

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 :

TAYEBI Abdellah
TRIKI Toufik

THEME

**Etude géotechnique d'une structure
routière à base des matériaux locaux entre
TSABIT et BOUDA**

Soutenu Le **07/07/2019** Devant Un Membre De Jury Composé De :

Dr. BEN-NACER Lyacine
Dr. BENAMAR Balegh
Pr. MEKERTA Belkacem.

Président
Examineur
Encadreur

Année Universitaire 2018/2019

Remerciements

Dans le cadre de la réalisation de cette étude, nous remercierons avant tous DIEU 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 DRAIA, département des sciences et technologie d'Adrar pour toutes les informations qu'ils nous ont prodigué durant notre étude.

*Nos reconnaissances et toute notre remerciement s'adresse particulièrement à nos encadreurs Pr **MEKERTA Belkacem** et Mr **BELAOUT Fateh**, pour nous avoir encadré et dirigé avec une grande rigueur scientifique, la qualité de ces formations et de leurs conseils, le soutien et la confiance qu'ils nous ont accordés, et nous ont permis de réaliser cette période de recherche dans les meilleures conditions.*

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

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

DEDICACES

Au sens de gratitude et d'amour je dédie ce travail à Dieu tout puissant Allah qui m'a donné la volonté et la puissance pour réaliser cette étude dont je souhaiterai qu'elle sera acceptée par lui sobhanaho et qu'il m'aide à continuer inchaallah.

A ma famille :

Avec une profonde reconnaissance et toute ma gratitude, grâce et remerciement vont aussi à MES PARENTS pour ses tendresses, amours, ses encouragements, et surtout de tous ses sacrifices, pour avoir sacrifié ses plus belles années pour moi pour que je puisse mon arriver là où je suis, c'est grâce à eux; et aussi pour mes frères, ainsi à ma famille TRIKI que je n'oublierai jamais ses encouragements et ses conseils aussi.

A mes amis :

A tous mes meilleurs amis : SAFI Belkacem,nadjiba hassani, Ghandour Mimouna,Mohamed salmi ,Rabie Sayah,Rabah bssasshia, abdelghani belbali hassan tage et toute les membres du groupes réalisation ; ainsi à toute mes amis de promo 2018/2019 option géotechnique et à tous les autre qui étaient là pour moi et à tous les autres que je les connais bien.

A mon biome :

A mon ami, mon frère et mon binôme : TEYBI Abdallah.

Toute la promotion : M2-GC2018/2019.

Tous ce qui m'aime et que j'aime.

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 une 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, une étude portant sur la valorisation des matériaux locaux de la région d'Adrar, le tuf son abondance avec la chaux et l'utilisation du ciment, peuvent fournir aux futurs travaux expérimentaux une base documentaire sur l'amélioration et la stabilisation des couches de chaussées. Ceci va permettre une bonne exploitation de ce mélange dans la construction des routes, de manière à avoir une bonne performance mécanique dans la durabilité.

Des essais d'identifications ont été effectués sur le tuf de la région d'Adrar, dans le but d'étudier leurs performances mécaniques, physiques et chimiques.

Mots clé : matériaux locaux, tuf, chaux, ciment, valorisation, propriété p mécaniques, physiques et chimiques.

Abstract:

Road construction is particularly based on the use of raw materials that need to meet regulatory standards, thereby ensuring good quality and durability of the road.

Some regions suffer from the unavailability of raw materials used for road construction, especially the Saharan regions; this necessitates long-distance travel, which has a negative impact on the cost of the project.

In this work, a study on the valorization of local materials in the Adrar region, the tuff its abundance with lime and the use of cement, can provide future experimental work with a documentary base on the improvement and stabilization pavement layers. This will allow a good exploitation of this mixture in the construction of the roads, so as to have a good mechanical performance in the durability.

Identification tests were carried out on the tuff of the Adrar region, in order to study their mechanical, physical and chemical performances.

Key words: local materials, tuff, lime, Cement, beneficiation, mechanical, physical and chemical property.

ملخص:

إن إنجاز الطرق يعتمد أساسا على استخدام المواد الأولية التي يجب أن تكون بمواصفات مطابقة للمقاييس، و بالتالي تضمن نوعية جيدة و ديمومة للطريق. بعض المناطق تعاني من مشكلة نقص المواد الأولية المستخدمة في إنشاء الطرق و بالأخص المناطق الصحراوية، مما يتطلب النقل لمسافات طويلة و الذي ينعكس سلبا على تكلفة المشروع .

