

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE



SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences appliquées

Département de Génie Civil et Hydraulique

Mémoire fin d'études

MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et technologies

Filière: Travaux Publics

Spécialité: Voies et Ouvrages d'Art (V.O.A.)



Présenté Par :

- BENHAMMOUDA Roufaïda
- SAIDAT Nour Alhoda

Thème :

*Etude des Performances Mécaniques d'un Mélange Tuf- poudre de Déchets de Briques et sable de dunes Traité par la Soude caustique à Déférents PH*

Soutenu publiquement le:13/06/2023

Devant le jury composé de:

KEBAILI Nabil	MCA (UKM Ouargla)	Président
DJOUHRI Mohamed	MCB (UKM Ouargla)	Examineur
KHELLOU Abderrezak	MCB (UKM Ouargla)	Encadreur
BAIKER Mohamed Cherif	Doctorant (UKM Ouargla)	Co-Encadreur

Année Universitaire : 2022/2023

## إهداء

إلى سكان قلبي....

والى أُمي إلى ركيذتي و ذراعي اليمنى , المضحية التي ساندتني عندما كنت في أضعف حالاتي بكلماتها الطيبة التي زرعت بها البهجة في قلبي بحنينها ودعائها الخالص الصادق..

و إلى أبي رجل الكفاح الغير مبال بخسائره في سبيل نجاحي أنا و إخوتي الذي كان سبب في عونينا ...  
اللهم بارك لهما واطل في عمرهما و هون عليهما ولا تهن عليهم اللهم أرزقهم من حيث لا تحتسب .

إلى صديقاتي وأخواتي ,إلى أنقى القلوب التي لم تورقهم المصالح اللاتي تقاسمت معهم حلو و مر الدرب  
حفظكم الله من كل شر.

إلى نفسي التي آمنت بها لتحقيقي نجاحي والي قلبي الذي صبر على الاستمرارية في نجاحي ....  
اللهم عوضني في كل صبر وأعمال شاقة التي جعلت مني إنسانة أقوي والى أحلامي وطموحاتي التي كانت تحفزني إلى  
بدل قصارى جهدي لتحقيقها.

الحمد لله الذي أعانني على انتهاء رحلة من رحلات الحياة التي جعلتني إنسانة ثانية ذو ثقة بنفسها ومرحبا بداية رحلة  
جديدة التي اجعلها و اسأل الله فيها التوفيق...

وخير الأعمال خواتمها فنختم مجوداتي بصلاة على أطيب خلق الله محمد صلى الله عليه وسلم وندع

و الله أن يكتبها في ميزان حسناتي وأن سينتفع بيها غيري.

بن حمودة رفيدة



## إهداء

اهدي هذا العمل إلى والدي الأعزاء على كل تضحياتهم ودعمهم طول فترة دراستي

والي أصدقائي... وكذلك لمشرفنا على وجوده و مساعداته.

أخيرا أود أن اعبر عن خالص شكري لكل من ساهم في تطوير هذا العمل.



سعيدات نور الهدى

## ***REMERCIEMENT***

Tout d'abord nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné la force et la patience pour réaliser ce travail.

Ensuite, Il nous fait grand plaisir d'exprimer notre gratitude et nos sincères remerciements vont principalement à notre directeur de la recherche ***Mr : KHELLOU Abderrezak*** et ***Mr: BAIKER Mohamed cherif***, pour leur encadrement , nous le remercierons pour leur confiance à nos capacité, pour leur patiente ainsi que pour leur politesse et gentillesse .

Nous chaleureux remerciement vont à ***Mr : Ali KCHIRAD***, chef de labo mécanique du sol.

Nous tenons également à remercier l'équipe de Laboratoire étude et contrôle LEC Ouargla.

finalement, Nous remercions aux membres du jury qui ont bien voulu accepter d'évaluer notre travail.

## ***Liste des tableaux***

### ***Chapitre I : Synthèse bibliographique***

Tableau I-1: Synthèse des caractéristiques géotechnique et mécaniques des tufs d'encroûtement (Morsli, 2007).....	5
Tableau I - 2: Différents types des déchets .....	10

### ***Chapitre II : Caractérisations des matériaux utilisés***

Tableau II – 1: Résultats d'analyse chimique du tuf.....	18
Tableau II- 2 : Préparation d'échantillon.....	20
Tableau II- 3: Les résultats d'analyse granulométrique du tuf.....	20
Tableau II – 4: Les classifications des sols en fonction de VBS.....	21
Tableau II - 5: Les résultats d'essai CBR.....	24
Tableau II-6: Essai compression.....	25
Tableau II -7: Synthèse des résultats de caractérisation.....	26
Tableau II-8: Résultats d'analyse chimique de la poudre de (déchets de briques et sable de dunes) .....	27
Tableau II-9: Résultats Essai sédimentation de( Sable broyé et briques broyés).....	29

### ***Chapitre III: Évolution de la résistance à la compression et discussion***

Tableau III-1: Différentes formulations élaborées.....	32
Tableau III-2 : Modes de conservation des éprouvettes.....	33

## *Liste des figures*

### *Chapitre I : Synthèse bibliographique*

Figure I-1 : Formation d'encroûtements par évaporation.....	4
Figure I-2: La dune de Sahara algérienne.....	6
Figure I -3: Sable de dunes avant broyer .....	8
Figure I -4: Sable de dunes après broyer.....	8
Figure I -5: Poudre de déchets de briques .....	12
Figure I -6: Déchets de briques .....	12
Figure. I-7: Hydroxyde de sodium NaOH.....	13

### *Chapitre II : Caractérisations des matériaux utilisés*

Figure II-1:Echantillon du tuf utilisé.....	17
Figure II-2 : Opérateur d'Essai.....	19
Figure II - 3: Courbe granulométrique du tuf.....	20
Figure II-4 : Bleu méthylène.....	21
Figure II-5: Opérateur d'Essai.....	22
Figure II-6: Courbe Proctor modifié.....	22
Figure II-7: Etapes de essai CBR.....	32
Figure II- 8: La courbe de la CBR.....	24
Figure II-9: Critère de l'IPI pour la différente couche de la chaussée .....	24
Figure II-10: Etapes du essai compression simple.....	25
Figure II-11: Classification du tuf selon GTR92.....	26
Figure II-12: broyeur à lames.....	26
Figure II-13: Opérateur d'Essai.....	27
Figure II-14:Opérateur d'Essai.....	28
Figure II-15: Opérateur d'Essai de analyse granulométrique par sédimentation.....	28
Figure II -16:Résultats Essai sédimentation.....	30

### ***Chapitre III : Évolution de la résistance à la compression et discussion***

Figure III-1 : Presse d'écrasement pour mesurer la résistance à la compression simple.....	33
Figure III-2 : Evolution de la RC des mélanges non traité en mode1.....	34
Figure III-3 : Evolution de la RC non traité en mode2.....	34
Figure III-4 : Evolution de RC des MT1 en mode1.....	35
Figure III-5 : Evolution de RC de MT1 en mode2.....	35
Figure III-6 : Evolution de RC des MT2 en mode1.....	36
Figure III-7 : Evolution de RC de MT2 en mode2.....	36
Figure III-8 :La résistance à la compression des mélanges selon la solution de traitement en mode1.....	37
Figure III-9 :La résistance à la compression des mélanges selon la solution de traitement en mode2.....	37
Figure III-10 :La résistance à la compression des mélanges non traités selon les modes de conservation.....	38
Figure III-11 :La résistance à la compression des mélanges traités avec l'hydroxyde sodium de ph=9.55(MT1)selon les modes de conservation.....	39
Figure III-12: La résistance à la compression des mélanges traités avec l'hydroxyde sodium de ph=13.38 (MT2) selon les modes de conservation.....	39
Figure III-13:L'immersion des éprouvettes dans l'eau après 28 jour de conservation en mode1 et mode2.....	40

## ***Liste des abréviations***

**W<sub>opm</sub>** : Teneur en eau optimale Proctor modifié

**$\gamma_d$**  : Densité sèche optimale de l'essai Proctor modifié

**R<sub>c</sub>** : Résistance à la compression simple

**R<sub>t</sub>** : Résistance à la traction simple

**ICBR** : Indice Portant Californien (Californien Bearing Ratio)

**W** : Teneur en eau exprimée en %

**OPM** : Optimum Proctor modifié

**$\rho_a$**  : Masse volumique

**M** : La masse

**V** : Volume

## *Sommaire*

### *Chapitre I : Synthèse bibliographique*

Introduction générale.....	1
I.1.Généralités sur les tufs .....	3
I.1.1.Introduction.....	3
I.1.2. Définitions des tufs.....	3
I.1.3.Les type du tuf .....	3
I.1.4.Définition de gypse.....	4
I.1.5.Caractéristiques géotechniques et mécaniques des tufs d'encrouement .....	5
I.2. Généralités sur les sables .....	6
I.2.1. Introduction.....	6
I.2.3. Les classes de sables .....	6
I.2.4. Caractéristiques physicochimique .....	7
I.2.5. Les familles de sables .....	7
I.2.5.1.Les sables de dunes.....	7
I.2.5.1.1. Définition.....	7
I.2.5.1.2. Utilisation du sable de dunes en génie civil .....	8
I.3. Généralités sur la poudre de déchets de briques.....	9
I.3.1. Définitions des déchets .....	9
I.3.2.Déférents types des déchets .....	10
I.3.3.Déchets utilises en génie civil.....	11
I.4.Traitement des sols.....	12
I.4.1. Définitions du traitement de sol .....	12
I.4.2. Objectif du traitement de sol .....	12
I.4.3.Types de traitement de sol .....	12
I.4.3.1. Traitement par l'hydroxyde de sodium (Noah).....	12
I.4.3.2.Caractéristique l'hydroxyde de sodium .....	13

I.4.3.3. Domaine d'application du traitement par l'hydroxyde de sodium (Noah).....	14
I.5.Conclusion .....	14

## ***Chapitre II : Caractérisations des matériaux utilisés***

II.1.Introduction.....	17
II.2. Essais de caractérisation sur le tuf.....	17
II.2.1. Le tuf d'encroutement.....	17
II.2.2. Analyse Chimique.....	17
II.2.3. Essai masse volumique apparente.....	18
II.2.4.Masse volumique absolu.....	18
II.2.5. Analyse granulométrique.....	19
II.2.5. Essai au bleu méthylène.....	21
II.2.6. Essai Proctor modifié.....	21
II.2.7. Essai CBR.....	23
II.2.8. Compression simple.....	24
II.2.9. Classification des matériaux selon GTR 92.....	25
II.3. Essais de caractérisation sur la poudre de déchets de briques et la poudre du sable de dunes.....	26
II.3.1. Essai analyse chimique.....	27
II.3.2. Essai masse volumique apparente .....	27
II.3.3. Essai masse volumique absolue.....	27
II.3.4. Essai analyses granulométrique des sols par sédimentation.....	28
II.5. Conclusion.....	30

## ***Chapitre III : Évolution de la résistance à la compression et discussion***

III.1. Introduction.....	32
III.2. Méthodologie de l'étude expérimentale .....	32
III.2.1. Mode conservation des éprouvettes.....	33
III.2.2 La sensibilité à l'eau.....	33
III.3. Résultats et discussion.....	34

III.3.1.L'évolution de la résistance a la compression des mélanges non traite.....	34
III.3.2.L'évolution de la résistance a la compression des mélanges traite.....	35
A. L'évolution de la résistance a la compression de mt1 (ph=9.55).....	35
B. L'évolution de la résistance a la compression de mt1 (ph=13.38).....	36
III.3.3.L'effet de l'alcalinité sur la résistance a la compression des mélanges.....	37
III.3.4.L'effet du mode de conservation sur la résistance a la compression des mélanges.....	38
III.3.5. La sensibilité a l'eau.....	40
III.4.Conclusion .....	40
Conclusion général.....	41
Références bibliographiques.....	43

## الملخص:

هذه الدراسة تندرج في إطار تثمين المواد المحلية وإعادة تدوير النفايات الصناعية. حيث تهدف إلى تحسين الأداء الميكانيكي لمادة التيف ، لا سيما مقاومة الانضغاط، وكذا لحساسيته للماء عن طريق مزجها بمسحوق بقايا الأجور ومسحوق رمل الكثبان الرملية. الخلائط المعتمدة يتم معالجة بتركيزين مختلفين من محلول هيدروكسيد الصوديوم ( $PH = 9.55$  و  $PH = 13.38$ ). أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن العينات المحضرة من التيف المعالج بالصودا لدرجة حموضة 13.38 أظهرت أعلى مقاومة للانضغاط. بعد 28 يومًا من الحفظ.

**الكلمات المفتاحية:** التيف، مسحوق نفايات الطوب، رمل الكثبان، هيدروكسيد الصوديوم، المعالجة، مقاومة الانضغاط.

## Résumé:

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux et du recyclage des déchets industriels. Elle vise à améliorer les performances mécaniques d'un tuf, notamment sa résistance à la compression, ainsi que sa sensibilité à l'eau en le mélangeant avec de la poudre de déchets de briques et de la poudre de sable des dunes. Les mélanges adoptés sont traités avec deux concentrations différentes de solution d'hydroxyde de sodium ( $PH = 9,55$  et  $PH = 13,38$ ). Les résultats obtenus ont montré que les éprouvettes confectionnées à partir du tuf traité à la soude pour un  $PH 13,38$  présentent la résistance à la compression la plus élevée après 28 jours de conservation.

