

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université Ahmed Draia Adrar
Faculté Des Sciences et de Technologies
Département Des Sciences et Technologie



Mémoire De Fin D'étude En Vue De L'obtention Du Diplôme :
Master En Génie Civil
OPTION : Géotechnique

Présenté par :
Boukheira Sara
Bakassou Fadila

THEME

***Caractérisation d'un matériau local utilisé en
corps de chaussée. Cas du tuf de la route de
l'aéroport d'Adrar***

Jury d'évaluation composé de:

Pr: MEKERTA Belkacem	Univ.d'Adrar	Examineur
Mr: MOULAY OMAR Hassan	Univ. d'Adrar	Examineur
Dr: AKACEM Mustapha	Univ. d'Adrar	Encadreur

Année Universitaire 2020-2021

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne populaire et démocratique
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAYA - ADRAR
BIBLIOTHÈQUE CENTRALE
Service de recherche bibliographique
N°.....B.C/S.R.B//U.A/2021



جامعة احمد دراية - ادرار
المكتبة المركزية
مصلحة البحث البيبلوغرافي
الرقم..... م.م.ب.ب. ب.ب. ا.ج.أ. 2021

شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة): أنا سم مصطفى

المشرف مذكرة الماستر.

الموسومة بـ:
Caractérisation d'un matériau local utilisé en corps de chaussée. Cas du tuf de la route de l'aéroport d'Adrar.

من إنجاز الطالب(ة): لو خيرة حارة

والطالب(ة): بكاسو فضيلة

كلية: العلوم والتكنولوجيا

القسم: علم المواد

التخصص: هندسة مدنية - جيو كوير

تاريخ تقييم / مناقشة: 2021 / 06 / 16

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعدلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين
النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.

ويامكنهم إيداع النسخ الورقية (02) والالكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

أنا سم مصطفى

ادرار في 2021/07/16

مساعد رئيس القسم:

ملاحظة: لا تقبل أي شهادة بدون التوقيع والمصادقة.

Remerciements :

Dans le cadre de la réalisation de cette étude, nous remercierons avant tous DIEU le tout puissant, de nous avoir accordé la santé, guidée vers le bon chemin et de nous avoir permis d'accomplir la présente recherche.

Nous remercierons l'ensemble des enseignants de l'université AHMED Draïa, département des sciences et technologie d'Adrar pour toutes les informations qu'ils nous ont prodigué durant notre formation de Licence et de Master.

Nos reconnaissances et toute notre remerciements s'adresse particulièrement à notre encadreur **Dr. AKACEM MUSTAPHA** pour nous avoir encadré et dirigé avec une grande rigueur scientifique, la qualité de ces formations et de ses conseils, le soutien et la confiance qu'il nous a accordé, et nous a permis de réaliser cette recherche dans de meilleures conditions.

Nous tiendrons également à remercier les membres du jury qui nous feront l'honneur d'examiner ce modeste travail.

Enfin, nous remercierons sincèrement tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin et particulièrement l'ensemble des membres du laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest LTPO.

إهداء

أهدي تخرجي إلى أمي قطعة من الجنة و نور حياتي
إلى كل أسرتي وإخوتي وأقربائي وسديقاتي.
وإلى كل من ساهم في تشجيعي ومساندتي لوصولي لهذا النجاح العظيم.
شكرا...

بوخيرة سارة

أهدي تخرجي إلى الذي أوصلني الله به برا وإحسانا
إلى من علمني كل أمور الحياة على حساب جسده وطاقته أبي العزيز.
إلى التي أدارت درسي بدعائها نبع العجب والحنان شمعة العطاء أمي الغالية.
إلى من وقفوا معي دائما سدي في الحياة إخوتي وكل أسرتي وأقربائي.
إلى كل أساتذتي واحداثي الذين وقفوا معي خلال هذه الرحلة الطويلة من النجاح.
إلى من تقاسمت معي هذه المذخرة سديقتي "سارة".

بكاسو فضيلة

إلى كل من يؤمن بالله الواحد الأحد

و

يعلم أن فوق كل ذي علم عليم.

Résumé :

La construction des routes est particulièrement basée sur l'utilisation des matières premières nécessitant de répondre aux normes réglementaires, assurant par la suite une bonne qualité et durabilité de la route.

Certaines régions souffrent de l'indisponibilité des matières premières utilisées pour la construction des routes notamment les régions sahariennes, cela nécessite des déplacements sur de longues distances, ce qui influe défavorablement sur le coût du projet.

Dans ce travail, nous avons mené une étude pour évaluer les ressources locales de la région d'Adrar pour le matériau de tuf présent en grande quantité, et cela vise à fournir une base de référence pour de futures recherches dans ce domaine, où nous avons mené des expériences sur le tuf pris de l'aéroport d'Adrar dans le but d'étudier ses propriétés et de le caractériser.

Après les résultats obtenus sur le tuf question d'étude, nous avons enregistré des résultats satisfaisants et acceptables pour une éventuelle utilisation en corps de chaussée.

Mots clé : tuf, ressources locales, les régions sahariennes, la route

ملخص :

يعتمد إنشاء الطرق بشكل خاص على استخدام المواد الخام التي تتطلب تلبية المعايير التنظيمية , وبالتالي ضمان الجودة والمتانة للطرق .

تعاني بعض المناطق من عدم توفر المواد الخام المستخدمة في تشييد الطرق وخاصة المناطق الصحراوية مما يتطلب السفر لمسافات طويلة مما يؤثر سلبا على تكلفة المشروع .

في هذا العمل أجرينا دراسة لتقييم الموارد المحلية لمنطقة أدرار لمادة الطف الموجودة بكميات كبيرة وهذا يهدف توفير أساس للبحث المستقبلي في هذا المجال حيث أجرينا تجارب على الطف مأخوذة من مطار أدرار من أجل دراسة خصائصه.

بعد النتائج التي تم الحصول عليها سجلنا نتائج مرضية و مقبولة.

كلمات مفتاحية : الطف ،الموارد المحلية ؛المناطق الصحراوية ؛الطرق.

Sommaire :

Chapitra I : généralité du tuf

I.1.	Introduction	1
I.2.	Définition :	1
	Qu'est-ce-que les tufs calcaires ?	1
I.3.	Hypothèse de formation :	2
I.4.	Evolution des encroutements calcaires :	4
I.5.	Classification :	5
I.6.	Essais géotechniques réalisés sur les tufs :	6
	I.6.1. Analyse granulométrique [1]:	6
	I.6.2. Mesure de la pollution argileuse [1]:	7
	I.6.2.2. L'Equivalent de Sable [1]:	7
	I.6.2.3. Essai au Bleu de Méthylène [1]:	7
	I.6.3. Essai Proctor [1]:	8
	I.6.4. Essai CBR [1]:	8
	I.6.5. Résistance aux chocs et à l'abrasion [1]:	8
	I.6.5.1. Essai Los Angeles :	8
	I.6.5.2. Essai Micro Deval humide :	9
I.7.	Conclusion :	10

Chapitra II : Production et utilisation des tufs

II.1.	Introduction :	12
II.2.	Recherche d'un gisement.....	14
II.3.	Exploitation d'un gisement :	15
	II.3.1. Décapage (découverte) :	15
	II.3.2. Extraction[1]:	15
	II.3.3. Transport	15
	Produits finis	15
II.4.	Utilisation des tufs calcaires en constructions routiers :	16
	II.4.1. Structure de chaussée :	16

II.4.2.	Utilisations des tufs non traité dans les routes :	17
II.4.3.	. Assises de chaussées :	17
II.4.3.1	Couche de fondation :	17
II.4.3.2	Couche de base :	18
II.4.3.3	Remblais :	19
II.5.	Traitement des tufs calcaires aux liants hydrauliques :	20
II.5.1	Méthodologie du traitement	20
II.5.1.1	Introduction	20
II.5.1.2	évaluation de l'aptitude du sol au traitement	21
II.5.1.3	Organisation général des chantiers.....	21
II.5.1.4	Exécution des opérations élémentaires	23
II.7.	Conclusion	28

Chapitra III : Caractérisation et identification du tuf étudié

III.1	Introduction :	30
2.	Poids spécifique des grains solides (NF P94-054)	30
III.2	Échantillonnage :	31
III.2.1	But.....	31
III.2.2	Principe	31
III.2.3	Préparation de l'échantillon pour essai	31
III.2.4	Prélèvement et réduction d'échantillon	31
III.2.4.1.	Prélèvement sur tas on stock.....	31
III.2.4.2.	Réduction d'échantillon	31
III.2.4.3.	Réduction par Quartage	32
III.2.4.4.	Réduction par moyen d'échantillonneur	32
III.3	Détermination des caractéristiques :	34
III.3.1	Analyse granulométrique :	34
III.3.1.1.	But de l'essai :	34
III.3.1.2.	Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056):	34
III.3.1.3.	Analyse sédiment métrique (NFP 94-057) :	37
III.3.2	Poids spécifique des grains solides (NF P94-054).....	41
III.3.2.1.	Définition	41
III.3.2.3.	Mode opératoire	42

III.3.1	Qualité des fines :.....	43
III.3.2.1.	Les limites d'Atterberg (NF P 94-058).....	43
III.3.2.2.	L'Equivalent de Sable (NF P 18-598):	49
III.3.2.3.	Essai au Bleu de Méthylène (NF P94-068):	52
III.3.2	Essai los Angeles (Résistance au chocNF P 18-573):.....	56
III.3.3	Essai de compactage et de portance :.....	58
III.3.5.1.	Essai Proctor Modifié :	58
III.3.5.2.	Essai CBR (NF P 98-230 2) :.....	61
III.3.4	Résistance à la compression simple.....	66
III.3.5	Evolution de la résistance à la compression simple en fonction de la compacité..	67
III.4	Classification LCPC, GTR des matériaux.....	69
III.4.1	Classification de LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées)	69
III.4.2	Classification de GTR (Guide Technique Routier).....	72
III.5	Conclusion :.....	73

Liste des figures :

Chapitre I : généralité de tuf

<i>Figure. I. 1 : Répartition des encroûtements calcaires dans le monde.</i>	2
<i>Figure. I. 2 : Schéma de circuit de la formation des tufs calcaires [1].</i>	3
<i>Figure. I. 3. Encroûtement mûr</i>	4
<i>Figure. I. 4 : Différentes classes de dureté</i>	9

Chapitre II : Production et utilisation des tufs

<i>Figure. II. 1. Etapes d'exploitation d'ungisement</i>	13
<i>Figure. II. 2. Structure de chaussée</i>	15
<i>Figure. II. 3: Opérations élémentaires intervenant dans l'exécution d'une couche de forme en sol traité (LCPC-SETRA, 2000).</i>	20
<i>Figure. II. 4:L'homogénéisation par constitution de dépôts provisoires</i>	21
<i>Figure. II. 5: Epandeur moderne équipé d'un dispositif de variation de la largeur d'épandage (GTS, 2000).</i>	22
<i>Figure. II. 6: Pulvérisateurs de sol à arbre horizontal munis de pioches (GTS, 2000)</i>	22
<i>Figure. II. 7: Vue d'ensemble d'une centrale</i>	23
<i>Figure. II. 8: Arroseuse de grande capacité</i>	23
<i>Figure. II. 9: Planche d'essai en tuf traité préparé en centrale</i>	23
<i>Figure .II. 10: Etat de la plate-forme après rabotage avec la raboteuse</i>	24
<i>Figure .II. 11: Compactage par l'utilisation de rouleaux vibrants à pieds</i>	25
<i>Figure. II. 12: Cloutage avec des gravillons concassés compactés à l'aide des rouleaux lisses (LCPC-SETRA, 2000)</i>	25
<i>Figure .II. 13: Différentes protections superficielles pouvant être appliquées sur une couche de forme en sol traité (LCPC-SETRA, 2000).</i>	26
<i>Figure .II. 14 : Exemple de protection superficielle lourde de type « enduit pré gravillonné »</i>	27

Chapitre III : Caractérisation et identification du tuf étudié

<i>Figure. III. 1: Organigramme de l'étude de l'essai géotechnique</i>	30
<i>Figure. III. 2. :Gite dutuf de laRoute de l'aéroport d'Adrar (Image satellitaire)</i>	30
<i>Figure. III. 3. Echantillonnage au laboratoire (Quartage)</i>	32

<i>Figure. III. 4. : Schématisation de l'échantillonnage.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure. III. 5 : Courbe granulométrique d'échantillon du tuf étudié.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure. III. 6. Courbe limitée de liquidité.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure. III. 7 : Positionnement du tuf étudié dans l'abaque de plasticité de Casagrande</i>	<i>47</i>
<i>Figure. III. 8. Courbe de Proctor Modifiée du tuf étudié</i>	<i>60</i>
<i>Figure. III. 9. : Variation de la force du piston en fonction de son enfoncement (Immédiat) .</i>	<i>65</i>
<i>Figure. III. 10. Variation de l'indice CBR (immédiat) en fonction de la densité sèche.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure. III. 11: Variation de la résistance à la compression simple en fonction de la compacité</i>	<i>68</i>
<i>Figure. III. 12 : Classification LPC des sols fins en laboratoire. Diagramme de plasticité ...</i>	<i>70</i>
<i>Figure. III. 13: Structure générale de la classification GTR pour les terrassements routiers</i>	<i>72</i>

Liste des photos

Chapitre III : Caractérisation et identification du tuf étudié

<i>Photo. III. 1 : Echantillonneur</i>	32
<i>Photo. III. 2 : Mode Opérateur Analyse granulométrique</i>	35
<i>Photo. III. 3 : Mode opératoire Analyse Sédiment métrique</i>	37
<i>Photo. III. 4 : Mode opératoire le poids spécifique</i>	42
<i>Photo. III. 5. : Appareil de Casagrande</i>	43
<i>Photo. III. 6. : Etapes de l'essai de limite de liquidité</i>	44
<i>Photo. III. 7: Etapes de l'essai de limite de plasticité</i>	45
<i>Photo. III. 8: Mode opératoire de l'essai Equivalent de sable</i>	49
<i>Photo. III. 9: Mode opératoire de l'essai bleu de méthylène</i>	52
<i>Photo. III. 10: Résultats de l'essai la valeur de bleu</i>	53
<i>Photo. III. 11 : Machine de Los Angeles</i>	55
<i>Photo. III. 12 : mode opératoire de los Angeles</i>	56
<i>Photo. III. 13 : mode opératoire Proctor Modifié</i>	58
<i>Photo. III. 14: Essai CBR imbibition</i>	61
<i>Photo. III. 15: Essai CBR Poinçonnement</i>	62
<i>Photo. III. 16: Appareillages de confection des éprouvettes</i>	65
<i>Photo. III. 17: Photos présentant les échantillons conservés à l'air libre</i>	65
<i>Photo. III. 18: L'écrasement des éprouvettes à la compression simple après conservation</i> ...	65

Liste des tableaux

Chapitre I : généralité de tuf

Tableau. I. 1 : Classification d'encroûtements proprement dits (Ruellan [1] et [4]).....	5
--	---

Chapitre II : Production et utilisation des tufs

Tableau. II. 1: Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de fondation en Algérie (d'après Colombier, 1988)	16
Tableau. II. 2 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de base en Algérie (d'après Colombier, 1988)	16
Tableau. II. 3 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en remblais en Algérie (d'après Colombier, 1988)	17
Tableau. II. 4 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en Algérie.....	17
Tableau. II. 5 : Critères retenus pour l'adaptation d'un sol au traitement	19

Chapitre III : Caractérisation et identification du tuf étudié

Tableau. III. 1: Résultats l'analyse granulométrique (16000g).....	36
Tableau. III. 2 : Résultats de la suite de l'analyse granulométrique (500g)	36
Tableau. III. 3 : Résultat de l'analyse granulométrique par sédimentométrie.	39
Tableau. III. 4 : Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique.	41
Tableau. III. 5: Résultats de détermination du poids spécifique.....	43
Tableau. III. 6 : Résultats de l'essai limite de liquidité	46
Tableau. III. 7 : Résultats de l'essai limite de plasticité.....	47
Tableau. III. 8 : Résultats de l'essai Limite d'Atterberg.....	48
Tableau. III. 9 : Classification suivant IP	48
Tableau. III. 10 : Résultats d'équivalent de sable du tuf.	51
Tableau. III. 11 : Spécification d'ES pour la construction des chaussées	51
Tableau. III. 12 : Nature et qualité du sable en fonction de l'ES.	52
Tableau. III. 13: Résultats de l'essai la valeur du bleu (tuf)	55
Tableau. III. 14 : Classifications des sols d'après Philipponnat(1997).	55
Tableau. III. 15 : Chargede boulettes pour l'essai Los Angeles.....	57
Tableau. III. 16 : Valeurs des coefficients de Los Angeles.	57
Tableau. III. 17 : Spécification du coefficient L_A pour couches d'assises de chaussées.	58
Tableau. III. 18: Représentées valeurs du coefficient LA	58

<i>Tableau. III. 19 : Résultats de l'essai Proctor Modifié.....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau. III. 20 :Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers</i>	<i>61</i>
<i>Tableau. III. 21 : Résulta maximale de l'essai CBR (12 c/c)</i>	<i>64</i>
<i>Tableau. III. 22: Résulta maximale de l'essai CBR (25 c/c)</i>	<i>64</i>
<i>Tableau. III. 23: Résulta maximale de l'essai CBR (55 c/c)</i>	<i>65</i>
<i>Tableau. III. 24: Résultatsdel'essaicompression simple 01</i>	<i>68</i>
<i>Tableau. III. 25: Résultatsde l'essaicompression simple 02</i>	<i>68</i>
<i>Tableau. III. 26 : Les groupes de sols.</i>	<i>69</i>
<i>Tableau. III. 27 : classification des sols grenus – LPC/USCS.....</i>	<i>71</i>

Introduction générale

INTRODUCTIONS GENERALE

Dans ces dernier tempes, Adrar a attesté une augmentation significative dans les constructions urbaines qui sont distribuées à grande surface qui a été accompagnée par des projets de construction routière qui destinent des travaux comprennent la réalisation et l'entretien des corps des chaussées.

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 certains régions (les zones arides et les zones semi-arides), ce qui rend l'approvisionnement par ces matériaux classiques (graves "nobles») 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 géomécanique des tufs. Ceci dans le but de généraliser leurs utilisations pour des routes à moyen et fort trafic.

Dans ce sujet on va étudier les caractéristiques du tuf de de l'aéroport d'Adrar pour réaliser des constructions routière.

Chapitre 01

Généralités sur les tufs

I. Introduction:

Les assises de chaussées sont réalisées, en général, avec des matériaux sélectionnés non traités réalisés en matériaux naturels (tuf, t.v.o, sable, etc.) ou en matériaux concassés à partir de roches massives (Graves concassées).

Notre étude porte un intérêt sur la valorisation des matériaux de construction d'assises de chaussée dans de la région d'Adrar.

Les tufs d'encroûtements sont constitués de trois catégories essentielle: les encroûtements calcaires (les sables calcaires); les encroûtements gypseux (les sable gypseux), et les encroûtements mixtes gypso-calcaires (les sable gypso- calcaires).

I.1. Définition :

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 (gypso-calcaires).

Qu'est-ce-que les tufs calcaires ?

Les tufs calcaires (ou travertins) sont des roches sédimentaires calcaires créés en milieu continental, à aspect concrétionné et riche en alvéoles de toutes tailles [2], de couleur blanche quand pure, mais tirant vers le gris ou jaunâtre ou rougeâtre ou marron, selon les impuretés, caractérisée par de petites cavités (vacuoles) inégalement réparties [3].

Ces roches se forment à la sortie de certaines sources, ou cours d'eau peu profonds et à petites cascades.

