

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE**

**Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université Kasdi Merbah Ouargla**



**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**

**Département de Génie Civil et d'Hydraulique**

C:.....

R:.....

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de**

**Master, Filière : Travaux Public**

**Spécialité : VOIES ET OUVRAGES D'ART (V.O.A)**

**Thème**

**Traitement chimique d'un mélange tuf / déchet de  
brique broyés**

**Présenté par :**

- ❖ **BENLAHRACHE Brahim**
- ❖ **CHENINE Ahmed Zakaria**

**Soumis au jury composé de :**

<b>ABDELDJOUAD Lokmane</b>	<b>MAB</b>	<b>UKMO</b>	<b>Président</b>
<b>BOUZIANE Lamya</b>	<b>MCB</b>	<b>UKMO</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>Mr. KHELLOU Abderrezak</b>	<b>MCB</b>	<b>UKMO</b>	<b>Encadreur</b>

***Année Universitaire: 2021 / 2022***

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ الْمَوَدَّاتِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ الْمَوَدَّاتِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ الْمَوَدَّاتِ  
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي  
خَلَقَ الْمَوَدَّاتِ

# Dédicace

Au nom d'ALLAH, le tout Miséricordieux, le très Miséricordieux

Je remercie ALAH le tout Puissant, clément et Miséricordieux de m'avoir motivé à réaliser ce modeste travail, ensuite je remercie infiniment mes parents, qui m'ont encouragé et aidé à arriver à ce stade de formation.

Et je leur dédie ce modeste travail

Je dédie aussi ce modeste travail à mes chers frères et mes chères sœurs

**Et aussi**

A l'âme de mon cher frère

A toute la famille **Chenine**

A mon binôme «**Benlahrache Brahim** »

A tous mes amis

A tous mes collègues à la spécialité **VOA** sans exception

ET A toutes les personés que je connais

Chenine Ahmed Zakaria

# Dédicace

Au nom d'ALLAH, le tout Miséricordieux, le très Miséricordieux

Je remercie ALAH le tout Puissant, clément et Miséricordieux de m'avoir motivé à réaliser ce modeste travail, ensuite je remercie infiniment mes parents, qui m'ont encouragé et aidé à arriver à ce stade de formation.

Et je leur dédie ce modeste travail

Je dédie aussi ce modeste travail à mes chers frères et mes chères sœurs

**Et aussi**

A toute la famille **Benlahrache**

A mon binôme «**Chenine Ahmed Zakaria** »

A tous mes collègues à la spécialité **VOA** sans exception

ET A toutes les personés que je connais.

Benlahrache Brahim

# Remerciement

Il nous fait grand plaisir d'exprimer en ces quelques lignes notre gratitude aux personnes qui ont contribué à la réussite de ce travail.

Nous remercions l'encadreur **Mr : KHELLOU Abderrezak**, et les membres du jury qui ont dirigé ce travail.

Nous sommes heureux de pouvoir adresser nos chaleureux remerciements à **Mr : Ali KCHIRAD**, chef de labo mécanique du sol pour sa disponibilité constante lors de la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier l'équipe du Laboratoire étude et contrôle LEC Ouargla Personnels, ingénieurs et techniciens.

# SOMMAIRE

---

## LISTE DES FIGURES

## LISTE DES TABLEAUX

Résumé

## INTRODUCTION GENERALE

### Chapitre 01

#### Synthèse bibliographique

<b>I.1. Introduction</b>	4
<b>I.2. Définition de tuf</b>	4
<b>I.3. Les type du tuf</b>	4
<b>a. Les encroutements gypso calcaires</b>	4
<b>b. Les Encroûtements calcaires</b>	5
<b>c. Les encroutements gypseux</b>	5
<b>I.4. Situation géographique et climatologie</b>	6
<b>I.5. Définition de gypse</b>	6
<b>I.6. Caractéristiques physico-chimiques</b>	6
<b>I.7. Origine du gypse et des formations gypseuses</b>	6
<b>I.8. Evolution des encroûtements gypseux</b>	7
<b>I.9. Définition du traitement de sol</b>	8
<b>I.10. Objectif du traitement de sol</b>	8
<b>I.11. Types de traitement de sol</b>	9
<b>I.11.1. Traitement mécaniques</b>	9
<b>a. Compactage dynamique</b>	9
<b>b. Vibro-compactage</b>	9
<b>I.11.2. Traitement hydromécaniques</b>	10
<b>a. Pré chargement ou Pré compression</b>	10
<b>b. Accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux</b>	11
<b>I.11.3. Traitement Thermiques</b>	11
<b>a. Déshydratation</b>	11
<b>b. Congélation</b>	12
<b>I.11.4. Traitement chimiques</b>	12
<b>a. Les produits de traitement chimique</b>	13
<b>a.1.La chaux aérienne</b>	13
<b>a.2.Les liants hydrauliques</b>	14
<b>a.3.Les liants spéciaux routiers (LSR) (ou liants hydrauliques routiers LHR)</b>	14
<b>a.3.1. Historique</b>	14
<b>a.3.2. Définition Les liants spéciaux routiers</b>	15
<b>a.3.3. Domaine d'application du traitement matériaux routier</b>	15
<b>Remarque</b>	15
<b>I.11.5. Traitement par L'hydroxyde de sodium (NaOH)</b>	16
<b>I.11.6. Caractéristique L'hydroxyde de sodium</b>	16
<b>a. Propriétés physiques</b>	16
<b>b. Propriétés chimiques</b>	17
<b>I.11.7. Domaine d'application du traitement par L'hydroxyde de sodium (NaOH)</b>	17
<b>I.12. Conclusion</b>	18

---

Chapitre 02  
Caractérisation des matériaux utilisés

<b>II.1. Introduction</b>	20
<b>II.2. Essais de caractérisation sur le tuf</b>	20
<b>II.2.1. Analyse chimique</b>	20
<b>II.2.2. Essai Masse volumique apparente (NF P 94-053)</b>	20
<b>II.2.3. Analyse Granulométrique (NF P 94-056)</b>	21
<b>II.2.4. Essai au Blue méthylène (NF P 94-068)</b>	22
<b>II.2.5. L'essai Proctor Modifié (NF P 94-093)</b>	22
<b>II.2.6. L'essai CBR (NF P 94-078)</b>	23
<b>II.2.7. Compression simple</b>	25
<b>II.3. Classification des matériaux GTR 92 (norme NF – P 11-300)</b>	25
<b>2.4. Essais de caractérisation sur la poudre de déchets de briques</b>	27
<b>2.4.1. Essai Analyse chimique</b>	27
<b>II.4.2. Essai de Masse volumique absolu</b>	27
<b>II.4.3. Essai de Masse volumique apparente</b>	27
<b>II.5. Conclusion</b>	27

Chapitre 03  
Évolution de la résistance à la compression

<b>III.1. Introduction</b>	30
<b>III.2. Déroulement l'étude expérimentale</b>	30
<b>III.2.1. Mode conservation des éprouvettes</b>	31
<b>III.3. Résultats et discussion</b>	31
<b>III.3.1. Résistance à la compression (Rc)</b>	31
<b>a. Evolution de la résistance en compression des mélanges non traités</b>	32
<b>b. Evolution de la Rc pour les mélanges traités</b>	33
<b>c. Effet de Mode conservation des éprouvettes</b>	35
<b>III .4. Conclusion</b>	37
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	
<b>Référence Bibliographie</b>	

## LISTE DES FIGURES

<b>Fig 01</b>	Figure I.1 : Formation d'encroûtements par évaporation	5
<b>Fig 02</b>	Figure I.2 : Schéma type d'un encroûtement gypseux selon Horta	8
<b>Fig 03</b>	Figure .I.3 : Chantier d'un compactage dynamique profond	9
<b>Fig 04</b>	Figure. I.4 : Vibrocompactage.	10
<b>Fig 05</b>	Figure.I.5 : Principe du pré chargement pour le contrôle des tassements.	11
<b>Fig 06</b>	Figure. I.6 : Hydroxyde de sodium NaOH.	16
<b>Fig 07</b>	Figure II.1 : Courbe granulométrique du tuf.	21
<b>Fig 08</b>	Figure II.2. Test bleu méthylène	22
<b>Fig 09</b>	Figure II.3.Courbe Proctor modifié.	23
<b>Fig 10</b>	Figure II.4 : La courbe de la CBR	24
<b>Fig 11</b>	Figure II.5 : Critère de l'IPI pour la différente couche de la chaussée [NF P 98 115]	24
<b>Fig 12</b>	Figure II.6 : Courbe Compression simple du tuf seul pour 1jour.	25
<b>Fig 13</b>	Figure II.7 : Abaque classification (GTR 92)	26
<b>Fig 14</b>	Figure. III.1 : Les Modes Conservation	30
<b>Fig 15</b>	Figure. III.2 : Appareil de mesure de résistance à la compression simple	32
<b>Fig 16</b>	Figure. III.3 : Evolution de la Rc des mélanges non traités en mode 1	32
<b>Fig 17</b>	Figure. III.4 : Evolution de la Rc des mélanges traités en mode 1	33
<b>Fig 18</b>	Figure. III.5 : Les résistances des mélanges non traités (MNT) et traité (MT) à 7 jours en mode 1	34
<b>Fig 19</b>	Figure. III.6 : Les résistances des mélanges non traités (MNT) et traité (MT) à 28 jours en mode 1	34
<b>Fig 20</b>	Figure. III.7 : Les résistances des mélanges non traités (MNT) et traité (MT) à 60 jours en mode 1	35
<b>Fig 21</b>	Figure. III.8 : Evolution de la Rc des mélanges traités en mode 2	35
<b>Fig 22</b>	Figure. III.9 : Les résistances des mélanges traités (MT) en mode1 et traité (MTS) en mode 2	36
<b>Fig 23</b>	Figure. III.10 : Les résistances des mélanges traités (MT) en mode1 et traité (MTS) en mode 2	36
<b>Fig 24</b>	Figure. III.11 : Les résistances des mélanges traités (MT) en mode1 et traité (MTS) en mode 2	37



## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1</b>	Tableau II-1. Résultats d'analyse chimique du tuf	20
<b>Tableau 2</b>	Tableau II -2 Résultats d'analyse granulométrique du tuf	21
<b>Tableau 3</b>	Tableau II.3.Les classifications des sols en fonction de VBS.	22
<b>Tableau 4</b>	Tableau II.4 de la CBR.	24
<b>Tableau 5</b>	Tableau II.5 : synthèse des résultats de caractérisation de tuf	26
<b>Tableau 6</b>	Tableau II.6. Résultats d'analyse chimique du tuf	27
<b>Tableau 7</b>	Tableau III.1. Formulations élaborées	31
<b>Tableau 8</b>	Tableau III.2. Types de Mode Conservation	31

## ملخص

هذا العمل هو جزء من استعادة المواد المحلية وإعادة تدوير النفايات الصناعية المخصصة لبناء الطرق. وهو يتألف من معالجة خليط من قشرة الطف / مسحوق نفايات الطوب بمحلول هيدروكسيد الصوديوم من أجل تحسين مقاومة الضغط للخليط من جهة والتحقق من وجود تفاعل محتمل بين مسحوق نفايات الطوب الغني بالمعادن وهذا المحلول القلوي من ناحية أخرى. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن زيادة المقاومة وفعالية العلاج تظهر في ظل ظروف معينة وعلى المدى الطويل. في حالتنا، يظهر التحسن في المقاومة في 60 يومًا عندما يتم دمج 5٪ من المسحوق في الخليط.