**Mots clés:** tuf d'encroûtement, poudre de déchets de briques, sable de dunes, hydroxyde de sodium, traitement, résistance à la compression.

## Abstract:

This study is part of the valorization of local materials and the recycling of industrial waste. It aims to improve the mechanical performance of a tuff, in particular its strength compressive strength, as well as its sensitivity to water by mixing it with waste brick powder and dune sand powder. The adopted mixtures are treated with two different concentrations of sodium hydroxide solution ( $PH = 9.55$  and  $PH = 13.38$ ). The results obtained showed that the specimens made from tuff treated with soda for a pH of 13.38 exhibited the highest simple compressive strength after 28 days of preservation.

**Keywords:** tuf crust, brick waste powder, dune sand, sodium hydroxide, treatment, compression strength.

## Introduction générale

Le développement des infrastructures routières à travers le monde, plus particulièrement en Algérie, a créé un besoin immense en matériaux de chaussées, qui doivent répondre rigoureusement à certains critères géotechniques tels que : la dureté, la propreté, la granulométrie, etc.

Toutefois, ces matériaux ne sont pas disponibles (rares ou mêmes inexistant) dans certaines régions (les zones arides et les zones semi-arides), ce qui rend l'approvisionnement par ces matériaux classiques difficiles et très coûteux à cause des distances de transport excessivement grandes et les moyens réduits. De là est né la nécessité d'utiliser les matériaux locaux qui ont prouvés leur efficacité par leur caractéristiques mécaniques convenables d'une part, et d'autre part leur coûts, parmi ces matériaux on trouve les tufs.

L'objectif principal de ce travail est d'améliorer certaines caractéristiques mécaniques des tufs gypseux largement utilisés dans la région sud-est de l'Algérie notamment à Ouargla, Touggourt et El-oued où ce matériau est de loin le plus utilisé dans les assises de chaussée (couche de base et couche de fondation).

La technique consistant à mélanger les matériaux disponibles ou à les traiter peut être une solution pour pallier ce problème.

Dans ce contexte, ce travail vient pour contribuer à l'amélioration des performances mécaniques, initialement médiocres, d'un tuf. Cela se fait en ajoutant la poudre de déchets de briques et sable de dune, en plus un traitement chimique par une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) à différents PH

Utilisation de déchets de briques comme ajout est imposée par la disponibilité de ce sous-produit industrielle, dont leur recyclage et leur valorisation est un second objectif de notre travail.

Ce mémoire comporte trois chapitres sont:

- ❖ Le premier chapitre donne un aperçu sur les tufs d'encroûtement ainsi que les procédé de traitements possible à utiliser.
- ❖ Le deuxième chapitre présente les résultats des essais de caractérisation, notamment ceux liés à certaines propriétés chimiques, physiques et mécaniques :
- ❖ Le troisième chapitre est consacré à l'interprétation des résultats obtenus.
- ❖ Enfin ; une conclusion générale est rédigée résumant l'essentiel du travail.

# ***CHAPITRE I: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE***

## **I.1.Généralités sur les tufs:**

### **I.1.Introduction:**

Au sud de l'Algérie, Les tufs d'encroûtement ou tout simplement les tufs font partie des matériaux disponibles en grande quantité. Ils sont largement utilisés en construction routière.

Vu leur particularité de durcir avec le temps après humidification, compactage et dessiccation.

Les études, relatives aux encroûtements, menées par les pédologues, géologues et géotechniciens remontent à plus d'un siècle. La définition donnée pour chaque type d'encroûtements et les hypothèses avancées pour expliquer la genèse de ces formations dépendent de la spécialité de l'auteur.[1]

Dans ce chapitre la définition des matériaux utilisés et le traitement chimique de ces matériaux.

### **I.1.2. Définitions des tufs:**

Dans la bibliographie, les tufs se définissent comme des roches, friables, poreuses, Légères et de couleur claire, elles datent du quaternaire, ces roches sont de constitution variable et résultent d'un certain nombre d'échanges par dissolution et précipitation. [2]

### **I.1.3.Les type du tuf :**

Les encroûtements se groupent en trois types :

#### ***A. Les encroûtements gypso calcaires :***

Les encroûtements calcaires sont la formation pédologique caractéristique des climats subhumide et semi-aride. Au-delà d'une certaine aridité, leur développement est arrêté à la source : insuffisance de précipitation pour dissoudre et drainer le calcaire vers les nappes phréatiques .En climat désertique, les encroûtements gypseux peuvent relayer les encroûtements calcaires. Inversement, lorsque l'on passe du climat désertique au climat semi-aride, le gypse devient instable dans les sols à cause de sa solubilité notable : Les encroûtements mixtes sont des formations de tufs calcaires gypsifiés à prédominance carbonatée ou de tufs gypseux calcifiés à prédominance sulfatée. [3]

Guétouche , explique la présence des formations calcaires au Nord Sahara, gypseuses plus au sud, dans les régions hyperarides et les gypso-calcaires dans les zones intermédiaires par la suite évaporation caractérisant résultant de l'évaporation d'une eau, chargée en différents minéraux : le carbonate de calcium précipite en premier sous forme d'aragonite

( $\text{CaCO}_3$ ), puis de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), puis la halite ( $\text{NaCl}$ ), et finalement les sels de potassium et de magnésium. [3]

Les matériaux gypso-calcaires ont été largement utilisés dans les chaussées du Sahara, en Algérie. D'après les règles énoncées par Fenzy, la teneur en gypse et calcite de ces matériaux doit dépasser une certaine valeur. Ainsi des sables gypso-calcaires ne doivent être utilisés en couche de base que si la teneur en gypse plus carbonates dépasse 70 %. [3]

#### **B. Les Encroûtements calcaires :**

De nombreuses définitions ont été données aux croûtes, et aux encroûtements calcaires, celles-ci diffèrent selon la spécialité de l'auteur (géologue, pédologue ou géotechnicien).

Parmi les définitions proposées, on peut retenir celles données par A.J.GOUDIE." La croûte calcaire est un matériau terrestre composé essentiellement, mais pas exclusivement de carbonates de calcium. Les croûtes existent à l'état poudreux. Nodulaire ou très induré; elles sont dues à la cimentation, à l'accumulation ou au remplacement de quantités plus ou moins grandes de sols, roches ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration ".[4]

#### **C. Les encroûtements gypseux :**

Dans les régions très arides, les croûtes gypseuses viennent souvent accompagner ou remplacer les croûtes calcaires. Elles sont le résultat soit de l'évaporation à partir d'une nappe phréatique ou d'une roche gypseuse, soit d'un apport éolien (le gypse, accumulé dans de grands lacs qui s'assèchent périodiquement, est repris par le vent qui peut l'entraîner et le redéposer très loin). Contrairement aux croûtes calcaires, la formation de ces croûtes gypseuses est souvent très rapide. [5]

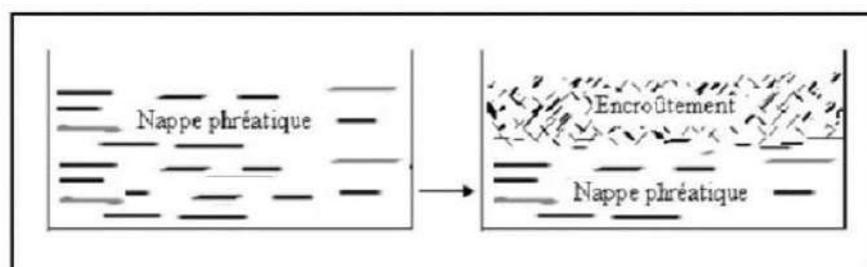


Figure I.1 : Formation d'encroûtements par évaporation. [23]

#### **I.1.4. Définition de gypse :**

Le gypse est un sulfate de calcium di-hydraté de formule chimique  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  est considéré comme le matériau de base de la fabrication industrielle des plâtres. [6]

- ❖ **Remarque :** Les couches les plus profondes de gypse peuvent perdre leur eau de cristallisation. On obtient alors une roche composée de sulfate de calcium non hydraté ( $\text{CaSO}_4$ ) appelé Anhydrite. [6]

### I.1.5. Caractéristiques géotechniques et mécaniques des tufs d'encroûtement :

À les résultats obtenus par les différents auteurs ayant réalisé des essais de laboratoire sur tuf d'encroûtement, montrent une grande dispersion dans les caractéristiques géotechniques de ces matériaux. Néanmoins, les fourchettes de variation (tableau I-1) sont établies en fonction de la nature chimiques du tufs.

Tableau I-1: Synthèse des caractéristiques géotechnique et mécaniques des tufs d'encroûtement (Morsli ,2007)

	Encroûtement	Calcaire	Gypso-calcaire	Gypseux
Taux de Gypse et de calcaire	Calcaire	50à95%	10à50%	Moins de 10%
	Gypse	Moins de 10%	10à50%	40à90%
	Gypse+calcaire	Plusde50%	Plusde50%	Plusde50%
Granulométrie		Très variable	Variable	Matériauxfi nà pulvé ulent
Limité d'Atterberg		Non mesurable <I <sub>p</sub> <25	Ordre de 13%	Ordre de 6%
Equivalent de Sable		10à60%	>40%	Sans signification
Essai Proctor	Densité sèche	1.7<γ <sub>d</sub> <2	1.7<γ <sub>d</sub> <2	1.60<γ <sub>d</sub> <1.90
	Teneur en eau optimale	8%<W <sub>opm</sub> <20 %	8%<W <sub>opm</sub> < 20%	8%<W <sub>opm</sub> < 20%
Essai CBR	Immédiat	50à100%	50à100%	Jusqu'à 112avec Une moye ne de40
	Imbibé	30à100%	20à40%	Peut chuter jusqu'à8
Essai de compression simple(MPa)		0,3à5	1à6	Entre0,3et5 MPa

## I.2. Généralités sur les sables :

### I.2.1. Introduction:

Le terme sable est généralement utilisé pour désigner un mélange de grains meuble n'ayant aucune cohésion et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0,062 et 5 mm. Du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux aspects : un aspect granulométrique (taille des grains) et un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains). Une particule individuelle est appelée grain de sable. [7]

### I .2.2. Définitions de sable :

Le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0.063 (limon) et 2 mm (gravier) selon la définition des matériaux granulaires en géologie. Sa composition peut révéler jusqu'à 180 minéraux différents (quartz, micas, feldspaths) ainsi que des débris calcaire de coquillage et de corail. [8]

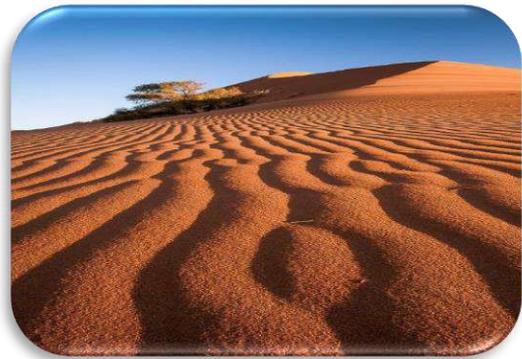


Figure I - 2: la dune de Sahara algérienne.

### I.2.3. Les classes de sables :

On peut classer les sables selon trois paramètres dont: [9]

**A. La granularité:** permet de séparer les sable en trois catégories sont:

- ❖ Sables fins.
- ❖ Sables moyens.
- ❖ Sables grossiers.

**B. La propreté et la teneur en fines :** elle est appréciée par la valeur de l'équivalent de sable.

**C. La nature minéralogique:** En général, les sables peuvent être classés comme suit:

- ❖ Sables siliceux.
- ❖ Sables silico-calcaires.
- ❖ Sables calcaires.

#### **I .2.4. Caractéristiques physicochimique :**

Les sables sont identifiés grâce à la granulométrie (la grosseur des grains). Le sable se caractérise par sa capacité à s'écouler. Plus les grains sont ronds, plus le sable s'écoule facilement. Le sable artificiel, obtenu par découpage ou broyage mécanique de roches, est principalement composé de grains aux aspérités marquées. On peut également différencier un sable qui a été transporté par le vent d'un sable transporté par l'eau. Le premier est de forme plus ronde, sphérique, alors que le deuxième est plus ovoïde. De plus, le sable éolien présente une diaphanéité plus mate que le sable fluviatile ou marin qui est dit "émoussé-luisant". L'aspect de la surface du grain de sable éolien est dû aux multiples impacts que subit le sable lors de son déplacement. [8]

Le sable est souvent le produit de la décomposition du micaschiste du fait de l'érosion. Ainsi, le plus fréquent de ses composants est le quartz, constituant le moins altérable du granite, ainsi que des micas et feldspaths. Un sable issu d'une roche volcanique est plutôt noir tandis qu'un sable marin s'enrichit de débris de coquillages. Il peut avoir plusieurs couleurs en fonction de sa nature : noir ou blanc Le sable peut aussi prendre d'autres formes : arène, grès. Les grains de sable sont assez légers pour être transportés par le vent et l'eau. Ils s'accumulent alors pour former des plages, des dunes. Un vent violent qui se charge en sable est une « tempête de sable ». Les grains les plus lourds se déposent en premier dans les milieux à forte énergie (rivière, haut d'une plage), les plus fins dans les milieux à énergie plus faible (delta, lac, bassin, crique). La masse volumique du sable sec varie, selon sa granulométrie et sa composition, de 1,7 à 1,9 kg/l (en moyenne 1 850 kg/m<sup>3</sup>). [8]

#### **I.2.5. Les familles de sables :**

On distingue Trois familles: [9]

- ❖ Les sables roulés siliceux (0 /2)
- ❖ Les sables de concassage calcaires
- ❖ Le sable de dune

#### **I .2.5.1.Les sables de dunes:**

##### **I .2.5.1.1. Définition:**

Le sable est un produit vient par la désagrégation lente des roches sous l'action des agents d'érosion tels que l'air, la pluie etc. Les déserts de sable, ou ergs ,se localisent dans les vastes cuvettes d'épandage ou des puissantes accumulations alluviales se sont concentrées par de grands écoulements liés aux périodes pluviales du début du quaternaire.

