

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université d'El-Oued.

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civile

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master II en Génie Civile.

Option : Matériaux de génie civile.

THEME

**Contribution à l'amélioration des caractéristiques
physico-mécaniques des sables gypseux de la région
d'El-Oued.
(Etude expérimentale).**

Dirigé par :

Mr. DJEDID Tarek.

Présenté par :

- **BELLABACI Salem.**
- **MAHMOUDI Bachir.**

Année Universitaire : 2018 / 2019.



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail
A mes parents,
A ma petite famille : Ma femme et mes frères.*

*A tous mes amis de proche ou de loin,
A tous ceux qui me sont chers, et qu'ils trouvent leur place
dans mon cœur.*

BELLABACI Salem



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail
Aux esprits de défunts parents, que le bon dieu bénisse leurs
âmes et les logent dans ses vastes paradis éternelles,*

A ma petite famille : Ma femme et mes frères.

*A tous mes amis de proche ou de loin,
A tous ceux qui me sont chers, et qu'ils trouvent leur place
dans mon cœur.*

MAHMOUDI Bachir

Remerciements

Tous D'abord nous remercions infiniment le bon DIEU le grand puissant qui nous a donné la force et la patience pour terminer ce travail.

Nous exprimons nos sincères remerciements, à notre respectable promoteur DJEDID Tarek pour son aide et ses inappréciables conseils, à mes amis MEDELLEL Abdelhafid et MOUSSAOUI Nabil.

A l'ensemble des enseignants du département de Génie civil et hydraulique.

Sans oublier ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

*BELLABACI Salem
MAHMOUDI Bachir*

ملخص

هذا العمل يدخل في إطار تهيئة المواد المحلية (الرمال الجبسية) من أجل الاستجابة للطلب الكبير في منطقة الجنوب الشرقي الجزائري و خاصة منطقة وادي سوف و ذلك لاستعماله في إنجاز بنية الطرق.

إن الهدف المرجو من الدراسة في المخبر هو إخضاع مادة الرمل الجبسي (مادة محلية ذات نوعية ضعيفة) المجلوب من محجر طريق الحنة الصفراء الواقع بإقليم بلدية وادي العلو بولاية الوادي، إلى معالجة و ذلك بإضافة الجير المائي على شكل نسب مختلفة 2% ، 4% ، 6% و 8% من أجل تحسين الخصائص الميكانيكية و خاصة مقاومة الضغط البسيط.

من خلال هذه الدراسة في المخبر، بينا تأثيرات بعض العوامل على مقاومة الضغط البسيط للرمال الجبسية المعالج، منه تأثير نسبة الرابط لمختلف الأعمار، تأثير ماء الرص و تأثير وقت التجفيف و نسبة الماء النهائية.

و قد خلصت الدراسة، أن معالجة المواد المحلية (الرمال الجبسية) ذو خصائص ميكانيكية متوسطة بالنسبة للنظم التقنية المعمول بها في إنجاز الطرق بإضافة نسبة معينة من مادة الجير المائي، مكنت من التوصل إلى خصائص ميكانيكية عالية و تحسين نوعية و تهيئة المادة المحلية الفقيرة (الرمال الجبسية) حتى يتم استعمالها في بنية الطرق في المناطق الجافة و الشبه جافة.

الكلمات المفتاحية : الرمل الجبسي، مقاومة الضغط البسيط، المعالجة و تهيئة.

RESUME

Ce travail entre dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux (sable gypseux) dans le but de répondre aux besoins intensifs de la région Sud-est de l'Algérie et particulièrement la région d'El-Oued, en vue de son emploi en construction routière.

L'objectif de cette étude au laboratoire est de faire subir le sable gypseux (matériau local de faible qualité) de la carrière route KHOBNA SAFRA située au territoire de la commune d'Oued El-Allenda dans la wilaya d'El-Oued, au traitement par l'ajout de la chaux hydratée avec des différents pourcentages de 2%, 4%, 6% et 8% pour améliorer ses caractéristiques mécaniques et particulièrement la résistance à la compression simple.

Dans cette étude au laboratoire, on a montré les influences des quelques paramètres sur la résistance à la compression simple pour le sable gypseux traité, tels que influence de la teneur en liant pour différents âges, Influence de l'eau de compactage et Influence du temps de séchage et la teneur en eau finale.

Cette étude a conclu que le traitement d'un matériau local (sable gypseux) à priori dont ses caractéristiques mécaniques sont médiocres par rapport aux normes de construction routière, peut améliorer la qualité de ce matériau et de le faire valoriser pour qu'il soit employé en corps de chaussée en zone aride et semi-aride.

Mots-clés: Sables gypseux, la résistance à la compression simple, traitement et valorisation.

ABSTRACT

This work is part of the valorization of local materials (gypsum sand) in order to meet the intensive needs of the South-East region of Algeria and particularly the region of El-Oued, with a view to its use in road construction.

The objective of this study in the laboratory is to subject the gypsum sand (low quality local material) of the road quarry KHOBNA SAFRA situated in the territory of the municipality of Oued El-Allenda in the wilaya of El-Oued, at treatment by adding hydrated lime with different percentages of 2%, 4%, 6% and 8% to improve its mechanical characteristics and particularly the simple compressive strength.

In this laboratory study, the influence of the few parameters on the simple compressive strength of treated gypsum sand has been shown, such as influence of binder content for different ages, Influence of compaction water and Influence of time. drying and the final water content.

This study concluded that the treatment of a local material (gypsum sand), whose mechanical characteristics are mediocre compared to road construction standards, can improve the quality of this material and make it more valuable for it to be used in pavement in arid and semi-arid zones.

Keywords: Gypsum sands, simple compressive strength, recovery and treatment.

Liste des figures

Figure 1 : Profil d'un encroûtement calcaire	4
Figure 2 : Profil d'un encroûtement gypseux	6
Figure 3 : Formation d'encroûtement gypseux par dépôt selon DURAND.....	8
Figure 4 : Formation d'encroûtement par évaporation	8
Figure 5 : Vue aérienne de la carrière route KHOBNA SAFRA	14
Figure 6 : Vue de la carrière route KHOBNA SAFRA	14
Figure 7 : Vue de la couche du sable gypseux carrière route KHOBNA SAFRA	14
Figure 8 : Essai d'équivalent de sable	16
Figure 9 : Essai de limite de liquidité (Cité par : ROBERT ; 2011-2012)	17
Figure 10 : Essai de limite de plasticité	18
Figure 11 : Plages des limites d'ATTERBERG	18
Figure 12 : Classification des sols fins : Diagramme de plasticité (selon L.C.P.C).....	20
Figure 13 : Calcimètre DIETRICH FRUHLING	21
Figure 14 : Matériels pour essai Proctor (Cité par : MEBARKI ; 2008)	24
Figure 15 : Essai Proctor Modifié au laboratoire.....	25
Figure 16 : Eprouvettes confectionnés en sable gypseux.....	25
Figure 17 : Ecrasement d'éprouvettes en sable gypseux.....	26
Figure 18 : Essai C.B.R (Presse C.B.R).....	26
Figure 19 : Courbe granulométrique d'échantillon du sable gypseux (Carrière route KHOBNA SAFRA).....	29
Figure 20 : Graphique limite de liquidité (W_L).....	30
Figure 21 : Courbe Proctor Modifié.....	32
Figure 22 : Courbe C.B.R.....	34
Figure 23 : Courbe granulométrique d'échantillon du sable gypseux (Sable gypseux + 2% de la chaux).....	35
Figure 24 : Courbe Proctor Modifié (Sable gypseux + 2% de la chaux).....	36
Figure 25 : Courbe granulométrique d'échantillon du sable gypseux (Sable gypseux + 4% de la chaux).....	37
Figure 26 : Courbe Proctor Modifié (Sable gypseux + 4% de la chaux).....	38
Figure 27 : Courbe granulométrique d'échantillon du sable gypseux (Sable gypseux + 6% de la chaux).....	40
Figure 28 : Courbe Proctor Modifié (Sable gypseux + 6% de la chaux).....	41

Table des matières

Figure 29 : Courbe granulométrique d'échantillon du sable gypseux (Sable gypseux + 8% de la chaux).....	42
Figure 30 : Courbe Proctor Modifié (Sable gypseux + 8% de la chaux).....	43
Figure 31 : Courbes Influence de la teneur en liant sur la résistance à la compression simple pour différents âges.....	46
Figure 32 : Courbes Influence de la teneur en eau de compactage sur la résistance à la compression simple.....	47
Figure 33 : Courbes Influence du temps de séchage sur la résistance à la compression (RC).49	
Figure 34 : Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC).....	53

Liste des tableaux

Tableau 1 : Equivalent de sable pour différents types d'encroûtements.....	17
Tableau 2 : Indice de plasticité pour différents types d'encroûtements	19
Tableau 3 : Classification des sols grenus (selon L.C.P.C).....	20
Tableau 4 : Les différents types d'encroûtements selon la nature chimique.....	23
Tableau 5 : La différence entre Proctor Normal et Proctor Modifié (cité par : Alain et Eric ; 2010)	24
Tableau 6 : Indice CBR immédiat et imbibé pour différents types d'encroûtements	27
Tableau 7: Analyse granulométrique d'échantillon du sable gypseux (Carrière route KHOBNA SAFRA).....	29
Tableau 8 : Calcul des teneurs en eau (Limite de liquidité).....	30
Tableau 9 : Résultats de calcul des densités sèches.....	31
Tableau 10 : Résultats de la résistance à la compression simple.....	33
Tableau 11 : Calcul de l'indice CBR.....	33
Tableau 12 : Analyse granulométrique d'échantillon du sable gypseux (Traitement à 2% de la chaux).....	35
Tableau 13 : Résultats essai Proctor modifié (Sable gypseux + 2% de la chaux).....	35
Tableau 14 : Résultats de la résistance à la compression simple (Sable gypseux + 2% de la chaux).....	36
Tableau 15 : Analyse granulométrique d'échantillon du sable gypseux (Traitement à 4% de la chaux).....	37
Tableau 16 : Résultats essai Proctor modifié (Sable gypseux + 4% de la chaux).....	38
Tableau 17 : Résultats de la résistance à la compression simple (Sable gypseux + 4% de la chaux).....	39
Tableau 18 : Analyse granulométrique d'échantillon du sable gypseux (Traitement à 6% de la chaux.....	39
Tableau 19 : Résultats essai Proctor modifié (Sable gypseux + 6% de la chaux).....	40
Tableau 20 : Résultats de la résistance à la compression simple (Sable gypseux + 6% de la chaux.....	41
Tableau 21 : Analyse granulométrique d'échantillon du sable gypseux (Traitement à 8% de la chaux.....	42
Tableau 22 : Résultats essai Proctor modifié (Sable gypseux + 8% de la chaux).....	43

Table des matières

Tableau 23 : Résultats de la résistance à la compression simple (Sable gypseux + 8% de la chaux.....	44
Tableau 24 : Influence de la teneur en liant sur la résistance à la compression simple pour différents âges.....	45
Tableau 25 : Récapitulatif Influence de la teneur en liant sur la résistance à la compression simple pour différents âges.....	45
Tableau 26 : Influence de l'eau de compactage sur la résistance à la compression simple.....	47
Tableau 27 : Influence du temps de séchage sur la résistance à la compression (RC).....	48
Tableau 28 : Récapitulatif Influence du temps de séchage sur la résistance à la compression (RC).....	49
Tableau 29 : Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC).....	51
Tableau 30 : Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC) pour teneur en liant 2 et 4%.....	51
Tableau 31 : Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC) pour teneur en liant 6 et 8%.....	51
Tableau 32 : Récapitulatif Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC) pour différentes teneurs en liant.....	52

SOMMAIRE

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I

Etude bibliographique.

I.1 Introduction.....	3
I.2 Les encroûtements calcaires.....	3
I.2.1 Profil des encroûtements calcaires.....	4
I.2.2 Les essais fondamentaux.....	5
I.3 Les encroûtements gypseux.....	5
I.3.1 Profil des encroûtements gypseux.....	5
I.3.2 Les essais fondamentaux.....	6
I.4 Les encroûtements mixtes (Tufts gypso-calcaires).....	6
I.5 Le gypse dans la nature.....	7
I.6 Formation des encroûtements gypseux.....	7
I.6.1 Les gypses Pulvérulents.....	8
I.6.2 Les encroûtements gypseux	8
I.7 Les Critères de sélection.....	8
I.8 Utilisation du sable gypseux en technique routière.....	9
I.9 La chaux.....	10
I.9.1 Définition de la chaux.....	10
I.9.2 Fabrication de la chaux.....	10
I.9.2.1 Préparation du calcaire.....	10
I.9.2.2 Cuisson.....	10
I.9.3 Type de chaux.....	11
I.9.3.1 Chaux aériennes.....	11
I.9.3.2 Chaux vive.....	11
I.9.3.3 Chaux magnésiennes.....	11
I.9.3.4 Chaux hydraulique.....	12
I.10 Conclusion.....	12

Chapitre II

Matériaux et méthodes expérimentales.

II.1 Introduction.....	13
II.2 Les avantages du traitement.....	13

Table des matières

II.3 Préparation du matériau.....	13
II.4 Choix de la teneur en eau du traitement.....	13
II.5 Les essais d'identification.....	14
II.5.1 Analyse granulométrique (NF P 94 – 056).	14
II.5.1.1 But de l'essai.....	14
II.5.1.2 Préparation de l'échantillon.....	15
II.5.1.3 Tamisage sous l'eau.....	15
II.5.1.4 Calcul des résultats.....	15
II.5.1.5 Fuseaux de référence.....	15
II.5.2 Equivalent de sable (NF P 18 – 598).....	16
II.5.3 Les limites d'ATTERBERG (NF P 94 – 051).....	17
II.5.3.1 Limite de liquidité (W_L).....	17
II.5.3.2 Limite de plasticité (W_p).....	18
II.5.3.3 Indice de plasticité (I_p).....	19
II.5.4 Les analyses chimiques.....	20
II.5.4.1 Détermination de la teneur en carbonates (NF P 15 – 461).....	20
II.5.4.2 Détermination des insolubles (NF P 15 – 461).....	22
II.5.4.3 Détermination de la teneur en sulfates.....	22
II.5.5 Essai Proctor (NF P 94 – 093).....	23
II.5.6 Essai de la résistance à la compression simple.....	25
II.5.7 Essai de portance C.B.R (NF P 94 – 078).....	26
II.6 Méthode C.B.R (Californian-Bearing-Ratio).....	27
II.7 Conclusion.....	28

Chapitre III

Résultats et interprétations.

III.1 Introduction.....	29
III.2 Résultats obtenus (avant traitement).....	29
III.2.1 Analyse granulométrique.....	29
III.2.2 Equivalent de sable.....	30
III.2.3 Limites d'ATTERBERG.....	30
III.2.3.1 Limite de liquidité.....	30
III.2.3.2 Limite de plasticité.....	31
III.2.3.3 Indice de plasticité.....	31

Table des matières

III.2.4 Les analyses chimiques.....	31
III.2.5 Essai Proctor Modifié.....	31
III.2.6 Essai de la résistance à la compression simple.....	32
III.2.7 Essai C.B.R.....	33
III.3 Résultats obtenus (après traitement).....	34
III.3.1 Addition de la chaux à 2%.....	34
III.3.1.1 Essai d'analyse granulométrique.....	34
III.3.1.2 Essai Proctor modifié.....	35
III.3.1.3 Essai de la résistance à la compression simple.....	36
III.3.2 Addition de la chaux à 4%.....	36
III.3.2.1 Essai d'analyse granulométrique.....	37
III.3.2.2 Essai Proctor modifié.....	38
III.3.2.3 Essai de la résistance à la compression simple.....	38
III.3.3 Addition de la chaux à 6%.....	39
III.3.3.1 Essai d'analyse granulométrique.....	39
III.3.3.2 Essai Proctor modifié.....	40
III.3.3.3 Essai de la résistance à la compression simple.....	41
III.3.4 Addition de la chaux à 8%.....	41
III.3.4.1 Essai d'analyse granulométrique.....	42
III.3.4.2 Essai Proctor modifié.....	43
III.3.4.3 Essai de la résistance à la compression simple.....	43
III.4 Influence du traitement sur la résistance.....	44
III.4.1 Influence de la teneur en liant sur la RC pour différents âges.....	44
III.4.2 Influence de l'eau de compactage sur la résistance à la compression simple.....	46
III.4.3 Influence du temps de séchage sur la résistance à la compression (RC) pour différentes teneurs en liant.....	48
III.4.4 Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC).....	50
III.5 Conclusion.....	52
Conclusion générale et perspective.....	53
Bibliographie	

Introduction générale.

Les encroûtements gypseux couvrent une grande partie du Sud-est Algérien (Ouargla, El-Oued, Tougourt), l'utilisation des sables gypseux comme matériaux du corps de chaussée date des années 50, leur abondance ainsi que leur facilité d'extraction et l'absence de tous autres matériaux de substitution en ont fait des matériaux économiques très utilisés dans les zones subhumides à arides de l'Algérie.

Ces matériaux possèdent des caractéristiques géotechniques différentes à celles relatives aux matériaux classiques utilisés dans la technique routière des zones humides, ce matériau a longtemps été utilisé d'une manière empirique, c'est-à-dire en l'absence des spécifications particulières.

Vu l'abondance du sable gypseux dans la région Sud-est de l'Algérie, et vu l'éloignement des gites du sable gypseux de bonne qualité par rapport aux projets routiers et dans la perspective de valoriser l'utilisation de ce matériau local qui se trouve sous forme des gites de moyenne qualité, il paraît nécessaire de traiter ce matériau pour améliorer sa qualité pour qu'il soit utilisé en corps de chaussée des routes.

L'objet de l'amélioration physico-mécanique (étude au laboratoire) est de déterminer les caractéristiques physiques et mécaniques des sables gypseux traités, ces caractéristiques sont définies essentiellement par la résistance à la compression simple.

Dans cette étude qui vise à améliorer la qualité des sables gypseux de moyenne qualité, on va traiter le sable gypseux par incorporation de la chaux hydratée en différentes proportions, jusqu'à l'obtention des caractéristiques qui répondent aux spécifications techniques de la construction routière.

L'étude a été axée essentiellement sur le comportement des sables gypseux traités à la chaux hydratée sous l'influence de la variation des différents paramètres qui se traduisent par :

- ☒ La teneur en liant (la chaux),
- ☒ La teneur en eau de compactage,
- ☒ Le temps de séchage,
- ☒ La teneur en eau finale.

L'étude que nous avons menée, ne concerne que l'influence de certains paramètres (teneur en liant, teneur en eau de compactage, etc.) sur la résistance à la compression simple.

Aussi, dans cette étude nous ne sommes pas préoccupés par la tenue dans l'eau du matériau, vu qu'au Sahara on est préoccupé par la dessiccation plutôt que par l'humidité comme c'est le cas dans les régions du nord.

Ce travail se divise en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographique présentant les types des encroûtements (les essais fondamentaux, formation, ...) et le matériau utilisé pour le traitement (chaux hydratée).

Le deuxième chapitre aborde les essais d'identification et de comportement de matériau prélevé avant et après traitement.