**الكلمات المفتاحية:** قشرة الطف، مسحوق نفايات الطوب، هيدروكسيد الصوديوم، المعالجة، مقاومة الانضغاط

## Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux et du recyclage des déchets industriels destinés à la construction routière. Il consiste à traiter un mélange de tuf encroûtement / poudre de déchets de briques par une solution d'hydroxyde de sodium dans le but d'améliorer la résistance à la compression du mélange d'une part et de valider une éventuelle interaction entre la poudre de déchets de briques riche en minéraux et cette solution alcaline d'autre part. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la résistance et l'efficacité du traitement apparaissent sous certaines conditions et à long terme. Dans notre cas, l'amélioration de la résistance se manifeste à 60 jours lors de l'incorporation de 5% de la poudre dans le mélange.

**Les mots clé :** Tuf encroûtement, poudre de déchets de briques, d'hydroxyde de sodium, traitement, résistance à la compression

## Abstract

This work is part of the valorization of local materials and the recycling of industrial waste intended for road construction. It consists in treating a mixture of encrusting tuff / powder of waste bricks with a solution of sodium hydroxide in order to improve the compressive strength of the mixture on the one hand and to validate a possible interaction between the powder of mineral-rich brick waste and this alkaline solution on the other hand. The results obtained show that the increase in strength and the efficacy of the treatment appear under certain conditions and in the long term. In our case, the improvement in resistance is manifested at 60 days when 5% of the powder is incorporated into the mixture.

**Keywords:** Encrusting tuff, powder of waste bricks, solution of sodium hydroxide, treatment, compressive strength

# INTRODUCTION GENERALE

## INTRODUCTION GENERALE

Les tufs d'encroûtement font partie des matériaux routiers qui se trouvent en abondance dans les zones arides algériennes, notamment dans la wilaya d'Ouargla. Ils sont souvent utilisés dans la construction de la majorité des routes sahariennes. Parfois entre les mains des ingénieurs routiers des tufs de mauvaises qualités. Ils sont donc obligés d'en faire venir d'autres de régions lointaines, et qui n'est du tout économique et écologiques.

La disponibilité des matériaux de bonne qualité à proximité des lieux d'insertion des routes n'est pas toujours garantie, ce qui nécessite de s'adapter avec les matériaux existants. 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, en plus un traitement chimique par une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH).

L'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.

Le choix de la solution d'hydroxyde de sodium comme produit de traitement a pour objectif de valider une éventuelle interaction entre la poudre de déchet de brique riche en minéraux et cette solution alcaline. Cette interaction est censée de tisser des liaisons entre les particules du matériau, et par conséquent améliorer de la résistance.

Ce mémoire comporte trois chapitres :

- le premier chapitre donne un aperçu sur les tufs d'encroûtement ainsi que les procédés 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 : évolution de la résistance compression ;
- enfin ; une conclusion générale est rédigée résumant l'essentiel du travail.

**CHAPITRE 01**  
**SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

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

Le sol est généralement un matériau hétérogène aux propriétés très différentes. Les principaux problèmes liés au sol en général sont se manifestant par une faible capacité portante, des déformations (tassement absolu et différentiel).

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

### **I.2. Définition de tuf :**

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. [1]

### **I.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. [2]

Guettouche, 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 évaporitique 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. [2]

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 %. [2]

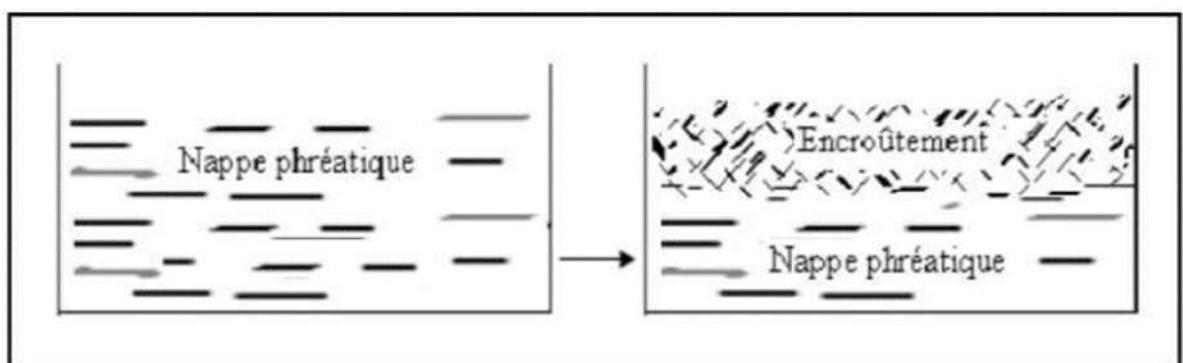
### **b. Les Encroûtements calcaires :**

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 au moins grandes de sols, roche ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration ". [3]

### **c. Les encroûtements gypseux :**

Les encroûtements gypseux sont des formations analogues aux encroûtements calcaires. Ils sont réels abondants dans les régions à climat arides où les précipitations sont insuffisantes pour lixivier le gypse, qui existe déjà dans les formations géologiques anciennes (Crétacé au Miopliocène) (Aloul, 1981 ; Frenkel et al. 1986 ; Schiote, 203 ; Alfaya, 204). Ce minéral qui présente l'élément actif de la cimentation de ces formations, possède une dureté très faible : il peut être rayé à l'ongle ; cette particularité pourrait paraître suffisante pour interdire l'utilisation du gypse comme matériau de chaussée en zones climatiques subhumides et semi- arides. [4]



**Figure I.1 : Formation d'encroûtements par évaporation**

#### **I.4. Situation géographique et climatologie :**

Très abondant dans les régions arides (précipitations de l'ordre de 100 mm/an) le gypse existe déjà dans les formations géologiques anciennes.

Les encroûtements gypseux massifs ou tendres sont rencontrés dans les dépressions : zones de chotts et des grandes étendues dunaires. Ils occupent de grandes surfaces au Sud et au Sud Est de Biskra, des villes d'El-Oued, Ouargla, Hassi-Messaoud. Les encroûtements tendres appelés sable gypseux d'extraction facile (après élimination des encroûtements durs) sont utilisés comme matériau routiers en zone aride. [2]

#### **I.5. 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. [5]

#### **I.6. Caractéristiques physico-chimiques :**

Le gypse est un minéral tendre dans l'échelle de Mohs\*1, qui compte 10 degrés (dureté 1,5 à 2 selon la face cristalline). Il est soluble dans l'eau (1,75 g/l à 0°C, 2,1 g/l à 38 °C et 1,69 g/l à 100 °C, avec augmentation de solubilité dans l'eau salée). Selon les impuretés, sa couleur est très variable, blanc, beige, gris, jaune, rouge etc...

Il se présente sous forme cristalline en variétés compactes grenues (gypse saccharoïde) ou fines (albâtre), en grands cristaux prismatiques (fer de lance ou pieds d'alouettes), en cristaux lamellaires ou fibreux, ou encore il est amorphe. La densité du minéral est de 2,31 à 2,33.[4]

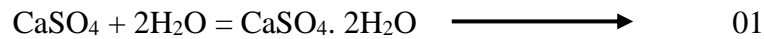
#### **I.7. Origine du gypse et des formations gypseuses**

Le sulfate de calcium s'hydrate et cristallise dans le système monoclinique pour former le minéral appelé gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). L'une des propriétés les plus caractéristiques de ce minéral est sa très faible dureté : il peut être rayé à l'ongle. [2]

Cette particularité pourrait paraître suffisante pour interdire l'utilisation du gypse comme matériau de chaussée. En effet, l'utilisation de granulats de gypse ne pourrait conduire qu'à des échecs, mais le sulfate de calcium possède d'autres propriétés qui permettent d'en faire un matériau de construction très apprécié. [2]



La première de ces propriétés, mise à profit dans le plâtre, est celle de l'hydratation. En présence d'eau, le sulfate de calcium anhydre ( $\text{CaSO}_4$ , anhydrite) ou partiellement hydraté (hémidrate,  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ) réagit avec celle-ci plus ou moins lentement et recristallise en gypse :



Cette réaction peut aussi se dérouler de la droite vers la gauche : lorsque l'on chauffe du gypse, il se déshydrate et, pour des températures de cuisson pas trop élevées, on obtient la forme hydratée intermédiaire, qui constitue le plâtre, très réactif. [2]

### **I.8. Evolution des encroûtements gypseux**

Dans la nature, le gypse se dépose par évaporation de solutions concentrées ou saumures en milieu confiné (lagunes littorales, chotts et sebkhas), formant avec d'autres sels, les roches sédimentaires que l'on appelle évaporites. On peut rencontrer ce type de sédiments en bordure des chotts et sebkhas de la zone aride, mais aussi des zones méditerranéennes semi-arides et subhumides. [2]

Au cours du quaternaire, le ruissellement a favorisé l'érosion de ces roches mobilisant ainsi une importante quantité de gypse qui s'est concentrée dans les sebkhas et les lagunes où il peut être remobilisé localement par des infiltrations latérales et alimenter les nappes déjà plus au moins séléniteuses. [2]

L'eau de la nappe phréatique, selon B. Alloul, intervient en premier lieu dans l'élaboration des croûtes gypseuses par des mouvements verticaux et peut être latéraux diffus. Les infiltrations se produisent lors des pluies. Les fortes chaleurs accompagnées de vents chauds engendrent une évaporation intense, et une remontée capillaire des eaux enrichies en sels. La cristallisation du gypse se fait par évaporation de l'eau. La continuité du phénomène est assurée par les fissurations de la partie superficielle de la croûte en périodes sèches. Cela provoque de nouvelles infiltrations des eaux de surface et la réalimentation de la nappe. [2]

Les encroûtements gypseux se présentent généralement en couches horizontales affleurantes à subaffleurantes.