Le grand erg coïncident avec des zones où des vents saisonniers de directions variées se compensent, dans notre cas on a pris notre échantillon d'ergs de la commune de **SIDI KHOULED**.



Figure I - 3: sable de dunes avant broyer .



Figure I - 4: sable de dunes après broyer.

### **I .2..1.2. Utilisation du sable de dunes en génie civil :**

#### ***A. diverses utilisations :***

Les sables sont un élément essentiel du processus sédimentaire et représentent une ressource très importante du point de vue économique: remblais, granulats pour béton, matériaux de construction, sables siliceux pour l'industrie. Ces derniers (appelés autrefois sables industriels) constituent l'essentiel de la matière première de l'industrie du verre, des moules, des noyaux de fonderie; ils entrent aussi dans la fabrication des céramiques et des mortiers spéciaux.

Le sable est aussi le milieu naturel où s'accumulent les minéraux lourds alluvionnaires; ces concentrations minéralisées sableuses sont dénommées placers (un mot espagnol) et l'on y extrait de l'or, des diamants, de la cassitérite (minerai d'étain), de la magnétite (oxyde de fer), de l'ilménite (oxyde de titane et de fer), etc.

Les placers d'ilménite, ou «sables noirs», sont importants économiquement pour la fabrication des pigments de la peinture blanche (gisements côtiers en Australie) et comme source du titane métal.

Les sables jouent également un grand rôle comme réservoirs potentiels pour les nappes d'eau (aquifères) ou les hydrocarbures. Il importe que l'exploitation du sable, souvent anarchique, soit réglementée pour éviter de perturber de fragiles équilibres naturels: érosion des plages dont l'alimentation naturelle en sable a été coupée; destruction à terre de la nappe phréatique, etc. [9]

### ***B. Utilisation du sable de dunes dans le béton:***

Le sable de dunes était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblayage des fouilles de fondations et les travaux routiers, mais l'utilisation comme constituant principal du béton n'apparaît qu'après la naissance du béton de sable en 1853 par F.COIGNET (Rapport général et conclusion de 23e congrès mondial de la route). Cette naissance a donné le courage de commencer une nouvelle investigation qui a étudié la possibilité d'utiliser le sable de dunes comme un constituant principal dans les structures des ouvrages en génie civil; pour cette raison plusieurs actions de recherches, soit en Algérie ou à l'étranger, ont été engagées et hypothéquées.

### ***C. Utilisation du sable de dunes dans le domaine routier :***

L'utilisation des sables en techniques routières n'est pas nouvelle. A l'époque déjà, les ingénieurs avaient recours à l'utilisation du sable mélangé à un liant hydrocarboné en particulier pour les couches de roulement. [7].

## **I.3. Généralités sur la poudre de déchets de briques :**

### **I.3.1. Définitions des déchets :**

Les déchets sont définis dans le Code de l'environnement à l'article L 541-1-1. Il s'agit de « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire « NOTE 1 ». Toute la réglementation applicable aux déchets découle de cette définition. Elle détermine la frontière entre les déchets et les produits, qu'il est nécessaire de connaître avant toute cession à un tiers, un transport ou un transfert. [10].

Selon l'article n°3 de la loi Algérienne n° 01-19 du 12 décembre 2001, " tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance, ou produit et tout bien meuble dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer. [11].

### I .3.2.Déférents types des déchets :

Tableau I - 2: Différents types des déchets [12].

Type des déchets	Définition
Déchets ménagers	Tous déchets issus des activités des ménages ainsi que les déchets analogues provenant des activités industrielles ;commerciales ;artisanales ou autres.
Déchets industriels	Tous déchets non ménagers résultant d'une activité industrielle ,minière ou artisanale ou similaire
Déchets agricoles	Tous déchets organiques génères directement par des activités agricoles, agro-industrielles ou par l'élevage.
Déchets biodégradables	Tous déchets pouvant subir une décomposition biologique naturelle anaérobique, comme les déchets alimentaires, les déchets de jardins ainsi que le papier et le carton.
Déchets médicaux	Tous déchets issus des activités de diagnostic , de suivi et de traitement préventif ,curatif ou palliatif dans le domaine de la médecine humaine ou vétérinaire ,des hôpitaux publics ,des cliniques et des cabinets privés, de la recherche ,scientifique ou de laboratoires d'analyses opérant dans ces domaines
Déchets dangereux	Tous déchets qui par leurs constituants ou par les caractéristiques des matières nocives qu'ils contiennent sont susceptibles de nuire a' la collectivité ou a' l'environnement et dont la liste fixée par voie règlementaire.
Déchets assimilés aux déchets ménagers	Tous résidus résultant ou non du traitement d' un déchet ,qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment ,notamment par extraction de la part valorisables ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.
Déchets ultimes	Tous résidus résultant ou non du traitement d'un déchet ,qui n'est plus susceptible d'être traite dans les conditions techniques et économiques du moment ,notamment par extraction de la part valorisables ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux.

Déchets inertes

Tous déchets provenant de l'exploitation des carrières , des mines , des travaux de démolition ,de construction ou de rénovation et qui ne sont pas constitués ou contaminés par des nuisances.ces déchets ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune autre réaction physique ou chimique .ils ne sont pas biodégradables et ne se détériorent pas avec les autres matières avec lesquelles ils entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner la pollution de l'environnement ou de nuire à la santé publique.

### I .3.3.Déchets utilisés en génie civil:

Les déchets du bâtiment et travaux publics BTP résultent, majoritairement des chantiers de construction, de réhabilitation et de déconstruction. Ils sont composés à 90% de déchets inertes, le reste étant des déchets non dangereux, et des déchets dangereux. Issus de la fin de vie de produits naturels (pierres, terres, sables) ou de produits manufacturés (béton, brique, céramique, verre), les déchets inertes sont des déchets non polluants, chimiquement stables dans le temps et donc théoriquement neutres pour l'environnement, toutefois, le transport et le stockage de ces déchets ont un impact significatif en terme d'émission de CO2 et d'utilisation des sols. Afin de limiter ces impacts, et devant les besoins croissants des ressources en matériaux et aux exigences et conditions de préservation de l'environnement, dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de valorisation des déchets inertes et sous-produits industriels notamment dans le domaine des travaux publics. [13]

On distingue trois catégories principales de déchets. Dans utilisés en génie civil sont définis dans le tableau ci-dessus :

**A. Déchets inertes:** Parmi les déchets inertes produits par le secteur du bâtiment on trouve

- .A.1.Béton.
- A.2. Briques.
- .A.3. Parpaings.
- .A.4. Tuiles et céramiques.
- A.5.et granulats non pollués et sans mélange.

**B. Déchets ménagers.**

**C. Déchets dangereux.**



Figure I - 5: Poudre de déchets de briques



Figure I - 6: Déchets de briques

## **I .4.Traitement des sols:**

### **I.4.1. Définitions du traitement de sol :**

Le traitement de sol est une technique économique qui permet de rendre apte à l'usage des matériaux qui ne l'étaient pas.

La technique s'inscrit ainsi dans la démarche environnementale du Développement Durable en préservant les ressources naturelles des produits de carrières, et en valorisant les matériaux du site par leur réutilisation. Pas de transport de matériaux, ni de dépôt, donc diminution du coût !

En effet la technique du traitement est une solution aux problèmes de dépôts et d'emprunts, et participe à l'optimisation du mouvement des terres. [14]

### **I.4.2. Objectif du traitement de sol :**

Le traitement de sol permet d'améliorer les performances mécaniques (portance), baisser la sensibilité à l'eau et au gel (protection), homogénéiser et valoriser les matériaux. [14]

### **I.4.3.Types de traitement de sol : [15]**

1. Traitement mécaniques.
2. Traitement hydromécaniques.
3. Traitement Thermiques.
4. Traitement chimiques.
5. Traitement par L'hydroxyde de sodium (Noah).

#### **I .4.3.1. Traitement par l'hydroxyde de sodium (Noah):**

L'hydroxyde de sodium est un composé minéral de formule chimique Noah qui est fourni sous forme de pastilles solides de masse molaire 39,99g/mol. Il est soluble dans l'eau à 20°C et permet d'hydrater les précurseurs pour activer des réactions de géo polymérisation. C'est pourquoi il est qualifié d'activateur alcalin. [10]



Figure. I.7 : Hydroxyde de sodium NaOH.

#### **I.4.3.2.Caractéristique l'hydroxyde de sodium :[17]**

- Point de fusion: 318-324 °C.
- Densité relative à 20°C: 2.02 -2.13. Complètement soluble dans l'eau et les alcools.
- Sulfates (SO<sub>4</sub>): 30ppm.
- Métaux lourds (Ag): 20ppm. Nickel (Ni): 2ppm.
- Grandeur de particule entre 1-2mm : 85%

##### **A. A propriétés physiques:**

L'hydroxyde de sodium est un solide blanc, inodore, très hygroscopique, déliquescent.

26Les principales impuretés sont le chlorure de sodium (<2%), le carbonate de sodium (≤ 1,0%) et le sulfate de sodium (≤0,2%).

L'hydroxyde de sodium est miscible à l'eau en toutes proportions mais il se solidifie à 20°C si la concentration dépasse 52 % en poids. Cette valeur est considérée comme la solubilité maximale dans l'eau à 20 °C.

L'hydroxyde de sodium est très soluble dans les alcools tels que méthanol, alcool absolu, glycérol. Il est insoluble dans l'acétone et l'éther éthylique.

Dans le commerce, l'hydroxyde de sodium est livré soit sous forme solide (blocs, écailles, grains, perles, poudre), soit sous forme de solutions aqueuses à diverses concentrations.[17]

##### **B. Propriétés chimiques :**

L'hydroxyde de sodium est un produit très hygroscopique qui absorbe rapidement l'humidité de l'air et, en même temps, fixe le dioxyde de carbone avec lequel il forme du carbonate de sodium.

La dissolution de l'hydroxyde de sodium dans l'eau s'accompagne d'une libération très importante de chaleur, la réaction peut être violente.

Les solutions aqueuses libèrent également de la chaleur lorsqu'elles sont diluées : une solution à 40% ou plus d'hydroxyde de sodium génère, lors de sa dilution dans l'eau, une grande quantité de chaleur portant la température au-delà du point d'ébullition, ce qui peut conduire à des projections sporadiques et incontrôlées de liquide corrosif.

L'hydroxyde de sodium est une base forte dont les solutions aqueuses, très alcalines, réagissent vigoureusement avec les acides.

#### **I.4.3.3. Domaine d'application du traitement par l'hydroxyde de sodium (Noah):**

Il est utilisé comme additif pour lier les matériaux routiers afin d'améliorer leurs performances mécaniques. Le traitement à la soude caustique, en particulier, convient à la phase de réponse rapide en raison de son temps de traitement court et de sa facilité d'utilisation.

L'hydroxyde de sodium est utilisé dans des domaines industriels variés :

- ❖ Fabrication de composés minéraux et organiques.
- ❖ Industrie de la pâte à papier et du papier (production, blanchiment, traitements des eaux...).
- ❖ Industrie métallurgique, industrie de l'aluminium (production de l'aluminium et autres métaux à partir des minerais, traitements de surface)
- ❖ Industrie alimentaire (nettoyage des bouteilles, matériels et équipements, épluchage chimique, additif alimentaire E524);
- ❖ Traitement de l'eau (régulation du pH, régénération des résines échangeuses d'ions, élimination des métaux lourds);
- ❖ Industrie textile (traitement et fabrication de textiles cellulosiques), Laboratoire d'analyse (réactif pour tests):

L'utilisation de l'hydroxyde de sodium est un type de traitement chimique caractérisé par son efficacité et ses faibles coûts appliqués aux boues d'épuration dans les trancheuses à fosse. Il est également utilisé comme lessive alcaline (hydroxyde de sodium: Noah) comme additif pour améliorer la réaction entre les matériaux routier. [17]

### **I .5.Conclusion :**

La valorisation des matériaux locaux et du recyclage des déchets industriels destinés à la construction routière, est un sujet d'étude important dans le domaine des travaux publics.

