

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 GÈNE CIVIL ET HYDRAULIQUE

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

Master, Filière: Travaux publics

Spécialité : Voies ouvrages d'Art

C:.....

R:.....

Thème

**Etude d'amélioration des performances mécaniques d'un
tuf de la région d'In Salah par ajout d'Argile**

Présenté par :

- ❖ **ELKHIR Redouane**
- ❖ **KOUNTA Mohammed Lamine**

Soumis au jury composé de :

MEZIANI Nedjma	M.A.A.	UKMO	Présidente
AOUAM Abdou	INGENIEUR	ASTO	Examineur
KEBAILI Nabil	M.C.A.	UKMO	Encadreur

Année Universitaire: 2021 / 2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative border of pearls and roses surrounds the text. The border consists of a top row of large pearls, a middle row of small pearls, a bottom row of large pearls, and a final row of small pearls. White roses are positioned in the top right and bottom right corners, while red roses are in the bottom left corner.

Remerciements

Je remercie les enseignants du Département de Génie civil et Hydraulique - Université Kasdi Merbah d'Ouargla - qui ont participé à ma formation durant les cinq dernières années.

Je remercie mon encadreur Dr KEBAILI Nabil qui a dirigé mon travail ainsi que tous les membres de jury.

Je suis heureux de pouvoir dire merci si chaleureusement à M. Cheikh Sidi Ali du laboratoire LTPS-In Salah et Al-Azzawi et tout le personnel qui est toujours disponible pendant tout ce travail.

Je tiens à remercier l'équipe du laboratoire LTPS-In Salah ; personnel, ingénieurs et techniciens.

ELKHIR Redouane



Remerciements

Je remercie tous les enseignants de la faculté des sciences et Sciences de l'Ingénieur - Université Kasdi Merbah d'Ouargla - qui ont participé à ma formation durant les cinq dernières années.

Je remercie mon encadreur Dr. KEBAILI Nabil ainsi que les membres du jury qui ont jugé mon travail.

Je suis heureux de pouvoir dire merci si chaleureusement M. Cheikh Sidi Ali, responsable au LTPS-In Salah et Al-Azzawi et tout le personnel toujours disponible pendant l'enquête de ce travail.

Je tiens à remercier l'équipe du laboratoire Travaux Publics Sud à Ain Saleh

Personnel, ingénieurs et techniciens.

KOUNTA Mohammed lamine

Dédicaces

**Tout d'abord, Je remercie "Dieu" le tout puissant.
Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui ont contribué
de près ou de loin à mon éducation, mon assistance à
savoir mes parents qui m'ont éduqué, soutenus et m'ont
transmis beaucoup de choses (savoir).**

A mes frères et sœurs et à tout les amis et proches.

**Elkhir redouane
Kounta Mohammed lamine**

SOMMAIRE

Introduction générale	
CHAP I: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1.Introduction	3
I.1.1.Définition de tuf	3
I.1.2.Les tufs dans le monde:	3
I.1.3.Les encroûtements calcaires	4
I.1.3.1.Formation des encroûtements calcaires	4
I.1.3.2.Hypothèses de formation	5
I.1.4.Les encroûtements gypseux	6
I.1.4.1.Formation des encroûtements gypseux	6
I.1.4.2.Les sables gypseux	7
I.1.5.Les encroûtements mixtes	7
I.2.Classification des encroûtements calcaires	8
I.2.1.Classification selon la teneur en carbonate de calcium(CaCO_3)	8
I.2.2.Evolution des encroûtements calcaires	9
I.3.Argile	12
I.3.1Utilisation de l'argile	12
I.3.2.Défaut de l'argile	12
I.4.Conclusion	13
CHAP II: ESSAI DE COMPACTAGE (PROCTOR ET CBR)	
II.1.Introduction:	15
II.2.Essai Proctor	15
II.2.1.But de l'essai Proctor	15
II.2.2.Principe de l'essai Proctor	15
II.2.2.1.Essai Proctor normal:	16
II.2.2.2.Proctor modifié:	16
II.2.3.Appareillage de l'essai Proctor	16
II.2.4.Mode Opérateur l'essai Proctor	17
II.2.5.Matériel de l'essai Proctor normal	18
II.3.Définition essai CBR	18
II.3.1.But de l'essai	19
II.3.2 Principe de l'essai	19
II.3.3.Préparation des échantillons	20
II.3.4.réalisation des essais	21
II.4.Conclusion	22
CHAP III : IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISES	
III.1.Introduction:	24

Résumé

III.2.Localisation des échantillons	24
III.2.1.Carrière tuf Pk18	24
III.2.2.Argile in Salah	24
III.3.Etude d'identification des matériaux utilisés	25
III.3.1.Etude d'identification géotechnique	25
III.3.1.1.Analyse granulométrique	26
III.3.1.2.Analyse granulométrique par tamisage	26
III.3.2.Analyse granulométrique de tuf et argile	28
III.4.Les limites d'Atterberg	31
III.4.1.Préparation de l'échantillon	32
III.4.2.Etapes de l'essai	32
III.4.3.Expression des résultats	33
III.5.Essai au bleu de Méthylène	34
III.6.Analyse chimique	35
III.7.Proctor modifié	36
III.8.Essai CBR	38
III.9.Essai compression simple	39
III.10.Conclusion	42
CHAP IV: ETUDE DES MELANGES: TUF + ARGILE	
IV.1.Introduction	44
IV.2.Essai Proctor modifié	46
IV.2.1.Tracé des courbes Proctor modifiés	46
IV.2.2.Tracé des courbes CBR	48
IV.3. Essai à la compression simple	50
IV.3.1 Influence sur la Résistance à la compression simple	50
IV.4. Résumé de l'étude des mélanges : tuf + argile	51
IV.5.Conclusion	52

Liste des figures

Figure I.1 : Répartition des encroûtements calcaires dans le monde.	4
Figure I.2 : Schéma du circuit de la formation des tufs calcaires.	5
Figure I.3 : Profil d'un encroûtement gypseux	7
Figure I.4 : Classification des encroûtements calcaires selon le processus pédologique	9
Figure I.5 : Argile	12
Figure II.1 : Etapes de réalisation de l'essai Proctor	18
Figure III.1 : Carte de localisation de la carrière étudiée (tuf)	24
Figure III.2 : Carte de localisation de la carrière étudiée (argile)	25
Figure III.3 : Courbe de l'analyse granulométrique de de tuf	29
Figure III.4 : Courbe de l'analyse granulométrique d'argile	31
Figure III.5 : Appareil de Casagrande	32
Figure III.6 : Etapes de l'essai de limite de liquidité	33
Figure III.7 : Courbe des limites d'Atterberg de tuf	34
Figure III.8 : Courbe Proctor de tuf	36
Figure III.9 : Courbe Proctor d'argile	37
Figure III.10 : Courbe CBR d'argile	38
Figure III.11 : Courbe CBR de Tuf	39
Figure IV.1 : Organigramme de recherche d'une formulation optimale	45
Figure.IV.2 : Courbe Proctor du mélange (95% Tuf +5% Argile)	46
Figure.IV.3 : Courbe Proctor du mélange (90% Tuf +10% Argile)	47
Figure.IV.4 : Courbe CBR du mélange (85% Tuf +15% Argile)	47
Figure.IV.5 : Courbe CBR du mélange (95% Tuf +5% Argile)	49
Figure.IV.6 : Courbe CBR du mélange (90% Tuf +10% Argile)	49
Figure.IV.7 : Courbe Proctor du mélange (85% Tuf +15% Argile)	50

Résumé

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des encroûtements calcaires	8
Tableau I.2 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de fondation	10
Tableau I.3 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de base	11
Tableau I.4 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en remblais en Algérie	11
Tableau III.1 : Résultats de l'analyse granulométrique de de tuf	28
Tableau III.2 : Résultats de l'analyse granulométrique d'argile	30
Tableau III.3 : Résultats de limite de liquidité de tuf	33
Tableau III.4 : Résultats de bleu de Méthylène	35
Tableau III.5 : Résultats d'analyses chimiques	35
Tableau III.6 : Résultats Proctor de tuf	36
Tableau III.7 : Résultats Proctor d'argile	37
Tableau III.8 : Résultats de compression simple de tuf	41
Tableau IV.1 : Résultats Proctor du mélange (95% Tuf +5% Argile)	46
Tableau IV.2 : Résultats Proctor du mélange (90% Tuf +10% Argile)	47
Tableau IV.3 : Résultats Proctor du mélange (85% Tuf +15% Argile)	48
Tableau IV.4 : Comparaison des résultats	48
Tableau IV.5 : Influence de l'ajout d'argile sur à la compression simple	50
Tableau IV.6 : Influence du Pourcentage d'argile sur les propriétés physicomécaniques.	51

Liste des photos

Photo II.1 : Appareillage pour l'essai Proctor	17
Photo.II.3 : Appareillage pour l'essai CBR	19
Photo III.1 : carrière étudiée (argile)	25
Photo III.2 : Appareillage pour l'essai Analyse granulométrique	27
Photo III.3 : Mode Opérateur Analyse granulométrique d'argile	28
Photo III.4 : opération Proctor	36
Photo III.5 : opération CBR	38
Photo III.6 : Echantillon et Moule de l'essai compression simple	40
Photo III.7 : Compactage statique et démoulages des éprouvettes	40
Photo III.8 : Conservations des éprouvettes à l'étuve	40
Photo III.9 : Ecrasement des éprouvettes dans Presse CBR	41

Résumé

ملخص: إن إنجاز الطرق يعتمد أساسا على استخدام المادة الأولية التي هي التيف التي يجب أن تكون بمواصفات مطابقة للمقاييس، والتي بها نضمن نوعية جيدة. بعض المناطق في العالم تعاني من مشكلة نقص المواد الأولية المستخدمة في إنشاء الطرق و بالأخص المناطق الصحراوية بالجزائر، التي تتطلب النقل لمسافات طويلة و الذي ينعكس سلبا على تكلفة المشروع. لهذا السبب يسعى أصحاب القرار و الخبراء للبحث عن بدائل فعالة و اقتصادية. أن وفرة الطين يجعل منه البدائل المطروحة يعتبر هذا البحث بداية لدراسة خصائص المواد المحلية المتوفرة بمنطقة عين صالح من أجل استخدامها في إنجاز الطرق. كما يعتبر العمل التجريبي السبيل الأنجع لإيجاد خلائط من الطف و الطين بنسب معينة للحصول على أحسن الخصائص الميكانيكية و الفيزيائية. هدف هذه الدراسة هو القيام ببحث مكتبي و تجريبي حول استخدام الطين في تقنية الطرق و هذا قصد توفير قاعدة من المراجع للأبحاث المستقبلية في هذا المجال، وهذا ما يسمح باستغلال جيد الطين في إنشاء الطرق بشكل يسمح بالحصول على مقاومة جيدة .

الكلمات المفتاحية: التيف ، الطين، خلايط من الطف و الطين.

Résumé: La construction des routes est principalement basée sur l'utilisation de matières premières (tuf, bitume,...etc.) devant être en conformité avec les normes, assurant par suite une bonne qualité. Certaines régions du monde, souffrent du problème de manque de matières premières utilisées pour la construction de routes notamment les régions sahariennes de algérie, d'où le besoin de déplacement sur de longues distances, ce qui influe défavorablement sur le cout du les décideurs et les spécialistes ont cherché des alternatives efficaces| projet. Pour cette raison et économiques. L'argile, vu son abondance ; peut-être considérer comme la plus importante de ces alternatives. Cette étude est une initiation d'une recherche menée sur la caractérisation des gisements de la région d'in Salah en vue de leurs utilisation en technique routière, et de valoriser les matériaux locaux si nécessaire. Le travail expérimental a permis d'obtenir les meilleurs caractéristiques des propriétés physiques et mécaniques de l'optimal Proctor Modifié à partir des pourcentages des mélanges tuf -argile. L'objectif de cette étude est de faire une recherche bibliographique et travail expérimental sur l'utilisation de l'argile en technique routière, en vue de fournir aux futurs travaux expérimentaux sur ce sujet une base documentaire, qui leurs permettent une bonne exploitation de argile dans la construction des routes de manière à avoir de bonne performance mécanique.

Mots clé : Tuf, Argile, mélange de Tuf-Argile.

Summary: Road construction is mainly based on the use of raw materials (tuff, bitumen, etc.) that must comply with standards, thereby ensuring good quality. Some regions of the world suffer from the problem of lack of raw materials used for road construction, particularly the Saharan regions of Algeria, hence the need for long-distance travel, which adversely affects the cost of decision-makers and specialists looked for effective alternatives| project. For this reason and economic. The clay, given its abundance; may be considered the most important of these alternatives. This study is an initiation of a research carried out on the characterization of the deposits of the region of in Salah with a view to their use in road engineering, and to valorize local materials if necessary. The experimental work made it possible to obtain the best characteristics of the physical and mechanical properties of the optimal Modified Proctor from the percentages of the tuff-clay mixtures. The objective of this study is to carry out a bibliographical research and experimental work on the use of clay in road engineering, in order to provide future experimental work on this subject with a documentary base, which will allow them a good exploitation of clay. in road construction so as to have good mechanical performance.

Key words: Tufa, Clay, Tufa-Clay mixture

Introduction générale

Introduction générale

Le développement des infrastructures routières à travers le monde, plus particulièrement en Algérie, a créé un besoin immense en matériaux de chaussées, qui doivent répondre rigoureusement à certains critères géotechniques tels que : la dureté, la propreté, la granulométrie, etc. Toutefois, ces matériaux ne sont pas disponibles (rares ou mêmes inexistant) dans certaines régions (les zones arides et les zones semi-arides), ce qui rend l'approvisionnement par ces matériaux classiques difficiles et très coûteux à cause des distances de transport excessivement grandes et les moyens réduits. De là est né la nécessité d'utiliser les matériaux locaux qui ont prouvés leur efficacité par leur caractéristiques mécaniques convenables d'une part, et d'autre part leur coûts, parmi ces matériaux on trouve les tufs.

Au nord d'Algérie, et depuis une trentaine d'années des milliers de kilomètres de routes économiques de désenclavement, peu circulées, ont été réalisés, dans l'ensemble avec succès, en tufs d'encroûtements. Par exemple la RN-1 (Laghouat– Médéa), la RN 4 (Oran) et la reconstruction de la RN 6 (Saïda) Actuellement, plusieurs chercheurs ont orienté leurs études vers une meilleure connaissance géologique et géo-mécanique des tufs et argile. Ceci dans le but de généraliser leurs utilisations pour des routes à moyen trafic.

Dans ce sujet on va étudier les caractéristiques du tuf de la carrière de PK 18 in Salah et argile de route aérodrome in Salah vu leur disponibilité, et la possibilité de les utilisé dans la construction routière.

Notre travail de recherche, pour étudier les propriétés du sol compacté, la technique nécessite de nombreux essais sur des échantillons de sol avant de pouvoir être mis en œuvre. Ce mémoire présente quatre chapitres.

- ✚ Le premier chapitre est consacré à la présentation des travaux de recherche, Une synthèse bibliographique sur les tufs et l'argile.

- ✚ Dans le second chapitre, nous avons déterminé l'essai compactage (Proctor et CBR)

Introduction générale

- ✚ Le troisième chapitre, nous avons déterminé les caractéristiques mécaniques des matériaux locaux (tuf, argile), particulièrement sur les limites d'Atterberg et l'essai Proctor Modifié et essai CBR, essai compression. Nous avons terminé ce chapitre par la présentation des résultats expérimentaux relatifs aux matériaux locaux.
- ✚ Le Quatrième chapitre aborde les résultats des essais des limite d'Atterberg et Proctor Modifié, CBR et essai de compression simple concernant les mélanges à différents pourcentages de tuf et argile, dont le but est de valoriser les matériaux locaux.

CHAPITRE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAP I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.INTRODUCTION

Le présent travail constitue une contribution à la recherche visant la caractérisation mécanique des chaussées en tuf et en argile. Cette étude bibliographique comporte des définitions, de la conception du tuf et l'argile, et leurs emplois en construction routière.

I.1.1.DEFINITION DE TUF

Dans la bibliographie, les tufs se définissent comme étant 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 dissolutions et précipitations.

Suivant leur composition, les tufs se regroupent en trois grandes catégories] :

- Les tufs calcaires;
- Les tufs gypseux;
- Les tufs mixtes.