Le profil d'un sol encroûté par le gypse présente généralement, de haut en bas, trois horizons principaux, (figure 1.2). L'horizon supérieur appelé terch en arabe, est caractérisé par l'abondance de racines gypsifiées et par un encroûtement discontinu en feuillets et granulés. Il

a une épaisseur comprise entre 10 et 30 cm et est l'équivalent de la terre végétale en zone tempérée. Cette partie est friable, poreuse et souvent sableuse. Sous cet horizon, vient l'encroûtement massif, un véritable grès à ciment gypseux, tafezza en arabe ou pierre à plâtre. L'encroûtement massif se forme au-dessus de la nappe phréatique par évaporation de la frange capillaire. Il est compact mais conserve une certaine porosité. Son épaisseur est de quelques décimètres ou plus grande (un à deux mètres) dans des cas favorables où l'aridification progressive aurait fait baisser graduellement le niveau de la nappe. Après remaniement, il a la granularité d'un sable d'où le nom de sable gypseux ; c'est uniquement cet horizon qui a un intérêt en construction routière. [15]

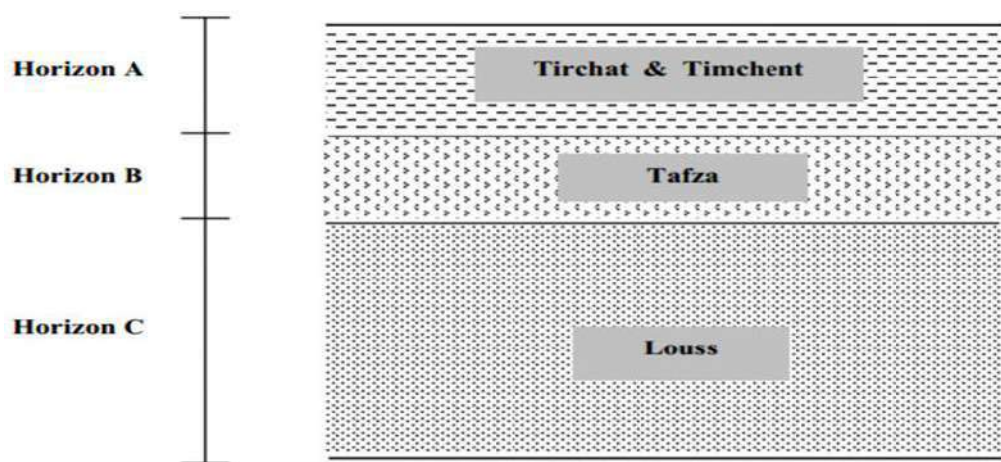


Figure I.2 : Schéma type d'un encroûtement gypseux selon Horta

### I.9. Définition 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. [6]

### I.10. 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. [6]

## I.11. Types de traitement de sol :

### I.11.1. Traitement mécaniques :

Nous citerons deux méthodes de stabilisation mécanique :

**a. Compactage dynamique :** Le compactage de surface peut être utilisé pour une profondeur maximale de 3m. Au-delà de cette profondeur un autre type de compactage existe connu sous le nom de compactage dynamique profond. C'est un procédé qui consiste à pilonner le sol en surface avec une dame en chute libre L'énergie transmise par chaque impact pénètre dans le sol et produit une déstructuration. Au bout de quelques jours ou semaines, une restructuration s'opère qui aboutit à des caractéristiques de portance améliorées (Fig.1.3).Le procédé s'applique aux sols sablo-graveleux, et aux matériaux argilo-limoneux saturés à condition qu'il y ait présence d'air occlus. Son emploi peut être intéressant pour consolider des couches sous l'eau. [7]



Figure .I.3 : Chantier d'un compactage dynamique profond

### b. Vibro-compactage :

Le procédé de vibrocompactage, développé à la fin des années trente, permet de compacter localement ou dans la masse, les sols grenus sans cohésion (sables, graviers, cailloux) en place ou mis en remblai au-dessus ou en-dessous de la nappe et ceci jusqu'à des profondeurs maximum de plus de 50 m .C'est une technique d'amélioration des sols pulvérulents de type

sablo-graveleux permettant de les densifier sous l'effet de la vibration. Ces vibrations, émises par l'outil, se propagent de grains en grains et provoquent un réarrangement optimal du volume initial occupé. La réduction de la porosité du matériau permet aussi d'augmenter sa capacité portante de manière significative Figure 1.4 : Vibrocompactage. Ce procédé de vibrocompactage est appelé aussi la vibroflotation. Cette méthode trouve son application dans les sols granulaires particulièrement les sables propres et les sables silteux avec une teneur en fines inférieure à 20%. Les vibrations engendrent un phénomène localisé de liquéfaction sous l'effet des surpressions interstitielles qui met les grains du sol dans un état liquéfié. Les grains se réarrangent en un état plus dense. [7]



Figure. I.4 : Vibrocompactage.

### I.11.2. Traitement hydromécaniques :

**a. Pré chargement ou Pré compression :** La pré-compression nécessite la compression du sol sous une pression appliquée avant l'application des charges. Cette méthode est utilisée sur des terrains dont le tassement va se prolonger durant plusieurs années. On applique généralement ces méthodes sur des mauvais terrains de composition principalement argileuse. Le principe consiste à surcharger le terrain afin qu'il se tasse naturellement. Le pré chargement des sols s'opère selon les mêmes principes dans le cas des sols fins ou grenus. Le mode de réalisation est le même, mais la perméabilité élevée des sols grenus permet d'obtenir l'amélioration souhaitée dans des délais beaucoup plus brefs que les sols fins et surtout argileux. (Figure. 1.5). Cette technique consiste à placer sur le terrain une charge égale à la charge définitive  $p_f$  augmentée éventuellement d'une surcharge  $p_s$  qui assure tout ou partie des effets suivants :

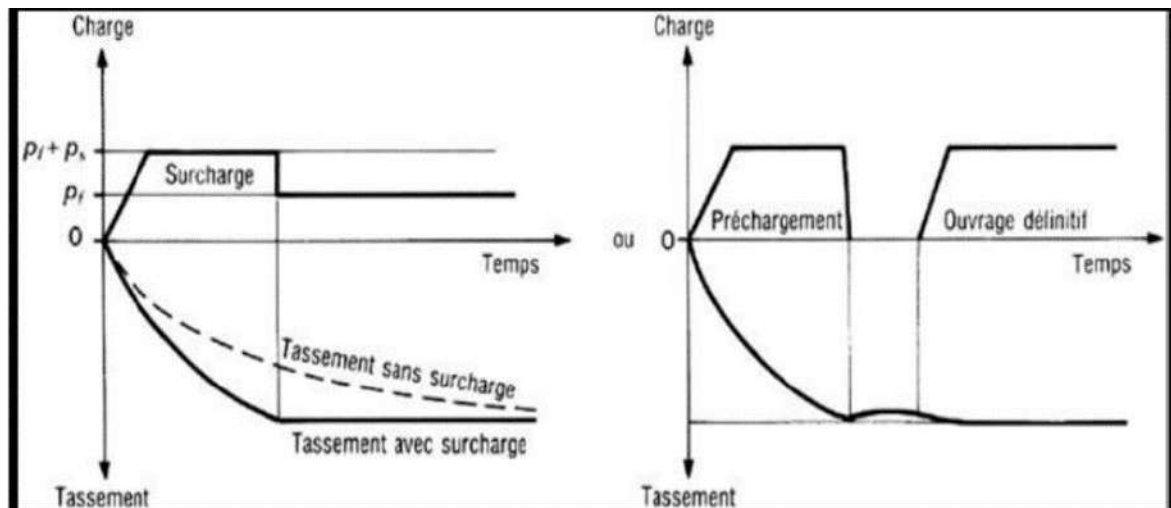


Figure.I.5 : Principe du pré chargement pour le contrôle des tassements.

Les effets bénéfiques de ce procédé incluent une augmentation considérable de la capacité de portance par la réduction des pressions interstitielles excessives et de plus la réduction de la compressibilité des sols mous par l'accélération de la consolidation. [7]

#### b. Accélération de la consolidation par l'installation des drains verticaux :

Les drains verticaux peuvent donc être utilisés dans beaucoup de cas pour accélérer le taux du tassement de la consolidation primaire à l'intérieur de la zone pré chargée avec ou sans la surcharge ajoutée. Ce procédé est inefficace dans les sols tels que les argiles très organiques et les tourbes où leur comportement de tassement est beaucoup plus dominé par la compression secondaire. Les drains verticaux permettent donc au drainage de s'effectuer horizontalement et verticalement.

Durant les années 1980, les drains verticaux sont constitués généralement de sable réalisés par différents procédés tels que le battage et le vibrofonçage. A partir des années 1980, une nouvelle génération de drains qui sont les drains préfabriqués en forme de bande a fait son apparition. La part de ces drains a augmenté de façon très rapide. [7]

#### I.11.3. Traitement Thermiques :

**a. Déshydratation :** La déshydratation par la chaleur est très rarement appliquée en géotechnique, elle permet de durcir certaines argiles par exemple. En pratique, la méthode consiste à brûler un carburant dans un forage en utilisant un forage voisin communiquant avec le premier et servant de cheminée de tirage.



**b. Congélation :** La congélation des terrains instables est un procédé ancien à caractère provisoire, employé pour le creusement des fouilles de puits ou de galeries. Cette technique rend le sol étanche et résistant provisoirement. Ce procédé est généralement développé pour les sols grenus mais il peut être appliqué aux argiles molles et aux limons. La congélation de l'eau interstitielle d'un sol produit un matériau dont les propriétés sont temporairement améliorées tant que la congélation est entretenue. La congélation a également pour effet de rendre imperméable le sol et de faciliter les travaux de terrassements ou de construction sous le niveau de la nappe. Ces propriétés en font une technique d'amélioration provisoire très efficace, mais dont l'emploi reste limité en raison de son coût élevé.

Les techniques de congélation utilisées sont basées sur la circulation d'un fluide froid dans des tubes enfoncés dans le massif de sol. Une saturation complète du sol est souhaitée. La congélation du sol s'effectue d'habitude en deux étapes à savoir les étapes active et passive de congélation. L'étape active est la plus importante et l'appareillage de réfrigération marche avec sa grande capacité que durant l'étape passive nécessaire pour maintenir l'épaisseur du front de gel contre le dégel. [7]

#### **I.11.4. Traitement chimiques :**

La stabilisation chimique est une technique intéressante pour améliorer les propriétés physiques et mécaniques des sols argileux. Aujourd'hui les divers produits et techniques font partie d'une pratique courante des grands ouvrages du Génie Civil à l'échelle mondiale. Le recours massif à cette technique qui valorise les matériaux en place ce qui entraîne une diminution notable des coûts est due principalement aux facteurs suivants tels que la raréfaction des gisements naturels de matériaux nobles, le souci écologique croissant imposant de préserver d'une part les ressources naturelles existantes et de limiter d'autre part la mise en dépôt des matériaux impropres à la réutilisation en remblais ou en couches de forme. Les ajouts cimentaires et les produits chimiques les plus utilisés sont le ciment, la chaux, les cendres volantes, L'objectif principal du malaxage des ajouts cimentaires avec le sol est l'amélioration de ses propriétés physico-mécaniques ainsi que sa durabilité. Les différentes propriétés qui peuvent être améliorées sont la résistance, la plasticité, la compressibilité, la perméabilité, le potentiel de gonflement et le potentiel d'effondrement. L'amélioration de ces propriétés s'effectue soit par l'augmentation de certaines d'entre elles telle que la résistance, soit par la réduction d'autres telles que la plasticité, la perméabilité et l'érosion. Un bon malaxage des

ajouts cimentaires avec le sol à traiter est un facteur important affectant d'une façon significative la qualité des résultats. [7]

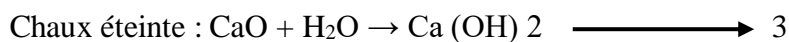
#### **d. Les produits de traitement chimique :**

Ce sont les chaux aériennes principalement calciques et les liants hydrauliques

##### **a.1.La chaux aérienne : [8]**

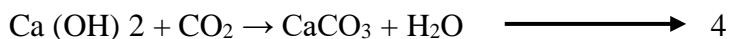
Elle est obtenue par décarbonatation du calcaire ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) à une température d'environ  $900^\circ\text{C}$  suivant la réaction :  $\text{CO}_3\text{Ca} + 50 \text{ kcal} = \text{CaO} + \text{CO}_2 \longrightarrow 2$

La chaux vive réagit au contact de l'eau avec un fort dégagement de chaleur et se transforme en



La réaction est réversible car l'hydratation par l'humidité ambiante et le  $\text{CO}_2$  de l'atmosphère

Vont permettre à la chaux une prise à l'air, d'où le terme de chaux aérienne.