Dans le troisième chapitre, et sur la base des résultats obtenus, on a commenté les influences des paramètres sur la résistance à la compression simple à savoir :

- ☒ La teneur en liant (la chaux),
- ☒ La teneur en eau de compactage,
- ☒ Le temps de séchage,
- ☒ La teneur en eau finale.

Finalement, une conclusion générale sur l'amélioration du sable gypseux de la région d'El-Oued (étude au laboratoire).

Chapitre I : Etude bibliographique.

I.1 Introduction

Tuf : dans le langage ordinaire, le mot désigne toute roche de porosité élevée et de faible densité, souvent pulvérulente. Les tufs d'encroûtements font partie des matériaux subnormaux utilisés en construction routière dans de nombreux pays à climat aride ou subhumide. Ils sont classés, suivant leur nature chimique, en trois catégories : [2] [3]

Dans la bibliographie, les tufs se définissent comme étant des formations superficielles, tendres, 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.

Suivant leur composition, les tufs se groupent en trois catégories : les tufs calcaires, les tufs gypseux et les tufs mixtes [5].

I.2 Les encroûtements calcaires

Les encroûtements calcaires se sont les calcaires des régions semi-aride ou aride, des formations récentes et de dureté très variables (selon les horizons rencontrés).

Ces matériaux acquièrent une forte cohésion après séchage lorsqu'ils ont été compactés en présence d'eau, cette cohésion disparaît si le matériau est à nouveau saturé.

Les tufs calcaires existent dans la plupart des pays du bassin méditerranéen et occupent les zones à climat sec.

L'abondance de cette ressource naturelle, fait que leur utilisation comme matériau routier est devenu de plus en plus répandue.

Pour toutes les définitions proposées, on peut retenir celle donnée par :

- Goudie (Goudie, 1988) : « La croute calcaire est un matériau terrestre composé essentiellement, mais pas exclusivement des carbonate de calcium. Les croutes existent à l'état poudreux, nodulaire ou très induré; elles sont dues à la cimentation, à l'accumulation ou au remplacement des quantités plus au moins grandes de sols, roches ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration. »
- D'après certains résultats (Hamrouni, 1975 ; DE Os Horta, 1979) : « Les tufs calcaires sont des roches calcaires ayant un Los Angeles supérieur à 60, une masse volumique inférieure à 20 KN/m³, une résistance à la compression simple comprise entre 5 et 10 MPa, et dont la teneur en éléments fins passant au tamis de 80 microns, obtenus sur la fraction 0/20 du matériau après extraction, est de l'ordre de 10 à 40% ».

I.2.1 Profil des encroûtements calcaires

Dans une formation d'encroûtement calcaire, on distingue généralement trois horizons définis comme suite :

- Horizon A :

C'est la couche végétale d'épaisseur décimétrique, elle peut inexister en cas d'érosion.

- Horizon B :

C'est l'encroûtement proprement dit, il comprend :

- ☒ Une dalle compacte dure à forte teneur en carbonate et dont l'épaisseur de quelques décimètres.
- ☒ Une croûte de dureté plus faible que la dalle, c'est l'encroûtement à structure feuilletée.
- ☒ Une zone nodulaire, avec nodules de calcaires durs pris dans une masse de calcaire pulvérulent.

- Horizon C :

C'est le matériau d'origine (roche mère) d'enrichissement calcaire.

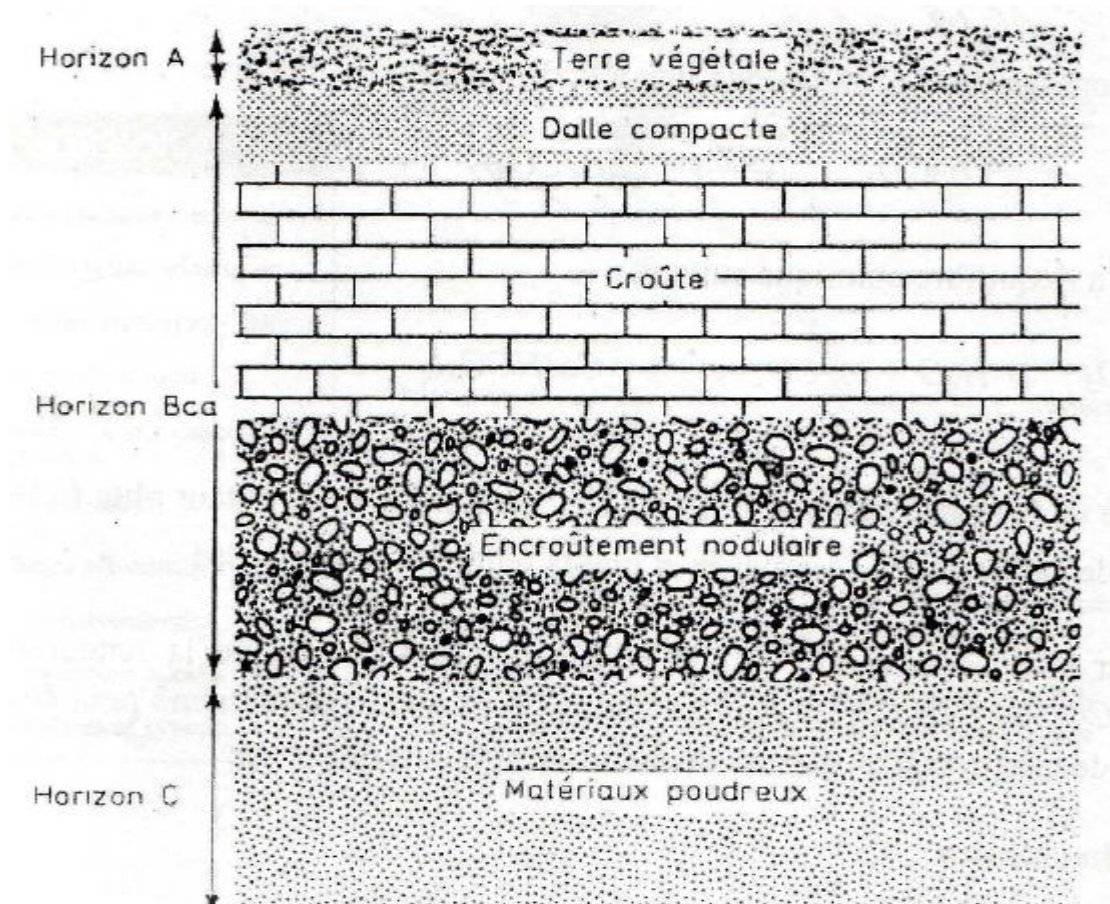


Figure 1 : Profil d'encroûtement calcaire [9].

I.2.2 Les essais fondamentaux [12]

Les essais fondamentaux sont :

1. Analyse chimiques : La teneur en carbonates CaCO_3 déterminée par l'attaque à l'acide chlorhydrique (HCl) varie pour un bon encroûtement calcaire entre 50% et 95%.
2. Granulométrie : On regroupera les courbes granulométriques en trois fuseaux types :
 - ☒ 0/D issu de concassage des éléments les plus durs d'un gisement (dalle et partie supérieure de la croute).
 - ☒ 0/D issu d'encroûtements feuilletés.
 - ☒ 0/D issu d'un gisement massif tendre. ,
3. Dureté : Le coefficient Los Angeles mesuré sur le matériau d'encroûtement varie entre 30% d'usure pour les dalles les plus compactes, et 60% d'usure pour les croutes les plus faibles.
 - ☒ Tuf à squelette LA est inférieur à 40%.
 - ☒ Tuf friable LA varie entre 40% à 80%.
 - ☒ Tuf pulvérulent LA est supérieur à 80%.

I.3 Les encroûtements gypseux

Les gisements des sables gypseux en zone aride, se sont formés à différentes époques du quaternaire par dépôt de gypse dans le sol à partir des nappes phréatiques séléniteuses.

Les sables gypseux ont un grain dont le diamètre est compris entre 0,1 et 2 mm, chaque grain est agglutination des cristaux microscopiques, il peut se présenter aussi en cristaux plus gros allant jusqu'à 5 mm.

Les sables gypseux formés aux alentours des chotts contiennent une proportion plus ou moins importante de sel.

Les encroûtements gypseux sont des formations analogues aux encroûtements calcaires. Ils sont très abondants dans les régions à climat aride où les précipitations sont insuffisantes pour lixivier le gypse, qui existe déjà dans les formations géologiques anciennes (Crétacé au Miopliocène) (Frenkel et al, 1986 ; Schiote, 2003 ; Alfaya, 2004). 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.

I.3.1 Profil des encroûtements gypseux

Le profil d'un sol encroûté par le gypse présente généralement trois horizons principaux.

- ☒ L'horizon appelé "TIRCH" en arabe, est caractérisé par l'abondance de racine de gypse, feuillets et granules.
- ☒ Sous cet horizon, vient l'encroûtement massif qui se présente sous forme d'un massif de grès à ciment gypseux "TAFZA" en arabe, il est compacté mais il conserve une certaine porosité, après remaniement, il a la granulométrie d'un sable, d'où, le nom de sable gypseux, c'est uniquement cet horizon qui a un intérêt en construction routière.
- ☒ Le troisième horizon est celui des roses de sable appelé "LOUSS" en arabe, à ce niveau le gypse se cristallise au contact direct de la nappe en agrégat des cristaux larges et aplatis (voir schéma ci-après).

Horizon A	" TIRCH "	Epaisseur 10 – 20 cm
Horizon B	" TAFEZA "	Epaisseur 40 – 100 cm
Horizon C	" LOUSS "	Epaisseur 40 cm

Figure 2 : Profil d'un encroûtement gypseux.

I.3.2 Les essais fondamentaux [12]

Les essais fondamentaux sont :

1. Analyse chimiques : Les analyses chimiques réalisées sur plusieurs échantillons du matériau par les laboratoires agréés, montrent la prédominance de gypse dans la constitution du matériau (20% à 90% de $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$).
 2. Granulométrie : La granulométrie des sables gypseux doit s'insérer dans les fuseaux de référence, fuseau de classe 0/5 et fuseau de classe 0/2.
 3. Résistance à la compression simple : Cet essai nous permet d'estimer la cohésion du matériau, il est effectué par moulage et serrage de matériau à la presse aux conditions de l'optimum Proctor dans un moule de type Sol-Ciment.
- L'écrasement se fait à une teneur en eau finale de 0%.

I.4 Les encroûtements mixtes (Tufs gypso-calcaires)

La granulométrie de ces tufs est aléatoire, avec une tendance à se classer du côté des matériaux fins. Les matériaux appartenant à la première catégorie sont les plus prisés pour la construction routière mais sont peu abondants. Ceux appartenant aux deux autres catégories font

partie des matériaux fins, sans squelette granulaire. Leur utilisation est admise en Technique Routière Saharienne à condition qu'ils remplissent un certain nombre de critères.

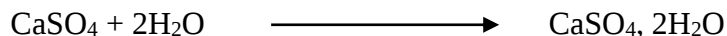
Les tufs d'encroûtements sont des matériaux dotés de cohésion qu'ils acquièrent après compactage puis dessiccation prolongée. C'est ce durcissement, appelé aussi auto stabilisation, qui a permis leur utilisation en corps de chaussée malgré des caractéristiques géotechniques qui s'écartent des spécifications usuelles des pays tempérés. [2] [3] [4]

I.5 Le gypse dans la nature

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 la plus caractéristique de ce minéral est sa faible dureté.

L'utilisation de granulats de gypse ne pourrait conduire qu'à des échecs, mais la sulfate de calcium possède d'autres propriétés qui lui permettent d'en faire un matériau de construction très apprécié.

La première de ces propriétés mise au profit dans le plâtre est celle d'hydratation. En présence d'eau, le sulfate de calcium anhydre (anhydrite) ou partiellement hydraté (semi-hydraté) réagit avec celui-ci lentement et recristallise en gypse.



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

La deuxième propriété importante du gypse, est sa solubilité dans l'eau quoique moins soluble que d'autres sels comme la halite (NaCl), le gypse possède une solubilité assez importante dans l'eau de l'ordre de quelques grammes par litre.

I.6 Formation des encroûtements gypseux

Dans la nature, le gypse se dépose par évaporation des solutions concentrées de sulfates en milieu confiné (lagunes littorales, chotts, sebkhas) pour former avec d'autres sels des roches sédimentaires appelées évaporites.

Les gisements de sables gypseux de la zone aride ont une autre origine, il s'agit des encroûtements gypseux formés à différentes époques du quaternaire par dépôt du gypse dans le sol à partir de l'évaporation des nappes phréatiques séléniteuses.

D'après [1], DURAND distingue, en Algérie les gypses pulvérulents et les encroûtements gypseux :

I.6.1 Les gypses Pulvérulents

Les gypses pulvérulents comme étant des « dépôts lagunaires formés au moment de l'assèchement des lacs » (figure 2).

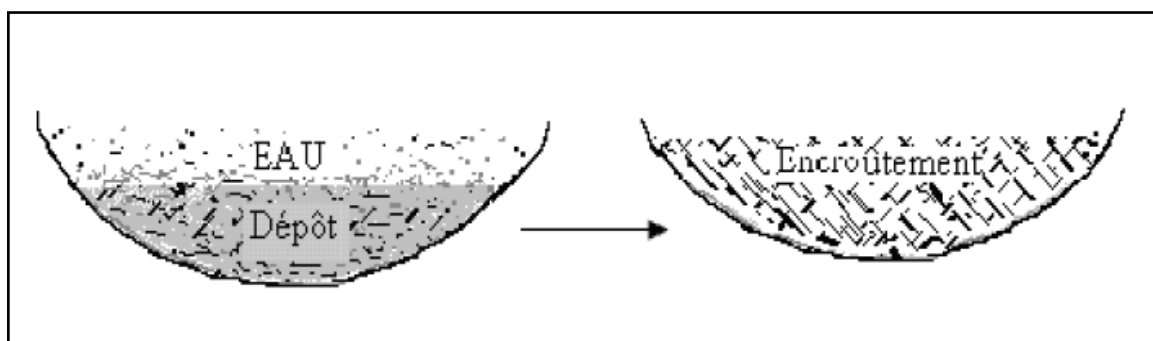


Figure 3 : Formation d'encroûtements gypseux par dépôt selon DURAND [1]

I.6.2 Les encroûtements gypseux

Les encroûtements gypseux et salins se forment au dessus des nappes phréatiques, suffisamment près de la surface du sol pour subir une évaporation telle que la nappe se concentre et dépose des sels. (Figure 3).

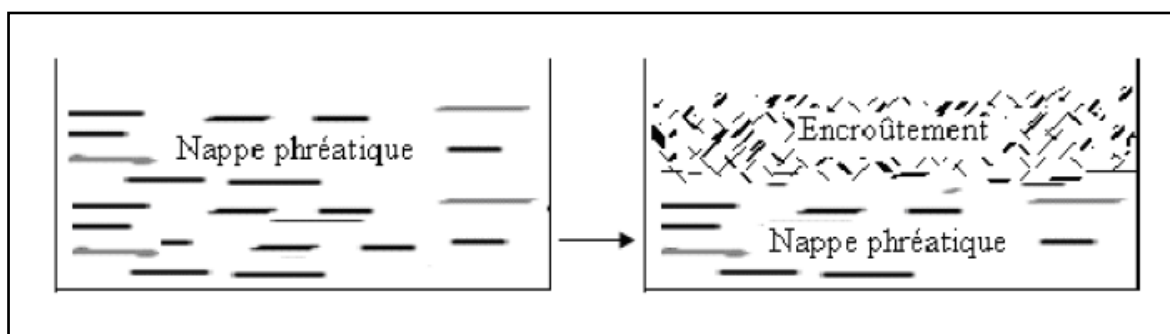


Figure 4 : Formation d'encroûtements par évaporation [1].

I.7 Les Critères de sélection [7]

Les critères de sélection d'un sable gypseux sont imposés par son utilisation en couche de fondation ou en couche de base, les matériaux utilisés en couche de base doivent avoir les principaux critères suivants :

- ☒ Une bonne granulométrie, la courbe granulométrique doit s'insérer dans son fuseau de référence de classe 0/5.
- ☒ Une bonne aptitude au compactage, les valeurs des densités sèches varient entre $1,70 \text{ T/M}^3$ et 2 T/M^3 .
- ☒ Une bonne portance est apprécié par l'essai C.B.R et surtout le C.B.R imbibé qui nous intéresse le plus, car il donne la valeur la plus défavorable malgré que la région d'El-

Oued est aride, l'indice C.B.R imbibé supérieur à 15 est l'indice d'un matériau de bonne portance.

- ☒ Une bonne résistance à la compression simple, l'exigence d'une cohésion minimale est nécessaire pour résister au phénomène de dessiccation et de décohésion par vibration et frottement provoqué par les véhicules. Les résistances demandées pour de bons matériaux doivent être supérieures à 15 bars à la compacité minimale 98%.

Ces critères de sélection suscités sont induits par des nombreux essais effectués au laboratoire sur plusieurs carrières du sable gypseux, mais le plus important parmi ces critères, c'est la résistance à la compression sans négliger les autres critères à savoir :

- ☒ Les analyses chimiques rendues nécessaires, elles permettent d'estimer le pourcentage du gypse qui a une incidence directe sur la qualité du matériau.
- ☒ Les limites d'ATTERBERG, le sable gypseux sont généralement peu ou pas plastique, leur indice de plasticité est généralement compris entre 0 à 12%, une valeur supérieure à 12% peut être un indice de l'existence d'une fraction d'argile.

I.8 Utilisation du sable gypseux en technique routière

Les tufs constituent une ressource en matériau routiers particulièrement intéressante et économique pour de nombreux pays à climat arides ou semi-aride.

Ces matériaux présentent, lorsqu'ils sont utilisés en assises des chaussées, un comportement bien meilleur que ne laisseraient supposer leurs caractéristiques géotechniques, si on le compare aux spécifications des endroits tempérés.

En Algérie, depuis près d'un demi-siècle, des milliers de kilomètres de routes économiques, de désenclavement ont été réalisées dans l'ensemble avec succès, en tuf.

Ces matériaux couvrent la totalité du réseau routier Algérien en zone aride et semi-aride.

Les premières routes sahariennes commencées vers 1955, il s'agit notamment des axes Ghardaïa – El Goléa et Ghardaïa – Ouargla, elles ont été étudiées en adoptant les bases de la technique mise au point pour la France métropolitaine à l'époque [5].

La première réalisation fût un chantier en régie, entrepris en 1953 près d'El-oued, dans la traversée des Oasis du Souf, région où la pierre à plâtre ou le gypse, seul matériau dur, est utilisé par les maçons locaux. On utilisa la croûte gypseuse de surface en blocage à la main; les intervalles ou "interstices" sont garnis de sable gypseux pulvérisé, après humidification et compactage, l'ensemble se soudait pour former une croûte très dure. La couche de chaussée ainsi réalisée fut recouverte d'un sable à bitume à base de sable de dune. Cette réalisation ayant donné de bons résultats pour une circulation peu intense et assez légère et qui servit de base "technique" aux réalisations futures: axe Biskra-Touggourt et Biskra-El-oued, lancés en 1955[6].