Une fois sèche, les tufs constituent un matériau léger, isolant et facile à tailler. [2]

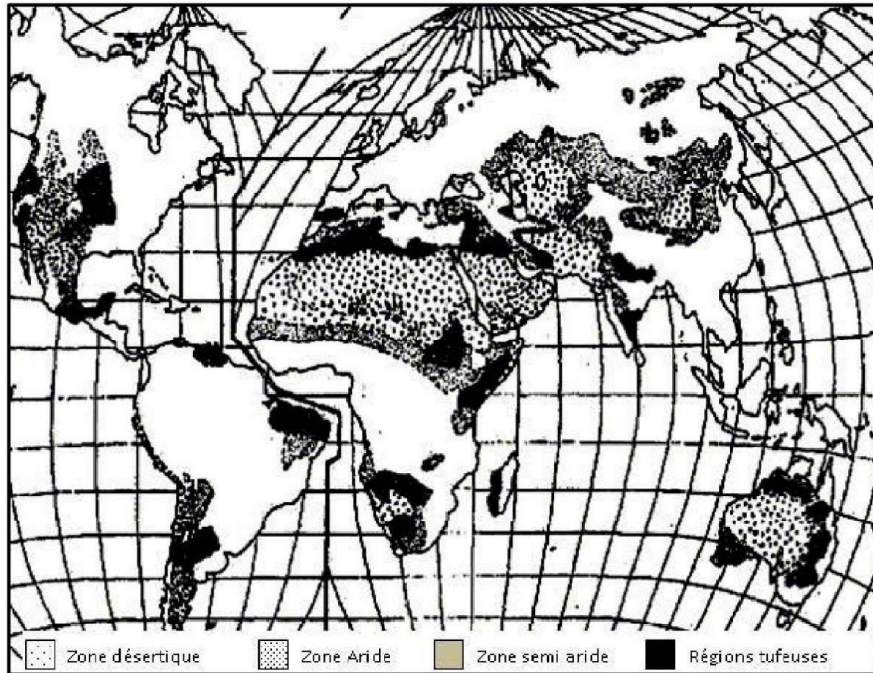
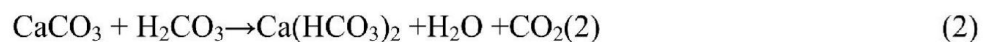


Figure. I. 1 : Répartition des encroûtements calcaires dans le monde.

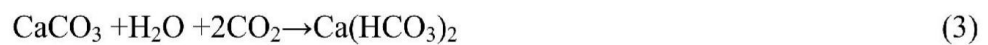
I.2. Hypothèse de formation :

La formation des encroûtements calcaires est due à la cimentation du sol par le 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 régit par les équations chimiques suivantes :



Soit l'équilibre :



Insoluble

soluble

Quant à la formation biologique des calcaires, elle est due à de nombreux organismes qui sécrètent directement le calcaire (CaCO_3) pour leur squelette ou coquille. C'est l'origine essentielle des calcaires.

Le CaCO_3 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.

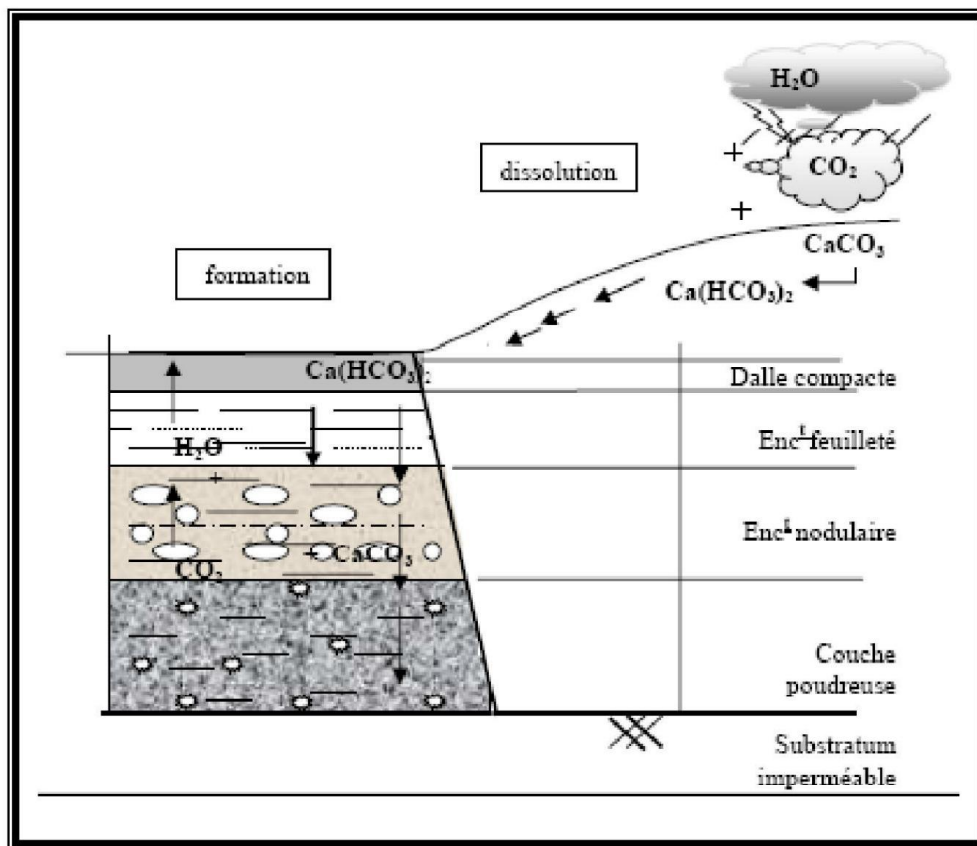


Figure. I. 2 : Schéma de circuit de la formation des tufs calcaires [1].

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 :



Précipité

L'élévation de la température accélère la réaction mais la dépression joue un rôle fondamental [1].

On peut sommer les réactions (3) et (4) dans la réaction suivant:[2]



I.3. Evolution des encroutements calcaires :

A partir d'un certain stade de concentration, se produisent ce que **Ruellan** appelle les phénomènes pédologiques qui progressivement transforment les différents horizons des sols. L'évolution finale du processus de formation des croûtes calcaires est l'encroûtement mûr (figure I.3). A ce stade, la formation comprend les horizons suivants : [4]

a. **Horizon A** : pauvre en calcaire c'est la terre végétale d'une épaisseur de 30 à 50cm voir être inexistante en cas d'érosion [1] et [4].

b. **Horizon B ou horizon d'accumulation** : C'est l'horizon de l'encroûtement proprement dit ; il est riche en calcaire (40 à 90 %) d'une épaisseur de 1 à 2m, il est constitué de trois couches de haut en bas suivant : [1] et [4]

- la dalle compacte, très dure à forte teneur en carbonate et dont l'épaisseur peut atteindre une vingtaine de cm ;
- la croûte constituée par une superposition de feuillets. la dureté de la croûte est plus faible que celle de la dalle, son épaisseur variable peut attendre 2m. la différenciation entre croute et dalle n'est pas toujours évidente ;
- une zone nodulaire qu'il s'agit de nodules de calcaires durs pris dans une Gange calcaire plus au moins pulvérulente;

c. **Horizon C** : c'est le matériau d'origine dans lequel on rencontre cependant quelque nodules, c'est un matériau poudreux ou l'enrichissement en calcaire est faible [1] et [4].

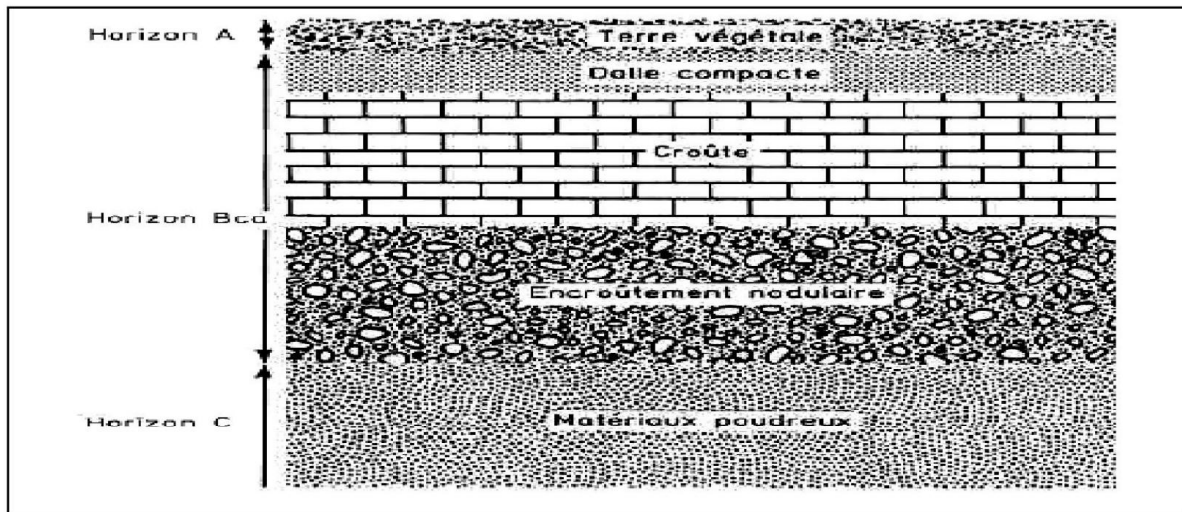


Figure .I. 3. Encroûtement mûr

I.4. Classification :

Cette classification a été établie par **Ruellan** ou il caractérise les encroûtements calcaires suivant la teneur en CaCO_3 . Il propose trois catégories suivant: [4]

- **Distribution diffusée** : la teneur en calcaire est très faible. Il n'est pratiquement pas visible à l'œil nu.

- **Concentration discontinues** : la teneur en calcaire devient plus élevée, elle est de 40 à 60 %. Les concentrations de calcaire se présentent sous la forme de nodules durs de 1 à quelques cm^3 ou sous forme d'amas friables qui s'écrasent facilement.

- **Concentration continues** : lorsque la concentration en calcaire se poursuit (teneur en $\text{CaCO}_3 > 60\%$), 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 d'encroûtements proprement dits (Ruellan [1] et [4]).

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	Feuillets superposés et discontinus d'encroûtement massif ou nodulaire d'épaisseur millimétrique à centimétrique croisant 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 elles tapissent la surface supérieure et les fissures.
	Dalles Compacte	Feuillets de croûte pétrifiés, épaisseur de quelques centimètres à plusieurs décimètres			

I.5. Essais géotechniques réalisés sur les tufs :

Les essais géotechniques les plus couramment utilisés pour déduire les caractéristiques Des tufs au laboratoire avant utilisation sont :

- ❖ Analyse granulométrique :
 - Par tamisage (voie sèche ou humide) ;
 - Par sédimentométrie.
- ❖ Mesure de la pollution argileuse :
 - Limites d'Atterberg (limites de consistance) ;
 - Equivalent de Sable ;
 - Essai au Bleu de Méthylène.
- ❖ Essai Proctor (modifié ou normal);
- ❖ Essai de portance (essai CBR) ;
- ❖ Résistance aux chocs et à l'abrasion :
 - Essai Los Angeles ;
 - Essai Micro Deval humide.

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. [1]

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 :

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. [1]

Il varie entre 5 (non mesurable) et 25 % (non mesurable < IP < 25).

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 µm de cette fraction varie de 10 à 80 %, ce qui influence considérablement la valeur de ES qui est compris 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.[1]

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

- Pour les enrobés bitumineux : $VB < 1$;
- Pour les graves non traités et traités : $VB < 1.5$;
- Pour les sables non traités et traités : $VB < 0.5$.

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.[1]

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 :

- les densités sèches maximales (γ_{dmax}) sont comprises entre 1.7 et 2g / 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 : [1]

- 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. En résumé, on a souvent les résultats suivants :

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

I.6.5. Résistance aux chocs et à l'abrasion:**I.6.5.1. Essai Los Angeles :**

Pour les matériaux suffisamment résistants, la résistance aux chocs sera appréciée par l'essai Los Angeles. Définie, par le coefficient LA. [1]

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. 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.6.5.2. Essai Micro Derval humide :

Cet essai qui caractérise la résistance à l'abrasion en présence d'eau est peu réalisé sur les matériaux d'encroûtements calcaires. Les quelques essais réalisés sur des matériaux relativement tendres ont donné un coefficient MDE > 80 ; ce qui indique une sensibilité très nette du tuf lorsqu'il est en présence d'eau.

Les résultats des coefficients LA et MDE, situent les tufs hors des classes admises par les spécifications des matériaux routières habituels. Ces spécifications distinguent quatre classes de dureté selon la figure I.4.

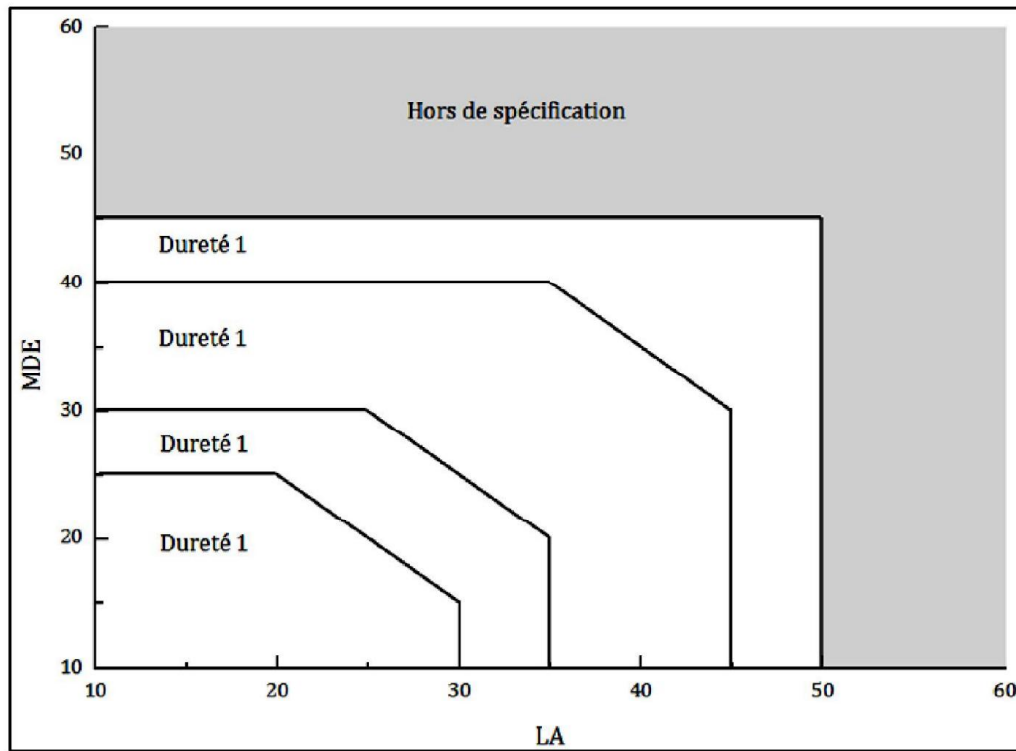


Figure .I. 4. Différentes classes de dureté

I.6. Conclusion :

A partir des données de ce chapitre on peut tirer les conclusions suivantes :

Les tufs sont des roches friables, poreuses, légères et de couleur variée selon les impuretés. Elles se regroupent en trois catégories (Les tufs calcaires ; Les tufs gypseux ; Les gypso-calcaires).

La formation des encroûtements calcaires est due à l'interaction du carbonate de calcium et dioxyde de carbone en présence d'eau.

L'évolution finale du processus de formation des croûtes calcaires est l'encroûtement mûr.

Les croûtes calcaires sont classées selon la teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) en trois classes différentes : Distribution diffusée ; Concentration continue; Concentration discontinue.

Les essais plus couramment réalisés sont actuellement : L'analyse granulométrique; Limites d'Atterberg (limites de consistance); Equivalent de Sable; Essai au Bleu de Méthylène; Essai Proctor; Essai de portance (essai CBR); Essai Los Angeles; Essai Micro Deval.

Chapitre II :

Production et utilisation des tufs

II.1. Introduction :

Après avoir donné une représentation générale de la genèse des tufs calcaires, dans le chapitre précédent, nous nous intéressons dans ce deuxième chapitre à la recherche et l'exploitation d'un gisement et l'utilisation des tufs dans les constructions routières.

II.2. Recherche d'un gisement :

La recherche d'un gisement devra répondre à trois impératifs:[4]

Permettre d'extraire dans des conditions économiques raisonnables, un granulat ayant les qualités souhaitées ;

Posséder une puissance suffisante ;

Etre situé le plus près possible du chantier ou au voisinage du centre de gravité des divers lieux d'utilisation.

On recherchera les gisements dans les zones où leur formation est envisageable et où leur altération et ré-dissolution sont peu vraisemblables.

Avant d'effectuer une prospection par sondage ou méthode géophysiques, on pourra utiliser un certain nombre d'indicateurs pour circonscrire les recherches [4].

Par exemple, on recherchera :

Dans les zones arides ou semi arides en éliminant les zones humides ;

Sur les glacis de faibles pentes ;

Dans les zones habitées ou cultivées ; etc.

La prospection est généralement effectuée le long d'un itinéraire lors de l'étude d'un nouveau tracé. L'outil de reconnaissance peut être une tarière mécanique, mais de l'avis des techniciens cet appareil présente un inconvénient tel que la difficulté d'attaque des encroûtements mûrs. Des sondages effectués manuellement nous renseignent sur la coupe du terrain et permettent de réaliser des prélèvements nécessaires pour analyser les matériaux tufs [1].

II.3. Exploitation d'un gisement :

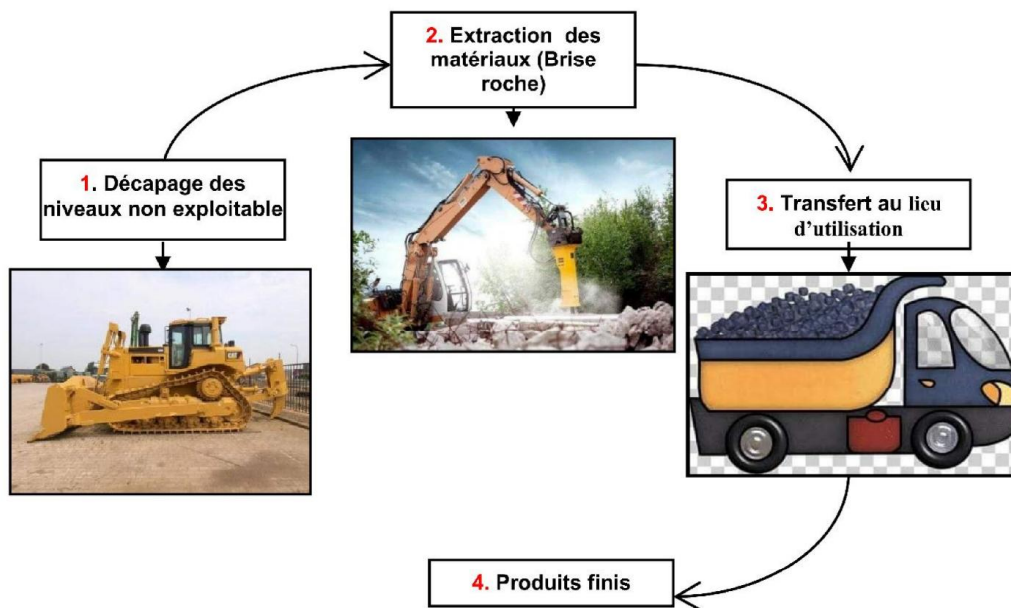


Figure. II. 1. Etapes d'exploitation d'un gisement

L'exploitation d'un gisement varie selon la nature du gisement et la qualité souhaitée pour les granulats extraits. Le seul point commun à toutes les exploitations est la nécessité de réaliser la découverte [4].

II.3.1. Décapage (découverte) :

La découverte est réalisée au buteur après que la terre végétale dont l'épaisseur est généralement faible (20 à 30cm), soit décapée [1]. Cette opération est assurée par un bulldozer.

II.3.2. Extraction:

La croûte et la dalle sont fragmentées à la défonceuse et extraites au buteur. Selon la granulométrie souhaitée pour le matériau, on limite l'extraction à la croûte ou bien on extrait aussi certaine épaisseur de la couche pulvérulente. Les matériaux extraits sont en générale gerbés en tas ce qui permet une certaine homogénéisation. [1]

II.3.3. Transport :

Ces granulats sont repris à l'aide de chargeuses sur des camions qui assurent le transport jusqu'au lieu d'utilisation.

Lors de l'exploitation d'un gisement ; le problème important à citer particulièrement, c'est l'hétérogénéité.

Les gisements des tufs ont des caractéristiques géotechniques très variables verticalement et latéralement, d'où la nécessité de faire des prélèvements périodiques pour une analyse au laboratoire pour éviter des échecs trop coûteux[1].

II.4. Utilisation des tufs calcaires en constructions routiers :

Les spécifications d'usage ont été fixées en fonction du trafic poids lourds, de la position de la couche considérée dans la structure de chaussée et de la technique routière utilisée pour sa réalisation (traitée ou non par un liant hydraulique ou hydrocarboné essentiellement) [5].