La chaux aérienne peut exister sous trois formes : chaux vive, chaux éteinte, lait de chaux.

Les caractéristiques des chaux aériennes prises en compte sont : la forme (vive, éteinte ou lait), La teneur en chaux libre, la granularité (tamisât 2 mm, 0,2 mm et 0,08 mm), la réactivité (essai De réactivité à l'eau, la vitesse d'hydratation de la chaux, le test global de qualité de la chaux).

La chaux est couramment symbolisée par sa formule chimique :  $\text{CaO}$ .

Il existe divers matériaux appelés chaux qui se différencient entre eux par leur teneur en impuretés. (Normes NF P 153310 et NF P 153312). Les chaux sont codifiées ainsi :

- chaux aérienne calcique vive : CL3Q
- chaux aérienne calcique éteinte : CL3S
- chaux hydraulique naturelle : NH

**a.2. Les liants hydrauliques : [8]**

Les liants hydrauliques sont des produits qui, en présence d'eau, s'hydratent en donnant naissance à des espèces cristallines insolubles et résistantes qui agglomèrent les éléments granulaires du sol. Ce phénomène, dénommé couramment « prise hydraulique », confère au sol une cohésion permanente dont l'importance dépend :

- De la nature du matériau,
- Du type de liant.
- De la quantité introduite.
- De la compacité atteinte à la mise en œuvre.
- De la température du milieu et de l'âge du mélange.

Les liants hydrauliques courants sont subdivisés selon la normalisation en vigueur en cinq types en fonction de leur composition :

- CEM 1 : ciment Portland ;
- CEM 2 : ciment Portland composé ;
- CEM 3 : ciment de haut fourneau ;
- CEM 4 : ciment pouzzolanique ;
- CEM 5 : ciment composé.

**a.3. Les liants spéciaux routiers (LSR) (ou liants hydrauliques routiers LHR) :****a.3.1. Historique :**

Dans les années 1980, parallèlement aux ciments normalisés, des liants spéciaux appelés « liants hydrauliques routiers ou LHR » ont été élaborés en France pour le traitement des sols en place ou en centrale, pour la fabrication de matériaux d'assises de chaussées ou encore pour être utilisés en retraitement en place à froid des anciennes chaussées. Ces liants composites sont issus d'un mélange et/ou broyage de clinker et/ou de coproduits de l'industrie (laitiers, pouzzolanes, cendres volantes, etc.).

Bien que les proportions soient différentes et les cinétiques spécifiques, les constituants de ces liants hydrauliques routiers sont principalement les mêmes que ceux des ciments. Quant aux principes d'actions et au phénomène de prise hydraulique, ils restent pratiquement identiques. [9]



### a.3.2. Définition Les liants spéciaux routiers :

Préparé en usine, un liant hydraulique routier est un produit fini et distribué prêt à l'emploi. Il s'agit d'une poudre minérale qui, une fois combinée avec de l'eau, devient une pâte faisant prise et durcissant progressivement, à l'air comme sous l'eau. Ces phénomènes de prise et de durcissement sont dus à la formation d'éléments hydratés stables, peu solubles dans l'eau, et dotés d'un fort pouvoir d'assemblage entre eux ainsi qu'aux sols ou granulats destinés au traitement. Progressivement, ils permettent ainsi l'agglomération des pâtes et des mélanges. [9]

### a.3.3. Domaine d'application du traitement matériaux routier :

- Le traitement des sols en terrassements (Remblais, déblais, couche de forme), conformément au guide technique « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, application à la réalisation des remblais et des couches de forme » SETRA/LCPC, 2000.
- Le traitement des sols en assises de chaussées, conformément au guide technique « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des assises de chaussées » - SETRA/LCPC, 2007 et conformément à la norme NF EN 14227-15.
- Le recyclage en place à froid des matériaux de chaussées, conformément au guide «Retraitement en place à froid des anciennes chaussées» - SETRA/CFTR, 2003.
- Le traitement des matériaux granulaires en assises de chaussées, conformément à la norme NF EN 14227-5 ou des graves hydrauliques à hautes performances, selon la norme française NF P 98 128, et ce suivant les indications données par la norme NF P 98 115 « Exécution des corps de chaussée » et par la série des normes NF P 98 114 « Méthodologie d'étude des matériaux traités aux liants hydrauliques ». [9]

#### Remarque :

De par leur formulation, les liants hydrauliques routiers ne conviennent pas à la confection des bétons de ciment. Ils sont uniquement élaborés pour le traitement des granulats et des sols, destinés à la construction routière.

Néanmoins, une vérification préalable de l'aptitude du sol ou du matériau au traitement, conformément à la norme NF P 94 100 « Essai d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement », est indispensable à l'emploi des liants hydrauliques routiers car la présence au sein du matériau ou du sol de certaines substances telles les matières organiques, les sulfures (pyrites) ou encore les chlorures (sel gemme), peut gêner, contrarier ou interrompre la prise du liant

hydraulique routier. De plus, la présence de substances telles les sulfates (gypse), peut provoquer au sein du matériau traité des gonflements plus ou moins importants.

### I.11.5. Traitement par L'hydroxyde de sodium (NaOH) :

L'hydroxyde de sodium est un composé minéral de formule chimique NaOH 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.6 : Hydroxyde de sodium NaOH.

### I.11.6. Caractéristique L'hydroxyde de sodium [11]

- 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%

#### e. Propriétés physiques :

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

Les principales impuretés sont le chlorure de sodium ( $\leq 2\%$ ), le carbonate de sodium ( $\leq 1,0\%$ ) et le sulfate de sodium ( $\leq 0,2\%$ ).

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. [12]

**f. 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. [12]

**I.11.7. Domaine d'application du traitement par L'hydroxyde de sodium (NaOH) :**

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 : NaOH) comme additif pour améliorer la réaction entre les matériaux routier. [12]

### **I.12. Conclusion :**

Le sol est généralement un matériau hétérogène avec des caractéristiques très variables. Les principaux problèmes liés aux sols de manière générale se manifestent par une capacité portante faible, des déformations.

Le développement de la mécanique des sols, et la recherche dans le domaine de la géotechnique, ont permis la mise au point d'une large gamme de technique permettant l'amélioration d'un sol présentant de médiocre propriété mécanique.

- Le traitement de sol est une technique d'amélioration des matériaux pour les rendre aptes à l'usage.
- Traiter un sol c'est le mélanger intimement avec un produit, comme la chaux ou un liant hydraulique, afin de lui conférer des propriétés mécaniques de qualité supérieure.
- De nombreux matériaux à priori non utilisables peuvent être améliorés et éviter ainsi de substituer aux terrains en place un matériau noble d'apport devenant rare.

**CHAPITRE 02**  
**CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX**  
**UTILISÉS**

## II.1. Introduction :

L'identification des matériaux utilisés est une étape cruciale pour tout travail expérimentale. Elle permet de déterminer certaines caractérisations chimiques, physiques et mécaniques.

Ce chapitre présente un aperçu sur les différents essais de cancérisation effectués ainsi que les résultats obtenus.

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

### II.2.1. Analyse chimique :

Elle est réalisée à la base des normes NF P 15-461 ; BS 1377 et NF P 94-048, pour la détermination des taux d'insoluble (le quartz principalement), le taux de gypse, le taux de carbonate et la teneur en sels .sont effectués sur la base des normes NF P15-461. [13]

D'après L'analyse chimique (tableau 2-1) établie, notre tuf à la nature gypseuse vu de la dominance du taux de sulfates de calcium qui est d'environ 70%.

Tableau II-1. Résultats d'analyse chimique du tuf

Résultats d'analyse chimique du tuf		
Insoluble (%)		17.73
SO <sub>3</sub> (%)		32.81
Sulfates (%)	SO <sub>4</sub> ((mg/l))	3937
	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O (%)	70.7
Carbonates de calcium CaCO <sub>3</sub> (%)		3.11
Chlorure de sodium Cl- (mg)		0.539

### II.2.2. Essai Masse volumique apparente (NF P 94-053) :

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à 105 ±5 °C. Elle est exprimée en (gr/cm<sup>3</sup> ; kg/m<sup>3</sup> ; T/m<sup>3</sup>). [14]

La valeur de la masse volumique apparente du tuf est de l'ordre de 1.17 gr/cm<sup>3</sup>.

### II.2.3. Analyse Granulométrique (NF P 94-056) :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer par tamisage (si l'échantillon est supérieur à 0,08mm) et par sédimentométrie (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.

Tableau II -2 Résultats d'analyse granulométrique du tuf

tamis (mm)	poids (gr)	poids cumulée (gr)	% de Refuse	% de tamis
100	0		0.00	100
50	0	0	0.00	100
40	0	0	0.00	100
31.5	161.3	161.3	5.38	95
25	232.6	393.9	13.13	87
20	75.1	469	15.63	84
16	62.4	531.4	17.71	82
12.5	38.5	569.9	19.00	81
10	28.9	598.8	19.96	80
5	86.1	684.9	22.83	77
2	134	818.9	27.30	73
1	151.9	970.8	32.36	68
0.4	402	1372.8	45.76	54
0.2	640.1	2012.9	67.10	33
0.08	461.3	2474.2	82.47	18

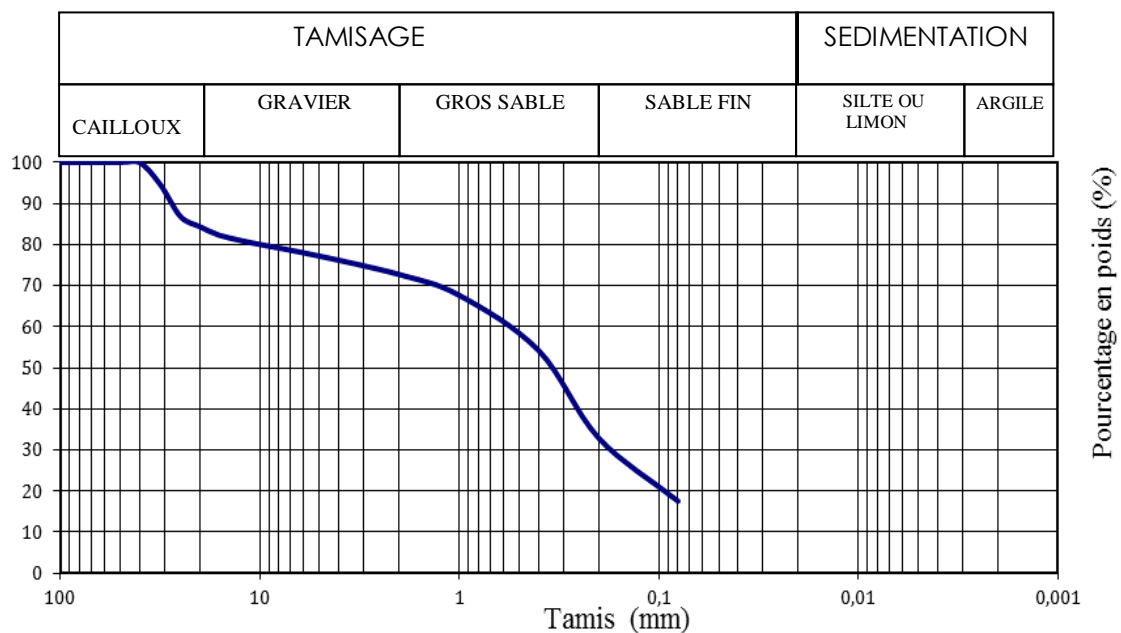


Figure II.1 : Courbe granulométrique du tuf.