Par cette recherche, nous touché tous les types des encroutements (tufs et déchets de brique et sable de dune et Noah) utilisé dans le domaine de la construction de routes en région aride et semi- aride nous avons touché pour améliorer la résistance du tuf.

# *Chapitre II : Caractérisations des matériaux utilisés*

## II.1. Introduction :

Avant de commencer toute étude expérimentale, L'identification des matériaux utilisés est plus que nécessaire. Ce chapitre présente les résultats d'essais de caractérisation, notamment ceux concernant certaines propriétés chimiques, physiques et mécaniques.

## II.2. Essais de caractérisation sur le tuf :

### II.2.1. Le tuf d'encroûtement :

Le tuf d'encroûtement objet de la présente d'étude est extrait de la région d'Ouargla (Ruwaisat) . Avant son utilisation , il est dessèche dans un en droit en soleillé pendant quelques jours(Figure II-1)afin d'éliminer toute humidité.

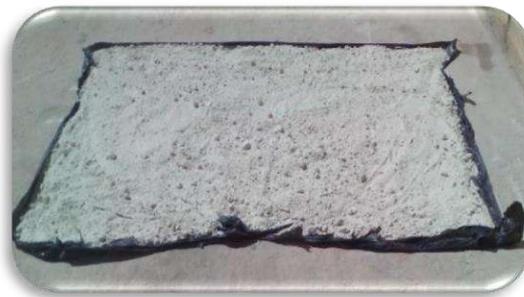


Figure II-1:échantillon du tuf utilisé.

### II.2.2. Analyse Chimique :

Analyse chimique réalisée se focalise sur la détermination le taux d'insolubles (quartz principalement), le taux sulfate, le taux de carbonates et la teneur en sels. Elle est effectuée sur la base des normes NF P15-461.

On note que les essais de détermination du taux de carbonates et de sulfates sont réalisés sur la fraction granulométrie inférieure à 1 mm

#### *A. Détermination du taux de carbonates :*

L'essai de détermination du taux de carbonate est effectué suivant la norme NF P 15-461 Mai 1964. On applique sur l'échantillon de sol un excès d'acide chlorhydrique et l'excès est dosé en retour par une solution d'hydroxyde de sodium, d'où on détermine exactement le taux de carbonate existant dans le sol. b). [18].

#### *B. Détermination du taux de sulfates :*

L'essai est réalisé à la base de la norme BS 1377 Déc. 1990, le taux de sulfate dans un sol est déterminé par la méthode gravimétrique selon laquelle on ajoute du chlorure de baryum à l'eau ou l'extrait acide de sol, puis on assèche et on pèse le précipité de sulfate de baryum. On calcul alors le taux à partir de la masse du matériau utilisé dans l'analyse et de la masse de sulfates de baryum précipité. [18].

### C. Détermination du taux d'insolubles :

Les insolubles sont les silicates (en particulier le quartz : principal composant du sable) corps insolubles dans l'acide chlorhydrique. L'essai de détermination du taux d'insolubles est effectué suivant la norme NF P 15- 461 Mais 1964. Une masse de 2g d'échantillon est additionnées à une quantité d'acide chlorhydrique, après chauffage et filtration de la liqueur, on rajoute une solution de carbonate de sodium, ont bouillie l'ensemble, et après filtration, on procède à un double lavage avec l'HCl et l'eau distillée, et enfin, on calcine le filtre avec son contenu et on pèse. Le résultat de ces deux types d'analyse permet de classer le matériau du point de vue granulométrique c.à.d. dire si c'est un matériau caillouteux, graveleux, sableux à granulométrie grossière, moyenne ou fine. Aussi, il permet de donner les taux de sable contenu, de gypse, et de carbonates, ainsi, on pourra dire que ce matériau est un sable gypseux, ou c'est un sable calcaire, ou c'est un sable gypso-calcaire. [18].

L'analyse chimique (Tableau II-1) réalisée au laboratoire d'études et de contrôle LEC d'Ouargla, illustre la nature gypseuse du matériau objet d'étude, et cela vu de la dominance du taux de sulfates de calcium qui dépasse les 75%.

Tableau II – 1: Résultats d'analyse chimique du tuf.

			Sulfates (%)		
CaCo3(%)	Insoluble (%)	Cl- (mg)	CaSO42H2O (%)	So3--(%)	So4--(mg/l)
9.69	9.92	0.051	75.5	35.04	4205

### II.2.3. Essai masse volumique apparente :

L'essai est réalisé selon la norme NF P 94-053, il a pour objectif de déterminer la masse volumique apparente d'un échantillon prélevé sur site, la masse volumique des sols est un paramètre d'état.

L'essai de détermination de la masse volumique apparente effectué sur le matériaux permet d'obtenir une valeur de  $\gamma_{ap}=1.03 \text{ g/cm}^3$ .

### II.2.4.Masse volumique absolu :

La masse volumique absolue  $\rho_a$  est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains .

✓ La masse spécifique est la masse de granulats secs ( $M_s$ ) rapportée au volume absolu (uniquement volume de solides  $Y_s$ ).

- ✓ La mesure du volume des solides ne tient pas compte des pores fermés contenus par le granulat.
- ✓ La masse volumique absolue  $\gamma_d=1,56 \text{ T/m}^3$ .

### II.2.5. Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique d'un sol consiste à déterminer la proportion des diverses classes de grosseur des particules. Il n'existe pas de méthode parfaite pour déterminer la granulométrie ; l'exactitude de la méthode dépend de la nature du sol et, plus précisément, de la forme géométrique des particules et du pourcentage des matières organiques qu'elles renferment. [19].

L'analyse granulométrique selon NF P 94-056 a pour but de déterminer par tamisage (si l'échantillon est supérieur à 0,08mm) et par sédiment métrie (si l'échantillon est inférieur à 0,08mm) la grosseur et les pourcentages des granulats dans un matériau afin de pouvoir classer le sol. Un granulat est un ensemble de grains minéraux de diamètres compris entre 0 et 50 mm, destinés à la confection des mortiers, bétons, couches de fondation, de base ou de roulement des chaussées. [20].

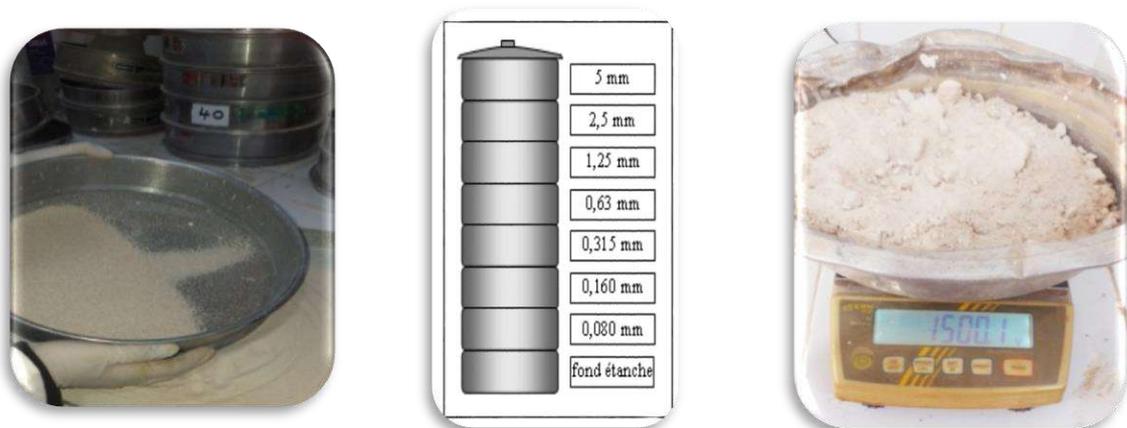


Figure II-2 : Opérateur d'Essai.

- ❖ Le tableau ci-dessous contient Les résultats d'analyse granulométrique du matériau objet d'étude.

Tableau II- 2: Préparation d'échantillon.

Préparation d'échantillon	
Poids total avant lavage	1500
Poids Total après lavage	1266.7
Température de séchage	c65°

Tableau II- 3: Les résultats d'analyse granulométrique du tuf.

tamis (mm)	poids (gr)	poids cumulee (gr)	% de Refuse	% de tamis
100	0	0	0.00	100
50	0	0	0.00	100
40	0	0	0.00	100
31.5	0	0	0.00	100
25	9.7	9.7	0.65	99
20	15.3	25	1.67	98
16	42	67	4.47	96
12.5	20	87	5.80	94
10	29.1	116.1	7.74	92
5	63.4	179.5	11.97	88
2	83	262.5	17.50	83
1	64.6	327.1	21.81	78
0.4	183.5	510.6	34.04	66
0.2	232.6	743.2	49.55	50
0.08	393.4	1136.6	75.77	24

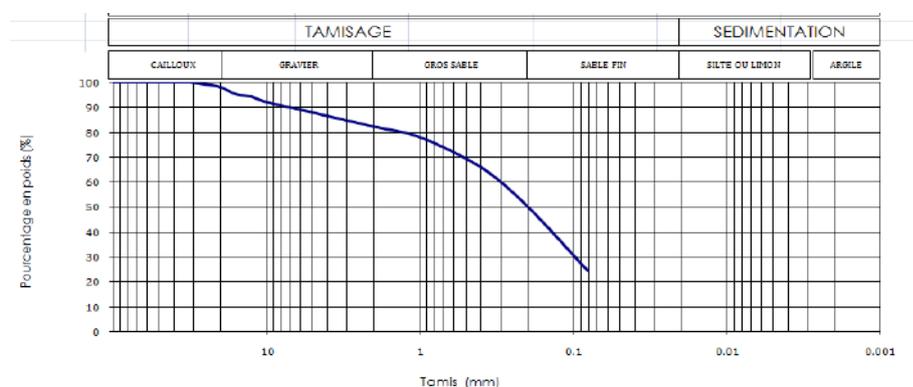


Figure II - 3: Courbe granulométrique du tuf.

- ✓ D'après la courbe, nous remarquons que le pourcentage d'éléments inférieurs à 0,08 est de l'ordre de 24%.

### II.2.5. Essai au bleu méthylène :

L'essai au bleu de méthylène, également appelé « essai au bleu », est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. [21].

L'essai au bleu de méthylène Selon NF P 94-068 a pour but Déterminer la valeur de bleu de méthylène d'un sol et l'activité de la fraction argileuse.



Figure II – 4 :Bleu méthylène.

- ❖ Pour c'est essai, volume de bleu méthylène absorbé par les particules du tuf est de l'ordre de 15 ml, c'est qui permet d'obtenir une valeur de bleu méthylène (VBS) est **égale 0.5**.
- ❖ Si en se basant uniquement sur la valeur bleu méthylène (Tableau II-4), le tuf peut rangé dans aux sols limoneux.

Tableau II – 4: Les classifications des sols en fonction de VBS.

$VBS \leq 0.2$	Sols Sableux
$0.2 \leq VBS \leq 2.5$	Sols Limoneux
$2.5 \leq VBS \leq 6$	Sols Limono-argileux
$6 \leq VBS \leq 8$	Sols argileux
$VBS > 8$	Sols très argileux

### II.2.6. Essai Proctor modifié :

C'est à l'ingénieur américain PROCTOR que l'on doit les premières études systématiques en ce domaine. Il a, en particulier, examiné en 1933, l'influence de la teneur en eau et celle de l'énergie de compactage sur la portance d'un sol. [17].

Si l'on fait varier la teneur en eau (**W**) d'un échantillon de sol donné, et que l'on représente graphiquement la variation de la densité sèche ( $\gamma_d$ ) en fonction de (**W**), on obtient une courbe en cloche qui représente un point haut que l'on appelle Optimum Proctor. [22].

L'objectif principal de cet essai selon la norme NF P 94-093, déterminer la teneur en eau optimale conduisant à une force portante maximale pour un sol donné, selon des conditions de compactage précises.

Le principe de cet essai consiste à compacter des échantillons de sol dans un moule normalisé, en adoptant diverses valeurs de teneur en eau. Pour chaque essai, on détermine la masse volumique sèche. Puis les résultats sont portés sur un graphique et la courbe joignant au mieux les points obtenus passe par un maximum qui correspond à l'Optimum Proctor.



Figure II -5: Opérateur d'Essai.