II.4.1. Structure de chaussée :

Les structures des chaussées sont constituées par nombreuse couches, que l'on définit comme suit:[6]

Les couches de surface comprennent :

la couche de roulement ;

la couche de liaison ;

Les couches d'assise comprennent :

la couche de base ;

la couche de fondation ;

L'accotement

Le fossé

La couche de forme

Le fond de forme

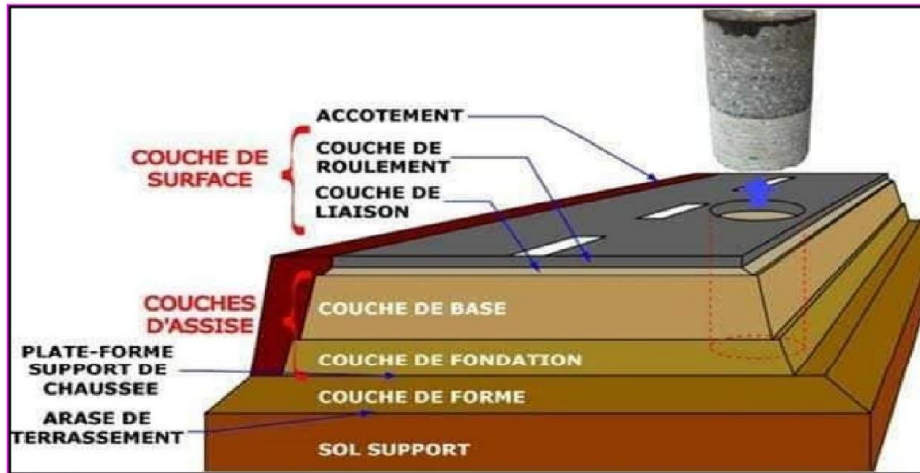


Figure. II. 2. Structure de chaussée

II.4.2. Utilisations des tufs non traité dans les routes :

Selon ses caractéristiques, les tufs calcaires pouvant être utilisés dans le cas le plus divers comme (Colombier, 1988) :

- Couches de fondation, couches de base, couches de forme, accotement ;
- Pistes agricoles, routes moyennement ou fortement circulées et même autoroutes ;
- Remblais.

Actuellement l'utilisation la plus courante est la réalisation de couches d'assises

(Fondation et base) de route moyennement ou faible trafics. Par exemple, en Algérie ont été utilisées depuis 1956 en corps de chaussées de la R. N 1 entre Laghouat et Ghardaïa (Ponton, 1962) cité par Boukezzi (1997).

Les spécifications d'utilisation des tufs calcaires en construction routière en Algérie

Sont comme suit (Colombier, 1988) :

II.4.3. Assises de chaussées :

II.4.3.1 Couche de fondation :

La couche de fondation est le domaine privilégié des tufs calcaires. L'épaisseur après compactage varie selon la nature des sols de plate-forme et l'importance du trafic (forte, moyen ou faible).

Le critère fondamental de convenance est le CBR mesurée après 4 jours d'imbibition (tableau II.3) et pour une densité de 95 % de la densité maximale.

Tableau II.1: Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de fondation en Algérie (d'après Colombier, 1988)

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	$\text{CaCO}_3 > 45 \%$
CBR imbibé	CV ⁽¹⁾ : CBR > 20 CW ⁽¹⁾ : CBR > 30 RN ⁽¹⁾ : CBR > 35

II.4.3.2 Couche de base :

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 (Tableau 1.4). Cette portance est rarement atteinte quand les tufs subissent 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 couche de bases puisque leur portance immédiate est en générale très élevée.

Chapitre 02 : Production et utilisation des tufs

Tableau II.2 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en couche de base en Algérie (d'après Colombier, 1988)

Granulométrie	Suivant le fuseau (Annexe 3)
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 imbibé	$CV^{(1)} : CBR > 20$ $CW^{(1)} : CBR > 30$ $RN^{(1)} : CBR > 35$

II.4.3.3 Remblais :

Les tufs sont également utilisés en remblais s'ils respectent certains critères présentés au tableau (II.3).

Tableau II.3 : Critères d'utilisation des tufs calcaires en remblais en Algérie (d'après Colombier, 1988)

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	$W_{opt} < 16 \%$

D'autres spécifications pour l'utilisation des tufs en construction routière en Algérie ont été proposées par **Struillou** et **Alloul**(1984).

Chapitre 02 : Production et utilisation des tufs

Tableau-II- 4- Critères d'utilisation des tufs calcaires en Algérie.

	Assises de chaussées		Remblais
	Couche de fondation	Couche de base	
Granulométrie	Suivant le fuseau	Suivant le fuseau	Ne doit pas être serrée
Limite de liquidité	$20 \% < W_L < 35 \%$	$20 \% < W_L < 30 \%$	$W_L < 45 \%$
Indice de plasticité	$6 \% < I_p < 12 \%$	$5 \% < I_p < 10 \%$	$I_p < 16 \%$
Equivalent de sable	$20 \% < ES < 35 \%$	$20 \% < ES < 40 \%$	$15 \% < ES < 40 \%$
Teneur en carbonate	$CaCO_3 > 45 \%$	$CaCO_3 > 45 \%$	$CaCO_3 > 30 \%$
CBR imbibé	$CV > 20^{(1)}$	$CV > 20^{(1)}$	CBR > 14
	$CW > 30^{(1)}$	$CW > 30^{(1)}$	
	$RN > 35^{(1)}$	$RN > 35^{(1)}$	
Densité sèche maximale	–	–	$\gamma_{d\max} > 1.6 \text{ g / cm}^3$
Teneur en eau optimale	–	–	$W_{opt} < 16 \%$

(1). CV: chemin vicinal. CW: chemin de wilaya. RN: route nationale.

II.5. Traitement des tufs calcaires aux liants hydrauliques :

Les caractéristiques géotechniques des matériaux d'encroûtements calcaires, et notamment leur faible résistance aux chocs ou à l'abrasion ne permettent pas d'envisager leur emploi en assises de chaussées à fort trafic. D'autre part, la forte teneur en fines de ces matériaux et la présence fréquente de fines argileuses les rend sensibles à l'eau.

Alors la conception de la route, celle des structures des chaussées et les exigences sur les matériaux utilisées dans la construction routière ont connu aussi une nouvelle ère.

Chapitre 02 : Production et utilisation des tufs

Pour profiter au mieux des matériaux naturels (tufs) on modifie leur granulométrie en supprimant une fraction ou en leur ajoutant un matériau correcteur afin d'améliorer leur compacité ; leur comportement mécanique est étroitement lié à cette dernière.

Mais pour avoir des chaussées à prix raisonnables qui pouvant supporter des fortes circulations, la correction granulométrie s'est avérée insuffisante. Il a fallu donc recourir au traitement par liants hydrauliques (les ciments, les chaux, les laitiers de hauts fourneaux, les cendres volantes, la pouzzolane, etc.). L'objectif est double :

- Rendre le matériau monolithique après prise du liant et éviter ainsi les risques

D'abrasion, sous le trafic, de granulats insuffisamment durs ;

- Agglomérer les fines calcaires et neutraliser les fines argileuses pour rendre le Matériau insensible à l'eau.

Dans cette étude de traitement, nous nous intéressons qu'à deux types de liants (Ciment et chaux) qui sont les plus couramment utilisés dans les traitements des sols.

Suivant la nature du sol nous choisissons le type de liant :

- Nature sableuse avec du ciment ;
- Nature limoneuse ou argileuse avec de la chaux, du ciment ou mixte

(Chaux - ciment).

II.5.1 Méthodologie du traitement :

II.5.1.1 Introduction :

Pour le traitement, il existe des paramètres d'identification concernant les sols, la chaux et les liants hydrauliques, reconnus comme significatifs vis-à-vis du traitement. Ces paramètres sont :

Pour les sols : la granularité, l'argilo site, les teneurs en constituants physicochimiques particulier (matières organiques, phosphates, sulfates, sulfures, nitrates, chlorures), l'état hydrique, l'état de compacité en place et, éventuellement, le fragment alité et l'abrasivité.

Pour la chaux aérienne, principalement concernée dans le traitement des sols, les paramètres d'identification importants vis-à-vis le traitement sont : la forme sous laquelle elle est

Chapitre 02 : Production et utilisation des tufs

introduite dans le sol (vive, éteinte, lait de chaux), sa teneur en chaux libre, sa granularité et, pour la chaux vive, sa réactivité avec l'eau.

Pour les liants hydrauliques constitués par les ciments et les liants spéciaux routiers (LSR), les paramètres significatifs sont : la proportion et la nature de leurs constituants (clinker, laitiers, cendres volantes), ces paramètres conditionnent le niveau de performance pouvant être atteint, la cinétique de la prise hydraulique et l'adaptation du produit aux différents constituants des sols.

II.5.1.2 évaluation de l'aptitude du sol au traitement :

Dans l'application du traitement à la réalisation de couche de forme, l'aptitude du sol au traitement est évaluée suivant les critères présentés au tableau (II.4) (LCPC -SETRA,

2000)

Tableau II.4 : Critères retenus pour l'adaptation d'un sol au traitement

(LCPC-SETRA, 2000)

Type de traitement	Paramètre considéré		Aptitude du sol au traitement
	Gonflement volumique G_v (%)	Résistance en compression diamétrale R_{tb} (Mpa)	
Traitement avec liants hydraulique éventuellement associé à la chaux	< 5	> 0.2	Adapté
	$5 \leq G_v \leq 10$	$0.1 \leq R_{tb} \leq 0.2$	Douteux
	> 10	< 0.1	Inadapté

II.5.1.3 Organisation général des chantiers :

La réalisation des couches de forme en sols traités à la chaux et/ou liants hydrauliques requiert l'exécution de différentes opérations qui doivent être exécutées selon un ordonnancement précis et, pour certaines d'entre elles, en un temps n'excédant pas le délai de maniabilité du mélange.

Chapitre 02 : Production et utilisation des tufs

Une certaine partie seulement de ces opérations élémentaires est à exécuter dans tous les chantiers, ce sont :

- la fabrication du mélange (en place ou en centrale),
- le préréglage,
- le compactage partiel,
- le réglage final,
- le compactage final,
- l'application de la protection superficielle.

D'autres, en revanche, comme

- la préparation initiale du sol,
- l'ajustement de l'état hydrique du mélange,
- le cloutage,

Ne sont à réaliser que si le contexte du chantier les exige (voir figure II. 3)

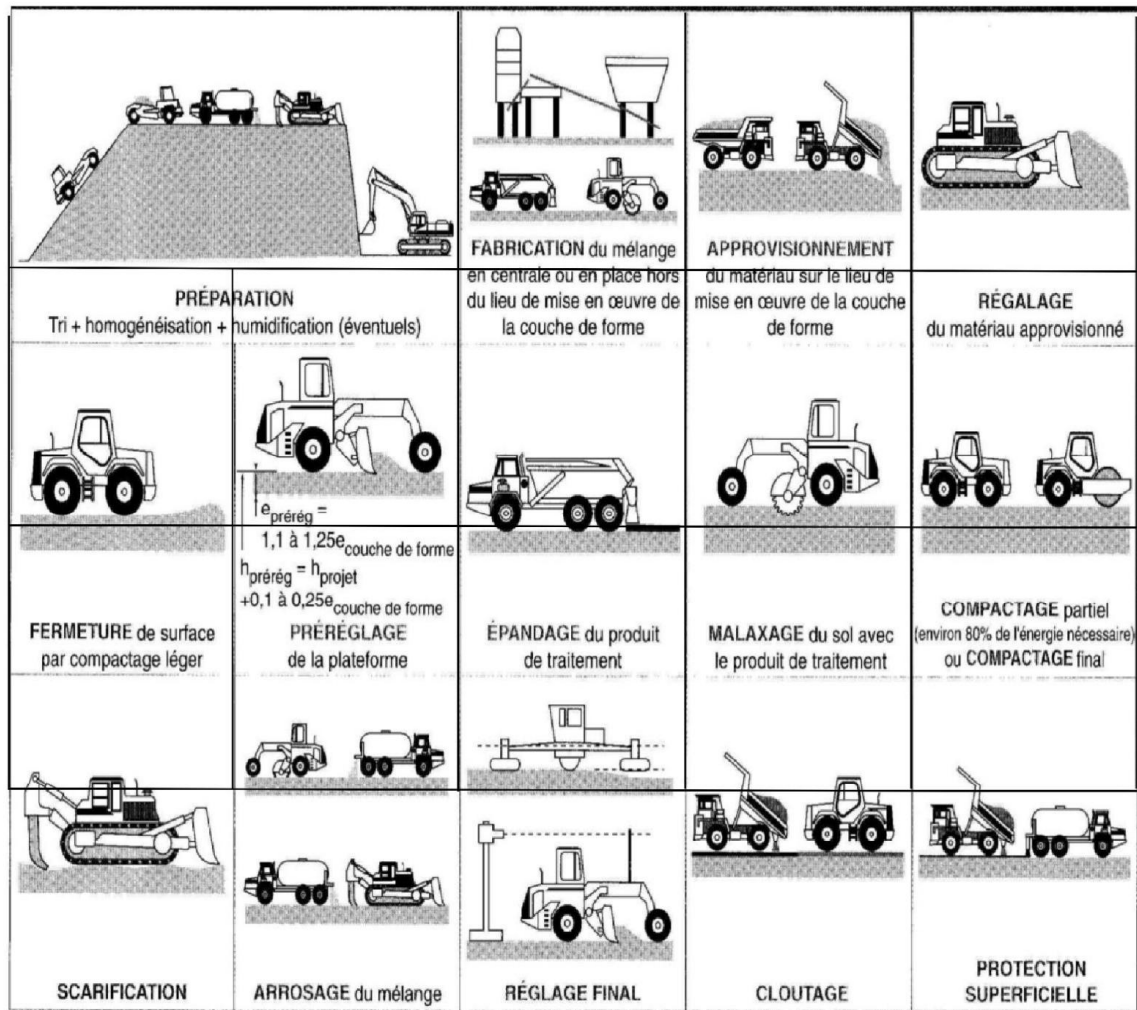


Figure II.3 : Opérations élémentaires intervenant dans l'exécution d'une couche de forme en sol traité (LCPC-SETRA, 2000).

II.5.1.4 Exécution des opérations élémentaires :

Les opérations élémentaires importantes vis-à-vis de la qualité de l'ouvrage sont les suivantes.

a) La préparation initiale du sol :

Elle commence par la décohéation du matériau en place suivit par l'élimination de la fraction grossière. Cette préparation initiale a pour objet l'homogénéisation des caractéristiques de la nature et d'état hydrique du sol pour les mettre en concordance avec les valeurs considérées dans l'étude du matériau traité (voir figure II.4).



Figure II.4L l'homogénéisation par constitution de dépôts provisoires

(LCPC-SETRA, 2000)

Les techniques et le coût de cette opération sont souvent difficiles à définir avec précision au stade de l'étude du projet.

b) La fabrication du mélange :

Dans le cas de la fabrication en place, cette opération comprend :

L'épandage du produit de traitement : Doit répartir la masse surfacique du produit de traitement correspondant au dosage recherché (figure II.5).

Le malaxage de ce produit avec le sol : Doit être réalisé avec des gros pulvérisateurs de sol à arbre horizontal. Il permet d'obtenir une qualité satisfaisante sur la quasi-totalité des sols dont la dimension des plus gros éléments n'excède pas 100 mm (figure II.6).



Figure II.5 : Epandeur moderne équipé d'un dispositif de variation de la largeur d'épandage (GTS, 2000).

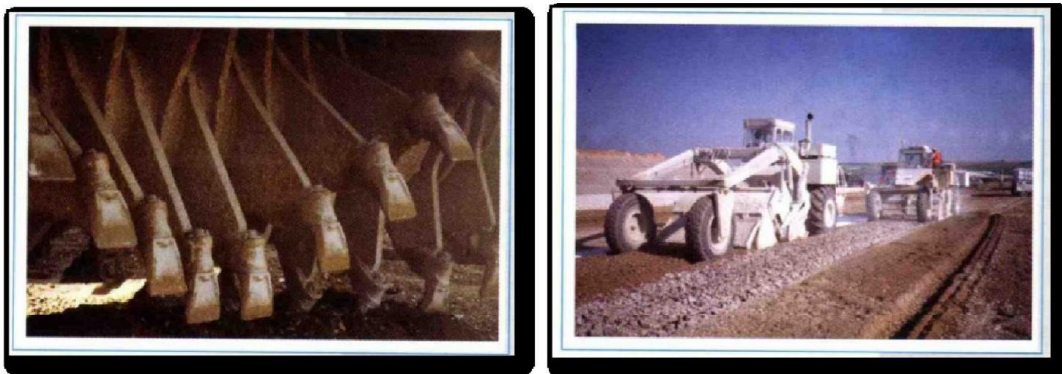


Figure II.6 : Pulvérisateurs de sol à arbre horizontal munis de pioches(GTS, 2000).

- L'ajustement de l'état hydrique du mélange : Consiste soit à humidifier le mélange par arrosage, soit à l'assécher par aération et/ou traitement à la chaux vive. On constate en pratique que c'est l'arrosage qui est le plus souvent concerné. Il doit être exécuté avant le compactage partiel avec beaucoup de rigueur, car un manque d'eau a des conséquences plus sensibles sur les performances d'une couche de forme en sol traité qu'un excès d'eau de même ampleur (figure II.7).
- Lorsque le mélange est fabriqué dans une centrale, sa qualité est en principe mieux maîtrisée que celle obtenue par traitement en place, à condition que l'écoulement du sol dans les organes de dosage se fasse correctement, ceci n'est possible qu'avec des sols non argileux ou des sols moyennement argileux prétraité à la chaux (figure II.8).

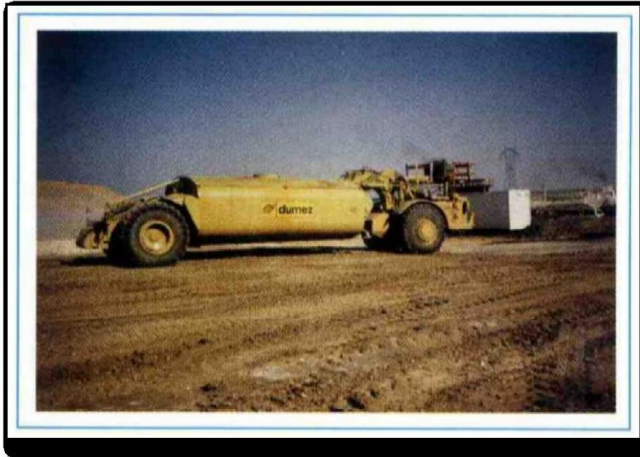


Figure II.7 : Arroseuse de grande capacité
(Supérieur à 80 m³)

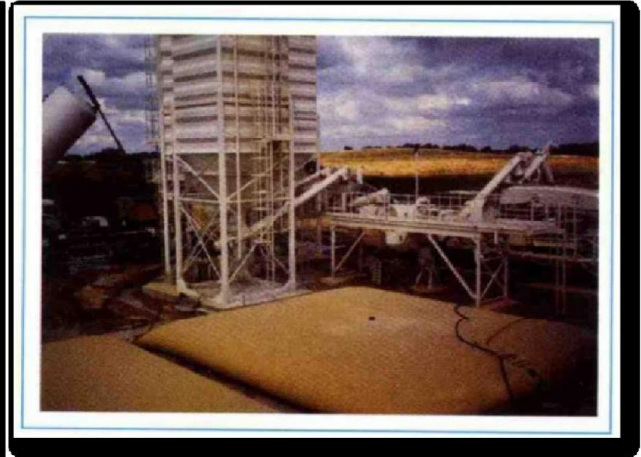


Figure II.8 : Vue d'ensemble d'une centrale
De fabrication du mélange.

A titre d'exemple, nous citons le cas de l'Autoroute Est-ouest, tronçon Oued Tlelat (Sig) où on procède à l'exécution de planche d'essai pour couche de forme en tuf traité à 4% ciment mélangé et fabriqué en centrale (figure II.9)



Figure II.9 : Planche d'essai en tuf traité préparé en centrale
(L'Autoroute Est-ouest, tronçon Oued Tlelat - Sig)

Chapitre 02 : Production et utilisation des tufs

c) Le réglage :

Dans le cas des couches de forme en sols traités, il n'est pas acceptable de réaliser le réglage final de manière traditionnelle par comblement des sous profils par les sur

Profils, du fait de la destruction qui en résulterait. Pour garantir la conformité de la couche traitée à la valeur prise en compte dans le dimensionnement de la structure, il est impératif que le réglage soit obtenu par rabotage, sur toute la surface de la couche, d'une certaine épaisseur de sol traité. Ceci nécessite d'exécuter le réglage en deux séquences : pré-réglage à une cote sauvegardant, après compactage, une certaine épaisseur qui est éliminée lors du réglage final (Figure II.10).