I.9 La chaux [10].

I.9.1 Définition de la chaux.

La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique (pyrolyse) du calcaire. Elle est utilisée depuis l'Antiquité, notamment dans la construction. Chimiquement, c'est un oxyde de calcium avec plus ou moins d'oxyde de magnésium mais la désignation usuelle de chaux peut englober différents états chimiques de ce produit.

I.9.2 Fabrication de la chaux

I.9.2.1 Préparation du calcaire.

Avant d'être cuit, le calcaire doit être préparé. La première opération consiste à forer des trous à intervalles réguliers. Ces trous sont ensuite remplis d'explosif, puis on procède au tir de mine. Une fois le tir effectué, il subsiste au pied du front de taille des pierres d'une grosseur allant de quelque centimètre à un mètre cube.

Le calcaire est déposé dans des bennes par des pelles mécaniques ou des chargeuses puis transporté vers un concasseur qui réduit sa granulométrie. Il est ensuite criblé. Il en résulte alors trois produits de granulométries différentes. Les 0 à 30 mm pouvant être commercialisés en l'état ou réduit en poudre pour des applications spécifiques. Ils sont destinés à être cuits dans des fours rotatifs. Les 30 à 60 mm pour un traitement similaire ou pour leur cuisson en four vertical. Les 60 à 200 mm également pour cuisson en four vertical.

I.9.2.2 Cuisson

• Combustibles

Il est nécessaire de porter le calcaire à une température suffisamment élevée pour le transformer en chaux vive. Pour ce faire, tout type de combustible peut être utilisé.

- ☒ Le gaz naturel (méthane), c'est le plus commode et le plus utilisé.
- ☒ Le plus ancien, le bois. Il est employé en bûches mélangées à la pierre, ou réduit en sciure, dans les fours modernes.
- ☒ Le fuel lourd et ses résidus plus épais, également pour les fours modernes. Le charbon, qui a pleinement participé à la révolution industrielle, est mélangé au calcaire ou injecté sous forme pulvérulente.

• Les fours

Il y a plusieurs types de fours, en détermine deux types :

1- Four à cycles alternés

Ce type de four est constitué de deux cuves métalliques reliées à leurs bases par un tunnel. Le combustible est injecté au sommet d'une cuve, les gaz issus de la

combustion descendent à travers la masse de calcaire, traversent le tunnel puis viennent chauffer la masse de l'autre cuve. A intervalles réguliers, le cycle s'inverse. Combustion dans la deuxième cuve et réchauffage de la première. Pendant l'inversion, une nouvelle charge de calcaire est introduite dans une cuve, l'équivalent en chaux en est retiré à la base. Ces fours, de conception récente, ont des capacités de production variant de 100 à 300 tonnes par jour, voire 500 tonnes. Ils acceptent indifféremment des combustibles liquides, solides ou gazeux.

2- Four rotatif

Le four rotatif est assez peu employé du fait de sa forte consommation énergétique, cependant il reste indispensable pour la cuisson des petites granulométries.

Il est constitué d'un tube présentant une légère pente et tournant lentement sur son axe. Le calcaire est introduit par l'orifice le plus élevé.

Dans le même temps, un bruleur injecte le combustible à l'autre extrémité. La chaux est évacuée en continu par ce même côté. Ces fours acceptent également tout type de combustible et sont très souples en débit.

I.9.3 Type de chaux

Selon la nature du calcaire utilisé, la cuisson permet la fabrication de plusieurs types de chaux.

I.9.3.1 Chaux aériennes

La chaux aérienne, que l'on trouve sous l'appellation standard CAEB (chaux aérienne éteinte pour le bâtiment) est déterminée par la norme NFP 15510. elle correspond à la chaux aérienne, très pure

I.9.3.2 Chaux vive

$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (chaux vive).

$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + Q$ (chaux hydratée-ou Éteinte).

I.9.3.3 Chaux magnésiennes

On distingue 3 types de chaux magnésiennes selon le % de calcaire ou d'oxyde de Magnésium

- Chaux calcique (CL) : $\text{MgO} < 5\%$ Chaux fabriquée à partir d'un calcaire CaCO_3 pur ou contenant moins de 5% d'oxyde de magnésium MgO . définie par Vicat. alors de chaux calcique. CL (calcique lime).
- Chaux magnésienne : $5\% < \text{MgO} < 34\%$. Chaux fabriquée à partir d'un calcaire CaCO_3 contenant de 5% à 34% d'oxyde de magnésium.

- Chaux dolomitique (DL) : $34\% < \text{MgO} < 41.6\%$ Chaux contenant de l'oxyde de calcium et de 34% à 41% d'oxyde de magnésium. "DL" (Dolomite Lime) Ces chaux contiennent MgO ou $\text{Mg}(\text{OH})_2$ après hydratation.

I.9.3.4 Chaux hydraulique

Provenant d'un calcaire argileux, riche en fer, alumine et surtout en silice (provenant des marnes ou argiles) environ 15 à 20 %.

A température entre 800 et 1500°C, le CaO du calcaire se combine avec ces éléments et forme des silicates de calcium, des aluminates et des Ferro-aluminates de calcium que l'on trouve sous l'appellation standard XHN (chaux X Hydraulique Naturelle) c'est déterminée par la norme NFP15310 dans la nouvelle norme on parle de chaux hydraulique naturelle .

I.10 Conclusion

Dans cette étude bibliographique, on a exposé tous les types des encroutements (calcaires, gypseux et gypso-calcaires) utilisés dans le domaine de construction routière en zone aride et semi-aride.

On a choisi l'ajout de la chaux hydratée comme un liant du traitement pour étudier l'amélioration du comportement mécanique d'un matériau local (sable gypseux) pour répondre aux exigences techniques relatives à la construction routière de la région.

Chapitre II : Matériaux et méthodes expérimentales.

II.1 Introduction

Pour le besoin de notre étude expérimentale de traitement, nous avons effectué un prélèvement d'un échantillon du sable gypseux d'un gisement de la carrière route KHOBNA SAFRA située dans la commune d'Oued El-Allenda wilaya d'El-Oued, Dans cette étude, on va essayer d'améliorer les caractéristiques mécaniques du notre échantillon à savoir : la résistance à la compression simple, par un ajout en différents pourcentages de la chaux hydratée ramenée de l'usine de la wilaya de SAIDA.

II.2 Les avantages du traitement.

Le traitement a pour avantage de :

- ☒ Réduire le volume des vides entre les particules solides (augmenter la compacité).
- ☒ Créer des liens et améliorer les liaisons existantes entre les particules.

Ces deux objectifs permettent d'améliorer la résistance à la compression simple.

II.3 Préparation du matériau.

Le matériau une fois amené de la carrière, est étalé afin que le matériau perde son humidité naturelle par séchage, lorsqu'il est suffisamment sec, il sera tamisé au tamis de 5 mm, avec la fraction passante à travers le tamis de 5 mm, on entame les procédures du traitement.

II.4 Choix de la teneur en eau du traitement.

La teneur en eau de traitement est obtenue par la formule suivante :

Teneur en eau du traitement = Teneur en eau OPM



Figure 5 : Vue aérienne de la carrière route KHOBNA SAFRA.



Figure 6 : Vue de la carrière route KHOBNA SAFRA



Figure 7 : Vue de la couche du sable gypseux carrière route KHOBNA SAFRA.

II.5 Les essais d'identification

Les essais d'identification effectués sur le matériau sont :

II.5.1 Analyse granulométrique (NF P 94 – 056).

II.5.1.1 But de l'essai

L'essai a pour but de déterminer en poids la subdivision des particules des sols suivants leurs dimensions.

L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations :

- ☒ Le tamisage pour des particules de dimensions supérieures ou égales à 0.1 mm.
- ☒ La sédimentométrie pour des particules de dimensions inférieures à 0.1 mm.

Le tamisage peut être effectué, soit à sec soit sous l'eau, le tamisage à sec n'est pas précis que pour les matériaux pulvérulents (cailloux, graviers, sables), dès que le sol comporte des éléments limoneux ou argileux, le tamisage doit être effectué sous l'eau.

II.5.1.2 Préparation de l'échantillon

Le poids de l'échantillon dépend des dimensions et du pourcentage des éléments les plus gros qu'il contient, il est recommandé de se tenir dans les limites définies par la formule :

$$200 D < P < 600 D.$$

P : Poids de l'échantillon en gramme.

D : La dimension maximum exprimée en mm du plus gros élément.

II.5.1.3 Tamisage sous l'eau

L'échantillon sec est mis dans un bac en tôle remplis d'eau pendant un temps suffisant pour obtenir la désagrégation complète des mottes et des agglomérats de terre et des cailloux, cette opération peut durer quelques minutes à plusieurs heures.

Le tamisage sous l'eau de la fraction fine s'effectue d'ailleurs immédiatement, on verse le contenu du deuxième bac sur le tamis supérieur en arrêtant de temps à autre s'il y a lieu pour qu'il n'y ait pas d'engagement des tamis, puis on rince très soigneusement le bac sur le même tamis, on procède alors au tamisage tamis par tamis.

II.5.1.4 Calcul des résultats

Il reste à calculer et porter sur la feuille d'essai :

S'il y a lieu, les refus cumulés à chaque tamis en additionnant les refus partiels.

Les pourcentages des refus cumulés obtenus en multipliant par 100 les rapports des poids des refus cumulés au poids total de l'échantillon.

En calculant le pourcentage des éléments inférieurs aux ouvertures des tamis considérés (% des tamisât cumulés).

II.5.1.5 Fuseaux de référence

Pour les sables gypseux, on distingue deux fuseaux de référence, il s'agit [11]:

Fuseau classe 0/5

Tamis (mm)		5	2	1	0,4	0,08
Tamisât (%)	Min	86	64	48	30	4
	Max	100	82	70	52	22

Fuseau classe 0/2

Tamis (mm)		2	1	0,4	0,08
Tamisât (%)	Min	84	68	50	20
	Max	100	90	74	48

II.5.2 Equivalent de sable (NF P 18 – 598).

L'essai d'équivalent de sable est effectué sur la base de la norme NF P 18 – 598, et sur la fraction inférieure à 5 mm du matériau à étudier.

L'essai d'équivalent indique le degré de pollution des éléments sableux d'un sol.

En d'autre terme, c'est la détermination de quantité du sable vrai contenue dans un sable plus au moins souillé des matières argileuses.

La propreté peut se contrôler par l'essai dit "**Equivalent de sable**" (ES).

On agite une certaine quantité de sable dans une solution de lavage (qui contient 111 g de chlorure de calcium anhydre, 480 g de glycérine et 12 g de formaldéhyde pour 40 l d'eau) puis on laisse reposer.

La hauteur du dépôt de sable visible étant h_2 et h_1 celle de sable y compris le floculat (fines en suspension).

$$ES \text{ (Visuel)} = 100 h_2/h_1.$$

$$ES \text{ (Piston)} = 100 h'_2/h_1.$$

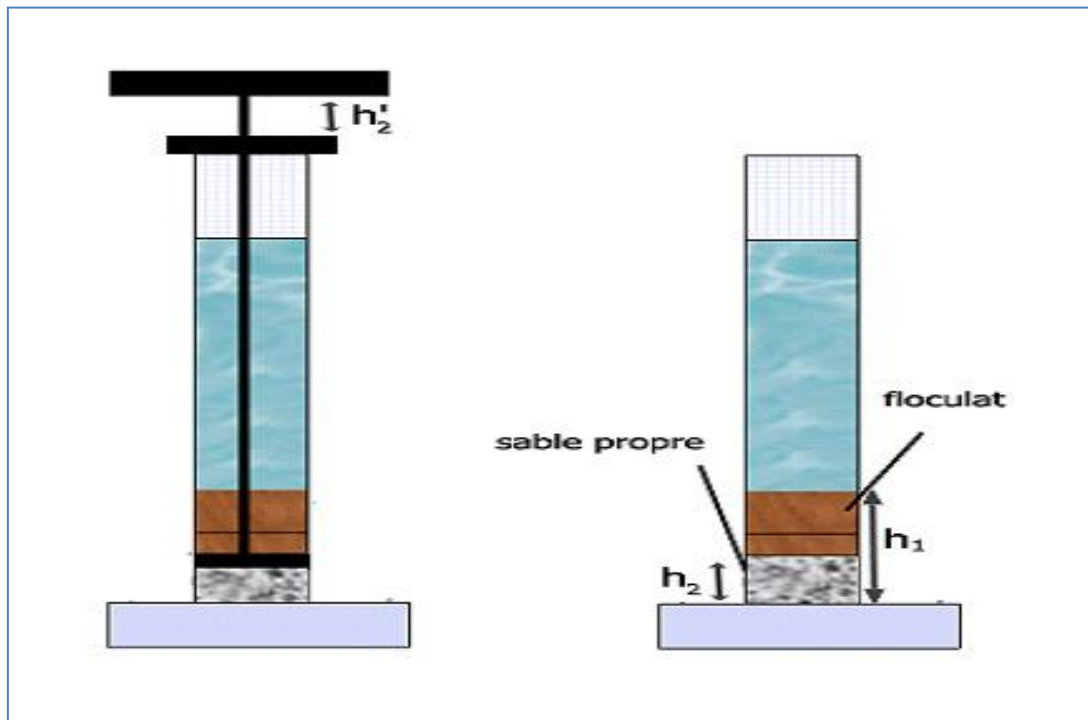


Figure 8 : Essai d'équivalent de sable.

Encroûtement	Calcaire	Gypso-calcaire	Gypseux
Equivalent de sable	10 à 60%	> 60%	Sans signification

Tableau 1 : Equivalent de sable pour différents types d'encroûtements [1].

II.5.3 Les limites d'ATTERBERG (NF P 94 – 051).

Les limites d'ATTERBERG, sont des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre des différents états (état solide, état plastique et état liquide).

II.5.3.1 Limite de liquidité (W_L)

La recherche de la limite de liquidité se fait par l'appareil de CASAGRANDE, elle marque le passage de l'état liquide à l'état plastique, le principe de la mesure de (W_L) est la suivante :

On réalise le nombre des chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent à leur base sur une longueur de 1 cm et on détermine la teneur en eau correspondante de la pâte à ce nombre des chocs de fermeture, on recommence l'essai pour des différentes teneurs en eau et on trace la courbe des teneurs en eau en fonction du nombre de chocs de fermeture.

La limite de liquidité est par définition la teneur en eau qui correspond à une fermeture à 25 chocs.

Le calcul, soit par la formule suivante : $W_L = w(N/25)^{0,121}$

Avec :

w : La teneur en eau au moment de l'essai.

N : Nombre des coups correspond à la fermeture.

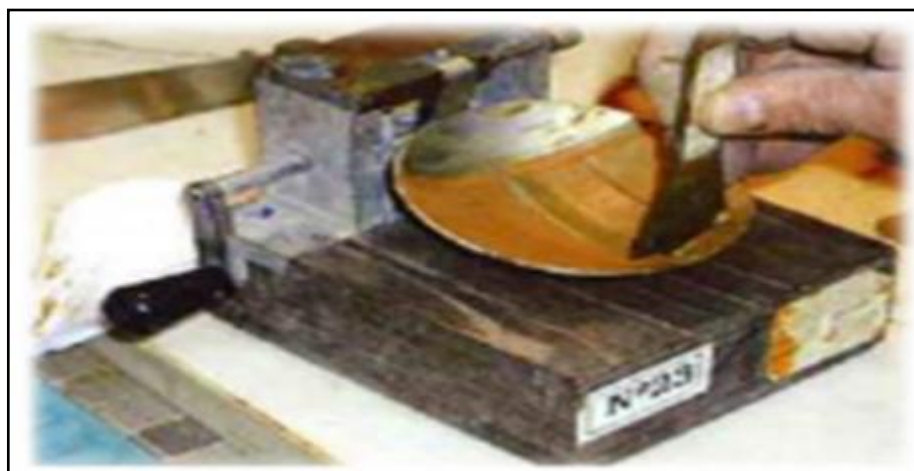


Figure 9 : Essai de limite de liquidité (Cité par : ROBERT ; 2011-2012)

II.5.3.2 Limite de plasticité (W_p)

La limite de plasticité marque le passage de l'état plastique à l'état solide.

Pour déterminer W_p , on prend une partie du mélange et on essaye de faire des petits rouleaux sur une plaquette jusqu'à obtenir un diamètre de 3mm.

Après on soulève le rouleau à 1 ou 2cm au dessus du plancher, quand il se fissure et rompt. On prélève sur chaque morceau des échantillons pour déterminer la teneur en eau qui sera la valeur de W_p .



Figure 10 : Essai de limite de plasticité.

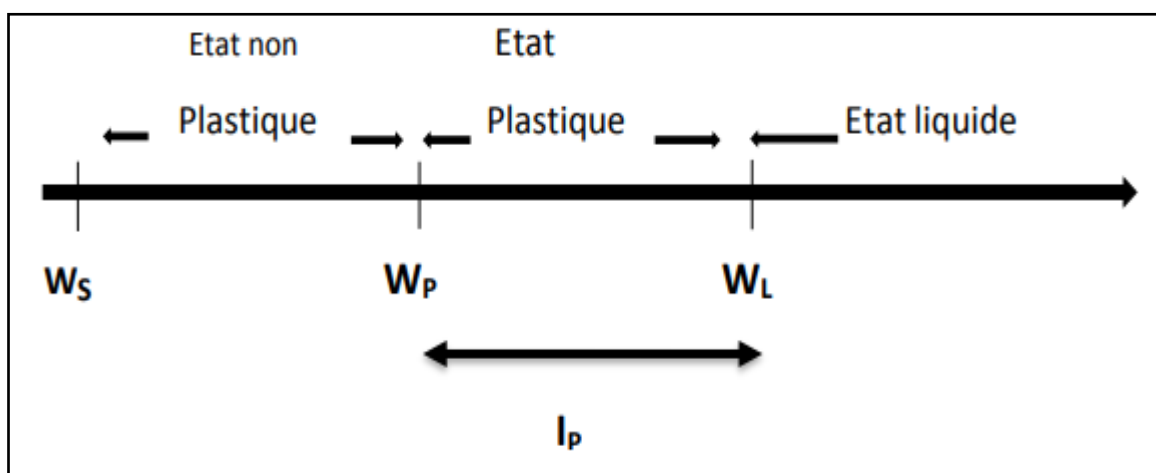


Figure 11 : Plages des limites d'ATTERBERG.

II.5.3.3 Indice de plasticité (I_p)

L'essai se réalise selon la norme NF P 94 – 051, il a pour objectif de déterminer le taux de pollution des encroûtements en fine argileuse, on fait souvent référence à la valeur de l'indice de plasticité.

Encroûtement	Calcaire	Gypso-calcaire	Gypseux
Indice de plasticité	Non mesurable < I_p < 25%	Ordre de 13%	Ordre de 6%

Tableau 2 : Indice de plasticité pour différents types d'encroûtements [1].

L'indice de plasticité exprime en pourcentage correspond à la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité : $I_p = W_L - W_P$.

Il permet de déterminer une zone dans laquelle on considérera que ce sol est à l'état plastique.