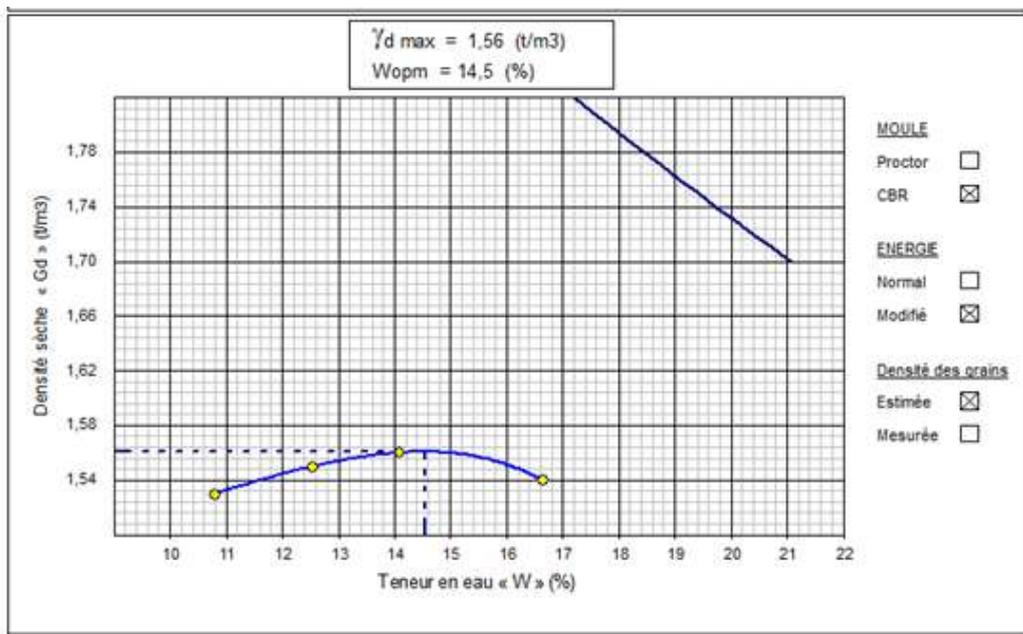


Figure II - 6: Courbe Proctor modifié.

- ❖ A partir de la courbe précédente, on trouve a la une teneur en eau optimale égale à 14,50%. Et la densité sèche maximale est de l'ordre de 1,56 g /cm<sup>3</sup>.

### II.2.7. Essai CBR :

Cet essai selon la norme NF P 94-093, a été développé en 1929 par les ingénieurs T.E Stanton et O.J. Porter du département des routes de Californie. Il permet la classification d'un sol pour être utilisé comme sous-fondation et fondation dans la construction de routes.

Pendant la deuxième guerre mondiale, le corps des ingénieurs des Etats Unis l'ont également adopté pour la construction des aéroports. [23].

- ❖ L'expérience CBR est utilisée pour à déterminer l'indice CBR après immersion (I.CBR immersion) et l'indice portant immédiat (IPI).
- ❖ Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante (1,27 mm/min) dans une éprouvette de matériau. Durant l'essai, la courbe effort-déformation est établie sur l'anneau dynamométrique.

La force nécessaire aux enfoncements de 1,25 mm ; 2 mm ; 2,5 mm ; 5 mm ; 7,5 mm et 10 mm. [19].

L'expression qui définit le CBR avec deux indices est la suivante :

$$\frac{\text{Effort \u00e9n\u00e9tration \u00e0 2,5mm d'nfoncement (enKN)}}{13,35} \times 100$$

$$\frac{\text{Effort de p\u00e9n\u00e9tration \u00e0 2,5mm d'nfoncement (enKN)}}{19,93} \times 100$$



Figure II – 7:Etapes de essai CBR

Tableau II - 5: Les résultats d'essai CBR

Temps	Enfoncement en (mm)	Force		Pression Kg/Cm <sup>2</sup>
		lecture	Valeur	
0'	0	0	0	0.000
30"	0.625	58	0.35	6.206
1'	1.25	100	0.57	10.700
1' 40"	2	155	0.99	16.585
2'	2.5	180	3.45	19.261
4'	5	340	6.48	36.381
6'	7.5	460	7.20	49.221
8'	10	540	9.25	57.782
10'	12.5	615	11.24	65.807

Calcul de l'indice Portant	
A 2,5mm : $P(2,5)/0,70=$	24.88
A 5mm : $P(5) / 1,05 =$	32.11
Indice CBR =	<b>32.11</b>

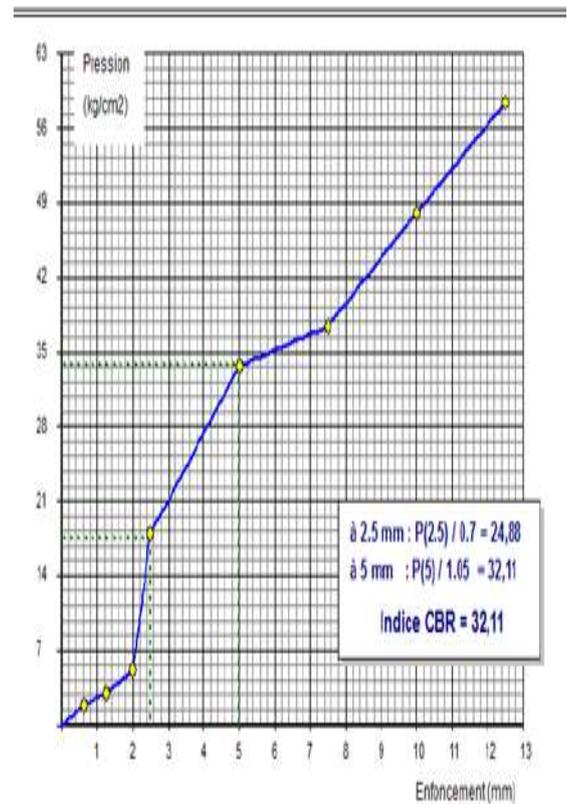


Figure II - 8: La courbe de la CBR

❖ D'après l'essai de CBR on conclut que l'IPI est d'ordre de **32%** .



Figure II-9 : Critère de l'IPI pour la différente couche de la chaussée. [NF P 98 115]

### II.2.8. Compression simple :

C'est un essai empirique, introduit pour les matériaux locaux pour la première fois par FENZY (1957), il est réalisé sur tous les matériaux sahariens sur la fraction 5 mm.

Le compactage à l'OPM est effectuées à la presse et les éprouvettes démoulées (5 cm de diamètre et de 10 cm de hauteur) sont séchées, soit à l'étuve à 65°C pendant 24h, ou bien conservées à l'air libre. [23]



Figure II -10: Etapes du essai compression simple.

❖ Écrasées à l'aide d'une presse à une vitesse de 1,27 mm/min.

Tableau II-6: Essai compression.

% De compactage	N° épr	Teneur en eau au moment de l'essai			Masse volumiq ue sèche	Lecture	Force en (KN)	Résistance en (bar)	Moyenne des résistances en (bar)
		Poids Hum en (g)	Poids Sec (g)	Teneur en eau %					
100	1	349.60	299.90	16.57	1.53	47	0.9875	5.03	5
	2	344.50	298.30	16.49	1.52	50	1.0505	5.35	
98	1	342.50	298.30	16.66	1.50	38	0.7984	4.07	4
	2	341.90	293.40	16.53	1.49	37	0.7774	3.96	
95	1	332.20	285.40	16.40	1.45	31	0.6513	3.32	3
	2	332.20	285.00	16.56	1.45	27	0.5673	2.89	

### II.2.9. Classification des matériaux selon GTR 92:

L'utilisation des terres en remblai est d'abord directement liée à leur classification et à leur comportement lors de leur mise en place. Le GTR 92 (Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme, LCPC, SETRA, 1992) et la norme qui en découle NF- P 11-300 (septembre 1992) proposent une classification des matériaux utilisables

dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières. Ils permettent de définir la classe du matériau à partir des résultats de plusieurs types d'essais.

Tableau II -7: synthèse des résultats de caractérisation.

Caractéristique	Valeur
La masse volumique apparente(g/cm <sup>3</sup> )	1.03
Diamètre maximal(mm)	50
Éléments< 0.08 mm	24%
Éléments< 2 mm	83
La densité sèche maximale	1.56
La teneur en eau optimale(%)	14.5
Indice portant immédiat (IPI)	32.11
VBS	0.5
2-	35.04
SO <sub>3</sub> (%)	9.92
Insolubles(%)	4205
2-	4205
SO <sub>4</sub> (%)	75.5
CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O(%)	9.69
CaCO <sub>3</sub> (%)	0.051
Cl(%)	

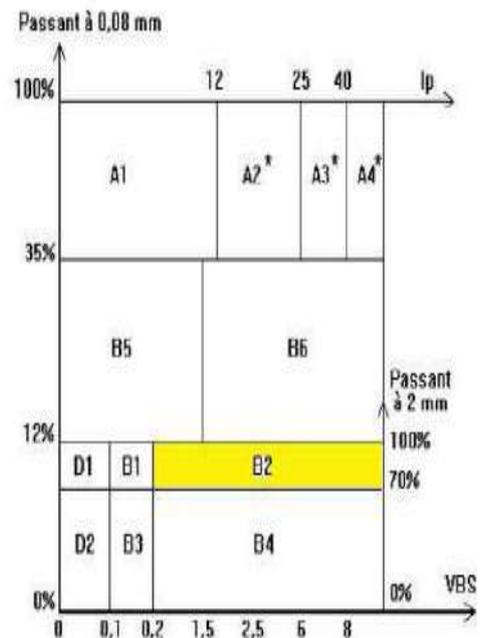


Figure II-11 : Classification du tuf selon GTR92.

### II.3. Essais de caractérisation sur la poudre de déchets de briques et la poudre du sable de dunes :

Dans cette étude , ces déchets de brique et sable de dune sont exploités sous forme de poudre obtenues après broyage et tamisage autamis80mm.



Figure II-12: Broyeur à lames.

### II.3.1. Analyse chimique :

Tableau II - 8 : Résultats d'analyse chimique de la poudre de (briques et sable).

		Sulfates (%)					
		CaCo3	Insoluble(%)	Cl- (mg)	CaSO42H2O(%)	So3-- (%)	So4-- (mg/l)
déchets de briques broyé		0.94	77.17	0.009	5.91	2.74	329.24
Sable de dunes broyé		2.47	89.5	0.054	6.92	3.21	385.21

### II.3.2. Essai masse volumique apparente :

- ✓ Le mode opératoire de cet essai comme suit :
- ✓ Verser dans le récipient la poudre de déchets de briques secs, par couches successives et sans tassement (utiliser l'entonnoir ou les mains). Araser à l'aide de la règle métallique.
- ✓ Peser le récipient rempli : noter (M).
- ✓ Calculer la masse volumique apparente :  $\rho_a = M/V$
- ✓ Refaire la mesure 3 fois.

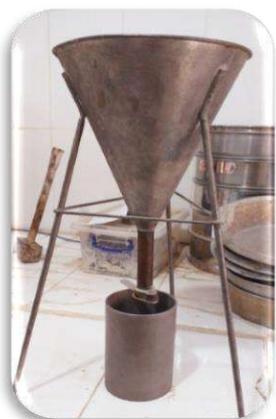


Figure II-13: Opérateur d'Essai.

- ❖ La masse volumique apparente de déchets de briques :  $\rho_a = 0.999 \text{ g/cm}^3$ .
- ❖ La masse volumique apparente du Sable de dune broyé:  $\rho_a = 1.273 \text{ g/cm}^3$ .

### II.3.3. Essai masse volumique absolue :

La masse volumique absolue  $\rho_a$  est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

La masse spécifique est la masse de granulats secs ( $M_s$ ) rapportée au volume absolu (uniquement volume de solides  $Y_s$ ).

- ❖ La masse volumique absolue du déchet de brique broyé :  $\rho_a = 2.50 \text{ g/cm}^3$
- ❖ La masse volumique absolue du Sable de dune broyé :  $\rho_a = 2.70 \text{ g/cm}^3$



Figure II-14: Opérateur d'Essai.

#### II.3.4. Essai analyses granulométrique des sols par sédimentation :

La présente norme s'applique aux éléments d'un sol naturel passant à travers le tamis à maille carrée de 80 micromètres d'ouverture. Les particules de taille inférieure à 1 micromètre ne peuvent cependant pas être différenciées par cet essai.

L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai géotechnique qui complète l'analyse granulométrique par tamisage d'un sol (norme NF P 94-056) et qui peut être nécessaire à sa description et à sa classification.



Figure II-15 : Opérateur d'essai de analyse granulométrique par sédimentation.

Tableau II-9: Résultats essai sédimentation de (Sable broyé et briques broyées).