### II.2.4. Essai au Blue méthylène (NF P 94-068) :

C'est cet essai qui permet la détermination de l'activité et de la quantité de la fraction argileuse d'un échantillon. Le dosage s'effectue en ajoutant successivement des quantités de solution de "bleu" et en contrôlant l'adsorption au fur et à mesure. Une goutte de suspension est prélevée et est déposée sur un filtre. L'essai consiste à déterminer l'adsorption maximale obtenue lorsque la tâche est entourée d'une auréole bleu-clair persistante. [16]



Figure II.2. Test bleu méthylène

Pour cet essai, le volume de bleu méthylène absorbé par les particules du tuf est de l'ordre de 12 ml, ce qui permet d'obtenir une valeur de bleu méthylène (VBS) est égale **0.4**.

Si en se basant uniquement sur la valeur bleu méthylène (Tableau 2.3), le tuf peut être rangé dans les sols limoneux.

Tableau II.3. Les classifications des sols en fonction de VBS.

$VBS \leq 0.2$	Sols sableux
$0.2 < VBS \leq 2.5$	Sols limoneux
$2.5 < VBS \leq 6$	Sols limono-argileux
$6 < VBS \leq 8$	Sols argileux
$VBS > 8$	Sols très argileux

### II.2.5. L'essai Proctor Modifié (NF P 94-093) :

L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de remblai donné et des conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore capacité portante maximale. [17]

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.



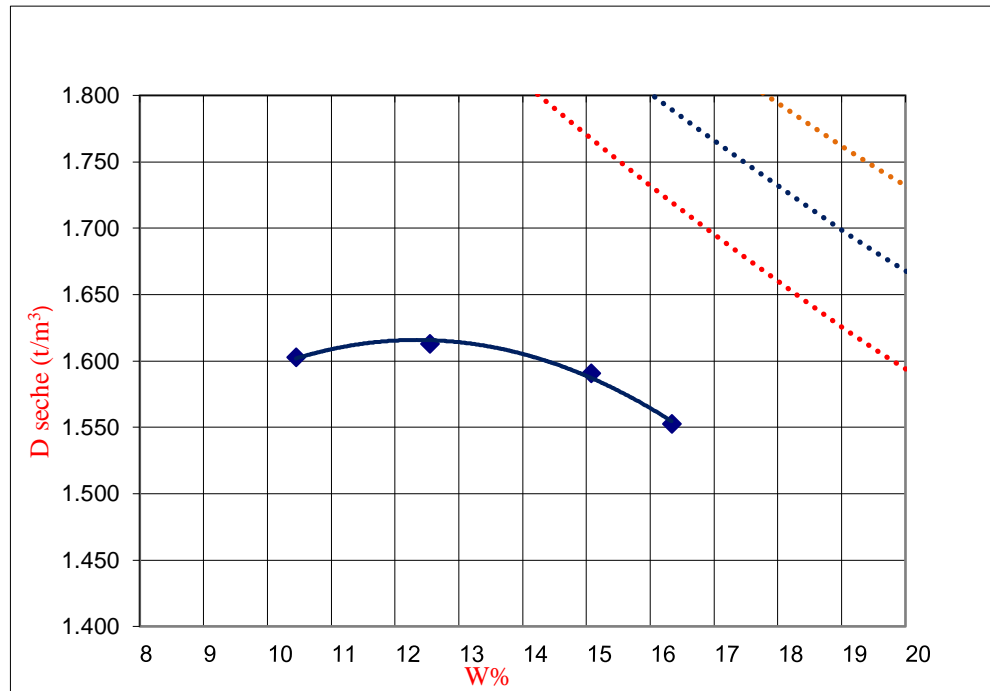


Figure II.3. Courbe Proctor modifiée.

- D'après de la courbe de Proctor, on trouve a la une teneur en eau optimale égale à 12,50%. Et la densité sèche maximale est de l'ordre de 1,62 g /cm<sup>3</sup>.

### II.2.6. L'essai CBR (NF P 94-078) :

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. [16]

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

$$\text{➤ } \frac{\text{Effort de pénétration à 2,5mm d'enfoncement (enKN)}}{13,35} \times 100$$

$$\text{➤ } \frac{\text{Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (en KN)}}{19,93} \times 100$$

Tableau II.4 de la CBR.

Temps	Enfoncement en (mm)	Force		Pression Kg/cm <sup>2</sup>
		Lecture	Valeur	
0	0	0	0	0.000
30"	0.625	8	0.168	0.856
1'	1.25	16	0.336	1.712
1' 40"	2	40	0.840	4.280
2'	2.5	62	1.303	6.634
4'	5	340	7.143	36.381
6'	7.5	486	10.211	52.003
8'	10	610	12.816	65.272
10'	12.5	686	14.413	73.404
<b>Calcul de l'indice Portant</b>				
A 2,5mm : P(2,5) / 0,70 =		9		
A 5mm : P(5) / 1,05 =		35		
Indice CBR =		35		

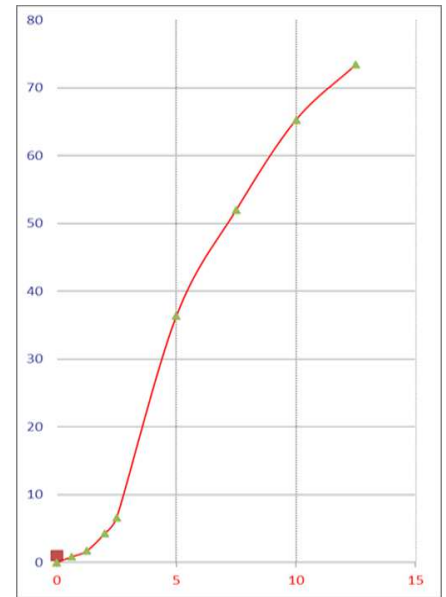


Figure II.4 : La courbe de la CBR

D'après l'essai de CBR ; l'IPI égale 35

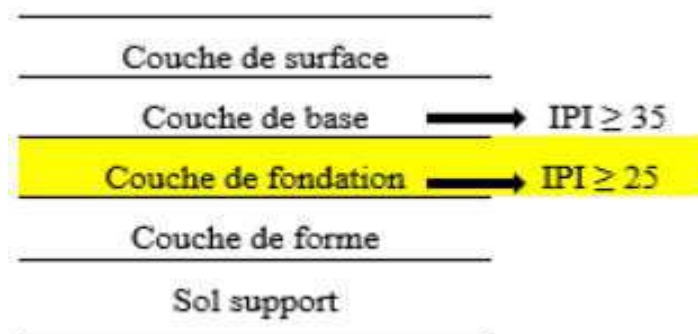


Figure II.5 : Critère de l'IPI pour la différente couche de la chaussée [NF P 98 115]

### II.2.7. 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. [18]

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

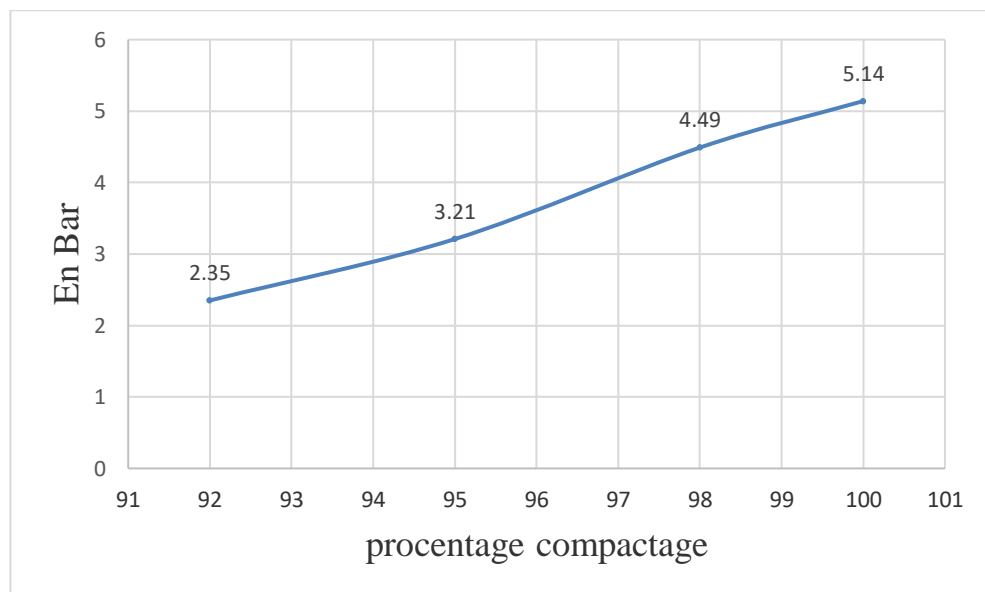


Figure II.6 Courbe Compression simple du tuf seul pour 1jour.

Les résultats obtenus montrent que la résistance à la compression simple du matériau tuf seul bas. Indication de étant donné les propriétés géotechniques faibles.

### II.3. Classification des matériaux GTR 92 (norme NF – P 11-300) :

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.

On distingue trois catégories d'essais :

- Les essais d'identification ou de nature.
- Les essais d'état
- Les essais de comportement mécanique.