I.1.2.LES TUFES DANS LE MONDE

En Amérique : Ce sont les hautes plaines des États-Unis allant du Texas à la Californie, celles du Mexique et celles de l'Argentine centrale. En Afrique : Ce sont les «Hamada», hauts plateaux de l'Afrique du Nord, la plaine de Djefara et le bassin de Benghazi en Lybie, les dépressions du nord du Kenya, les steppes de la Tanzanie, les plateaux de la Somalie, les vallées de Botswana et d'Afrique du Sud, les zones sèches de Madagascar et du Mozambique, la Namibie et l'Angola.

Au Moyen-Orient : On rencontre le tuf au Liban, en Syrie, en Jordanie, dans les pays du Golfe persique et en Inde dans les régions de Delhi et New Delhi.

En Australie : On trouve le tuf dans les plaines littorales.

En Europe : Le tuf y est peu abondant. On le trouve uniquement dans le sud de l'Espagne. La figure 1 représente la carte des zones de climat désertique, aride et semi-aride et des régions où existent les encroûtements calcaires

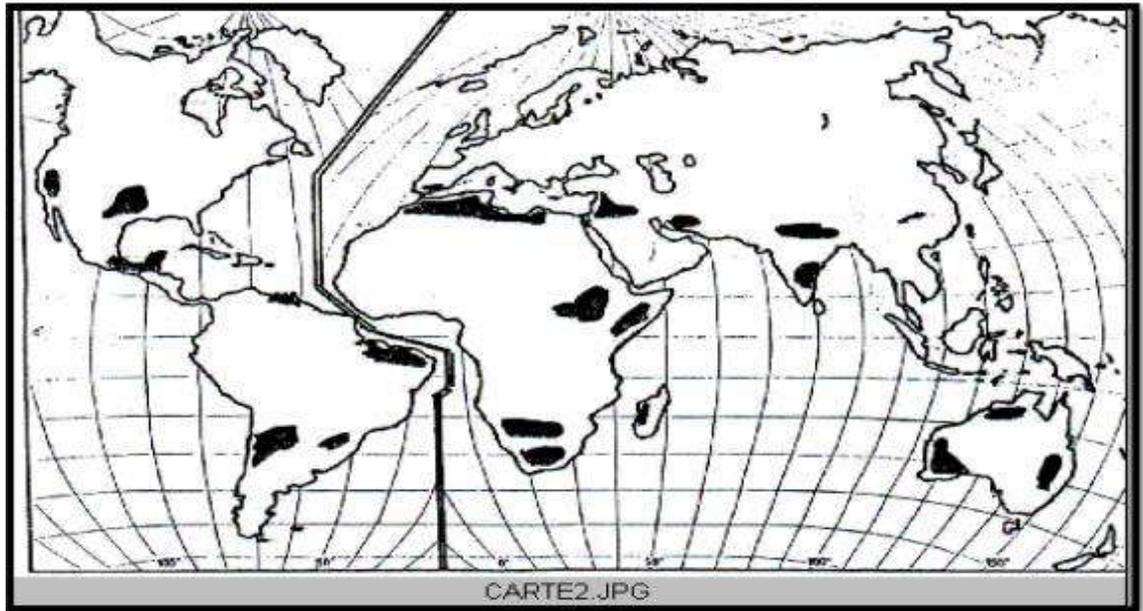


Figure I.1. : Répartition des encroûtements calcaires dans le monde.

I.1.3. Les encroûtements calcaires

➤ Définition :

Selon les différentes spécialités en géologie, pédologie ou la géotechnique, de nombreuses définitions ont été données aux encroûtements calcaires. Parmi ces définitions on peut retenir celle formulée par A.J. GOUDIE .[6]

« La croûte calcaire est un matériau terrestre composé en majorité de carbonate de calcium (CaCO_3). Les croûtes existent à l'état poudreux, nodulaire ou très induré ; elles sont dues à la cimentation, à l'accumulation ou au remplacement de quantités plus ou moins grande de sols rocheux ou matériaux altérés par du calcaire dans une zone d'infiltration ».

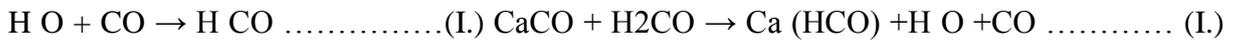
I.1.3.1. Formation des encroûtements calcaires

Les encroûtements sont constitués principalement de carbonate de calcium (CaCO_3 : calcaire) et de silice ou quartz (SiO_2 : sable). Ils contiennent aussi en faible quantité des argiles, des feldspaths et du chlorure de sodium. La différence entre les encroûtements au niveau des caractéristiques mécaniques n'est pas due essentiellement à la présence ou pas de l'un des composants minéraux autre que le calcaire et le sable, mais elle est liée aux conditions qui existaient dès le début de leur formation ; par exemple, deux encroûtements ayant la même composition chimique peuvent avoir des compacités très différentes selon l'ampleur, la fréquence et la nature des cycles qui ont été à l'origine de leur formation.

CHAP I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1.3.2. Hypothèses de formation

La formation des encroûtements calcaires est due à la cimentation du sol par carbonate de calcium. Dans la nature l'origine des calcaires est soit chimique, soit biologique. La formation chimique dépend de l'abondance du CO dans l'eau. Dans ce dernier, le phénomène régit par les équations chimiques suivantes :



Soit l'équilibre: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \dots\dots\dots (\text{I.})$ insoluble soluble.

Quant à la formation biologique des calcaires, elle est due à de nombreux organismes qui sécrètent directement le calcaire (CaCO₃) pour leur squelette ou coquille. C'est l'origine essentielle des calcaires. Le CaCO₃ qui contribue à la formation des encroûtements calcaires provient de la solubilisation des hauts massifs. La figure représente schématiquement le circuit qui aboutit à la création des encroûtements calcaires.

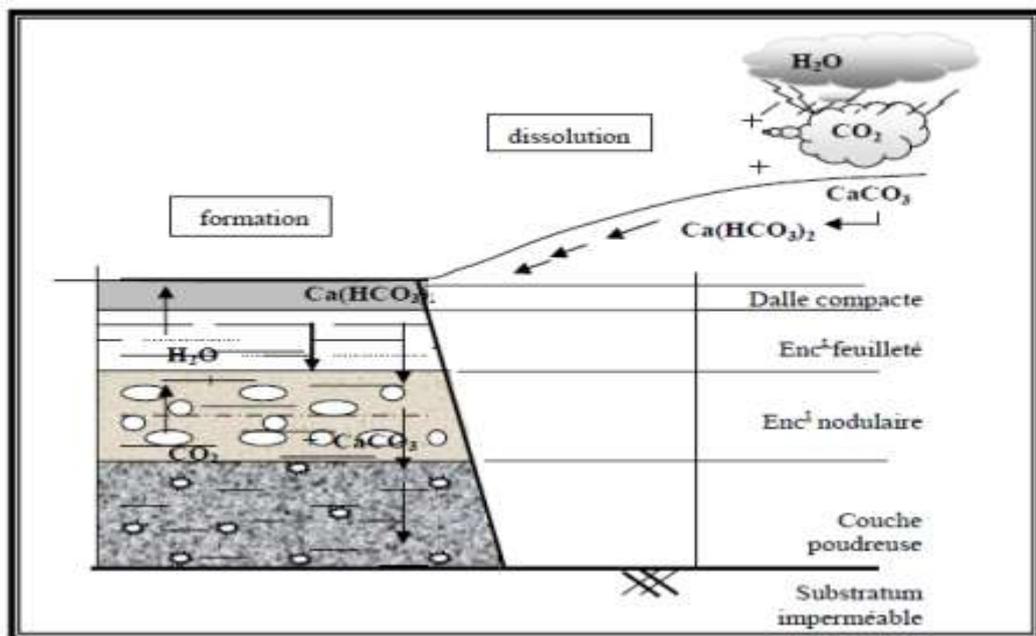
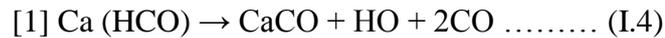


Figure I.2. : Schéma du circuit de la formation des tufs calcaires.

CHAP I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'eau est d'autant plus chargée que sa température est plus faible et son mouvement plus lent. Une fois arrivée dans une plaine ou un plateau, l'eau s'infiltré dans le sol pendant la saison sèche, le niveau de la nappe commence à baisser sous l'effet de l'évaporation et surtout de la végétation. A ce moment on assiste au phénomène de capillarité dû à la tension superficielle caractérisée par le potentiel capillaire. Cette pression négative est nécessaire pour la précipitation du calcaire selon la réaction suivante :



Précipité

L'élévation de la température accélère la réaction mais la dépression joue un rôle fondamental.

I.1.4. Les encroûtements gypseux

Les encroûtements gypseux sont des formations analogues aux encroûtements calcaires. Ils sont très abondants dans les régions à climat arides où les précipitations sont insuffisantes pour lixivier le gypse, qui existe déjà dans les formations géologiques anciennes. 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. Les encroûtements gypseux se dressent généralement en couches horizontales affleurâtes à sub-affleurantes. En Algérie, ils occupent la grande surface au Sud et Sud-ouest de Biskra jusqu'en Tunisie].

I.1.4.1. Formation des encroûtements gypseux

Le profil d'un sol encroûté par le gypse présente généralement de haut en bas, trois horizons principaux voir figure

✓ Horizon supérieur A

C'est un horizon appelé tirsch en arabe d'une épaisseur comprise entre 0 et 0 cm, il est l'équivalent de la terre végétale en zone tempérée. Cet horizon est caractérisé par l'abondance de racines gypsifiées et par un encroûtement discontinu en feuillets et granulés il est friable, poreux et souvent sableux.

✓ **Horizon massif ou pierre à plâtre B**

C'est un horizon appelé Taffeza en arabe d'une épaisseur qui varie généralement entre 0,5 et 1 m, il vient juste après l'horizon supérieur. C'est un grès à ciment gypseux, utilisé souvent comme pierre à bâtir à cause de sa dureté remarquable.

✓ **Horizon des roses de sable C**

A la base de l'horizon massif, l'encroûtement devient clair, humide et sableux. De gros cristaux de gypse imbriqués apparaissent, appelé « Louss » en arabe, la nappe est souvent de 50 cm à 1 m en dessous. Au contact direct de la nappe, le gypse se cristallise en agrégats de cristaux larges et aplatis qui englobent des grains de sable.

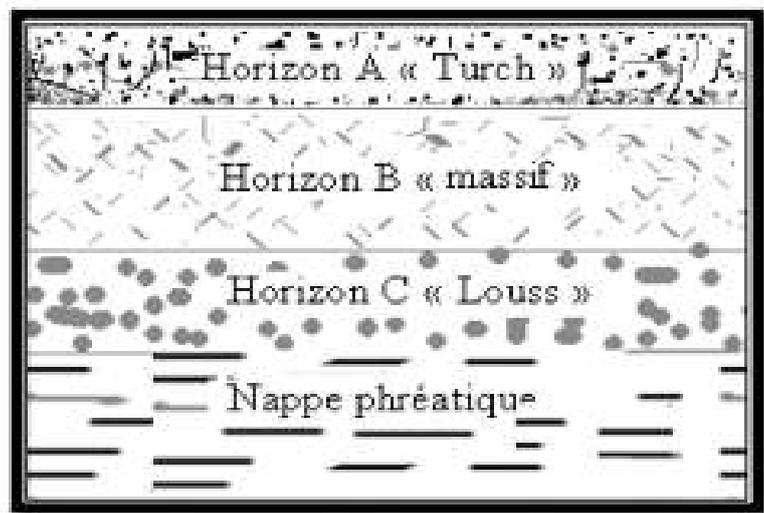


Figure I.3. : Profil d'un encroûtement gypseux 7

I.1.4.2. Les sables gypseux

Les encroûtements dits « tendres » sont les principaux gisements de tufs gypseux, appelés plus couramment « **sable gypseux** ». C'est uniquement cet horizon qui est utilisé en construction routière.

I.1.5. Les encroûtements mixtes

Les encroûtements mixtes sont des formations de tufs calcaires gypsifiés à prédominance carbonatée ou de tufs gypseux calcifiés à prédominance sulfatée (De Os Horta, 1980). Au-delà d'une certaine aridité, le développement des encroûtements calcaires est arrêté à la source, à cause de l'insuffisance des précipitations pour dissoudre et drainer le calcaire vers les nappes phréatiques; et inversement, lorsqu'on passe du climat désertique au

CHAP I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

climat semi-aride, le gypse devient instable dans les sols à cause de sa solubilité notable, les encroûtements gypseux sont relayés alors par les encroûtements calcaires.

I.2. CLASSIFICATION DES ENCROUTEMENTS CALCAIRES

I.2.1. Classification selon la teneur en carbonate de calcium(CaCO₃)

La classification de Ruellan établie pour la géologie du Maghreb, semble avoir un caractère relativement universel puisqu'elle est très voisine de celle de Netterberg ablie à partir des études faites en Afrique du sud et en Australie [7]. Ruellan propose trois grandes catégories :

- **Distributions diffuses** : La teneur en calcaire est très faible. Le calcaire n'est pratiquement pas visible à l'œil nu.
- **Concentration discontinues** : La teneur en calcaire devient plus élevée (40 à 60%) les concentrations de calcaire se présentent sous la forme de nodule durs de 1 à quelque Cm³ ou sous la forme de module, ou d'amas friable qui s'écrasent facilement.

Tableau I.1. : Classification des encroûtements calcaires

	Denomination	Description	CaCO ₃ (%)	Epaisseur	Rapports mutuels
Encroutements non feuilletés	Encroutements massifs	structure massive ou polyédrique	> 60	0.3 a 2.0 m (le plus souvent)	Sous les encroutements non feuilletés; il y a toujours des amas friables avec ou sans nodules
	Encroutements nodulaires	structure nodulaire et polyédrique			
Encroutements feuilletés	Croutes sensutricu	euillets superposes et discontinus d encroutement massif ou nodulaire d epaisseur millimetrique a centimetrique croisant du bas en haut.	>70	Quelques centimetres a >1 m	Sous les croutes; il y a presque toujours des encroutements non feuilletés .les dalles compactes n existent qu au sommet des croutes et peuvent remplacer entierement celles -ci. Des pelicules rubanees sont presque toujours associees a la dalle compacte dont tapissent la surface superieure et les fissures.
	Dalles compactes	Feuillets petrifies epaisseur de qlq cm a plusieurs decimetres			

- **Concentration continues** : Lorsque la concentration en calcaire se poursuit (teneur en CaCo 0) elle devient continue, on a alors affaire aux encroûtements calcaires proprement dits.

CHAP I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La classification proposée par Ruellan pour les concentrations continues, est résumée sur le tableau I.

I.2.2. Evolution des encroûtements calcaires

Au fur et à mesure du dépôt du calcaire, la teneur en carbonates du sol s'élève. A partir de ce stade se produisent les phénomènes pédologiques qui transforment les différents horizons des sols. L'évolution finale est l'encroûtement mûr

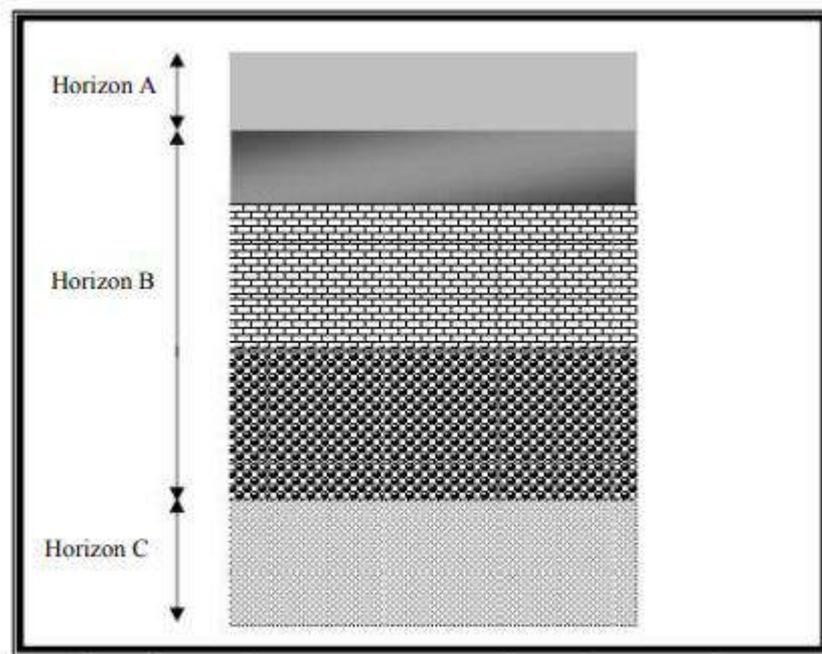


Figure I.4. : Classification des encroûtements calcaires à partir du processus pédologique (encroûtement mûr).