Sable de dunes broyé							
Temps de lecture		R	Temperature	Correction de temperature C	Lecture corrigee ou (R-C)	Poircentage des particules P%	Diametre des particules D (Um)
h	Min	Leucture de densimetre				100	
-	30	12.0	20	0	12.0	100	0.0750
-	1	10.0	20	0	10.0	83	0.0550
-	2	7.0	20	0	7.0	58	0.0380
-	5	7.0	20	0	7.0	58	0.0250
-	10	6.0	20	0	6.0	50	0.0170
-	20	4	20	0	4.0	33	0.0120
-	40	0	20	0	0.0	0	0.0080
1	80						0.0060
4	160						0.0040
6	320						0.0030
24	1440						0.0020
48	2880						0.0010
72	4320						0.0005

Déchets de briques broyés							
Temps de lecture		R	Temperature	Correction de temperature C	Lecture corrigee ou (R-C)	Poircentage des particules P%	Diametre des particules D (Um)
h	Min	Leucture de densimetre				100	
-	30	18.0	22	0.38	18.38	100	0.0750
-	1	16.0	22	0.38	16.38	89	0.0550
-	2	12.0	22	0.38	12.38	67	0.0380
-	5	7.0	22	0.38	7.38	40	0.0250
-	10	4.0	22	0.38	4.38	24	0.0170
-	20	4.0	22	0.38	4.38	24	0.0120
-	40	3	22	0.38	3.38	18	0.0080
1	80	3	22	0.38	3.38	18	0.0060
4	160	0	20	0	0	0	0.0040
6	320						0.0030
24	1440						0.0020
48	2880						0.0010
72	4320						0.0005

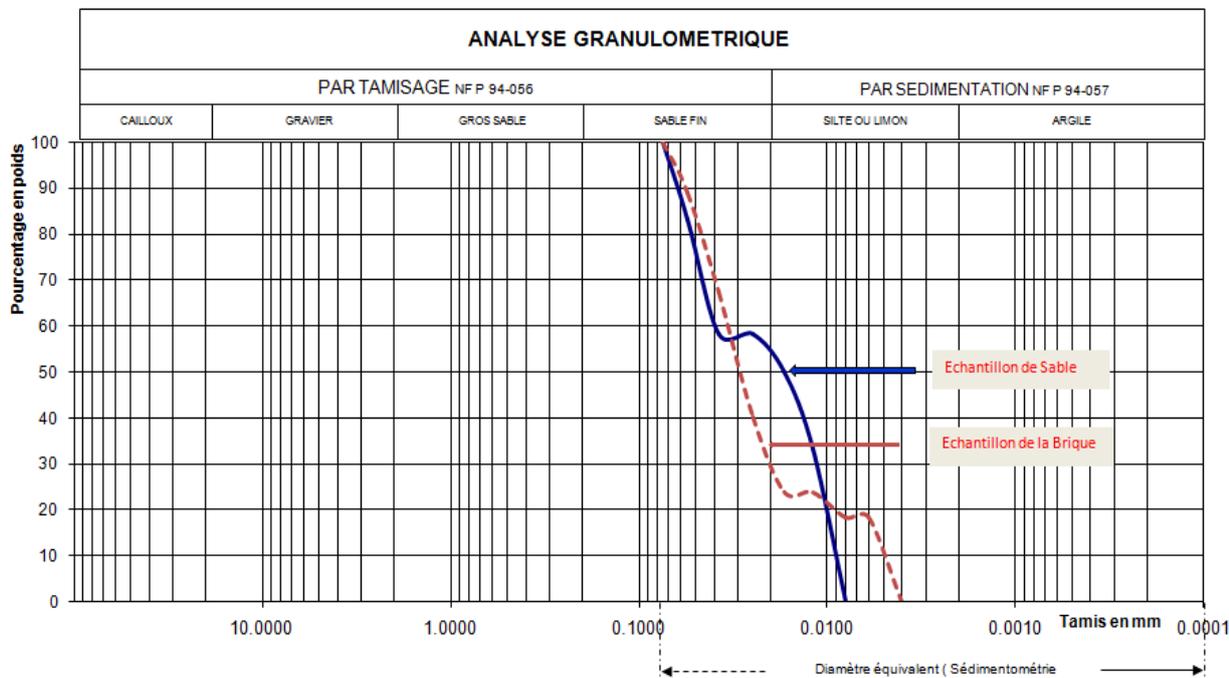


Figure II -16:Résultats essai sédimentation.

## II.5. Conclusion :

À travers les résultats de caractéristiques géotechniques et mécaniques, le tuf utilisé est rangé dans la classe B2 qui considère comme un sable argileux Selon GTR 92. Les faibles performances mécaniques (IPI et Rc) obtenues ne permettent pas l'utilisation de ce tuf en construction routière. Cela nécessite de trouver une solution afin d'améliorer ses propriétés mécaniques. Le procédé de l'associer avec d'autres granulats ou de le traiter peut-être une voie à envisager.

# *Chapitre III : Évolution de la résistance à la compression*

### III.1.Introduction :

Ce chapitre est dédié à l'étude de l'évolution de la résistance à la compression des mélanges constitués de différentes proportions du tuf, de poudre de déchets de brique et de poudre de sable des dunes, non traitées et traitées avec deux concentrations différentes de solution d'hydroxyde de sodium, en faisant varier le mode de conservation et en étudiant la sensibilité des mélanges à l'eau.

### III.2.Methodologie de l'étude experimente :

Afin d'atteindre nos objectifs des éprouvettes cylindriques(h10φ5cm) ont été confectionnées ,à partir des formulations composées de tuf, de poudre des déchets de briqueet de poudre de sable des dunes(tableauIII.1à une compacité de 95%, traitées et non traitées.

- Les mélanges non traitées(MNT) : les éprouvettes ont été confectionnées avec une compacité de 95% de la densité sèche maximale de 1.56 et une teneur en eau optimale de 14.5% du tuf
- Les mélanges traitées (MT1) : les éprouvettes ont été confectionnées avec une compacité de 95% de la densité sèche maximale de 1.56 et une teneur en eau optimale de 14.5% du tuf avec un traitement par une solution de hydroxide de sodium de ph=9.55.
- Les mélanges traitées (MT2) : les éprouvettes ont été confectionnées avec une compacité de 95% de la densité sèche maximale de 1.56 et une teneur en eau optimale de 14.5% du tuf avec un traitement par une solution de hydroxide de sodium de ph=13.38.

Tableau III-1 : Différents formulations élaborées.

	TB0S0	TB15S0	TB10S5	TB5S10	TB0S15
Tuf %	100	85	85	85	85
Poudre de déchets de brique %	0	15	10	5	0
Poudre de sable des dunes %	0	0	5	10	15

La résistance à la compression est indice permettant d'évaluer la cohésion au sein du mélange. Les éprouvettes confectionnées son écrasées à l'aide d'une presse avec une vitesse de1.27mm/min (figure III-1).



Figure III-1: Presse d'écrasement pour mesurer la résistance à la compression simple.

L'évolution de la résistance à la compression de différentes formulations avec l'âge (7,14 et 28 jours) ont été observées en étudiant :

- L'effet de l'alcalinité des solutions de traitement.
- L'effet du mode de conservation.
- La sensibilité à l'eau.

### III.2.1. Modes de conservations des éprouvettes :

Tableau III-2 : Modes de conservation des éprouvettes.

Mode de conservation	Définition
Mode1	Les éprouvettes sont conservées dans les conditions climatiques de laboratoire pour une température de $25^{\circ} \pm 5$ et une humidité entre 10 et 25% pendant toute la durée retenue.
Mode2	Les éprouvettes sont confinées dans des sachets plastiques pendant la durée retenue.

### III.2.2 La sensibilité à l'eau :

La sensibilité des tufs à l'eau oblige les utilisateurs de ce matériau de prendre en compte certaines précautions afin d'éviter ce point négatif. De ce fait, le procédé de mélanger le tuf avec d'autres matériaux ou le recours à son traitement peut être une solution pour surmonter ce problème.

Pour notre cas, la sensibilité a été testée en mesurant la résistance des éprouvettes de différents mélanges immergés dans l'eau pendant 4 jours après une durée de conservation de 28 jours.

### III.3.Résultats et discussion :

#### III.3.1-Evolution de la résistance à la compression des mélanges non traités:

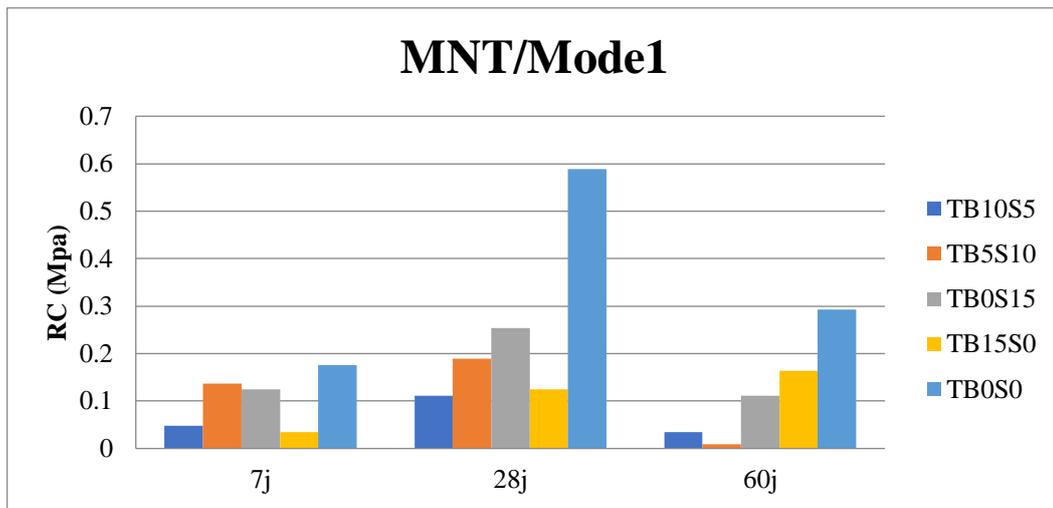


Figure III-2 : Evolution de la RC des mélanges non traité en mode1.

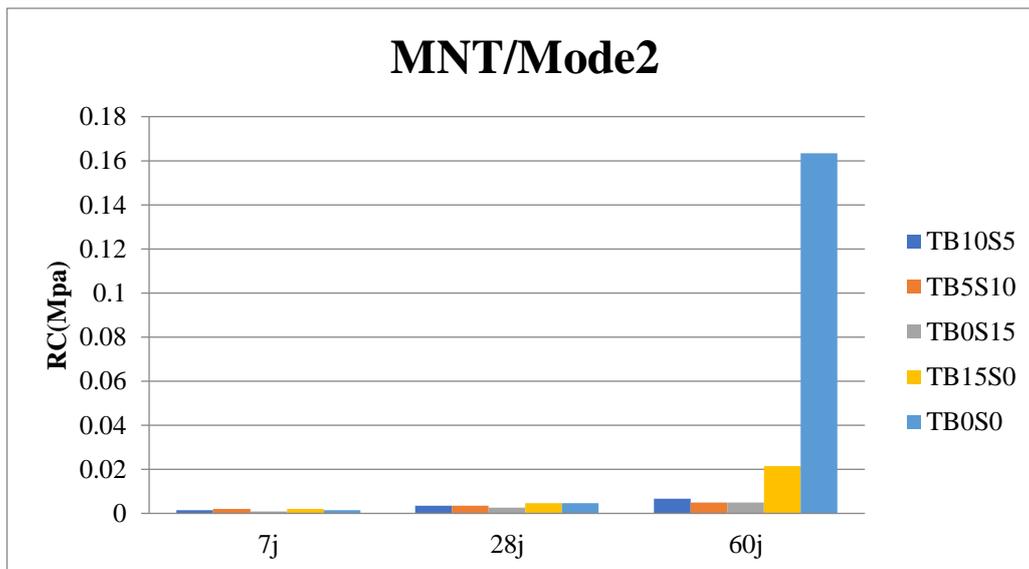


Figure III-3 : Evolution de la RC non traité en mode2.

Les figures III-2 et III-3 représentent respectivement de l'évolution de la résistance à la compression avec l'âge des mélanges non traités en mode1 et mode2.

Les résultats obtenus montrent que :

- La résistance à la compression de tous des mélanges est généralement faible (<1Mpa).
- La résistance à la compression du mélange TB0S0 est la plus élevée, atteignant sa valeur maximale à 28jours pour le mode1 et à 60 jours pour mode2.

- La diminution des résistances à la compressions des mélanges contenant des ajouts de poudre des déchets de brique et poudre de sable des dunes est due au fait que ces ajouts n'ont pas réagi efficacement avec le tuf, ce qui a entraîné une faible cohésion entre les particules des mélanges.
- La résistance à la compression en mode 2 est inférieure à celle obtenue en mode 1, ceci est dû au fait que l'évaporation de l'eau est empêchée en mode 2, ce qui conduit un durcissement incomplet.

### III.3.2-L'évolution de la résistance à la compression des mélanges traités :

#### A. L'évolution de la résistance à la compression ( $ph=9.55$ ):

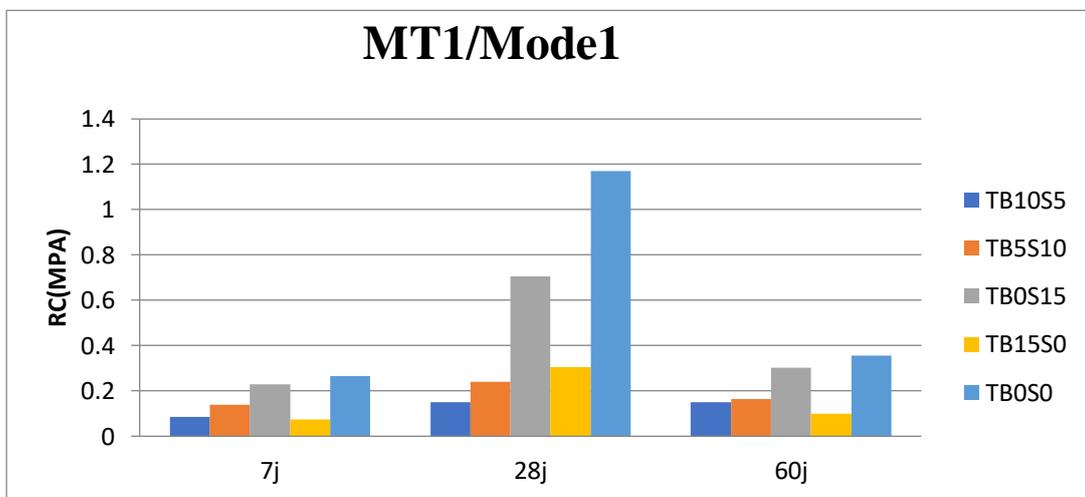


Figure III-4 : Evolution de RC des MT1 en mode1.