La figure (figure II.6) indique la classification primaire des matériaux basée sur leur granulométrie, leur argilosité et leur nature pétrographique. [19]

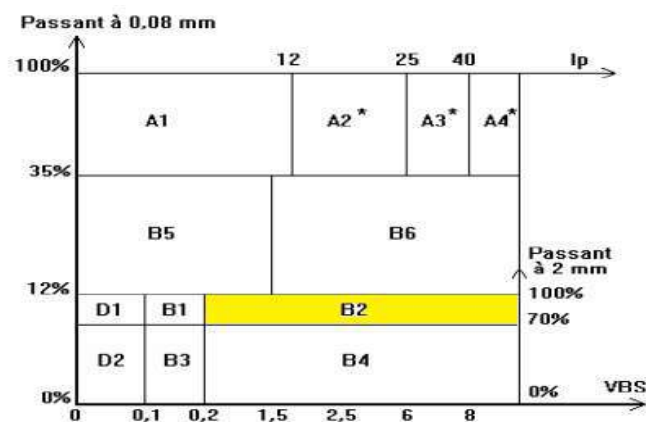


Figure II.7 : Abaque classification (GTR 92)

Tableau II.5 : synthèse des résultats de caractérisation de tuf

Caractéristique	Valeur
<b>La masse volumique apparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.17
<b>Diamètre maximal (mm)</b>	50
<b>Éléments &lt; 0.08 mm %</b>	18
<b>Élément &lt; 2 mm %</b>	73
<b>La densité sèche maximale</b>	1.62 g/cm <sup>3</sup>
<b>La teneur en eau optimale (%)</b>	12.50
<b>Indice portant immédiat (IPI)</b>	35
<b>VBS</b>	0.4
<b>SO<sup>-2</sup>3 (%)</b>	32.81
<b>Insolubles (%)</b>	17.73
<b>SO<sup>-2</sup>4 (%)</b>	3937
<b>CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O (%)</b>	70.7
<b>CaCO<sub>3</sub> (%)</b>	3.11
<b>Cl-(%)</b>	0.539

## II.4. Essais de caractérisation sur la poudre de déchets de briques :

### II.4.1. Essai Analyse chimique :

Tableau II.6. Résultats d'analyse chimique du déchet de brique

<b>Insolubles (%)</b>		<b>86.73</b>
<b>Sulfates (%)</b>	SO <sub>3</sub> (%)	1.37
	SO <sub>4</sub> ((mg/l))	164.62
	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O (%)	2.96
<b>Carbonates de calcium CaCO<sub>3</sub> (%)</b>		<b>1.15</b>
<b>Chlorure de sodium Cl<sup>-</sup> (mg)</b>		<b>0.031</b>

### II.4.2. Essai de Masse volumique absolu :

La masse volumique absolue  $\rho_s$  est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. [15]

La masse volumique absolue :  $\rho_s = 2.33 \text{ gr/cm}^3$

### II.4.3. Essai de Masse volumique apparente :

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.

- La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté. [15]

La masse volumique apparente est de l'ordre de  $0.934 \text{ gr/cm}^3$

## II.5. Conclusion

Les résultats des essais d'identification permettent de ranger le tuf objet d'étude en classe B2 qui considère comme un sable argileux Selon GTR 92. La médiocrité des performances mécaniques (IPI et  $R_c$ ) ne permet pas l'utilisation de ce tuf en construction routière. Cela nécessite la recherche une solution pour 'améliorer ses propriétés mécaniques. Le procédé de l'associer avec d'autres granulats ou de le traiter peut être une voie à envisager.

**CHAPITRE 03**  
**ÉVOLUTION DE LA RÉSISTANCE À LA**  
**COMPRESSION**

### III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'examen l'évolution de la a résistance à la compression d'un mélange constitué de tuf d'encroûtement et de poudre de déchets de briques dans non traité et traité par une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) en faisant varier le mode de conservation .

### III.2. Déroulement l'étude expérimentale :

L'évolution de la résistance à la compression simple ( $R_c$ ) avec l'âge est étudiée sur des éprouvettes cylindriques (H10Ø5cm) préparées à partir des mélanges de poudres de déchets Tuf/brique pour une capacité de 95 %. Deux cas sont discutés : cas des mélanges non traités et cas des mélanges traités avec une solution d'hydroxyde de sodium (PH=11,13).

- cas des mélanges non traités

Les éprouvettes sont fabriquées avec une compacité de 95% et une teneur en eau optimale de Proctor  $W_{opm}$  de 12.5 %.

- cas des mélanges traités

Les éprouvettes sont fabriquées avec une compacité de 95% et une teneur en solution d'hydroxyde de sodium (PH=11,13). De 12.5 %.



Figure. III.1)- Les Modes Conservation

Cette évolution avec l'âge (7, 28 et 60 jours) est examinée pour trois formulations (Tableau III.1) et pour deux modes de conservation des éprouvettes.

**Tableau III.1. Formulations élaborées**

	T5DB	T10DB	T15DB
<b>Tuf %</b>	95	90	85
<b>Poudre de déchets de briques %</b>	5	10	15

### III.2.1. Mode conservation des éprouvettes :

Les éprouvettes confectionnées sont conservées selon deux modes tels que définis dans (Tableau. III.2)

**Tableau III.2. Types de Mode Conservation**

Mode de conservation	Définition
Mode	Les éprouvettes sont conservées dans les conditions de laboratoire, pour une température variant entre 20 et 25°C, et ce pendant toute la durée la durée retenue.
Mode2	Les éprouvettes sont d'abord conservées dans des sachets plastiques pendant la moitié de la durée retenue, puis conservées sans sachets pendant le reste de la durée dans les conditions de laboratoire

### III.3. Résultats et discussion :

#### III.3.1. Résistance à la compression : (Rc)

La mesure de la Rc permet d'évaluer de la cohésion au sein du mélange. Les éprouvettes, sont écrasées à l'aide d'une presse avec une vitesse de 1.27mm/min (Figure. III.2)





Figure. III.2)- Appareil de mesure de résistance à la compression simple

a) **Evolution de la résistance en compression des mélanges non traités**

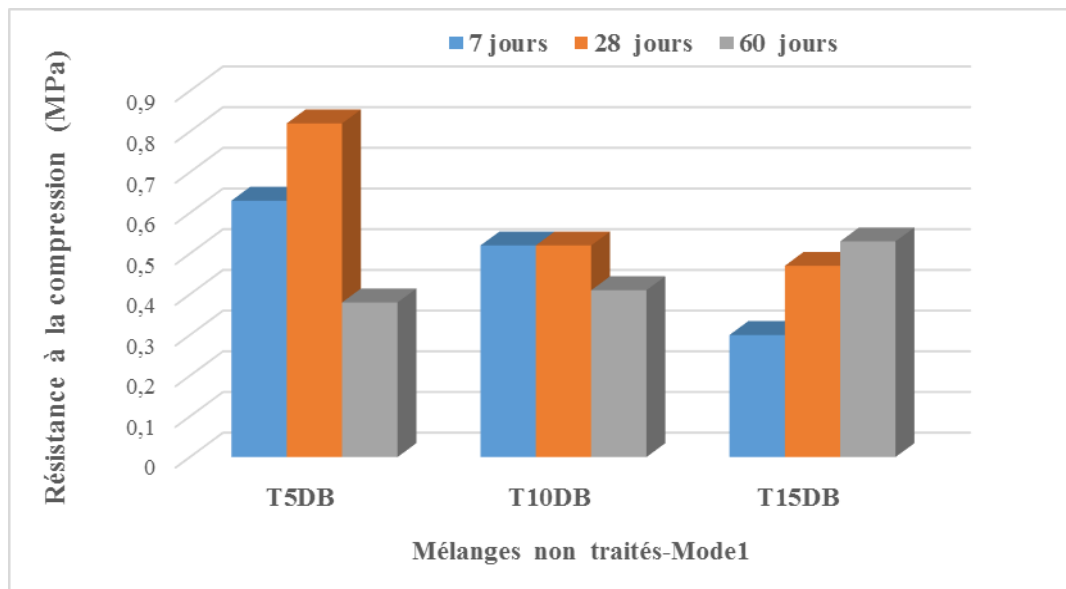


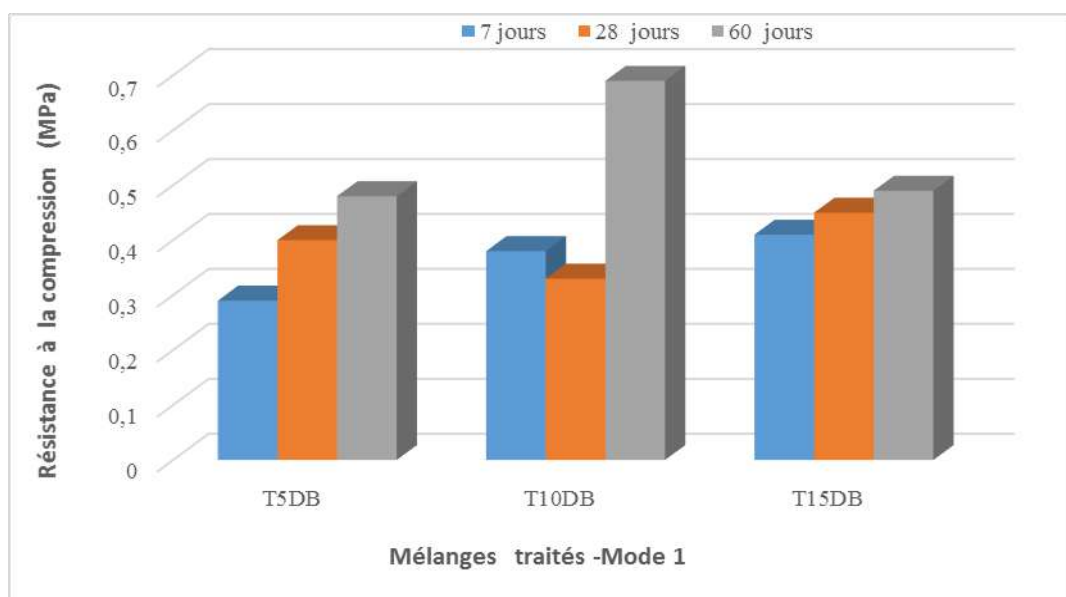
Figure. III.3)- Evolution de la Rc des mélanges non traités en mode 1

D'après la figure III.3 , qui représente l'évolutions de la Rc avec l'âge des différents mélanges non traité en mode 1 , nous remarquons que les résistances sont globalement faible , elles ne dépassent pas 1 MPa . Relativement, les résistances T5DB est les plus élevées en surtout r pour 7 et 28 jours. La diminution de la résistance des mélanges T10DB et T15DB peut être justifiée par l'augmentation de taux de déchets de briques incorporé dans le mélange dotant de faible cohésion.

**b) Evolution de la Rc pour les mélanges traités**

La figure III.4. illustre l'évolution de résistance des différents mélanges traités par la solution d'hydroxyde de sodium en mode 1.

Résultats montrent que malgré les faibles des résistances obtenues, le fait de préparer les éprouvettes par une solution alcaline entraîne une certaine amélioration de la Rc qui atteint sa valeur maximale à 60 jours. Ceci décèle que la poudre de déchets de briques, riche en minéraux réagit avec l'hydroxyde de sodium. Cette réaction qui est responsable au développement des liaisons entre les particules des mélanges.



**Figure. III.4)- Evolution de la Rc des mélanges traités en mode 1**

La comparaison entre les résistances des mélanges traités (MT) et non traités (MNT) pour les différents âges (figure. III.5/ III.6/ III.7) montre que l'efficacité du traitement apparaît à l'âge de 60 jours.