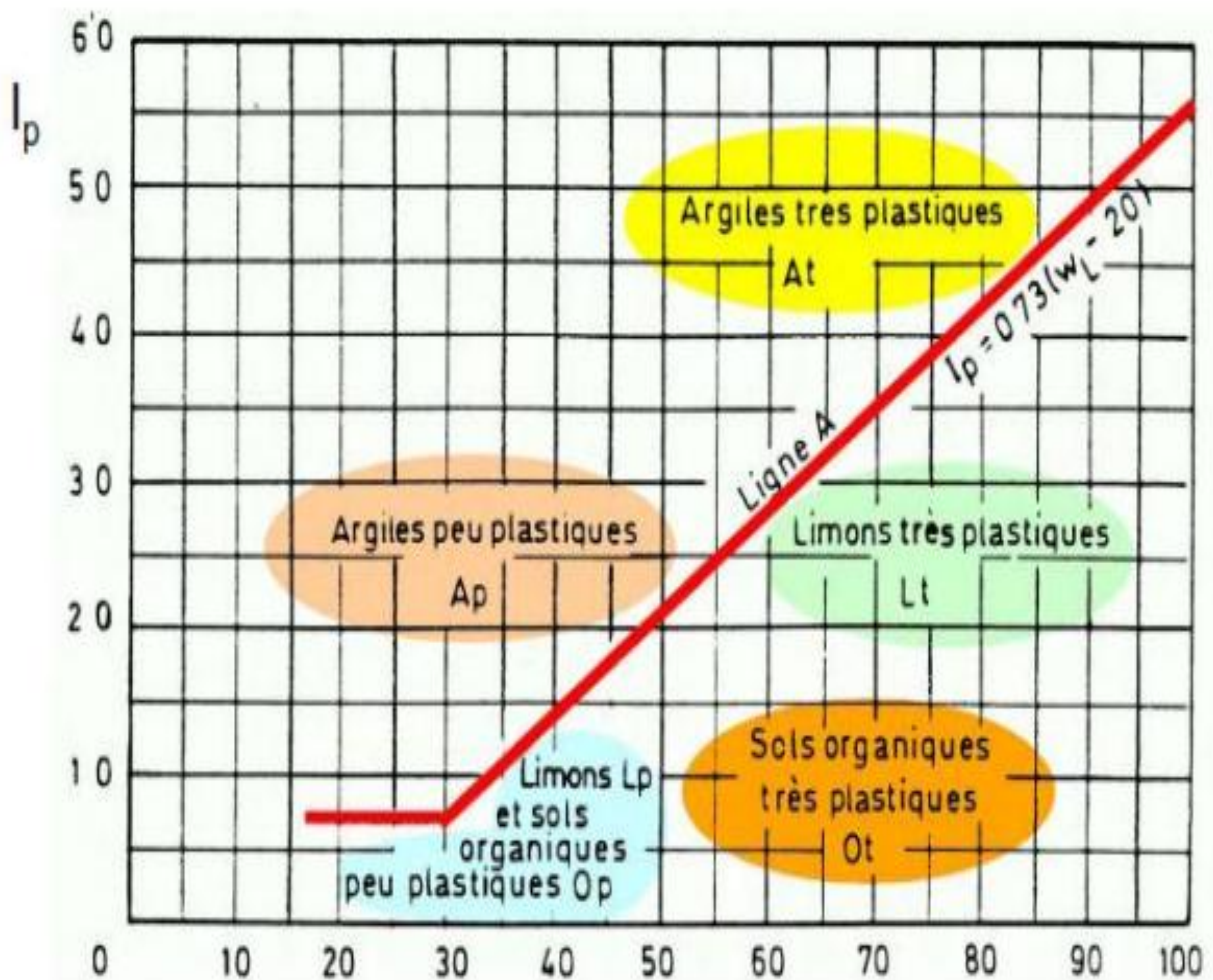


Figure 12 : Classification des sols fins : Diagramme de plasticité (selon L.C.P.C)

Définitions			Symboles	Conditions	Désignation géotechnique
GRAVES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Gb	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ (*) et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	GL	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A (fig. 2)	grave limoneuse
			GA	Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	grave argileuse
SABLES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Sb	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	SL	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A	sable limoneux
			SA	Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	sable argileux

Tableau 3 : Classification des sols grenus (selon L.C.P.C).

II.5.4 Les analyses chimiques

Elle est réalisée à la base de la norme NF P 15 – 461; BS1377 et NF P 94 - 048, pour la détermination de taux d'insolubles (le quartz principalement), le taux de gypse, le taux de carbonate. On donnera ci-dessous un résumé de la méthode.

Les essais de détermination du taux de carbonates et de sulfates sont réalisés sur la fraction granulométrie inférieure à 1 mm [7].

II.5.4.1 Détermination de la teneur en carbonates (NF P 15 – 461).

Elle se fait par la méthode "DIETRICH FRUHLING", elle se base sur la décomposition de carbonates par l'acide chlorhydrique (HCl). On compare le volume de CO₂ dégagé par attaque de la prise d'essai à l'acide chlorhydrique.

Mode opératoire

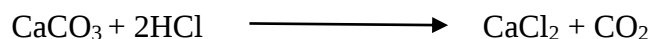
Le flacon et la burette sont remplis d'eau distillée colorée par quelques gouttes de bleu de méthylène de telle sorte que ce liquide atteint au préalable le niveau zéro dans la burette et dans le flacon.

On recueille à partir de l'échantillon initial le tamisât passant le tamis 1 mm, ensuite on prend une masse de 0,5 g de substance, on la verse entièrement au fond d'un flacon et à l'aide d'une pince brucelle, on fait descendre prudemment un petit tube contenant 10 ml d'acide chlorhydrique à 10%. On branche bien le flacon à réaction à l'aide d'un bouchon à tubulure, l'air existant dans le flacon va entraîner le déplacement de la solution de la burette. On note cette première lecture soit V1, puis à ce moment on fait basculer l'acide sur la substance en inclinant le flacon. Le gaz carbonique se dégage et exerce une autre pression sur le liquide, on note la deuxième lecture soit V2.

Calcul

Volume de gaz carbonique dégagé $V = V2 - V1$.

La réaction chimique peut être représentée comme suite :



Si l'acide HCl est en excès, son action sur une mole de CaCO_3 (100g/mol) libère une mole de CO_2 (22,4 l soit 22400 ml).



Figure 13 : Calcimètre DIETRICH FRUHLING.

II.5.4.2 Détermination des insolubles (NF P 15 – 461).

Les insolubles du matériau sont formés de quartz, argiles et autres silicates, hydroxydes de fer et d'aluminium.

La teneur en insolubles est déterminée à partir de l'attaque à chaud de la prise d'essai à l'acide chlorhydrique (H Cl) dilué à 10%, porter le tout sur une plaque chauffante pendant 10 min, une fois le temps écoulé, on filtre le contenu du bécher dans une fiole et on met le papier filtre avec le contenu dans un creuset pour la calcination dans un four à 900°C.

Pour déterminer le taux des insolubles, nous procédons de la manière suivante :

- Retirer le tamisât passant par le tamis 0,2 mm de l'étuve à 60° C.
- Mettre dans un bécher 1 g d'échantillon.
- Ajouter 10 ml l'acide chlorhydrique (HCl) diluée à 10%.
- Porter le tout sur une plaque chauffante pendant 10 min.
- Une fois la durée de l'ébullition est terminée, filtrer le contenu du bécher dans une fiole.
- Ajouter au filtrat de l'eau distillée jusqu'à la graduation 250 ml.
- Mettre le papier filtre avec le contenu dans un creuset pour la calcination dans un four à 900°C.

Le taux des insolubles = $(P2 - P1) \times 100$.

Où,

P1 : Poids du creuset vide.

P2 : Poids du creuset après calcination.

II.5.4.3 Détermination de la teneur en sulfates

(BS 1377 à la base Décembre 1990).

Pour déterminer la teneur en sulfates, on utilise le filtrat obtenu dans première opération (détermination des insolubles).

- Prenez 100 ml du filtrat qui se trouve dans le fiole après un mélange énergique.
- Verser cette quantité dans un bécher.
- Mettre le tout sur une plaque chauffante pendant 10 min.
- Une fois les 8 premières minutes passent, ajouter au contenu du bécher 10 ml de chlorure de baryum (BaCl_2) à 10%.
- Après ébullition, filtrer la solution sur un papier filtre.

Par dosage du précipité de sulfate de baryum (BaSO_4) obtenu par réaction avec de chlorure de baryum (BaCl_2), la teneur en sulfate est évaluée en gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$).



P1 : Poids du creuset vide.

P2 : Poids du creuset après calcination au four.

$$P = P2 - P1$$

Le type d'encroûtement est déterminé selon la nature chimique correspondant au taux de sulfate et de carbonate.

	Encroûtement	Calcaire	Gypso-calcaire	Gypseux
Taux de Gypse et de calcaire	Calcaire	50 à 95%	10 à 50%	Moins de 10%
	Gypse	Moins de 10%	10 à 50%	40 à 90%
	Gypse + calcaire	Plus de 50%	Plus de 50%	Plus de 50%

Tableau 4 : Les différents types d'encroûtements selon la nature chimique [1]

II.5.5 Essai Proctor (NF P 94 – 093).

L'essai a pour but de déterminer par un compactage donné, la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximale.

La teneur en eau ainsi déterminée est appelée teneur en eau optimum Proctor.

Le sable gypseux à étudier est généralement séché à l'air ou à l'étuve jusqu'à ce que soit pulvérisé.

L'essai consiste à compacter dans un moule standard à l'aide d'une dame standard et selon un processus bien déterminé, un échantillon du sol à étudier et à déterminer la teneur en eau du sol et sa densité sèche après compactage.

- Le moule Proctor ($\varnothing = 101,6$ mm, $H_{Sol} = 116,4$ mm) lorsque le matériau est suffisamment fin (pas d'éléments supérieurs à 5 mm, $D \leq 5$ mm).
- Le moule CBR (Californian Bearing Ratio) pour les matériaux de dimensions supérieurs à 5 mm et inférieures à 20 mm ($\varnothing = 152$ mm, $H_{Sol} = 152$ mm).

Avec chacun de ces moules, on peut effectuer (énergie normalisée de compactage choisie) respectueusement l'essai Proctor normal (pour travaux de compactage en bâtiment et/ou de barrage) et l'essai Proctor modifié (pour travaux de compactage routier essentiellement).

Les quantités à prévoir de matériau par essai sont :

- Moule Proctor : 2500 g.
- Moule C.B.R : 5500 g.

Chapitre II: Matériaux et méthodes expérimentales.

L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons à des teneurs en eau croissantes. On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des densités sèches en fonction des teneurs en eau, on trace alors la courbe en interpolant entre les points expérimentaux. Cette courbe présente un maximum dont l'abscisse correspond à la teneur en eau optimale et l'ordonnée correspond à la densité sèche maximale Proctor.

Calcul de la teneur en eau : $W = (\text{Poids de l'eau} / \text{Poids sec}) \times 100$.

Calcul de la densité sèche : $\text{Densité sèche} = \text{Poids sec} / \text{Volume}$.

Type	Masse de la dame (Kg)	Hauteur de chute (cm)	Nombre des coups par couche	Nombre des couches	Energie de compactage (KN.M/m3)
Proctor Normal	2,490	30,50	25 (moule Proctor)	3	593
			55 (moule CBR)	3	
Proctor Modifié	4,540	45,70	25 (moule Proctor)	5	2700
			55 (moule CBR)	5	

Tableau 5 : La différence entre Proctor Normal et Proctor Modifié (cité par : Alain et Eric ; 2010).



Figure 14 : Matériels pour essai Proctor (Cité par : MEBARKI ; 2008)



Figure 15 : Essai Proctor Modifié au laboratoire.

II.5.6 Essai de la résistance à la compression simple

La résistance à la compression simple permet d'apprécier la valeur de la cohésion.

C'est un essai empirique, introduit par les matériaux locaux pour la première fois par FENZY (1957), il est réalisé sur tous les matériaux sahariens sur la fraction inférieure à 5 mm (< 5 mm) [7].

Le compactage à l'OPM est effectué à la presse, et les éprouvettes démoulées sont séchées à l'étuve à 60° C jusqu'à ce que la teneur en eau de confection soit nulle (éprouvette de 5 cm de diamètre et de 10 cm de hauteur). Elles sont ensuite écrasées sous une presse à la vitesse de 1.27 mm/min.



Figure 16 : Eprouvettes confectionnées en sable gypseux.

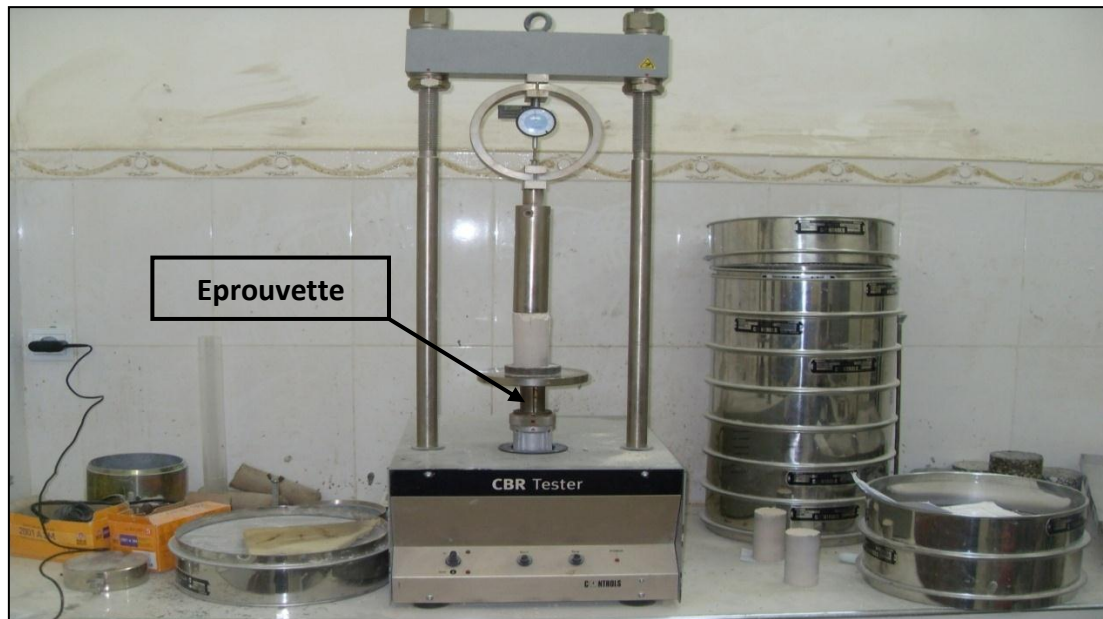


Figure 17 : Ecrasement d'éprouvettes en sable gypseux.

II.5.7 Essai de portance C.B.R (NF P 94 – 078).

L'indice C.B.R est un nombre sans dimension exprimant en pourcentage, qui a pour objet la détermination de la portance d'un matériau compacté à teneur en eau optimum Proctor modifié, il est utilisé dans le dimensionnement des chaussées.

L'essai CBR nous permet de mesurer 2 types d'indices en fonction des buts fixés :

- ☒ L'indice Portant immédiat (IPI) : Il caractérise l'aptitude du sol à permettre la circulation des engins de chantier directement sur sa surface lors des travaux.
- ☒ L'indice C.B.R. après immersion pendant une période (4 jours ou 4 heures selon la zone d'utilisation) : Il caractérise l'évolution de la portance d'un sol support compacté à différentes teneurs en eau et soumis à des variations de régime hydrique.



Figure 18 : Essai C.B.R (Presse C.B.R).

C'est un essai de poinçonnement à l'aide d'une presse standard (presse CBR) à vitesse constante (1,27 mm/min), son principe est basé sur la comparaison d'un enfoncement d'un poinçon dans le matériau testé d'une part et dans un matériau type d'autre part (moule utilisé : moule C.B.R), la fraction du matériau est celle inférieure à 20 mm [7].

Vu l'aridité qui caractérise la région d'El-Oued, notre étude se limite aux indices portant immédiats (IPI).

Par définition, l'indice C.B.R est pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$I_{CBR\ 2,5} = P(2,5) / 0,7 \longrightarrow F(2,5) / 13,35.$$

$$I_{CBR5} = P(5) / 1,05 \longrightarrow F(5) / 20.$$

Où,

P (2,5) : La pression correspondante à 2,5 mm d'enfoncement.

P (5) : La pression correspondante à 5 mm d'enfoncement.

La surface de poinçon : 19,07 cm².

	Encroûtement	Calcaire	Gypso-calcaire	Gypseux
Essai CBR	Immédiat	50 à 100	50 à 100	Jusqu'à 112 avec une moyenne de 40
	Imbibé	30 à 100	20 à 40	Peut chuter jusqu'à 8

Tableau 6 : Indice CBR immédiat et imbibé pour différents types d'encroûtements [1].

II.6 Méthode C.B.R (Californian-Bearing-Ratio).

C'est une méthode semi empirique, elle se base sur un essai de poinçonnement d'un échantillon du sol support.

Cette méthode nous permet de déterminer l'épaisseur « e » des chaussées avec des abaques en fonction des pneus et du nombre de répétitions des charges, sachant qu'il faut tenir compte de l'influence de trafic [8].

II.2.8.1 Détermination de l'épaisseur « Eeq »

L'épaisseur de la chaussée est calculée par les formules suivantes :

Pour un trafic routier léger (10⁵ tonne par mètre de largeur et par an) :

$$Eeq = \frac{100 + 150\sqrt{P}}{I + 5}$$

L'influence du trafic ne doit pas être négligée dans le dimensionnement du corps de chaussée, nous en tiendrons donc compte dans la formule améliorée par (Petier) :

$$Eeq = \frac{100 + (\sqrt{P})(75 + 50 \log \frac{N}{10})}{I + 5}$$

Avec :

Eeq ; Epaisseur équivalente de la chaussée (cm).

P = 6,5 t : Poids de la roue t (essieu 13 t).

N : Nombre des poids lourds par jour.

I : Indice de portance C.B.R du sol support.

L'épaisseur équivalente est donnée par la formule suivante :

$$Eeq = c_1 \times e_1 + c_2 \times e_2 + c_3 \times e_3.$$

Avec :

$c_1 \times e_1$: Couche de roulement.

$c_2 \times e_2$: Couche de base.

$c_3 \times e_3$: Couche de fondation.

Où :

c_1, c_2, c_3 : Coefficients d'équivalence.

e_1, e_2, e_3 : Epaisseurs réelles des couches.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a essayé de caractériser le sable de gypseux de route KHONA SAFRA, commune d'Oued Allenda wilaya d'El-Oued.

C'est un sable ayant une résistance à la compression simple aux environs de 10 bars, la granulométrie s'insère dans le fuseau de référence de classe 0/5, ayant une densité sèche maximale de 1,65 T/M³ pour une teneur en eau optimale de 12%.

Ces résultats ne le permettent pas d'être utilisé en corps de chaussée.

Le liant utilisé en traitement (La chaux hydratée) disponible dans la nature et sur le marché.

Chapitre III : Résultats et interprétations.