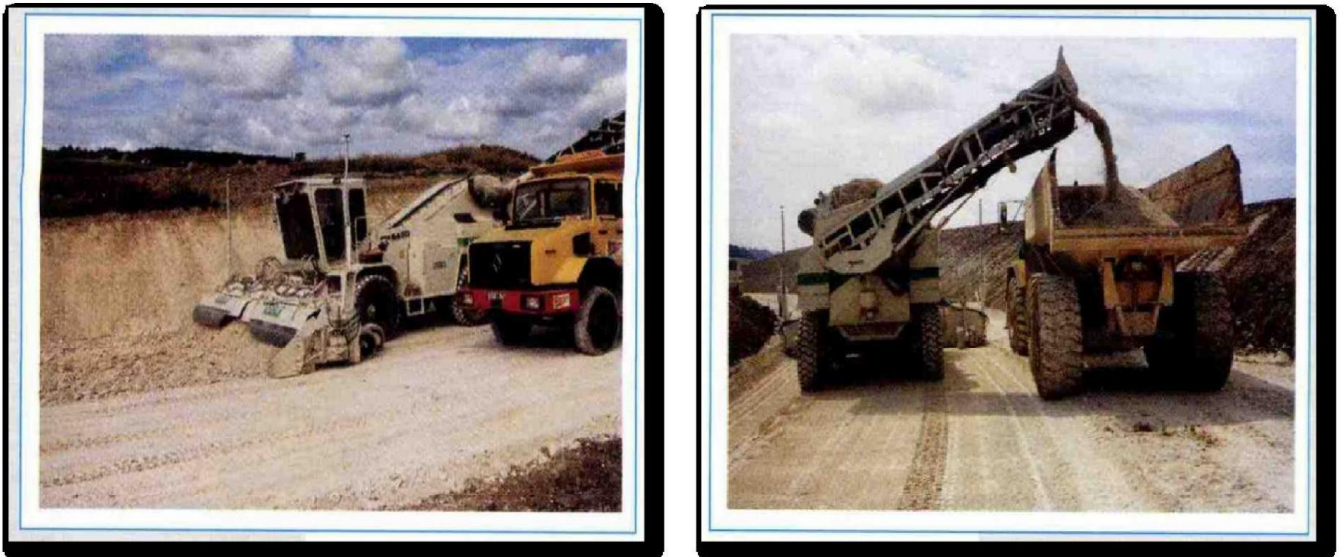


Figure II.10 : Etat de la plate-forme après rabotage avec la raboteuse

(Reprise et évacuation du matériau raboté, GTS, 2000)

d) Le compactage :

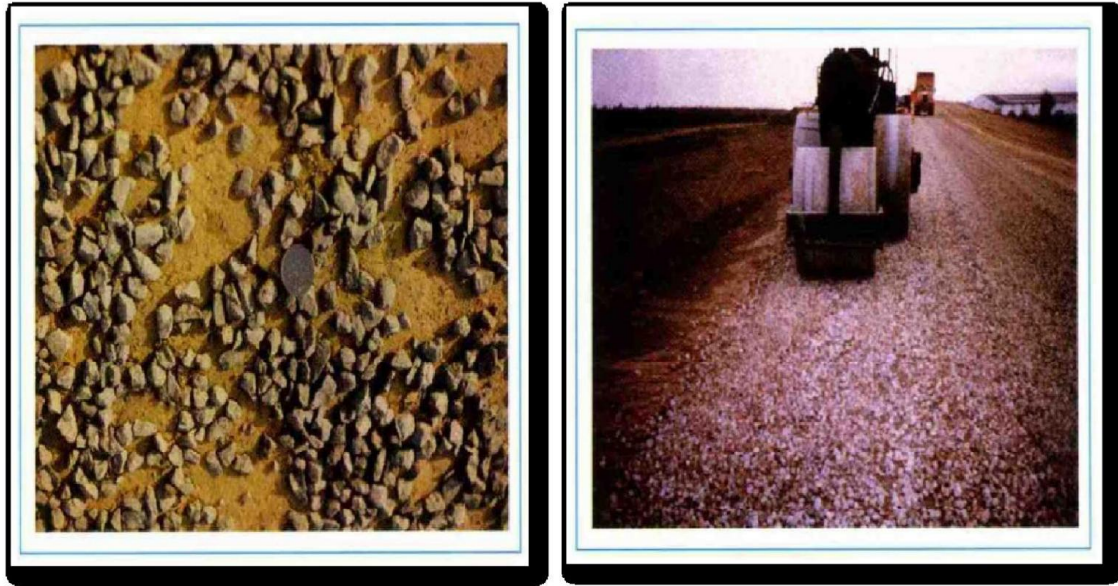
Il a pour objet l'obtention de valeurs de compacité, notamment en fond de couche, conformes à celle prise en compte dans l'étude du dimensionnement de la structure. Il doit se faire également en deux séquences (compactage partiel et compactage final) séparées par l'opération de réglage final. En outre, des moyens complémentaires de compactage sont souvent nécessaires pour résoudre des problèmes spécifiques tels que le feuilletage, le préréglage, la fermeture de surface (figure II.11).



Figure II.11 : Compactage par l'utilisation de rouleaux vibrants à pieds

e) Le cloutage :

Le cloutage est indispensable sur les plates-formes de couche de forme en sols fin traités, son rôle est de permettre l'accrochage de la protection superficielle lourde. Cette opération consiste à épandre, après réglage final et compactage final, des gravillons de coefficient Los-Angeles inférieur ou égal à 35. L'enchâssement doit être exécuté avant la fin du délai de maniabilité par deux à trois passages d'un cylindre lisse fonctionnant sans vibrer (figure II.12).

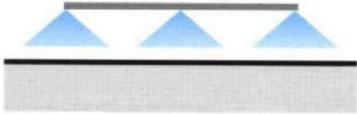
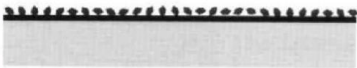


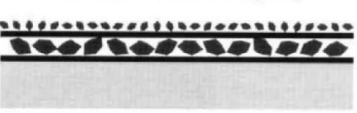
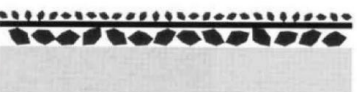


*Figure II.12 : Cloutage avec des gravillons concassés compactés à l'aide des rouleaux lisses
(LCPC-SETRA, 2000)*

f) La protection superficielle :

Elle a pour objet de maîtriser l'évaporation du sol traité et/ou de le protéger de l'imbibition durant la prise hydraulique. Elle a également souvent un rôle de protection vis-à-vis des émissions de poussières et des agressions du trafic de chantier. Pour remplir les rôles pouvant lui être dévolus, elle fait appel à différentes techniques : pulvérisation d'eau, enduit de cure, enduit gravillonné mono ou bicouche, qu'il convient de choisir en fonction du contexte du chantier (figures II.13 et II.14).

Chapitre 02 : Production et utilisation des tufs

Appellation - Schéma	Formulation (par m ²)	Commentaires
Pulvérisation d'eau (P) 	1 à 2 litres d'eau éventuellement additionnée d'un produit hydrophile (Cl2 Ca)	Nécessité de répandre l'eau sous forme finement pulvérisée. Opération à renouveler dès que la surface s'est asséchée et qu'il y a à nouveau formation de poussières.
Enduit de cure par voile d'émulsion (EC) 	0,5 à 0,8 kg d'émulsion* + sable propre ou petits gravillons à refus**	Le sable peut être utilisé uniquement en l'absence de trafic lourd sur sur la couche de forme (cf. tableau C2-VII).
Enduit de scellement (ES) 	0,8 à 1,1 kg d'émulsion* + sable propre ou petits gravillons à refus**	Protection similaire à (EC) mais plus efficace contre la dessiccation si la durée d'exposition est importante. (cf tableau C2-VI)
Enduit monocouche (EM) 	1,3 à 1,6 kg d'émulsion* + 7 à 8 litres de gravillons 4/6** ou 9 à 10 litres de gravillons 6/10**	Le choix du gravillon dépend de l'agressivité du trafic. Le taux d'émulsion peut être augmenté de 5 à 10 % suivant la rugosité du support.
Enduit bicouche (EB) 	1re couche : 1,1 à 1,3 kg d'émulsion* 10 à 11 litres de gravillons 10/14** 2e couche : 1,5 kg d'émulsion* 6 à 7 litres de gravillons 4/6**	L'ajustement de la quantité d'émulsion de la première couche doit être réalisé en fonction de la rugosité du support.
Enduit prégravillonné (EP) 	8 à 9 litres de gravillons 10/14** + 2 kg d'émulsion* + 6 à 7 litres de gravillons 4/6**	Cette protection est comparable à celle obtenue par l'application d'un enduit monocouche sur une plate forme préalablement cloutée.

* Masse surfacique donnée pour une émulsion cationique à 65 % de bitume
 ** Les gravillons doivent avoir un coefficient Los-Angeles ≤ 35 et une propreté (% ≤ 0,08 mm) ≤ 2%

Figure II.13 : Différentes protections superficielles pouvant être appliquées sur une couche de forme en sol traité (LCPC-SETRA, 2000).

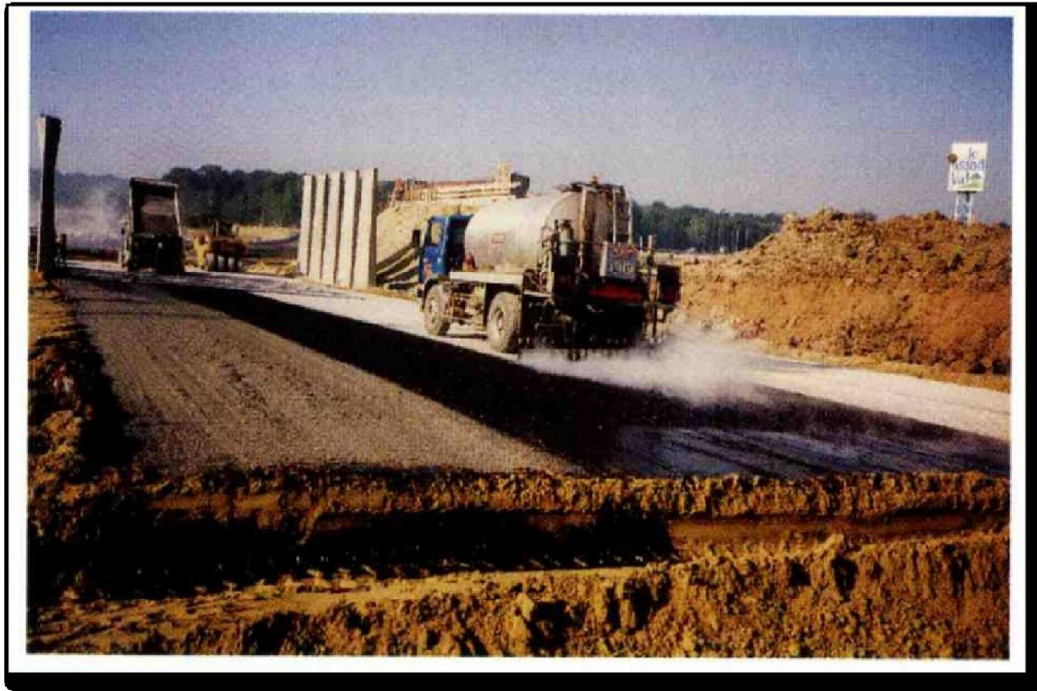


Figure II.14 Exemple de protection superficielle lourde de type « enduit pré gravillonné »

(GTS, 2000)

Dans la figure (II.14) on distingue successivement :

- à l'arrière-plan, la bande cloutée,
- au centre, l'épandage de l'émulsion,
- au premier plan, l'épandage des gravillons.

II.6. Conclusion :

L'exploitation des tufs passe par plusieurs étapes à partir de la recherche des gisements ; suivit par diverses opérations : décapage, extraction, transport.

Les tufs sont utilisés dans plusieurs travaux, en particulier les routes dans les couches de fondation, couches de base, couches de forme, accotement, pistes agricoles, routes moyennement ou fortement circulées et même autoroutes, et remblais.

Ils sont également traités avec de nombreux matériaux, notamment le ciment et la chaux pour améliorer ses caractéristiques mécaniques.

Chapitre III:

Caractérisation et identification du tuf étudié

III.1 Introduction :

Après l'étude théorique des tufs dans les chapitres précédents (chapitre I et II), on va entamer l'étude d'identification du tuf de la Route de l'aéroport d'Adrar. La figure III.1 regroupe les essais qu'on a faits, la figure III.2 présente le site du tuf étudié.

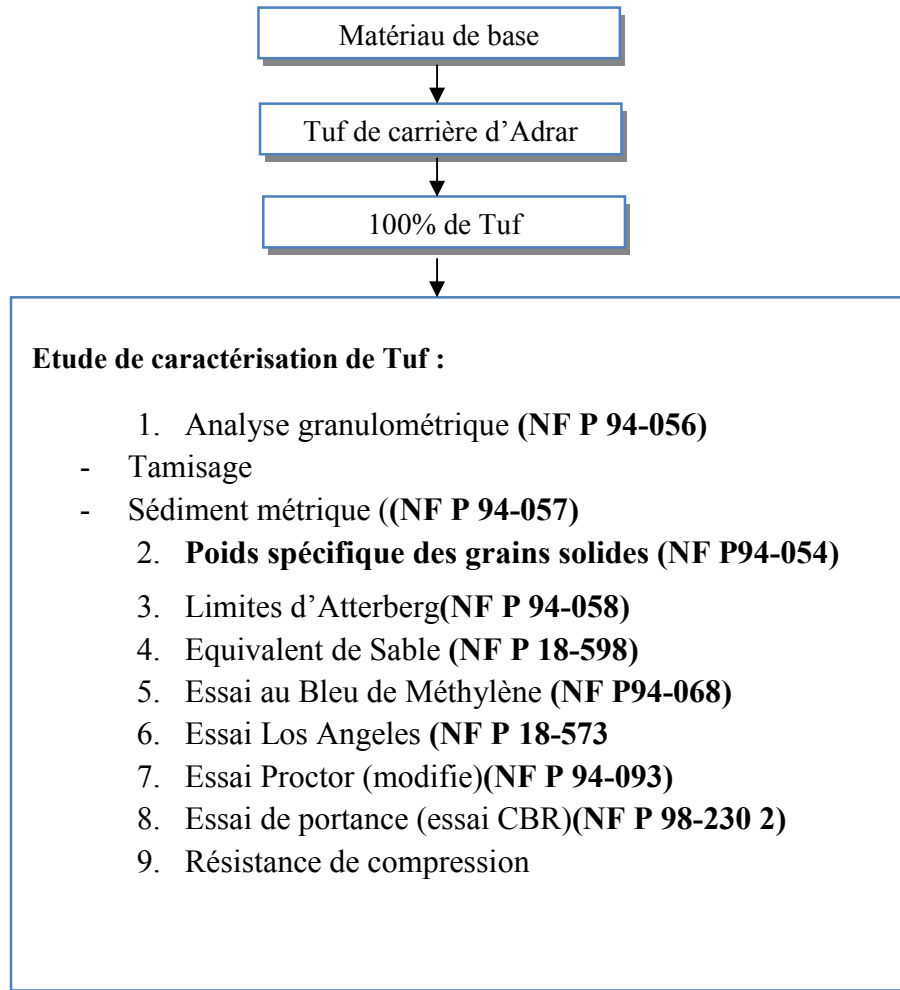


Figure. III. 1: Organigramme de l'étude de l'essai géotechnique



Figure. III. 2. :Gite dutuf de laRoute de l'aéroport d'Adrar (Image satellitaire)

III.2 Échantillonnage :

III.2.1 But :

Le but principal de l'échantillonnage est de prendre une quantité de matériaux de telle sorte que cette quantité soit représentative et assure deux critères fondamentaux.

- la représentativité : l'échantillon prélevé ne doit en aucun cas être sélectif;
- la quantité prélevée doit satisfaire à tous les essais de laboratoire[6].

III.2.2 Principe:

La préparation peut s'effectuer de deux manières différentes :

- a) par quartage ou fractionnement manuel d'une quantité de matériau. cette méthode est à utiliser lorsqu'on a des quantités de matériau importantes,
- b) au moyen de diviseurs «échantillonneurs», appareils séparant en parties égales une quantité de matériau déterminée[7].

III.2.3 Préparation de l'échantillon pour essai:

La préparation doit être réalisée avec le matériau légèrement humide pour éviter la perte d'éléments fins. Si le matériau est sec, il faut l'humidifier légèrement de manière homogène. Veiller à ce que la totalité de l'échantillon reçu soit récupérée de son emballage d'origine[8].

III.2.4 Prélèvement et réduction d'échantillon :

Le prélèvement d'échantillons se fait en deux étapes[8]:

III.2.4.1. Prélèvement sur tas on stock:

Le prélèvement se fait :

Soit à la main, à l'aide d'une planche ou d'une plaque métallique.

Soit à la main, sur tas d'éléments grossiers par ratissage dans un récipient.

III.2.4.2. Réduction d'échantillon :

Au laboratoire avant de procéder à l'opération de réduction on fait l'homogénéisation de l'échantillon et prendre juste la quantité nécessaire à l'essai, elle se fait par deux techniques.

III.2.4.3. Réduction par Quartage :

L'échantillon est divisé en quatre parties égales dont on ne retient que la moitié en réunissant deux quarts opposés. Cette sélection est homogénéisée et un nouveau quartage est effectué, l'opération pouvant se répéter trois ou quatre fois. On obtient ainsi un échantillon représentatif du matériau initial (figure. III. 3).

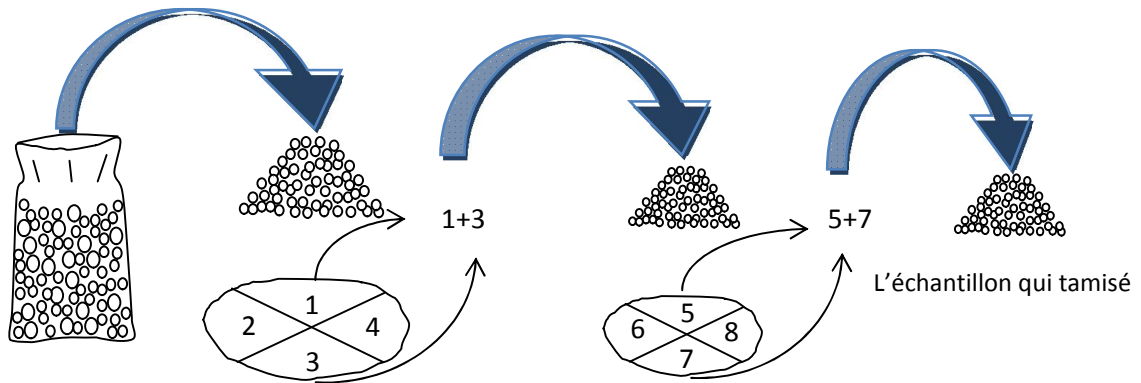


Figure. III. 3. Echantillonnage au laboratoire (Quartage)

III.2.4.4. Réduction par moyen d'échantillonneur :

Cet équipement de laboratoire (Photo.III.1), permet de diviser facilement en deux parties représentatives la totalité d'un échantillon initial, chaque moitié étant recueillie dans un bac de manière séparée.

La répétition en cascade de cette opération, en retenant à chaque opération le contenu de l'un des bacs, permet d'obtenir l'échantillon nécessaire, après trois ou quatre opérations identiques.



Photo. III. 1 : Echantillonneur.

Cette méthode obéit à un protocole d'échantillonnage (Voir figure.III.4).