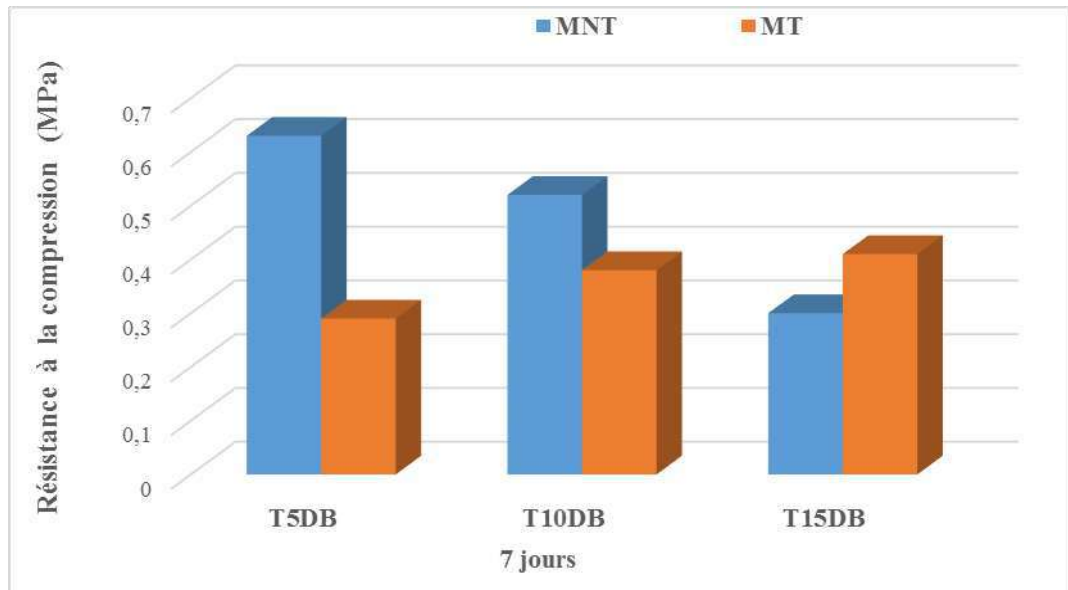


Figure. III.5.- Les résistances des mélanges non traités (MNT) et traité (MT) à 7 jours en mode 1

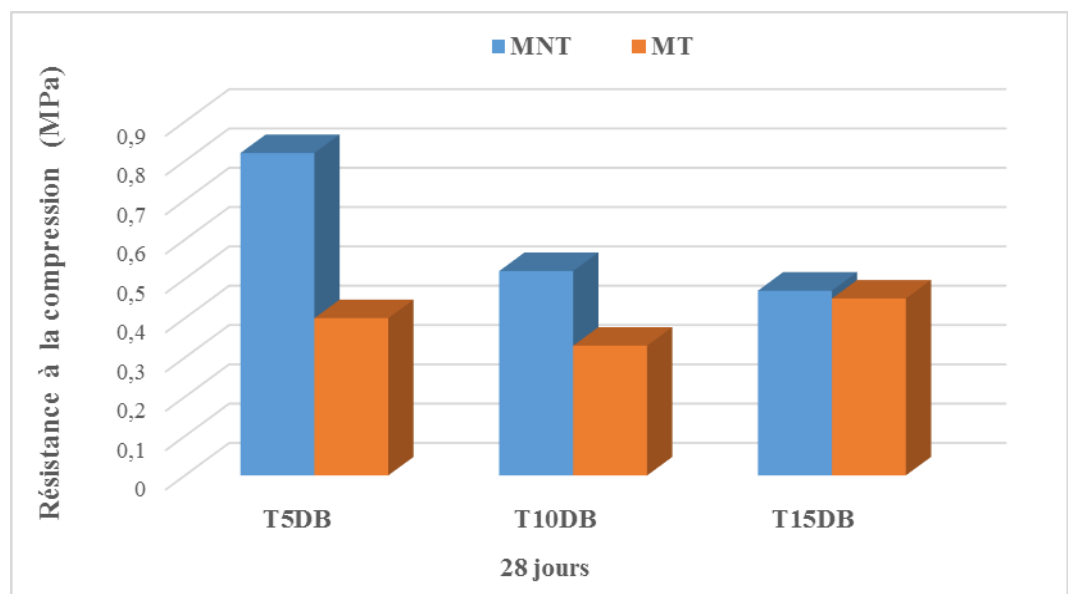


Figure. III.6.- Les résistances des mélanges non traités (MNT) et traité (MT) à 28 jours en mode 1

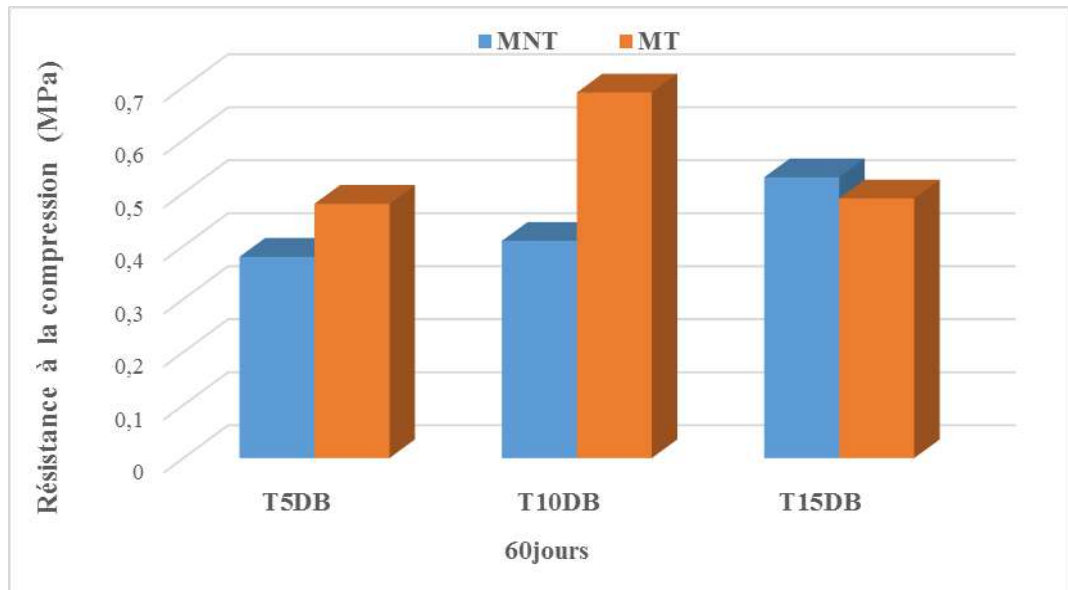


Figure. III.7.)- Les résistances des mélanges non traités (MNT) et traité (MT) à 60 jours en mode 1

c) Effet de Mode conservation des éprouvettes

(Figure III.8.) Présente l'évolution des résistances des mélanges traités dont les éprouvettes conservées en mode 2.

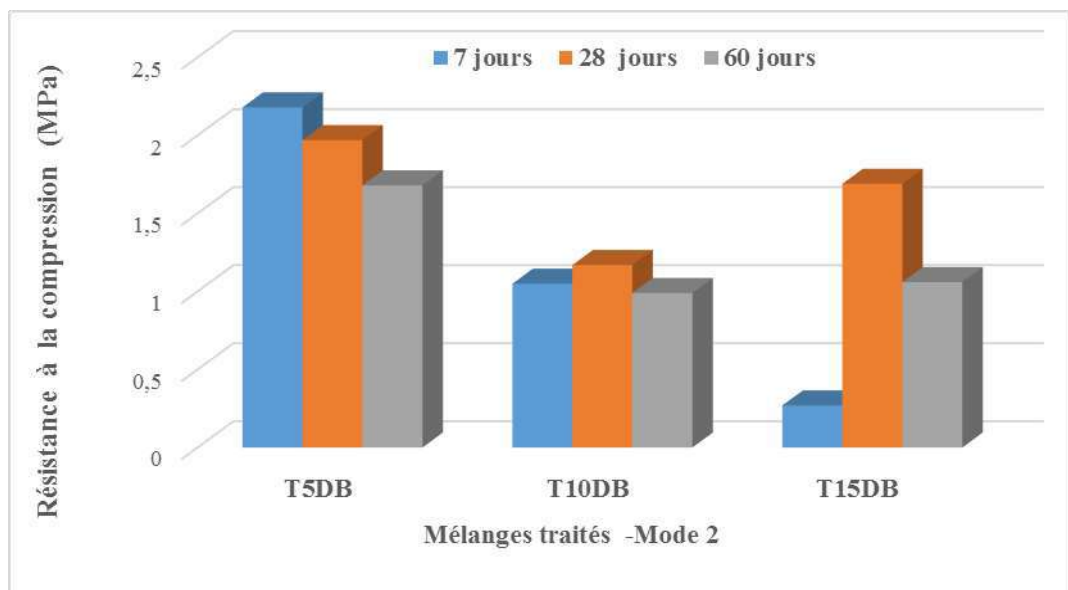


Figure. III.8.)- Evolution de la Rc des mélanges traités en mode 2

Les résultats montrent que presque toutes les résistances des mélanges T5DB et T10DB dépassent 1 MPa, ce qui n'est obtenu qu'en mode 01.

Les meilleures Rc sont celles du T5DB dont la valeur maximale est obtenue à 7 jours. La légère diminution de Rc à 28 et 60 jours peut s'expliquer par la perte de la cohésion due à l'évaporation d'une quantité au cours du temps.

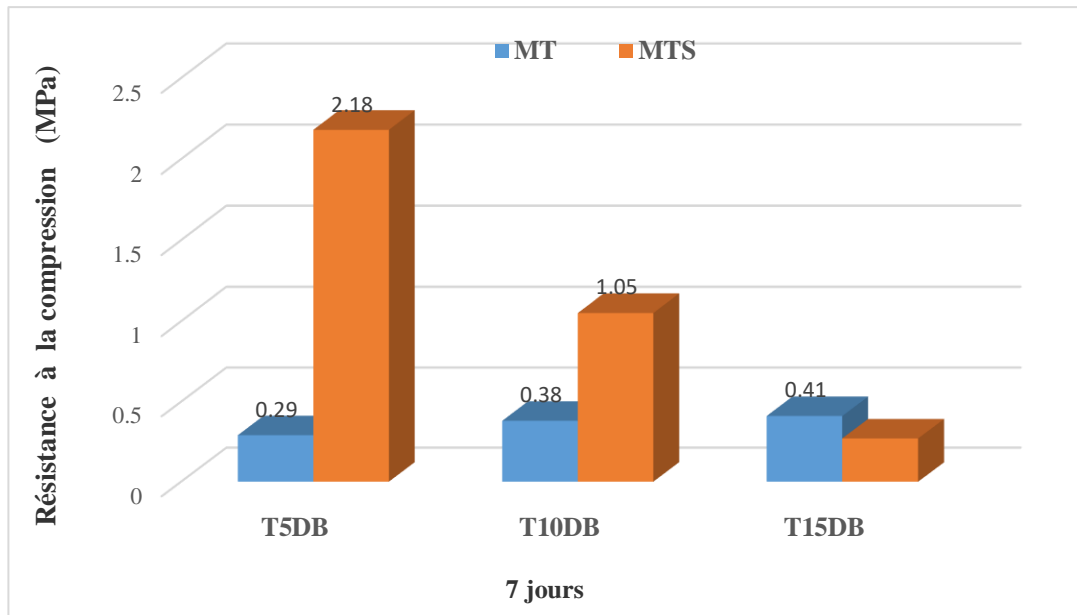


Figure. III.9.)- Les résistances des mélanges traités (MT) en mode1 et traité (MTS) en mode 2 à 7 jours

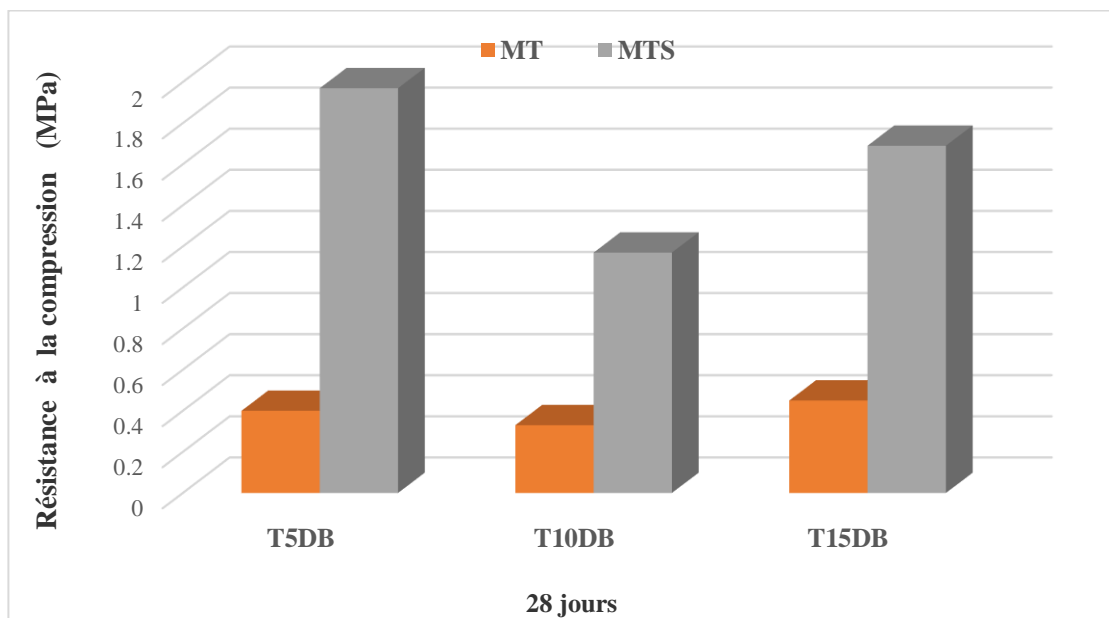


Figure. III.10.)- Les résistances des mélanges traités (MT) en mode1 et traité (MTS) en mode 2 à 28 jours

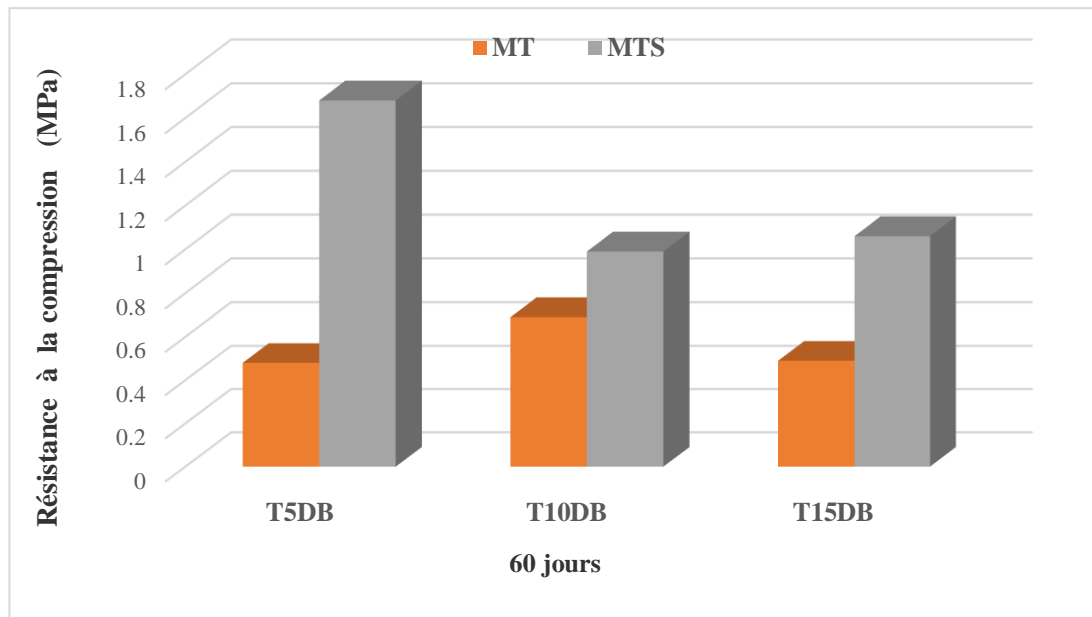


Figure. III.11.)- Les résistances des mélanges traités (MT) en mode1 et traité (MTS) en mode 2 à 60 jours

La comparaison (figure III.9. / III.10. / III.11.) Entre les résistances des éprouvettes des mélanges traités conservées en mode1 et celles conservées en Mode2 montre clairement l'effet du mode de conservation sur  $R_c$ . Les résistances élevées sont enregistrées lors de la conservation en mode2. Ce résultat démontre que la réaction établie entre la poudre de déchets de brique et la solution alcaline nécessite certaines conditions pour avoir lieu.

### III .4. Conclusion

Les résultats obtenus nous permettent de conclure ce qui suit :

- Les éprouvettes confectionnées à partir des différents mélanges non traités et conservées en mode1 donnent de faibles résistances à la compression qui ne dépassent pas 1MPa ;
- le traitement des mélanges en mode 1 par la solution d'hydroxyde de sodium contribue à l'augmentation de la résistance ;
- l'efficacité du traitement avec la solution de NaOH apparaît lorsque les éprouvettes sont conservées en mode2. Cela signifie qu'il faut certaines conditions pour que la poudre de déchets de briques réagisse avec la solution de NaOH et développe des liaisons entre les particules des mélanges et par conséquent, augmente la résistance ;
- la meilleure résistance est obtenue pour les éprouvettes de mélanges T5DB traités et conservés selon le mode1 à 60 jours

L'efficacité du traitement avec la solution de NaOH apparaît lorsque les éprouvettes sont stockées en mode 2. Cela signifie qu'il faut certaines conditions pour que la poudre de brique de rebut réagisse avec la solution de NaOH et développe des liaisons entre les particules des mélanges et donc augmente la force.

## CONCLUSION GÉNÉRALE



## CONCLUSION GENERALE

Ce travail a pour objectif de valoriser un tuf d'encroûtement de tuf doté de propriétés mécaniques médiocres et le recyclage des déchets de briques sous forme de poudre en vue de leur utilisation en construction saharienne. L'étude est focalisée sur l'examen de l'évolution de la résistance à la compression simple des mélanges tuf/ poudre déchets de briques traités par une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH).

Les essais d'analyse chimique effectuée sur le tuf ont révélés qu'il est de nature de gypseuse. Selon la classification GTR92, le matériau appartient à la classe B2, qui est considérée comme un sable argileux .Du point de vue performances mécaniques, le tuf a une portance moyenne (IPI =35) et une faible de résistance à la compression qui ne dépasse pas 1MPa.

Le fait de mélanger le tuf et la poudre de déchets de briques, et de plus le procédé de traitement par la solution de NaOH, nous permet de déduire ce qui suit :

- Les différents mélanges non traité et conservées aux conditions de laboratoire (mode 1) enregistrent des faibles résistances ;
- en mode 1, les mélanges traités par la solution d'hydroxyde de sodium marquent certaine augmentation de la résistance ;
- les résistances élevées sont obtenues pour les éprouvettes de mélanges T5DB traitées et conservées selon le mode1 à 60 jours ;
- L'efficacité du traitement avec la solution de NaOH apparaît lorsque les éprouvettes sont conservées en mode 2, c'est -à-dire lorsqu'elles sont conservées dans des sachets plastiques pendant la moitié de la durée, puis conservées sans sachets pendant le reste de la durée dans les conditions de laboratoire ;

L'augmentation de la résistance en mode 2 est peut être considérée comme un indice préliminaire de l'existence d'une interaction entre la poudre de déchets de briques et la solution alcaline.

## RÉFÉRENCE BIBLIOGRAPHIE

1. Khalili Khadîdja (2016) Caractérisation mécanique d'un mélange : Tuf + sable de dunes, MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES DE MASTER.
2. LOUALBIA Hamza (2017) Intitulée Valorisation des tufs d'encrouement en technique routière, Thèse Pour l'obtention du Diplôme de Docteur en Génie Civil Option : Matériaux innovants dans le génie civil.
3. KHELLOU Abderrezak (2011), modélisation du comportement des matériaux sable gypso-calcaires, Mémoire de MAGISTER
4. OMRANI SADEK et ZITOUT NOUREDDINE ALI (2016) Étude en APD de la modernisation d'un tronçon de la route national RN40B avec l'étude géotechnique dutuf calcaire, thèse master.
5. MERMAT FARES et KICHE ABDNOURE (2017). THEME Etude et caractérisation physique et mécanique de plâtre recyclé .thèse master.
6. Isis BRABET (2012), LE TRAITEMENT DES SOLS POUR LA COUCHE DE FORME, PLATEFORME DE CHAUSSEE. LE DIPLOME D'INGENIEUR CNAM
7. Oudni Selma (2018).Thème EFFET DU TRAITEMENT DES SOLS LIMONEUX PAR LA CHAUX SUR LES CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE. Thèse master
8. BOUHEMAME NESRINE (2021), Etude expérimentale du comportement des sédiments de barrage traités avec du Ciment et Métakaolin. Mémoire de Master
9. <https://www.infociments.fr/liants-hydrauliques-routiers/liants-hydrauliques-routiers-generalites>
10. Baba Hassane AHMED HISSEINI, (2021), Traitement par alcali-activation et géopolymérisation de sols argileux : caractérisations physicochimique, géotechniqueet environnementale. Diplôme de Docteur
11. <https://stock-chimie.com/products/soude-caustique>
12. Hydroxyde de sodium et solutions aqueuses - Edition : Avril 2021.  
[www.inrs.fr/fichetox](http://www.inrs.fr/fichetox)
13. HAFSI Abdellatif (2010), Les Tufs Gypseux et Calcaires en Zones Arides Essais et Critères de Sélection

14. TP matériaux de Construction
15. M. GHOMARI F. & Mme BENDI-OUIS A (2008), SCIENCE DES MATERIAUXDE CONSTRUCTION Travaux pratiques. UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID
16. ARVOR Géotechnique Ingénierie des sols et des fondations
17. TP N°4 : ESSAI DE COPACTAGE (ESSAI PROCTOR) (NF P 94-093), UniversitéMohamed Khider Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie
18. Mustapha. AKACEM\* ; Abdelkader. HACHICHI (2013), Utilisation du sable de dunes en construction routière saharienne
19. Classification des sols Norme NF P 11 300 et G.T.R <https://pdfprof.com>