On distinguera les horizons suivants :

- ✚ **Horizon A** : pauvre en calcaire, c'est la terre végétale d'une épaisseur de 0 à 50 cm.
- ✚ **Horizon B** : riche en calcaire (40 à 90) d'une épaisseur de à m, il est constitué de trois couches de haut en bas, d'une dalle compacte très dure à forte teneur en carbonate, d'une croûte constituée de feuillets de dureté plus faible que la dalle et d'un encroûtement nodulaire plus au moins pulvérulent.
- ✚ **Horizon C** : c'est le sol originel, c'est un matériau poudreux où l'enrichissement en calcaire est faible.

Utilisation des calcaires en constructions routière

Selon leurs caractéristiques, les tufs calcaires sont utilisés différents cas :

- ✚ couches de fondation, couches de base, couches de forme et en accotement.

✚ pistes agricoles, routes moyennement ou fortement circulées et même autoroutes remblais.

Actuellement l'utilisation la plus courante des tufs calcaires est la réalisation de couches d'assises (Fondation et base) de routes à moyen ou faible trafic. Les spécificités d'utilisation des tufs calcaires en construction routière en Algérie [6].

a. Couches de fondation

Le rôle de la couche de fondation est identique à celui de la couche de base. Elle reprend les contraintes normales et les répartit sur le sol support. La couche de fondation est le domaine privilégié des tufs calcaires ; l'épaisseur après compactage varie selon la nature des sols de la plate-forme et de l'importance du trafic (forte, moyenne ou faible). Le tableau I.1 présente les différentes caractéristiques physiques et chimiques des tufs calcaires utilisés en couches de fondation en Algérie.

Tableau I.2.: Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de fondation en Algérie.

Granulometrie	suivant le fuseau
Limite de liquidite	$20\% < Wl < 35\%$
Indice de plasticite	$6\% < Ip < 12\%$
Equivalent de sable	$20\% < ES < 35\%$
Teneur en carbonate	$CaCO_3 > 45\%$
CBR inbibe	CV (1): CBR > 20 CW(1): CBR > 30 RN(1): CBR > 35

CV (1): chemin vicinal

CW (1): chemin wilaya

RN (1): route nationale

b. Couche de base

La couche de base a pour rôle essentiel de reprendre les efforts verticaux et de répartir les contraintes normales qui en résultaient sur les couches sous-jacentes. Les tufs naturels sont rarement aptes à être utilisés en couches de bases pour les routes à fort ou moyen trafic. Pour la couche de base, le CBR doit être au minimum égale à 60 Cette portance est rarement atteinte quand les tufs permettent une immersion de 4 jours. Dans les régions sèches, on peut prendre en compte un CBR non immergé, d'où une possibilité d'utilisation des tufs en couches de bases, puisque leur portance immédiate est en générale très élevée.

Tableau I.3. : Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de base en Algérie.

Granulometrie	Suivant le fuseau
Limite de plasticite	$20\% < Wl < 30\%$
Indice de plasticite	$5\% < Ip < 10\%$
Equivalent de sable	$20\% < ES < 40\%$
Teneur en carbonate	$CaCO_3 > 45\%$
CBR inbibe	CV (1): CBR > 20 CW(1): CBR > 20 RN(1): CBR > 20

c. Remblais :

Il consiste à transporter et déposer des terres pour combler des cavités, il prend en considération le tassement et le coefficient de foisonnement du sol. Les tufs sont également utilisés en remblais s'ils respectent certains critères.

Tableau I.4. : Critères d'utilisation des tufs calcaires en remblais en Algérie

Granulometrie	Suivant le fuseau
limite de plasticite	$Wl < 45\%$
Indice de plasticite	$Ip < 16\%$
Equivalent de sable	$15\% < ES < 40\%$
teneur en carbonate	$CaCO_3 > 30\%$
CBR inbibe	CBR > 14
Densite seche maximale	$\gamma_{dmax} > 1.6g/cm^3$
Teneur en optimale	$W_{opt} < 16\%$

I.3.Argile

L'argile est un minéral (plus exactement une famille de minéraux) de la famille des silicates, plus précisément des phyllosilicates (silicates en feuillets). Leur structure est identifiable par étude aux rayons X ; elle se caractérise par la superposition de feuillets composés de couches tétraédriques ou octaédriques. Dans l'espace entre les feuillets, ou espace interfoliaire, se placent divers cations comme K, Na, Ca. L'argile est généralement issue de l'altération par l'eau des autres silicates (sauf le quartz). C'est pour cette raison qu'on le trouve systématiquement dans les sols et les formations superficielles. Minéral détritique ultrafin, on le trouve aussi très fréquemment dans les roches sédimentaires. Mélangé à un autre minéral comme la calcite il formera de la marne. Si l'argile est seule présente on désignera la roche sous le nom d'argilite.



Figure I.5.: Argile

I.3.1. Utilisation de l'argile

Selon sa variété, l'argile se révèle être un minéral très utile. On peut ainsi faire des tuiles et briques, des poteries en jouant sur sa capacité de modelage lorsque mélangé à l'eau. Sa capacité d'absorption est utilisée pour la réalisation des cosmétiques et de médicaments (Smectite du Smecta, Attapulgite). L'argile sert aussi à la fabrication du ciment.

I.3.2. Défauts de l'argile

Mais ces qualités peuvent se révéler dans certains cas être des défauts très graves, par exemple les coulées boueuses. Cette capacité de gonfler en présence d'eau et rétrécir en période de sécheresse nuit à la stabilité des constructions. Plusieurs milliers de communes en France sont en arrêt de catastrophe naturelle en raison de ce comportement.

I.4. CONCLUSION

Dans ce chapitre il est présenté les généralités sur les tufs et les argiles telle que, définition du tuf et argile, quelques paramètres qui nous permettent d'identifier ce type de tuf et argile comme la minéralogie, analyse granulométrique, comportement mécanique et les propriétés (WL, WP,...). On a parlé aussi sur les diverses utilisations des tufs et argile, son utilisation dans le domaine routier qui on va l'expliquer dans le chapitre suivant. Dans le chapitre suivant, on s'intéressera à la partie expérimentale par la présentation des résultats des essais d'identification physiques et mécaniques réalisés sur le tuf et le argile au niveau de la région d'in Salah, dans un but de leurs utilisations en construction routière. Les tufs sont utilisés dans plusieurs travaux, en particulier les routes dans les couches de fondation, couches de base, couches de forme, accotement, piste agricoles, routes moyennement ou fortement circulées.

CHAPITRE II

ESSAIS DE COMPACTAGE ET DE PORTANCE

II.1. INTRODUCTION

Les remblais posent à l'ingénieur routier un certain nombre de problèmes, d'où on peut citer:

- La stabilité des talus
- La résistance des talus à l'érosion.
- Le tassement.
- le compactage.

Le « compactage » est le procédé le plus économique toujours utilisé dans la construction des remblais pour améliorer la densité sèche du sol (gd.)

Le « compactage » est une réduction pratiquement instantanée du volume du sol dû à la réduction des vides d'air. Il n'y a aucune expulsion d'eau ce qui différencie le compactage de la consolidation.

L'étude du compactage s'effectue à l'aide d'un damage normalisé connu sous le nom de (l'essai Proctor).

II.2. ESSAI PROCTOR

II.2.1. BUT DE L'ESSAI PROCTOR

L'essai Proctor a pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée, la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximum. La teneur en eau ainsi déterminée est appelée (teneur en eau optimum Proctor).

II.2.2. PRINCIPE DE L'ESSAI PROCTOR

L'essai Proctor 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 le teneur en eau du sol et sa densité sèche après le compactage.

L'essai Proctor est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (2%, 4% ,6% ,8% ,10%,12% ,14%,16%) 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. Elle représente un maximum dont l'abscisse est « la teneur en eau optimum Proctor », et l'ordonnée (la densité sèche maximum Proctor).

L'essai Proctor s'effectue généralement pour deux compactages d'intensités différentes:

II.2.2.1. Essai Proctor normal

Le compactage n'est que moyennement poussé. Il est généralement utilisé pour les études de remblais en terre (barrages et digues).

Il s'effectue en trois couches avec « la dame Proctor normal » l'énergie de compactage est de:

- 55 coups de dame par couche dans le moule C.B.R.
- 25 coups par couche dans le moule Proctor normal.

II.2.2.2. Proctor modifié

Le compactage est beaucoup plus intense ; il correspond en principe au compactage maximum que l'on peut obtenir sur chantier avec les rouleaux à pieds de mouton ou les rouleaux à pneus lourds modernes. C'est par l'essai Proctor modifié que l'on détermine les caractéristiques de compactage des matériaux destinés à constituer la fondation ou le corps de chaussée des routes.

Le compactage dans ce cas-là s'effectue en cinq couches successives avec « la dame Proctor modifié » l'énergie de compactage est de:

- 55 coups de dame par couche dans le moule C.B.R.
- 25 coups par couche dans le moule Proctor.

II.2.3. APPAREILLAGE DE L'ESSAI PROCTOR

Il comprend:

1. Le moule Proctor constitué par un tube cylindrique métallique inoxydable de 10,15cm de diamètre intérieur et 11,7 cm de hauteur.
2. La dame Proctor normal qui est constitué par un mouton de 2,49 kg (cylindrique de 5,1cm de diamètre) dont la hauteur de chute est de 30,4 cm.
3. Du sable.
4. Une étuve.
5. Une règle à araser d'environ 250mm.
6. Truelles pour le malaxage.
7. Des maillets, burins, couteaux, etc. pour le démoulage, ou mieux un appareil à démouler.
8. Une balance sensible au gramme d'une portée maxima au moins égale à 20 kg.
9. Une éprouvette graduée
10. Un bac et de l'eau.



Photo II.1. : Appareillage de l'essai Proctor.

II.2.4.MODE OPERATOIRE DE L'ESSAI PROCTOR

- + Sécher le matériau à l'air ou à l'étuve (3 à 5 heure à 60 °C);
- + Faire passer au tamis de diamètre 20mm;
- + Prendre 5.5 kg de tamisat;
- + ajouter une quantité d'eau mesurée au sol et homogénéiser le mélange;
- + Assembler moule + embase + disque d'espacement + disque de papier au fond du moule (facilite le démoulage) ; puis, peser l'ensemble : soit P et ajouter la hausse;
- + Remplir le moule en 5 couche en damant chacune au moyen de 55 coups;
- + Enlever la hausse et araser la dernière couche;
- + Faire la pesée (sol + moule);
- + Prélever à la fin de l'expérience un échantillon de la couche supérieure et un autre de celle du milieu afin de déterminer la teneur en eau;
- + Reprendre l'expérience avec l'échantillon ayant précédemment servi et auquel il faudra ajouter % d'eau par poids de l'échantillon (kg)

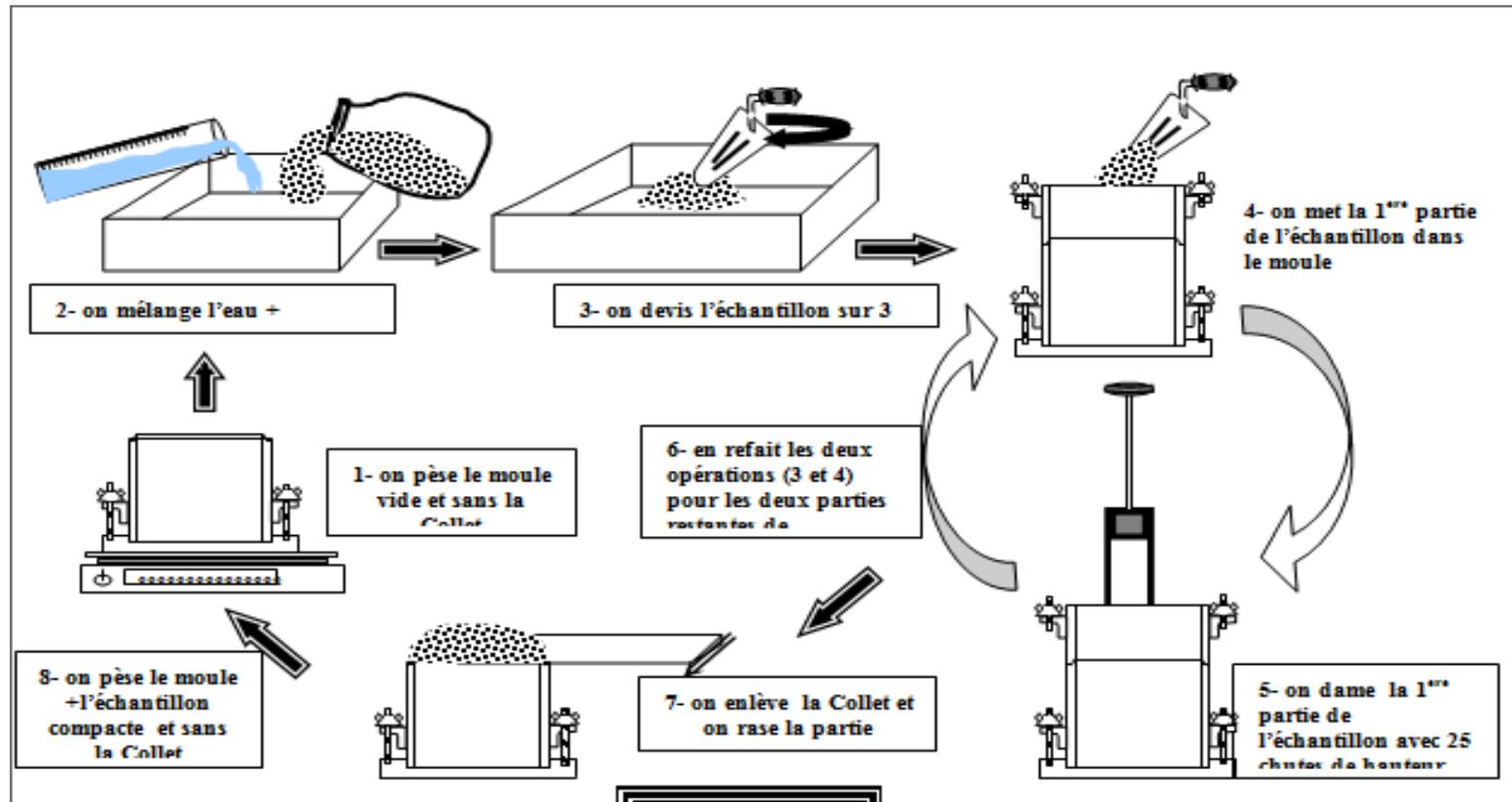


Figure II.2. : Etapes de réalisation de l'essai Proctor.

II.2.5. MATERIEL DE L'ESSAI PROCTOR NORMAL

Une fois le moule rempli, on arase le sable avec une règle à araser, on comble les vides laissés à la surface.

- On prélève ensuite un échantillon d'environ 100 g à la surface du moule, puis on retire la base de ce dernier afin de prendre un 2ème échantillon d'à peu près du même poids.
- A la balance, on évalue les masses des deux prélèvements puis on le fait passer à l'étuve au moins pendant 24h. au terme desquelles on va repeser les échantillons.

Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau suivant.

II.3. DEFINITION DE L'ESSAI CBR

L'essai CBR, de California Bearing Ratio, permet de réaliser la caractérisation mécanique des sols naturels et de sols compactés dans des remblais et des couches de forme, de fondations et de sous-fondations de routes et aéroports. Il mesure la résistance à l'effort tranchant d'un sol et le gonflement du sol lorsqu'il est immergé dans l'eau pendant 4 jours. Il nous permet de calculer la portance du sol, en estimant sa résistance au poinçonnement

Cet essai est utilisé partout dans le monde pour déterminer l'épaisseur des couches de fondation, établir une classification des sols et permettre d'étudier la traficabilité. Il peut être réalisé soit en laboratoire, soit in-situ. Cependant cette dernière option n'est pas souvent réalisée. Il nous donne un des paramètres indispensables dans les essais géotechniques précédant la construction. Il y a différents types d'essais CBR à réaliser en fonction du type et de la qualité du sol. La norme qui définit cet essai porte la référence NF P 94-078.



Photo II.2. Appareillage pour l'essai CBR

II.3.1. BUT D'ESSAI

L'essai permet de déterminer la capacité de portance d'un sol compacté, en estimant sa résistance au poinçonnement, en fonction de son état, sa densité et son humidité, ainsi que les charges appliquées. Il mesure la résistance à l'effort tranchant d'un sol sous conditions d'humidité et de densité contrôlées et du niveau de compactage variable, en permettant d'obtenir un pourcentage du rapport de portance. Cet essai CBR est utilisé pour le dimensionnement des structures des chaussées et l'orientation des travaux de terrassements.

II.3.2. PRINCIPE D'ESSAI

Les essais de CBR sont effectués sur des échantillons compactés avec une teneur en humidité optimale, obtenus à partir de l'essai de compactage Proctor.

L'expression qui définit le CBR est la suivante:

$$\text{CBR} = P/P_s * 100$$

- P= est la pression mesurée dans les sols du site (N/mm²).
- P_s= est la pression pour atteindre la pénétration égale sur soi standard (N/mm²).

L'équation représente le nombre CBR, qui représente le pourcentage de la charge unitaire standard. Dans la pratique, le symbole de (%) est enlevé et le rapport est représenté par un nombre entier.

Normalement le nombre CBR est basé sur le rapport de la charge pour une pénétration de 2,5mm, cependant si la valeur de CBR à une pénétration de 5mm est supérieure, l'essai doit être répété. Si, au cours du deuxième essai, la valeur CBR dépasse les 5 mm de pénétration, cette valeur pourra être acceptée.

Avant la détermination de la résistance à la pénétration, les éprouvettes peuvent être saturées d'eau pendant 96 heures pour simuler les conditions de travail les plus défavorables et pour déterminer sa possible expansion.

Dans la plupart des cas, 3 éprouvettes au moins sont confectionnées, auxquelles sont appliquées différentes énergies de compaction (56, 25 et 10 de coups). Le sol doit avoir une petite quantité de matériel passant par le tamis de 50 mm et une retenue dans le tamis de 20 mm inférieure ou égale à 20%.

Le comportement du sol est différent en fonction du degré d'altération (inaltéré ou altéré), sa granulométrie et les caractéristiques physiques (granulaires, fins et peu plastique). Donc, la méthode à suivre dans chaque cas pour la détermination du CBR est différente.

CHAP II ESSAIS DE COMPACTAGE ET DE PORTANCE

Détermination du CBR pour sols perturbés et remoulés graviers et sables sans cohésion sols cohésifs, peu plastiques et pas expansifs sols cohésifs et expansifs -Détermination du CBR de sols inaltérés -Détermination du CBR in-situ.

II.3.3. PREPARATION DES ECHANTILLONS

Il faut prendre deux ou plusieurs échantillons de sol avec un poids de 4,5 kg, dans le cas de sol fin et 5,5 kg dans le cas de sols granulaires.

Si les échantillons doivent être soumis à l'immersion, il faut d'abord prendre un échantillon représentatif du matériel afin de déterminer son humidité (égale ou supérieure à 100 g pour les sols fins et 500 g pour les sols granulaires).

Si les échantillons ne sont pas destinés à être soumis à l'immersion, l'échantillon pour la détermination de l'humidité est obtenu de la coupe des faces de l'éprouvette, après la réalisation de la pénétration de l'éprouvette et supprimer ainsi l'humidité de la couche supérieure à une épaisseur de 25 mm.

Une fois que la densité de l'échantillon est déterminée de la même manière que dans le Proctor modifié, l'échantillon est placé sur le moule.

Dans un premier temps, les moules doivent être remplis de plusieurs couches de 1 pouce d'épaisseur après compactage. Dans le premier moule, seront appliqués 56 coups pour la compaction de chaque couche, pour le deuxième 25 coups et pour le troisième 10 coups. Immédiatement après, les trois moules du CBR doivent être pesés avec les plaques de support du moule. Ensuite, le collier est enlevé du moule et est pesé avec l'échantillon compacté, le disque d'écartement et la plaque du support. Enfin, un papier filtre est placé sur la plaque du support et le moule est retourné et placé sur la plaque du support.

II.3.4. REALISATION DES ESSAIS

Si l'essai est réalisé sans immersion dans l'eau, un poids annulaire sera placé sur l'échantillon de telle manière à simuler la surcharge qu'aura le sol.

Si l'échantillon a été immergé pour mesurer son expansion, une fois drainé, un poids annulaire sera également placé sur l'échantillon. Le moule avec l'échantillon est placé sur la presse et le piston cylindrique descend à 1,27 mm/min à vitesse uniforme. Il faut prendre les lectures de charges appliquées à différentes profondeurs de pénétration du piston, jusqu'à atteindre 0,5 pouce de profondeur.

Pour terminer, l'humidité de l'échantillon est mesurée.

II.4. CONCLUSION

Sur les chantiers de stabilisation, on exige, en général, des densités sèches égales à 90% ou à 95% de la densité sèche maximum déterminée à l'essai Proctor ; d'où l'importance d'avoir au moment du compactage une teneur en eau très voisine de la teneur en eau optimum.

Cette Condition est souvent difficile à remplir, ce qui limite les possibilités de stabilisation des sols : en périodes de pluie, la teneur en eau du sol naturel est généralement supérieure à la teneur optimum, il faut aérer le sol pour le faire sécher ou attendre une période plus sèche. En période sèche les apports d'eau sont importants (la teneur en eau optimum varie entre 6 et 12% selon la nature du sol et l'engin de compactage utilisé).

CHAPITRE III

IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISÉS

III.1. Introduction

Après l'étude théorique des tufs dans le chapitre précédent (chapitre I), on va entamer l'étude d'identification du tuf de la carrière de pk 18 in Salah. Nous nous intéressons dans deuxième chapitre à l'étude d'identification géotechnique des Matériaux: tuf et argile à l'aide des essais de laboratoire classique.

Essai	Norme
Analyse granulométrique	NF P 94-056
Proctor Modifié	NF P 94-093
Portance CBR	NF P 94-078
Limites d'Atterberg	NF P 94-058

III.2. Localisation des échantillons

III.2.1. Carrière tuf pk18 : Il est situé au nord de la ville d'Ain Saleh au point 18 km et est de couleur rouge.



Figure III.1. : Carte de localisation de la carrière étudiée (tuf).

III.2.2. Argile in salah : Il est situé à l'est de la ville d'Ain Saleh, à deux kilomètres à l'est de la route nationale n°01 Airport Road.



Figure III.2 : Carte de localisation de la carrière étudiée (argile).



Photo III 1. : carrière étudiée (argile).

III.3. Etude d'identification des matériaux utilisés

Dans le chapitre précédent, nous avons donné une présentation générale de la Formation des tufs, argile. Nous allons prendre connaissance dans ce chapitre les essais d'identification géotechnique du tuf de la carrière pk 18 et de argile de route Aéroport in Salah.

III.3.1. Etude d'identification géotechnique

L'identification géotechnique telle qu'elle est pratiquée actuellement dans les Laboratoires routiers algériens s'effectue selon des modes opératoires établies par la norme française.

III.3.1.1. Analyse granulométrique

En général, pour les matériaux routiers, la Granulométrie est représentée par une courbe granulométrique sur laquelle doit être Inscrit un fuseau dit fuseau de spécification.

III.3.1.2. Analyse granulométrique par tamisage

a) But de l'essai

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages Pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle S'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à mm pour les particules inférieure à 80 μm , l'analyse granulométrique se fait par sédimentométrie.

b) Analyse granulométrique

❖ Principe de l'essai :

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois sèche, au moyen d'une série de tamis et peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

❖ Dimensions des tamis utilisés :

Pour le tuf, on a utilisé les séries des tamis de diamètre : 63 – 50 – 40 – 31.5 – 25 – 20 – 16 – 12.5 – 10 – 5 – 2 – 1 – 0.4 – 0.2 – 0.1 – 0.08 mm.

❖ Matériel nécessaire

Des tamis dont les ouvertures carrées, de dimension normalisée, sont réalisés soit à partir d'un maillage métallique. Pour un travail d'essai aux résultats reproductibles, il est conseillé d'utiliser une machine à tamiser électrique qui comprime un mouvement vibratoire horizontal, ainsi que des secousses verticales, à la colonne de tamis. La dimension nominale des tamis se suit dans une progression géométrique.



Photo III.2. : Appareillage pour l'essai Analyse granulométrique.

❖ **Mode Opérateur**

Nous avons effectué cette analyse sur les deux matériaux par voie sèche.

- Peser une masse M du matériau.
- Procéder au tamisage à sec du granulat en utilisant successivement les tamis d_m jusqu'à d_c dans l'ordre décroissant des dimensions.
- Placer le granulat en partie supérieur et tamiser à la main.
- Peser les différents refus et déduire les tamisâts.

Soit R_i la masse de refus cumulé dans le tamis « i », le calcul des pourcentages des tamisâts se fait comme suit:

$$T_i = (M - R_i) \times 100 / M \dots\dots\dots (II.3)$$



Photo III.3. : Mode Opérateur Analyse granulométrique de argile.

III.3.2. Analyse granulométrique de tuf et argile

Les résultats d'analyse granulométrique des échantillons de tuf sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Résultats de l'analyse granulométrique de de tuf.

Tamis (mm)		< 80 (mm)	< 50 (mm)	< 20 (mm)	< 5 (mm)	< 2 (mm)	< 0,2 (mm)	< 0,063 (mm)
E01	% de passant	100	95	79	55	47	17	11

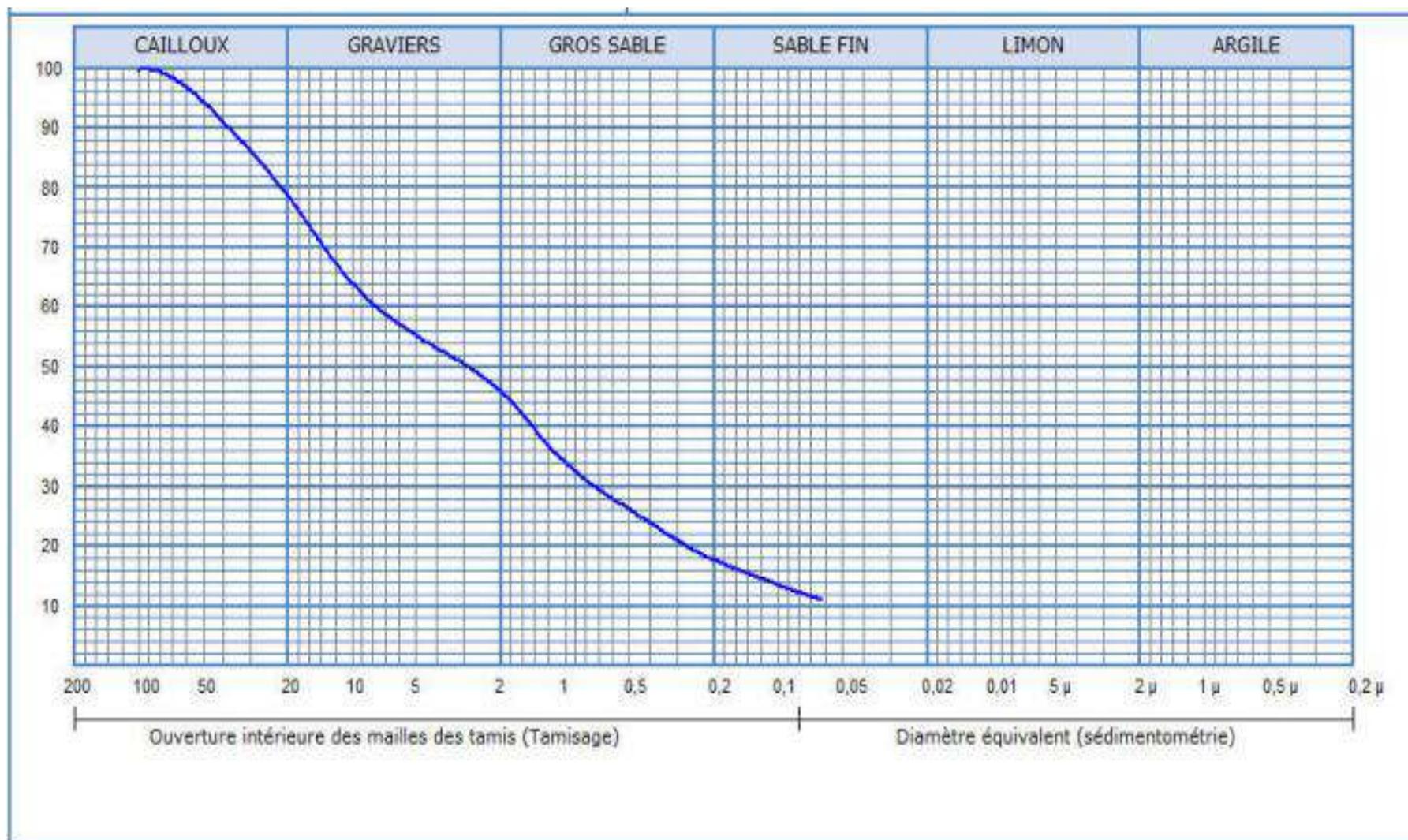


Figure III.3. : Courbe de l'analyse granulométrique de tuf

Les résultats d'analyse granulométrique des échantillons d'argile sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.2.: Résultats de l'analyse granulométrique de argile

Tamis (mm)	Poids refus partiels (g)	Poids refus cumulés (g)	Poids refus cumulés (%)	Complément à 100
5	19	19	1.58	98
2	37	56	4.67	95
1	50	106	8.83	91
0.4	108	214	17.8	82
0.2	130	344	28.7	71
0.1	65	403	34.1	66
0.08	33	442	36.8	63

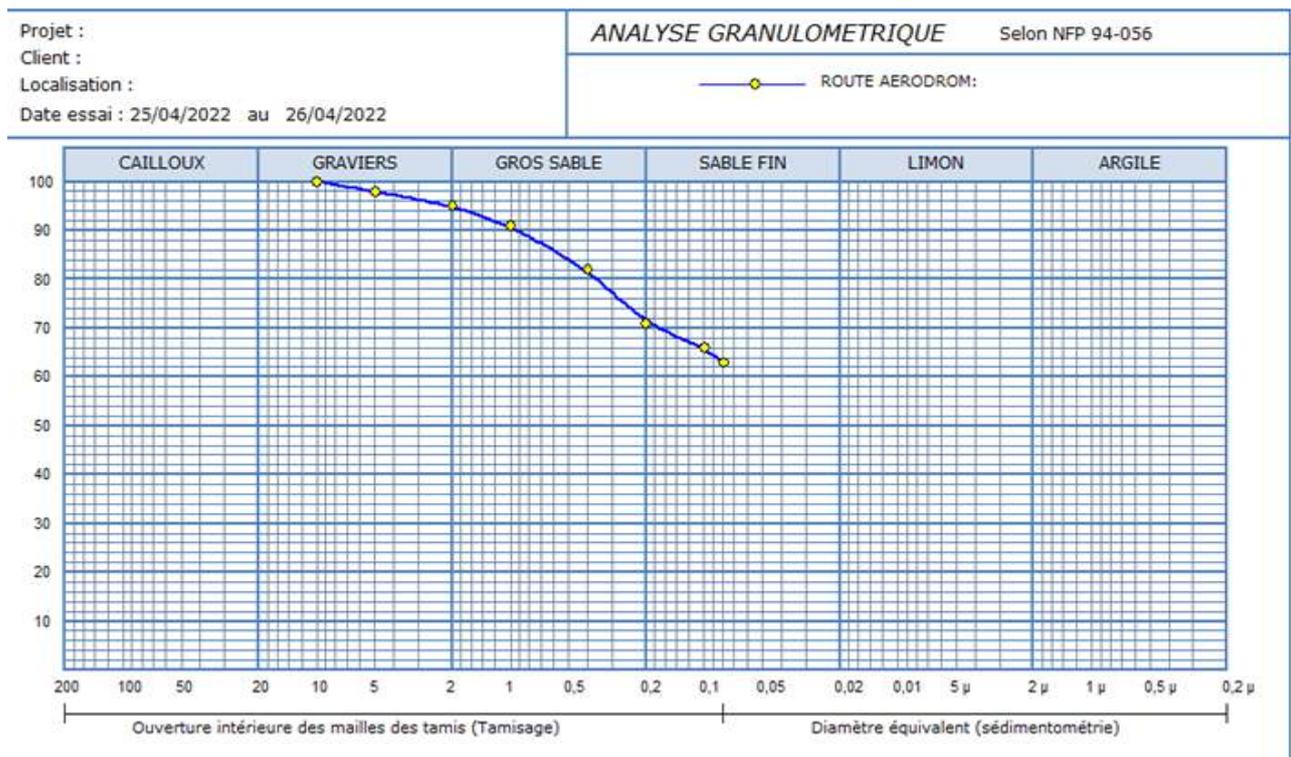


Figure III.4. : Courbe de l'analyse granulométrique de argile.

III.4. Les limites d'Atterberg

❖ Principe

L'essai s'effectue en deux phases:

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés;
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure de longueur (à 15 cm). Avec des diamètres compris entre 3 et 2 mm.

❖ Appareillage

Appareil de Casagrande, outil à rainure, Balance, tares, étuve.



Figure III.5.: Appareil de Casagrande.

III.4.1. Préparation de l'échantillon

L'échantillon pour l'essai est une portion du tamisât du tamis 0.4 mm. On ajoute une quantité d'eau suffisamment pour assurer qu'on est dans l'état liquide, couvrir le tout et laisser au moins 24 heures.

III.4.2. Etapes de l'essai

❖ Limite de liquidité

- Mettre une quantité de l'échantillon dans la coupelle environ 4 de son volume et l'étaler;

- Effectuée une rainure de 2 mm sur le long de la coupelle qui fait séparer l'échantillon en deux côtés.
- Faire subir la coupelle une succession de chocs jusqu'à ce que les deux lèvres de rainure de referme sur une longueur de 1 cm (noter le nombre de coups N);
- Prendre deux échantillons de part et d'autre de l'échantillon pour mesurer la teneur en eau correspondante;
- Reprendre les mêmes étapes, après avoir sécher l'échantillon.
- Avec les résultats obtenu, on trace le graphe $\omega(N)$, avec N compris entre 15 e 35coups, la limite de liquidité ω_L correspond à une teneur en eau tel que $N = 25$.

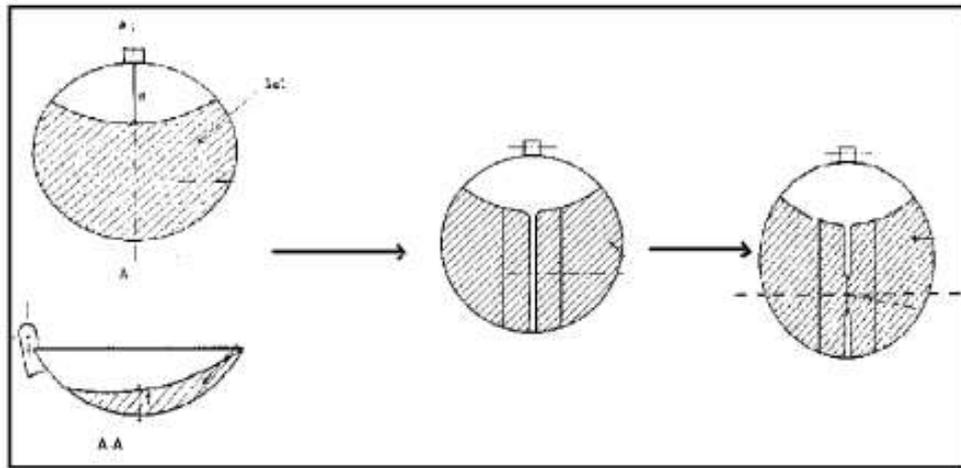


Figure III.6.: Etapes de l'essai de limite de liquidité.

❖ **Limite de plasticité:**

Après avoir terminer l'essai de la limite de liquidité, le sol est proche de sa limite de plasticité avec l'échantillon qui reste, on forme des boudins de longueur variant entre 10 et 15 cm, avec des diamètres comprises entre 3 et 2 mm, si les baguettes se cassent en petites morceaux après avoir être levé par leur milieux, alors on dit que la limite de plasticité est atteinte; il suffit donc de déterminer la teneur en eau des morceaux recueillis ; la valeur de la teneur en eau ($\omega\%$) sera donc celle correspondante à limite de plasticité ($\omega_p\%$) de l'échantillon étudié.

Remarque : l'indice de plasticité I_p est donné par:

$$I_p = \omega_L - \omega_p \dots \dots \dots (III.6)$$

III.4.3. Expression des résultats

Le tableau résume les résultats de l'essai des limites d'Atterberg de tuf

Tableau III.3. : Résultats de limite de liquidité de tuf

WL (%)	WP (%)	IP (%)
23,32	16,98	6,34

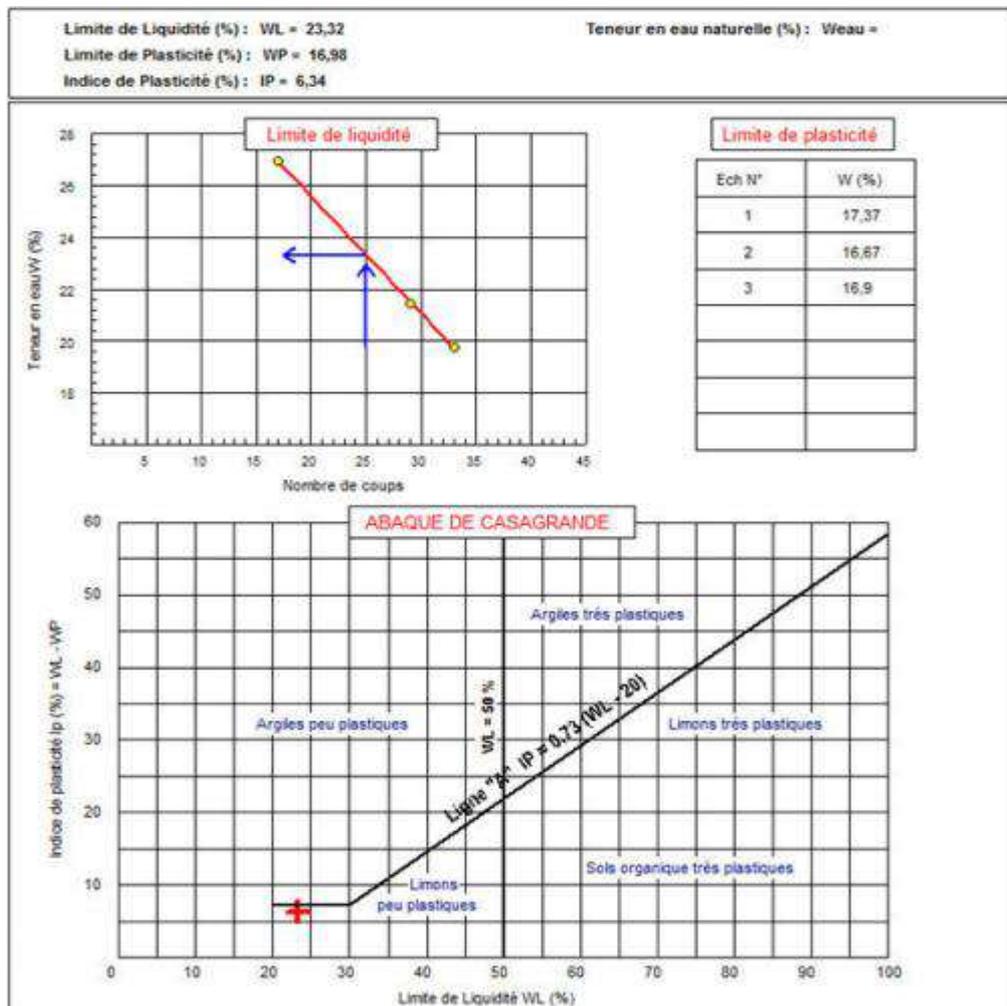


Figure III.7. : Courbe des limites d'Atterberg de tuf.

III.5. Essai au bleu de Méthylène

Cet essai, utilisé de manière courante pour caractériser l'activité des argiles contenues dans les sols, est également utilisé pour évaluer l'influence des fines d'origines argileuses contenues dans les sables et graves d'origines naturelle ou artificielle. On injecte successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène dans le bain aqueux contenant la prise d'essai. On contrôle l'adsorption du bleu après chaque ajout, en effectuant une tache sur un papier filtre. Pour un simple contrôle de conformité, la quantité de bleu spécifiée est injectée en une seule fois.

L'essai au bleu de Méthylène permet une évaluation globale de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse. La valeur du bleu VB est la quantité du bleu de méthylène adsorbée par le poids sec de la pris

$$V_b(0/d) = \frac{\text{Quantité du bleu absorbé}(cm^3)}{\text{Poids sec de la prise}(g)}$$

Connaissant la valeur du bleu de la fraction fine 0/d, on peut calculer celle de la fraction globale 0/D à partir de la courbe granulométrique du sol.

$$V_B(0/D) = \frac{V_B(0/d) \cdot C_d}{100}$$

Où : C_d est la proportion de la classe granulaire 0/d dans la fraction total 0/D. L'essai se fait sur la fraction 0/0.4, la valeur du bleu VB et la granulométrie des fines permettent de déterminer le coefficient d'activité C_A .

$$C_A = \frac{V_B(0/D)}{\% 2 \mu m}$$

Les résultats de tuf obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.4. : Résultats de bleu de Méthylène.

Echantillon	VBS
E01	0.52

III.6. Analyse chimique

Les résultats de tuf obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : Résultats d'Analyses chimiques

Echantillon	Insolubles (%)	Sulfqtes (%)	CaCo3 (%)	NaCl (%)
E01	81.0	00	11	0.08

III.7. Proctor modifié



Photo III.4. : Opérations de l'essai Proctor.

Les résultats de tuf obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

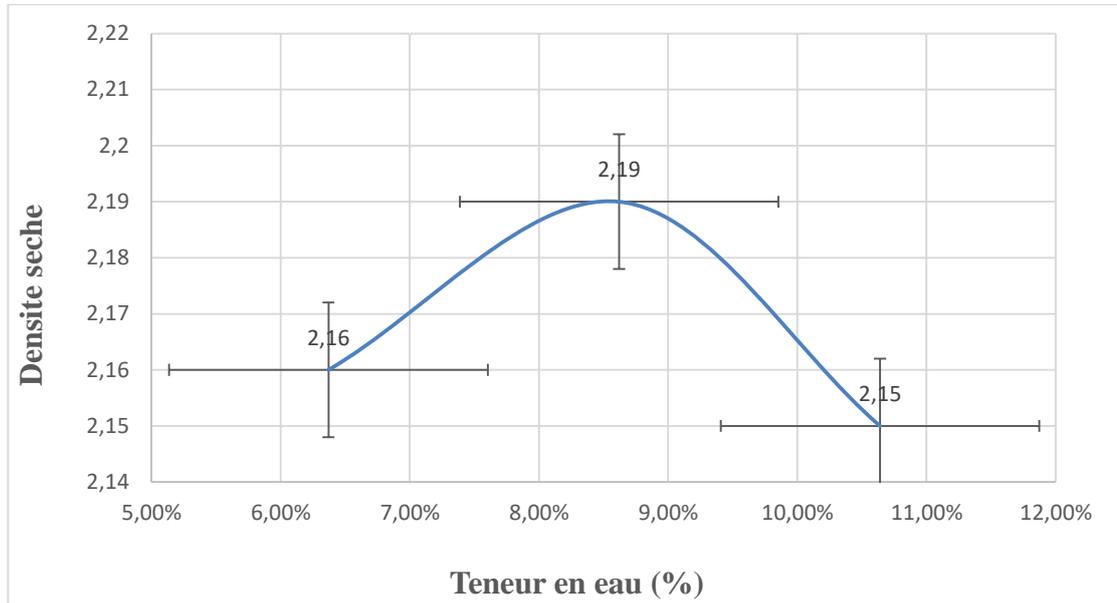


Figure III.8.: Courbe Proctor de tuf.

Tableau III.6.: Résultats Proctor de tuf.

W (%)	6,37	8,62	10,64
Densité (T/m ³)	2,16	2,19	2,15

Les résultats d'argile obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

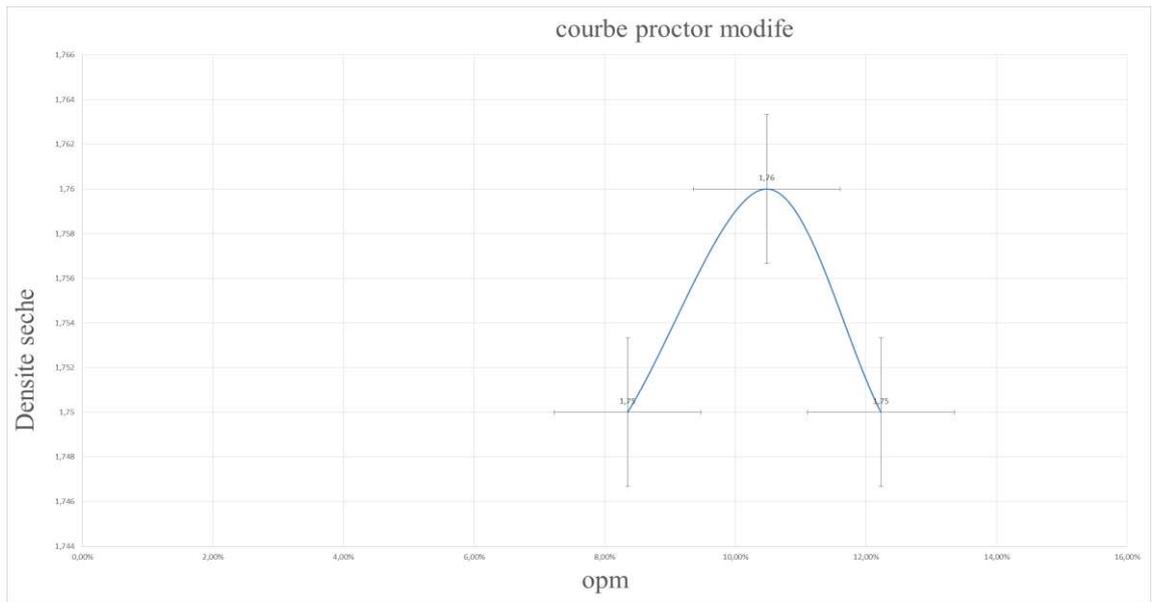


Figure III.9. : Courbe Proctor de l'argile.

Tableau III.7 : Résultats Proctor d'argile.

W (%)	8.35	10.48	12.23
Densité (t/m ³)	1.75	1.76	1.75

III.8.Essai CBR



Photo III.5 : Opérations CBR

Les résultats d'argile obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Calcul de l'indice portant	
A 2,5 mm :	$\underline{P(2.5)} = 67.5$
	0.70
A 5 mm :	$\underline{P(5)} = 67.28$
	1.05

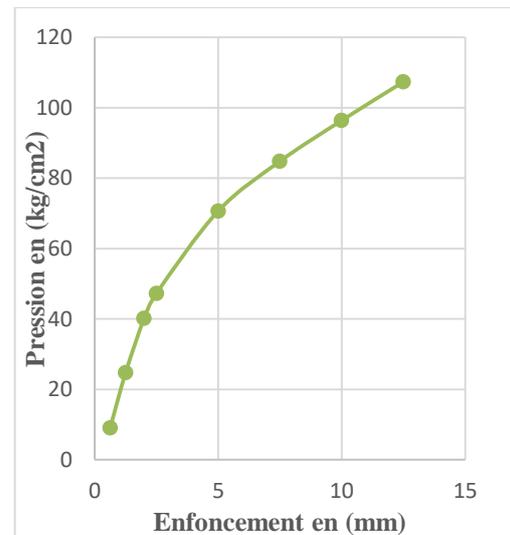


Figure III.10. : Courbe CBR d'argile.

Les résultats de tuf obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Calcul de l'indice portant	
A 2,5 mm :	$\underline{P(2.5)} = 54.65$
	0.70
A 5 mm :	$\underline{P(5)} = 74.37$
	1.05

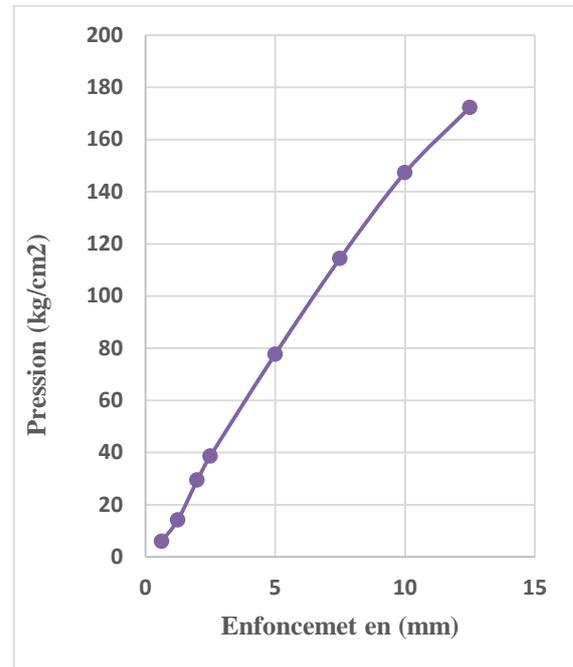


Figure III.11. : Courbe CBR de Tuf

III.9. Essai compression simple

❖ Objet :

La résistance à la compression permet d'apprécier approximativement la valeur de la cohésion du matériau ou des éléments fins, lorsqu'il est caillouteux ou graveleux.

❖ Mode opératoire LCPC:

- (06) éprouvettes doivent être confectionnées Les résultats du Proctor Modifié
- Doivent être connus et mentionner sur la feuille d'essai ; Les éprouvettes compactés dans le moule de Proctor normal a l'énergie de Proctor Modifie ; Les éprouvettes utilisés $\varnothing 5$ cm et H10cm ; avec des matériaux < 5 mm.
- Un échantillon représentatif doit être tamisé, passant à 05 mm est recueillir puis séché à l'étuve ;
- Après malaxage de l'échantillon on procéder au remplissage des moules ; remplissage des moules (voir mode opératoire) -si on ne dispose que d'un seul moule et que par suite de la chaleur par exemple, l'on peut craindre une perte de teneur en eau du

matériau pendant le moulage et la confection des éprouvettes, il est toujours possible d'effectuer le malaxage de celles-ci une par une;



Photo III.6.: Echantillon et Moule de l'essai de compression simple.

- Moulages des éprouvettes (voir mode opératoire) ;
- Démoulages des éprouvettes (voir le mode opératoire) ;



Photo III.7.: Compactage statique et démoulages des éprouvettes.

- Etuvages des éprouvettes : 55°C pour 72 H pour les matériaux non gypseux ;



Photo III.8.: Conservations des éprouvettes dans l'étuve.

- écrasement des éprouvettes : les éprouvettes conservées pendant la durée voulue dans l'étuve, puis en suite porté entre les plateaux de la presse CBR. On applique alors la charge à une vitesse de .2 mm min jusqu'à la rupture.



PhotoIII.9.: Ecrasement des éprouvettes dans Presse CBR

- sur la feuille d'essai, les renseignements suivants seront joints éprouvettes :
 - a) la densité sèche maximale Proctor modifiée.
 - b) la teneur en eau optimale Proctor modifiée.
 - c) le poids théorique humide de l'éprouvette.
 - d) la teneur en eau réelle du compactage.
 - e) la hauteur de l'éprouvette.
 - f) le diamètre de l'éprouvette.
 - g) le volume de l'éprouvette.
- écrasement : RC en Kg /cm².

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.8. : Résultats de compression simple de tuf.

95% de l'OPM (bar)	98% de l'OPM (bar)	100% de l'OPM (bar)
11.44	14.97	16.75

III.10. Conclusion

Les essais d'identification géotechnique, ont pour but de classer les matériaux et de les situer par rapport aux spécifications et normes retenues pour leur emploi en corps de chaussée. Ces essais, nous ont permis de constater que :

✚ A la lumière de ces résultats, on peut conclure que le tuf analysé présente des caractéristiques suivantes:

- Les courbes granulométriques sont étalées caractérisant un matériau prêtant bien au compactage;
- l'indice de plasticité de la fraction fine analysée est peu plastique;
- L'essai Proctor présente un matériau dense;
- La résistance à la compression simple est acceptable.

Donc les échantillons analysés présentent des caractéristiques géotechniques acceptables, à cet effet il peut être utilisé dans les travaux de terrassements pour le projet en question. On demande à l'entreprise de respecter les recommandations suivantes:

- Un bon gerbage du matériau peut accroître considérablement les caractéristiques géotechniques du matériau;
- Respecter la teneur en eau de compactage;
- Éliminer les grands éléments supérieurs à 10 cm;
- Refaire les analyses de matériau à chaque changement visuel de matériau.

✚ Argile: à travers les résultats obtenus, on constate que l'argile contient une grande proportion de poussières, une proportion quasi inexistante de cailloux, et la densité est assez moyenne avec une teneur en eau moyenne.

CHAPITRE IV

ETUDE DES MELANGES

TUF + ARGILE

IV.1.Introduction

Malgré certaines caractéristiques géotechniques médiocres vis-à-vis des règlements en vigueur, le tuf a la propriété particulière de durcir en vieillissant. Afin d'améliorer sa compacité, on a opté pour une correction de sa granulométrie en substituant dans le tuf, une fraction de x% de argiles variant de 0 à 15 %, avec un pas de 5.

Afin de rechercher la composition optimale du mélange, des essais de compactage et de portance ont été effectués sur les différents mélanges. Des essais de compression simple à différents âges ont été réalisés sur des éprouvettes de différents mélanges compactées à l'optimum Proctor modifié(OPM). La conduite de l'étude est faite selon l'organigramme suivant:

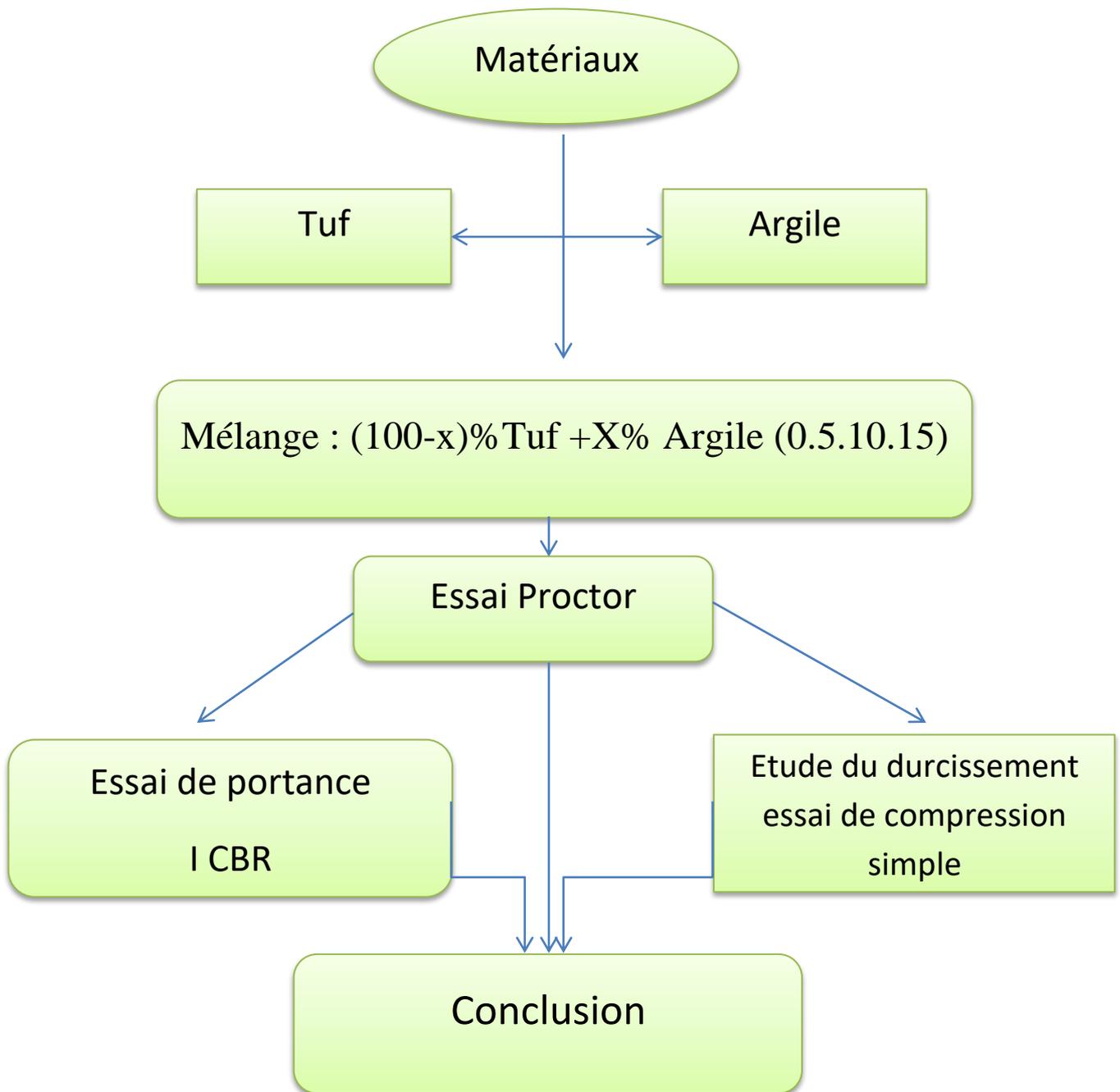


Figure IV.1.: Organigramme de recherche d'une formulation optimale

Ce chapitre traite l'influence de l'ajout de différents pourcentages de l'argile au tuf. L'objectif principal est de déterminer la variation des caractéristiques physiques (γ_{dmax} , ω_{opt} , w_L , W_p , I_p et VBs,) en fonction du pourcentage d'argile.

IV.2. Essai Proctor modifié

IV.2.1. Tracé des courbes Proctor modifiées

Les essais Proctor Modifié ont été faits selon la norme NFP94-093 pour les différents mélanges Tuf/argile. Les figures suivantes III.8, III.9, III.10 et III.11. Montrent la variation de la teneur en eau W en fonction du poids volumique sec γ_d .

Pour différents mélanges, les résultats ont montré que l'ajout d'argile dans une certaine proportion est bon ou égal Comparé à celui du tuf sans additif. Même protocole que le test Proctor modifié pour les mélanges suivant :

- 95 % Tuf +5 % Argile.
- 90 % Tuf +10 % Argile.
- 85 % Tuf +15 % Argile.

Les figures suivantes montrent la variation de la teneur en eau W en fonction du poids volumique sec γ_d .

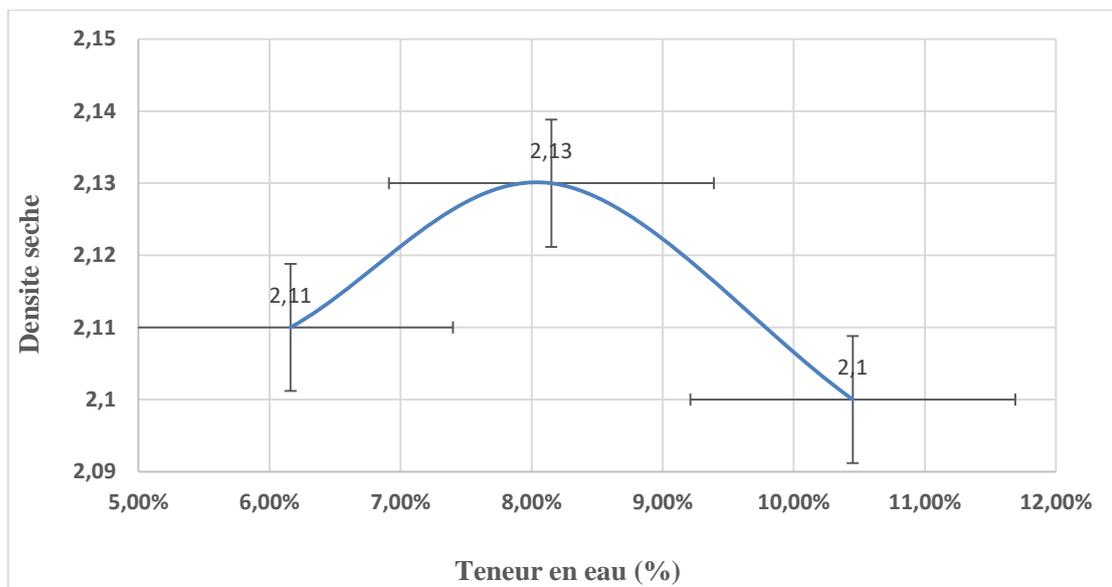


Figure IV.2: Courbe de l'essai Proctor (95% Tuf +5% Argile)

Tableau IV.1: Résultats Proctor (95% Tuf +5% Argile)

Teneur en eau (%)	6,16	8,15	10,45
Densité (t/m ³)	2,11	2,13	2,1

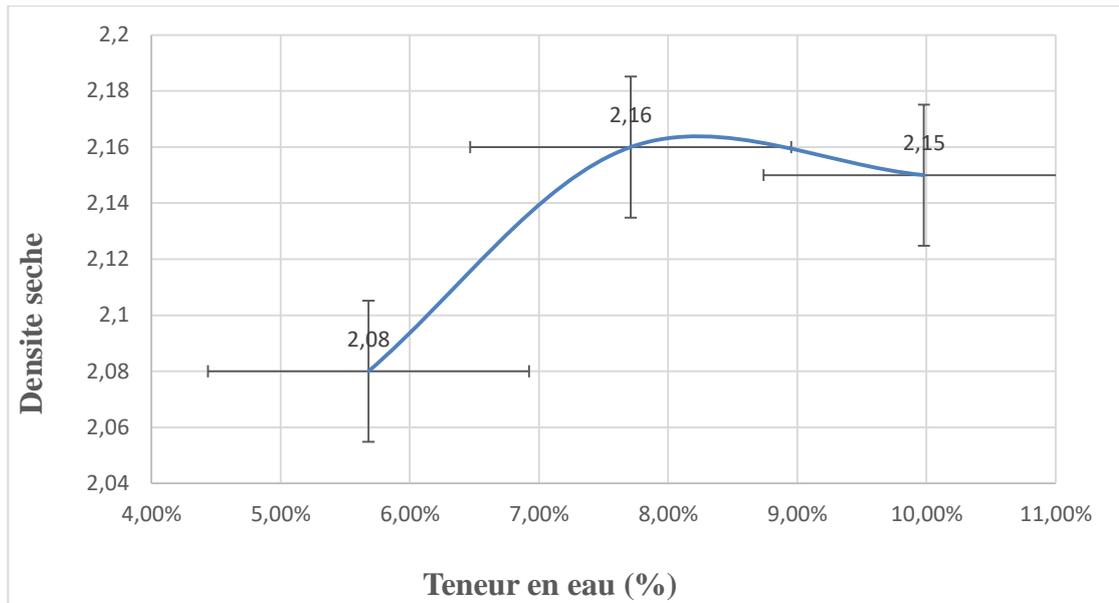


Figure IV.3: Courbe de l'essai Proctor (90% Tuf +10% Argile).

Tableau IV.2. : Résultats de l'essai Proctor de mélange (90 % Tuf +10 % Argile).

Teneur en eau (%)	5,68	7,71	9,98
Densité (t/m ³)	2,08	2,16	2,15

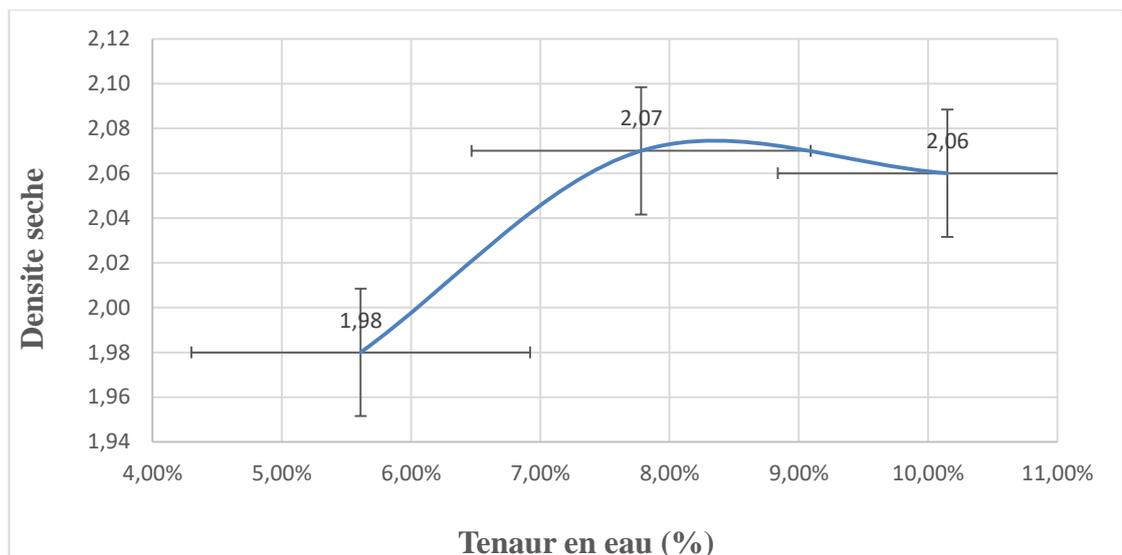


Figure IV.4. Courbe de l'essai Proctor (85% Tuf +15% Argile).

CHAP IV ETUDE DES MELANGES TUF + ARGILE

Tableau IV.3. Résultats de l'essai Proctor de mélange (85 % Tuf +15 % Argile).

Teneur en eau (%)	5,61	7,78	10,15
Densité (t/m ³)	1,98	2,07	2,06

❖ Comparaison des résultats

Les essais Proctor Modifié ont été faits selon la norme NFP94-093 pour les différents mélanges Tuf/Argile. Le Tableau II.10 indique les valeurs de masse volumique sèche et de teneur en eau correspondantes à l'optimum Proctor Modifié pour les différents mélanges.

Tableau IV.4. : Comparaison des résultats.

Tuf (%)	0	100	95	90	85
Argile (%)	100	0	05	10	15
Densité (t/m ³)	1,76	2,19	2,13	2,16	2,07
Teneur en eau (%)	10,48	8,62	8,15	7,71	7,78

Nous notons que la proportion d'argile dans le tuf de 10% est approximativement égale au tuf en densité, mais avec un pourcentage inférieur en teneur en eau par rapport au tuf.

IV.2.2. Tracé des courbes CBR

L'essai de portance est réalisé conformément à la norme NFP 94-078 pour les différents mélanges Tuf/Argile. L'indice CBR est déterminé immédiatement, juste après le compactage.

Nous avons suivi le même protocole de l'essai CBR pour les mélanges suivants :

- ❖ 95 % Tuf +5 % Argile
- ❖ 90 % Tuf +10 % Argile
- ❖ 85 % Tuf +15 % Argile

La figure suivantes III.13;III.14 montre que la variation de la force de piston en fonction de son enfoncement.

Calcul de l'indice portant

$$A=2,5 \text{ mm: } p(2,5)/0,70=61,62$$

$$A=5 \text{ mm: } p(5)/1,05=73,21$$

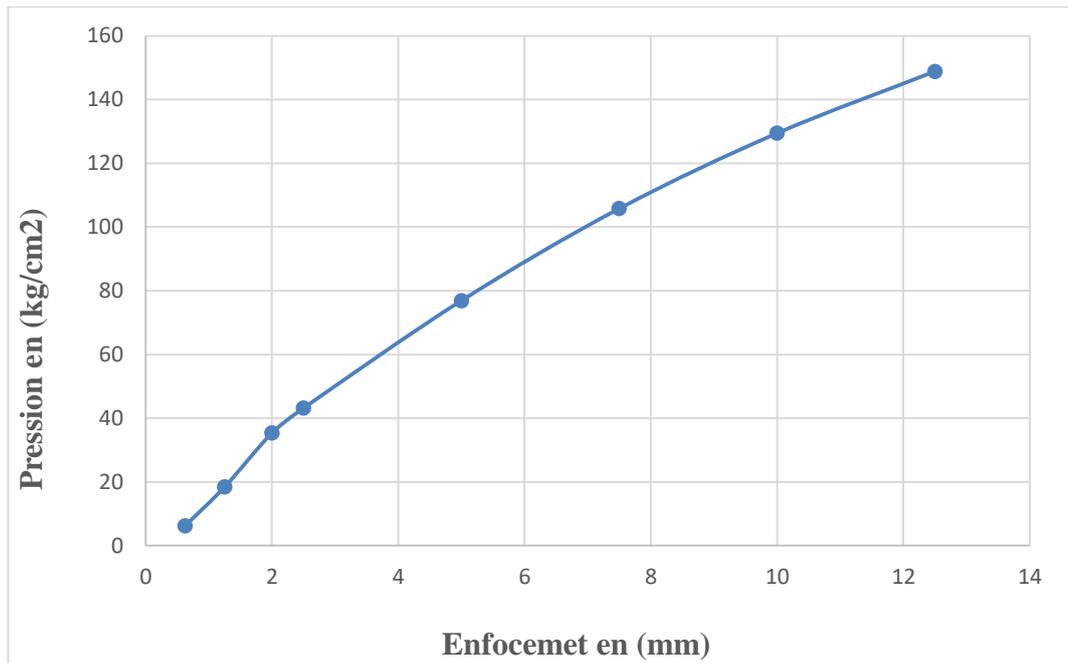


Figure IV.5. Courbe CBR du mélange (95% Tuf +5% Argile).

Calcul de l'indice portante:

A=2,5 mm: $p(2,5)/0,70=80,27$

A=5 mm: $p(5)/1,05=74,06$

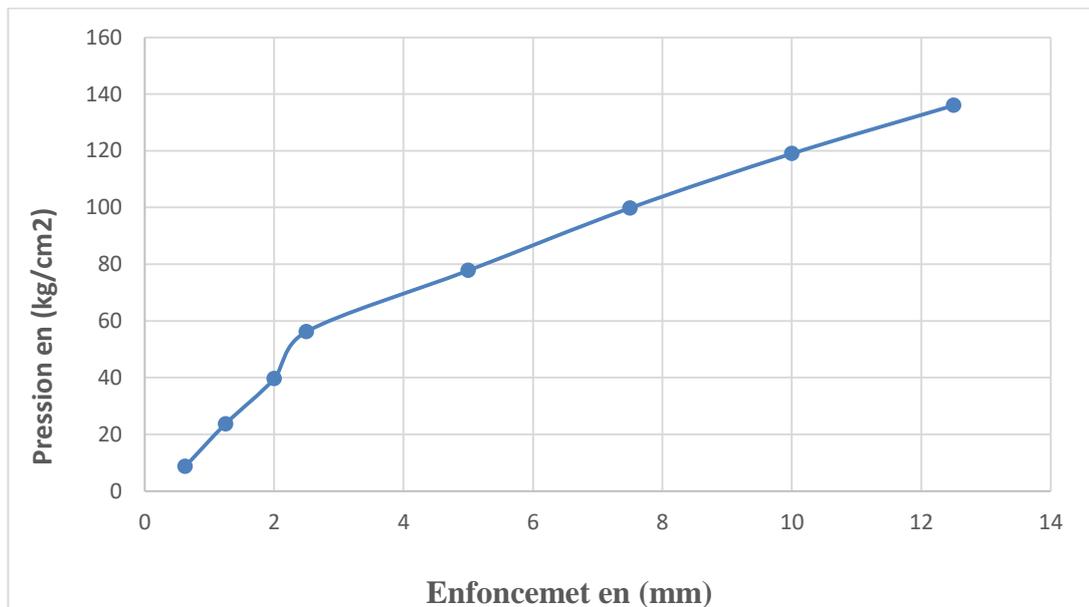


Figure.IV.6. Courbe CBR du mélange (90% Tuf +10% Argile).

Calcul de l'indice portant:

A 2,5mm : $P(2,5) / 0,70 = 66.45$

A 5mm : $P(5) / 1,05 = 65.69$

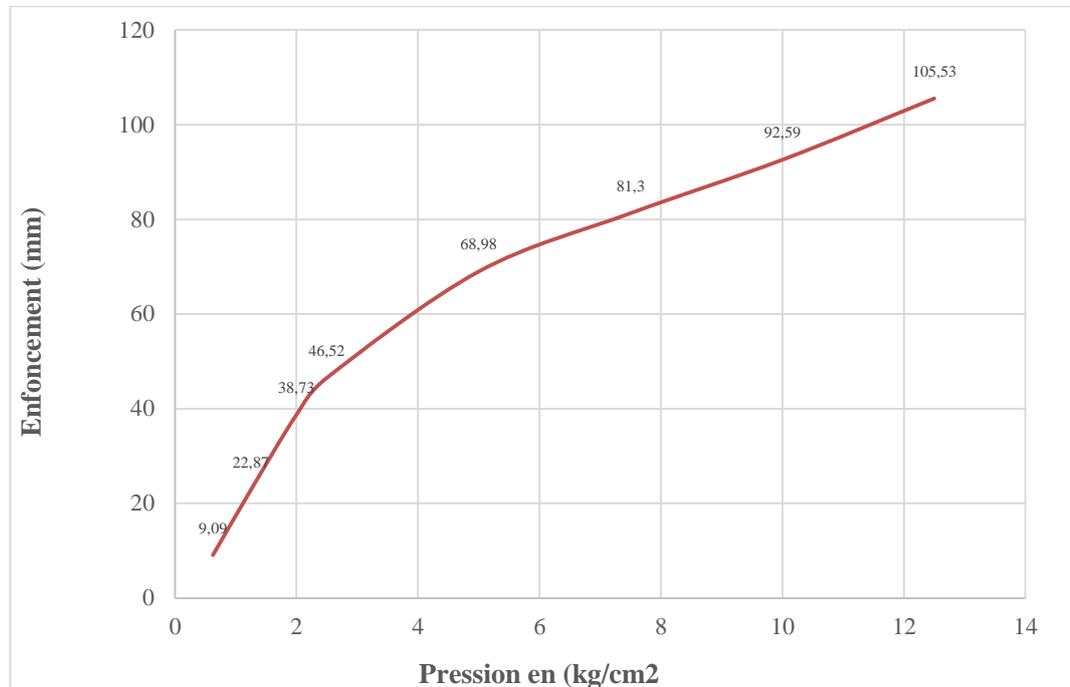


Figure.IV.7. Courbe de l'essai de CBR de mélange (85 % Tuf +15 % Argile).

IV.3. Essai à la compression simple

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

IV.3.1 Influence sur la Résistance à la compression simple

Le tableau IV.5 résume les valeurs de résistance à la compression simple en fonction du pourcentage du Argile.

Tableau IV.5 Influence de l'ajout d'Argile sur la compression simple.

% argile	RC (kg/cm²) après 3 jours à l'étuve (55°C)		
	c=100%	c=98%	c=95%
0	16.75	14.97	11.44
5	21.37	18.66	13.39
10	29.86	21.64	15.15
15	17.19	14.03	10.65

CHAP IV ETUDE DES MELANGES TUF + ARGILE

Les courbes de la figure III.16 qui reflètent de pourcentage d'argile, la résistance à la compression augmenté proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage d'argile jusqu'à 10%, on remarque à 03 jours que ce mélange acquiert une résistance à la compression simple maximale de l'ordre de 29.86 kg/cm.

Correspondant à un gain de 0% (tuf). Les valeurs des résistances à la compression simple des mélanges de tuf + (5 à 10%) de argile, sont augmenter jusqu" 29.86 kg/cm pour la compacité 100.et le même remarque pour la compacité 98 ce qui explique l'efficacité du correcteur granulaire utilisé pour améliorer la compacité des mélanges.

IV.4. Résumé de l'étude des mélanges : tuf + argile

Le tableau IV.6. Récapitule les caractéristiques physico-mécaniques et des matériaux étudiés du pourcentage de l'argile.

Tableau IV.6 Influence de l'argile sur les propriétés physicomécaniques.

Argile (%)	Wopm (%)	γ_{dmax} (t/m ³)	I _{CBR} Immédiat	RC (kg/cm ²) (c=100)
0	8.62	2.19	74.37	16.75
5	8.15	2.13	73.21	21.37
10	7.71	2.16	74.06	29.86
15	7.78	2.07	65.69	17.19

D'après le tableau IV.6 qui présente les résultats obtenus, on remarque que les essais de compactage ont montré une Résultats égaux avec Tuf en densité de la densité sèche liée à une diminution de la teneur optimale de l'eau de compactage. La portance elle augmente jusqu'à un taux de 10% d'argile. La résistance à la compression simple, seul Propriétés mécaniques réduites par l'ajout de argile, il peut Expliquez que la consistance de l'argile dans le mélange a montré de bons résultats par rapport au Tuf.

IV.5. Conclusion

Les essais de compactage Proctor modifié effectués sur des mélanges de tuf et d'argile qui ont été présentés, avaient d'abord pour but de montrer l'intérêt d'une présentation de l'effet d'ajout d'argile au matériau local le tuf, fréquemment utilisés en construction routière dans la région d'in Salah. Cette présentation permet de suivre l'évolution des caractéristiques des mélanges compactés, notamment le poids volumique sec et la teneur en eau optimale. si la même chose Et moins cher En comparant les paramètres de l'optimum Proctor sur les mélanges de tuf et de argile, il est fortement conseillé d'utiliser le argile car il influe si la même considérablement sur l'augmentation de la valeur de γ_{dmax} . même tuf Et moins cher.

Conclusion générale

Conclusion générale

D'après cette étude, on propose la définition des matériaux à usage routière appelé " Tuf " Les tufs sont type de roche, friables, poreuses, légères et de couleur varie selon les impuretés. Elles se regroupent en trois catégories (les tufs calcaires ; Les tufs gypseux; Les gypso-calcaires), dont les caractéristiques géotechniques et plus encore les propriétés d'usage sont précisés à partir de constatation sur chantier et d'essais au laboratoire effectués sur un grand échantillonnage.

Cette étude, utilisant des données bibliographiques et les résultats d'essais de laboratoire, a permis de présenter le contexte saharien avec ses caractéristiques géotechniques et ses matériaux de construction. Dans ces régions, comme partout ailleurs, il y a un grand intérêt à minimiser autant que possible le transport des matériaux et de l'eau. L'incorporation de l'argile dans les matériaux routiers dans les opérations de compactage.

A partir des résultats obtenus dans le chapitre III et IV on peut dire que:

Lorsqu'ils sont utilisés en assises de chaussées, ils présentent un comportement de tuf et mélange tuf-argile se la mémé. Ce qui laisserait à supposer leurs caractéristiques, si on les compare aux spécifications habituelles des matériaux de construction routière. Mais par rapport de l'essai à la compression simple des mélanges un comportement excellent. Lors que les argiles excellent la cohésion entre les gains. Je constate ; Comme solution qu'on le traite avec le ciment ou la chaux.

L'incorporation d'argile dans les matériaux routiers et dans les opérations de compactage est des solutions convenables pour atteindre cet objectif car les résultats trouvés lors de cette étude sont encourageants. Leur application dans des chantiers réels présente des avantages économiques certains.

Par rapport aux matériaux routiers conventionnés nous avons constaté que certaines caractéristiques géotechniques de ces matériaux ne correspondent pas totalement aux règles d'utilisations actuelles des tufs en construction routière en Algérie. Mais c'est ça qui est disponible maintenant et les projets devront être réalisés. Donc on utilise ces matériaux momentanément jusqu'à ce qu'on trouve ce qui est meilleur et moins coûteux.

Références bibliographiques

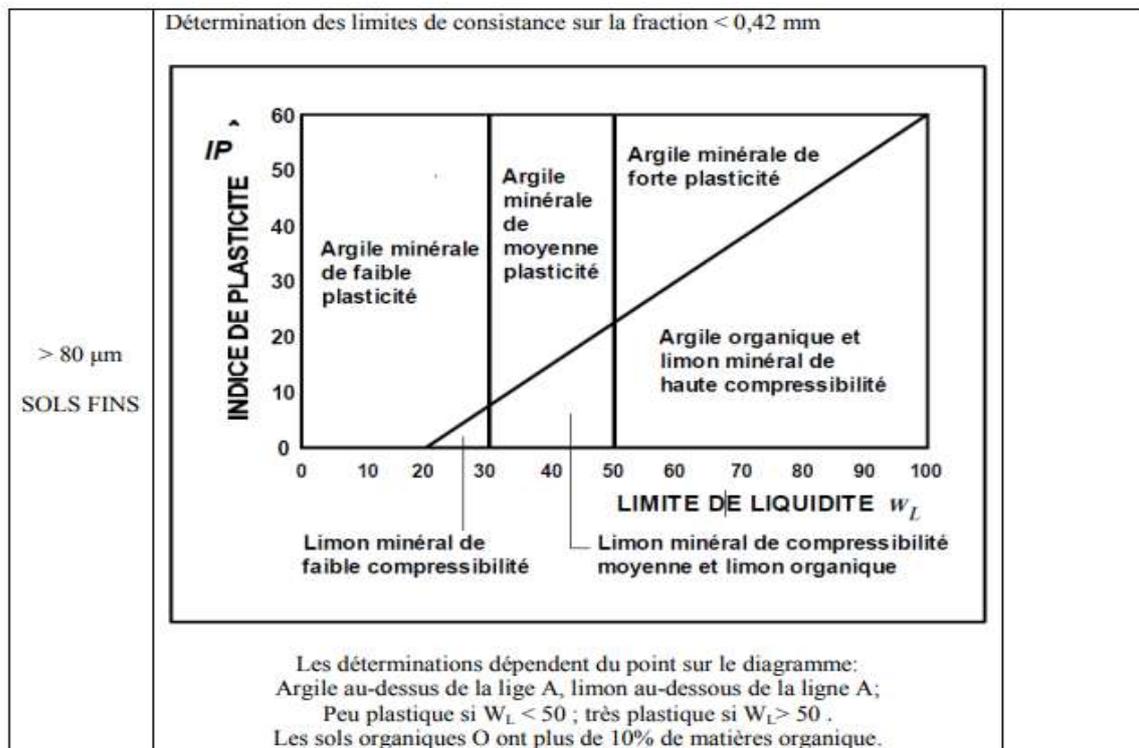
- 1- Akacem Mustapha (2008) :** « Contribution à l'étude de la stabilisation aux liants hydraulique des tufs de région d'Adrar ». Mémoire de Magister, Université Mouhamed Boudiaf-Oran
- 2- Mohamed Habib Ben Dhia :** «Les tufs et encroûtements calcaires en Tunisie et dans le monde ». Thésard, Service des études et recherches internationales Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Tunisie.
- 3- Goual Idriss (2012)** « Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat : Application en construction routière ». Thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen.
- 4- M. Ghomari F.et Mme Bendi-ouis A.(2008)** « science des matériaux de construction travaux pratiques ».Travaux pratiques, Université Aboubekr Belkaid
- 5- Afnor,(1994)** « Analyse granulométrique, méthode par tamisage après lavage ». Normalisation française.
- 6- Afnor (1992) :** «Analyse granulométrique, méthode par sédimentation » Normalisation française
- 7- LTPS (2010)** Laboratoires des travaux publics de l'ouest. In salah.
- 8- Afnor, A. A, (1993)** « Détermination de limite d'Atterberg ». Normalisation
- 9- Hafsi Abdellatif, LTPS Ouargla (2010):** «Les Tufs Gypseux et Calcaires en Zones Arides Essais et Critères de Sélection » Université Kasdi Merbah Ouargla

Annexes

Annexes I

Classification USCS/LCPC des sols

d_{50}	Fraction > 80 μm	Fraction < 80 μm		Norme LCPC	Symbole USCS		
> 80 μm SOLS GRENUS	Majorité > 2 mm GRAVES	0 à 5% Grave propre	$C_u > 4$ Et $1 < C_c < 3$	Gb Grave propre bien graduée	GW		
			sinon	Gm Grave propre mal graduée	GP		
		> 12 %	Diagramme de plasticité : Au-dessus de la ligne A		GA Grave argileuse	GC	
			Diagramme de plasticité : Au-dessus de la ligne A		GL Grave limoneuse	GM	
		5 à 12 %		Double classement et double symbole		GA/GL – Lp/Lt/Ap/At	
		Majorité < 2 mm GRAVES	< 5% sable propre	$C_u > 6$ Et $1 < C_c < 3$	Sb sable propre bien graduée	SW	
	sinon			Sm sable propre mal graduée	SP		
	> 12 %		Diagramme de plasticité : Au-dessus de la ligne A		SA sable argileuse	SC	
			Diagramme de plasticité : Au-dessus de la ligne A		SL sable limoneuse	SM	
	5 à 12 %		Double classement et double symbole		SA/SL – Lp/Lt/Ap/At		



Annexes III

Essai Proctor tuf

<i>Poids d eau ajoutée</i>	6%		8%		10%	
<i>Poids total humide</i>	11289		11460		11465	
<i>Poid de moule</i>	6010		6010		6010	
<i>Poid de sol humide</i>	5279		5450		5455	
<i>Poid de sole sec</i>	4963		5018		4931	
<i>Volume de moule</i>	2295		2295		2295	
<i>Dencité sèche</i>	2,16		2,19		2,15	
<i>N°de la tare</i>	G	M	N	V	F	D
<i>Poids total humide</i>	114,20	100,80	112,50	101,80	115,50	130,20
<i>Poids total sec</i>	108,80	96,20	105,90	95,30	106,70	119,80
<i>Poids de la tare</i>	22,80	25,10	26,10	22,80	22,40	23,80
<i>Poids del'eau</i>	5,40	4,60	6,60	6,50	8,80	10,40
<i>Poids de sole sec</i>	86,00	71,10	79,80	72,50	84,30	96,00
<i>Teneur en eau</i>	6,28	6,47	8,27	8,97	10,44	10,83
<i>Moyenne</i>	6,37		8,62		10,64	

Essai Proctor argile

<i>Poids d'eau ajoutée</i>	8%		10%		12%	
<i>Poids total humide</i>	10346		10477		10519	
<i>Poid de moule</i>	6005		6005		6005	
<i>Poid de sol humide</i>	4341		4472		4514	
<i>Poid de sole sec</i>	4007		4048		4022	
<i>Volume de moule</i>	2295		2295		2295	
<i>Dencité sèche</i>	1,75		1,76		1,75	
<i>N°de la tare</i>	10	33	V	H	N	K
<i>Poids total humide</i>	137,22	154,47	150,52	166,78	122,88	132,35
<i>Poids total sec</i>	127,88	144,20	139,60	155,20	111,91	119,45
<i>Poids de la tare</i>	18,44	18,34	37,64	42,23	18,22	18,30
<i>Poids del'eau</i>	9,34	10,27	10,92	11,58	10,97	12,90
<i>Poids de sole sec</i>	109,44	125,86	101,96	112,97	93,69	101,15
<i>Teneur en eau</i>	8,53	8,16	10,71	10,25	11,71	12,75
<i>Moyenne</i>	8,35		10,48		12,23	

Essai CBR tuf

Temps	Enfoncemet (mm)	force totale (kgf)		Pression (kgf/cm2)
		Lecture	Valeur	
0' 30"	0,625	1,15	117,3	5,98
1' 00"	1,25	2,73	278,46	14,19
1' 40"	2	5,66	577,32	29,43
2' 00"	2,5	7,43	757,86	38,63
4'00"	5	14,95	1524,9	77,72
6' 00"	7,5	22,01	2245,02	114,43
8'00"	10	28,33	2889,66	147,28
10' 00"	12,5	33,14	3380,28	172,29

Essai CBR argile

Temps	Enfoncemet (mm)	force totale (kgf)		Pression (kgf/cm2)
		Lecture	Valeur	
0' 30"	0,625	1,74	177,48	9,04
1' 00"	1,25	4,75	484,5	24,69
1' 40"	2	7,72	787,44	40,13
2' 00"	2,5	9,09	927,18	47,25
4'00"	5	13,59	1386,18	70,65
6' 00"	7,5	16,31	1663,62	84,79
8'00"	10	18,54	1891,08	96,38
10' 00"	12,5	20,65	2106,3	107,35

Annexes IV

Essai Proctor mélange 95 % Tuf +5 % Argile

<i>Poids d'eau ajoutée</i>	6%		8%		10%	
<i>Poids total humide</i>	11139		11293		11326	
<i>Poid de moule</i>	6005		6005		6005	
<i>Poid de sol humide</i>	5134		5288		5321	
<i>Poid de sole sec</i>	4836		4890		4818	
<i>Volume de moule</i>	2295		2295		2295	
<i>Dencité sèche</i>	2,11		2,13		2,10	
<i>N° de la tare</i>	N	33	H	K	V	10
<i>Poids total humide</i>	121,74	117,39	151,24	143,37	136,79	123,41
<i>Poids total sec</i>	115,89	111,50	142,90	134,10	127,50	113,39
<i>Poids de la tare</i>	18,26	18,39	42,24	18,32	37,67	18,46
<i>Poids del'eau</i>	5,85	5,89	8,34	9,27	9,29	10,02
<i>Poids de sole sec</i>	97,63	93,11	100,66	115,78	89,83	94,93
<i>Teneur en eau</i>	5,99	6,33	8,29	8,01	10,34	10,56
<i>Moyenne</i>	6,16		8,15		10,45	

Essai Proctor mélange 90 % Tuf +10 % Argile

<i>Poids d'eau ajoutée</i>	6%		8%		10%	
<i>Poids total humide</i>	11049		11343		11436	
<i>Poid de moule</i>	6005		6005		6005	
<i>Poid de sol humide</i>	5044		5338		5431	
<i>Poid de sole sec</i>	4773		4956		4938	
<i>Volume de moule</i>	2295		2295		2295	
<i>Dencité sèche</i>	2,08		2,16		2,15	
<i>N° de la tare</i>	V	M	K	10	N	33
<i>Poids total humide</i>	153,16	183,34	156,80	127,51	127,92	121,20
<i>Poids total sec</i>	146,74	176,00	146,52	120,00	118,77	111,14
<i>Poids de la tare</i>	37,62	42,21	18,34	18,45	18,32	18,44
<i>Poids de l'eau</i>	6,42	7,34	10,28	7,51	9,15	10,06
<i>Poids de sole sec</i>	109,44	133,79	128,18	101,55	100,45	92,70
<i>Teneur en eau</i>	5,88	5,49	8,02	7,40	9,11	10,85
<i>Moyenne</i>	5,69		7,71		9,98	

Essai Proctor mélange 85 % Tuf +15 % Argile

<i>Poids d eau ajoutée</i>	6%		8%		10%	
<i>Poids total humide</i>	10805		11125		11212	
<i>Poid de moule</i>	6005		6005		6005	
<i>Poid de sol humide</i>	4800		5120		5207	
<i>Poid de sole sec</i>	4545		4750		4727	
<i>Volume de moule</i>	2295		2295		2295	
<i>Dencité sèche</i>	1,98		2,07		2,06	
<i>N°de la tare</i>	10	B16	X	V	H	K
<i>Poids total humide</i>	144,37	157,25	185,29	147,84	179,27	138,45
<i>Poids total sec</i>	137,87	149,68	175,03	139,75	166,50	127,50
<i>Poids de la tare</i>	18,39	18,59	40,74	37,71	42,20	18,29
<i>Poids del'eau</i>	6,50	7,57	10,26	8,09	12,77	10,95
<i>Poids de sole sec</i>	119,48	131,09	134,29	102,04	124,3	109,21
<i>Teneur en eau</i>	5,44	5,78	7,64	7,93	10,27	10,03
<i>Moyenne</i>	5,61		7,78		10,15	

Essai CBR mélange 95 % Tuf +5 % Argile

Temps	Enfoncemet (mm)	force totale (kgf)		Pression (kgf/cm2)
		Lecture	Valeur	
0' 30''	0,625	1,2	122,4	6,23
1' 00''	1,25	3,54	361,08	18,4
1' 40''	2	6,8	693,6	35,35
2' 00''	2,5	8,3	846,6	43,14
4'00''	5	14,79	1508,58	76,88
6' 00''	7,5	20,35	2075,7	105,79
8'00''	10	24,9	2539,8	129,44
10' 00''	12,5	28,63	2920,26	148,84

Essai CBR mélange 90 % Tuf +10 % Argile.

Temps	Enfoncemet (mm)	force totale (kgf)		Pression (kgf/cm2)
		Lecture	Valeur	
0' 30"	0,625	1,66	169,32	8,62
1' 00"	1,25	4,56	465,12	23,7
1' 40"	2	7,62	777,24	39,61
2' 00"	2,5	10,81	1102,62	56,19
4'00"	5	14,96	1525,92	77,77
6' 00"	7,5	19,2	1958,4	99,81
8'00"	10	22,89	2334,78	119
10' 00"	12,5	26,16	2668,32	136

Essai CBR mélange 85 % Tuf +15 % Argile.

Temps	Enfoncemet (mm)	Force Totale (kgf)		Pression (kgf/cm2)
		Lecture	Valeur	
0' 30"	0,625	1,75	178,5	9,09
1' 00"	1,25	4,4	448,8	22,87
1' 40"	2	7,45	759,9	38,73
2' 00"	2,5	8,95	912,9	46,52
4'00"	5	13,27	1353,54	68,98
6' 00"	7,5	15,64	1595,28	81,3
8'00"	10	17,81	1816,62	92,59
10' 00"	12,5	20,3	2070,6	105,53

Essai compression simple mélange 5 % Tuf +95 % Argile

Compacité Théorique	Densité	Poids du sol sec	Poids de l'eau	Poids sol humide
95	2,02	397,11	32,36	429,48
98	2,09	409,65	33,39	443,04
100	2,13	418,01	34,07	452,08

N° éprouvettes	Pois réel après compactage	Poids réel à l'écrasement	Teneur en eau	Diamètre d'éprouvette	Hauteur d'éprouvettes	Volume d'éprouvettes	Densité sèche à l'écrasement	Compacité à l'écrasement	Lecture	Résistance en (Kg/cm ²)	RC moyenne (Bars)
95-1	429,43	400,92	28,51	5	10	196,25	2,04	96%	2,583	13,43	13,39
95-2	428,4	399,85	28,55	5	10	196,25	2,04	96%	2,57	13,36	
98-1	446,32	418,67	27,65	5	10	196,25	2,13	100%	3,591	18,66	18,66
98-2	446,11	418,5	27,61	5	10	196,25	2,13	100%	3,589	18,65	
100-1	450,75	421,63	29,12	5	10	196,25	2,15	101%	4,112	21,37	21,37
100-1	450,7	421,6	29,10	5	10	196,25	2,15	101%	4,11	21,36	

Essai compression simple mélange 10 % Tuf +90 % Argile

Compacité Théorique	Densité	Poids du sol sec	Poids de l'eau	Poids sol humide
95	2,06	404,57	34,79	439,36
98	2,13	417,35	35,89	453,24
100	2,17	425,86	36,62	462,49

N°	Pois réel après compactage	Poids réel à l'écrasement	Teneur en eau	Diamètre d'éprouvette	Hauteur d'éprouvettes	Volume d'éprouvettes	Densité sèche à l'écrasement	Compacité à l'écrasement	Lecture	Résistance en (Kg/cm ²)	RC moyenne (Bars)
95-1	439,27	408,41	30,86	5	10	196,25	2,08	96%	2,932	15,24	15,15
95-2	438,15	407,8	30,35	5	10	196,25	2,08	96%	2,899	15,07	
98-1	450,59	418,04	32,55	5	10	196,25	2,13	98%	4,169	21,67	21,64
98-2	450,4	417,89	32,51	5	10	196,25	2,13	98%	4,158	21,61	
100-1	462,65	431,47	31,18	5	10	196,25	2,20	101%	5,749	29,88	29,86
100-1	462,48	431,22	31,26	5	10	196,25	2,20	101%	5,742	29,84	

Essai compression simple mélange 15 % Tuf +85 % Argile

Compacité Théorique	Densité	Poids du sol sec	Poids de l'eau	Poids sol humide
95	1,97	385,93	30,03	415,95
98	2,03	398,11	30,97	429,09
100	2,07	406,24	31,61	437,84

N° d'éprouvettes	Pois réel après compactage	Poids réel à l'écrasement	Teneur en eau	Diamètre d'éprouvette	Hauteur d'éprouvette	Volume d'éprouvette	Densité sèche à l'écrasement	Compacité à l'écrasement	Lecture	Résistance en (Kg/cm ²)	RC moyenne (Bars)
95-1	417,07	390,48	26,59	5	10	196,25	1,99	96%	2,1	10,91	10,65
95-2	415,9	389,5	26,40	5	10	196,25	1,98	96%	2	10,39	
98-1	430,45	403,5	26,95	5	10	196,25	2,06	99%	2,701	14,04	14,03
98-2	429,2	402,54	26,66	5	10	196,25	2,05	99%	2,697	14,02	
100-1	437,67	410,61	27,06	5	10	196,25	2,09	101%	3,324	17,28	17,19
100-1	437,52	410,4	27,12	5	10	196,25	2,09	101%	3,29	17,10	