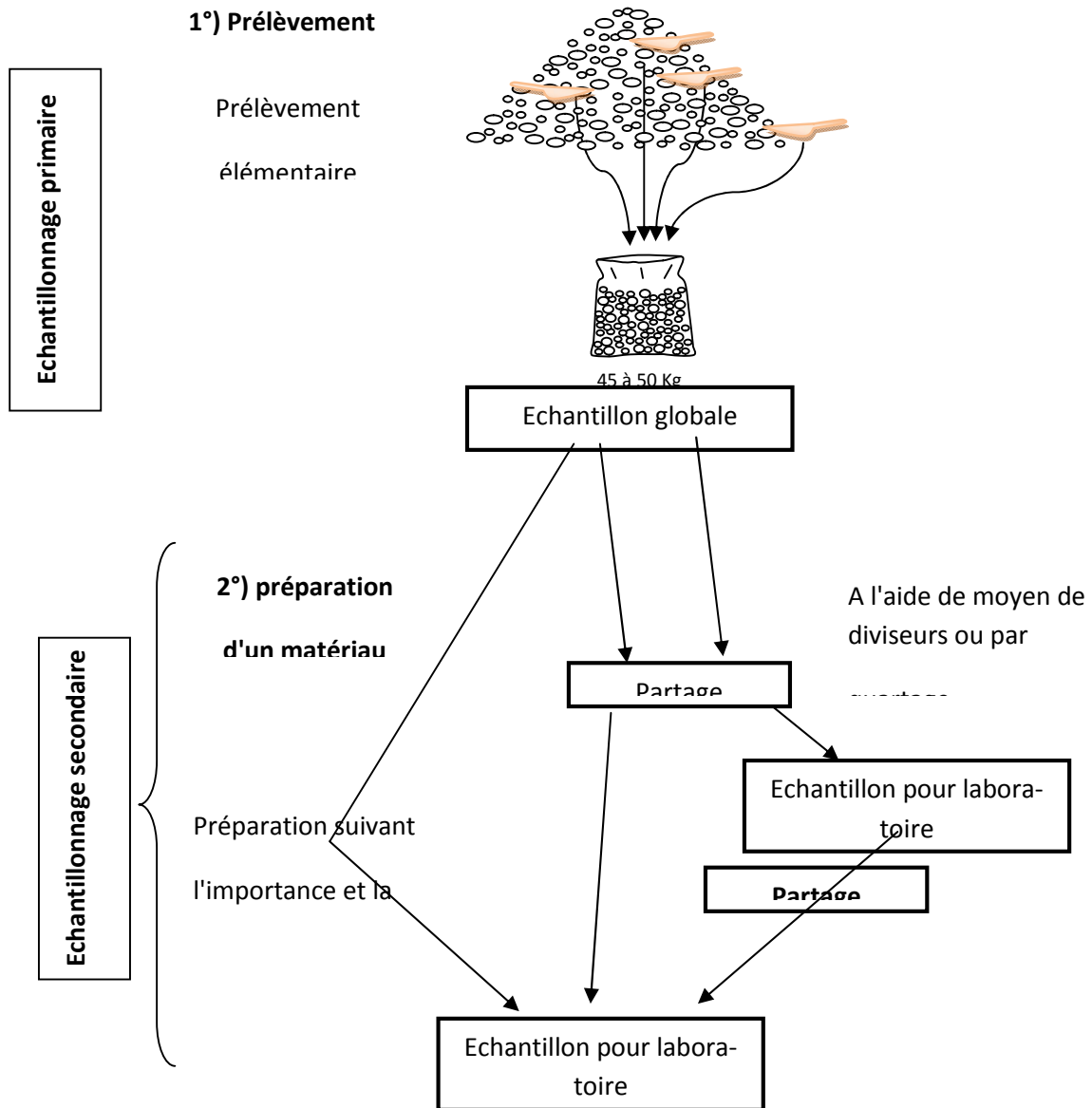


Figure. III. 4 : Schématisation de l'échantillonnage.

III.3 Détermination des caractéristiques :

III.3.1 Analyse granulométrique :

III.3.1.1. 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 [8], pour les particules Inférieure à 80 μm , l'analyse granulométrique se fait par Sédimentométrie (norme NFP 94-057) [8].

III.3.1.2. Analyse granulométrique par tamisage (NF P 94-056):

➤ Principe de l'essai:

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois sèche, au moyen d'une série de tamis et peser successivement. Le refus cumulé surchaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapporté à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse[8].

➤ Dimensions des tamis utilisés:

Pour le tuf, je utilise 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 – 0.08mm

➤ Préparation d'échantillon :

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.

Dans la pratique, la masse utilisée sera telle que: $M \geq 0,2D$ avec M, masse de l'échantillon en kg, et D diamètre du plus gros granulats exprimé en mm[6].

Mode Opérateur : Nous avons effectué cette analyse sur notre échantillon par voie sèche, voir Photo III. 2

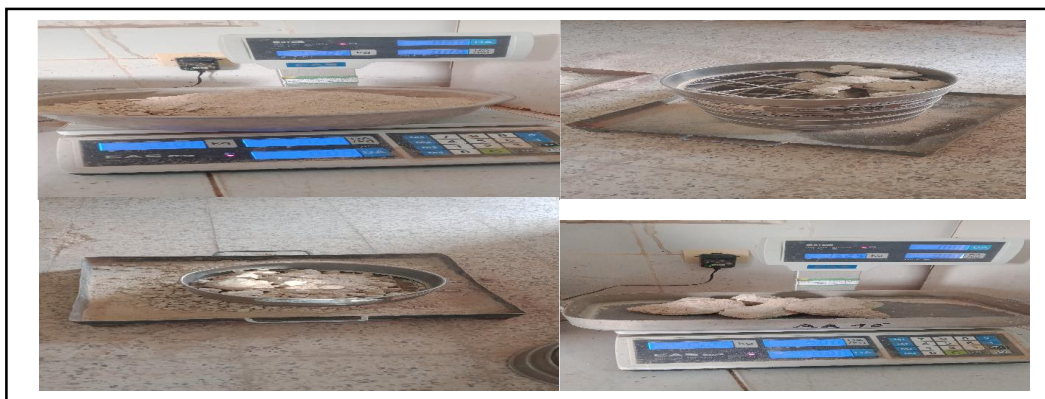


Photo. III. 2 : Mode Opérateur Analyse granulométrique

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

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 à la main.
- Peser les différents refus et déduire les tamisas.

Soit R_i la masse de refus cumulé dans le tamis « i », le calcul des pourcentages des tamisas se fait comme suit : $T_i = (M_0 - R_i) \times 100 / M_0$

B. Partie II

- Prendre une masse M_1 de matériau passant à d_c et le laver au tamis de diamètre 80 μm .
- Placer le refus de tamis 80 μm dans l'étuvage 24 h.
- Tamiser à sec ce refus en utilisant successivement les tamis d_c jusqu'à $d_{80\mu\text{m}}$ dans l'ordre décroissant des dimensions.
- Peser les différents refus et déduire les tamisas.

Soit T_c la masse du tamisât du tamis d_c et R_c son refus, r_i la masse de refus cumulé du tamis « i », le calcul des refus R_i dans cette partie se fait comme suit :

$$R_i = R_c + (T_c \times r_i) / M_1.$$

➤ Méthode de calcul :

Par exemple : sont représentées sur les tableaux ci-dessous (Voir tableaux III-1-et III-2-).

Refus cumulés en (g)_{31.5} = 1525 + 2275 = 3800g

Refus cumulés en (%)_{31.5} = 3800 * 100 / 1600 = 23.75%

Tamisât cumulés en (%)_{31.5} = 100 - 23.75 = 76.25%.

Tableau. III. 1: Résultats l'analyse granulométrique (16000g)

Tuf	Poids de l'échantillon : 16000g				
	Ouvertures de tamis D (mm)	Refus partiel en (g)	Refus cumulés en (g)	Refus cumulés en (%)	Tamisât cumulés en (%)
63	0	0	0	100	
50	1525	1525	9.53	90.47	
31.5	2275	3800	23.75	76.25	
20	1835	5635	35.21	64.79	
10	1869	7504	46.9	53.1	
Fond	8493	15997	59.37	40.62	

Note : La perte ($M - R_c$) doit toujours être inférieur à $0,02 * M = 320\text{g}$. Avec $M = 16000\text{g}$

La perte : $M - R_c = 16000 - 15997 = 3\text{g}$, donc $3\text{g} < 320\text{g} \rightarrow$ le résultat du tamisage est acceptable.

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

Tableau. III. 2 : Résultats de la suite de l'analyse granulométrique (500g)

Tuf	Poids de l'échantillon : 500g				
	Ouvertures de tamis D (mm)	Refus partiel en (g)	Refus cumulés en (g)	Refus cumulés en (%)	Tamisât cumulés en (%)
5		43	43	8.6	91.4
2		36.5	79.5	19.5	80.5
1		57.8	137.3	27.46	72.54
0.4		22.9	160.2	32.04	67.96
0.2		21.9	182.1	36.42	63.58
0.1		67.9	250	50	50
0.08		24.9	274.9	54.98	45.02
Fond		223.1	498	99.6	0.4

Note : La perte ($M - R_c$) doit toujours être inférieure à $(0,02 * M)$, avec $M = 500$ g. $0,02 * 500 = 10$ g.

La perte : $M - R_c = 500 - 498 = 2$ g, donc $2\text{g} < 10\text{g} \rightarrow$ le résultat du tamisage est acceptable.

III.3.1.3. Analyse sédiment métrique (NFP 94-057) :

➤ Principe :

L'essai de l'analyse sédiment métrique 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[9].

➤ Dimensions des tamis utilisés:

Pour le tuf, je utilise les séries des tamis de diamètre – 0.062 – 0.045 – 0.032 – 0.019 – 0.014 – 0.010 – 0.007 – 0.003 – 0.001 mm.

➤ Mode opératoire (Voir Photo. III. 3):



Photo. III. 3 : Mode opératoire de l'analyse Sédimentométrique

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

- Prendre deux éprouvettes à essais de 1 litre de contenance
- Prendre 60cm^3 de défloquant et ajouter 440cm^3 d'eau distillée pour obtenir une solution 500cm^3 .
- Diviser la solution obtenue (500 cm^3 entre les deux éprouvettes à raison de 250 cm^3 chacune.
- Prendre l'une des deux éprouvettes et la compléter avec de l'eau distillée jusqu'à 1 litre. Cette éprouvette sera appelée dorénavant l'éprouvette sera dite l'éprouvette.
- Prendre 40 grammes de sol.
- Verser ces 40 grammes de sol dans le récipient de l'agitateur mécanique et verser de dessus une certaine quantité de la solution de l'éprouvette.
- Procéder à l'agitation mécanique pendant environ 3min.
- Verser la suspension dans l'éprouvette (veillez à bien rincer le récipient et les ailettes de l'agitateur pour ne pas perdre le matériau).
- Compléter l'éprouvette avec de l'eau distillée jusqu'à 1 litre.
- Procéder à une homogénéisation de la suspension à l'aide de l'agitateur manuel.
- Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre, et procéder aux lectures (on les appellera R_t). les temps de lecture sont : 30'' ; 1min ; 2 ; 5 ; 10 ; 30 ; et 60min.
- A la fin des lectures, le densimètre est retiré de l'éprouvette et introduit dans l'éprouvette *B* procéder à la lecture de la densité de la solution de l'éprouvette procéder à la lecture de la densité de la solution de l'éprouvette (on l'appellera R_B).
- Retirer le densimètre, le nettoyer et le ranger définitivement.
- A l'aide du thermomètre, procéder à la lecture de la température de la solution de l'éprouvette[10].

Sont représentées sur le tableau (Voir tableau III-3-).

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

Tableau. III. 3 : Résultat de l'analyse granulométrique par sédimentométrie.

Temps de lecture (Min)	Lecture de nombre de graduation (R_i)	Température T°	Facteur F	(R_B)	(H_i)	P%<D	D(mm)
0.5	1.019	26	0.0127	1.001	12.3	72.4	0.062
1	1.018	26	0.0127	1.001	12.57	86.37	0.045
2	1.017	26	0.0127	1.001	12.85	64.35	0.032
5	1.0155	26	0.0127	1.001	11.86	58.3	0.019
10	1.014	26	0.0127	1.001	12.275	52.27	0.014
20	1.012	26	0.0127	1.001	12.825	44.23	0.010
40	1.0115	26	0.0127	1.001	12.962	42.22	0.007
80	1.011	27	0.0128	1.001	13.1	40.21	0.005
240	1.010	27	0.0128	1.001	13.375	36.18	0.003
1440	1.001	27	0.0128	1.001	15.85	0	0.001

Tracé de la courbe granulométrique : Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisât cumulés sur une feuille semi-logarithmique :

- En abscisse : les dimensions des mailles, échelle logarithmique
- En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.

La courbe doit être tracée de manière continue.

La forme de la courbe granulométrique obtenue apporte les renseignements suivants :

- Les dimensions d et D du granulat,
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins,
- La continuité ou la discontinuité de la granularité.

Voir (annexe 01parti (a)) pour tracer la courbe (Figure III. 5)

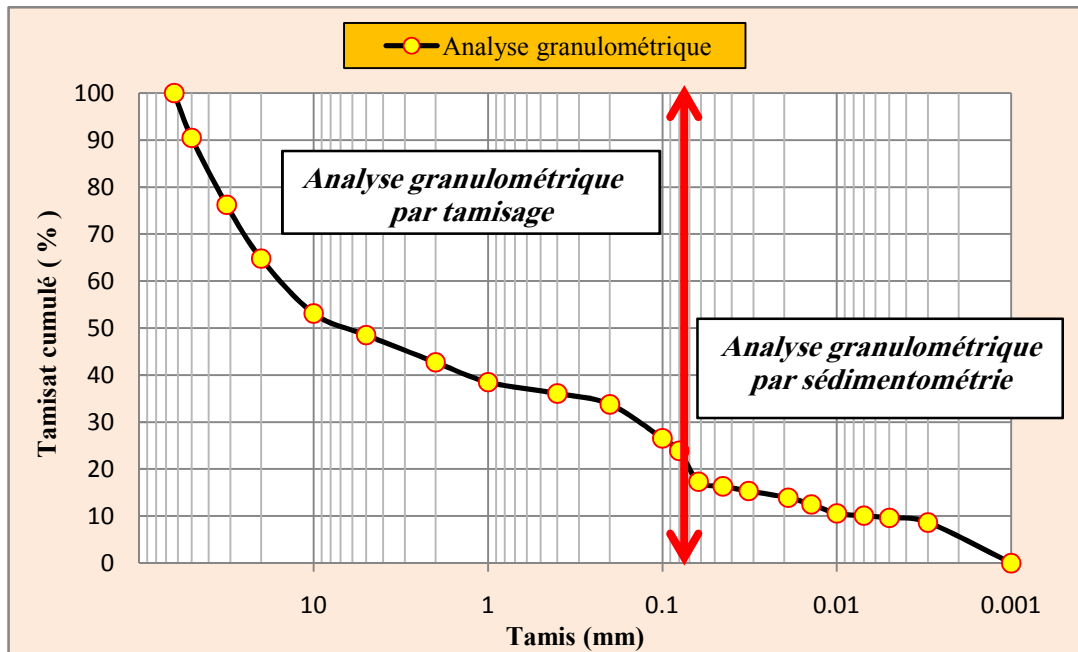


Figure. III. 5 : Courbe granulométrique d'échantillon du tuf étudié

➤ **Expression des résultats:**

Résultats de l'analyse granulométrique du tuf, sont représentés sur le tableau (Voir tableau III-4-).

Calcul des résultats selon la formule suivante :

$$Tc\% = 100 - Rc\% \tag{1}$$

$$Rc\% = \frac{Rc(g) \cdot 100}{M} \tag{2}$$

$$600D \geq M \geq 200D \tag{3}$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \tag{4}$$

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{5}$$

Rc : Refus cumulés.

Tc : Tamisât cumulés.

Cu : Le coefficient d'uniformité.

Cc : Le coefficient de courbure.

M : Masse de l'échantillon exprimé en grammes.

D : Dimension maximale des plus gros éléments appréciée visuellement et exprimée en millimètres.

- Tuf :

$$D = 63\text{mm} \rightarrow 37800\text{ g. } \geq M \geq 12600\text{ g.}$$

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

On prend : $M = 16000\text{g} = 16\text{kg}$.

Tableau. III. 4 : Résultats récapitulatif de l'analyse granulométrique.

Échantillon		Tuf
0/D		0/63
D ₁₀ (mm)		0,01
D ₃₀ (mm)		0,15
D ₆₀ (mm)		17
Fraction 80µm	R _C (%)	76,1
	T _C (%)	23,9
Fraction 2mm	R _C (%)	66,24
C _U		1700
C _C		0,13

Le tamisât du d'où la nécessité de compléter l'analyse granulométrique par tamisage passer à l'analyse sédiment métrique. Avec $C_u > 200$ donc Classe de granulométrie est Granulométrie très étalée ; 0,08 mm représente 23.9% de l'échantillon (donc supérieure à 5% de l'échantillon) Voir annexe 01 parti (b).

III.3.2 Poids spécifique des grains solides (NF P94-054) :

III.3.2.1. Définition :

Le poids spécifique des grains d'un sol (γ_s) est le quotient du poids de ses grains solide (W_s) par leur volume absolu (V_s).

C'est un rapport exprimé en (g/cm^3 , kg/m^3) de la quantité de la masse (M_s) des grains solides après un étuvage d'une durée de 24h à une température de 105°C au volume absolu (V_s) (volume des grains solides à l'état sec) de l'échantillon.

$$\gamma_s = w_s/v_s(6)$$

γ_s : poids spécifique des grains solides.

W_s : poids du sol sec.

V_s : volume absolu des grains solides.

III.3.2.2. But :

Le but de cet essai est la détermination du poids spécifique du matériau étudié

III.3.2.3. Mode opératoire : (Voir Photo III. 4)

- Etalonnage de pycnomètre :

Cette méthode consiste à déterminer le volume absolu à l'aide d'un pycnomètre :

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

- Le volume du pycnomètre pouvant varier avec la température l'étalonnage doit être refait pour chaque essai.
- Prendre un pycnomètre, le peser l'avoir lavé et séché, soit (W1) de poids.
- Remplir le pycnomètre jusqu'à la base du col d'eau distillée, éliminer toutes les bulles d'air. Compléter le remplissage du pycnomètre à l'eau distillée jusqu'au repère.
- Attendre que l'équilibre de température entre le pycnomètre et l'eau soit atteint relever la température.
- Sécher l'extérieur du pycnomètre et peser. Soit (W2) de poids.
- Vide le pycnomètre de son contenu, le séché.
- Prélever approximativement 25g de matériau sec si le sol n'est pas cohérent et 10g s'il est cohérent.
- Mettre l'échantillon ainsi prélevé dans le pycnomètre et mesurer le poids. Soit (W3).
- Compléter au trois quart avec de l'eau distillée, chasser les bulles d'air.
- Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au repère, relever le poids. soit (W4) de poids.

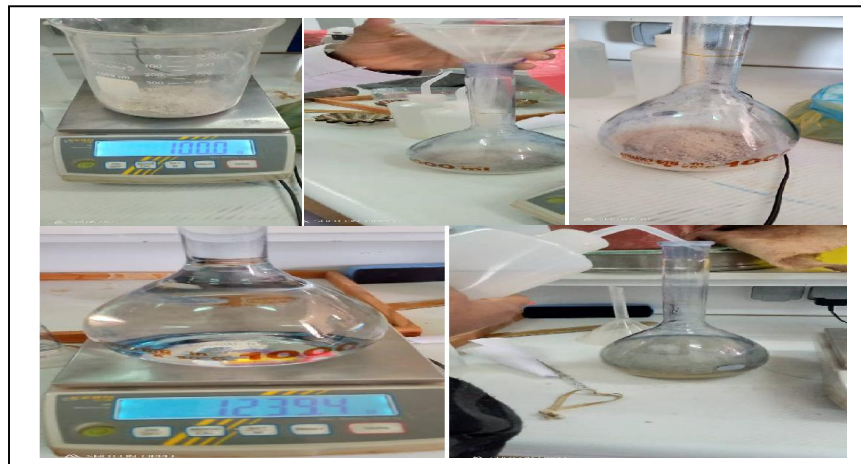


Photo. III. 4 : Mode opératoire de détermination du poids spécifique

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

Résultats obtenus : sont représentées sur le tableau III. 5

Tableau. III. 5: Résultats de détermination du poids spécifique

Essais	Unité	Essai 01	Essai 02	Essai 03
Poids de pycnomètre vide (W1)	g	243,80	244,50	244,10
Poids de pycnomètre + eau (W2)	g	1239,10	1240,10	1239,50
Poids de pycnomètre +échantillon (W3)	g	343,80	344,50	344,10
γ_w	g/cm ³	1,00	1,00	1,00
Poids de pycnomètre +échantillon + eau (W4)	g	1301,90	1301,20	1301,10
Poids du matériau (Ws= W3-W1)	g	100,00	100,00	100,00
Le volume du matériau (Vs= (W2-W1)-(W4-W3)/ γ_w)	cm ³	33,74	35,44	34,94
Poids spécifique des grains Solides ($\gamma_s=W_s/V_s$)	g/cm ³	2,96	2,82	2,86

III.3.1 Qualité des fines :

Ce sont surtout les fines argileuses qui posent des problèmes pour les matériaux routiers. Leur influence est généralement caractérisée par les essais au laboratoire, tels que [1]

- Les limites d'Atterberg ;
- L'équivalent de sable ;
- Bleu de Méthylène ;
- Les limites d'Atterberg (NF P 94-058) :

➤ Principe:

L'essai s'effectue en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristique imposée se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés ;

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure[11].

➤ Appareillage :

Appareil de Casagrande, outil à rainure, Balance, Tares, étuve.(Voir Photo.III. 5)



Photo. III. 5. :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:(Voir Photo III. 6)

- Mettre une quantité de l'échantillon dans la coupelle environ 3/4 de son volume, et l'éta-ler ;
- 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 séché 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 $N = 25$.



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

B. Limite de plasticité:(Voir Photo III. 7)

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 baguettes 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 : $I_p = \omega_L - \omega_p$



Photo. III. 7: Etapes de l'essai de limite de plasticité

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

➤ Expression des résultats:

Tableau. III. 6 : Résultats de l'essai limitée de liquidité

Limite de liquidité	1		2		3	
Essai	B+7	A6	XA	L	KL	NF
N° de tare	B+7	A6	XA	L	KL	NF
Poids T humide(sol + tare) $P_{th}(g)$	14.5	21	14.8	17.1	18.2	18.1
Poids T sèche (sol+tare) $P_{ts}(g)$	8.8	8.9	9.4	9.2	8.6	9.6
Poids de la tare $P_t(g)$	13.1	17.9	13.5	15.4	16.1	16.3
Poids d'eau $P_w=P_{th}-P_{ts}(g)$	1.4	3.1	1.3	1.7	2.1	1.8
Poids sec $P_s=P_{ts}-P_t(g)$	4.3	9	4.1	6.2	7.5	6.7
Teneur en eau $\omega_N = P_w / P_s (\%)$	0.33	0.34	0.32	0.27	0.28	0.27
Teneur en eau moyenne (%)	0.34		0.30		0.27	
Nombre de coups	18		24		30	

Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans un sol placé dans une coupelle se referme sur 1cm lorsque celle-ci et son contenu sont soumis à 25 chocs répété. Sont représentées sur Figure. III. 6

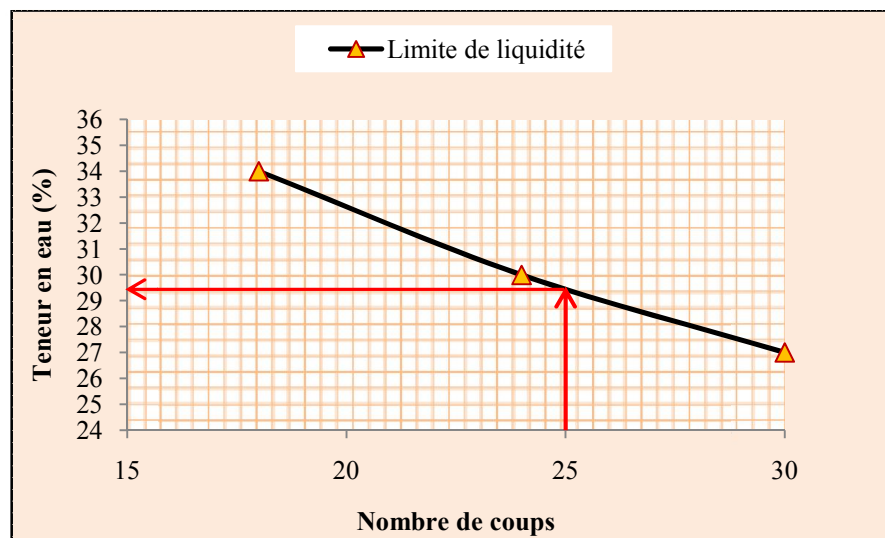


Figure. III. 6. Courbe limitée de liquidité

D'après la courbe de la limite de liquidité, on déduit ω_N correspondante à N (nombre de coups) = 25 est $\omega_N = 29,5\%$.

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

Tableau. III. 7 : Résultats de l'essai limitée de plasticité

Limite de plasticité			
N° de tare	L8	N	MI
Poids T humide (sol+tare) $P_{th}(g)$	13.6	12.6	13.4
Poids T sèche (sol+tare) $(g)P_{ts}$	9.3	8.8	8.8
Poids de la tare $(g) P_t$	12.7	12.1	12.6
Poids d'eau $(P_w=P_{th}-P_{ts}) (g)$	0.9	0.5	0,8
Poids sec $(P_s=P_{ts}-P_t)(g)$	3.4	3.3	3,8
Teneur en eau $(W_p= P_w /P_s) (%)$	0.26	0.15	0.21
Teneur en eau moyenne $(W_p) (%)$	0.21		

D'après ces résultats nous avons fait la classification géotechnique de notre échantillon selon le système de classification géotechnique USCS .Nous avons trouvé que l'échantillon se classe comme un sable argileux peu plastique (Figure III.7).

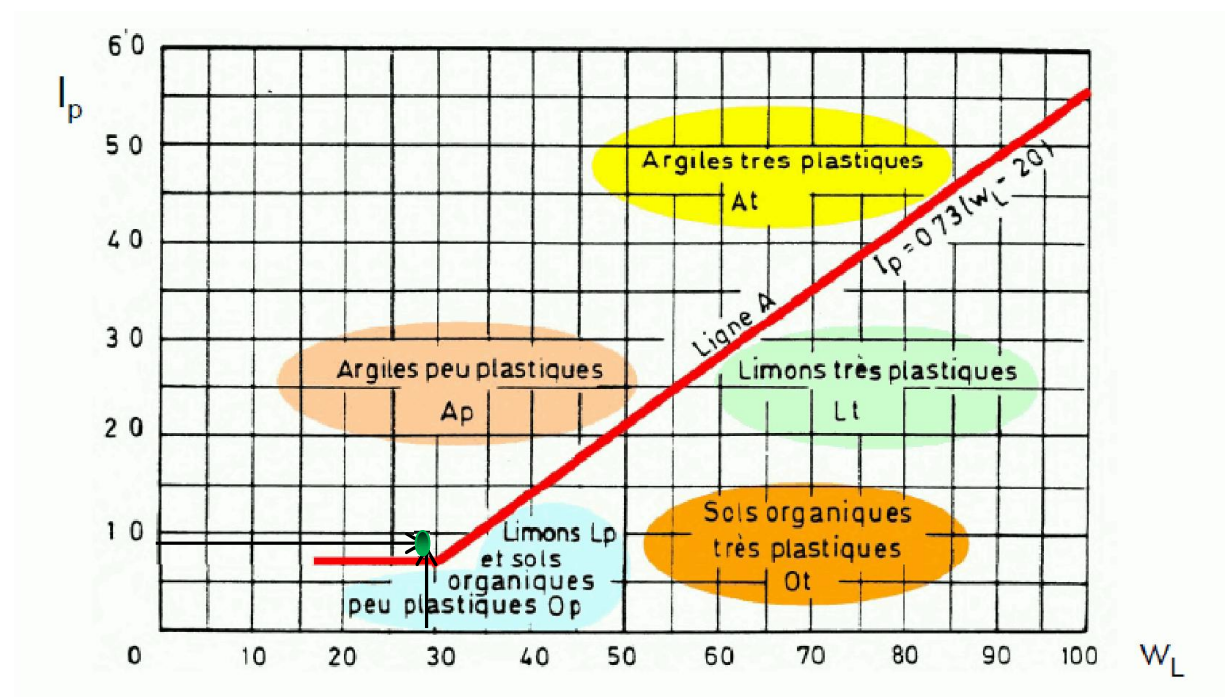


Figure. III. 7 : Positionnement du tuf étudié dans l'abaque de plasticité de Casagrande

Résultats de limites d'Atterberg du tuf, (Tableau III- 6- Tableau III- 7-)

Calcule des résultats selon les formules suivantes :

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

$$W_L = \omega_N (N/25)^{0,121} (7)$$

$$W_L = 29,5(25/25)^{0,121} = 29,5\%$$

$$W_L = 30\%; \quad W_P = 21\%$$

$$I_p = W_L - W_P \quad (8)$$

$$I_p = 29,5 - 21 = 8,5\%$$

$$I_c = (W_L - \omega_N) / I_p \quad (9)$$

$$I_c = (29,5 - 29,5) / 8,5 = 0 \quad \text{donc si matériau à l'état liquide ;}$$

$I_c = 0$ si matériau à l'état liquide

$I_c = 1$ si matériau à l'état solide

W_L : Limite de liquidité.

W_P : Limite de plasticité.

W : Teneur en eau naturelle d'argile.

I_p : Indice de plasticité.

N : Nombre de coups.

ω_N : La teneur en eau correspondant au nombre de coups N .

Tableau. III. 8 : Résultats de l'essai Limite d'Atterberg.

W_L (%)	W_P (%)	I_p (%)
29,5	21	9

Tableau. III. 9 : Classification suivant I_p

Indice de plasticité	Etat du sol
$0 < I_p < 5$	Non plastique
$5 < I_p < 15$	Peu plastique
$15 < I_p < 40$	Plastique
> 40	Très plastique

$I_p = 9\%$ (Tableau III- 8-) c'est-à-dire supérieur à 5 et inférieur à 15, Ceci peut donner une indication intéressante sur la nature argileuse peu plastique ($5 < I_p < 15$ %) de ces fines (Tableau III.9)

III.3.2.1. L'Equivalent de Sable (NF P 18-598):

➤ Principe de l'essai

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

La hauteur h_1 : sable propre + éléments fins

La hauteur h'_2 : sable propre seulement

La hauteur h_2 : sable propre seulement

Le mode opératoire a une grande influence sur le résultat donc il faut le suivre scrupuleusement. L'essai est effectué sur un échantillon de 120 g de grains. Il est préférable d'utiliser un échantillon humide, pour éviter les pertes des éléments fins du sol.

➤ Matériels de l'essai

Éprouvettes en Plexiglas avec deux traits repères et leurs bouchons, Entonnoir, Bonne de solution lavante avec son bouchon, le siphon et le tube souple, Tube laveur métallique plongeant, Réglét métallique, Piston taré à masse de 1 kg pour la mesure de l'ES.

Mode opératoire :(Voir Photo III. 8)

Remplir les éprouvettes avec la solution lavante, jusqu'au premier trait.

- Verser la quantité de sable voulue et éliminé les bulles d'air.
 - Boucher les éprouvettes et les agiter par des mouvements rectilignes horizontaux de 20 cm d'amplitude, 90 allers retours en 30 secondes (effectués de manière automatique par la machine, si possible).
 - Laver et remplir les éprouvettes, avec le tube plongeur
 - Sortir le tube, fermer le robinet lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur puis laisser reposer 20 mn en évitant toute vibration. La tolérance sur le temps de repos est faible (plus ou moins 10 sec) car la hauteur du floculat dépend fortement de celui-ci.
 - Mesurer à vue les hauteurs h_1 et h'_2
- La mesure de h'_2 n'est pas toujours aisée donc l' ES_V qui en découle contient des incertitudes. Il faut donc procéder de manière précise pour déterminer l'ES en utilisant la méthode du piston.

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

- Descendre le piston taré dans le liquide à travers le flocculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette, et l'immobiliser au contact du sable. Mesurer alors h_2 .

Ces opérations sont identiques pour les 2 éprouvettes réalisées sur chaque sable. Les Mesures h_1 , h'_2 et h_2 doivent être faites avec la précision du mm



Photo. III. 8: Mode opératoire de l'essai Equivalent de sable

➤ Expression des résultats :(voire tableau III. 10)

Résultats d'équivalent de sable du tuf.

Calcul des résultats selon la formule suivante :

L'équivalent de sable visuel est donné par la formule :

$$ESv = \left(\frac{h_2}{h_1}\right) * 100(10)$$

L'équivalent de sable par piston est dans les mêmes conditions, donné par la formule :

$$ESp = \left(\frac{h'_2}{h_1}\right) * 100 \quad (11)$$

ESv : La valeur de l'équivalent de sable visuel.

ESp : La valeur de l'équivalent de sable par piston.

h_1 : Hauteur (sable+ éléments fines).

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

h2 : Hauteur (sable propre seulement) ;(visuel).

h'2 : Hauteur (sable propre seulement) ;(par piston).

Selon que la hauteur h2 est mesurée visuellement ou à l'aide du piston en déterminer un :

ESv(visuel) ou Esp(par piston).

$$ES = (ESv + Esp)/2 \quad (12)$$

Tableau. III. 10 : Résultats d'équivalent de sable du tuf.

Echantillon	Tuf		
N° de l'essai	1	2	3
La hauteur h1(cm)	33.5	31.1	32
La hauteur h2(cm)	3.3	2.9	2.7
La hauteur h'2(cm)	9	8	7.5
ESv(%)	26.86	25.72	23.43
ESvmoyenne(%)	25.33		
ESp(%)	9.85	9.32	9.43
Espmoyenne(%)	9.53		
ES (%)	17.43		

Ces résultats coïncident bien avec les résultats des limites de consistance et les résultats de l'analyse granulométrique, la valeur de l'équivalence de sable est 17.43%. Ces valeurs montrent bien qu'il y a des éléments fins. A titre d'indication, (le tableau III-11-) donne des valeurs de ES minimum pour la construction routière proposée par **Hreem**[1].

Tableau. III. 11 : Spécification d'ES pour la construction des chaussées

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

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

Tableau. III. 12 : Nature et qualité du sable en fonction de l'ES.

ES	Nature et qualité du sable
ES<60	Sable argileux-Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons qualité.
60<ES<70	Sable légèrement argileux- de propreté admissible pour béton de qualité quand ou ne craint pas particulièrement de retrait.
70<ES<80	Sable propre- à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.
>80	Sable très propre- l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

D'après les tableaux III.10 et III.12, le tuf est unsable argileux, risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons qualité.

III.3.2.2. Essai au Bleu de Méthylène (NF P94-068):

➤ **But de l'essai:**

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 argileuse

s contenues dans les sables et graves d'origines naturelle ou artificielle[6].

➤ **Principe de l'essai**

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[12].

➤ **Matériel à utiliser :**

Papier filtre, burette, agitateur magnétique, Bécher, chronomètre, Balance et une solution de bleu de méthylène (10g de bleu en poudre dans un litre d'eau), Baguette en verre et gants[6].

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

➤ Mode opératoire : (voir Photo III. 9)

L'adsorption doit effectuer sur 30 à 60g de matériau sec mis à tremper avec 500ml d'eau dans un bécher et maintenu en permanence sous agitation. On mesure la valeur de bleu par dosage en procédant par des additions successives de bleu de méthylène (5 à 10 ml), jusqu'à ce que claire particules argileuses soient saturées. On observe alors un excès de bleu, qui marque la fin de l'essai et que l'on détecte par le test dit à la tâche. Ce dernier consiste à former avec une goutte de la suspension déposée à l'aide d'une baguette en verre sur du papier filtre normalisée, une tache qui est en fait un dépôt de sol coloré en bleu entouré d'une zone humide en général incolore; l'excès de bleu se traduit par l'apparition, autour de la tâche, d'auréole bleu-claire. On dit alors que le test est positif[6].

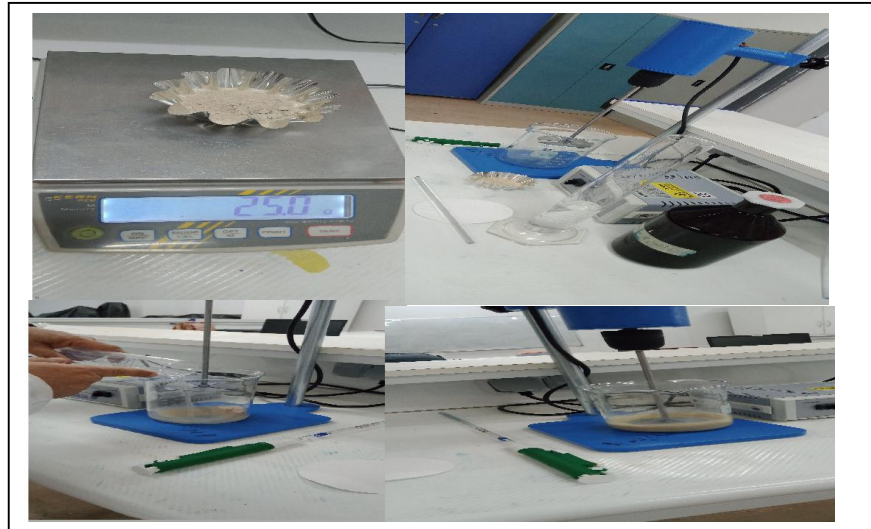


Photo. III. 9: Mode opératoire de l'essai bleu de méthylène

➤ Expression des résultats :(voirPhoto III. 10)

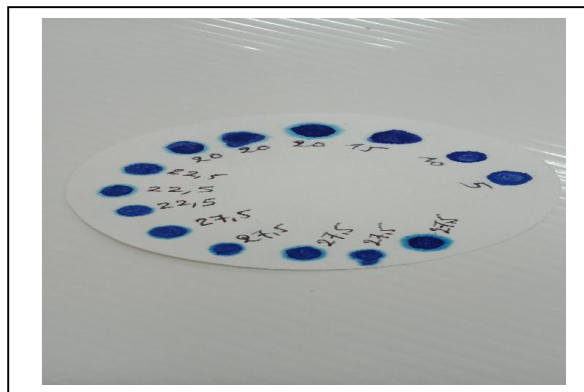


Photo. III. 10: Résultats de l'essai la valeur de bleu

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

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.

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.

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

Résultats de l'essai la valeur de bleu du tuf (voir Tableau. III-13-) :

Calcul des résultats selon la formule suivante :

La valeur de bleu est :

$$V_b(0/d) = \frac{\text{Quantité du bleu absorbé (cm}^3\text{)}}{\text{Poids sec de la prise (g)}} \quad (13)$$

Note : Le poids sec de la prise du tuf et de sable dans l'essai est 25g mais l'argile on prendre 10g.

$$\text{Tuf} \rightarrow V_b(0/5) = 27,5/25 = 1,1 \text{ cm}^3/\text{g}$$

Connaissant la valeur du bleu de la fraction 0/5, on peut calculer celle de la fraction globale 0/D à partir de la courbe granulométrique du sol.

$$V_{BS}(0/D) = \frac{V_b(0/d).C_d}{100} \quad (14)$$

$$\text{Tuf} \rightarrow V_{BS}(0/D) = \frac{V_b(0/d).C_d}{100} = \frac{1,1 \cdot 59,02}{100} = 1,04$$

Avec : Cd est la proportion de la classe granulaire 0/d dans la fraction totale 0/D.

La surface spécifique totale SST est calculée d'après la formule ci-dessous :

$$SST = 20,93 \cdot V_{BS} \quad (15)$$

$$\text{Tuf} \rightarrow SST = 20,93 \cdot 1,1 = 23,023 \text{ m}^2/\text{g}$$

Déterminer le coefficient d'activité CA.

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

$$C_A = \frac{V_B(0/D)}{\% 2 \mu\text{m}} (16)$$

$$C_A = \frac{1,04 * 100}{2} = 52\%$$

Tableau. III. 13: Résultats de l'essai la valeur du bleu (tuf)

Echantillon	Tuf
Valeur de bleu méthylène $V_b(0/d)$ (cm^3/g)	1,1
	1,04
Surface spécifique (m^2/g)	23,023

Si nous adoptons la classification de Colombier (1988) retenue pour les sables, aux tufs d'encroutements, nous trouvons que nos deux échantillons sont peu pollués.

$V_B < 0,2$ matériau propre ;

$0,2 < V_B < 0,5$ matériau propre ;

$0,5 < V_B < 1$ matériau pollué ;

$V_B > 1$ matériau très pollué ;

Les spécifications actuelles pour les couches de chaussées (SETRA-LCPC, 1981) sont :

- Pour les enrobés bitumineux : $V_B < 1$
- Pour les graves non traités et traités : $V_B < 1,5$
- Pour les sables non traités et traités : $V_B < 0,5$

Si nous considérons les tufs comme étant des sables, nous remarquons que le tuf vérifie la condition pour son utilisation en couches de chaussées.

Les ordres de grandeurs des valeurs du bleu des sols d'après Philipponnat (1997) sont représentés dans le tableau III.14.