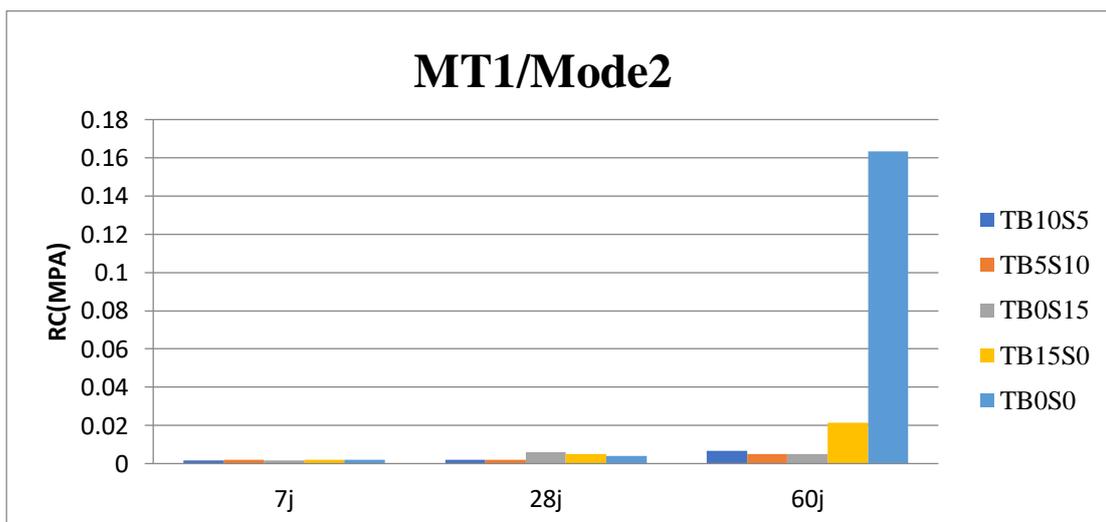


Figure III-5 : Evolution de RC de MT1 en mode2.

Les figures III-4 et III-5 illustrent respectivement l'évolution de la résistance en compression en mode1 et mode 2 de différentes mélanges traités par la solution d'hydroxyde de sodium (ph=9.55)

Les résultats montrent une amélioration de résistance à la compression des différentes mélanges traités par la solution alcaline, notamment en mode1, où la valeur de RC dépasse 1 Mpa à 28 jour pour le tuf seul (TB0S0). Cela peut probablement être dû à la dissolution partielle et à la recristallisation des particules gypseuse qui conduit à une meilleure cohésion.

**B. l'évolution de la résistance à la compression (ph=13.38):**

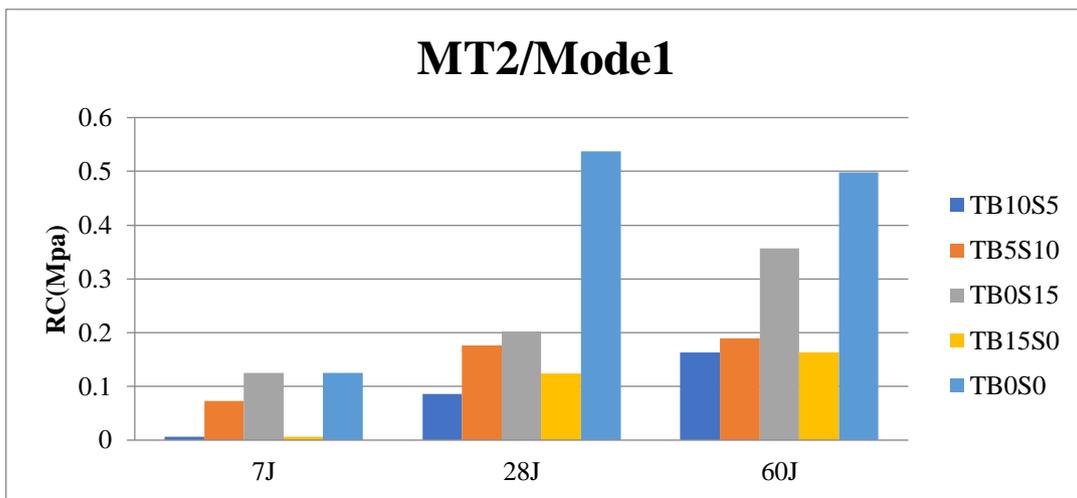


Figure III-6 : Evolution de RC des MT2 en mode1.

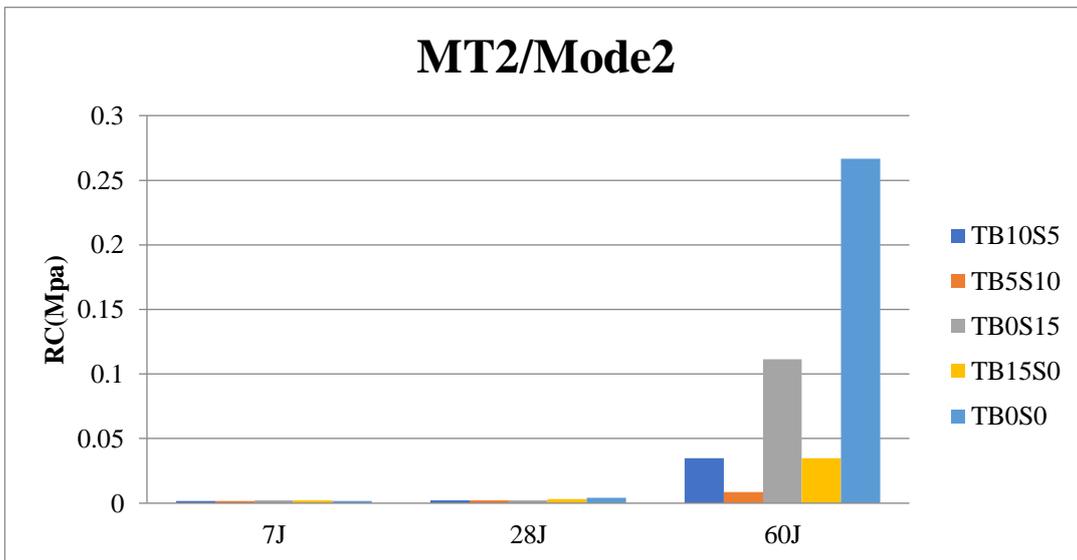


Figure III-7 : Evolution de RC de MT2 en mode2.

Les résultats des figures III-6 et III-7 confirment une autre fois l'amélioration de la résistance à la compression des mélanges traités lors de l'augmentation du PH (13.38) de la solution de l'hydroxyde particulièrement à long terme (60 jours). Cette amélioration de RC

reste relativement faible pour les mélanges contenant des ajouts de poudre des déchets de brique et la poudre de sable des dunes. Ceci dû au fait que les particules des ajouts n'ont pas réagi efficacement avec le tuf, ce qui nécessite de prévoir d'autres paramètres pour obtenir une bonne réaction entre les ajouts et le tuf.

### III.3.3-Effet de l'alcalinité sur la résistance à la compression des mélanges :

Afin d'étudier clairement l'effet du Ph de la solution de traitement sur la résistance à la compression nous avons fait une comparaison entre les résultats obtenus sur les différents mélanges( MNT,MT1 et MT2) à long terme (60 jours).

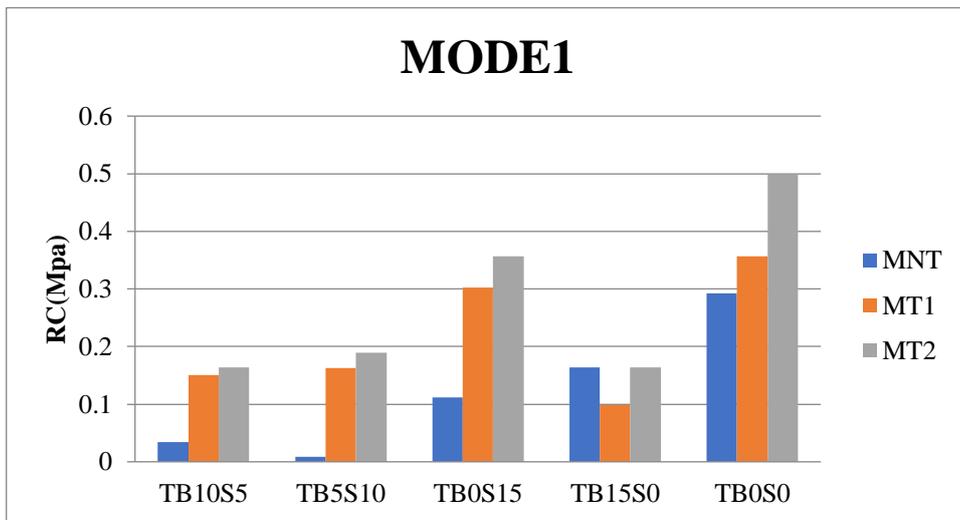


Figure III-8: Résistance à la compression des mélanges non traité et traité à différents PH en mode1.

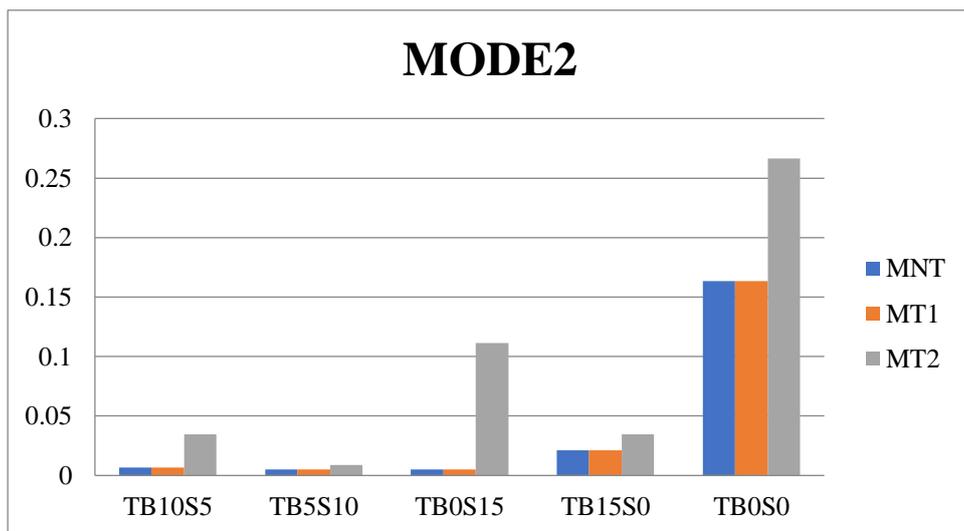


Figure III-9: Résistance à la compression des mélanges non traité et traité à différents PH en mode2.

Les figures III-8 et III-9 présentent en mode1 et 2 une comparaison entre les résistances à la compression simple des mélanges (non traité et traité à différents PH).

A travers les histogrammes tracés, on observe que la résistance varie en fonction du PH de la solution de traitement. L'augmentation du PH entraîne une amélioration de la résistance pour les deux modes de conservation. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées lors du traitement par la solution ayant un PH égale à 13.38 (MT2) en mode1. Ceci indique que le milieu alcalin favorise la dissolution des particules gypseuse du tuf et par leur recristallisation améliore la cohésion, et par conséquent la résistance.

Il est également noté que les valeurs des résistances à la compression dans le mode2 sont inférieures à celles du mode1 car en mode 2 l'empêchement de l'évaporation de l'eau ne permet pas l'achèvement du durcissement des éprouvettes.

#### III.3.4- Effet du mode de conservation sur la résistance à la compression des mélanges :

Pour illustrer l'effet des modes de conservation sur la résistance à la compression, une comparaison est faite à long terme (60jours) entre les différents mélanges (Figure III-10, Figure III-11 et Figure III-12).