III.1 Introduction

Les essais d'identification effectués sur le prélèvement du sable gypseux de la carrière route KHOBNA SAFRA, avant et après traitement ont abouti aux résultats suivants :

III.2 Résultats obtenus (avant traitement)

III.2.1 Analyse granulométrique

Tamis (mm)		Poids de Refus partiel (g)	Poids de Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)	Tamisât arrondi (%)
	31,5					
	20					
	10					
Poids : 2000 g	5	30,6	30,6	1,53	98,47	98
	2	481,4	512	25,60	74,40	74
	1	384	896	44,80	55,20	55
	0,4	258	1154	57,70	42,30	42
	0,08	578	1732	86,60	13,40	13

Tableau 7: Analyse granulométrique d'échantillon du sable gypseux. (Carrière route KHOBNA SAFRA).

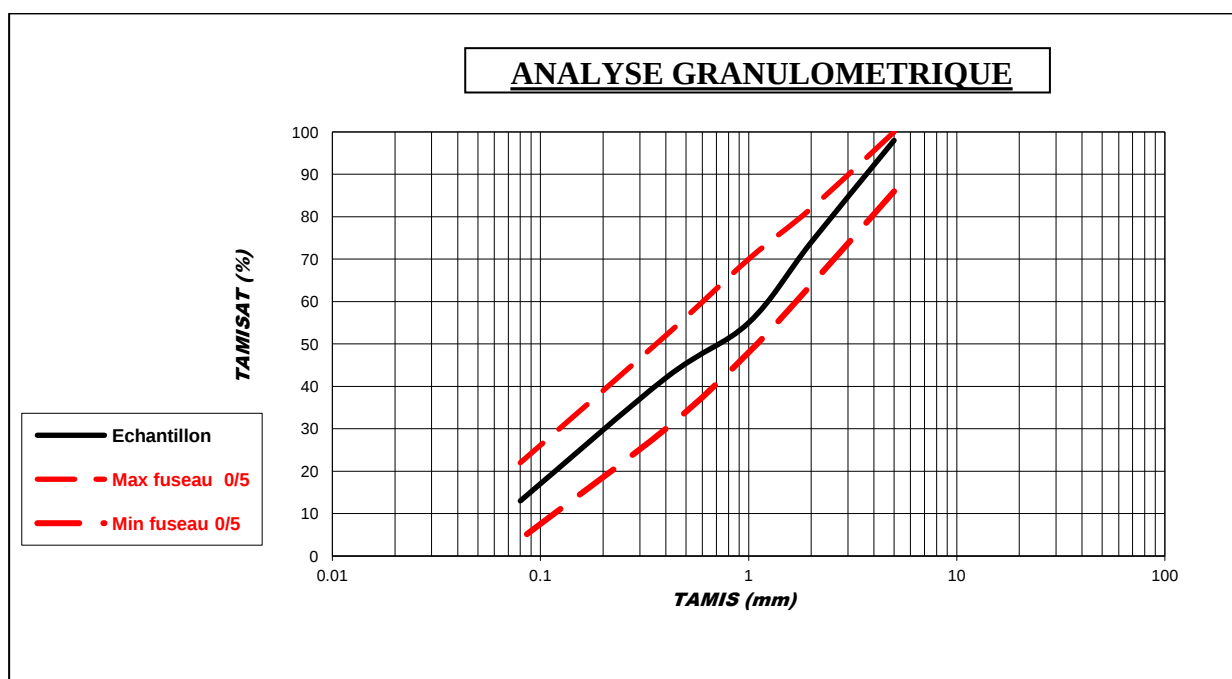


Figure 19 : Courbe granulométrique d'échantillon du sable gypseux. (Carrière route KHOBNA SAFRA).

III.2.2 Equivalent de sable

- La hauteur des grains solides : 8,2 cm.
- La hauteur totale (grains solides + floculat) : 11 cm.

D'où, l'équivalent de sable (ES) = $100 \times 8,2/11 = 74,55\%$, soit un **ES = 75%**, signalant un sable gypseux propre.

III.2.3 Limites d'ATTERBERG

III.2.3.1 Limite de liquidité

	1 ^{er} Essai		2 ^{ème} Essai		3 ^{ème} Essai	
Nombre des coups	16		27		34	
N° de la tare	1	2	3	4	5	6
Poids total humide	29,4	33,1	34,7	40,2	38,5	45,2
Poids total sec	27	30,2	32,77	38	36,2	43
Poids de la tare	18,4	19,2	25,03	29,1	26,8	32,9
Poids de l'eau	2,40	2,9	1,93	2,2	2,3	2,2
Poids du sol sec	8,6	11	7,69	8,9	9,4	10,1
Teneur en eau (%)	27,91	26,36	25,10	24,72	24,47	21,78
Teneur en eau moyenne (%)	27,14		24,91		23,13	

Tableau 8 : Calcul des teneurs en eau (Limite de liquidité).

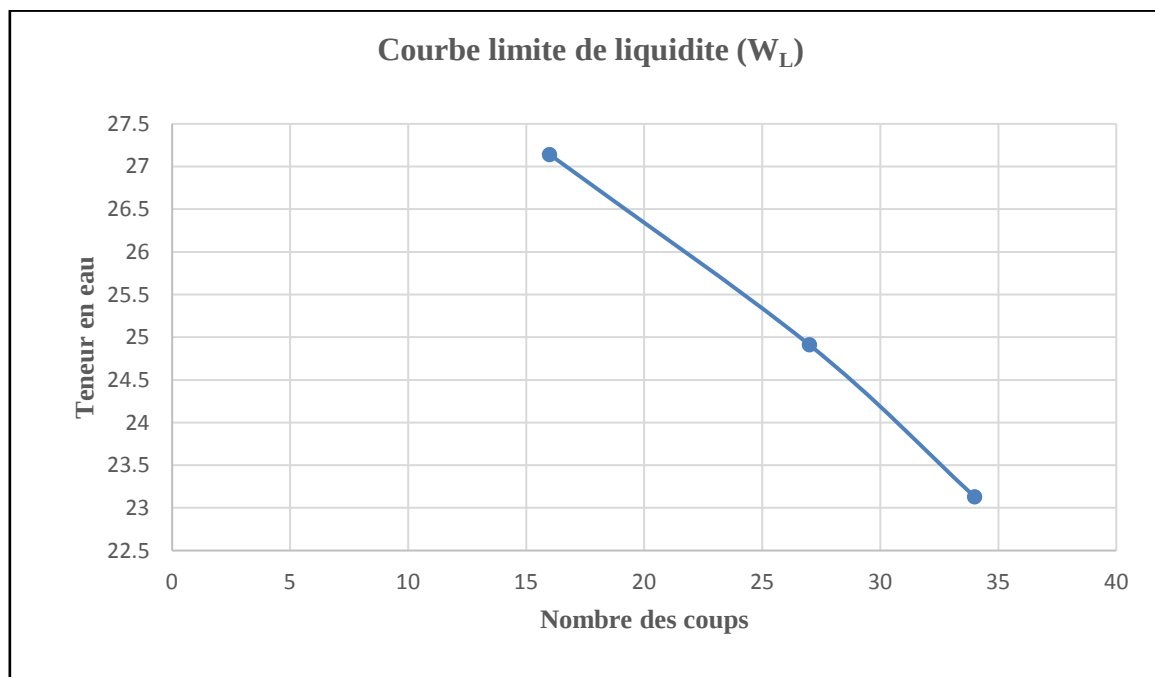


Figure 20 : Graphique limite de liquidité (W_L).

A partir de graphique ci-dessus (figure 20), la valeur de la limite de liquidité (W_L) est égale à 25,3%.

Ou, soit par la formule suivante : $W_L = w(N/25)^{0,121}$

Avec :

w : La teneur en eau au moment de l'essai.

N : Nombre des coups correspond à la fermeture.

III.2.3.2 Limite de plasticité

D'après les essais de détermination de la limite de plasticité W_p , il est impossible de calculer la limite de plasticité.

III.2.3.3 Indice de plasticité

La limite de plasticité était impossible de la mesurer, dans ce cas, l'indice de plasticité est non mesurable, on peut conclure que le sable gypseux est classé « Sol peu plastique »

III.2.4 Les analyses chimiques

1. Pourcentage des carbonates

$$\begin{array}{ll} 100 \text{ g (CaCO}_3\text{)} & 22400 \text{ ml (CO}_2\text{)} \\ X & 9 \text{ ml} \quad X = 9 \times 100/22400 = 0,04 \text{ g.} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} 0,04 \text{ (CaCO}_3\text{)} & 0,5 \text{ (Masse du matériau)} \\ Y & 100 \quad Y = 0,04 \times 100/0,5 = 8\% \end{array}$$

2. Pourcentage des Sulfates = 30%.

3. Pourcentage des insolubles = 60%.

III.2.5 Essai Proctor Modifié

Sur le tableau ci-dessous, on va montrer les résultats de calcul obtenus pour les essais Proctor modifié effectués au laboratoire sur l'échantillon du sable gypseux de la carrière route KHOBNA SAFRA, qui sont :

Teneur en eau (%)	6	8	10	12	14
Poids d'eau ajouté (g)	150	200	250	300	350
Poids total humide (g)	4967,1	5047,6	5109,2	5161,3	5138,5
Poids du moule (normale) (g)	3411,2				
Volume du moule (cm³)	947				
Poids du sol humide (g)	1555,9	1636,4	1698,0	1750,1	1727,3
Densité humide (Kg/cm³)	1,64	1,73	1,79	1,85	1,82
Densité sèche (Kg/cm³)	1,55	1,60	1,63	1,65	1,60

Tableau 9 : Résultats de calcul des densités sèches.

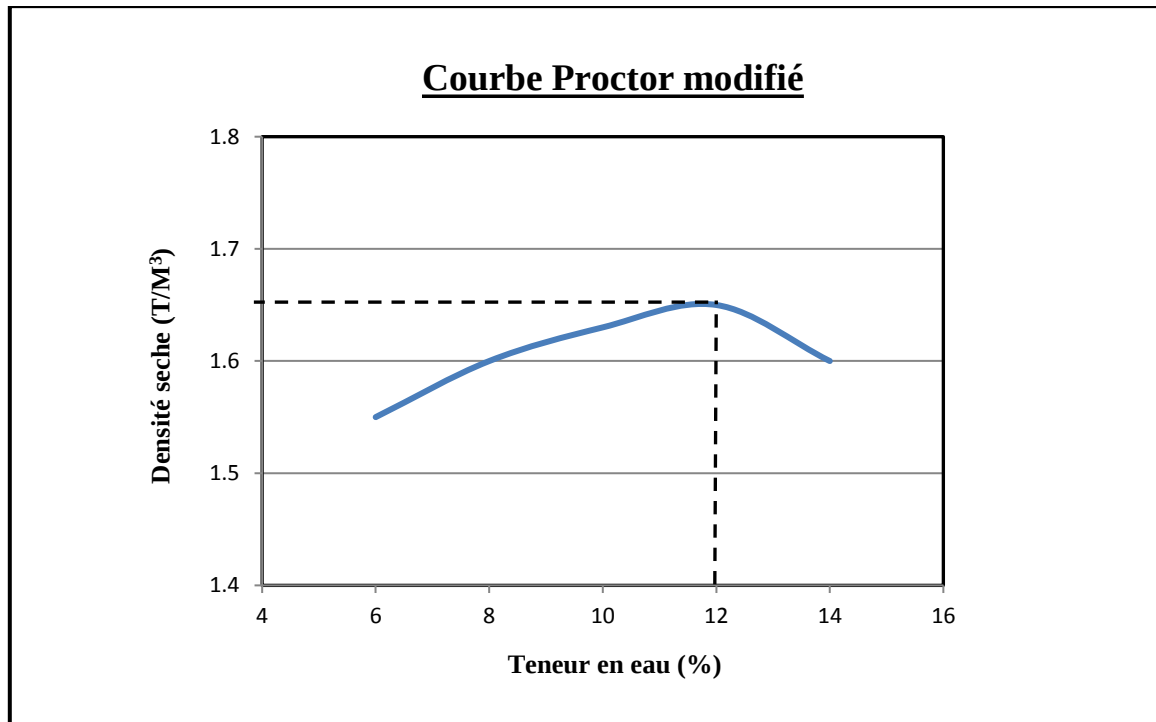


Figure 21 : Courbe Proctor Modifié.

A l'issue des essais Proctor modifié sur l'échantillon du sable gypseux de la carrière route KHOBNA SAFRA, les résultats obtenus à partir de la courbe Proctor sont :

- La teneur en eau optimale (W_{opt}) : 10%.
- La densité sèche maximale (D_{sm}) : 1,65 T/M³.

III.2.6 Essai de la résistance à la compression simple

Les éprouvettes écrasées, sont confectionnées sur la base des résultats du Proctor modifié indiqués au paragraphe III.2.4, à savoir :

- La teneur en eau optimale (W_{opt}) : 12%.
- La densité sèche maximale (D_{sm}) : 1,65 T/M³.

Et à l'aide d'un moule cylindrique spécial dont les dimensions sont :

- Diamètre intérieur : 5 cm.
- La hauteur : 10 cm.

Le poids humide de l'éprouvette = $V \times D_{sm} \times (1 + W_{opt}) \times C$.

Avec :

V : Volume de moule = 196,25 cm³

D_{sm} : La densité sèche maximale Proctor modifié.

W_{opt} : La teneur en eau optimale Proctor modifié.

C : La compacité désirée égale à 98%.

CARACTERISTIQUES DE L'ESSAI PROCTOR MODIFIE

Teneur en eau optimale W_{opt} (%) = 12. Densité sèche maximale (T/M^3) $D_{sm} = 1.65$

Echantillon	Eprouvettes	Résistance à la Compression Simple (bars)	Compacité (%)
Sable Gypseux carrière KHOBNA SAFRA	1	10	98
	2	10	
	3	10	

Tableau 10 : Résultats de la résistance à la compression simple.

III.2.7 Essai C.B.R

Temps	Enfoncement en (mm)	Force totale (Kg)		Pression en Kg/cm2
		Lecture	Valeur	
30''	0,625	1	22,72	1,19
1'	1,25	1	22,72	1,19
1' 40''	2	2	45,45	2,38
2'	2,5	3	68,18	3,58
4'	5	9	204,54	10,73
6'	7,5	19	431,81	22,64
8'	10	53	1173,91	61,56
10	12,5			

Tableau 11 : Calcul de l'indice CBR.

D'après le tableau ci-dessous, on va calculer l'indice CBR immédiat, c'est la grande valeur des deux valeurs données par les formules suivantes :

$$I_{CBR\ 2,5} = P(2,5) / 0,7$$

$$I_{CBR5} = P(5) / 1,05$$

D'où,

$$\text{À } 2,5 \text{ mm d'enfoncement : } I_{CBR\ 2,5} = P(2,5) / 0,7 = 3,58 / 0,7 = 5,11.$$

$$\text{À } 5 \text{ mm d'enfoncement : } I_{CBR\ 5} = P(5) / 1,05 = 10,73 / 1,05 = 10,02.$$

L'indice CBR immédiat = 10,02.

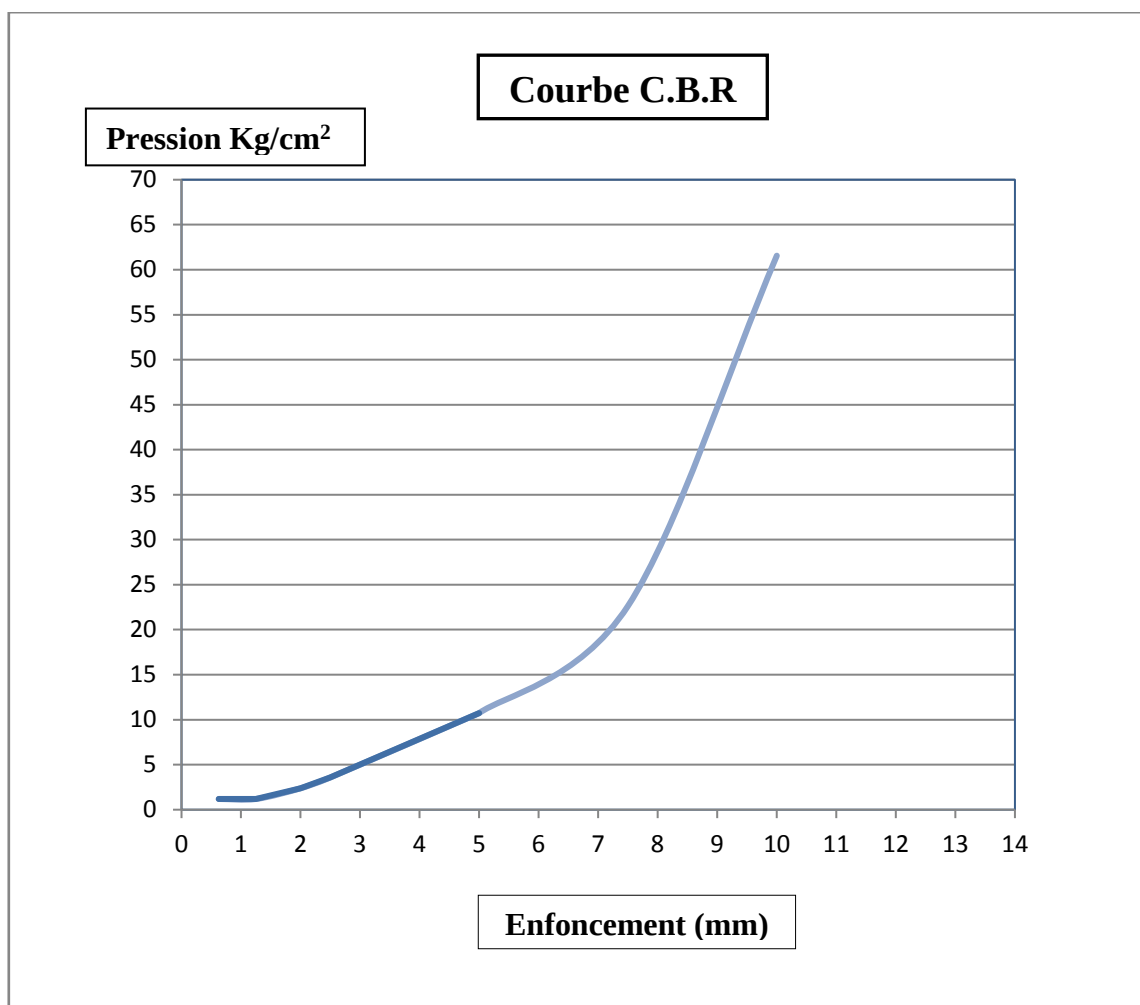


Figure 22 : Courbe C.B.R.

III.3 Résultats obtenus (après traitement)

III.3.1 Addition de la chaux à 2%.

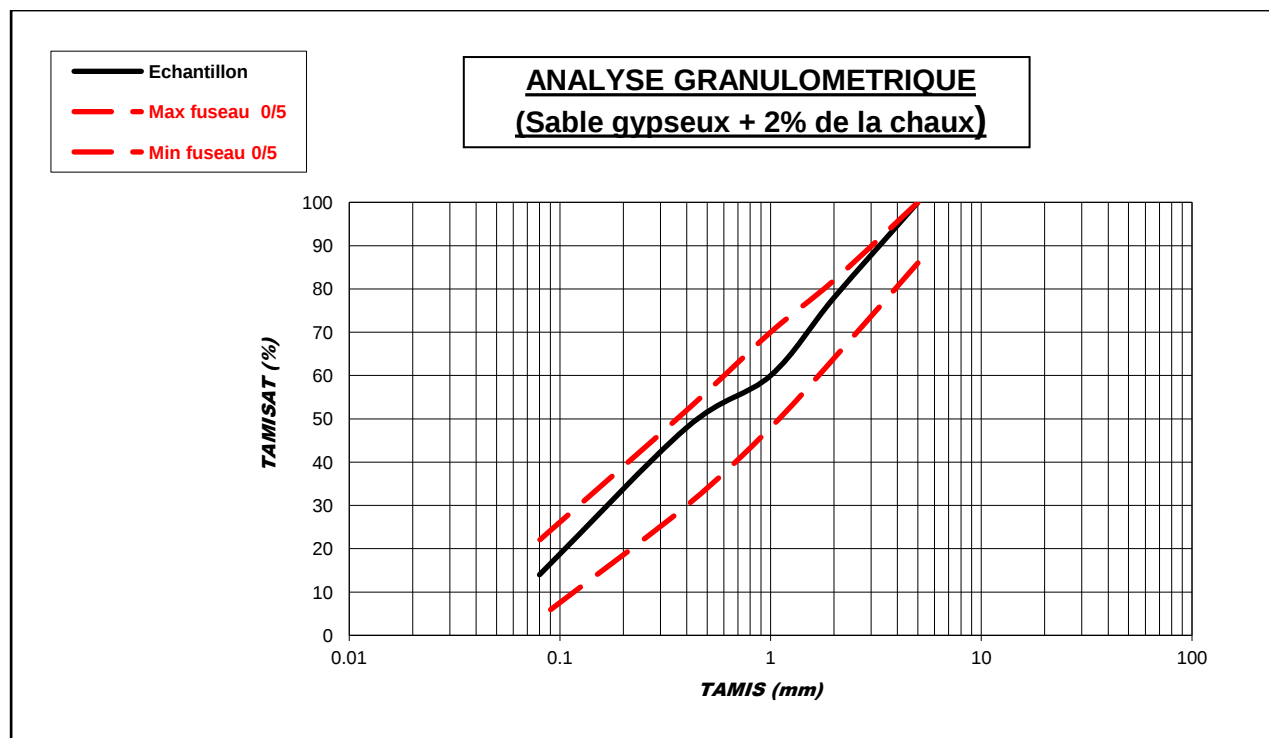
Après avoir préparé soigneusement le mélange à sec (matériau + 2% de la chaux), on a entamé les essais d'identification et de comportement au laboratoire sur ce mélange, ces essais avaient abouti à :

III.3.1.1 Essai d'analyse granulométrique.

Tamis (mm)		Poids de Refus partiel (g)	Poids de Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)	Tamisât arrondi (%)
	31,5					
	20					
	10					

Poids : 2040 g	5	0	0	0	100	100
	2	455,9	455,9	22,35	77,65	78
	1	357,4	813,3	39,87	60,13	60
	0,4	241,2	1054,5	51,69	48,31	48
	0,08	702,6	1757,1	86,13	13,87	14

**Tableau 12 : Analyse granulométrique d'échantillon du sable gypseux.
(Traitement à 2% de la chaux).**

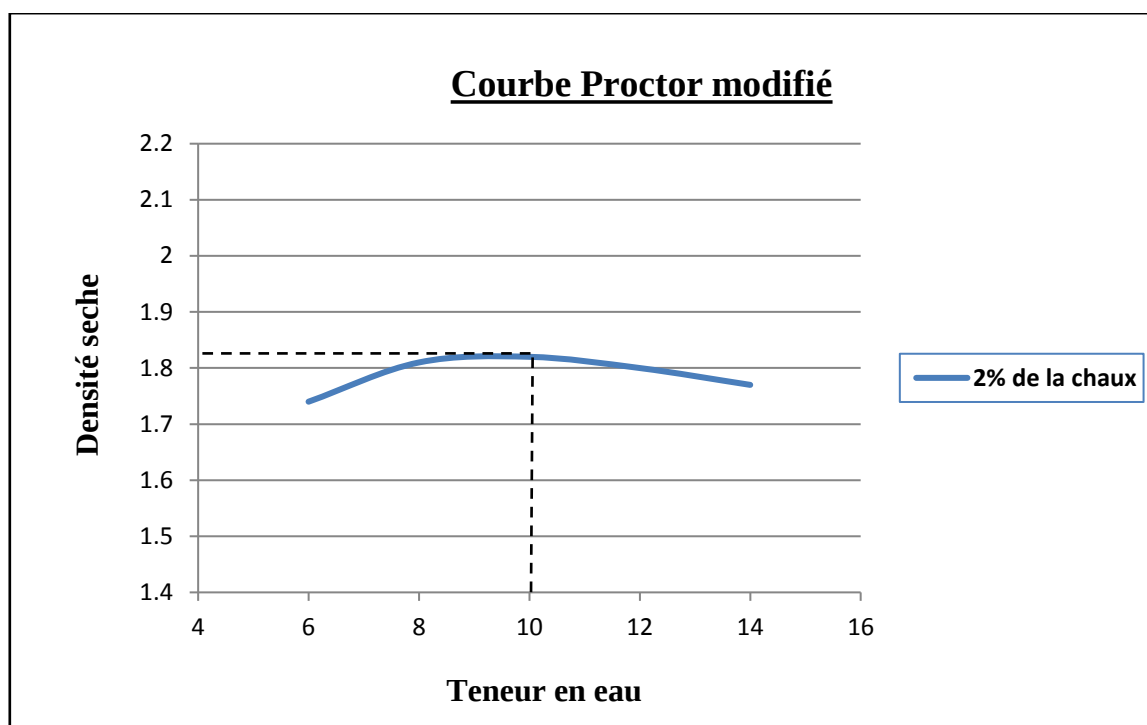


**Figure 23 : Courbe granulométrique d'échantillon du sable gypseux.
(Sable gypseux + 2% de la chaux).**

III.3.1.2 Essai Proctor modifié.

Teneur en eau (%)	6	8	10	12	14
Poids d'eau ajouté (g)	150	200	250	300	350
Poids total humide (g)	5157.8	5262.4	5307,1	5320,7	5322,1
Poids du moule (normale) (g)	3411,2				
Volume du moule (cm ³)	947				
Poids du sol humide (g)	1746.6	1851,2	1895,9	1909,5	1910.8
Densité humide (Kg/cm ³)	1,84	1,95	2,00	2,02	2,02
Densité sèche (Kg/cm ³)	1,74	1,81	1,82	1,80	1,77

**Tableau 13 : Résultats essai Proctor modifié
(Sable gypseux + 2% de la chaux).**



**Figure 24 : Courbe Proctor Modifié.
(Sable gypseux + 2% de la chaux).**

III.3.1.3 Essai de la résistance à la compression simple

CARACTERISTIQUES DE L'ESSAI PROCTOR MODIFIE

Teneur en eau optimale W_{optm} (%) = 10. Densité sèche maximale (T/M^3) $D_{sm} = 1.82$

Echantillon	Eprouvettes	Résistance à la Compression Simple (bars)	Compacité (%)
Sable Gypseux carrière KHOBNA SAFRA + 2% de la chaux	1	10.45	98
	2	10.45	
	3	10.45	

**Tableau 14 : Résultats de résistance à la compression simple.
(Sable gypseux + 2% de la chaux).**

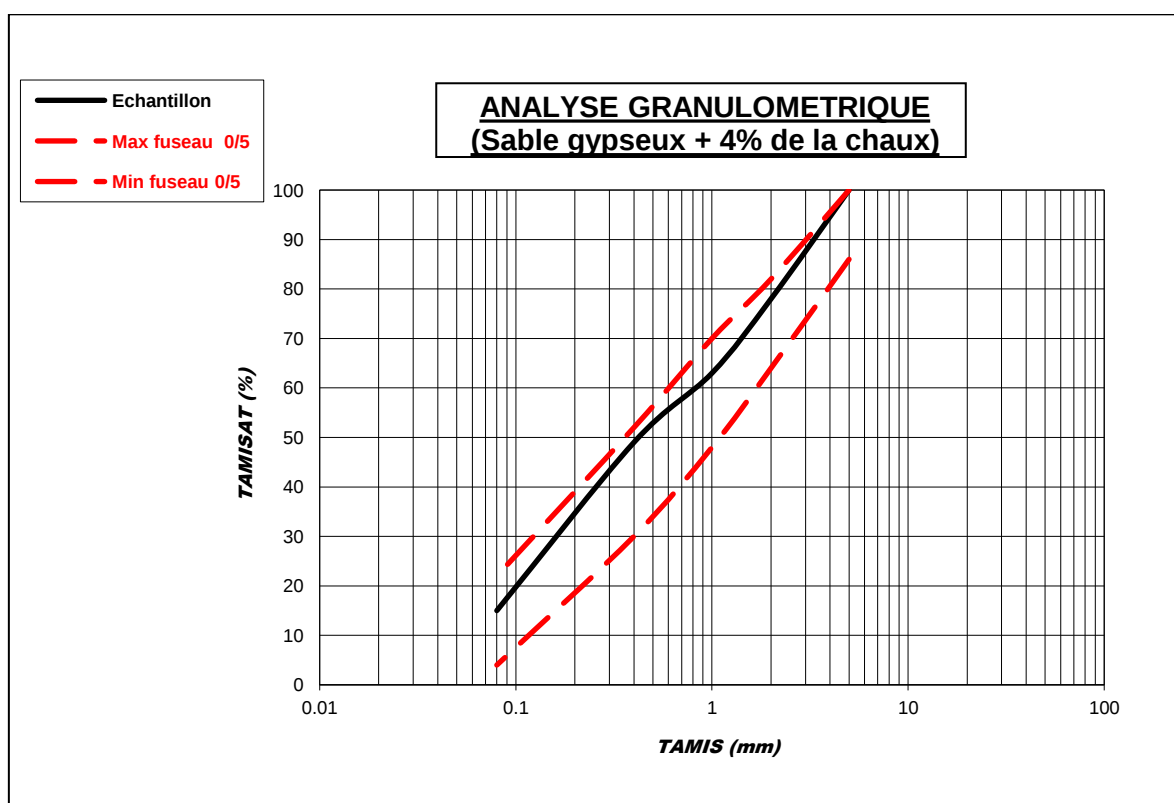
III.3.2 Addition de la chaux à 4%

Nous avons préparé le mélange à sec (matériau + 4% de la chaux) et ensuite, on a commencé les essais d'identification et de comportement de ce nouveau mélange, les essais au laboratoire avaient conduit à :

III.3.2.1 Essai d'analyse granulométrique

Tamis (mm)	Poids de Refus partiel (g)	Poids de Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)	Tamisât arrondi (%)
31,5					
20					
10					
Poids : 2080 g	5	0	0	100	100
	2	449,1	21,59	78,41	78
	1	323,2	37,13	62,87	63
	0,4	283,9	50,78	49,22	49
	0,08	715,3	85,17	14,83	15

**Tableau 15 : Analyse granulométrique d'échantillon du sable gypseux.
(Traitement à 4% de la chaux).**

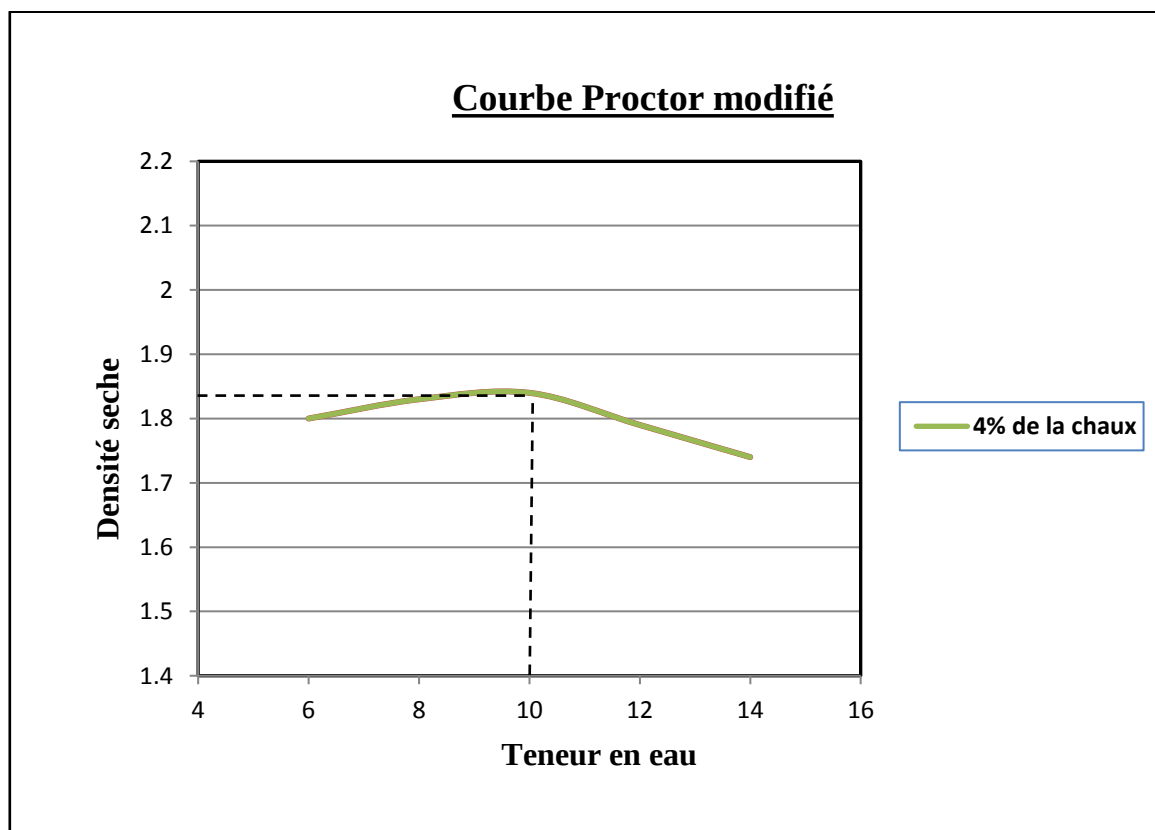


**Figure 25 : Courbe granulométrique d'échantillon du sable gypseux.
(Sable gypseux + 4% de la chaux).**

III.3.2.2 Essai Proctor modifié

Teneur en eau (%)	6	8	10	12	14
Poids d'eau ajouté (g)	150	200	250	300	350
Poids total humide (g)	5217.1	5282.9	5327,9	5309,4	5289,7
Poids du moule (normale) (g)	3411,2				
Volume du moule (cm ³)	947				
Poids du sol humide (g)	1805.9	1871,7	1916,7	1898,2	1878.5
Densité humide (Kg/cm ³)	1,91	1,98	2,02	2,02	1,98
Densité sèche (Kg/cm ³)	1,80	1,83	1,84	1,79	1,74

**Tableau 16 : Résultats essai Proctor modifié
(Sable gypseux + 4% de la chaux).**



**Figure 26 : Courbe Proctor Modifié.
(Sable gypseux + 4% de la chaux).**

III.3.2.3 Essai de résistance à la compression simple

CARACTERISTIQUES DE L'ESSAI PROCTOR MODIFIE

Teneur en eau optimale W_{opm} (%) = 10. Densité sèche maximale (T/M³) D_{sm} = 1.84

Echantillon	Eprouvettes	Résistance à la Compression Simple (bars)	Compacité (%)
Sable Gypseux carrière KHOBNA SAFRA + 4% de la chaux	1	11.62	98
	2	11.62	
	3	11.62	

**Tableau 17 : Résultats de la résistance à la compression simple.
(Sable gypseux + 4% de la chaux).**

III.3.3 Addition de la chaux à 6%

Encore, des essais d'identification et de comportement a été effectués sur le mélange à sec (matériau + 6% de la chaux), ces essais avaient abouti à :

III.3.3.1 Essai d'analyse granulométrique

Tamis (mm)	Poids de Refus partiel (g)	Poids de Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)	Tamisât arrondi (%)
31,5					
20					
10					
Poids : 2120 g	5	0	0	100	100
	2	417,0	417,0	19,67	80,33
	1	312,7	729,7	34,42	65,58
	0,4	321,0	1050,7	49,56	50,44
	0,08	743,0	1793,7	84,61	15,39

**Tableau 18 : Analyse granulométrique d'échantillon du sable gypseux.
(Traitement à 6% de la chaux).**

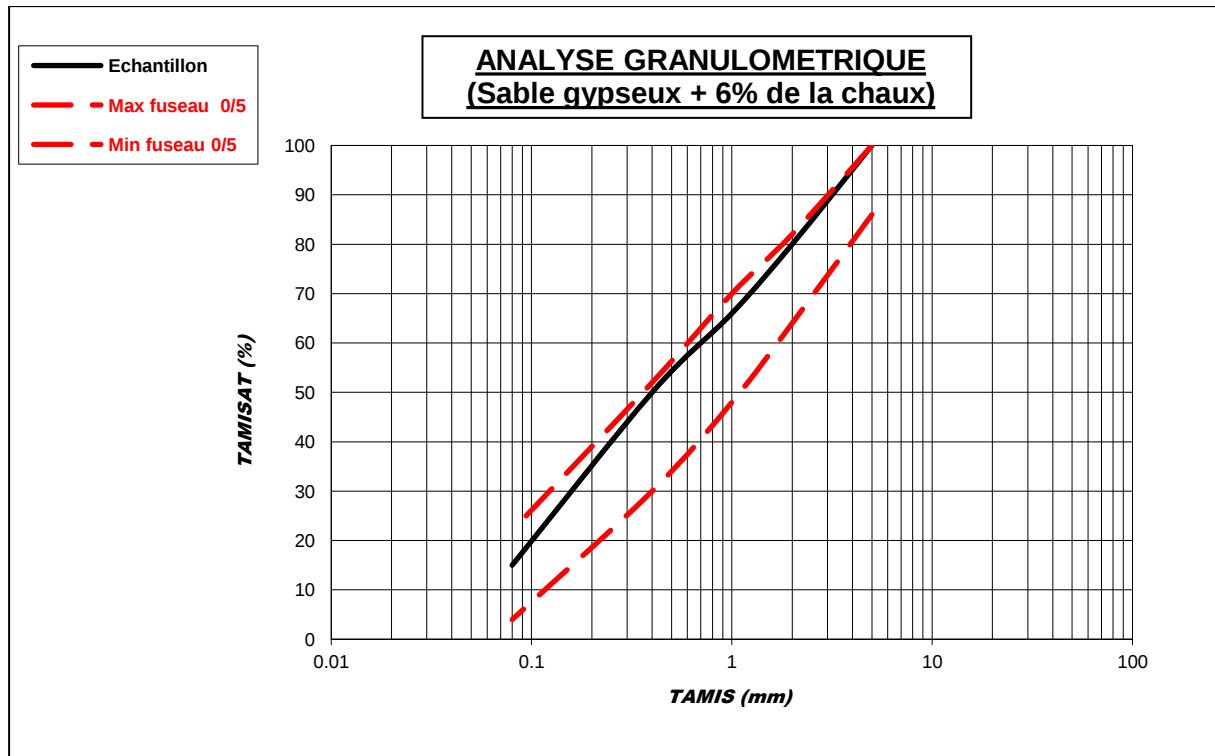
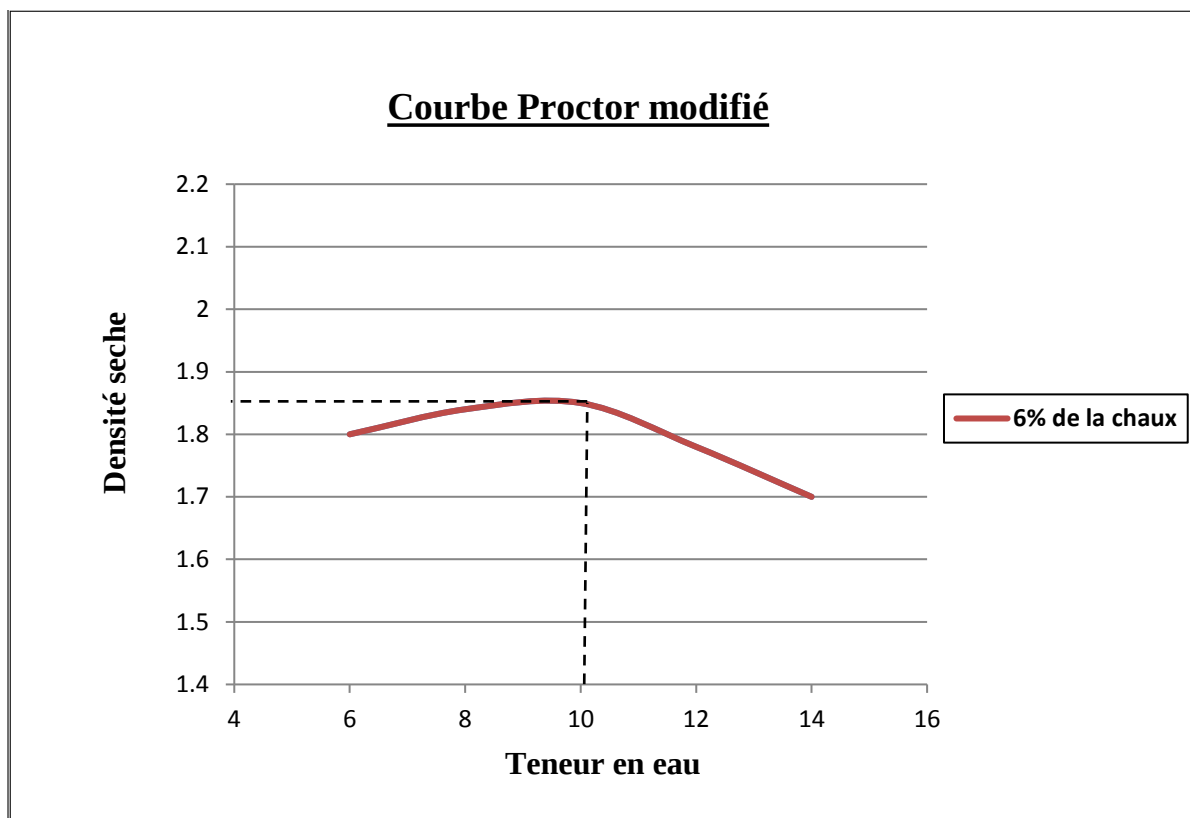


Figure 27 : Courbe granulométrique d'échantillon du sable gypseux.
(Sable gypseux + 6% de la chaux).

III.3.3.2 Essai Proctor modifié

Teneur en eau (%)	6	8	10	12	14
Poids d'eau ajouté (g)	150	200	250	300	350
Poids total humide (g)	5223.0	5262.4	5334,6	5302,4	5246,5
Poids du moule (normale) (g)	3411,2				
Volume du moule (cm³)	947				
Poids du sol humide (g)	1811.8	1880,8	1923,4	1891,2	1835.3
Densité humide (Kg/cm³)	1,91	1,99	2,03	2,00	1,94
Densité sèche (Kg/cm³)	1,80	1,84	1,85	1,78	1,70

Tableau 19 : Résultats essai Proctor modifié
(Sable gypseux + 6% de la chaux).



**Figure 28 : Courbe Proctor Modifié.
(Sable gypseux + 6% de la chaux).**

III.3.3.3 Essai de résistance à la compression simple

CARACTERISTIQUES DE L'ESSAI PROCTOR MODIFIE

Teneur en eau optimale W_{opm} (%) = 10. Densité sèche maximale (T/M³) $D_{sm} = 1.85$

Echantillon	Eprouvettes	Résistance à la Compression Simple (bars)	Compacité (%)
Sable Gypseux carrière KHOBNA SAFRA+ 6% de la chaux	1	16.31	98
	2	16.31	
	3	16.31	

**Tableau 20 : Résultats de la résistance à la compression simple.
(Sable gypseux + 6% de la chaux).**

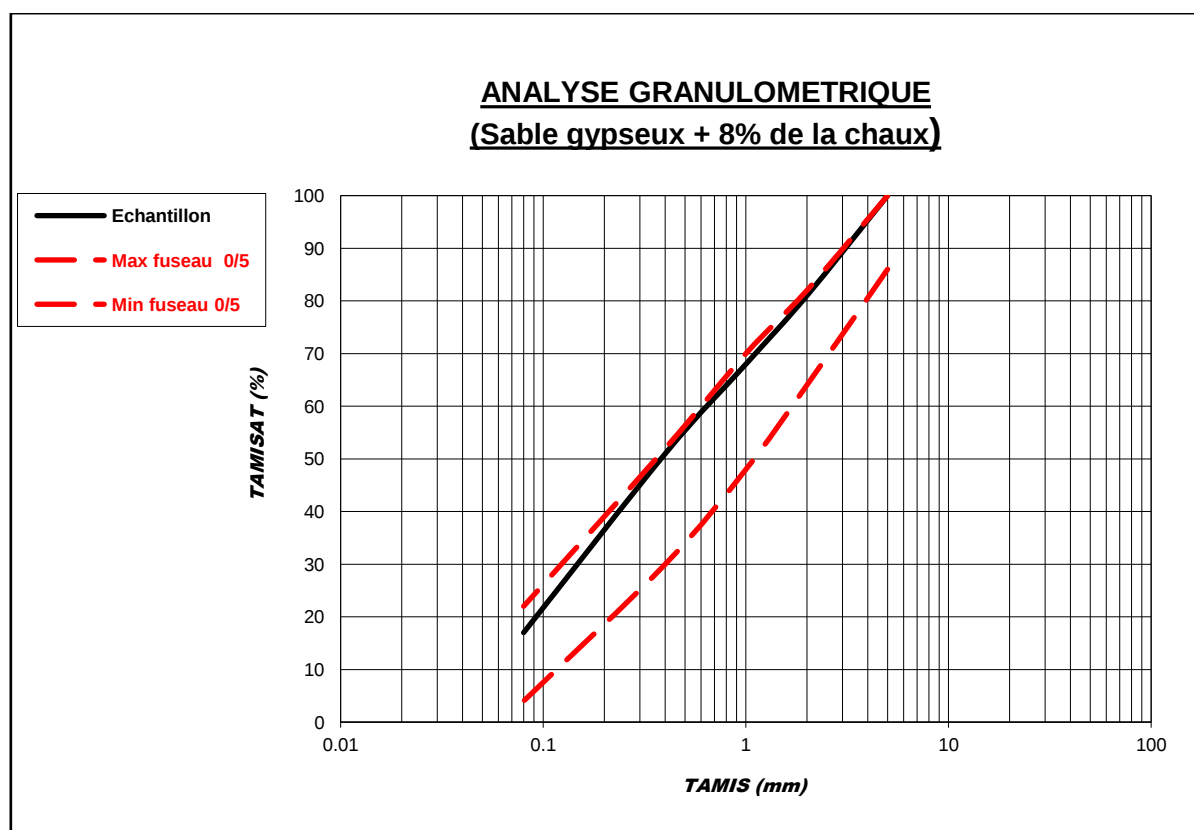
III.3.4 Addition de la chaux à 8%

De la même manière, on a préparé un mélange à sec (matériau + 8% de la chaux), des essais d'identification et de comportement ont été effectués au laboratoire, et ils avaient abouti à :

III.3.4.1 Essai d'analyse granulométrique

Tamis (mm)		Poids de Refus partiel (g)	Poids de Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Tamisât (%)	Tamisât arrondi (%)
	31,5					
	20					
	10					
Poids : 2160 g	5	0	0	0	100	100
	2	403,5	403,5	18,68	81,32	81
	1	290,9	694,4	32,15	65,58	66
	0,4	354,7	1049,1	48,57	51,43	51
	0,08	741,3	1790,4	82,89	17,11	17

**Tableau 21 : Analyse granulométrique d'échantillon du sable gypseux.
(Traitement à 8% de la chaux).**

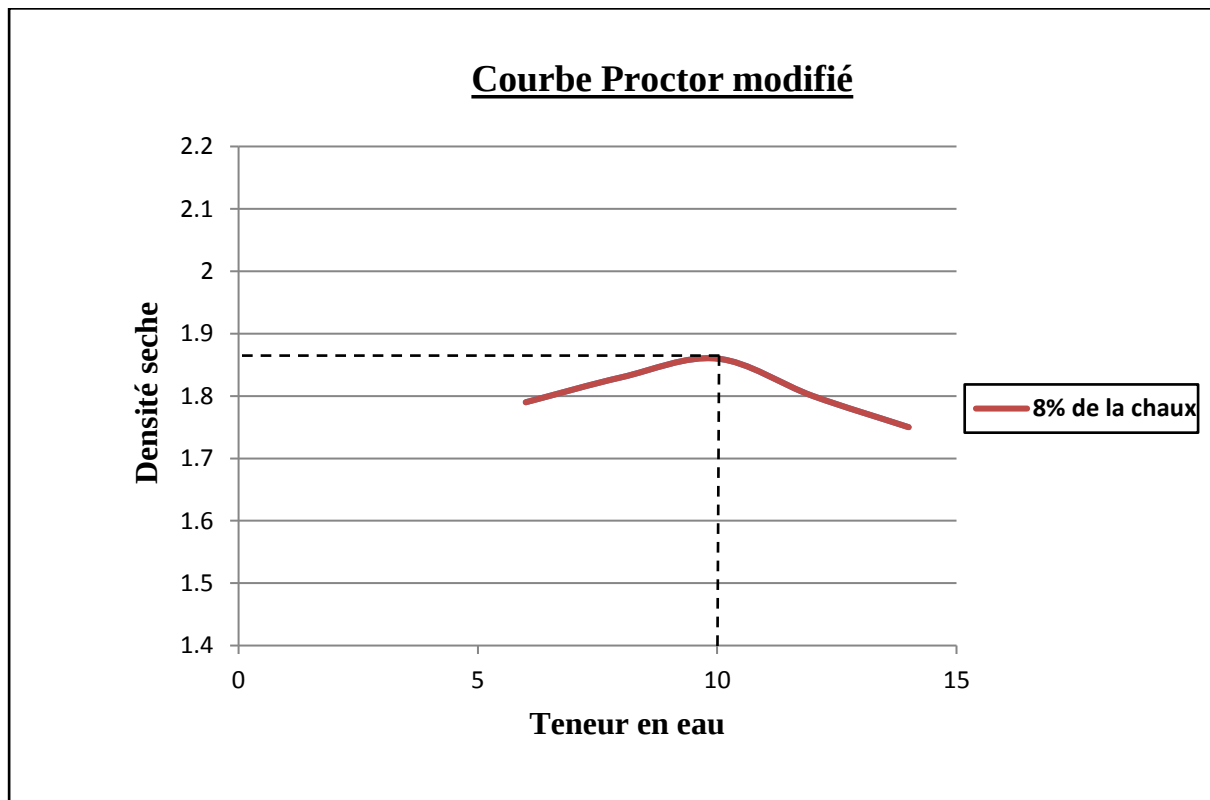


**Figure 29 : Courbe granulométrique d'échantillon du sable gypseux.
(Sable gypseux + 8% de la chaux).**

III.3.4.2 Essai Proctor modifié

Teneur en eau (%)	6	8	10	12	14
Poids d'eau ajouté (g)	150	200	250	300	350
Poids total humide (g)	5208.0	5282.8	5348,8	5320,4	5300,5
Poids du moule (normale) (g)	3411,2				
Volume du moule (cm³)	947				
Poids du sol humide (g)	1796.8	1871,6	1937,6	1909,2	1889.3
Densité humide (Kg/cm³)	1,90	1,98	2,05	2,02	2,00
Densité sèche (Kg/cm³)	1,79	1,83	1,86	1,80	1,75

**Tableau 22 : Résultats essai Proctor modifié
(Sable gypseux + 8% de la chaux).**



**Figure 30 : Courbe Proctor Modifié.
(Sable gypseux + 8% de la chaux).**

III.3.4.3 Essai de la résistance à la compression simple

CARACTERISTIQUES DE L'ESSAI PROCTOR MODIFIÉ

Teneur en eau optimale W_{opm} (%) = 10. Densité sèche maximale (T/M³) $D_{sm} = 1.86$

Echantillon	Eprouvettes	Résistance à la Compression Simple (bars)	Compacité (%)
Sable Gypseux carrière KHOBNA SAFRA+ 8% de la chaux	1	17.43	98
	2	17.43	
	3	17.43	

**Tableau 23 : Résultats de la résistance à la compression simple.
(Sable gypseux + 8% de la chaux).**

III.4 Influence du traitement sur la résistance à la compression simple.

III.4.1 Influence de la teneur en liant sur la RC pour différents âges.

On a confectionné trois (03) éprouvettes pour chaque teneur en liant (Chaux hydratée) choisi dans notre étude (2, 4, 6 et 8%), à la teneur en eau OPM et à la compacité de 98%, ceux-ci sont conservés à l'air libre pendant 1, 2, 3 et 4 jours.

On a noté pour chaque âge, la variation de la résistance à la compression simple moyenne en fonction de la teneur en liant.

Ages (jour)	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour
Teneur en chaux (%)	2	2	2	2
RC moyenne (bars)	3,47	7,08	10,42	10,45

Ages (jour)	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour
Teneur en chaux (%)	4	4	4	4
RC moyenne (bars)	5,79	8,10	11,58	11,62

Ages (jour)	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour
Teneur en chaux (%)	6	6	6	6
RC moyenne (bars)	8,25	11,62	16,21	16,31

Ages (jour)	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour
Teneur en chaux (%)	8	8	8	8
RC moyenne (bars)	5,79	11,58	17,37	17,43

Tableau 24 : Influence de la teneur en liant sur la résistance à la compression simple pour différents âges.

âges (jours) \ Teneur en liant (%)	1	2	3	4
2	3.47	7.08	10.42	10,45
4	5.79	8.10	11.58	11.62
6	8.25	11.62	16.21	16.31
8	5.79	11.58	17.37	17.43

Tableau 25 : Récapitulatif Influence de la teneur en liant sur la résistance à la compression simple pour différents âges.

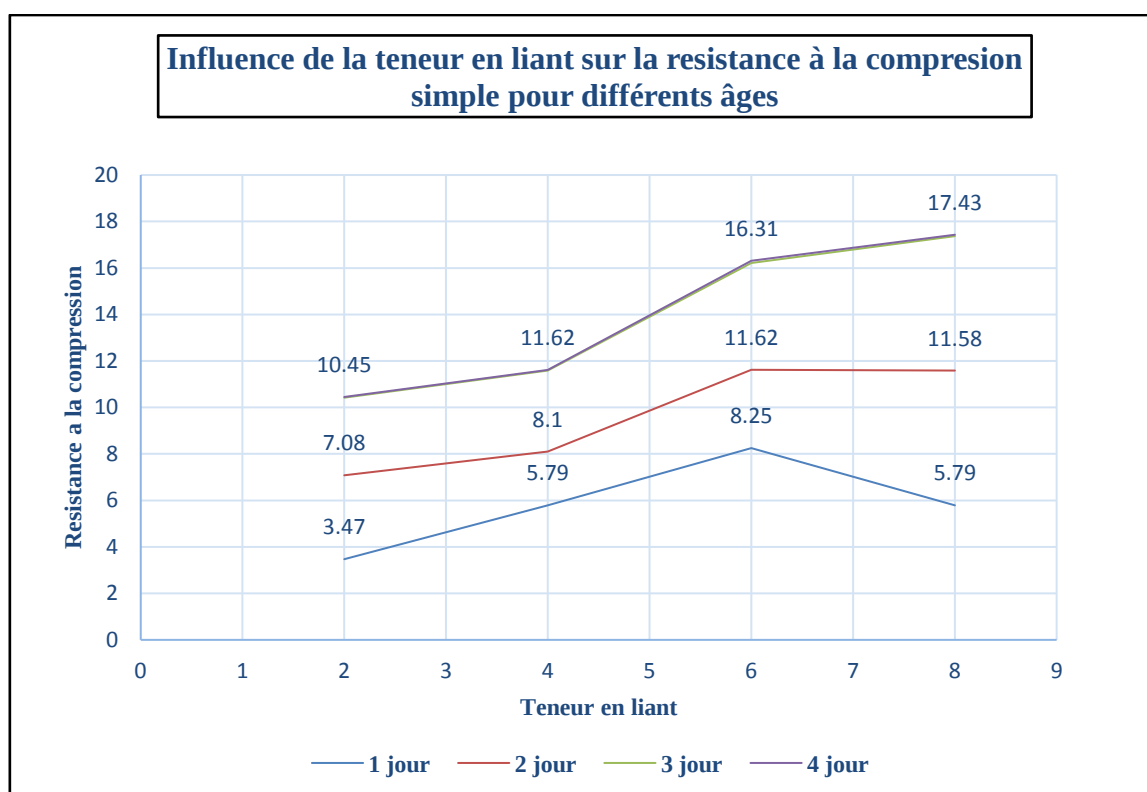


Figure 31 : Courbes Influence de la teneur en liant sur la résistance à la compression simple pour différents âges.

D'après les graphes obtenus, on remarque que les résistances à la compression simple (à un âge donné), augmente avec la teneur en chaux, la totalité de la résistance à la compression simple est obtenue au troisième jour, on note aussi qu'à partir du 3^{ème} jour, il y a une stabilisation de la résistance à la compression simple pour les différents dosages en chaux.

Du diagramme, on a remarqué la chute de la résistance à la compression simple au 1^{er} et 2^{ème} jour pour une teneur en liant considérable (8%), cela dû de la quantité d'eau de confection (OPM) qui reste dans le matériau avant séchage, alors, la sensibilité à l'eau est toujours posée malgré le traitement.

Il est tout à fait indiquer de différer la réalisation de la couche d'imprégnation au Cut-back 0/1 d'au moins 3 jours pour un sable gypseux traité.

III.4.2 Influence de l'eau de compactage sur la résistance à la compression simple.

Pour chaque dosage en liant choisi (2, 4, 6 et 8% de la chaux hydratée), on a essayé d'examiner l'effet de l'eau de compactage sur la RC, pour cette raison, on a confectionné pour chaque dosage en chaux trois (03) éprouvettes avec des teneurs en eau croissantes (6, 8, 10, 12 et 14%) et au poids spécifique apparent sec correspondant à la courbe Proctor et à la compacité de 98%.

Les éprouvettes ont été écrasées à la teneur en eau finale nulle pour chaque dosage en chaux choisi, après séchage à l'étuve à 60°C.

Densités sèches (T/m3)	1,74	1,81	1,82	1,80	1,77
Teneur en eau (%)	6	8	10	12	14
Teneur en liant (%)	2	2	2	2	2
RC moyenne (bars)	2,31	6,95	10,45	6,94	3,47

Densités sèches (T/m3)	1,80	1,83	1,84	1,79	1,74
Teneur en eau (%)	6	8	10	12	14
Teneur en liant (%)	4	4	4	4	4
RC moyenne (bars)	3,47	10,42	11,62	8,10	3,47

Densités sèches (T/m ³)	1,80	1,84	1,85	1,78	1,70
Teneur en eau (%)	6	8	10	12	14
Teneur en liant (%)	6	6	6	6	6
RC moyenne (bars)	9,26	11,58	16,31	9,26	5,79

Densités sèches (T/m ³)	1,79	1,83	1,86	1,80	1,75
Teneur en eau (%)	6	8	10	12	14
Teneur en liant (%)	8	8	8	8	8
RC moyenne (bars)	11,58	12,99	17,43	9,26	5,79

Tableau 26 : Influence de l'eau de compactage sur la résistance à la compression simple.

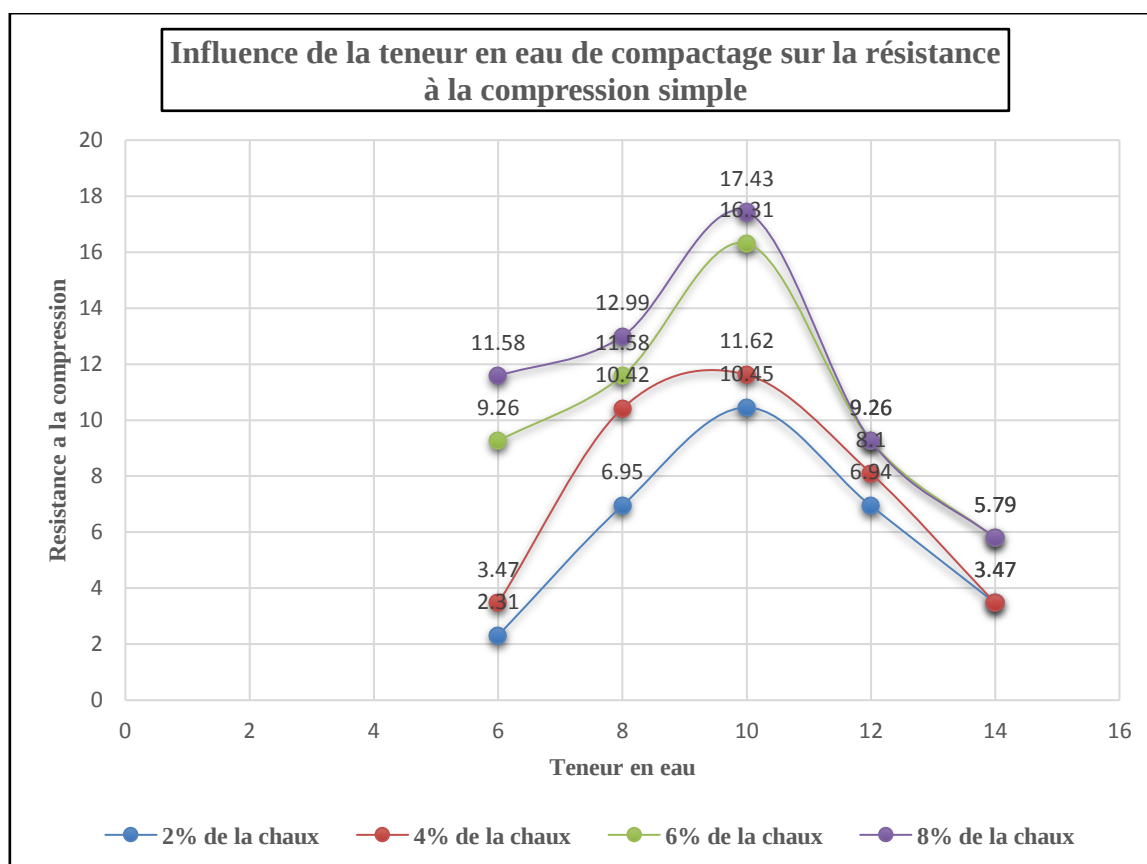


Figure 32 : Courbes Influence de l'eau de compactage sur la résistance à la compression simple.

Après avoir une teneur en eau finale nulle, les éprouvettes ont été écrasées pour chaque dosage en chaux choisi, on a rapporté sur un graphique, la résistance moyenne à la compression simple en fonction de la teneur en eau, les courbes obtenues ont l'allure de la courbe Proctor et chacune de courbe nous montre qu'il existe pour une teneur en liant donnée, une teneur en eau optimale et une RC optimale.

III.4.3 Influence du temps de séchage sur la résistance à la compression (RC) pour différentes teneurs en liant.

Pour examiner l'influence du temps de séchage sur la résistance à la compression simple, pour chaque dosage en chaux, les résultats ont été enregistrés lors de l'étude de l'influence de la teneur en liant sur la RC pour différents âges (paragraphe III.4.1).

Ages (jour)	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour
Teneur en chaux (%)	2	2	2	2
RC moyenne (bars)	3,47	7,08	10,42	10,45

Ages (jour)	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour
Teneur en chaux (%)	4	4	4	4
RC moyenne (bars)	5,79	8,10	11,58	11,62

Ages (jour)	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour
Teneur en chaux (%)	6	6	6	6
RC moyenne (bars)	8,25	11,62	16,21	16,31

Ages (jour)	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour
Teneur en chaux (%)	8	8	8	8
RC moyenne (bars)	5,79	11,58	17,37	17,43

Tableau 27 : Influence du temps de séchage sur la résistance à la compression (RC).

Teneur en liant (%) \ Temps de Séchage (jour)	2	4	6	8
1	3.47	5.79	8.25	5.79
2	7.08	8.10	11.62	11.58
3	10.42	11.58	16.21	17.37
4	10.45	11.62	16.31	17.43

Tableau 28 : Récapitulatif Influence du temps de séchage sur la résistance à la compression (RC).

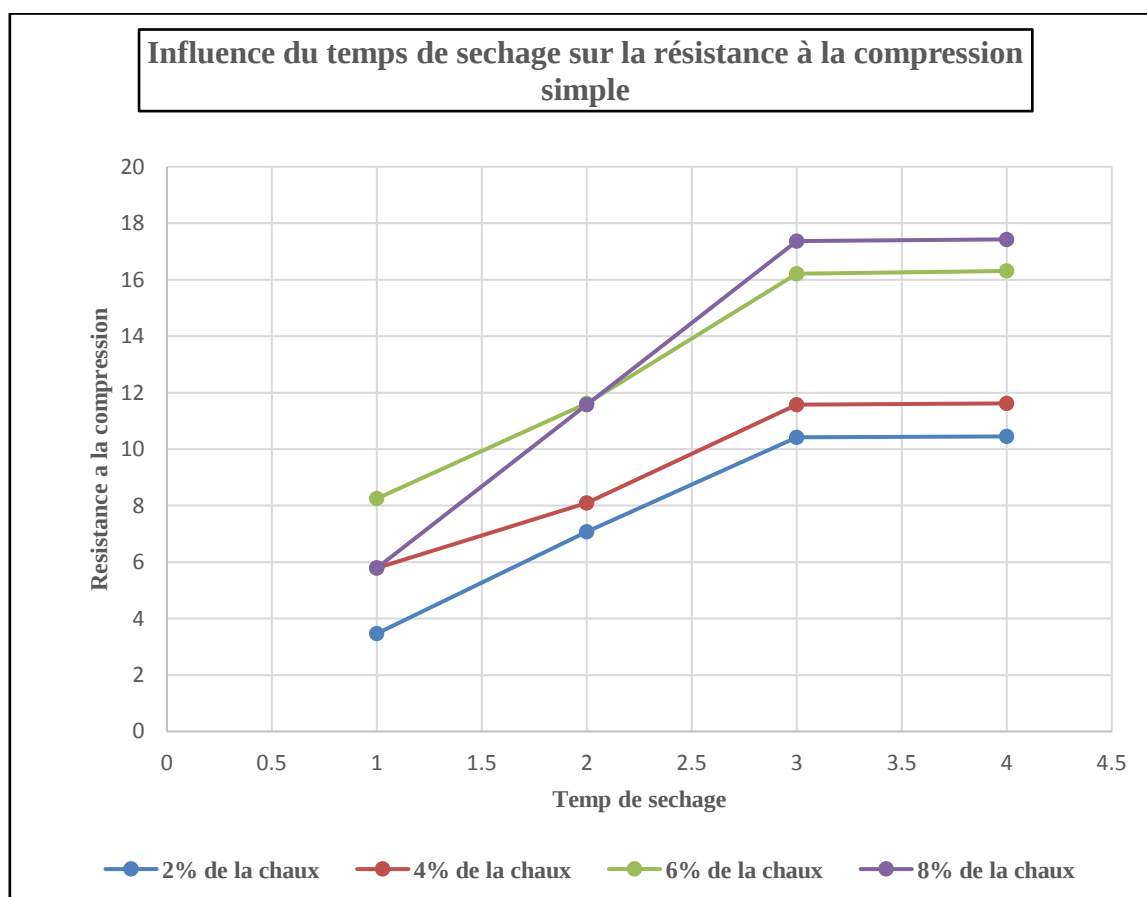


Figure 33 : Courbes Influence du temps de séchage sur la résistance à la compression (RC).

Le fait remarquable qui apparaît de la première vue, et que plus le temps de séchage augmente plus la résistance à la compression simple augmente et ceci pour les différents teneurs en liant,

On a constaté à partir du graphe que l'augmentation des pentes des différentes droites est proportionnelle aux teneurs en liant, ceci veut dire que le matériau traité à une teneur en chaux élevée est plus sensible à la variation du temps de séchage.

III.4.4 Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC).

De la même manière, pour étudier l'influence de la teneur en eau finale sur la compression simple, pour chaque teneur en chaux, les résultats ont été enregistrés lors de l'étude de l'influence de la teneur en liant sur la RC (paragraphe III.4.1).

D'où, les résultats sont donnés sur les tableaux ci-dessous.

Ages (jour)	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour
Teneur en eau finale (%)	2,79	0,48	0,11	0
Teneur en chaux (%)	2	2	2	2
RC moyenne (bars)	3,47	7,08	10,42	10,45

Ages (jour)	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour
Teneur en eau finale (%)	2,89	0,98	0,60	0
Teneur en chaux (%)	4	4	4	4
RC moyenne (bars)	5,79	8,10	11,58	11,62

Ages (jour)	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour
Teneur en eau finale (%)	2,98	1,90	0,78	0
Teneur en chaux (%)	6	6	6	6
RC moyenne (bars)	8,25	11,62	16,21	16,31

Ages (jour)	1 ^{er} jour	2 ^{ème} jour	3 ^{ème} jour	4 ^{ème} jour
Teneur en eau finale (%)	3,25	2,45	0,90	0,5
Teneur en chaux (%)	8	8	8	8
RC moyenne (bars)	5,79	11,58	17,37	17,43

Tableau 29 : Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC).

Teneur en liant (%) Teneur en eau finale (%)	2	Teneur en liant (%) Teneur en eau finale (%)	4
2.79	3,47	2,89	5,79
0,48	7,08	0,98	8,10
0,78	10,42	0,60	11,58
0	10,45	0	11,62
Chute de la résistance entre (0,5 et 3)%	50,98	Chute de la résistance entre (0,5 et 3)%	50,93

**Tableau 30 : Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC)
Pour teneur en liant 2 et 4%.**

Teneur en liant (%) Teneur en eau finale (%)	6	Teneur en liant (%) Teneur en eau finale (%)	8
2.98	8,25	3,25	5,79
1,90	11,62	2,45	11,58
0.11	16,21	0,90	17,37
0	16,31	0,5	17,43
Chute de la résistance entre (0,5 et 3)%	50,30	Chute de la résistance entre (0 et 3)%	66,78

**Tableau 31 : Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC)
Pour teneur en liant 6 et 8%.**

A partir du diagramme, on lit les valeurs suivantes :

Teneur en chaux (%)	2	4	6	8
Teneur en eau finale (%)	0,48	0,5	0,5	0,5
RC (bars)	7,08	11,80	16,60	17,43

Tableau 32 : Récapitulatif Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC) pour différents teneurs en liant.

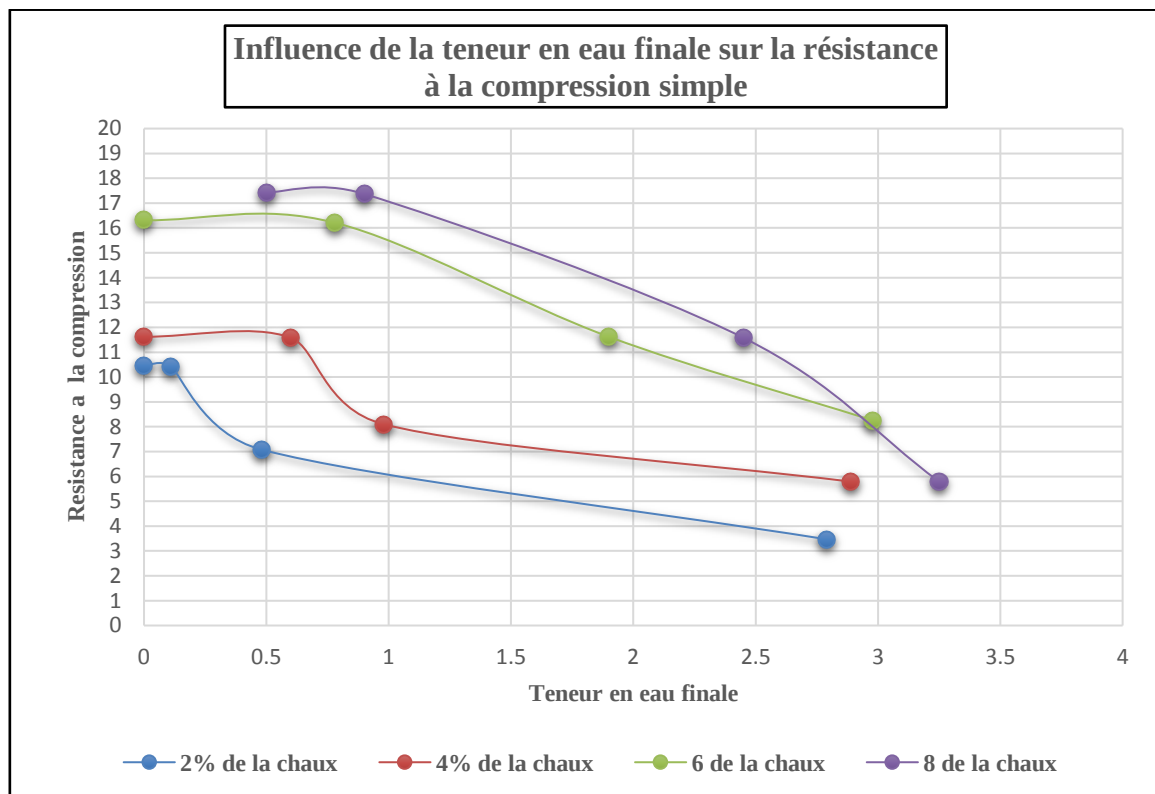


Figure 34 : Influence de la teneur en eau finale sur la résistance à la compression (RC).

On remarque à travers les courbes obtenues, une chute de la résistance à la compression simple entre l'intervalle 0,5 et 3% et ce pour tous les dosages en liant utilisés, donc, l'ajout de la chaux n'améliore pour autant la tenue à l'eau de matériau.

III.5 Conclusion

Les sables gypseux sont les seuls matériaux qui existent dans le sud-est Algérien où ils nous sont imposés par la nature, souvent ces matériaux sont de mauvaises qualités, mais cependant le traitement à la chaux hydratée apporte des modifications dans ses caractéristiques mécaniques.

Conclusion générale et perspective.

A l'issue de cette étude au laboratoire sur le sable gypseux de la carrière de KHOBNA SAFRA dans la commune d'Oued El-Allenda, nous avons pu arriver à la conclusion générale suivante :

- ☒ Le traitement du sable gypseux à la chaux hydratée a amélioré sa résistance à la compression simple, on passe ainsi d'une résistance à la compression simple (RC) de 10 bars avant traitement à une RC de 16 bars pour 6% de liant.
- ☒ L'obtention de la résistance maximale à la compression du sable gypseux traité, est subordonnée par une teneur en eau finale de l'eau de compactage nulle égale à (0%).
- ☒ Dans tous les cas, le liant du traitement utilisé n'améliore pas la sensibilité à l'eau des sables gypseux en cas de séchage à 100%, cependant une humidification entraîne la chute de la résistance à la compression simple.

En complément de cette étude, et en perspective, nous recommandons d'approfondir l'étude du traitement des sables gypseux en examinant le volet relatif à la sensibilité à l'eau des sables gypseux traités à la chaux hydratée.

Bibliographie

- [1] MORSLI M. 2007** "Contribution à la valorisation des tufs d'encroûtement en technique routière saharienne" thèse de doctorat d'état école nationale polytechnique, Alger.

- [2] ALLOUL B.** Thèse de doctorat d'état "Etude géologique et géotechnique des Tufs calcaires et gypseux d'Algérie en vue de leur valorisation routière".

- [3] BEN DHIA M. H.** "Les tufs et encroûtements calcaires en Tunisie et dans le monde".

- [4] BOULKHIOUT M., 2002** – Utilisation des tufs calcaires- sable de dune en géotechnique Routière – Mémoire de Magister, ENP Alger.

- [5] ALLOUL B., TRAORE A. et DEMBELE I. 2006** " The Transaharian in Algeria: A road for developing countries in Africa " IAEG paper number 739.

- [6] BAH E. 2009** "Sable Gypseux Utilisé En Technique Routière Au Sud-Algérien" Alger.

- [7] HAFSI A. 2010** "Les tufs gypseux et calcaires en Zones Arides - Essais et Critères de Sélection"

- [8] Y. ATLANS.** Catalogue des essais géotechniques exécutés au laboratoire géotechnique d'Orléans. Mars 1978.

- [9] COLOMBIER G., 1988** "Tufs et encroûtements calcaires : Utilisations routières – Synthèse, ISTED".

- [10]** La chaux, sa production et son utilisation.

- [11]** Catalogue de Dimensionnement des Chaussées Neuves MTP.

- [12] LTP- Sud** "Aspects principaux de la technique routière saharienne"