Tableau. III. 14 : Classifications des sols d'aprèsPhilipponnat(1997).

La valeur de bleu	Type de sol
$V_B < 0,2$	Sols sableux, sensible à l'eau
$0,2 < V_B < 2,5$	Sols limoneux, sensible à l'eau et peu plastique
$2,5 < V_B < 6$	Sols limoneux-argileux, plasticité
$6 < V_B < 8$	Sols argileux
$V_B > 8$	Sols très argileux

Note :Les valeurs du bleu trouvées nous indiquent que le tuf a un caractère limoneux, sensible à l'eau et peu plastique.

III.3.2 Essai los Angeles (Résistance au chocNF P 18-573):

➤ But de l'essai

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 [6].

➤ Principe de l'essai :(Voir Photo.III.11)

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[6].



Photo. III. 11 :Machine de Los Angeles

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

➤ Equipement nécessaire : (Voir Photo.III.12)

- 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[6].



Photo. III. 12 : Mode opératoire de los Angeles

➤ Mode opératoire :

Nous avons choisi deux classes granulaires pour l'échantillon parmi les six classes granulaires citées au Tableau III-15.

Tableau. III. 15 : Charge de boulettes pour l'essai Los Angeles.

Classe granulaire (mm)	Nombre de Boulettes	Masse total de la charge (g)
4 – 6.3	7	3080
6.3 –10	9	3960
10 – 14	11	4840
10 – 25	11	4840
16 – 31.5	12	5280
25 – 50	12	5280

- Tamiser à sec selon la classe granulaire.
- Peser 5000 g et la charge abrasive correspondante.
- Introduire l'échantillon et la charge abrasive, et lancer la machine 500 tours.
- Recueillir le matériau et tamiser sur un tamis 1.6mm.

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

- Après séchage peser le refus en gramme m.

$$L_A = \frac{5000 - m}{5000} 100$$

➤ Expression des résultats :

Le tableau III-16 donne les valeurs du coefficient L_A pour les deux classes granulaires de notre échantillon étudié. Nous constatons que le coefficient L_A de l'échantillon de tuf dépasse beaucoup les 40 généralement fixés par les spécifications de chaussées (tableau III-17) et ceci pour les deux classes granulaires étudiées.

Tableau. III. 16 : Valeurs des coefficients de Los Angeles.

Classe granulaire (mm)	Nombre de Boulettes	masse (g)	Valeurs LA (%)	Masse après étuvage (g)
16 – 31.5	12	618	87,64	554,2
10 – 25	11	609,7	87,81	503,4

Tableau. III. 17 : Spécification du coefficient L_A pour couches d'assises de chaussées.

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

Tableau. III. 18: Représentées valeurs du coefficient LA.

Coefficient LA	Appréciation
≤ 15	Très bon à bon
15 à 20	Bonne à moyenne
20 à 30	Moyen à faible
≥ 30	Médiocre

Le Tableau II.18 donne le coefficient Los Angeles à une valeur égale à 87,64% et 87,81% donc c'est un tuf médiocre.

III.3.3 Essai de compactage et de portance :

III.3.5.1. Essai Proctor Modifié :

➤ **But de l'essai :**

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[13].

➤ **Principe de l'essai**

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 [14].

➤ **Matériel nécessaire :**

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 [13].

➤ **Mode opératoire :** (Voir Photo.III.13)



Photo. III. 13 : mode opératoire Proctor Modifié

- 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 tamisât;
- 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 (5,5kg);

➤ **Expression des résultats:** Résultats de l'essai Proctor modifié du tuf :

Tableau. III. 19 : Résultats de l'essai Proctor Modifié

<i>Proctor Modifié</i>										
Tare	Haut (C.6)	Bas (8)	Haut (XD)	Bas (G)	Haut (N)	Bas (A3)	Haut (A1)	Bas (A7)	Haut (A)	Bas (H)
Pth(g)	73,3	81,5	80,9	82,8	104,3	87,5	104,2	93,4	118,8	116,7
Pts (g)	71,3	79,1	77,5	79,2	97,9	82,6	96,8	86,8	110,2	108,5
Pt (g)	20,8	20,8	21	21,4	20,7	20,8	20,9	20,9	38,4	37,4
Pw (g)	2	2,4	3,4	3,6	6,4	4,9	7,4	6,6	8,9	8,2
$\gamma_d = P_s/v$ (g/cm ³)	1,97		2		2,01		1,99		1,97	
P _s (g)	50,5	58,3	56,5	57,8	77,2	61,8	75,9	65,9	71,8	71,1
$\omega = P_w/P_s$ (%)	3,96	4,11	6,01	6,22	8,29	7,92	9,74	10,01	12,39	11,53
$\omega\%$	4,03		6,11		8,1		9,87		11,96	

Les résultats des essais sont présentés sur la figure III.8. Le tuf présente une courbe plus concave que celle du sable calcaire. Les courbes présentent une grande pente, ceci explique la sensibilité de la densité sèche de nos échantillons à la teneur en eau lorsque celle-ci varie jusqu'à l'OPM. Ce qui explique bien l'influence de l'eau sur les fines existantes

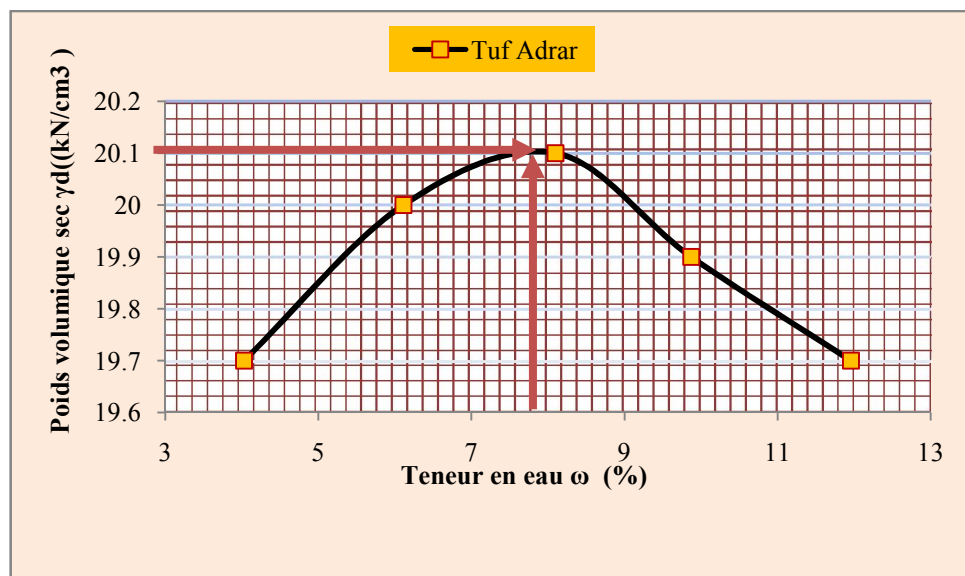


Figure. III. 8. Courbe de Proctor Modifié du tuf étudié

$$\omega_{opt} (\%) = 8.00 \text{ et } \gamma_{dmax} = 20,1 \text{ kN/cm}^3$$

Le tableau III-20 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. III. 20 : Caractéristiques de compactage pour quelques matériaux routiers

Nature de matériaux	$\gamma_d \text{ max (t / m}^3\text{)}$	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

III.3.5.2. Essai CBR (NF P 98-230 2) :

➤ But de l'essai

Déterminer un indice (l'indice CBR) permettant de calculer grâce à des abaques, l'épaisseur des couches de fondation d'une route nécessaires à la constitution d'une chaussée en fonction [13]:

- du sol sous-jacent;
- du trafic et des charges par essieu prévus;
- des conditions hydriques futures que subira cette route.

➤ Principe de la méthode

L'indice CBR est déterminé pour des sols à vocation routière de manière purement empirique.

Après avoir compacté le matériau dans les conditions de l'essai Proctor modifié, on lui applique les conditions hydriques prévues [13]:

- Immersion pendant 4 jours dans l'eau;
- Immersion pendant 2 jours dans l'eau;
- Immersion pendant 4 heures dans l'eau;

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

- Pas d'immersion : essai immédiat;

Le matériau à étudier étant placé dans un moule dans un état donné de densité et de teneur en eau, on applique ensuite une charge voisine de ce que sera la charge de service, puis on le poinçonne par un piston tout en mesurant les efforts et déplacements résultants.

Une comparaison de ces résultats avec ceux obtenus sur un sol de référence (californien) est ensuite effectuée (voir définition de l'indice CBR ci-avant).

➤ **Matériel nécessaire**

Le même matériel de Proctor modifié plus :

Poinçonneuse CBR (piston de section $19,3 \text{ cm}^2$; vitesse d'enfoncement $1,27 \text{ mm/min}$; force maxi 50 KN) ; Capteur de déplacement (précision $\pm 0,01 \text{ mm}$) et support associé; Disque de surcharge (au moins 2 disques ou encore 4 demi disques); Disque de papier filtre (au fond de moule CBR pour éviter le départ des fines du sol).

➤ **Mode opératoire.**

1. Essai CBR immédiat

- Compacter à la teneur en eau égale à w_{opm} suivant le processus de l'essai PM
- Araser.
- Enlever la plaque de base et ôter le disque d'espacement
- Retourner le moule et le fixer sur la plaque de base (mettre une feuille de papier filtre).
- Peser le moule + la plaque de base + le contenu (à 1 gramme près)

2. Essai CBR imbibition : (voir Photo III. 14)

L'opération d'imbibition de l'échantillon se réalise de la façon suivante :

Après avoir pesé l'ensemble moule + plaque de base+ échantillon compacté, on place alors successivement un disque de papier filtre, un disque perforé de mesure du gonflement (appelé Disque perforé de mesure du gonflement), et une charge constituée par des disques annulaires de $2,265 \text{ Kg}$ (au moins 2 ou encore 4 demi-disques), représentant l'équivalent de la contrainte imposée par la chaussée sur la plate-forme.

On met le tout dans un bac rempli d'eau, la plaque de base étant un peu écartée du fond pour permettre le passage de l'eau. Un comparateur tenu par un trépied placé sur le moule mesurera les variations de hauteur de l'échantillon (Gonflement éventuel). On note la lecture de la

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

mesure donnée par le comparateur au début de l'essai. A la fin d'une opération d'imbibition, on note le gonflement.



Photo. III. 14: Essai CBR imbibition

3. Poinçonnement :(voir Photo III. 15)

■ On utilise une presse qui est munie d'un piston de poinçonnement de diamètre 4,96 cm (section 19,3 cm²), équipée d'un contrôleur de cadence ainsi que d'un comparateur permettant de suivre les enfoncements au 1/100^{ième} de mm près.

■ On place l'échantillon sur le plateau, bien axé sur le piston de poinçonnement. Les charges annulaires sont remises en place (leur trou central laisse le passage au piston de poinçonnement).

■ On amène la tige au contact du sol et quand l'aiguille dynamométrique de la presse commence à bouger, on arrête

Le mouvement et on met le comparateur à zéro. Puis la presse est actionnée à une vitesse constante d'enfoncement égale à 1,27 mm/min, le mouvement étant réglé, soit de manière automatique, soit en suivant la cadence mètre de la machine.

L'essai est réalisé à différentes énergies de compactage (12 c/c, 25 c/c et 55 c/c).



Photo. III. 15: Essai CBR Poinçonnement

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

➤ Expression des résultats :(voir Tableaux III-21-22-23)

Sur la base des normes françaises, l'indice CBR (ICBR) est utilisé pour estimer l'épaisseur d'un corps de chaussée. On le détermine immédiatement après le compactage ou après quatre jours d'immersion selon la norme NFP 94-078.

L'essai consiste à poinçonner dans le moule CBR des éprouvettes confectionnées à différentes énergies de compactage (12 coups par couche, 25 c/c, 55 c/c), et à des teneurs en eau correspondant à l'optimum de l'essai Proctor modifié. D'après les courbes qui représentent la pression du piston en fonction de son enfoncement (Figure III.9), on détermine l'indice CBR pour chaque énergie de compactage. Ceci permet de représenter la variation du poids volumique sec en fonction de l'indice CBR [$\gamma_d = f(\text{ICBR})$] (figure III.10). L'indice CBR final, déterminé graphiquement, est celui qui correspond à 95% du poids volumique sec maximum de l'essai Proctor modifié

la courbe effort-déformation est établie sur l'anneau dynamométrique la force nécessaire aux enfoncement de 1,25mm ; 2mm ; 2,5mm ; 5mm ; 7,5mm et 10 mm.

On définit les valeurs caractéristique suivants :

$$\text{CBR1} = \frac{\text{effort de pénétration à 2,5 mm (kN)}}{13,35 \text{ kN}} * 100 \quad (17)$$

$$\text{CBR2} = \frac{\text{effort de pénétration à 5 mm (kN)}}{13,35 \text{ kN}} * 100 \quad (18)$$

L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur exprimée en %.

Tableau. III. 21 : Résultats maximaux de l'essai CBR (12 c/c)

12 Coups/couche	temps	Enfoncement (mm)	Valeur comparateur	Force $F=V*0,021$	$F'=F*100$	Surface	Pression (Kg/cm ²) F'/S	
	1'	1,25	30	0,63	63		19,3	3,264
	1' 40"	2	46	0,966	96,6			5,005
	2'	2,5	52	1,092	109,2			5,658
	4'	5	80	1,68	168			8,705
	6'	7,5	105	2,205	220,5			11,425
	8'	10	117	2,457	245,7			12,731

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{CBR1} = \frac{5,658}{13,35} * 100 = 42,38 \text{ kN} \\ \text{CBR2} = \frac{8,705}{13,35} * 100 = 43,52 \text{ kN} \end{array} \right. \quad \longleftrightarrow \quad \text{CBR2} > \text{CBR1}$$

Tableau. III. 22: Résulta maximale de l'essai CBR (25 c/c)

25 Coups/couche	temps	Enfoncement en mm	Valeur comparateur	Force F=V*0,021	F'=F*100	Surface	Pression (Kg/cm²)F'/S	
	1'	1,25	33	0,693	69,3		19,3	3,591
	1' 40"	2	58	1,218	121,8			6,311
	2'	2,5	69	1,449	144,9			7,508
	4'	5	126	2,646	264,6			13,710
	6'	7,5	171	3,591	359,1			18,606
	8'	10	210	4,41	441			22,850

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{CBR1} = \frac{7,508}{13,35} * 100 = 56,23 \text{ kN} \\ \text{CBR2} = \frac{13,710}{13,35} * 100 = 68,55 \text{ kN} \end{array} \right. \quad \longleftrightarrow \quad \text{CBR2} > \text{CBR1}$$

55 Coups/couche	temps	Enfoncement en mm	Valeur comparateur	Force F=V*0,021	F'=F*100	Surface	Pression (Kg/cm²)F'/S	
	1'	1,25	36	0,756	75,6		19,3	3,917
	1' 40"	2	60	1,26	126			6,528
	2'	2,5	74	1,554	155,4			8,052
	4'	5	164	3,444	344,4			17,845
	6'	7,5	258	5,418	541,8			28,073
	8'	10	316	6,636	663,6			34,383

Tableau. III. 23: Résulta maximale de l'essai CBR (55 c/c)

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{CBR1} = \frac{8,052}{13,35} * 100 = 60,31 \text{ kN} \\ \text{CBR2} = \frac{17,84}{13,35} * 100 = 98,22 \text{ kN} \end{array} \right. \quad \longleftrightarrow \quad \boxed{\text{CBR2} > \text{CBR1}}$$

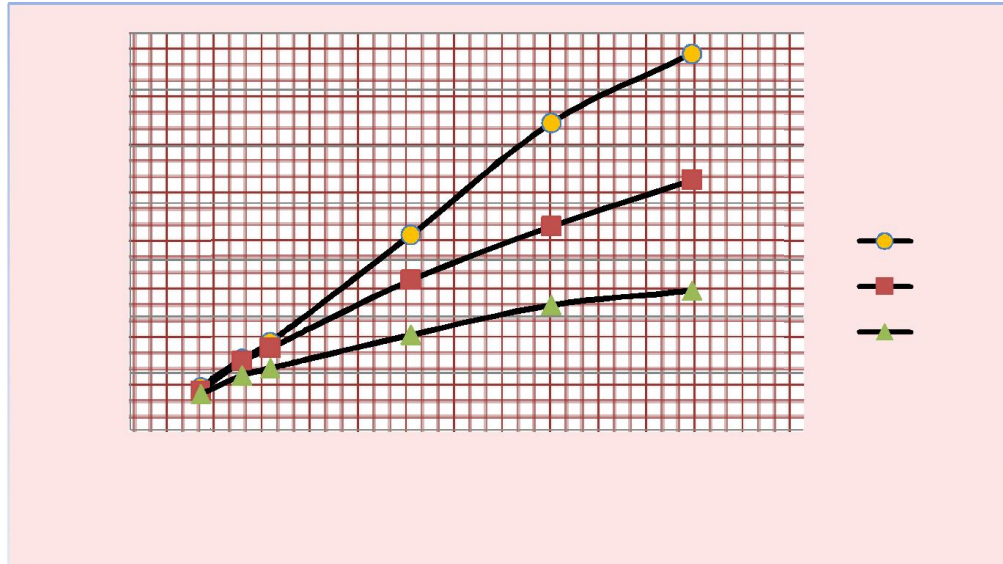


Figure. III. 9. :Variation de la force du piston en fonction de son enfoncement (Immédiate).

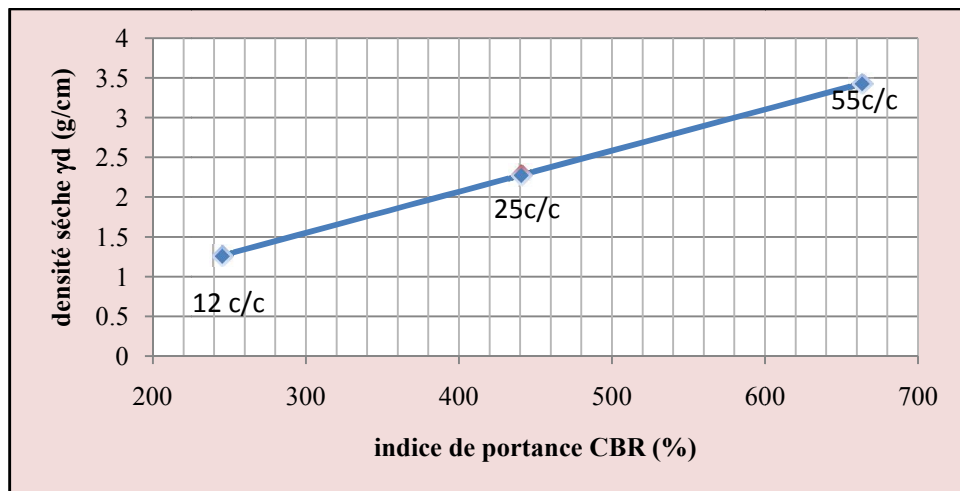


Figure. III. 10. Variation de l'indice CBR (immédiate) en fonction de la densité sèche.

III.3.4 Résistance à la compression simple:

Cet essai a été introduit pour apprécier la cohésion des matériaux locaux soumis à un état de sécheresse. L'essai consiste à suivre le phénomène de durcissement dans le temps, il est réalisé sur des échantillons confectionnés avec des éléments dont le diamètre est inférieur à 5mm

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

et compactés à la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale de l'essai Proctor modifié..

▪ Préparation des échantillons :

La préparation des échantillons est conduite comme suite :

- L'essai de compression simple a été réalisé sur la fraction 0/5 mm des différents mélanges compactés statiquement à l'optimum Proctor modifié dans des éprouvettes cylindriques de 38 mm de diamètre et 76mm de hauteur.
- Le compactage s'est effectué statiquement à l'aide d'une presse de type CBR à une vitesse inférieure à 2 mm/min, à différentes compacités.
- Les éprouvettes démoulées sont séchées à l'air libre pendant une durée de 0,7, 14 ...



Photo. III. 16: Appareillages de confection des éprouvettes.



Photo. III. 17: Photos présentant les échantillons après confection

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

III.3.5 Evolution de la résistance à la compression simple en fonction de la compacité

Après la durée de conservation (4 jours à l'étuve, 50 °C), les éprouvettes sont soumises à un effort de compression simple appliqué parallèlement à l'axe verticale du cylindre à l'aide d'une presse à une vitesse inférieure à 2 mm/min jusqu'à la rupture (Voir photo III.18).



Photo. III. 18: Ecrasement des éprouvettes à la compression simple après conservation

➤ **Expression des résultats:**(Les valeurs de la résistance maximale de l'essai compression simple sont représentées sur le tableau (Voir tableau III.25) ;

- Teneur en eau = $((\text{Poids sec} - \text{P humide}) / (\text{P sec})) \times 100$
- Densité à l'ecra = $\text{P sec} / \text{Volume éprouvette}$
- Compacité = $(\text{Densité à l'ecra} / \text{Densité}) / 100$
- $R_c = \text{Lecteur} \times 10,98 / 19,625$

Tableau. III. 24: Résultats de l'essai compression simple 01

Compacité	Densité	Poids du sol humide (g/cm ³)	Poids du sol sec (g/cm ³)	Poids de l'eau (g/cm ³)
100	2,01	426,41	394,46	31,95
98	1,96	415,81	384,65	31,16
95	1,90	403,08	372,88	30,20

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

Tableau. III. 25: Résultats de l'essai de compression simple 02

Compacité	Poids réel après	P réel l'ecras	Teneur en eau	D(φ) éprouvette	Hauteur éprouvette	Volume éprouvette	Densité l'ecra	Compacité	Lecteur	R (kg/cm ³)	Rc Moye(bar)
100	424,60	395,80	7,28	5,00	10,00	196,25	2,02	100,34	63,00	35,25	34,69
100	413,30	386,00	7,07	5,00	10,00	196,25	1,97	97,85	61,00	34,13	
98	415,40	386,80	7,39	5,00	10,00	196,25	1,97	98,06	51,50	28,81	29,51
98	415,20	386,20	7,51	5,00	10,00	196,25	1,97	97,91	54,00	30,21	
95	403,30	375,80	7,32	5,00	10,00	196,25	1,91	95,27	43,50	24,34	23,78
95	398,20	369,60	7,74	5,00	10,00	196,25	1,88	93,70	41,50	23,22	

L'évolution de la résistance à la compression simple en fonction de la compacité est présentée par la figure III.11.

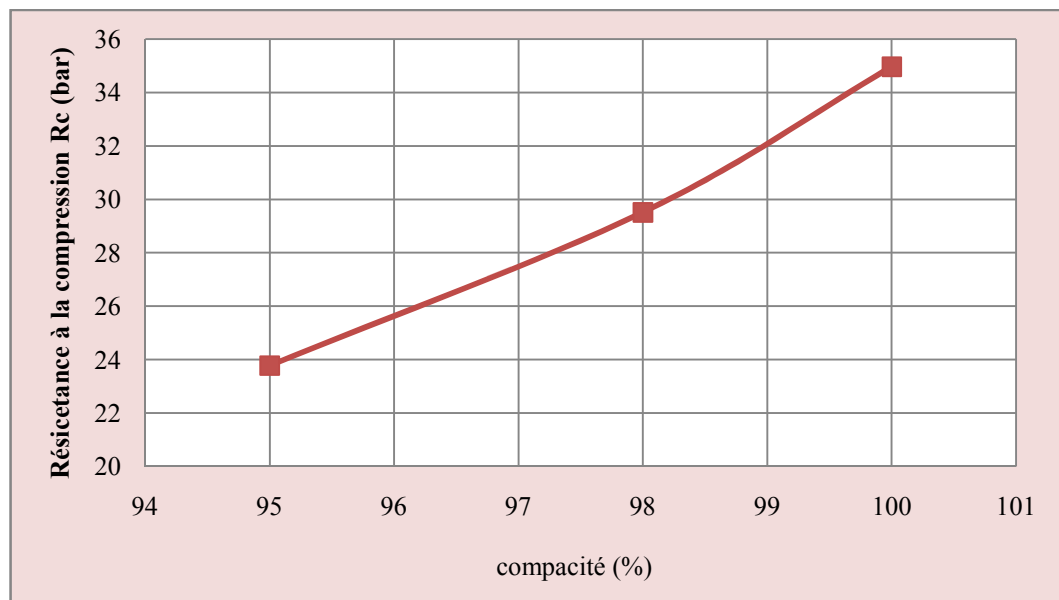


Figure. III. 11: Variation de la résistance à la compression simple en fonction de la compacité

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

III.4 Classification LCPC, GTR des matériaux :

III.4.1 Classification de LCPC (Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées) :

La classification LPC (1965) utilise les résultats d'essais classiques d'identification des sols :

- ❖ Des critères granulométriques :
 - les pourcentages de gravier, sable et particules fines (tamisât à 2 mm et 0,08 mm);
 - la forme de la courbe granulométrique : Cu et Cc (ou Cz);
- ❖ Les caractéristiques de plasticité W_L et I_p , et la ligne **A** d'équation :
$$I_p = 0,73(W_L - 20) \quad (\text{Relation de Casagrande});$$
- ❖ La teneur en matières organiques.

- a. Les groupes de sols :** Le système de classification LPC débouche sur 15 sols types, affectés chacun d'un symbole à deux lettres, prises dans les trois ensembles suivants :

Tableau. III. 26 : Les groupes de sols.

Éléments du sol	Granularité du sol	Plasticité du sol
G : Gravier. Le gravier est la fraction principale	b : Bien gradué	t : Très plastique
S : Sable. Le sable est la fraction principale	m : Mal gradué	p : Peu plastique
L : Limon ou limoneux		
A : Argile ou argileux		
T : Tourbe		
O : Organique. Présence de matières organiques		

- b. La procédure de classification :** La classification des sols grenus est donnée par le tableau III.27 et la figure III.13 donne la classification des sols fins

On a ;

- $I_p = 9$
- $W_L = 29,5$

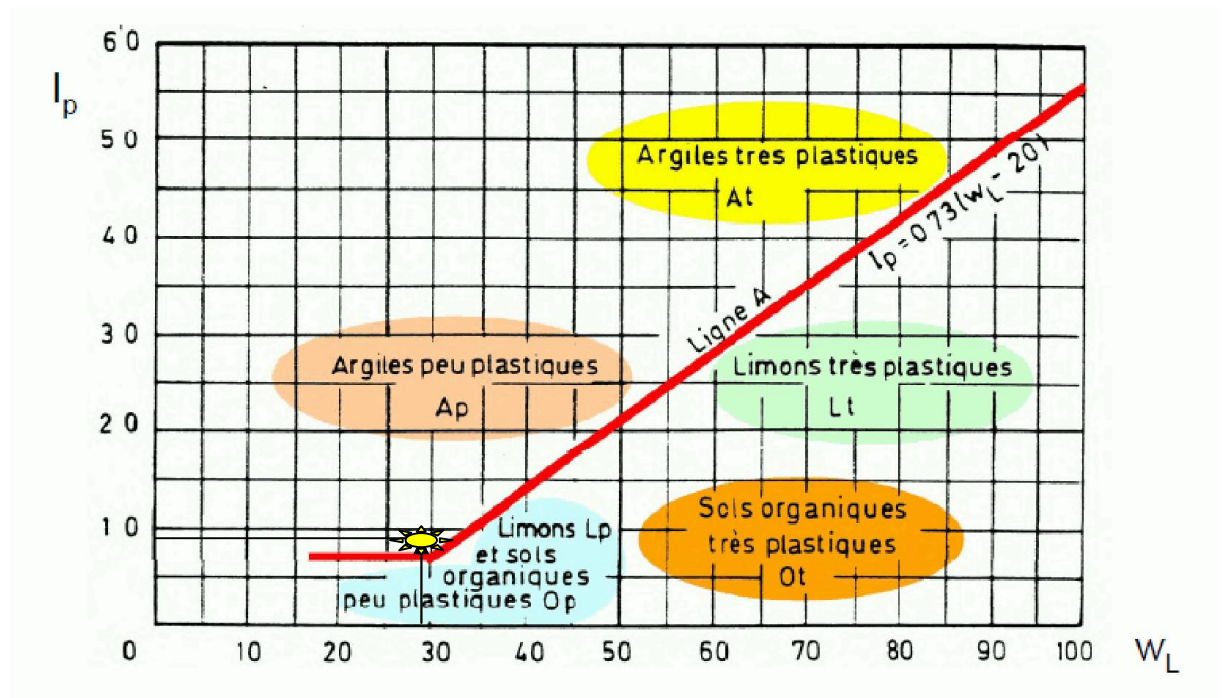


Figure. III. 12 : Classification LPC des sols fins en laboratoire. Diagramme de plasticité

III.4.2 Classification LPC modifiée

Les modifications apportées à la classification LPC/USCS portent exclusivement sur la description des sols organiques (teneur en matières organiques supérieure à 3 %). Seuls les sols comportant moins de 10 % de matières organiques continuent d'être classés comme les sols fins. Pour les teneurs en matières organiques plus fortes, l'accent est mis sur le degré de

Décomposition (d'humification) des fibres organiques, évalué au moyen du test de Von Post.

D'après les résultats d'analyse granulométrique, le tuf à plus de 50% des éléments > 0.08mm qui ont un diamètre > 2mm et moins de 5% d'éléments < 0.08mm ; avec Plus de 12% d'éléments < 0,08 mm donc les classifications des matériaux selon le LCPC est grave argileuse. (Voire tableau.III. 27).

Tableau. III. 27 : classification des sols grenus – LPC/USCS

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

plus de 50 % des éléments > 0,08 mm					
Définitions		Symboles	Conditions	Appellations	
GRAVES	Plus de 50% d'éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	Cu > 4 et Cc compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			Gm (GP)	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Gm (GP)	Limite d'Atterberg au-dessous de A	grave limoneuse
			GL (GM)	Limite d'Atterberg au-dessus de A	grave argileuse
SABLES	Plus de 50% d'éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Sb (SW)	Cu > 6 et Cc compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Sm (SP)	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	SL (SM)	Limite d'Atterberg au-dessous de A	sable limoneux
			SA (SC)	Limite d'Atterberg au-dessus de A	sable argileux
Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % : on utilise un double symbole.					

- La classification LPC modifiée débouche sur vingt-deux types de sols: - des sols grenus : Gb, Gm, GA, GL, Sb, Sm, SA, SL
- des sols fins : At, Ap, Lt, Lp
 - des sols faiblement organiques : fO-At, fO-Ap, fO-Lt, fO-Lp
 - des sols moyennement organiques : mO-a, mO-sf, mO-f

Chapitre 03 : Caractérisation et identification du tuf étudié

- des sols très organiques: tO-a, tO-sf, tO-f.

Les symboles des sols grenus et des sols fins sont les mêmes que dans la classification LPC/USCS. Pour les sols organiques, les symboles : a, sf et f signifient « à matière organique amorphe », « à matière organique semi fibreuse » et « à matière organique fibreuse ».

III.4.3 Classification de GTR (Guide Technique Routier) :

GTR propose une classification des sols utilisables en remblais et couche de forme d'infrastructure, les étapes de notre classification sont comme suite:

Classement selon la nature :

Paramètre de nature en premier niveau de la classification :

- $D_{max} > 50 \text{ mm} \rightarrow 63 \text{ mm} > 50$
- Passant à 0.08mm 23,9% < 35%

Classe : C sols comportant des fines et des gros éléments.

Paramètre de nature deuxième niveau de classification :

Tamisât à 0.08mm $\rightarrow 23,9\% > 12\%$

VBS $\rightarrow 1,04 > 0,2$

Sous classe fonction de la nature :

Classe C1 ou C2 Argiles à silex. (Voire figure. III. 14).

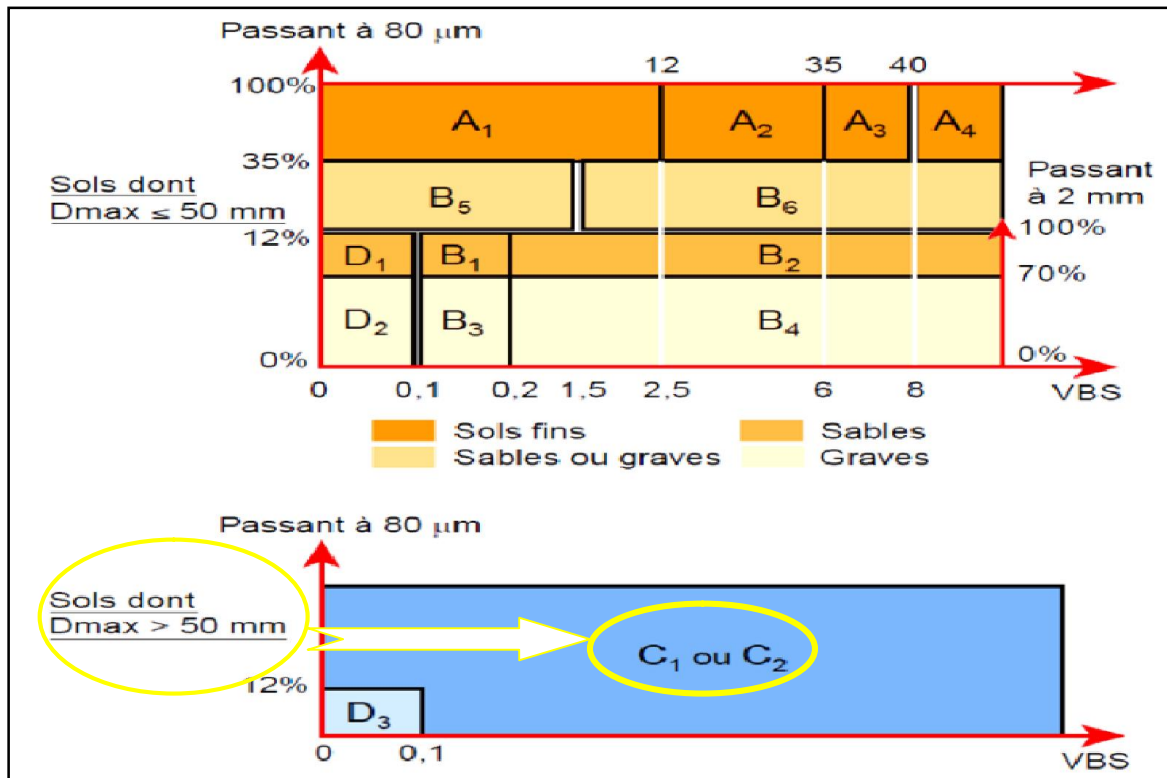


Figure. III. 13: Structure générale de la classification GTR pour les terrassements routiers

La classification GTR permet de classer les sols, en fonction d'un certain nombre de paramètres (Passant à 80 µm, passant à 2 mm, l'indice de plasticité I_p et la valeur au bleu V_b), en:

- Classe A - Sols fins
- Classe B - Sols sableux et graveleux avec fines
- Classe C - Sols comportant des fines et de gros éléments
- Classe D - Sols insensibles à l'eau.

Les principes généraux de cette classification sont présentés sur la figure 2.8. La classification détaillée est décrite dans un guide technique du LCPC et du SETRA et dans la norme NF P 11-300.

III.5 Conclusion :

L'étude d'identification géotechnique à permet de dire que les tufs se présentent en 0/D où D est la plus grande dimension des granulats est compris entre 100 et 80mm. Ils sont riches en fines; La fraction 0/80 μ m est 28.99 %, ces particules sont des fines argileuses peu plastiques. Les tufs sont des matériaux légers, leur densité sèche maximale au Proctor modifiée qui est 2.12 t/m³ et leur portance sont sensible à la teneur en eau. Ces matériaux tendres (60 >L.A >40).

conclusion général

conclusion général

Cette conclusion regroupe les conclusions qui sont dans les chapitres Précédents.

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).

La formation des encroûtements calcaires est due à l'interaction du carbonate de calcium et dioxyde de carbone avec le présence d'eau.

D'après **Ruellan** :

L'évolution finale du processus de formation des croûtes calcaires est l'encroûtement mûr.

Les tufs sont classées selon la teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) en 3 classes différents : Distribution diffusée ; Concentration continues; Concentration discontinues.

Les essai plus couramment réalisés sont actuellement Analyse granulométrique; Limites d'Atterberg (limites de consistance) Equivalent de Sable; Essai au Bleu de Méthylène; Essai Proctor; Essai de portance (essai CBR); Essai Los Angeles; Essai Micro Deval humide.

La production des tufs passe par différent étape a partir de la recherche des gisements à diverses opérations (décapage, extraction, transport).

Les tufs sont utilisées dans plusieurs travaux, en particulier les route dans les couches de fondation, couches de base, couches de forme, accotement, pistes agricoles, routes moyennement ou fortement circulées et même autoroutes, remblais.

Ils sont également traiter avec de nombreux matériaux, notamment le ciment et la chaux pour améliorer ses efficacité.

A partir des résultats obtenus dans le chapitre III on peut dire que: lorsqu'ils sont utilisés en assises de chaussées, ils présentent un comportement bien meilleur, que ce que laisseraient supposer leurs caractéristiques géotechniques, si on les compare aux spécifications habituelles des matériaux de construction routière.

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 réalisé. Donc on utilise ces matériaux momentanément jusqu'à ce qu'on trouve ce qui est meilleur et moins coûteux.

références bibliographique

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. **GOUAL Idriss (2002)**, « Contribution à l'étude de la stabilisation aux liants des tufs de la région de Laghouat », Thèse de Magister, USTO. Oran.
- [4]. **Georges, C., (1988)**. « Tufs et encrouement calcaire ». Institut des sciences et des techniques de l'équipement et de l'environnement pour le développement, France.
- [5]. **Pierre, D. Georges, A. Yannick, D. Jeanne-Sylvine, G (2000)**. « Granulats. Production et utilisations ».
- [6]. **Ministères Des Travaux Publics. (2005)**. « Cahier des charges 'enrobes à chaud' .Ponts et chaussées ». Luxembourg.
- [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]. **AFNOR, (1990)**. «Préparation d'un échantillon pour essai ». Normalisation française.
- [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]. **AFRO, A. A., (1993)**. « Détermination de limite d'Atterberg ». Normalisation française
- [13]. **AFNOR, A. A., (1990)**. « Essai au bleu de méthylène, méthode à la tâche». Normalisation française
- [15]. **AFNOR., (1990)**. « Détermination des références de compactage d'un matériau ». Normalisation française

WEBOGRAPHIE

- [2]. <http://hydroval.free.fr/>, 21/05/2021;
- [3]. <http://fr.wikipedia.org/>, 21/05/2021;
- [14]. <http://www.2ie-edu.org/>, 21/05/2021.

Annexes

Annexe 01 :

a) Les résultats de cette analyse granulométrique ;

Calcul des résultats selon la formule suivante :

$$Tc\% = 100 - Rc\% ; Rc\% = \frac{Rc(g) \cdot 100}{M} ; 600D \geq M \geq 200D$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \cdot D_{60}} ; Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Rc : Refus cumulés.

Tc : Tamisât cumulés.

Cu : Le coefficient d'uniformité.

Cc : Le coefficient de courbure.

M : Masse de l'échantillon exprimé en grammes.

D : Dimension maximale des plus gros éléments appréciée visuellement et exprimée en millimètres

Ouvertures de tamis D (mm)	R	Rc (g)	Rc (%)	Tamisât cumulés en (%)
63	0	0	0	100
50	1525	1525	9,53	90.47
31.5	2275	3800	23,75	76.25
20	1835	5635	35,21	64.79
10	1869	7504	46,9	53.1
5	731,2	8235,2	51,47	48.53
2	916,3	9161,6	57,26	42.74
1	676,8	9838,4	61,49	38.51
0.4	388,8	10227,2	63,92	36.08
0.2	41,2	10598,4	66,24	33.76
0.1	1153,6	11752	73,45	26.55
0.08	424	12176	76,1	23.90
0.062	1056	13232	82,7	17.30
0.045	135,6	13385,6	83,66	16.34
0.032	155,2	13540,8	84,63	15.37
0.019	230,4	13771,2	86,07	13.93
0.014	240	14011,2	87,57	12.49
0.010	297,6	14308,8	89,43	10.57
0.007	76,8	14385,6	89,91	10.09
0.005	76,8	14462,4	90,39	9.61
0.003	155,2	14617,6	91,36	8.64
0.001	1382,4	16000	100	0
D10= 0,01 mm ; D30= 0,15 mm ; D60= 17 mm Cu=17/0,01=1700 Cc= 0,15²/0,009*17=0,13				

b) Classes de granulométrie de sols

Coefficient d'uniformité	Classe de granulométrie
$Cu \leq 2$	Granulométrie très serrée
$2 < Cu \leq 5$	Granulométrie serrée
$5 < Cu \leq 20$	Granulométrie semi-étalée
$20 < Cu \leq 200$	Granulométrie étalée
$Cu > 200$	Granulométrie très étalée