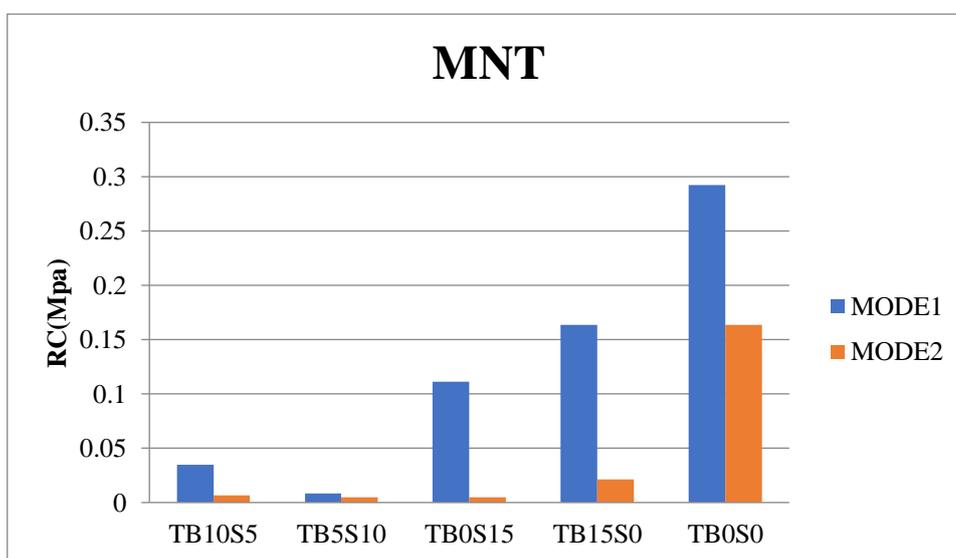


Figure III-10: résistance à la compression des mélanges non traités selon les modes de conservation.

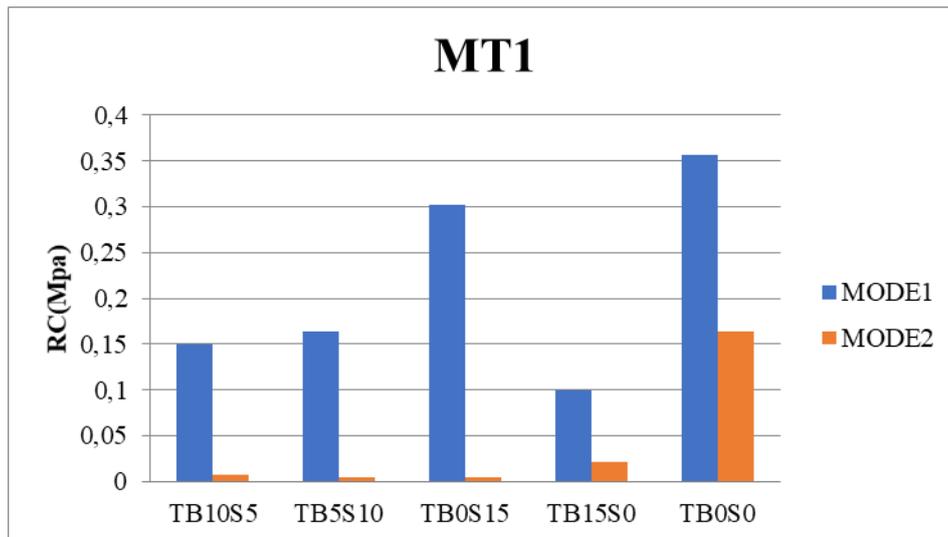


Figure III-11 : Résistance à la compression des mélanges traités avec l'hydroxyde sodium de PH=9.55 (MT1) selon les modes de conservation à 60 jours.

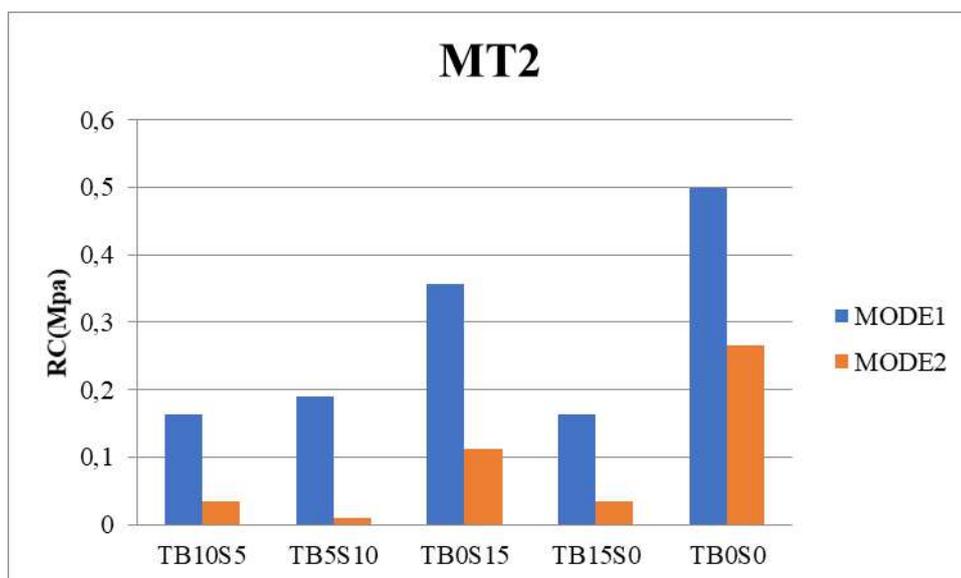


Figure III-12 : Résistance à la compression des mélanges traités avec l'hydroxyde sodium de PH=13.38 (MT2) selon les modes de conservation à 60 jours.

Les histogrammes montrent clairement l'effet des modes de conservation sur la résistance à la compression, où l'on observe que les valeurs de RC dans le mode1 sont plus élevées que celles du mode2, pour tous les mélanges traité ou non traité. En effet, en mode 1, l'évaporation de l'eau est autorisée et avec le temps la succion augmente. Cette succion génère des forces d'attraction inter granulaire contribuant à l'augmentation de la résistance.

### III.3.5- Sensibilité à l'eau:

Les éprouvettes confectionnées à partir de différents mélanges sont conservées pendant 28 jours en mode1 et en mode2, puis elles sont immergées dans l'eau pendant 4 jours.



Figure III-13 : L'immersion des éprouvettes dans l'eau après 28 jour de conservation en mode1 et mode2.

Après quelques minutes d'immersion dans l'eau, les éprouvettes confectionnées à partir des différents mélanges se sont complètement effondrées, que ce soit conservées en mode 1 ou en mode2. Cela nous permet de dire que le traitement des mélanges avec des solutions alcalines ne conduit pas à l'amélioration de leur sensibilité à l'eau, ce qui nécessite une étude approfondie pour déterminer les causes.

### III.4. Conclusion :

D'après les résultats obtenus on peut conclure ce qui suit :

- Les éprouvettes confectionnées à partir des différents mélanges non traité donnent de faibles résistances à la compression qui ne dépassent 1MPa.
- Le traitement des mélanges par la solution d'hydroxyde de sodium contribue à l'augmentation de la résistance.
- L'augmentation de concentration de la solution d'hydroxyde de sodium a un effet positif sur la résistance.
- L'efficacité du traitement avec la solution de NaOH apparait dans les mélanges qui contiennent du tuf seul, cela signifie qu'il faut certaines conditions pour que les poudres des déchets de brique et de sable des dunes réagissent avec la solution de NaOH, et développent des liaisons entre les grains des mélanges et par conséquent, augmentent la résistance.
- La meilleure résistance est obtenue pour les éprouvettes de mélanges TB0S0 traitées et conservées selon le mode1 à 28 jours (1.16Mpas).

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail est de valoriser un type de tuf d'encroûtement ayant des propriétés mécaniques médiocres et de sable des dunes, ainsi que de recycler les déchets de briques sous forme de poudre en vue de leur utilisation en construction routières saharienne.

L'étude s'est concentrée sur l'évolution de la résistance à la compression simple dans le temps des éprouvettes confectionnées à partir des mélanges ( composés de tuf, de poudre de déchets de briques et de poudre de sable des dunes ) traités chimiquement par deux solutions d'hydroxyde de sodium (NaOH) de PH différent.

Les analyses chimiques effectuées sur le tuf ont révélé qu'il est de nature gypseuse. Selon la classification GTR92, ce matériau appartient à la classe B2, qui est considérée comme un sable argileux.

En termes de performances mécaniques, le tuf possède une portance moyenne (IPI = 32) et une faible résistance à la compression qui ne dépasse pas 1MPa.

Le processus de mélanger le tuf avec la poudre de déchets de briques et de sable de dunes et du traitement à l'aide de la solution de NaOH , nous permet de conclure ce qui suit :

- Les mélanges non traités présentent une résistance à la compression faible, ne dépassant pas 1 MPa.
- Le traitement des mélanges avec la solution d'hydroxyde de sodium contribue à l'augmentation de la résistance en compression simple particulièrement à long terme.
- Une concentration plus élevée de la solution d'hydroxyde de sodium a un effet positif sur la résistance.
- Les meilleures résistances sont obtenues pour les éprouvettes confectionnées à partir tuf traitées et conservées selon le mode 1 pendant 28 jours (1.16MPa).
- L'efficacité du traitement avec la solution de NaOH apparaissant sur le tuf seul montre que cette solution alcaline a contribué à la dissolution partielle des particules gypseuse et par leur recristallisation a augmenté la cohésion et par conséquent la résistance.
- Le traitement des mélanges avec des solutions de NaOH n'arrive pas à améliorer leur sensibilité à l'eau.
- La faible résistance enregistrée pour les mélanges formulés nécessite une étude plus approfondie pour déterminer les causes empêchant l'interaction entre les ajouts utilisés et le tuf en présence de la solution de NaOH.

# *Références bibliographiques*

[1] - GOUAL.I, Thèse Pour l'obtention du Diplôme de Docteur en Génie Civil, Université ABOUBAKR Belkaid – TLEMEN, Intitulée : Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat : Application en construction routière p 21,22.

[2]- Khalili Khadîdja (2016) Caractérisation mécanique d'un mélange : Tuf + sable de dunes, MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES DE MASTER.

[3]- LOUALBIA Hamza (2017) Intitulée Valorisation des tufs d'encroûtement en technique routière, Thèse Pour l'obtention du Diplôme de Docteur en Génie Civil Option : Matériaux innovants dans le génie civil.

[4]- KHELLOU Abderrezak (2011), modélisation du comportement des matériaux sable gypso-calcaires, Mémoire de MAGISTER.

[5]- OMRANI SADEK et ZITOUT NOUREDDINE ALI (2016) Étude en APD de la modernisation d'un tronçon de la route nationale RN40B avec l'étude géotechnique du tuf calcaire, thèse master.

[6][http://ruedeslumieres.morkitu.org/apprendre/gypse/composition/index\\_composition.html](http://ruedeslumieres.morkitu.org/apprendre/gypse/composition/index_composition.html).

[7]- Ben Ouakhir Abdel Hakim «Utilisation du sable de dunes en technique routière Etude bibliographique ». Mémoire de Master, Université Mohamed Khider-Biskra.

[8]- BALHACHEMI SARRA, BERRAFA FATOUMA IMANE(2016/2017): La valorisation de sable de dune (sable de Naama) Durabilité et comportement mécanique, Mémoire de MASTER

[9]- Mémoire de magister Spécialité : Génie civil Présenté par AZZOUZ Hocine : Etude des bétons à base des sables de dune 03/05/2009 université MOHAMED KHEIDER BISKRA

[10]-LIVERE, LES DÉCHETS DÉFINITION, GESTION, COLLECTE, TRAITEMENT, RESPONSABILITÉS, POLICE SPÉCIALE, p 09

[11]. BARAKAT.Abd, Thème Valorisation des déchets des briques dans la réalisation des ouvrages en béton, MAGISTER Aménagement Hydraulique et Génie Civil, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA, p 43

[12]. LIVERE, Milieux Humains, Déchets, Rapport sur l'Etat de l'Environnement du Maroc p221.

[13]- CHEREF.L, En vue de l'obtention du diplôme du master en science biologique, Recyclage et valorisation des déchets inertes de la briqueterie SARL-DBK-MAT dans la fabrication de dallage de sol, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou.p 01

[14]- Isis BRABET (2012), LE TRAITEMENT DES SOLS POUR LA COUCHE DE FORME, PLATEFORME DE CHAUSSEE. LE DIPLOME D'INGENIEUR CNAM

[15]- Oudni Selma (2018).Thème EFFET DU TRAITEMENT DES SOLS LIMONEUX PAR LA CHAUX SUR LES CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE. Thèse master

[16]- Baba Hassane AHMED HISSEINI (2021), Traitement par alcali-activation et géopolymérisation de sols argileux : caractérisations physicochimique, géotechnique et environnementale. Diplôme de Docteur

[17]-BENLAHRACHE Brahim CHENINE Ahmed Zakaria (2022), Traitement chimique d'un mélange tuf / déchet de brique broyés, MAGISTER Hydraulique et Génie Civil, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA .

[18]- HAFSI.M, LTPS Ouargla, Les Tufs Gypseux et Calcaires en Zones Arides Essais et Critères de Sélection, Séminaire national de la route et la sûreté de la circulation 29 & 30 Novembre 2010, Université KASDI MERBAH Ouargla, p 02,03

[19]- Méthode d analyse, Détermination de la granulométrie, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 2015-11-16 (révision 1). P 05

[20]- <https://www.academia.edu/36613916>.

[21]- Document, Essai au bleu de méthylène.

[22]- L'ESSAI PROCTOR, SOURCES MODES OPERATOIRES DU LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES SANGLERAT – INTERNE.

[23]- Tounsi Mohammed Abimouloud AbdEnnour (2022), Effet du mode de conservation sur les performances mécaniques d'un Tuf traité aux déchets de briques broyés et à la chaux , MAGISTER Hydraulique et Génie Civil,UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA .