

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE COLONEL AHMED DRAÏA D'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES DE MASTER

Parcours :

Option :

Génie Civil

Constructions Civiles et Industrielles

Thème

Caractérisation mécanique d'un mélange : Tuf + sable de dunes

Présenté par :

Membres de jury :

Khalili Khadidja

Président : Pr. Mekerta Belkacem

Encadré par :

Examineurs :

Mr. Akacem Mustapha

Mr. Moulay omar Hassan

Membres: M^{ME}. Belaidi Khadidja

Année : 2015 / 2016

Remerciements

Je remercie tous les enseignants de la faculté des sciences et des sciences de L'ingénieur – université africaine Ahmed Draya Adrar- qui ont participés à ma formation durant les cinq dernières années.

je remercie mon encadreur Mr : Mustapha AKACEM et les membres de jury qui a orienté mon travail.

Je suis heureux de pouvoir remercier chaleureusement Mr Abderrahmane BEN DJRAD, directeur de l'antenne LTPO Adrar, et l'ensemble des personnels qui travaille sous sa direction, Mr BOUAFIA, pour leur disponibilité permanente au cours de la réalisation de ce travail.

Je me saurais remercier l'équipe du Laboratoire des Travaux Publique du Sud L.T.P.S à Adrar personnels, ingénieurs et techniciens.

KHALILI KHADIDJA

Dédicaces

Tout d'abord, Je remercie "Dieu" le tout puissant.

*Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui
contribue de après au de loin à mon éducation,
mon assistance à savoir mes parents qui m'ont
éduque ;*

*Soutenus transmis beaucoup de choses (savoir), à
mes frères, à mes sœurs,
à toute mes amis de proches.*



KHALILI KHADIDJA

Notations bibliographique

ρ_{app} : Masse volumique apparente

ρ_{abs} : Masse volumique absolue

dm: diamètre maximale de tamis

dc: diamètre minimale de tamis

Ri: Refus cumulé dans le tamis « i »

T_i: Tamisât cumulé dans le tamis « i »

LCPC: Laboratoire Centrale des Ponts et chaussées

C_u : Coefficient d'uniformité ou Coefficient de HAZEN

C_c : Coefficient de courbure

W_P : Limite de plasticité

W_L : Limite de liquidité

I_p : Indice de plasticité

VBS : Valeur au bleu de méthylène

ES_v : Valeur de l'équivalent de sable visuel

ESP: Equivalent de sable au piston

Wopt: La teneur en eau optimale

$\gamma_d \max$: La densité sèche maximale

IPI : L'indice Portant Immédiat de CBR

LA : Coefficient Los Angeles du matériau

PL : Poids Lourds

R_c: Résistance a la compression

GTR: Guide Technique Routier

LTPS : Laboratoire des Travaux Publics du Sud

W : pourcentage La teneur en eau

ES : Equivalent de sable (%)

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 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	7
I. 2.1.Classification selon le teneur en carbonate de calcium (CaCO_3).....	7
I.2.2.Evolution des encroûtements calcaires	9
I.3. Utilisation des calcaires en constructions routière	9
I.4.Sable.....	11
I.4.1.Introduction	11
I.4.2.Définition du sable des dunes	12
I.4.3.Différentes formes des dunes	12
I.4.3.1. Dune de barkhane.....	12
I.4.3.2.La dune parabolique.....	13
I.4.3.3.Les dunes en étoile	13
I.4.3.4 Les dunes transversales	13
I.4.3.5. Les dunes longitudinales	14
I.4.4.Formation des sables de dunes	14
I.4.5.Utilisation du sable de dunes dans le domaine routier	14
I.5.Les mélanges de tuf et d'un autre granulat	14
I.5.1.Introduction	14
I.4.2. Tufs – Sable de dunes.....	15
I.5.3.Tufs – Sables – Bitume.....	15

Sommaire

I.6.Essais géotechniques réalisées sur les tufs	16
I.6.1. Analyse granulométrique	17
I.6.2. Mesure de la pollution argileuse	17
I.6.2.1.Limites d'Atterberg	17
I.6.2. 2. L'Equivalent de Sable	17
I.6.2.3. Essai au Bleu de Méthylène	17
I.6.3. Essai Proctor.....	18
I.6.4. Essai CBR	18
I.6.5. Essai de résistance à la compression simple	18
I.6.6. Résistance aux chocs et à l'abrasion	19
I.6.6.1. Essai Los Angeles	19
I.7.Conclusion	19

Chapitre II : Identification des matériaux utilisés

II.1 Introduction	20
II.2.Localisation des échantillons	21
II.2.1.Carrière du Tuf (Berbaa)	21
II.2.2.Sable de dunes du Bouda	21
II.3. Etude d'identification des matériaux utilisés	22
II.3.1.Etude d'identification géotechnique	22
II.3.1.1.Masse volumique apparente.....	22
II.3.1.2.Masses Volumiques absolues.....	22
II.3.2.Analyse granulométrique	23
II.3.2.1.Analyse granulométrique par tamisage.....	24
II.3. 2.2. Analyse sédimentométrique	26
II.3. 3.Qualité des fines	28
II.3.3.1.Les limites d'Atterberg	28
II.3.3.2.L'équivalent de sable	31
II.3.3.3.Essai au bleu de méthylène	33
II.4.Essai de compactage et portance.....	36
II.4.1. Essai Proctor Modifié.....	36
II.4.2.Essai CBR	38

Sommaire

II.4.3. Resistance a l'attrition (essai Los Angeles)	40
II.5. Essai de résistance à la compression simple	42
II.6. Classification GTR (Guide Technique Routier)	45
II.7. Conclusion	45

Chapitre III : Etude des mélanges : Tuf + Sable de dunes

III.1. Introduction	46
III.2. Les limites d'Atterberg	47
III.2.1. Mélange (90% tuf+ 10% sable de dunes)	47
III.2.1.1. Limite de liquidité	47
III.2.1.2. Limite de plasticité	48
III.2.1.3. Indice de plasticité	48
III.2.2. Mélange (80% tuf+ 20% sable de dunes)	48
III.2.2.1. Limite de liquidité	48
III.2.2.2. Limite de plasticité	49
III.2.2.3. Indice de plasticité	49
III.2.3. Mélange (70% tuf+ 30% sable de dunes)	50
III.2.3.1. Limite de liquidité	50
III.2.3.2. Limite de plasticité	51
III.2.3.2. Indice de plasticité	51
III.2.4. Mélange (60% tuf+ 40% sable de dunes)	51
III.2.4.1. Limite de liquidité	51
III.2.4.2. Limite de plasticité	52
III.2.4.3. Indice de plasticité	52
III.2.5. Influence de sable de dune sur les limites d'Atterberg	53
III.3. Essai au Bleu de Méthylène	54
III.3.1. Mélange: (100 -x)% tuf +x% sable de dunes; (x= 0 à 40)	54
III.4. Essai Proctor Modifié	54
III.4.1. Tracé des courbes Proctor Modifiés	54
III.4.2. Comparaison des résultats	57

Sommaire

III.4.3.Tracé des courbes CBR	58
III.4.4.Influence sur l'indice CBR.....	59
III.5.Essai de compression simple	61
III.5.1.Influence sur la Résistance à la compression simple.....	61
III.6. Résumé de l'étude des mélanges :Tuf + Sable de dunes	63
III.7. Conclusion	64

Liste des figures

Chapitre I: Etude bibliographique

Figure I.1: Répartition des encroûtements calcaires dans le monde	3
Figure I.2: Schéma de circuit de la formation des tufs calcaires	5
Figure I.3: Profil d'un encroûtement gypseux	7
Figure I.4: Classification des encroûtements calcaires d'après Ruellan (1976) à partir du processus pédologique (encroûtement mûr).....	9
Figure I.5: Dune de barkhane.....	13
Figure I.6: Dune parabolique	13
Figure I.7: Dunes en étoile.....	13
Figure I.8: Dune transversale.....	13
Figure I.9: dune longitudinal.....	14

Chapitre II : Identification des matériaux utilisés

Figure II.1 : Carte de localisation de la carrière étudiée (tuf)	21
Figure II.2 : Etapes de l'essai de la Masse volumique apparente.....	22
Figure II.3 : Etapes de l'essai de la Masse volumique absolue.....	23
Figure II.4: Colonne de tamis	25
Figure II.5 : Courbe granulométrique du sable de dunes et tuf de Berbaa	27
Figure II.6 : Etapes de l'essai de limite de liquidité	29
Figure II.7: Courbe de l'essai de limite de liquidité du tuf	30
Figure II.8 : Courbe de l'essai de limite de liquidité du sable de dunes.....	30
Figure II.9 : Essai équivalent sable	32
Figure II.10 : Courbe Proctor Modifié du tuf	38
Figure II.11: Variation de la force du piston en fonction de son enfoncement(Tuf)	40

Chapitre III : Etude des mélanges : Tuf + Sable de dunes

Figure III.1: Organigramme de recherche d'une formulation optimal	46
Figure III.2: Courbe de limite de liquidité (90% tuf +10% du sable de dunes).....	47
Figure III.3: Courbe de limite de liquidité (80% tuf +20% du sable de dunes)	49
Figure III.4: Courbe de limite de liquidité (70% tuf +30% du sable de dunes).....	50
Figure III.5: Courbe de limite de liquidité (60% tuf +40% du sable de dunes).....	52
Figure III.6: Influence de l'ajout de sable de dunes sur les limites d'Atterberg.....	53

Figure III.7: Influence de l'ajout de sable de dunes sur bleu Méthylène.....	54
Figure III.8 : Courbe Proctor Modifié (90% tuf +10% sable de dunes)	55
Figure III.9: Courbe Proctor Modifié (80% tuf + 20% sable de dunes)	56
Figure III.10: Courbe Proctor Modifié (70% tuf +30% sable de dunes)	56
Figure III.11: Courbe Proctor Modifié (60% tuf + 40% sable de dunes)	57
Figure III.12: Variation de la densité sèche en fonction du pourcentage de sable de dunes	58
Figure III.13: Variation de la force du piston en fonction de son enfoncement (mélanges avec 10% et 20% du sable de dunes).....	59
Figure III.14 : Variation de la force du piston en fonction de son enfoncement (mélanges avec 30% et 40% du sable de dunes).....	59
Figure III.15 :Variation de l'Indice CBR en fonction des différents pourcentages de sable de dunes	61
Figure III.16 : Variation de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de sable de dunes	62

Liste des tableaux

Chapitre I: Etude bibliographique

Tableau .I.1: Classification des encroûtements calcaires	8
Tableau. I.2 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de fondation en Algérie.....	10
Tableau I.3 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de base en Algérie.....	11
Tableau I.4 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en remblais en Algérie.....	11

Chapitre II : Identification des matériaux utilisés

Tableau II.1: Essais d'identification.....	20
Tableau II.2: Résultats de la masse volumique apparente et absolue	23
Tableau II.3: Résultats de l'analyse granulométrique de sable de dunes et de tuf	26
Tableau II.4: Limites d'Atterberg du tuf et sable de dunes	30
Tableau II.5: Valeurs de l'Equivalent de sable ES	33
Tableau II.6: Spécification d'ES pour la construction des chaussées	33
Tableau II.7: Valeurs des coefficients VB du tuf	35
Tableau II.8: Valeurs des coefficients VB du sable de dune	35
Tableau II.9: Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers	38
Tableau II.10 : Caractéristiques de compactage et de portance du (Tuf du Berbaa).....	39
Tableau II.11 : Valeurs des coefficients de Los Angeles.....	41
Tableau II.12: Spécification du coefficient L_A pour couches d'assises de chaussées	42
Tableau II.13 : Résultats de l'essai compression simple du Tuf	44

Chapitre III : Etude des mélanges :Tuf + Sable de dunes

Tableau III.1 : Résultats de la limite de liquidité (90% tuf+10% du sable de dunes)	47
Tableau III.2: Résultats de la limite de plasticité (90% tuf+10% du sable de dunes)	48
Tableau III.3 : Résultats de la limite de liquidité (80% tuf+20% du sable de dunes)	48
Tableau III.4 : Résultats de limite de plasticité (80% tuf+20% du sable de dunes)	49
Tableau III.5 : Résultats de limite de liquidité (70% tuf+30% du sable de dunes)	49
Tableau III.6 : Résultats de limite de plasticité (70% tuf+30% du sable de dunes)	51
Tableau III.7 : Résultats de limite de liquidité (60% tuf+40% du sable de dunes)	51
Tableau III.8 : Résultats de limite de plasticité (60% tuf+40% du sable de dunes)	52
Tableau III.9 : Influence de l'ajout de sable de dunes sur les limites d'Atterberg	53
Tableau III.10 : Influence de l'ajout de sable de dunes sur VBS des différents mélange	54
Tableau III.9 : Influence de l'ajout de sable de dunes sur les limites d'Atterberg	53
Tableau III.10 : Influence de l'ajout de sable de dunes sur les VBS	54

Tableau III.11 : Influence de l'ajout de sable de dunes La densité sèche γ_{dmax} et la teneur en eau W_{opt}	57
Tableau III.12 : Résultats de l'indice CBR (tuf seul	60
Tableau III.13 : Résultats de l'indice CBR (90% tuf +10% du sable de dunes	60
Tableau III.14 : Résultats de l'indice CBR (80% tuf +20% du sable de dunes	60
Tableau III.15 : Résultats de l'indice CBR (70% tuf +30% du sable de dunes	60
Tableau III.16 : Résultats de l'indice CBR (60% tuf +40% du sable de dunes	61
Tableau III.17 : Influence de l'ajout de sable de dunes sur résistances à la compression	62
Tableau III.18 : Influence du Pourcentage de sable de dune sur les propriétés physico-mécaniques	63

Liste des photos

Chapitre I: Etude bibliographique

Photo I.1: Sables de dunes 12

Chapitre II : Identification des matériaux utilisés

Photo II.1: Sable de dunes (Bouda)21

Photo II.2:Tamiseuse électrique 25

Photo II.3: Matériel de l'essai sédimentométrique27

Photo II.4: Appareil de Casagrande29

Photo II.5: papier filtre du bleu de méthylène du tuf(Barbaa).....34

Photo II.6: papier filtre du méthylène du sable du dune(Bouda).....35

Photo II.7: Matériel nécessaire de Proctor Modifie37

Photo II.8: Presse CBR39

Photo II.9: Machine de Los Angeles.....41

Photo II.10: Echantillon et Moule de L'essai de la comperssion simple43

Photo II.11: Compactage statique et démoulages des éprouvettes43

Photo II.12: Conservations des éprouvettes à l'étuve43

Photo II.13: Ecrasement d' une éprouvette à la Presse CBR44

ملخص

إن إنجاز الطرق يعتمد أساسا على استخدام المواد الأولية (الطف، الزفت،...الخ.) 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 . إن وفرة رمل الكتبان يجعل منه أهم البدائل المطروحة.

يعتبر هذا البحث بداية لدراسة خصائص المواد المحلية المتوفرة بمنطقة أدرار من أجل استخدامها في إنجاز الطرق . كما يعتبر العمل التجريبي السبيل الأنجع لإيجاد خلائط من الطف ورمال الكتبان بنسب معينة للحصول على أحسن الخصائص الميكانيكية و الفيزيائية . هدف هذه الدراسة هو القيام ببحث مكتبي و تجريبي حول استخدام رمل الكتبان في تقنية الطرق و هذا قصد توفير قاعدة من المراجع للأبحاث المستقبلية في هذا المجال، وهذا ما يسمح باستغلال جيد لرمال الكتبان في إنشاء الطرق بشكل يسمح بالحصول على مقاومة جيدة .

الكلمات المفتاحية : الطف ، رمل الكتبان ، خلايط من الطف ورمال الكتبان.

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. Le sable de dunes, vu son abondance ; peut être considéré 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'Adrar 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 -sable des dunes.

L'objectif de cette étude est de faire une recherche bibliographique et travail expérimental sur l'utilisation du sable de dunes en technique routière, en vue de fournir aux futurs travaux expérimentaux sur ce sujet une base documentaire, qui leurs permettent une bonne exploitation de sable de dunes dans la construction des routes de manière à avoir de bonne performance mécanique.

Mots clé : Tuf, Sable de dunes, mélange de Tuf-Sable de dunes.

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 sable de dune. 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 BERBAA et sable de dune de BOUDA 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 trois chapitre

- ✚ Le premier chapitre est consacré à la présentation des travaux de recherche, une synthèse bibliographique sur les tufs et les sables des dunes.
- ✚ Dans le second chapitre, nous avons déterminé les caractéristiques mécaniques des matériaux locaux (tuf, sable des dunes), 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 troisième 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 sable de dunes, dont le but est de valoriser les matériaux locaux.

CHAPITRE I :

Etude bibliographique

I.1. Introduction:

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

I.1.1. Définition de tuf:

Dans la bibliographie, les tufs se définissent comme des roches, friables, poreuses, légères et de couleur claire, elles datent du quaternaire, ces roches sont de constitution variable et résultent d'un certain nombre d'échanges par dissolution et précipitation. Suivant leur composition, les tufs se regroupent en trois catégories : [1]

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

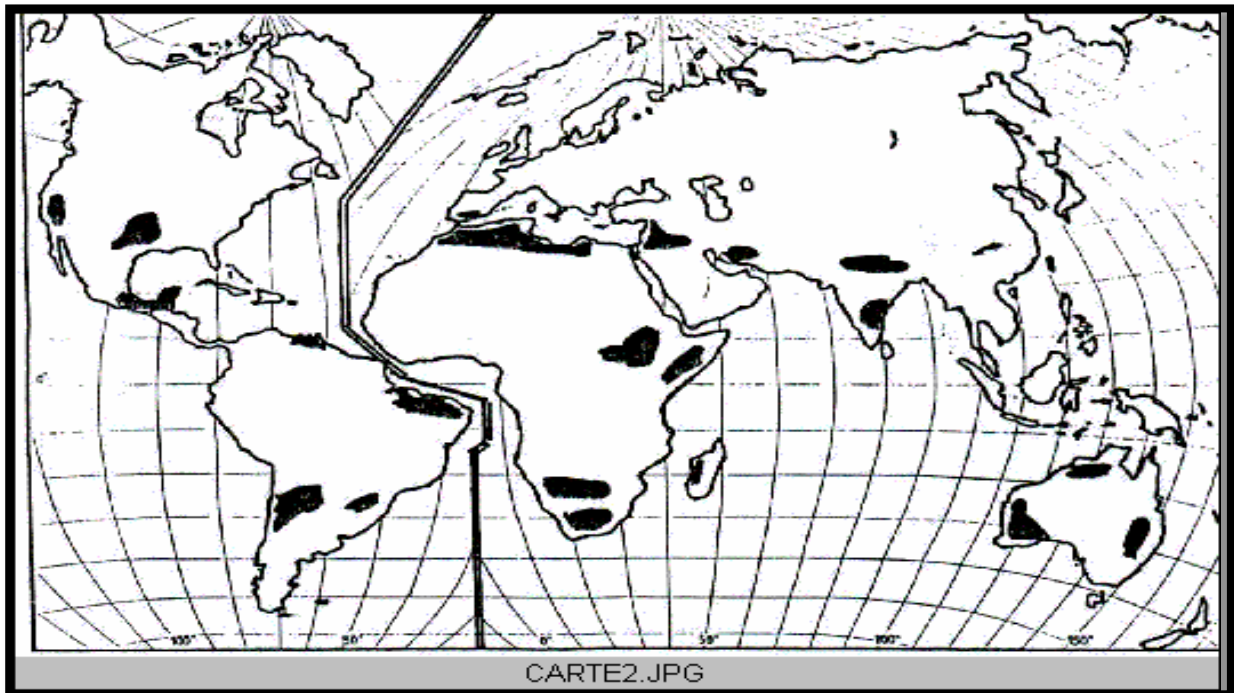


Figure I.1: Répartition des encroûtements calcaires dans le monde[1].

I.1.2. Les tufs 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 Ben Gazi 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[2].

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 ».

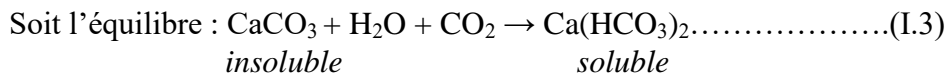
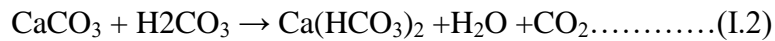
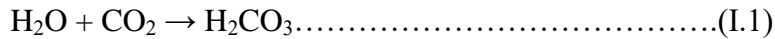
I.1.3.1. Formation des encroûtements calcaires:

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.

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 CO₂ dans l'eau. Dans ce dernier, le phénomène régi par les équations chimiques suivantes : [1]



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 I.2 représente schématiquement le circuit qui aboutit à la création des encroûtements calcaires.

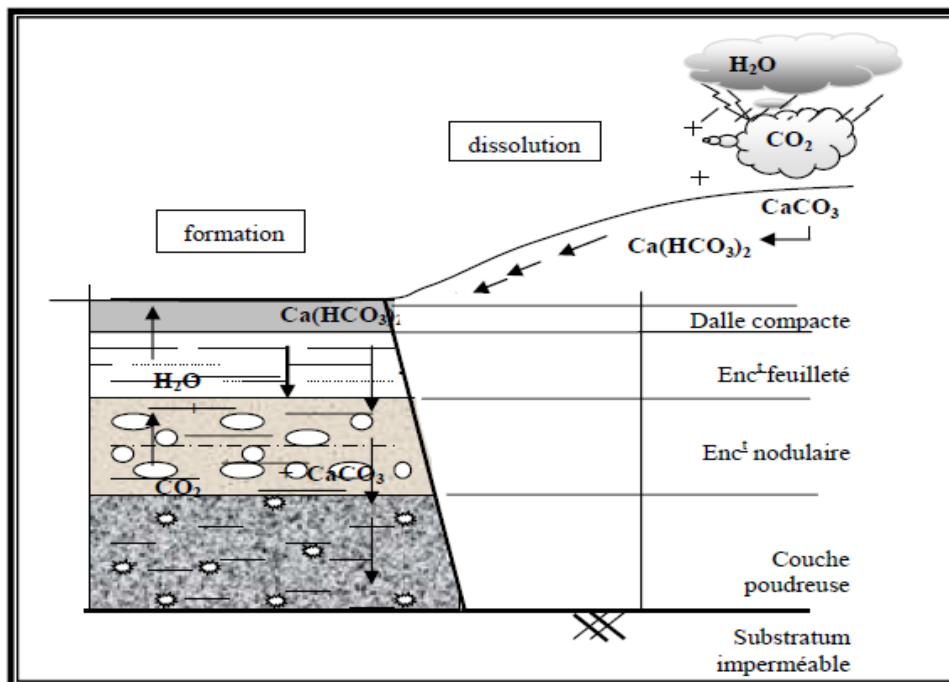


Figure I.2: Schéma du circuit de la formation des tufs calcaires[1].

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 : [1]
$$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2 \dots \dots \dots (\text{I.4})$$

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 [3].

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 1.4)[17] .

✓ **Horizon supérieur A :**

C'est un horizon appelé tirsch en arabe d'une épaisseur comprise entre 10 et 20 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 1 et 2 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.

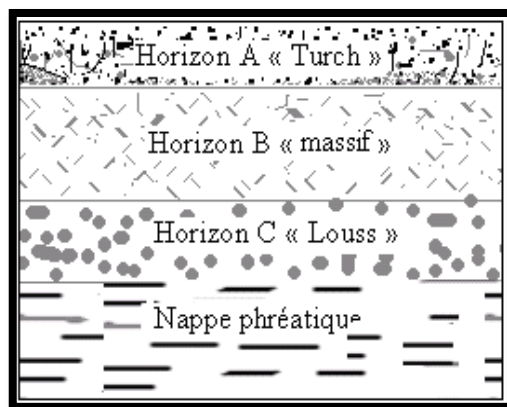


Figure I.3: Profil d'un encroûtement gypseux [17]

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 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 [3].

I.2. Classification des encroûtements calcaires:

I.2.1. Classification selon la teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) [1]

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]. Reullan 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.

- **Concentration continues:**

Lorsque la concentration en calcaire se poursuit (teneur en CaCO₃ > 60%) elle devient continue, on a alors affaire aux encroûtements calcaires proprement dits.

La classification proposée par Ruellan pour les concentrations continues, est résumée sur le tableau I.1.

Tableau I.1 : Classification des encroûtements calcaires [1]

DENOMINATION		DESCRIPTION	TENEUR EN CaCO ₃ (%)	EPAISSEUR	RAPPORTS MUTUELS
Encroûtements non feuilletés	Encroûtements massifs	Structure massives ou polyédrique	> 60	0.3 à 2.0 m (le plus souvent)	Sous les encroûtements non feuilletés, il y a toujours des amas friables avec ou sans nodules
	Encroûtements nodulaires	Structure nodulaire et polyédrique			
Encroûtements feuilletés	Croûtes sensustrictu	euillets superposés et discontinus d'encroûtement massif ou nodulaire d'épaisseur millimétrique à centimétrique croissant du bas en haut.	> 70	Quelques centimètres à > 1 m	Sous les croûtes, il y a presque toujours des encroûtements non feuilletés. Les dalles compactes n'existent qu'au sommet des croûtes et peuvent remplacer entièrement celles-ci. Des pellicules rubanées sont presque toujours associées à la dalle compacte dont ² tapissent la surface supérieure et les fissures.
	Dalles compactes	Feuillets de croûte pétrifiés, épaisseur de quelques centimètres à plusieurs décimètres			

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.3),

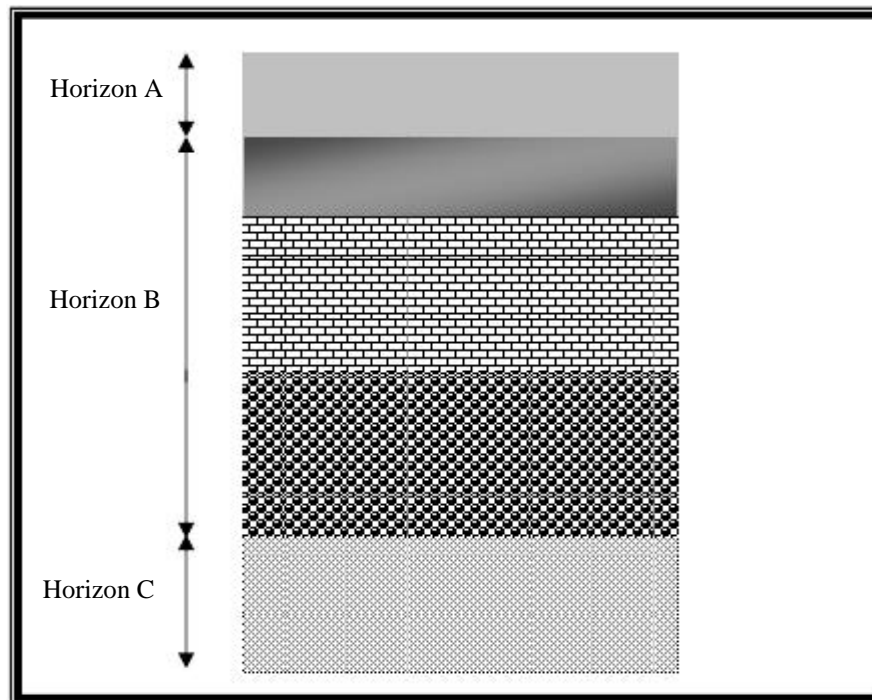


Figure I.4: Classification des encroûtements calcaires à partir du processus pédologique (encroûtement mûr). [1]

On distinguera les horizons suivants :

- ✚ **Horizon A** : pauvre en calcaire, c'est la terre végétale d'une épaisseur de 30 à 50 cm.
- ✚ **Horizon B** : riche en calcaire (40 à 90 %) d'une épaisseur de 1 à 2 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 feuilletés de dureté plus faible que la dalle et d'un encroûtement nodulaire plus au moins pulvérulent.
- ✚ **Horizon C** : c'est le sol origine, c'est un matériau poudreux où l'enrichissement en calcaire est faible.

I.3. 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. Couche 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 [6].

Granulométrie	Suivant le fuseau
Limite de liquidité	$20 \% < W_L < 35 \%$
Indice de plasticité	$6 \% < I_p < 12 \%$
Equivalent de sable	$20 \% < ES < 35 \%$
Teneur en carbonate	$CaCO_3 > 45 \%$
CBR imbibé	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 (**voir Tableau. I.3**). 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 [6].

Granulométrie	Suivant le fuseau
Limite de liquidité	$20 \% < W_L < 30 \%$
Indice de plasticité	$5 \% < I_p < 10 \%$
Equivalent de sable	$20 \% < ES < 40 \%$
Teneur en carbonate	$CaCO_3 > 45 \%$
CBR imbibe	$CV^{(1)} : CBR > 20$ $CW^{(1)} : CBR > 30$ $RN^{(1)} : CBR > 35$

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 présentés au Tableau I.4.

Tableau I.4 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en remblais en Algérie [6].

Granulométrie	Ne doit pas être serrée
Limite de liquidité	$W_L < 45 \%$
Indice de plasticité	$I_p < 16 \%$
Equivalent de sable	$15 \% < ES < 40 \%$
Teneur en carbonate	$CaCO_3 > 30 \%$
CBR imbibé	$CBR > 14$
Densité sèche maximale	$\gamma_{d \max} > 1.6 \text{ g / cm}^3$
Teneur en eau optimale	$W_{opt} < 16 \%$

I.4. Sable:

I.4.1. Introduction:

Le terme sable est généralement utilisé pour désigner un mélange de grains meuble n'ayant aucune cohésion et dont la dimension des grains est généralement comprise entre 0,062 et 5 mm. Du point de vue géologique, le terme sable recouvre deux

aspects : un aspect granulométrique (taille des grains) et un aspect minéralogique (nature minéralogique des grains). Une particule individuelle est appelée grain de sable[4]

I.4.2. Définition du sable des dunes:

On distingue par sable éolien les sables de dune, qui sont le résultat de l'érosion provoqué par le vent et la température particulièrement dans les déserts. Ces sables se déposent en édifices dunaires constitués d'une succession de crêtes et de couloirs qui correspondent à des vagues. Ces sables se trouvent dans plusieurs régions du désert sous forme de dunes qui occupent de vastes territoires. La vitesse et l'intensité des vents sont les deux facteurs responsables du triage granulaire des sables dunaires, de leur distance de transport et de leur mode d'accumulation. La photo I.1 montre un exemple particulier de sable de dune.[7]

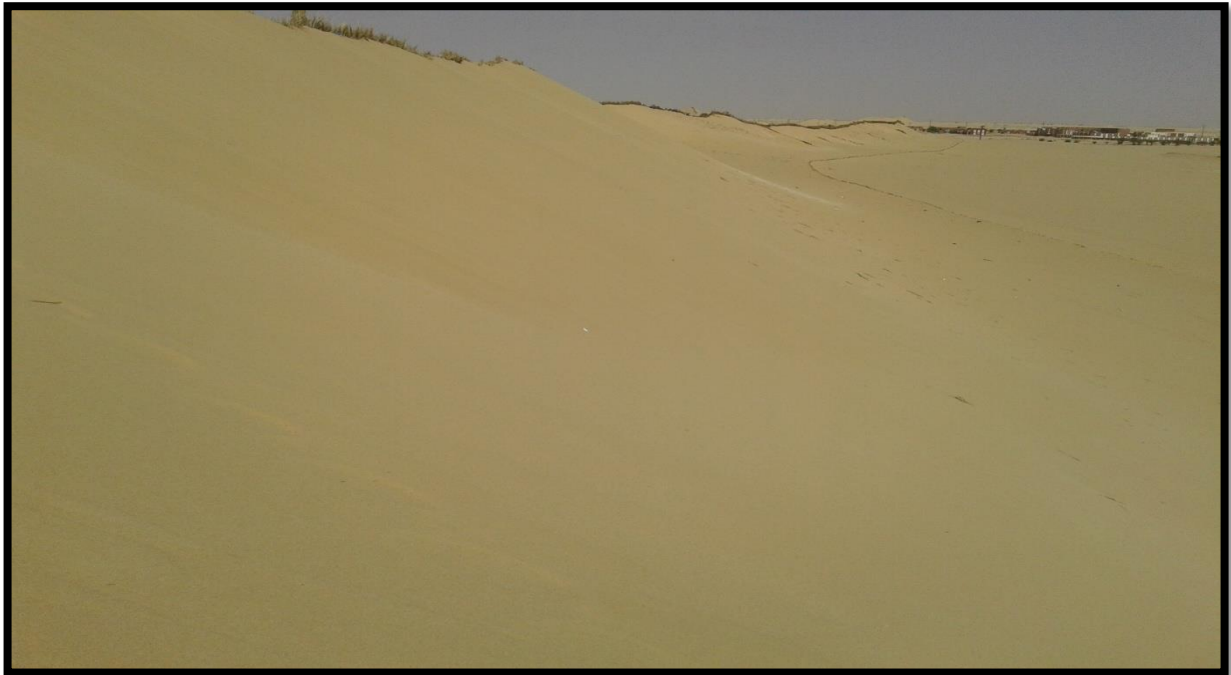


Photo I.1 : Sable de dunes

I.4.3. Différentes formes des dunes:[4]

I.4.3.1. Dune de barkhane:

Ces dunes sont des dunes d'accumulation, édifiées en terrain plat, mobiles, en forme de croissant dont la convexité est tournée au vent. Elles peuvent atteindre une taille de 300 m et s'assembler pour former des formes complexes.



Figure I.5: Dune de barkhane

I.4.3.2. La dune parabolique:

Une dune dissymétrique en forme de fer à cheval à concavité au vent souvent plus ou moins fixée par la végétation. Sa disposition par rapport à la direction du vent est donc inverse de celle de la barkhane. La dune parabolique est peu mobile et généralement ne migre guère une fois qu'elle est formée ;



Figure I.6: Dune parabolique

I.4.3.3. Les dunes en étoile:

Immobiles se rencontrent dans les clairières des forêts de pins et seraient dues à un des équilibre dans le système des vents.



Figure I.7: Dunes en étoile

I.4.3.4. Les dunes transversales:

Mobiles rectilignes, perpendiculaires la direction du vent: la dune du Pilat.

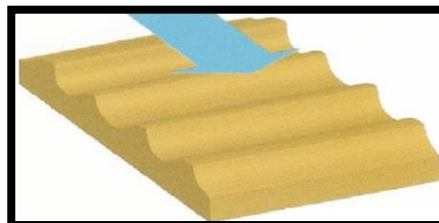


Figure I.8: Dune transversale

I.4.3.5. Les dunes longitudinales:

Allongées dans le sens du vent. Elles peuvent apparaître si le vent change de direction au cours de l'année. Plus précisément elles peuvent apparaître si le vent possède deux directions privilégiées. La dune est alors étirée dans le sens du vent moyen. On parle aussi du « Seif » dunes. Leur dynamique est bien plus complexe que pour les barkhanes puisque leur forme évolue beaucoup au cours du temps.

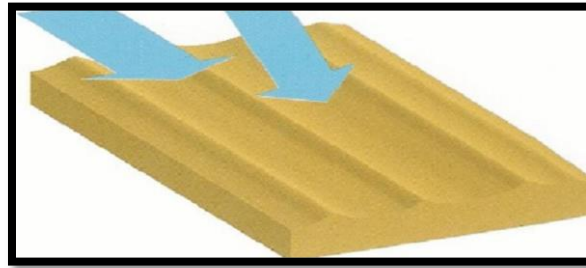


Figure I.9: dune longitudinal

I.4.4. Formation des sables de dunes :

Les sables des dunes ont pour origine la désagrégation des roches sous l'effet conjugué des chocs thermiques et de l'altération des sols constituant les lits d'oueds ou d'anciens fleuves.

Les matériaux détritiques superficiels sont dégagés des particules limoneuses emportées en suspension dans l'air à des grandes distances. Les sables restés sur place sont à leur tour déplacés par roulement sur des distances plus courtes.

I.4.5. Utilisation du sable de dunes dans le domaine routier :

L'utilisation des sables en techniques routières n'est pas nouvelle. A l'époque déjà, les ingénieurs avaient recours à l'utilisation du sable mélangé à un liant hydrocarboné en particulier pour les couches de roulement [4] .

I.5. Les mélanges de tuf et d'un autre granulat:

I.5.1. Introduction:

Les tufs, notamment les plus tendres, ont naturellement une courbe granulométrique discontinue. Leur teneur en fines est élevée et ils comportent peu ou pas de squelette.

Certaines graves naturelles sont, au contraire, riches en gros éléments, mais totalement dépourvues de fines. Par ailleurs, certains sables naturels éoliens ou

alluvionnaires et même dunaire ont des courbes granulométriques très homométriques et sont eux aussi dépourvus de fines.

L'association de tuf avec ces graves ou sables paraît donc tout à fait intéressante lorsque l'on cherche une courbe granulométrique continue et suffisamment riche en fines pour obtenir un matériau à faible pourcentage de vides après compactage. Cette technique a été élaborée et développée depuis plus de 30 ans.

Elle est à rapprocher de la litho-stabilisation qui est utilisée avec succès pour le traitement des latérites [3].

I.4.2. Tufs – Sable de dunes:

L'utilisation du sable en techniques routières n'est pas nouvelle. Beaucoup d'études et de réalisations ont été faites et un guide pratique d'utilisation routière des sables a été publié (Chauvin, 1987). Cependant, les sables de dunes constituent un cas particulier pour lequel les directives et recommandations ne peuvent pas être appliquées sans études spécifiques. Ben-Dhia (1998) dans une tentative de valorisation du sable de dune, a mélangé ce dernier, différents taux, avec divers matériaux: grave naturelle, tuf calcaire, tuf gypseux et sol argileux et a conclu que :

- L'incorporation du sable de dune améliore la portance des matériaux.
- Le poids volumique s'améliore aussi lorsque la teneur en sable augmente jusqu'à 30%
- La plasticité diminue au profit d'une nette amélioration de la propreté. En Algérie, vu l'abondance du sable de dune, l'idée de l'association de tuf avec le sable de dune au laboratoire paraît très intéressante (Morsli, et al., 2005a, Morsli, 2007 ; Morsli et al., 2007). L'étude a porté sur l'effet de l'incorporation d'un sable de dune sur les caractéristiques géotechniques et mécaniques d'un tuf calcaire de la région de Bechar. L'objectif était de tester les possibilités d'amélioration des caractéristiques de ce tuf par une technique de stabilisation économique permettant de valoriser à la fois le sable de dune et le tuf calcaire pulvérulent[3].

I.5.3. Tufs – Sables – Bitume:

La technique des tufs calcaires-sables-bitume permet, à partir de deux matériaux «marginiaux» (tuf tendre et sable fin), de réaliser des assises de chaussées traitées au bitume. Le comportement de ces structures est globalement jugé très bon en

Argentine ou cette technique est utilisée depuis plus de 25 ans. Le seul défaut de la technique réside dans la nécessité d'utiliser une teneur en bitume très élevée (8% à 10%), ce qui rend cette solution peu économique dans les pays non producteurs (Riuz et al 1969 ; Tagle, 1976) Cette technique repose sur les idées de base suivantes :

- Enrober les gros éléments 5/20 mm de tufs très friables dans un mortier bitumineux rigide qui les protège de l'attrition sous les contraintes de la circulation :
- Réaliser un mortier bitumineux performant en rigidifiant fortement un bitume routier traditionnel par un fort pourcentage de fines calcaires amenées par le tuf.

Les formules traditionnelles mises au point pour chaque chantier à l'issue d'une étude de formulation comportent en principe : 50 à 65 % de tuf calcaire plus 50% à 35 % de sable siliceux mélangé avec 8% à 10 % de bitume 70/100.

Les tufs-sables-bitume peuvent être utilisés en assises de chaussées faiblement ou moyennement circulées ; ils sont alors protégés par un enduit superficiel. La présence d'éléments très friables en surface ne permet pas en effet de livrer longtemps les tufs-sables-bitume à la circulation sans protection. Pour ce type de chantier, les épaisseurs sont de l'ordre de 10 cm. Dans le cas des chaussées fortement circulées, on doit les recouvrir par une couche de roulement en béton bitumineux de 5 à 6 cm[3].

I.6. Essais géotechniques réalisés sur les tufs :

Les essais géotechniques les plus couramment utilisés pour la caractérisation des tufs au laboratoire sont :

- Analyse granulométrique :
 - Par tamisage (voie sèche ou humide) ;
 - Par sédimentométrie.
- Limites d'Atterberg (limites de consistance) ;
- Mesure de la pollution argileuse :
 - Equivalent de Sable ;
 - Essai au Bleu de Méthylène.
- Essai Proctor (Modifié ou Normal) ;
- Essai de portance (essai CBR) ;
- Essai de compression simple.

- Résistance aux chocs et à l'abrasion :

- Essai Los Angeles.

I.6.1. Analyse granulométrique:

La granulométrie des tufs est très variable selon la nature du matériau :

- Sur le matériau d'origine elle est sans signification ;

- Sur le matériau extrait, elle est très variable.

Généralement le tamisage est réalisé par voie humide pour bien séparer les particules fines. Concernant les éléments inférieurs à 80 μm l'analyse est faite par sédimentométrie. Les courbes granulométriques sont généralement continues avec une allure proche de celles des sables [1].

I.6.2. Mesure de la pollution argileuse :

Lorsque des matériaux sont susceptibles d'être utilisés pour la réalisation de couches de chaussées, il est indispensable de connaître dans quelle mesure ils sont pollués par des fractions argileuses.

Nous connaissons qu'un excès d'argile rendra le matériau sensible à l'eau et aux déformations permanentes sous la circulation. Pour cela, la mesure de la pollution elle est appréciée par trois essais géotechniques [1] :

I.6.2.1. Limites d'Atterberg :

C'est l'essai actuellement le plus souvent réalisé et le plus universel sur les encroûtements calcaires. Pour évaluer la pollution argileuse, on fait en effet souvent référence à la valeur de l'indice de plasticité qui est très variable.

Il varie entre 5 (non mesurable) et 25 % (non mesurable $< IP < 25$) [1].

I.6.2. 2. L'Equivalent de Sable :

Cet essai n'a pas de signification lorsqu'il est réalisé sur la totalité de la fraction 0/5mm. La teneur en éléments $< 80 \mu\text{m}$ de cette fraction varie de 10% à 80 %, ce qui influence considérablement la valeur de ES qui est comprise entre 10% et 60 %, et renseigne peu sur la qualité des fines [1].

I.6.2. 3. Essai au Bleu de Méthylène :

L'essai au bleu a pour but de déterminer l'activité globale de la fraction argileuse. Cet essai, qui a été peu appliqué aux matériaux d'encroûtements, serait peut-être le mieux adapté pour évaluer l'activité des fines et détermine la présence d'argile plastique.

A titre d'indication, les spécifications actuelles pour les couches de chaussées sont :

- Pour les enrobés bitumineux : $VB < 1$ [11] et [12] ;
- Pour les graves non traités et traités : $VB < 1.5$ [11] et [12];
- Pour les sables non traités et traités : $VB < 0.5$ [13].

I.6.3. Essai Proctor :

Lorsque le matériau est destiné à être utilisé en couche de chaussée, on adopte la version dite Proctor Modifiée pour laquelle l'énergie de compactage est la plus forte à peu près quatre fois que du Proctor Normal.

Les résultats de cet essai sont très dispersés car le comportement d'un matériau dépend de la teneur en eau, du compactage et de la granularité. Généralement, les résultats sont dans les fourchettes suivantes [1]:

- les densités sèches maximales ($\gamma_d \text{ max}$) sont comprises entre 1.7 et 2 g / cm³ ;
- les teneurs en eau optimales (W_{opt}) sont, très variables et élevées, de 8 à 15 %.

I.6.4. Essai CBR :

L'essai est réalisé avec les conditions de l'essai Proctor Modifié à savoir la teneur en eau optimale et l'énergie de compactage. L'essai est réalisé :

- Soit immédiatement après compactage ;
- Soit après 4 jours d'imbibition sous l'eau

La portance qui est caractérisée par l'indice CBR, est très élevée dans le cas du poinçonnement immédiat et chute considérablement après imbibition de 4 jours. Ceci, rend en compte l'influence de l'eau sur les tufs calcaires [1].

En résumé, on a souvent les résultats suivants :

- $50 < \text{CBR immédiat} < 150$
- $30 < \text{CBR après 4 jours d'immersion} < 100$

I.6.5. Essai de résistance à la compression simple:

C'est un essai empirique, introduit pour les matériaux locaux pour la première fois par Fenzy (1957) (in Alloul, 1981) [19]. [18]., il est réalisé sur tous les matériaux sahariens sur la fraction 5 mm. Le compactage à l'OPM est effectué à la presse ou sur le moule CBR. On réalise par la suite des essais de compression simple sur des échantillons de 5 cm de diamètre et 10 cm de hauteur, en fonction de la durée de conservation de l'échantillon dans une enceinte à la même température [20].

I.6.6. Résistance aux chocs et à l'abrasion :

I.6.6.1. Essai Los Angeles :

Pour les matériaux suffisamment résistants, la résistance aux chocs sera appréciée par l'essai Los Angeles. Définie, par le coefficient LA.

Pour les matériaux d'encroûtements, ce coefficient varie entre 30 pour les dalles les plus compactes et 70 à 80 pour les croûtes les plus friables [1]. Au-delà de ces valeurs, l'essai est sans intérêt. En résumé :

- Pour les croûtes et dalle : $25 < LA < 80$
- Pour les encroûtements friables le LA est non mesurable.

I.7. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur le tuf et sable de dunes telle que, définition du tuf et sable de dune, différents formes des dunes, Intérêt de sable de dunes, quelque paramètres qui nous parmi d'identifier ce type de tuf et sable comme la minéralogique, analyse granulométrique, comportement mécanique et les propriétés (WL ,WP,...).On a parlé aussi sur les devers utilisations des tuf et sable de dune, son utilisation dans le domaine routière qui on va l'expliqué dans le chapitre suivant. Dans le chapitre suivant, on s'intéressera à la partie expérimentale par la présentation des résultats des essais identification physiques et mécaniques réalisés sur le tuf et le sable de dunes au niveau de la région d'Adrar, 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 circulée

CHAPITRE II :

Identification des matériaux utilisés

II.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 BERBAA. Nous nous intéressons dans ce deuxième chapitre à l'étude d'identification géotechnique des matériaux: tuf et sable de dunes à l'aide des essais de laboratoire classique. Le tableau II.1 résume les essais qu'on a fait :

Tableau II. 1: Essais d'identification.

L'ESSAI	NORME
Analyse granulométrique	NF P 94-056
Equivalence de sable	NF P 18-598
Proctor Modifié	NF P 94-093
Portance CBR	NF P 94-078
Limites d'Atterberg	NF P 94-058
Los Anglos	NF P 18-573

II.2. Localisation des échantillons:

II.2.1. Carrière tuf (Berbaa) : Elle est située approximativement à l'Est de la ville d'Adrar, le matériau appelé tuf est de couleur blanc.



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

II.2.2. Sable de dunes de Bouda :

Elle se trouve à l'Ouest de la ville d'Adrar et à 20 kilomètres à l'ouest de la Route Nationale N° 6. Le matériau de couleur jaune (voir photo II.2).



Photo II.1 : Sable de dunes (Bouda)

II.3. Etude d'identification des matériaux utilisés:

Dans le chapitre précédent, nous avons donné une présentation générale de la formation des tufs calcaires, gypseux et mixtes, les sables des dunes . Nous allons prendre connaissance dans ce chapitre les essais d'identification géotechnique du tuf de la carrière de Berbaa et du sable de dune de Bouda.

II.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.

II.3.1.1. Masse volumique apparente, ρ_{app} [8]:

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

- La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté.
- La masse volumique apparente est donnée par:

$$\rho_{app} = M/V \dots \dots \dots (II.1)$$

- L'essai est répété 3 fois pour un volume de 1 litre et la moyenne de ces essais donne la valeur de la masse volumique apparente[8].

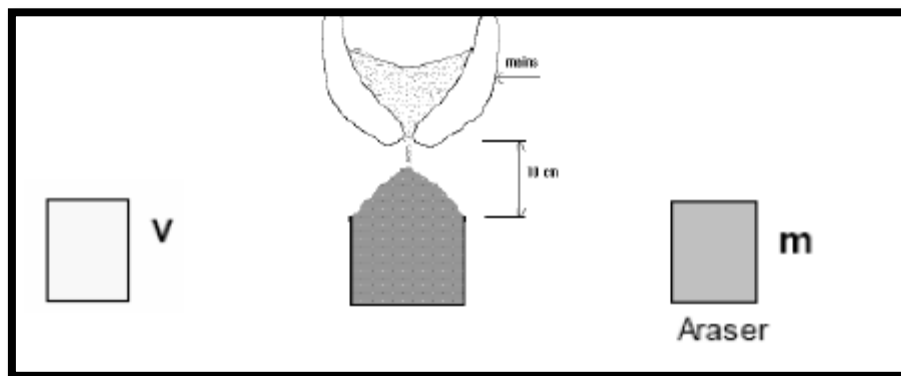


Figure II.2: Étapes de l'essai la Masse volumique apparente.

II.3.1.2. Masses Volumiques absolues ρ_{ab} [8]:

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

❖ **Méthode opératoire:**

- Cette méthode de détermination des masses volumiques est plus précise à condition de prendre un certain nombre de précautions
- Déterminer avec précision la masse M1 du ballon rempli d'eau.
- Déterminer avec précision la masse M2 d'un échantillon de matériau sec .
- Introduire la totalité du matériau dans le ballon, remplir d'eau. Vérifier qu'il n'y a aucune bulle d'air. Peser alors avec précision le ballon, soit M3 .

La masse volumique absolue est alors . La masse volumique absolue est:

$$\rho_{ab} = \frac{M_2}{(M_1 + M_2) - M_3} \dots \dots \dots (II.2)$$

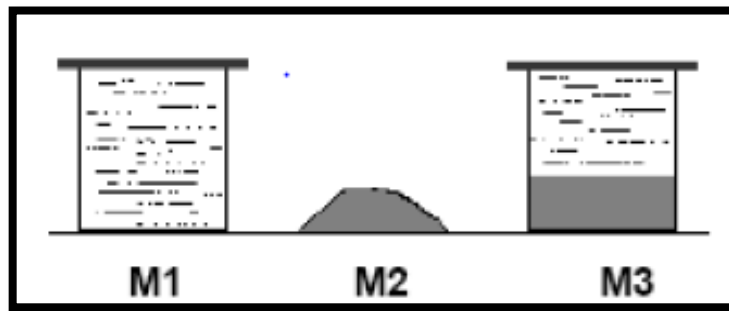


Figure II.3: Etapes de l'essai la Masse volumique absolue.

Le tableau II.2: résume les résultats de l'essai:

Tableau II.2: Résultats de la masse volumique apparente et absolue

Sable de dunes		Tuf	
La masse volumique apparente (ρ_{app}) [KN/m ³]	La masse volumique absolue (ρ_{ab}) [KN/m ³]	La masse volumique apparente (ρ_{app}) [KN/m ³]	La masse volumique absolue (ρ_{ab}) [KN/m ³]
1.54	2.65	1.36	2.42

On remarque que la masse volumique absolue est plus importante que la masse volumique apparente ; Grâce à la masse volumique apparente, nous savons maintenant le poids et le volume des granulats, plus l'eau qu'ils contiennent et les vides. Avec la masse volumique absolue, nous avons déterminé le poids et le volume du squelette solide et de l'eau.

II.3.2. 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*.

II.3.2.1. 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 63 mm [7], pour les particules inférieure à 80 μm , l'analyse granulométrique se fait par sédimentométrie (norme NFP 94-057)[9].

B. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056):

❖ Principe de l'essai [5]:

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.

❖ Préparation de l'échantillon [7]:

La quantité à utiliser doit répondre à différents impératifs qui sont contradictoires:

- Il faut une quantité assez grande pour que l'échantillon soit représentatif,
- Il faut une quantité assez faible pour que la durée de l'essai soit acceptable et que les tamis ne soient pas saturés et donc inopérants.

❖ **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. (Figure (II.4)). La dimension nominale des tamis se suit dans une progression géométrique.



photo II.2: Tamiseuses électrique.

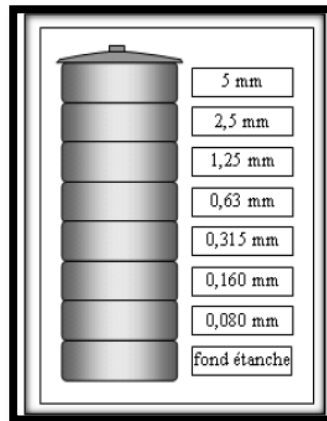


Figure II.4: Colonne de tamis.

❖ **Mode Opérateur :**

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

a) **Partie I**

- Peser une masse M_0 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 a 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 :

$$T_i = (M_0 - R_i) \times 100 / M_0 \dots \dots \dots (II. 3)$$

❖ **Expression des résultats:**

Cu est le coefficient d'uniformité ou le coefficient de Hazen:

$$C_u = D_{60}/D_{10} \dots \dots \dots (II.5)$$

Cc est le coefficient de courbure

$$C_c = D_{30}^2 / D_{10} \cdot D_{60} \dots \dots \dots (II.6)$$

Le tableau II.3 résume les résultats de cette analyse granulométrique.

Tableau II.3: Résultats de l'analyse granulométrique de de tuf et sable de dunes .

Echantillon	Sable de dunes	Tuf
0 / D	0 / 2	0 / 63
D30 (mm)	0.5	0.20
% < 80µm	0.46	24.1
% < 0.5mm	27.88	40
D60 (mm)	0.65	4.1
D10 (mm)	0.25	0.02
Cu	> 2 (granulométrie série)	> 2 (granulométrie étalée)
Cc	1.54	0.51

Le tamisât du 0,08 mm représente 24.1% de l'échantillon (donc supérieure à 5% de l'échantillon) d'où la nécessité de compléter l'analyse par sédimentométrie.

II.3.2.2. Analyse sédimentométrique

❖ **Principe:[10]**

L'essai de l'analyse sédimentométrique utilise le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantation des grains fins à très fins est fonction de leur dimension. La loi de Stokes donne, dans le cas de grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains et leur vitesse de sédimentation. Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer les diamètres équivalents des particules.

❖ **Mode opératoire [11]:**

- ✚ faire passer l'échantillon au tamis de 80 µm;
- ✚ étuvé le tamisât pendant 4 heures à la température 105°C;
- ✚ désagréger puis homogénéiser le tamisât;

Chapitre II : Identification des matériaux utilisés

- ✚ imbibé une prise d'essai de 20g;
- ✚ introduire la prise d'essai dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique;
- ✚ ajouter 500 cm³ du mélange (440 cm³ d'eau distillée + 60 cm³ à 5% d'examétaphosphate de sodium);
- ✚ laisser imbiber l'échantillon pendant 15h au moins;
- ✚ passer à l'agitateur mécanique ;
- ✚ verser la suspension dans une éprouvette;
- ✚ compléter par l'eau distillée à la température ambiante jusqu'à 1000 cm³;
- ✚ plonger le thermomètre et le densimètre dans l'éprouvette témoin;
- ✚ Faire les lectures aux temps suivant sans retirer le densimètre, plonger le densimètre dans la solution au moins 30 secondes avant la mesure.



Photo II.3: Matériel de l'essai sédimentométrique.

La figure II.4 montre que les courbes granulométriques de nos deux échantillons sont hors fuseau de spécification de Beni Abbas[1].

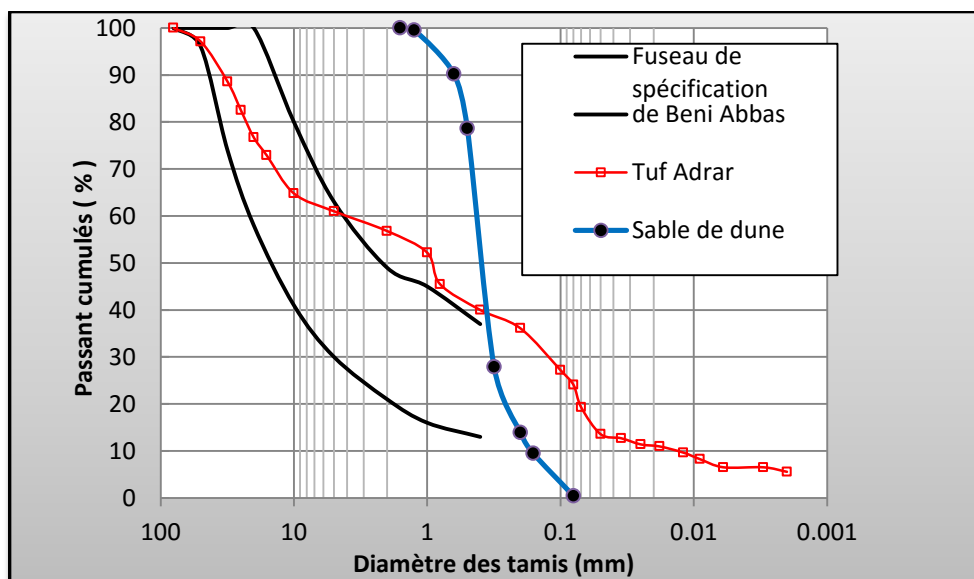


Figure II.5: Courbe granulométrique du sable de dunes et tuf de Berbaa.

II.3.3. Qualité des fines :

Les argiles ont toujours posé des problèmes aux ingénieurs qui s'occupent des assises de chaussées, leurs influences sont caractérisées par les essais au laboratoire qui sont :

- limites d'Atterberg ;
- l'équivalent de sable ;
- l'essai au bleu de méthylène

II.3.3.1. Les limites d'Atterberg: (NF P 94-058) :

❖ Principe [12]:

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 (10 à 15 cm). avec des diamètres comprises entre 3 et 2 mm.

❖ Appareillage :

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



Photo II.4: Appareil de Casagrande.

❖ 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.

❖ Etapes de l'essai :

A. Limite de liquidité:

- ✓ Mettre une quantité de l'échantillon dans la coupelle environ 3/4 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 se 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 et 35 coups, la limite de liquidité ω_L correspond à une teneur en eau tel que $N = 25$.

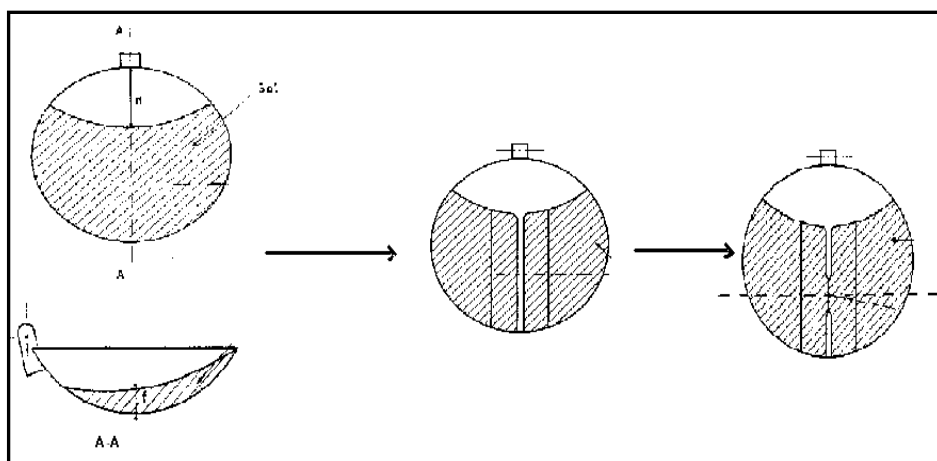


Figure. II.6: Etapes de l'essai de limite de liquidité

B. 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 :

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

Expression des résultats:

Le tableau II.4 résume les résultats de l'essai des limites d'Atterberg de tuf et sable de dunes:

Tableau II.4: Valeurs de Limites d'Atterberg du tuf et sable de dunes

Echantillon	W_L (%)	W_P (%)	I_P (%)
Tuf	28.0	18.30	9.85
Sable de dune	22.2	NM	NM

Les courbes résumant les résultats de l'essai des limites d'Atterberg de tuf et sable de dunes:

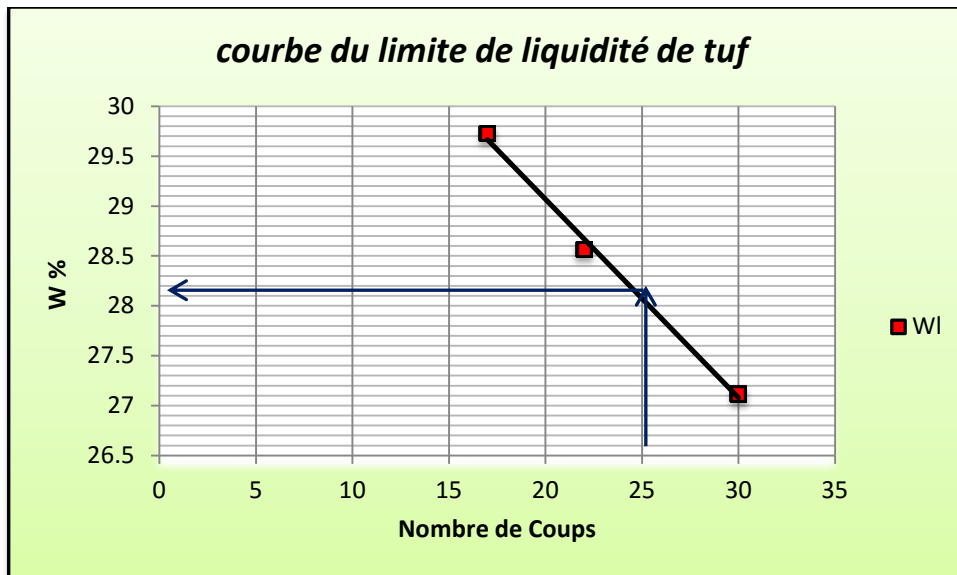


Figure II.7: Courbe de l'essai de limite de liquidité de tuf

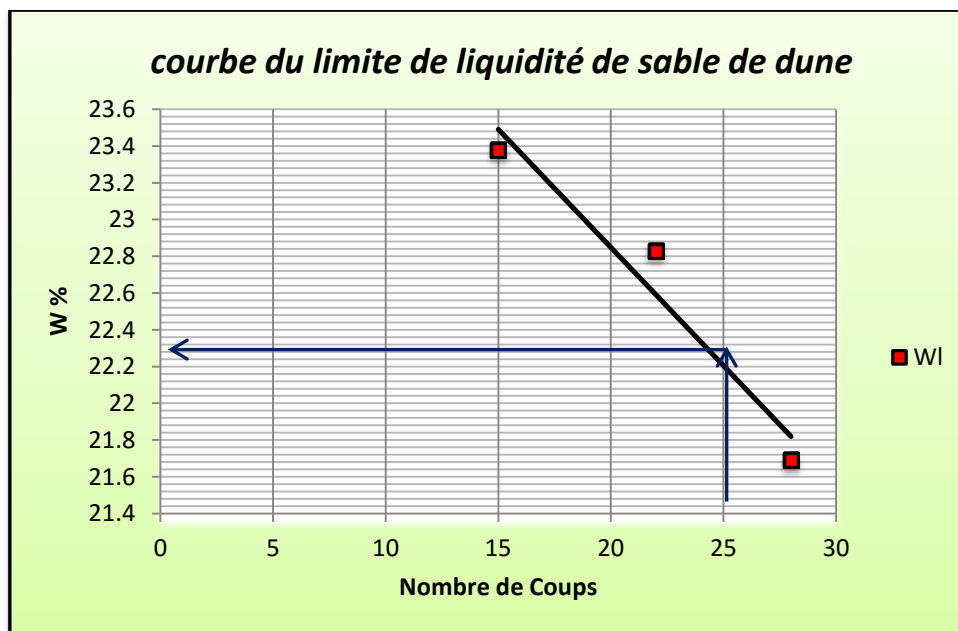


Figure II.8: Courbe de l'essai de limite de liquidité de sable de dunes

Les résultats des limites de consistance montrent que le tuf de Berbaa présente une certaine plasticité, ce qui coïncide avec les résultats de l'analyse granulométrique où nous avons vu que l'échantillon a un pourcentage des fractions inférieures à 80µm de 24.1 %. Cela n'est pas toujours vraie, c'est-à-dire un pourcentage remarquable des éléments inférieurs à 80 µm n'implique pas forcément la plasticité du matériau, puisque les fines peuvent être calcaires siliceuses, comme elles peuvent être limoneuses ou argileuses.

D'après ces résultats nous avons fait la classification géotechnique du tuf étudié selon le système de classification géotechnique *USCS* (Annexe I). Nous avons trouvé que l'échantillon se classe comme un **sable argileux peu plastique**.

II.3.3.2. L'équivalent de sable:

a-But de l'essai [16] :

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables entrant dans la composition des bétons. L'essai consiste à séparer les particules fines contenues dans le sol des éléments sableux plus grossiers. Une procédure normalisé permet de détermination un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

b- Principe de l'essai [16] :

L'essai est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier .Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'élément fins. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20minutes, on mesure les éléments suivants :

- ✚ **Hauteur h1** : sable propre +élément fins,
- ✚ **Hauteur h2** : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention, est :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \dots \dots \dots (II. 7)$$

Selon que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) ou ES_p(équivalent de sable au piston) .

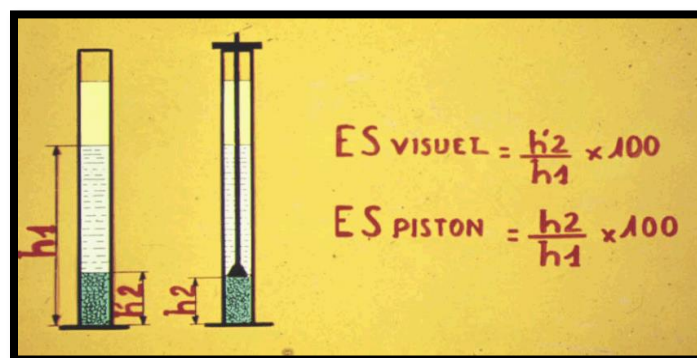


Figure II.9: Mesure de l'essai équivalent sable

Tableau II.5: Résultat d'équivalent de sable.

Echantillon	ES (%)
Sable de dunes	95.65
Tuf	18.79

Les résultats de l'équivalent de sable pour le sable de dune montrent que notre sable de dunes est très propre et il y'a absence totale d'éléments fins, par contre pour tuf la valeur de ES nous confirme que ce matériau est légèrement argileux.

Le tableau II.5 donne des valeurs de ES minimum pour la construction routière proposée par **Hreem** [1].

Tableau II.6: Spécification d'ES pour la construction des chaussées

Matériaux	ES Minimum
Graves pour couche de base	30
Agrégats pour route mixte	35
Agrégats pour enrobées denses	45
Agrégats pour béton bitumineux	55
Sable pour béton	80

II.3.3.3. Essai au bleu de Méthylène [13]:

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 [7].

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.

Chapitre II : Identification des matériaux utilisés

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 V_B est la quantité du bleu de méthylène adsorbée par le poids sec de la prise.

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

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 V_B et la granulométrie des fines permettent de déterminer le coefficient d'activité C_A .

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

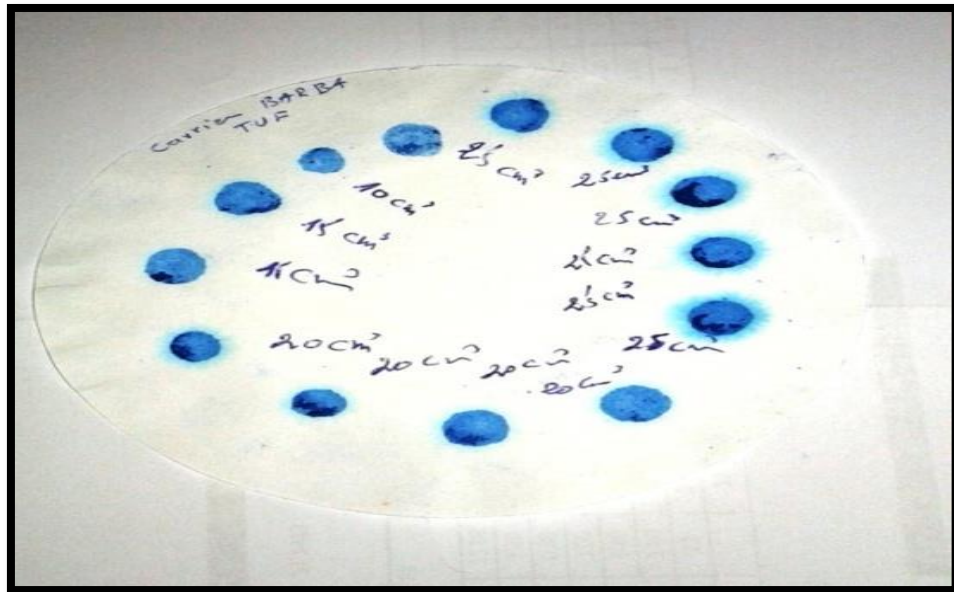


Photo II.5: Papier filtre de l'essai au bleu de méthylène du tuf(BERBAA).



Photo II.6: Papier filtre de l'essai au bleu de méthylène du sable de dunes (BOUDA)

Les tableaux II.7, II.8 représente les valeurs de bleu et les coefficients d'activité des échantillons Etudiés.

Tableau II.7: Valeurs des coefficients VB du tuf

Echantillons	VB(0/5)	VB(0/D)
Tuf	1	0.6..

Tableau II.8: Valeurs des coefficients VB du sable de dunes

Echantillons	VB(0/D)
Sable de dunes	0.2

D'après ces résultats, le tuf est classé comme un matériau faiblement argileux ($I_p < 12\%$) et légèrement pollué ($0,2 < VBS < 1$). Le sable de dune est un matériau propre insensible à l'eau ($VBS = 0,2$) (Colombier, 1988) il est effectué sur la fraction 0/2 mm du sol et on distingue les valeurs suivantes (D. Didier, 1999):

- ❖ $VBS < 0,2$: sols sableux (sol insensible à l'eau)
- ❖ $0,2 < VBS < 2,5$: sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau)
- ❖ $2,5 < VBS < 6$: sols limono-argileux, (sol de plasticité moyenne)

- ❖ $6 < VBS < 8$: sols argileux
- ❖ $8 < VBS$: sols très argileux.

II.4. Essai de compactage et de portance :

II.4.1. Essai Proctor Modifié :

❖ But de l'essai [14]:

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

❖ Principe de l'essai [15]:

Le principe de cet essai consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé.

❖ Matériel nécessaire [14]:

Moule CBR ; Dame Proctor Modifié; Règle à araser; Disque d'espacement Bacs d'homogénéisation pour préparation du matériau; spatule; Eprouvette graduée 150 ml environ; Petits récipients; Balance portée 20 kg, précision ± 5 g; Balance de portée 200 g, précision $\pm 0,1$ g; Etuve $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$; Burette à huile.



Photo II.7: Matériel nécessaire de Proctor Modifié

❖ Mode opératoire

- ✚ 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_1 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 1% d'eau par poids de l'échantillon (5,5 kg);

Expression des résultats :

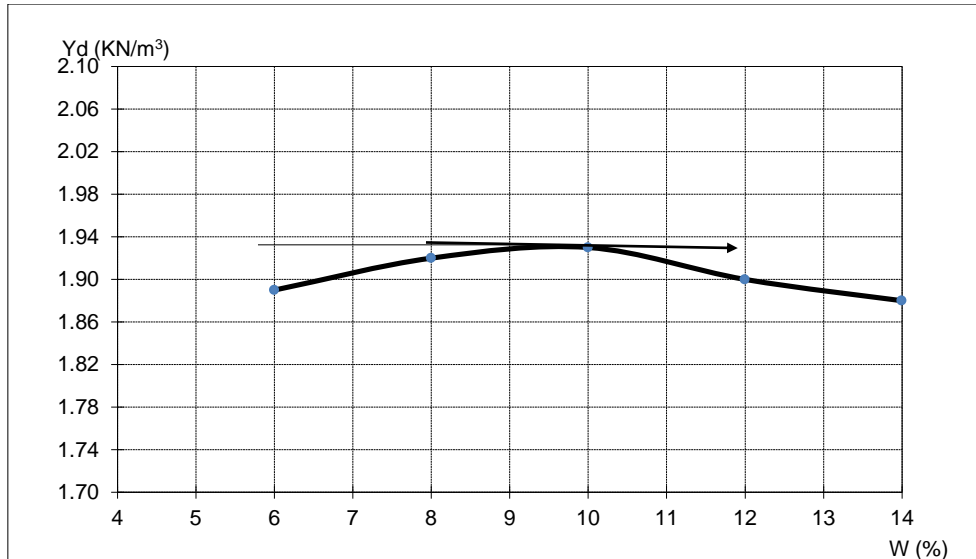


Figure II.10: Courbe de Proctor Modifié du tuf.

Le tableau II.10 donne les valeurs de la densité sèche maximale γ_{dmax} et la teneur en eau optimale obtenues à l'essai Proctor Modifié pour quelques matériaux de chaussées caractéristiques.

Tableau II.9: Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers [14].

Nature de matériaux	γ_d max (t / m ³)	Wopt (%)
Grave non traité	2.2	6
Grave ciment	2.25	6
Grave laitier	2.15	5
Sable ciment	1.9	6
Sable laitier	1.9	6

II.4.2. Essai CBR:

C'est un essai de poinçonnement d'une éprouvette de sol compacté suivant des conditions de densité et de teneur en eau fixées au préalable. Il s'exprime par un chiffre CBR proportionnel à la force appliquée sur un piston s'enfonçant de 2.5 ou 5 mm dans le sol.

La valeur CBR chute très vite lorsque la compacité du sol diminue, c'est un bon critère de portance d'un sol. l'indice Portant Immédiat (IPI) exprime la valeur de

l'indice CBR immédiat (sans surcharge ni immersion) , sur une éprouvette compacté à l'énergie Proctor Normal et a sa teneur en eau naturelle. (D. Didier, 1999).[4]



Photo. II.8: Presse CBR.[4]

Expression des résultats :

Le tableau II.10 nous renseigne sur les valeurs des caractéristiques à l'optimum Proctor modifié et la portance du sol.

Tableau II.10 : *Caractéristiques de compactage et de portance
(Tuf du Berbaa).*

Essai	Proctor Modifié		Portance	
	γ_{dmax} (t/m ³)	W _{opt} (%)	I CBR Immédiat	I CBR Imbibé
Tuf	1.93	10.7	88.82	34.2

Nous déterminons d'après les courbes qui représentent la force du piston en fonction de son enfoncement (figure II.11) l'indice CBR correspondant à 55 coups par couches.

Il est égal à: $\text{MAX}\{P(2.5) \times 100 / 13.35 ; P(5) \times 100 / 19.93\}$ où P(i) est la pression en KN correspondante à un enfoncement (i) en mm et les valeurs de 13.35 KN et 19.93

KN sont respectivement les forces provoquant l'enfoncement du piston de 2.5 mm et 5 mm sur le matériau conventionnel de référence.

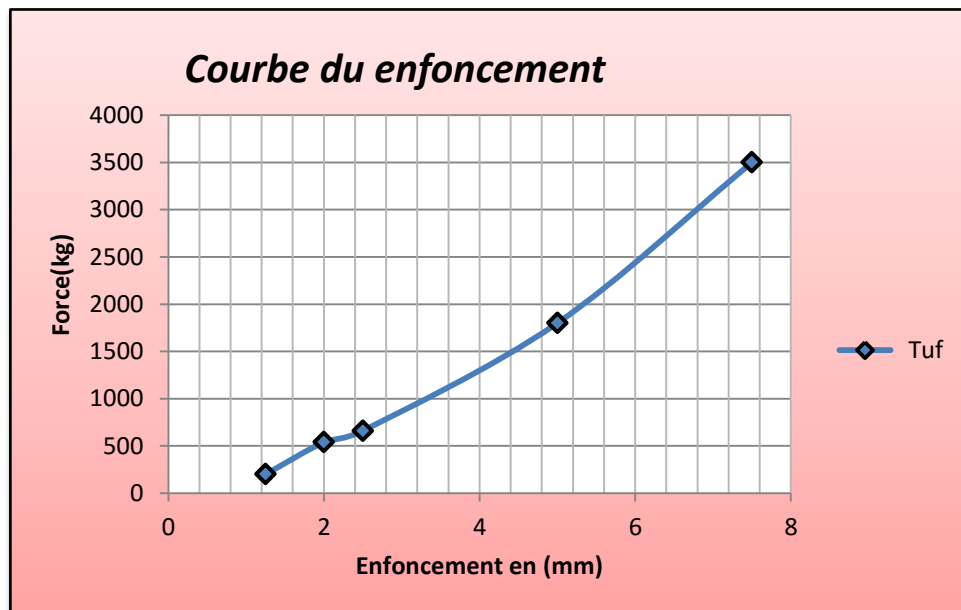


Figure II.11: Variation de la force du piston en fonction de son enfoncement (Tuf)

II.4.3. Essai los Angeles (résistance au choc NFP 18-573):

❖ But de l'essai [7]:

L'essai permet de déterminer la résistance aux impacts (choc de boulets d'acier sur les granulats) basé sur la mesure de la dégradation granulométrique des matériaux soumis aux chocs.

❖ Principe de l'essai [7]:

L'essai consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

❖ Equipement nécessaire [7]:

- Série des Tamis : 1.6 – 4 - 3.6 – 10 – 14
– 16 – 20 – 25 - 31.5 – 40 et 50mm

- ✚ Balance de précision $\pm 0.5g$
- ✚ Machine Los Angeles
- ✚ Etuve pour séchage.



Photo II.9: Machine de Los Angeles

$$L_A = (5000 - m/5000) \times 100 \dots \dots \dots (II.7)$$

Le tableau II.11 donne les valeurs du coefficient LA pour un classe granulaire de tuf étudiée. Nous constatons que le coefficient LA de tuf dépasse beaucoup les 40 généralement fixés par les spécifications de chaussées [1] (tableau II.11) et ceci pour les un classes granulaires étudiées.

Tableau II.11 : Valeurs des coefficients de Los Angeles

Classe granulaire(mm)	Nombre de boulets	Valeurs de LA (%)
10 – 25	11	66.08

Le tableau II.12 montre les différentes valeurs de LA utilisées soit dans les couches de fondation ou de base, en fonction du trafic des PL (Poids Lourds).

Tableau II.12: Spécification du coefficient L_A pour couches d'assises de chaussées [1].

Trafic PL (13 t/j)	Valeurs de L_A pour couches d'assises de chaussées	
	Fondation	Base
< 25	≤ 40	≤ 40
25 à 150	≤ 40	≤ 30
150 à 300	≤ 40	≤ 30
> 300	≤ 40	≤ 30

II.5. 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 < 5mm.
- Un échantillon représentatif doit être tamisé, passant à 05 mm est recueillir puis séché à l'étuve ;
- Après malaxage de l'échantillon on procéder ou 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 II.10: Echantillon et Moule de l'essai compression simple

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



Photo II.11: Compactage statique et démoulages des éprouvettes

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



Photo II.12: Conservations des éprouvettes à 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 1.27 mm/ min jusqu'à la rupture.



Photo II.13: 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 : R_C en Kg/cm^2 .

Le tableau II.13 représente les valeurs de la résistance à la compression des échantillons étudiés.

Tableau II.13 : Résultat de l'essai compression simple de tuf

	$R_c(kg/cm^2)$ après 3 jours à l'étuve (55°C)		
	c=100	c=98	c=95
Tuf	23.42	20.05	17.42

II.6. Classification GTR (Guide Technique Routier) du tuf [21] :

Tuf	Sable de dunes
$D_{max} \leq 50$	$D_{max} \leq 50$
passant à $80\mu\text{m} > 12\%$	passant à $80\mu\text{m} < 12\%$
VBS > 0.2	VBS = 0.2
ES ≤ 25	ES > 25
Passant à $2\text{mm} \leq 70\%$	Passant à $2\text{mm} > 70\%$
LA > 45	-

D'après les résultats obtenus lors d'essais d'identification, on a trouver que le matériaux (tuf et sable de dunes) étudié se classe selon la classification GTR en **B₅₂**(traitement avec liant hydraulique) du tuf et **B₁** du sables de dunes.

II.7. 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 :

- Le tuf à une courbe granulométrique étalée, située au-dessus du fuseau de Beni Abbas; C'est un matériau de nature friable (LA = 66.08%) et faiblement argileux (IP = 9.85). Il est classé selon le LCPC/USCS comme un sable argileux (SA/SC), et dans la classe B₅₂ Suivant la classification du guide technique routier GTR (LCPC, 1992).
- Le sable de dunes, a une classe granulaire de 0/2, avec une fraction fine (<80 μm) de l'ordre de 0.46 %. C'est un matériau propre (I p \approx 0) insensible à l'eau (VBS = 0,2). Sa courbe granulométrique est au-dessus du fuseau granulaire Beni Abbas. Il est classé comme un sable propre mal graduée (SL/SM) selon le LCPC/USCS.

CHAPITRE III :

Etude des mélanges: Tuf + Sable de dunes

III.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 sable de dune variant de 0 à 40 %, avec un pas de 10.

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 [3]:

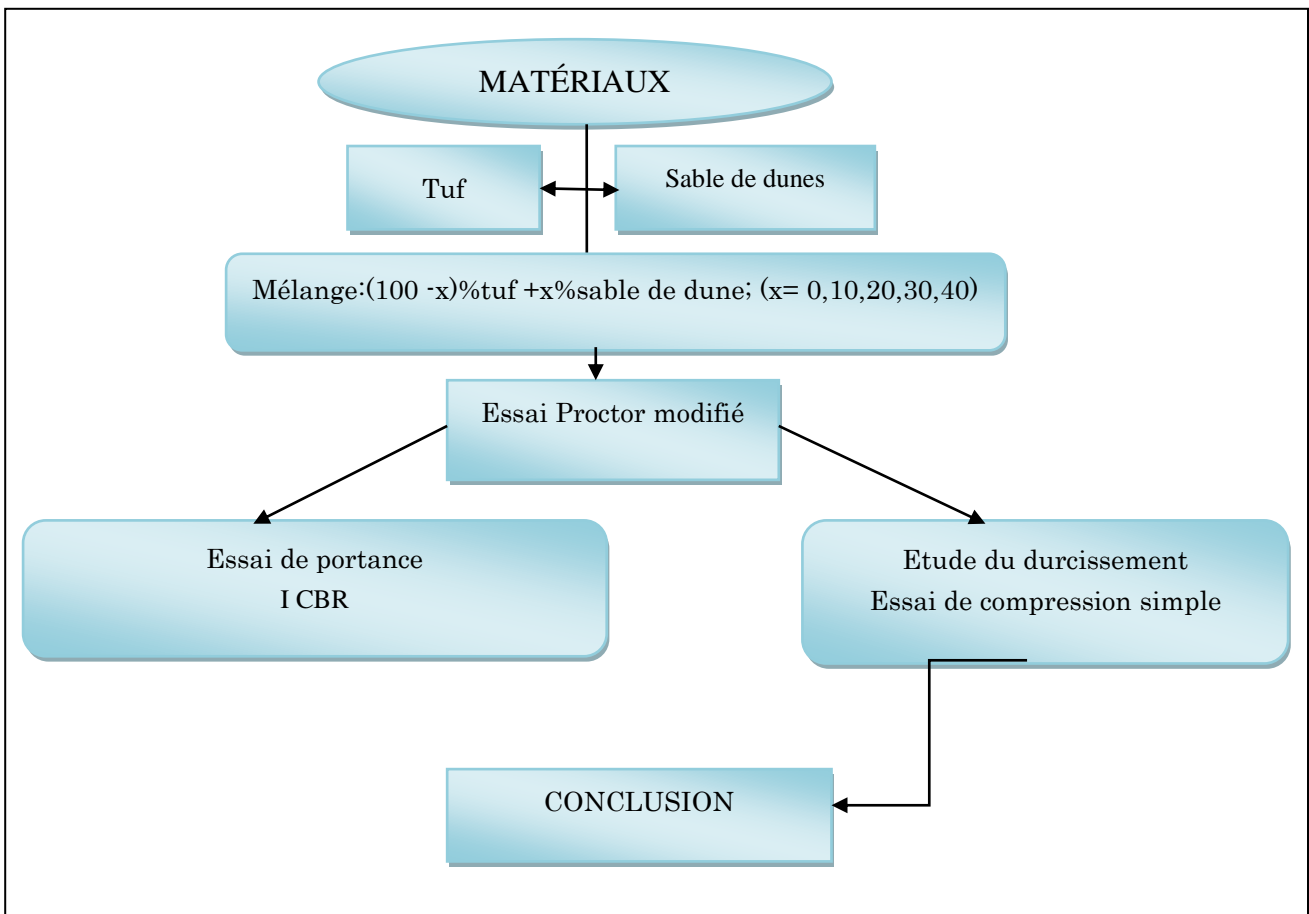


Figure III.1: Organigramme de recherche d'une formulation optimale[3].

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

III.2. Limites d'Atterberg des mélanges :

III.2.1. Mélange (90% tuf + 10% sable de dunes) :

III.2.1.1. Limite de liquidité :

Les résultats des essais sont représentés dans le tableau ci-dessous.

*Tableau. III.1 : Résultats de limite de liquidité
(90% tuf+10% du sable de dunes).*

Nombre de coupe	16		22		28	
N° Tare	O	YZ	1	AA	F	K.L
Masse humide [g]	7.70	6.90	7.60	7.10	11.50	12.10
Tare [g]	3.50	4.00	3.60	3.50	8.30	8.50
Masse sèche [g]	6.80	6.30	6.80	6.40	10.90	11.40
Masse l'eau [g]	0.90	0.60	0.80	0.70	0.60	0.70
Masse nette sèche [g]	3.30	2.30	3.20	2.90	2.60	2.90
Teneur en eau [%]	27.27	26.09	25.00	24.14	23.08	24.14
	26.68		24.57		23.61	

1. Graphe ($W_L = f(N)$) :

De la figure III.1 on peut connaître la valeur de la limite de liquidité pour $N=25$ coups, on a $W_L = 24.2$ %.

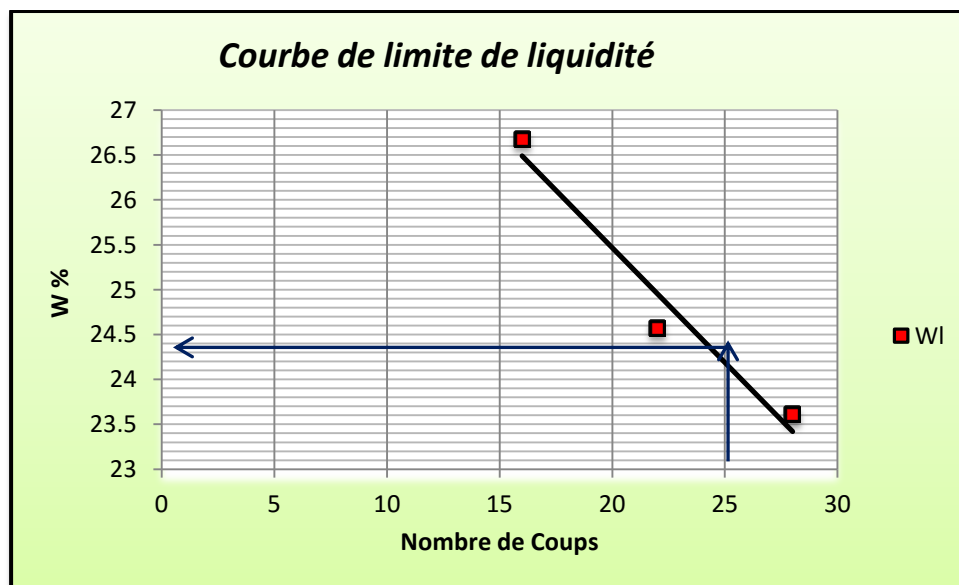


Figure III.2: Courbe de limite de liquidité (90% tuf + 10% du sable de dunes)

III.2.1.2. Limite de plasticité :

*Tableau. III.2 : Résultats de limite de plasticité
(90% tuf+10% du sable de dunes).*

N° Tare	D	AZ	C8	MI
Masse humide [g]	11.25	11.20	10.80	11.00
Tare [g]	9.10	9.30	8.80	8.80
Masse sèche [g]	10.90	10.90	10.50	10.70
Masse l'eau [g]	0.35	0.30	0.30	0.30
Masse du sol sèche [g]	1.80	1.60	1.70	1.90
Teneur en eau [%]	19.44	18.75	17.65	15.79
WP	17.91			

III.2.1.3. Indice de plasticité :

$$W_p = 17.91$$

$$I_p = W_L - W_p$$

$$I_p = 24.2 - 17.91 = 6.29$$

III.2.2. Mélange (80 % tuf+ 20% sable de dunes):

III.2.2.1. Limite de liquidité :

*Tableau. III.3 : Résultats de limite de liquidité
(80% tuf+20% du sable de dunes).*

	1 ^{er} essai		2 ^{ème} essai		3 ^{ème} essai	
Nombre de coupe	17		22		29	
N° Tare	58	U	R	I	OM	LI
Masse humide [g]	9.70	8.30	8.60	9.80	8.40	8.60
Tare [g]	4.10	3.90	4.10	3.90	3.70	3.90
Masse sèche [g]	8.60	7.50	7.80	8.70	7.60	7.80
Masse l'eau [g]	1.10	0.80	0.80	1.10	0.80	0.80
Masse nette sèche [g]	4.50	3.60	3.70	4.80	3.90	3.90
Teneur en eau [%]	24.44	22.22	21.62	22.92	20.51	20.51
	23.33		22.27		20.51	

2. Graphe :

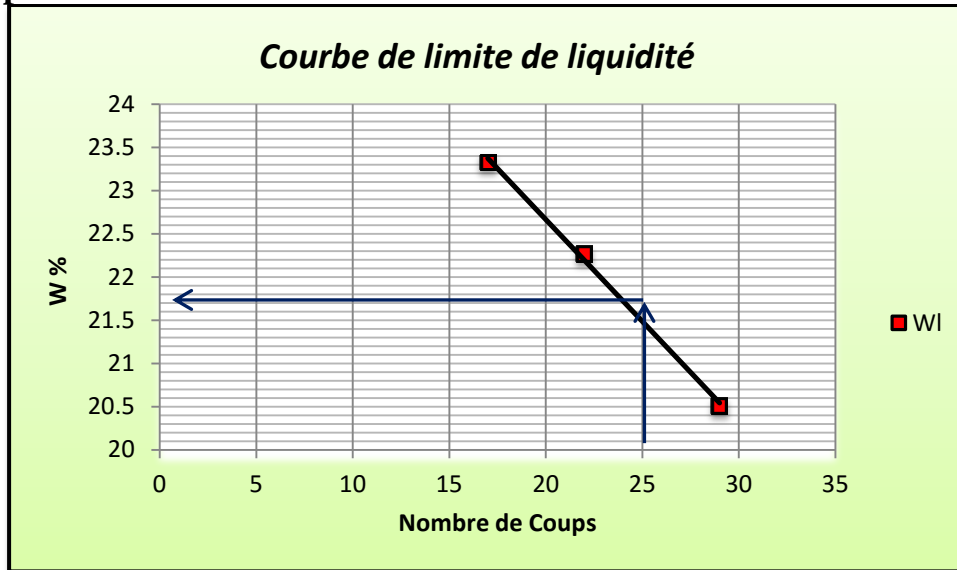


Figure III.3: Courbe de limite de liquidité (80% tuf +20% sable de dunes).

Ainsi pour 25 coups, on a $W_L = 21.6 \%$.

III.2.2 .2 Limite de plasticité :

Tableau. III.4 : Résultats de limite de plasticité
(80% tuf+20% du sable de dunes).

N° Tare	MI	V	AZ	D
Masse humide [g]	13.20	11.30	11.99	12.61
Tare [g]	8.90	8.90	9.40	9.20
Masse sèche [g]	12.70	11.00	11.50	12.20
Masse de l'eau [g]	0.50	0.30	0.49	0.41
Masse du sol sec [g]	3.80	2.10	2.10	3.00
Teneur en eau [%]	13.16	14.29	23.33	13.67
WP	16.11			

III.2.2.3. Indice de plasticité :

$$W_p = 16.11$$

$$I_p = W_L - W_p$$

$$I_p = 21.6 - 16.11 = 5.49$$

III.2.3. Mélange (70%tuf + 30% sable de dunes) :

III.2.3.1. Limite de liquidité:

Tableau. III.5 : Résultats de limite de liquidité

(70% tuf +30% du sable de dunes).

	1 ^{er} essai		2 ^{ème} essai		3 ^{ème} essai	
Nombre de coupe	18		22		30	
N° Tare	O	YZ	1	AA	F	KL
Masse humide [g]	7.90	7.70	9.50	9.20	12.70	14.00
Tare [g]	3.60	4.00	3.60	3.50	8.60	8.60
Masse sèche [g]	7.10	7.00	8.40	8.20	12.00	13.10
Masse l'eau [g]	0.80	0.70	1.10	1.00	0.70	0.90
Masse nette sèche [g]	3.50	3.00	4.80	4.70	3.40	4.50
Teneur en eau [%]	22.86	23.33	22.92	21.28	20.59	20.00
	23.10		22.10		20.29	

3. Graphe:

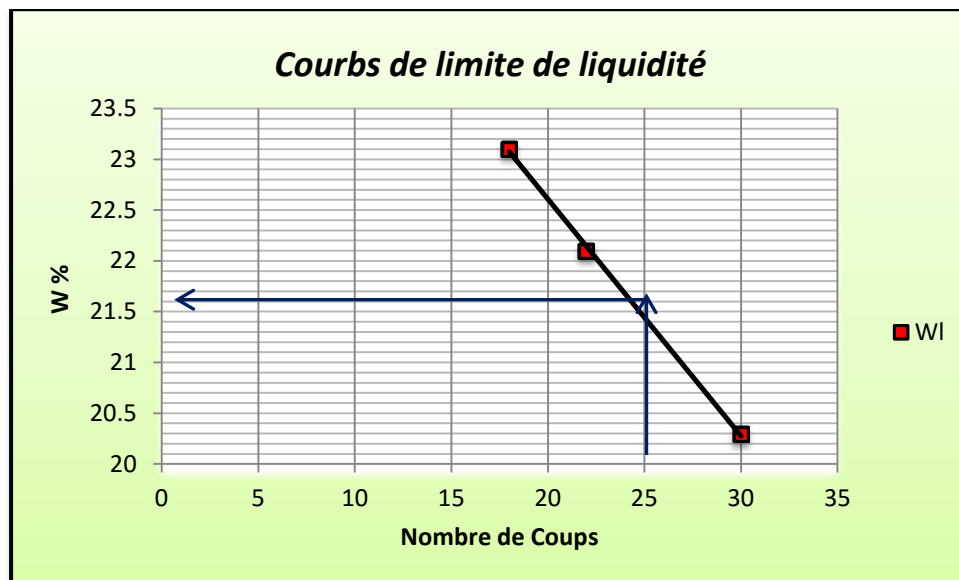


Figure III.4: Courbe de limite de liquidité. (70% tuf +30% sable de dunes).

Ainsi pour 25 coups, on a $W_L = 21.5\%$

III.2.3.2. Limite de plasticité:

*Tableau. III.6 : Résultats de limite de plasticité
(70% tuf+30% du sable de dunes).*

N° Tare	GH	55.00	C8	Y
Masse humide [g]	11.20	10.60	10.67	12.50
Tare [g]	8.80	9.30	8.80	9.20
Masse sèche [g]	10.89	10.40	10.40	12.09
Masse de l'eau [g]	0.31	0.20	0.27	0.41
Masse du sol sec [g]	2.09	1.10	1.60	2.89
Teneur en eau [%]	14.83	18.18	16.88	14.19
WP	16.02			

III.2.3.3. Indice de plasticité :

$$W_p = 16.02$$

$$I_p = W_L - W_p$$

$$I_p = 21.5 - 16.02 = 5.48$$

III.2.3. Mélange (60% tuf +40% sable de dunes):

III.2.4.1. Limite de liquidité:

*Tableau. III.7 : Résultats de limite de liquidité
(60% tuf +40% du sable de dunes).*

	1 ^{er} essai		2 ^{ème} essai		3 ^{ème} essai	
Nombre de coupe	16		21		27	
N° Tare	214	11	20X	FG	Z	OX
Masse humide [g]	9.30	7.80	7.30	7.60	7.80	8.40
Tare [g]	4.40	3.50	3.50	4.20	3.80	3.70
Masse sèche [g]	8.40	7.00	6.60	7.00	7.10	7.60
Masse l'eau [g]	0.90	0.80	0.70	0.60	0.70	0.80
Masse nette sèche [g]	4.00	3.50	3.10	2.80	3.30	3.90
Teneur en eau [%]	22.50	22.86	22.58	21.43	21.21	20.51
	22.68		22.00		20.86	

4. Graphe:

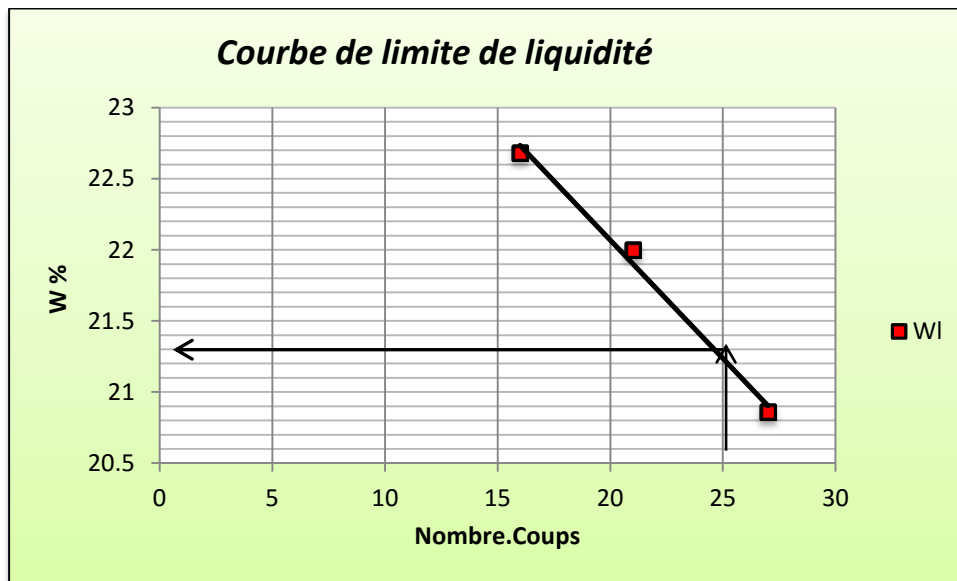


Figure III.5: Courbe de limite de liquidité (60% tuf+40% du sable de dunes).

Ainsi pour 25 coups, on a $W_L = 21.2 \%$

III.2.4.2. Limite de plasticité:

Tableau. III.8 : Résultats de limite de plasticité
(60% tuf+40% du sable de dunes).

N° Tare	I	58.00	R	11.00
Masse humide [g]	7.60	7.10	7.50	7.00
Tare [g]	3.90	3.80	4.00	4.10
Masse sèche [g]	7.20	6.60	7.10	6.50
de l'eau [g]	0.40	0.50	0.40	0.50
Masse du sol sèche [g]	3.30	2.80	3.10	2.40
Teneur en eau [%]	12.1	17.9	12.9	20.8
WP	15.9			

III.2.4.3. Indice de plasticité :

$$W_p = 15.9$$

$$I_p = W_L - W_p$$

$$I_p = 21.25 - 15.9 = 5.30$$

III.2.5. Influence de sable de dunes sur les limites d'Atterberg :

Tableau. III.9 : Influence de l'ajout de sable de dunes sur les limites d'Atterberg

% sable de dunes	W _l	W _p	I _p
0	28.00	18.30	9.70
10	24.20	17.91	6.29
20	21.60	16.11	5.49
30	21.50	16.02	5.48
40	21.20	15.90	5.30

La variation de sable de dunes sur les limites d'Atterberg est présentée sur la courbe suivante:

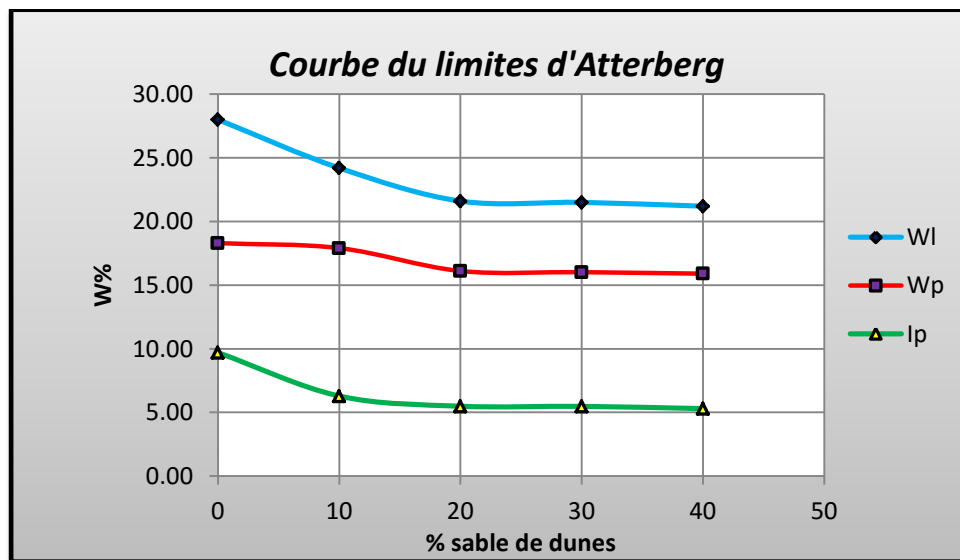


Figure III.6: Influence de l'ajout de sable de dunes sur les limites d'Atterberg

Les résultats du tableau III.9, montrent la diminution de la limite de liquidité et de plasticité en fonction de pourcentage de sable de dunes à ajouter, cela a engendré une diminution de l'indice de plasticité. Cette diminution continue est due à la substitution d'un pourcentage croissant de tuf riche en particules fines; par le sable de dunes qui présente une courbe granulométrique plus uniforme, avec des éléments fins moins importants.

III.3. Essai au Bleu de Méthylène:

III.3.1 Mélange:(100 -x)%tuf +x%sable de dune; (x= 0,10,20,30,40):

Le tableau III.10 représente les valeurs de bleu des différents mélanges à différents états(tuf/sable de dunes).

Tableau III.10: Valeurs de bleu des différents mélanges à différents états (tuf/sable de dunes).

% Sable de dunes	VBs
0	0.6.
10	0.55
20	0.4
30	0.3
40	0.25

La variation du bleu des différents mélanges à différents états (tuf/sable de dunes) est présentée par la courbe suivante:

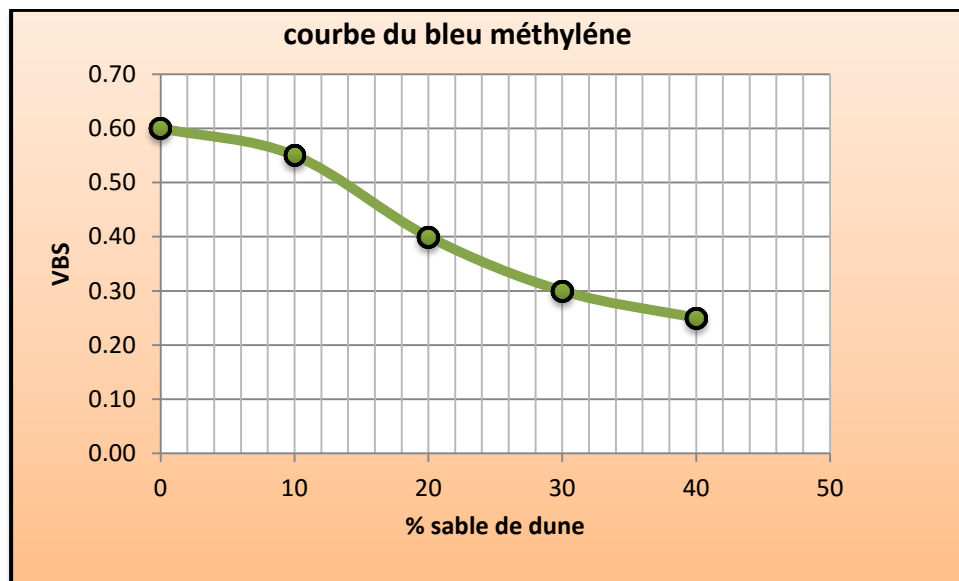


Figure III.7: Influence de l'ajout de sable de dunes sur la valeur du bleu

III.4. Essai Proctor modifié :

III.4.1. Tracé des courbes Proctor modifiés:

Les essais Proctor Modifié ont été faits selon la norme NFP94-093 pour les différents mélanges Tuf/Sable de dunes. 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 .

Chapitre III : Etude des mélanges: tuf + sable de dunes

Pour les différents mélanges, les résultats montrent que l'ajout de sable de dunes tend à améliorer les caractéristiques optimales de compactage des mélanges en comparaison à celles du tuf sans ajout.

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

- 90 % de tuf +10 % de sable de dunes;
- 80 % de tuf +20 % de sable de dunes;
- 70 % de tuf + 30 % de sable de dunes;
- 60 % de tuf +40 % de sable de dunes.

Les figures suivantes III.8, III.9, III.10et III.11 montrent la variation de la teneur en eau W en fonction du poids volumique sec γ_d .

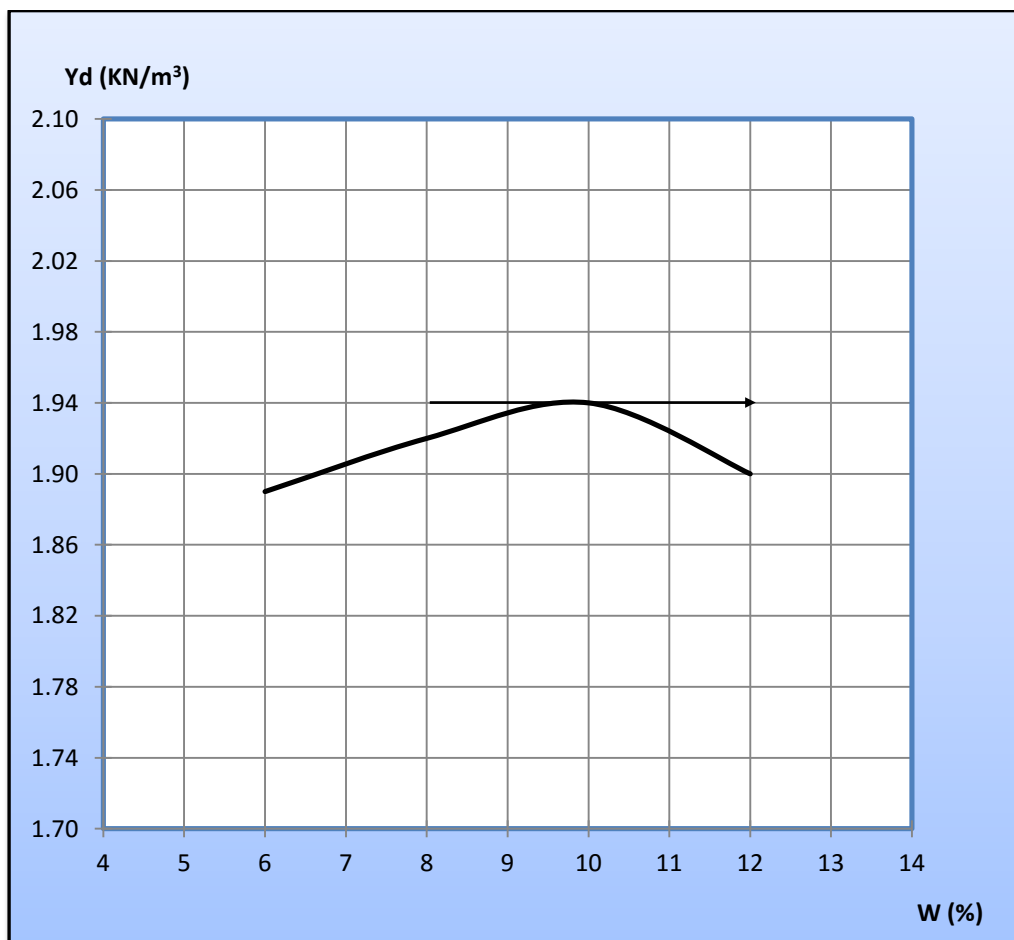


Figure III.8: Courbe Proctor Modifié (90 % de tuf +10 % de sable de dunes).

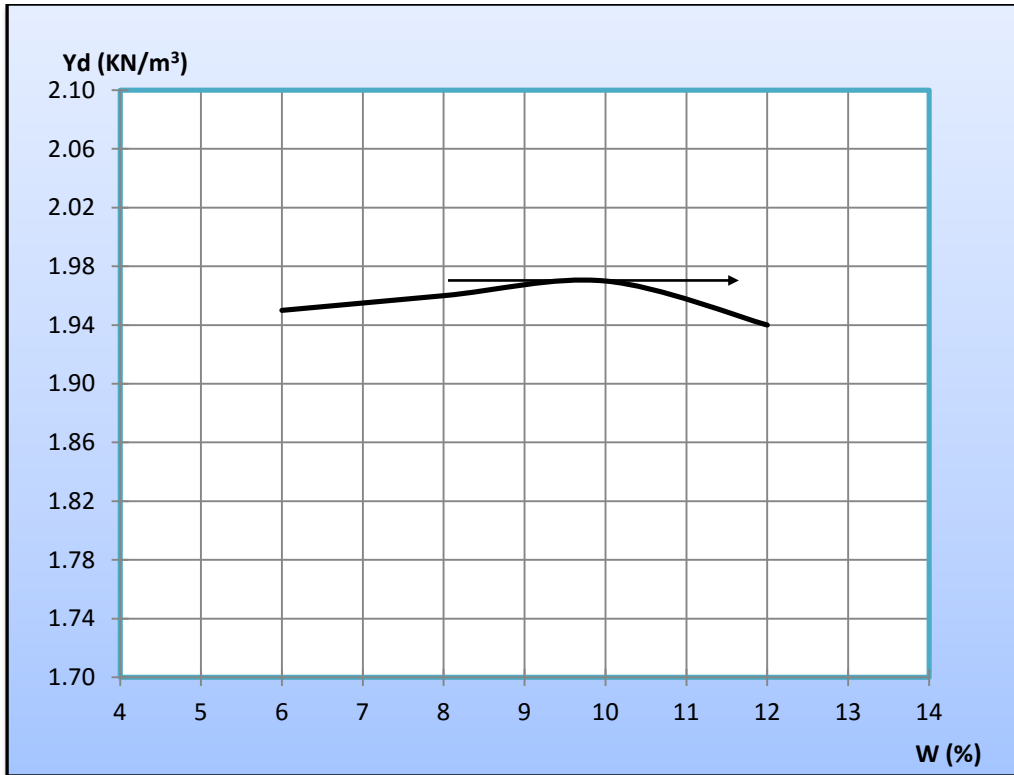


Figure III.9: Courbe Proctor Modifié (80% tuf + 20% sable de dunes).

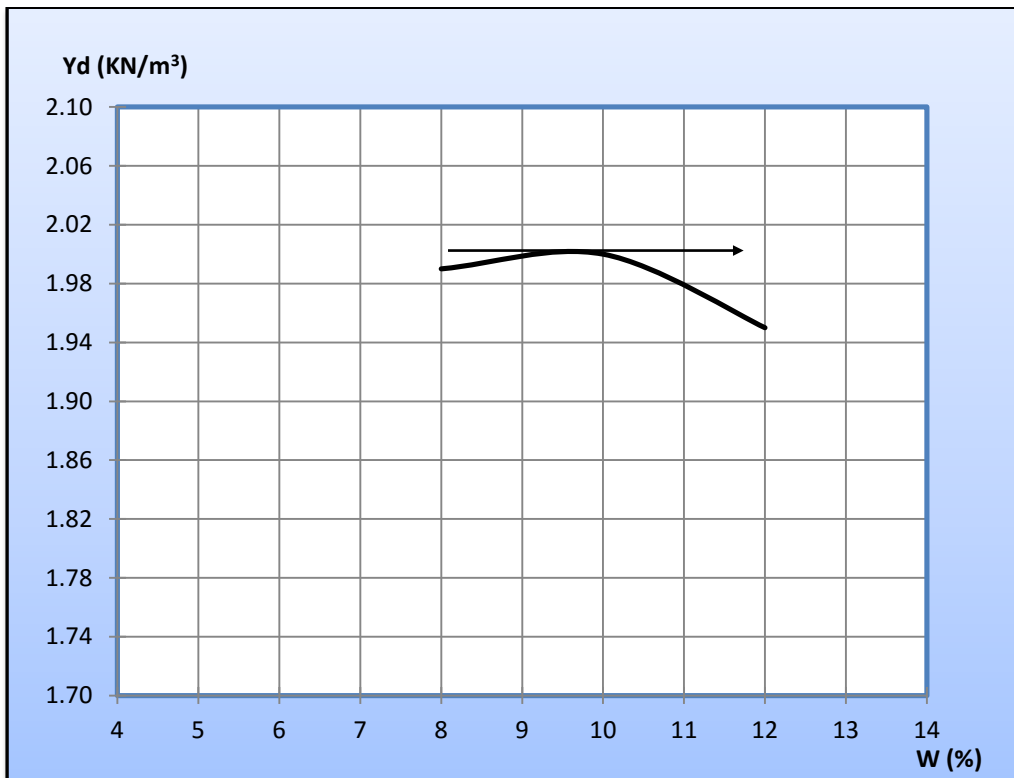


Figure III.10: Courbe Proctor Modifié (70% tuf + 30% sable de dunes).

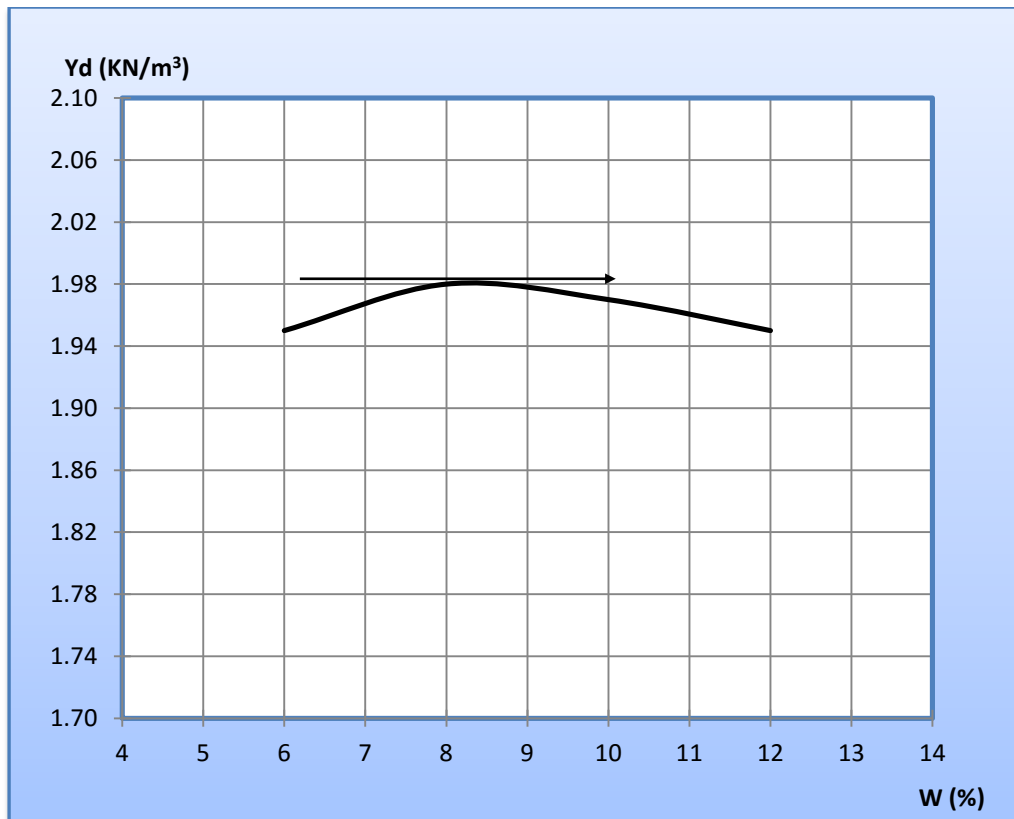


Figure III.11: Courbe Proctor Modifié (60% tuf + 40% sable de dunes).

III.4.2. Comparaison des résultats:

Les essais Proctor Modifié ont été faits selon la norme NFP94-093 pour les différents mélanges Tuf/Sable de dune. 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. III.11 : Influence de l'ajout de sable de dunes sur la densité sèche γ_{dmax} et la teneur en eau W_{opt}

	100 % Tuf	90 % Tuf + 10 % Sable des dunes	80 % Tuf + 20 % Sable des dunes	70 % Tuf + 30 % Sable des dunes	60 % Tuf + 40 % Sable des dunes
$\gamma_{dmax}(KN/m^3)$	1.93	1.94	1.97	2.00	1.98
$W_{opt} (%)$	10.7	10	9.9	9.8	7.7

La variation de la masse volumique sec γ_{dmax} et W_{opt} du tuf et tuf + un pourcentage de sable des dunes est présentée sur la courbe suivante:

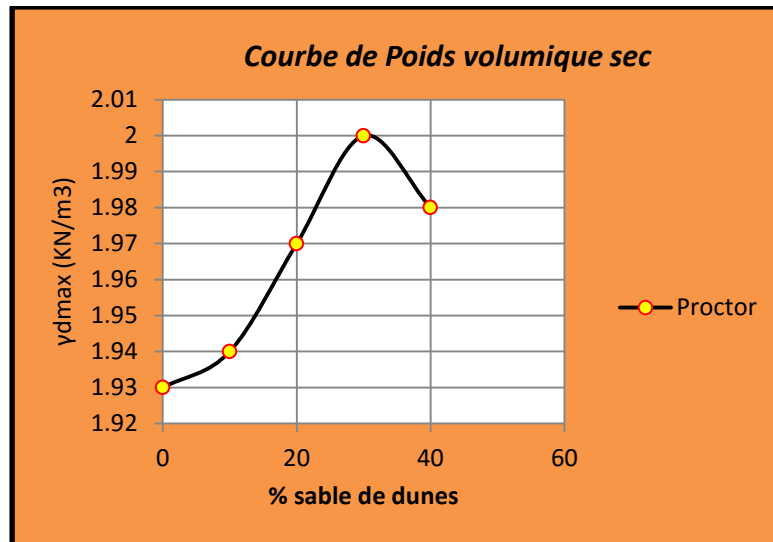


Figure III.12 : Variation de la densité sèche en fonction du pourcentage de sable de dunes.

On remarque que plus on augmente le pourcentage de sable des dunes la valeur du poids volumique sec à l'optimum augmente, par contre la teneur en eau optimale.

III.4.3. Tracé des courbes CBR:

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

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

- 90 % de tuf + 10 % de sable de dunes ;
- 80 % de tuf + 20 % de sable de dunes ;
- 70 % de tuf + 30 % de sable de dunes ;
- 60 % de tuf + 40 % de sable de dunes .

Les figures suivantes III.13;III.14, montrent la variation de la force de piston en fonction de son enfoncement.

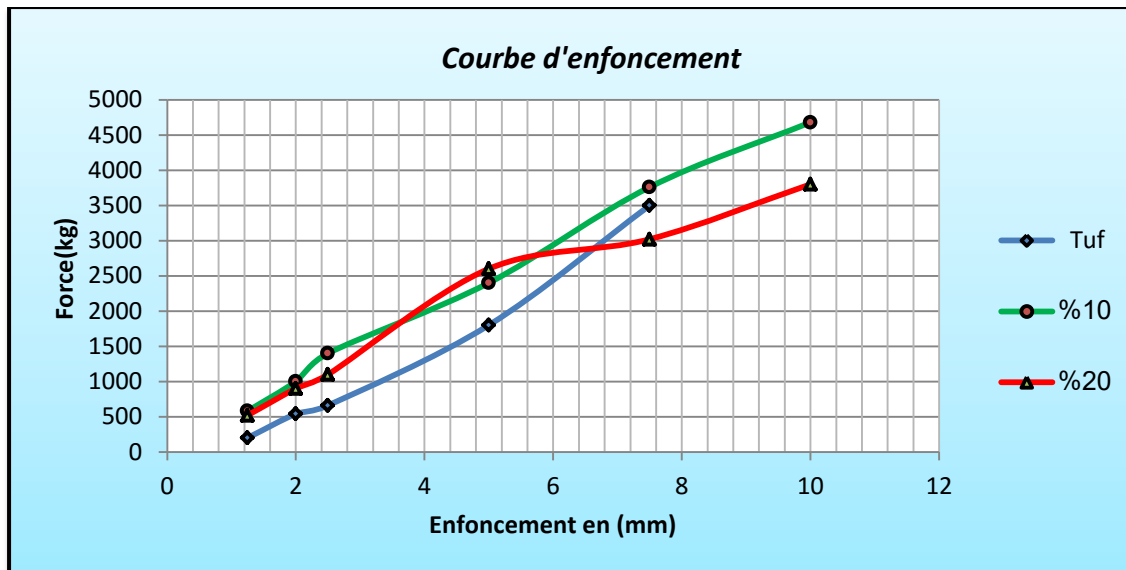


Figure III.13: Variation de la force du piston en fonction de son enfoncement (mélanges avec 10% et 20% du sable de dunes).

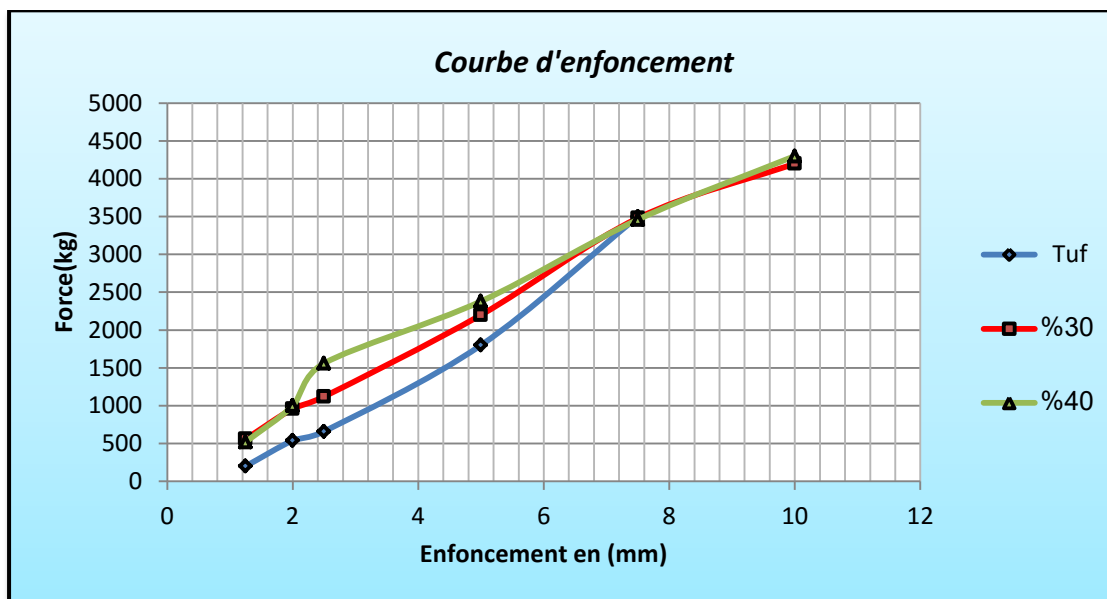


Figure III.14: Variation de la force du piston en fonction de son enfoncement (mélanges avec 30% et 40% du sable de dunes).

Les figures III.13;III.14 montre une augmentions de la force du piston relative au pourcentage du sable de dunes incorporé.

III.4.4. Influence sur l'indice CBR:

Les tableaux et la courbe suivants représentent les résultats de l'indice CBR des différents pourcentages de sable de dune (mélange tuf/sable de dunes).

Chapitre III : Etude des mélanges: tuf + sable de dunes

Tableau III.12 : Résultats de l'indice CBR (tuf seul).

Enfoncement en (mm)	Pression (kg/cm ²)	I CBR		
		Formule	I CBR	Valeur maximale
2.5	34.2	pression/0.70	48.85	88.82
5	93.3	pression/1.05	88.82	

Tableau III.13 : Résultats de l'indice CBR

(90% tuf +10% du sable de dunes).

Enfoncement en (mm)	Pression (kg/cm ²)	I CBR		
		Formule	I CBR	Valeur maximale
2.5	72.5	pression/0.70	103.63	118.43
5	124.4	pression/1.05	118.43	

Tableau III.14 : Résultats de l'indice CBR

(80% tuf +20% du sable de dunes).

Enfoncement en (mm)	Pression (kg/cm ²)	I CBR		
		Formule	I CBR	Valeur maximale
2.5	57.0	pression/0.70	81.42	128.30
5	134.7	pression/1.05	128.30	

Tableau III.15: Résultats de l'indice CBR

(70% tuf +30% du sable de dunes).

Enfoncement en (mm)	Pression (kg/cm ²)	I CBR		
		Formule	I CBR	Valeur maximale
2.5	58.0	pression/0.70	82.90	108.56
5	114.0	pression/1.05	108.56	

Chapitre III : Etude des mélanges: tuf + sable de dunes

Tableau III.16 : Résultats de l'indice CBR
(60% tuf +40% du sable de dunes).

Enfoncement en (mm)	Pression (kg/cm ²)	I CBR		
		Formule	I CBR	Valeur maximale
2.5	80.8	pression/0.70	115.47	117.44
5	123.3	pression/1.05	117.44	

La Figure III.14 rassemble les résultats de l'indice CBR, sous forme de courbes I CBR, pour les différents pourcentages de sable de dunes.

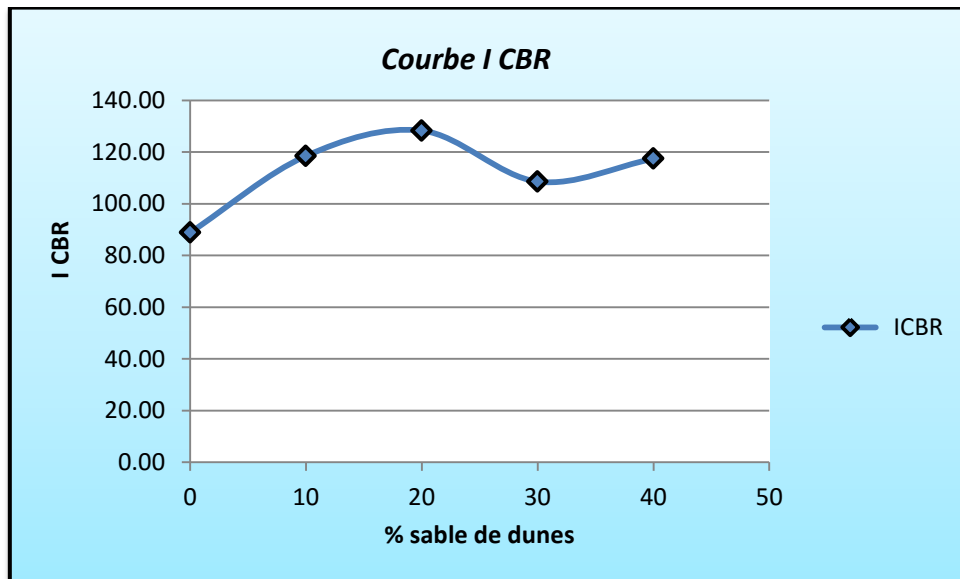


Figure III. 14 : Courbe de Variation de l'indice de portance du I CBR en fonction des différents pourcentages de sable de dunes

Les résultats de figure III.15 montrent que pour un pourcentage de sable de dunes, la Variation de l'indice de portance du I CBR augmente de façon très significative avec l'augmentation de sable de dunes jusqu'à 20%. Et diminue pour 30%.

III.5. Essai à la compression simple:

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

III.5.1 Influence sur la Résistance à la compression simple:

Le tableau III.17 résume les valeurs de résistance à la compression simple en fonction de la pourcentage du sable de dunes.

Tableau III.17 : Influence de l'ajout de sable de dunes sur à la compression simple.

% Sable de dunes	Résistance à la compression (kg/cm^2)		
	Compacité =100	Compacité =98	Compacité =95
0	23.42	20.05	17.42
10	22.85	19.99	16.85
20	16.28	14.28	12.85
30	13.42	10.57	9.71
40	10.28	9.71	8.85

La variation de mélange est présentée sur la courbe suivante :

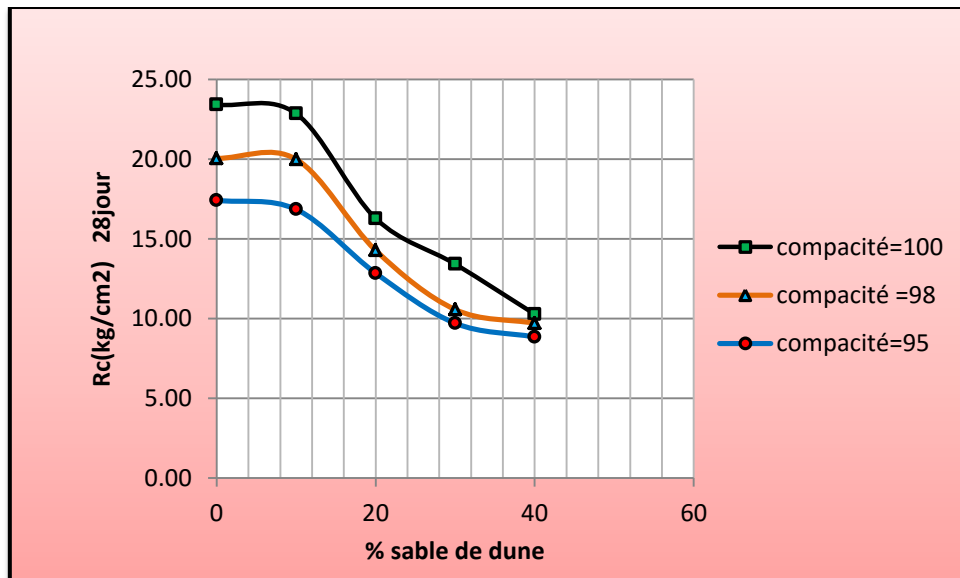


Figure III.16 : Variation de la résistance à la compression en fonction de pourcentage de sable de dunes

Les courbes de la figure III.16 qui reflètent de pourcentage de sable de dunes, la résistance à la compression diminue proportionnellement avec l'augmentation du pourcentage de sable de dunes, on remarque à 28 jours que ce mélange acquiert une résistance à la compression simple maximale de l'ordre de 23.42kg/cm^2

Chapitre III : Etude des mélanges: tuf + sable de dunes

correspondant à un gain de 0% (tuf). Les valeurs des résistances à la compression simple des mélanges de tuf + (10 à 40 %) de sable de dunes, sont diminuées jusqu'à 10.28 kg/cm^2 , pour la compacité 100. et la même remarque pour la compacité 98-95 ce qui explique l'efficacité du correcteur granulaire utilisé pour améliorer la compacité des mélanges.

III.6. Résumé de l'étude des mélanges: tuf + sable de dunes:

Le tableau III.18 récapitule les caractéristiques physico-mécaniques et des matériaux étudiés de la pourcentage du sable de dunes.

Tableau III.18 : Influence du Pourcentage de sable de dunes sur les propriétés physico-mécaniques..

% sable de dune	IP%	W% _{opt}	γ_{dmax} (t/m ³)	I CBR Immédiat	VBs	R _c (kg/cm ²) (c=100)
0	9.70	10.7	1.93	88.82	0.6	23.42
10	6.29	10	1.94	118.43	0.55	22.85
20	5.49	9.9	1.97	128.30	0.4	16.28
30	5.48	9.8	2.00	108.56	0.3	13.42
40	5.30	7.7	1.98	117.44	0.25	10.28

D'après le tableau III.18 qui présente les résultats obtenus, on remarque que les essais de compactage ont montré une nette amélioration 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 25% de sable de dunes. La résistance à la compression simple, seule caractéristique mécanique qui se voit diminuer avec l'ajout de sable, cela peut s'expliquer que la cohésion du sable est tellement faible voir même nulle, que les éléments fins du tuf n'arrivent pas à se coller aux grains de sable vu leur nature siliceuse. Ce point faible peut être résolu par un éventuel traitement avec de la chaux ou du ciment.

III.7. Conclusion :

Les essais de compactage Proctor modifié effectués sur des mélanges de tuf et de sable des dunes qui ont été présentés, avaient d'abord pour but de montrer l'intérêt d'une présentation de l'effet d'ajout de sable de dunes au matériau local le tuf, fréquemment utilisés en construction routière dans la région d'Adrar. Cette présentation permet de suivre l'évolution des caractéristiques des mélanges compactés, notamment le poids volumique sec et la teneur en eau optimale.

En comparant les paramètres de l'optimum Proctor sur les mélanges de tuf et de sable des dunes, il est fortement conseillé d'utiliser le sable des dunes car il influence considérablement sur l'augmentation de la valeur de γ_{dmax} .

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 du sable de dune dans les matériaux routiers dans les opérations de compactage.

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

Lorsqu'ils sont utilisés en assises de chaussées, ils présentent un comportement de tuf et mélange tuf-sable de dunes bien meilleur. Ce qui laisseraient 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 faible. Lors que le sable de dunes faible le cohésion entre les gains. Je constate; Comme solution qu'on le traite avec le ciment ou le chaux.

L'incorporation du sable de dune dans les matériaux routiers et dans les opérations de compactage sont 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.

Annexes

ANNEXE

ANNEXE I

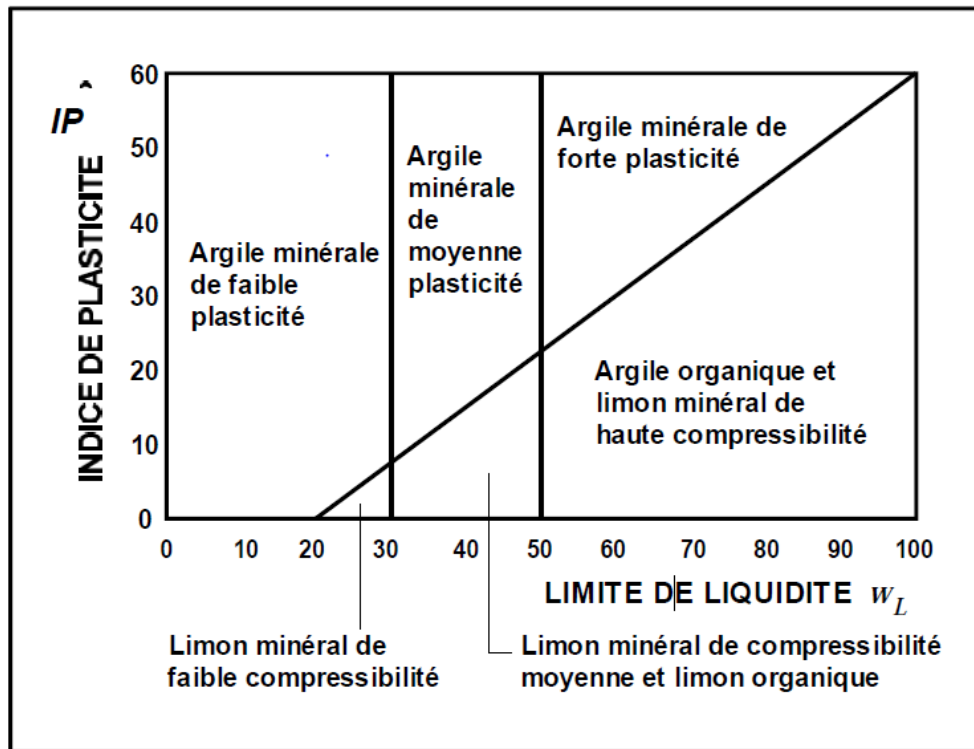
Classification USCS/LCPC des sols

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	

ANNEXE

Détermination des limites de consistance sur la fraction < 0,42 mm

> 80 μm
SOLS FINS



Les déterminations dépendent du point sur le diagramme:
Argile au-dessus de la ligne A, limon au-dessous de la ligne A;
Peu plastique si $w_L < 50$; très plastique si $w_L > 50$.
Les sols organiques O ont plus de 10% de matières organiques.

ANNEXE

ANNEXE II

résultats du sable de dune et tuf

Les tableaux:

Essai la masse volumique apparente et absolue

	Sable		Tuf	
	Apparente (g/l)	Absolue (g/l)	Apparente (g/l)	Absolue (g/l)
M1(g)	3505.1	1662.5	3291.2	1662.5
M2(g)	3488.2	500	3292.6	500
M3(g)	3439.1	1974	3314.3	1956
M(moy)	3477.47		3299.37	
$\rho_{app};\rho_{ab}$	1539.07	2.65	1360.97	2.42

Essai analyse granulométrique: sable(1000g)

Taims	Refus par (g)	Refus (%)	Refus cumulés (%)	Refus cumulés (%)
2	0	0	0	100
1.6	0	0	0	100
1.25	4.5	0.45	0.45	99.55
0.63	93.1	9.31	9.76	90.24
0.5	116.1	11.61	21.37	78.63
0.315	507.5	50.75	72.12	27.88
0.2	139.5	13.95	86.07	13.93
0.16	44.4	4.44	90.51	9.49
0.08	90.3	9.03	99.54	0.46
fond	3.4	0.34	99.88	0.12
Totale	998.8			

ANNEXE

Essai sédimentométrie: tuf

fuseau de Beni Abbas		
Φ (mm)	Min	Max
80	100	100
50	100	96
31.5	100	74
20	100	58
10	80	41
5	63	30
2	49	21
1	45	16
0.4	37	13
0.2	30	11
0.1	20	10

Temps	Lecture densiètre	Temperature °C	Correction densite	Densite réelle	Dianétre équivalente(mm)	Tamisats
0.5s	14	20	2.6	16.6	0.08	19.3
1min	13	20	2.6	15.6	0.075	13.572
2min	12	20	2.6	14.6	0.053	12.702
5min	10.5	20	2.6	13.1	0.039	11.397
10min	10	20	2.6	12.6	0.026	10.962
20min	8.5	20	2.6	11.1	0.018	9.657
40min	7	19	2.5	9.5	0.009	8.265
1h	5	19	2.5	7.5	0.006	6.525
4h	5	18	2.5	7.5	0.003	6.525
24h	4	18	2.4	6.4	0.001	5.568

Essai equivalent de sable

	Sable de dune	Tuf
h1(cm)	9.2	33
h2(cm)	8.5	5.9
h'2(cm)	8.8	6.2
ES	95.65	18.79

ANNEXE

Essai limites d'atterberg

Limite de liquidité de tuf

Nombre de coupe	17		22		30	
N° Tare	OX	FG	11	20X	214	Z
Masse humide [g]	7.70	7.20	8.00	8.00	8.70	8.40
Tare [g]	3.70	4.20	3.50	3.50	4.40	3.80
Masse sèche [g]	6.80	6.50	7.00	7.00	7.80	7.40
Masse l'eau [g]	0.90	0.70	1.00	1.00	0.90	1.00
Masse nette sèche [g]	3.10	2.30	3.50	3.50	3.40	3.60
Teneur en eau [%]	29.03	30.43	28.57	28.57	26.47	27.78
	29.73		28.57		27.12	

limite de plasticité de tuf

N° Tare	Y	55	V	GH
Masse humide [g]	12.50	11.40	11.60	11.40
Tare [g]	9.20	9.30	8.40	9.20
Masse sèche [g]	11.90	11.10	11.10	11.10
Poids de l'eau [g]	0.60	0.30	0.50	0.30
Poids du sol seche [g]	2.70	1.80	2.70	1.90
Teneur en eau [%]	22.22	16.67	18.52	15.79
WP	18.30			

ANNEXE

limite de liquidité de sable de dune

Nombre de coupe	15		22		28	
N° Tare	I	U	ox	1	LT	OM
Masse humide [g]	8.30	6.90	7.50	8.20	6.40	9.60
Tare [g]	3.60	3.70	3.70	3.40	3.80	4.10
Masse sèche [g]	7.40	6.30	6.80	7.30	5.90	8.70
Masse sèche [g]	0.90	0.60	0.70	0.90	0.50	0.90
Masse nette sèche [g]	3.80	2.60	3.10	3.90	2.10	4.60
Teneur en eau [%]	23.68	23.08	22.58	23.08	23.81	19.57
	23.38		22.83		21.69	

ANNEXE

Essai Proctor(tuf)

	8%		10%		12%	
Masse humide Total [g]	15025		15140		15158	
Masse de moule vide [g]	10265		10265		10265	
Masse sèche [g]	4760		4875		4893	
Voleme de Moule [Cm ³]	2295					
denste humid [g]	2.07		2.12		2.13	
Denste seche [g]	1.92		1.93		1.90	
N° de Tare	F	C2	8	TL	X	G
Masse humide [g]	78.1	62.7	60.7	49.7	64.7	61.2
Masse sèche [g]	74.5	59.3	56.4	47.1	59.7	56.9
Tare [g]	31.8	21.2	20.7	19.4	20	21.1
Masse l'eau [g]	3.6	3.4	4.3	2.6	5	4.3
Masse nette sèche [g]	42.7	38.1	35.7	27.7	39.7	35.8
Teneur en eau Reel [%]	8.4	8.9	12.0	9.4	12.6	12.0
Teneur en eau Reel [%]	8.7		10.7		12.3	
Denste seche [g]	1.91		1.93		1.90	

Essai CBR tuf

Enfoncement en (mm)	Valeur comparateur	Forse en (kg)	Surface en (cm ²)	Pression (kg/cm ²)
1.25	10	200	19.3	10.36
2	27	540	19.3	27.98
2.5	33	660	19.3	34.20
5	90	1800	19.3	93.26
7.5	175	3500	19.3	181.35
10	231	4620	19.3	239.38

ANNEXE

Essai los angeles: tuf

	Nbr de boulet	Poids initial (g)	Poids final (g)	P1-P2 (g)	LA=P1-P2/p1*100
10---25	11	5000	1695.6	3304.4	66.088

Essai au Bleu de Méthylène :Tuf et sable

essai	Tuf	Tuf 90% +10% Sable	Tuf80% +20% Sable	Tuf70% +30% Sable	Tuf60% +40% Sable	Sable
Masse (g)	25	25	25	25	25	25
Volume (cm3)	25	20	20	15	15	5
VBS	1	0.8	0.8	0.6	0.6	0.2



مخبر الأشغال العمومية في جنوب البلاد
LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

DEPARTEMENT LABORATOIRE
SERVICE MATERIAUX

MODE OPERATOIRE SIMPLIFIE

ESSAIS MESURE DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE

ESSAIS :COMPRESSION SIMPLE mode opératoire lcpc /MODE OPERATOIRE ETABLIS PAR ALLOUL

ANNEXE

ANNEXE III

résultats de mélange du sable de dune et tuf

Les tableaux:

Essai de compression: 90%tuf+10%sable de dune

	6%		8%		10%		12%	
Masse humide Total [g]	14873		15030		15169		15158	
Masse de moule vide [g]	10265		10265		10265		10265	
Masse sèche [g]	4608		4765		4904		4893	
Volume de Moule [Cm ³]	2295							
denste humid [g]	2.01		2.08		2.14		2.13	
Denste seche [g]	1.89		1.92		1.94		1.90	
N° de Tare	F17	282	F	C2	8	TL	X	G
Masse humide [g]	76.1	69.7	78.1	62.7	60.5	49.8	64.7	61.2
Masse sèche [g]	73.5	68	74.5	59.3	56.8	47.1	59.7	56.9
Tare [g]	31.6	38	31.8	21.2	20.7	19.4	20	21.1
Masse l'eau [g]	2.6	1.7	3.6	3.4	3.7	2.7	5	4.3
Masse nette sèche [g]	41.9	30	42.7	38.1	36.1	27.7	39.7	35.8
Teneur en eau Reel [%]	6.2	5.7	8.4	8.9	10.2	9.7	12.6	12.0
Teneur en eau Reel [%]	5.9		8.7		10.0		12.3	
Denste seche [g]	1.90		1.91		1.94		1.89	

ANNEXE

80%tuf+20%sable de dune

	6%		8%		10%		12%	
Masse humide Total [g]	15016		15125		15234		15240	
Masse de moule vide [g]	10265		10265		10265		10265	
Masse sèche [g]	4751		4860		4969		4975	
Voleme de Moule [Cm ³]	2295							
denste humid [g]	2.07		2.12		2.17		2.17	
Denste seche [g]	1.95		1.96		1.97		1.94	
N° de Tare	F17	282	26	H	83	66A	83	66A
Masse humide [g]	82.6	85.3	84	90.5	83	67.7	76	81
Masse sèche [g]	79.3	82.4	80.5	86.1	78.7	64.1	71.8	76.8
Tare [g]	31.6	38.2	38.3	37.2	5	38.3	37.9	38.4
Masse l'eau [g]	3.3	2.9	3.5	4.4	4.3	3.6	4.2	4.2
Masse nette sèche [g]	47.7	44.2	42.2	48.9	73.7	25.8	33.9	38.4
Teneur en eau Reel [%]	6.9	6.6	8.3	9.0	5.8	14.0	12.4	10.9
Teneur en eau Reel [%]	6.7		8.6		9.9		11.7	
Denste seche [g]	1.94		1.95		1.97		1.94	

ANNEXE

70%tuf+30%sable de dune

	8%		10%		12%	
Masse humide Total [g]	15188		15312		15270	
Masse de moule vide [g]	10265		10265		10265	
Masse sèche [g]	4923		5047		5005	
Voleme de Moule Cm3	2295					
denste humid [g]	2.15		2.20		2.18	
Denste seche [g]	1.99		2.00		1.95	
N° de Tare	F	C2	8	TL	C8	B7
Masse humide [g]	59.9	74.6	57.6	56.8	54.9	53.3
Masse sèche [g]	57.2	70.5	54.4	53.5	51.4	49.8
Tare [g]	21	21	21	20.8	21.6	21
Masse l'eau [g]	2.7	4.1	3.2	3.3	3.5	3.5
Masse nette sèche [g]	36.2	49.5	33.4	32.7	29.8	28.8
Teneur en eau Reel [%]	7.5	8.3	9.6	10.1	11.7	12.2
Teneur en eau Reel [%]	7.9		9.8		11.9	
Denste seche [g]	1.99		2.00		1.95	

ANNEXE

60%tuf+40%sable de dune

	6%		8%		10%		12%	
Masse humide Total [g]	14997		15167		15247		15267	
Masse de moule vide [g]	10265		10265		10265		10265	
Masse sèche [g]	4732		4902		4982		5002	
Voleme de Moule [Cm ³]	2295							
denste humid [g]	2.06		2.14		2.17		2.18	
Denste seche [g]	1.95		1.98		1.97		1.95	
N° de Tare	F17	282	G	TLE	B6	C7	K	C6
Masse humide [g]	76.1	69.7	57	58.7	47.6	53.7	70.1	66.6
Masse sèche [g]	73.6	68	54.4	55.9	45.1	50.4	65	61.7
Tare [g]	31.6	38	21.1	19.4	21	20.8	20.7	20.9
Masse l'eau [g]	2.5	1.7	2.6	2.8	2.5	3.3	5.1	4.9
Masse nette sèche [g]	42	30	33.3	36.5	24.1	29.6	44.3	40.8
Teneur en eau Reel [%]	6.0	5.7	7.8	7.7	10.4	11.1	11.5	12.0
Teneur en eau Reel [%]	5.8		7.7		10.8		11.8	
Denste seche [g]	1.95		1.98		1.96		1.95	

Essai CBR: 90%tuf+10%sable de dune

Enfoncement en (mm)	Valeur comparateur	Forse en (kg)	Surface en (cm ²)	Pression (kg/cm ²)
1.25	29	580	19.3	30.05
2	50	1000	19.3	51.81
2.5	70	1400	19.3	72.54
5	120	2400	19.3	124.35
7.5	188	3760	19.3	194.82
10	234	4680	19.3	242.49

ANNEXE

80%tuf+20%sable de dune

Enfoncement en (mm)	Valeur comparateur	Forse en (kg)	Surface en (cm ²)	Pression (kg/cm ²)
1.25	26	520	19.3	26.94
2	45	900	19.3	46.63
2.5	55	1100	19.3	56.99
5	130	2600	19.3	134.72
7.5	151	3020	19.3	156.48
10	190	3800	19.3	196.89

70%tuf+30%sable de dune

Enfoncement en (mm)	Valeur comparateur	Forse en (kg)	Surface en (cm ²)	Pression (kg/cm ²)
1.25	28	560	19.3	29.02
2	48	960	19.3	49.74
2.5	56	1120	19.3	58.03
5	110	2200	19.3	113.99
7.5	174	3480	19.3	180.31
10	210	4200	19.3	217.62

60%tuf+40%sable de dune

Enfoncement en (mm)	Valeur comparateur	Forse en (kg)	Surface en (cm ²)	Pression (kg/cm ²)
1.25	26	520	19.3	26.94
2	50	1000	19.3	51.81
2.5	78	1560	19.3	80.83
5	119	2380	19.3	123.32
7.5	173	3460	19.3	179.27
10	215	4300	19.3	222.80

ANNEXE

Essai de compression simple: tuf

$\rho_{\max}(\text{t/m}^3)$	1.93
W_{opt}	10.7

Compacité	Densité	Poids du sol sec(g/cm^3)	Poids de l'eau(g/cm^3)	Poids du sol humide(g/cm^3)
100	1.93	378.76	40.53	419.29
98	1.89	371.19	39.72	410.90
95	1.83	359.82	38.50	398.33

N d'éprouvette	Compacité	Poids réel après le compactage	P réel l'écrasement	Teneur en eau	D(ϕ) éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité l'écrasement	Compacité	Lecteur	R (kg/cm^3)	R _c _{moy}
A	100	416.10	378.60	9.90	5.00	10.00	196.25	1.93	99.96	20.10	22.96	23.42
B	100	414.10	376.10	10.10	5.00	10.00	196.25	1.92	99.30	20.90	23.88	
C	98	404.10	366.00	10.41	5.00	10.00	196.25	1.86	96.63	19.10	21.82	20.05
D	98	407.70	369.20	10.43	5.00	10.00	196.25	1.88	97.48	16.00	18.28	
E	95	394.20	357.40	10.30	5.00	10.00	196.25	1.82	94.36	15.00	17.14	17.42
F	95	393.60	356.00	10.56	5.00	10.00	196.25	1.81	93.99	15.50	17.71	

ANNEXE

90%tuf+10%sable de dune

$\rho_{\max}(\text{t/m}^3)$	1.94
w_{opm}	10

Compacité	Densité	Poids du sol sec(g/cm^3)	Poids de l'eau(g/cm^3)	Poids du sol humide(g/cm^3)
100	1.94	380.73	38.07	418.80
98	1.90	373.11	37.31	410.42
95	1.84	361.69	36.17	400.39

N d'éprouvette	Compacité	Poids réel après le compactage	P réel l'écrasement	Teneur en eau	D(ϕ) éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité l'écrasement	Compacité	Lecteur	R (kg/cm^3)	$R_{\text{c moy}}$
A	100	417.10	375.50	9.97	5.00	10.00	196.25	1.91	98.63	18.00	20.56	22.85
B	100	417.60	377.00	9.72	5.00	10.00	196.25	1.92	99.02	22.00	25.13	
C	98	408.70	370.30	9.40	5.00	10.00	196.25	1.89	97.26	18.00	20.56	19.99
D	98	408.70	370.50	9.35	5.00	10.00	196.25	1.89	97.31	17.00	19.42	
E	95	397.50	360.60	9.28	5.00	10.00	196.25	1.84	94.71	14.00	15.99	16.85
F	95	397.40	361.20	9.11	5.00	10.00	196.25	1.84	94.87	15.50	17.71	

ANNEXE

80%tuf+20sable de dune

$\rho_{\max}(\text{t/m}^3)$	1.97
W_{optm}	9.9

Compacité	Densité	Poids du sol sec(g/cm^3)	Poids de l'eau(g/cm^3)	Poids du sol humide(g/cm^3)
100	1.97	386.61	38.27	425.27
98	1.93	378.88	37.51	416.77
95	1.87	367.28	36.36	404.01

N d'éprouvette	Compacité	Poids réel après le compactage	P réel l'ecrasement	Teneur en eau	D(ϕ) éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité l'ecrasement	Compacité	Lécteur	R (kg/cm^3)	$R_{\text{c moy}}$
A	100.00	423.20	382.00	9.74	5.00	10.00	196.25	1.95	98.81	15.00	17.14	16.28
B	100.00	424.00	383.40	9.58	5.00	10.00	196.25	1.95	99.17	13.50	15.42	
C	98.00	413.70	375.40	9.26	5.00	10.00	196.25	1.91	97.10	13.00	14.85	14.28
D	98.00	412.90	374.90	9.20	5.00	10.00	196.25	1.91	96.97	12.00	13.71	
E	95.00	402.40	365.50	9.17	5.00	10.00	196.25	1.86	94.54	11.00	12.57	12.85
F	95.00	402.50	365.70	9.14	5.00	10.00	196.25	1.86	94.59	11.50	13.14	

ANNEXE

70%tuf+30sable de dune

$\rho_{\max}(\text{t/m}^3)$	2
W_{opm}	9.8

Compacité	Densité	Poids du sol sec(g/cm^3)	Poids de l'eau(g/cm^3)	Poids du sol humide(g/cm^3)
100	2.00	392.50	38.47	430.97
98	1.96	384.65	37.70	422.35
95	1.90	372.88	36.54	409.42

N d'éprouvette	Compacité	Poids réel après le compactage	P réel l'ecrasement	Teneur en eau	D(ϕ) éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité l'ecrasement	Compacité	Lecteur	R (kg/cm^3)	R_{cmoy}
A	100	427.00	385.60	9.70	5.00	10.00	196.25	1.96	98.24	12.00	13.71	13.42
B	100	426.80	385.30	9.72	5.00	10.00	196.25	1.96	98.17	11.50	13.14	
C	98	419.70	379.50	9.58	5.00	10.00	196.25	1.93	96.69	10.00	11.42	10.57
D	98	419.80	379.80	9.53	5.00	10.00	196.25	1.94	96.76	8.50	9.71	
E	95	405.80	368.20	9.27	5.00	10.00	196.25	1.88	93.81	9.00	10.28	9.71
F	95	406.10	368.80	9.18	5.00	10.00	196.25	1.88	93.96	8.00	9.14	

ANNEXE

60%tuf+40sable de dune

$\rho_{\max}(\text{t/m}^3)$	1.98
wopm	7.7

Compacité	Densité	Poids du sol sec(g/cm^3)	Poids de l'eau(g/cm^3)	Poids du sol humide(g/cm^3)
100	1.98	388.58	29.92	418.50
98	1.94	380.80	29.32	410.13
95	1.88	369.15	28.42	397.57

N d'éprouvette	Compacité	Poids réel après le compactage	P réel l'ecrasement	Teneur en eau	D(ϕ) éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité l'ecrasement	Compacité	Lecteur	R (kg/cm^3)	R _{c moy}
A	100	416.30	378.50	9.08	5.00	10.00	196.25	1.93	97.41	10.00	11.42	10.28
B	100	416.60	379.00	9.03	5.00	10.00	196.25	1.93	97.54	8.00	9.14	
C	98	406.70	370.80	8.83	5.00	10.00	196.25	1.89	95.43	8.00	9.14	9.71
D	98	407.30	370.50	9.04	5.00	10.00	196.25	1.89	95.35	9.00	10.28	
E	95	395.50	360.60	8.82	5.00	10.00	196.25	1.84	92.80	9.50	10.85	8.85
F	95	395.40	361.20	8.65	5.00	10.00	196.25	1.84	92.96	6.00	6.85	

Référence bibliographique

- [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 (1981)** : «Les tufs et encroûtements calcaires en Tunisie et dans le monde ». Thésard, Service des etudes 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]. **Ben Ouakhir Abdel Hakim (2015)**: «Utilisation du sable de dunes en technique routière Etude bibliographique ». Mémoire de Master, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [5]. **Ministères Des Travaux Publics (2005)**: « Cahier des charges 'enrobes a chaud'.Ponts et chaussées ». Luxembourg.
- [6]. **Colombier G (1988)** : « Tufs et encroûtements calcaires : utilisation routière synthèses » ISTED.
- [7]. **Chalhi, M^{ed}. Moussaoui, M^{ed}. M (2007)**: «Valorisation des granulats disponibles dans le sud de Bechar ». Projet fin étude. Université de Béchar; Béchar.
- [8]. **M. Ghomari F.et Mme Bendi-ouis A. (2008)**: « science des materiaux de construction travaux pratiques ».Travaux pratiques, Université Aboubekr Belkaid
- [9]. **Afnor, (1994)**:« Analyse granulométrique, méthode par tamisage après lavage ». Normalisation française.
- [10]. **Afnor, (1992)**: «Analyse granulométrique, méthode par sédimentation » Normalisation française.
- [11]. **LTPO ,(2009)**: Laboratoires des travaux publics de l'ouest. Adrar.
- [12]. **Afnor, A. A , (1993)**: « Détermination de limite d'Atterberg ». Normalisation française.
- [13]. **Afnor, A. A , (1990)**: « Essai au bleu de méthylène, méthode à la tache ». Normalisation française.

- [15]. **Afnor.,(1999):** « Détermination des références de compactage d'un matériau ». Normalisation française
- [16]. **Belhocine Aida Nagoudi Nadjat. (2014).** «Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux», Thèse de Master, Université Kasdi Merbah – Ouargla.
- [17]. **Horta J.C. (1979) :** « Les encroutements calcaires et les encroutements gypseux en géotechnique routière », Service des pubs. Du laboratoire de M.D.S., Base Sonatrach, Blida, Algérie.
- [18]. **Alloul B. (1981) :** « Etude géologique des tufs calcaires et gypseux d'Algérie en vue de leur valorisation routière », Thèse de docteur 3ème cycle de l'Université de paris, juillet 1981.
- [19]. **Fenzy E. (1966) :** « particularité de la technique routière au Sahara », Rapport technique du laboratoire centrale des travaux publics, Alger, sep.1980.
- [20]. **Hafsi Abdellatif, LTPS Ouargla (2010):** «Les Tufs Gypseux et Calcaires en Zones Arides Essais et Critères de Sélection » Université Kasdi Merbah Ouargla
- [21]. **GTR-Remblais-Couches_de_Forme-Fascicule1 (1992) :** «Réalisation des remblais et les couches de formes » . service d'etudes techniques des routes et autoroutes