في هذا العمل، أجريت دراسة لثمين المواد المحلية لمنطقة أدرار، التي المتواجد بكمية وفيرة مع الجير والاسمنت و هذا قصد توفير قاعدة من المراجع للأبحاث المستقبلية في هذا المجال , مما يسمح بالإستغلال الجيد للخليط في إنشاء الطرق و الحصول على مقاومة عالية و ديمومة أفضل ، حيث قمنا بإجراء تجارب على التي لمنطقة أدرار، بعد تصنيف الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية للمادتين وضعنا مجموعة من العينات بمختلف النسب من المواد بهدف دراسة الخصائص الميكانيكية، الفيزيائية و الكيميائية .

كلمات دالة: مواد محلية، التي ، الاسمنت، الجير، ثمين، الخصائص الميكانيكية، الفيزيائية والكيميائية .

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : GENERALITES SUR LES MATERIAUX LOCAUX ET LA STRUCTURE DE LA CHAUSSEE	
I.1. INTRODUCTION :	4
I.2. PRESENTATION DU PROJET :	4
I.2.1. Présentation de la wilaya d'Adrar	4
I.2.2. Géomorphologie de la région d'Adrar	5
I.2.3 Ressources hydrogéologiques	6
I.2.4 Climatologie et végétation	6
I.3 GENERALITES SUR LA ROUTE :	7
I.3.1. Définition.....	7
I.3.2. Caractéristiques de la route	7
I.3.3 Les composants routiers	8
I.3.3.1 La couche de forme.....	8
I.3.3.2 Le corps de chaussée et la sous-couche	8
I.3.3.3 La couche de surface	9
I.4 Schéma directeur de la qualité.....	11
I.5 Etablissement du dossier de consultation des entreprises.....	12
I.6 Plan d'assurance qualité.....	12
I.6.1 Plan de contrôle.....	14
I.6.2 Déroulement du chantier.....	15
I.6.3 Vérification de la conformité de la démarche qualité.....	16
I.7 DEFINITION DES TUFs :.....	16
I.7.1 Définitions Générale.....	16
I.7.2 Formation des Tufs	16
I.7.2.1 Les idées anciennes	16
I.7.2.2 Les idées récentes.....	17
I.7.2.3 Hypothèse de formation.....	17
I.7.3 Classification des tufs calcaires	18

I.7.3.1 Classification selon la teneur en carbonate de calcium (CaCO ₃)	18
I.7.3.2 Classification selon le processus pédologique	19
I.8 RECHERCHE ET EXPLOITATION DES GISEMENT.....	20
I.8.1 Recherche d'un gisement.....	20
I.8.2 Exploitation d'un gisement.....	21
I.8.2.1 Découverte.....	21
I.8.2.2 Extraction.....	21
I.9 UTILISATION DES TUFS CALCAIRES EN CONSTRUCTIONS ROUTIERES.....	22
I.9.1 Assises de chaussées	22
I.9.2 Remblais	22
I.10 APPLICATION DES TUFS TRAITES EN CONSTRUCTION ROUTIERE.....	24
I.11- APPLICATION DU TRAITEMENT IN-SITU.....	25
I.10 Conclusion	27

Chapitre II : L'ETUDE GEOTECHNIQUE ROUTIERE

II.1. Introduction.....	29
II.2. Présentation des échantillons.....	29
II.2.1. Exploitation sur les Carrières.....	30
II.3. Essais au laboratoire.....	32
II.3.1.1 Les essais d'identification.....	33
II.3.2 Les essais chimique.....	40
II.3.3 Essais mécanique.....	42
II.4 CLASSIFICATION GTR (GUIDE TECHNIQUE ROUTIER).....	45
II.5. UTILISATION DU MATERIAU ETUDIE	46
II.6. Conclusion.....	47

Chapitre III : LE TRAITEMENT ET L'AMELIORATION DE LA PORTANCE DU TUF

III.1 Introduction.....	49
III.2 Constat des désordres des routes.....	49
III.2.1 Orcières.....	49
III.2.2. Traverse.....	49

III.2.3 Tôle ondulée	50
III.2.4 Ravinement.....	50
III.2.5 Nids de poule.....	50
III.2.6 Gonflement de couche de liaison.	51
III.3 Traitement des tufs calcaires aux liants hydrauliques.....	52
III.3.1 Traitement au ciment.....	52
III.3.2 Traitement à la chaux	53
III.3.3 Traitement mixte à la chaux plus ciment.....	54
III.4 ESSAIS DE LABORATOIRE.....	55
III.4.1 Analyse granulométrique.....	55
III.4.2 Proctor modifié.....	58
III.4.3 Limites d'Atterberg.....	59
III.4.4 ESSAIS CHIMIQUES.....	60
III.5 Conclusion.....	62
IV. Conclusion générale.....	64
Références Bibliographiques	65

Annexe : CLASSIFICATION GTR (GUIDE TECHNIQUE ROUTIER)

Annexe IV : Rapport géotechnique

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Le tracé de l'axe reliant Tsabit à bouda.....	4
Figure I.2 : Situation géographique de la zone d'étude.....	5
Figure I.3 : Structure générale d'une chaussée.....	7
Figure I.4 : Schéma du circuit de la formation des tufs calcaires.....	18
Figure I.5 : Classification des encroutementscalcaires d'apresRuellan à partir du processus pédologique (encroutement mur).....	20

Chapitre II

Figure II.1: Carte de localisation des carrières étudiées (tuf) (image satellitaire).....	29
Figure II.2 : Carte de localisation de la carrière étudiée (tuf) (Image satellitaire).....	30

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma du mécanisme observé lors du traitement.....	53
---	-----------

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 :Classification d'encroûtements proprement dits.....	19
Tableau I.2 -Critères d'utilisation des tufs calcaires en Algérie (pour assises de chaussées et aux remblais.....	23

Chapitre II

Tableau II.1 :Les essais analyse granulométrique.....	33
Tableau II.2 :Classification des sols selon l'indice de plasticité IP.....	39
Tableau II.3 : Classification de l'argilité d'un silt (limon) selon IP.....	40
Tableau II.4 :Ordres de grandeur de WL, WP et IP.....	40
Tableau II.5 :Valeur au bleu de méthylène du sol VBS.....	41
Tableau II.6 :Analyse chimique.....	42
Tableau II.7 :Caractéristiques optimales de l'essai Proctor des différents échantillons.....	43
Tableau II.8 :Caractéristiques de compactage et de portance	45

Chapitre III

Tableau III.1 :Les essais analyse granulométrique.....	54
Tableau III.2 :Caractéristiques optimales de l'essai Proctor et l'indice ICBR.....	57
Tableau III.3 :Ordres de grandeur de WL, WP et IP.....	58
Tableau III.4 : Valeur au bleu de méthylène du sol VBS.....	59
Tableau III.5 :Analyses chimiques.....	59

Liste des photos

Chapitre I

Photo I.1 Préparation du sol à l'aide d'une charrue.....	25
Photo I.2 Incorporation de la chaux ou du ciment à l'aide d'un épandeur.....	25
Photo I.3 Malaxeur.....	26

Chapitre II

Photo I.1 : Carrière de PK 36+700 gauche vers Tsabit.....	30
Photo II.2 :Carrière de PK 36+000 gauche vers Tsabit.....	31
Photo II.3 :Carrière de PK 36+000 gauche vers Tsabit	31
Photo II.4 :Carrière de PK 24+000 gauche vers Tsabit.....	32

Chapitre III

Photo III.1 :Ornières.....	48
Photo III.2 :Traverse.....	48
Photo III.3 :Tôle ondulée	49
Photo III.4 :Ravinement.....	49
Photo III.5 :Nids de poule	49
Photo III.6 :Gonflement de la couche de liaison.....	50
Photo III.7 :gonflement de la couche de liaison.....	50

Liste des symboles

γ_s	Poids spécifique des particules solides (kN/m^3).
W_s	Poids du sol sec (kN).
V_s	Volume des particules solides (m^3).
R_c	Refus cumulés (%).
T_c	Tamisât cumulés (%).
M	Masse de l'échantillon (g).
D	Dimension maximale des plus gros éléments appréciée visuellement (mm)
W_L	Limite de liquidité (%).
W_P	Limite de plasticité (%).
I_P	Indice de plasticité (%).
N	Nombre de coups.
ω_N	La teneur en eau correspondant au nombre de coups N (%).
V_b	La valeur de bleu (cm^3/g).
VBS	La valeur de bleu du sol.
γ_d/γ_w	La Densité sèche.
W	La teneur en eau (%).
γ_{dOPM}	La densité sèche maximale à l'optimum Proctor (g/cm^3).
$(\gamma_d/\gamma_w)_{\max}$	La Densité sèche maximale.
W_{Opt}	La teneur en eau optimal(%).
IPI	Indice portant immédiat.
CBR	Californien Baring Ration.
$ICBR$	Indice Californien Baring Ration.

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'analyse de la situation des pays équipés et développés, montre que le secteur du transport constitue une base au plan du développement national et de la croissance économique.

Cela montre bien que le secteur du transport est un secteur stratégique sur le plan économique et social, et de l'intégrité du territoire. Il contribue à la satisfaction des besoins essentiels de la population, en particulier l'économie nationale, des pays actuellement développés ou en voie de développement.

En Algérie le transport routier joue un rôle majeur dans la mesure où la route supporte plus de 80% du trafic de marchandises et voyageurs. Afin de fluidifier le trafic l'état a opté pour un programme portant sur la réalisation des tracés routiers neufs. En particulier dans les régions du sud.

C'est dans ce contexte qu'on peut classer notre projet qui consiste à la création d'un nouveau axe routier reliant Bouda (ksar) à Tsabit (ksar), en travaux de revêtement. La problématique de ce travail est de parvenir à réaliser une étude géotechnique d'une chaussée neuve qui doit satisfaire aux exigences de la durabilité en fonction du choix des matériaux locaux.

C'est dans cette optique qu'un programme de reconnaissances géotechniques a été établi et exécuté par Le laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest. Nos travaux de recherche vont permettre une comparaison de nos essais divers avec ceux déjà réalisés par le LTPO. Les constatations sur le terrain ont montré des anomalies au niveau de la couche de liaison de la chaussée qui est dû à la remontée des sels. Afin de remédier à ce problème, on va s'intéresser à trouver une solution dans le traitement et l'amélioration des tufs par un ajout mixte.

Ce mémoire comporte trois chapitres :

Tout d'abord une introduction générale.

Le premier chapitre porte sur les généralités du projet.

Un deuxième chapitre est consacré à l'étude géotechnique routière.

Le troisième chapitre porte sur le traitement et l'amélioration de la portance du tuf.

En dernier, on présente les conclusions générales.

CHAPITRE I
CONTEXTE GENERAL

I.1- INTRODUCTION :

Le Sahara Algérien est l'un des plus grands déserts du monde (environ 2 millions de km²). Il y a quelques millions d'années la faune et la flore y étaient riches et variées, les falaises de Tassilis et les parois rocheuses de la Saoura en témoignent. Le changement du climat et la désertification de plus en plus intense a mené la population qui vit dans cette région, soit à émigrer vers les régions les plus humides, soit à s'adapter au nouveau mode de vie.

I.2- PRESENTATION DU PROJET :

Ce projet couvre l'étude géotechnique de la réalisation d'un nouvel axe routier reliant Bouda (ksar) à Tsabit (Ksar) sur une longueur de 37 Km, avec des travaux de revêtements en Tri-couche (voir figure 1).

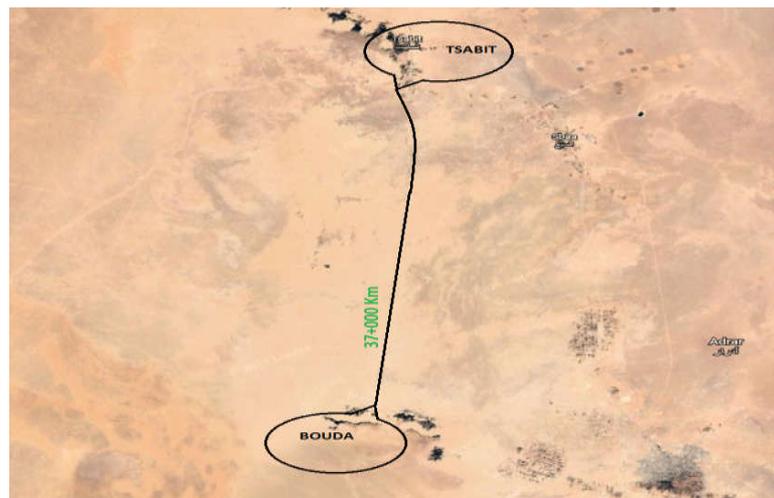


Figure I.1- Le tracé de l'axe reliant Tsabit à Bouda [1].

I.2.1- Présentation de la wilaya d'Adrar

La wilaya d'Adrar est située dans le Sud-Ouest de l'Algérie ; elle s'étend selon les coordonnées géographiques :

- entre les longitudes 0°30' Est et 0°30' à l'Ouest
- entre la latitude 26°30' et 28°30' au Nord
- et une altitude moyenne de 222m.

Elle est limitée géo-morphologiquement au Nord par le Grand Erg Occidental, au Sud par le

Plateau de Tanezrouft, à l'Est par le plateau de Tademaït et à l'Ouest par l'Erg Chech. Elle est Répartie entre quatre régions sahariennes naturelles représentées par (voir figure 2) :

- ❖ **Gourara** : Son centre administratif est la daïra de Timimoune, cette région regroupe Tous les palmerais et les ksars de cette daïra.
- ❖ **Touat** : Elle se prolonge du Brinkane jusqu'à Reggane ; c'est la plus vaste des régions, et la plus intéressante, car elle contient un grand nombre de foggaras.
- ❖ **Tidikelt** : Cette région se prolonge d'Aoulef à Ain Saleh qui est le centre de la région
- ❖ **Tanezrouft** : région de Bordj Badji Mokhtar.

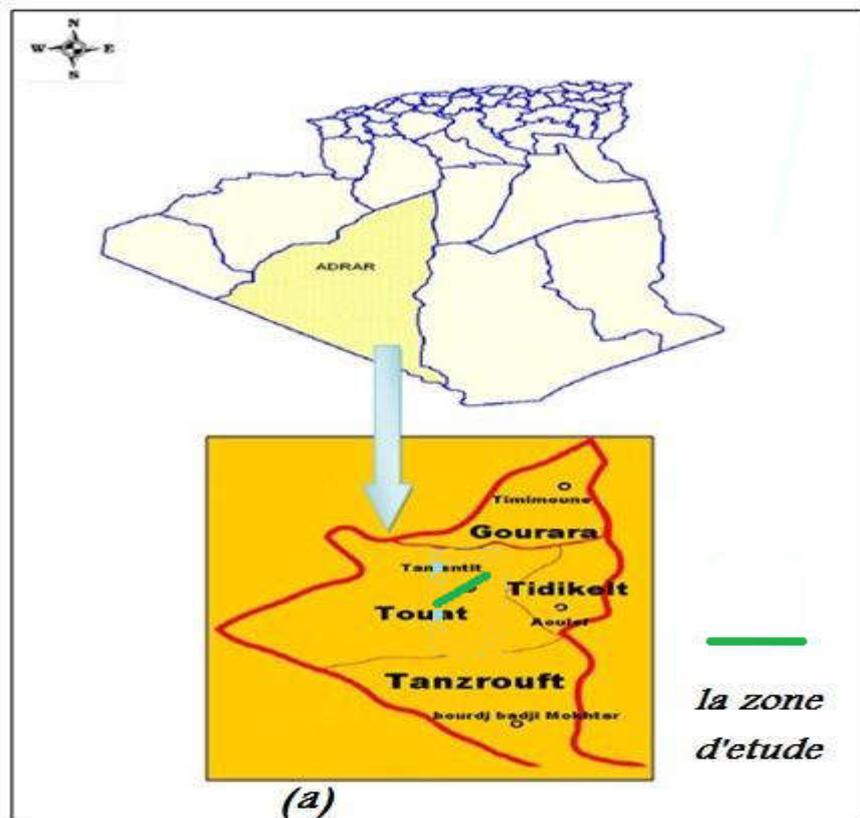


Figure I.2 -Situation géographique de la zone d'étude [2].

I.2.2- Géomorphologie de la région d'Adrar :

La Wilaya d'Adrar se caractérise par un relief d'aspect désertique se subdivise en trois grands ensembles géomorphologiques, qui sont :

Les Plateaux :

Couvrent de très grandes surfaces, et sont constitués de formations géologiques

différentes :

- Crétacé inférieur continental intercalaire.
- Crétacé supérieur secondaire marin.
- Cuvette du Mio-pliocène.
- Massif cristallin. Néo protérozoïque.

Les Ergs :

Massifs dunaires s'étendant sur près de la moitié de la Wilaya. Ils se sont formés au cours des temps Quaternaires tels que le grand Erg occidental et l'Erg Chèche.

Les Sebkhass :

Correspondant aux puits les plus bas et appartiennent généralement aux anciens lits d'oueds très larges, elles sont formées de dépôts Co-fluviatiles gypseux.

Les regs du massif cristallin :

Représentés par les régions de Chenachène, Erg Chech (partie orientale du massif Eglab) et la partie Ouest du massif de l'Ahaggar.

I.2.3-Ressources hydrogéologiques :

La quasi-totalité des besoins en eau de la région sont satisfaits par les nappes souterraines du continental intercalaire, et du Mio-pliocène. L'eau est puisée dans les nappes à l'aide du système traditionnel des foggaras. Cependant, ce dernier a tendance à laisser la place aux forages et aux puits.

I.2.4-Climatologie et végétation

Le climat de la Wilaya d'Adrar est composé de deux zones climatiques distinctes

- Une zone semi-désertique, qui va de Timimoun à Bechar.
- Une zone désertique, qui va de Timimoun à Timiaouine.

i. Température :

La Wilaya d'Adrar connaît des écarts de température considérables. La température est maximale, en Eté (plus de 45°C en Juin- Juillet- Aout), et donne lieu à un froid glacial, en Hiver (atteignant parfois les 0°C en Décembre et Janvier).

ii. Les vents :

La fréquence des vents est très grande durant toute l'année, notamment le sirocco, dont la vitesse peut atteindre les 100 Km /h. Généralement, c'est durant la période du Printemps (Mars-Avril), que les vents de sable se manifestent le plus souvent, D'après

l'intensité, on constate:

- vents calmes (6 %) : Vitesse < 1m/s.
- vents peu violents (3 %) : Vitesse = 1-5m/s.
- vents violents (50 %) : Vitesse > 5 m/s. (vents de sables du Sahara).

Les vents dominants sont N et NE en Juillet, en moi d'Août ils sont du E et NE

i. La Pluviométrie :

Elle est extrêmement faible, sinon insignifiante, dans la région, mise à part la daïra de Timimoun, qui enregistre parfois de fortes chutes de pluies dues essentiellement à sa situation géographique (limitrophe avec la Wilaya de Béchar).

ii. Végétation :

La végétation est presque inexistante. Elle se limite au lit d'Oued Messaoud, et à quelques cuvettes circulaires (dolines) dans la Hamada (plantes désertiques).

La faune est représentée par quelques reptiles (scorpions, vipères....) et de rares animaux sauvages (fennecs, renards et lièvres).

I.3- GENERALITES SUR LA ROUTE :

I.3.1- Définition

La route se définit comme une voie de circulation créée et aménagée pour supporter le trafic et les charges pour une durée donnée[3].

I.3.2- Caractéristiques de la route :

La route est l'ensemble formé par : le sol support ou terrain, le terre-plein centrale, les accotements ou trottoirs, les ouvrages routiers et essentiellement par la chaussée comme sur la figure (3) suivante :

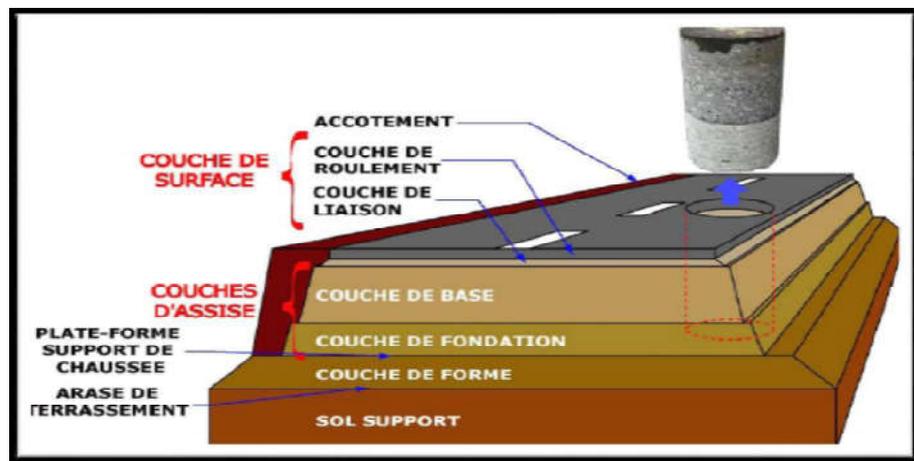


Figure I.3- Structure générale d'une chaussée [3].

Le sol support :

Il s'agit du support sur lequel la route et ses dépendances sont construites. Il peut demeurer dans son état naturel ou être amélioré avant construction de la route.

La Chaussée :

Les chaussées sont des structures constituées de plusieurs couches surmontant un ensemble appelé plateforme ou support de la chaussée, constitué du sol support le plus souvent protégé par une couche de forme.

Sur le plan structural, les chaussées se présentent comme des structures multicouches disposées horizontalement et mises en œuvre sur un ensemble géologique appelé plate-forme. Celle-ci est constituée du sol du terrain naturel terrassé (sol support), surmonté au besoin d'une couche de forme.

De bas en haut, le corps de chaussée comporte généralement les éléments suivants :

- couche de fondation
- la couche de base
- et la couche de surface.

Il s'agit d'une succession de couches de matériaux dont la résistance géotechnique décroît généralement de la surface vers la profondeur.

On distingue deux types de chaussées : les chaussées revêtues (qui sont soit du type rigide, soit du type semi-rigide, soit du type chaussé souple) qui feront l'objet de notre étude et les chaussées en terre ou non – revêtues.

Mais, sur le plan structural, les chaussées sont dans la majeure partie des cas constituées de deux ou plusieurs couches. Elles peuvent comprendre.

I.3.3-Les composants routiers

I.3.3.1-La couche de forme

Elle est rattachée aux terrassements, c'est une couche de transition entre le sol-support et le corps de chaussée. Elle est constituée de matériaux naturels sélectionnés (sable, grave).

Elle se charge de protéger le sol-support et d'établir une qualité de nivellement ainsi que de rendre plus homogène et d'améliorer les caractéristiques dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la chaussée.

I.3.3.2-Le corps de chaussée et la sous-couche

Le corps de chaussée est constitué par les couches d'assise et éventuellement d'une sous couche. L'assise de chaussée est généralement constituée de deux couches : la couche de fondation surmontée de la couche de base.

Ces couches en matériaux élaborés apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic. Elles répartissent les pressions sur la plate-forme afin de maintenir les déformations à ce niveau, dans des limites admissibles.

De nombreux matériaux conviennent aux couches d'assise. Ce sont les matériaux naturels sélectionnés rocheux ou graveleux, des matériaux concassés ou semi-concassés, des matériaux traités à l'aide de liants. Des sables naturels sont également employés.

I.3.3.3- La couche de surface

Elle est constituée de :

- Soit uniquement de la couche de roulement, qui est la couche supérieure de la structure chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat,
- Soit éventuellement, de la couche de roulement et d'une couche de liaison entre les couches d'assise et la couche de roulement. La couche de surface contribue à la pérennité de la structure de chaussée de par la fonction d'étanchéité qu'elle assure vis-à-vis de l'assise et par une stabilité élevée.

Cependant, après construction de la route et son ouverture au trafic, elle se dégrade.

Un travail de qualité correspondant à la satisfaction d'un besoin qui s'exprime en termes de qualité d'usage, le maître d'ouvrage définissant la fonction attendue de l'ouvrage. Le maître d'œuvre conçoit le projet pour lequel il traduit les besoins en termes de qualité requise, sous forme d'exigences contractuelles (contrat maître d'ouvrage - entreprise mis au point et géré par les maîtres d'œuvre) Ces exigences sont de trois types

- Les performances et leur durabilité ou plus souvent, enterrassement, l'absence de désordre dans les ouvrages construits.
- Le délai.
- Le coût.
- Le premier point cité est très complexe à réaliser c'est-à-dire l'incapacité d'évaluer ou déterminer le seuil de tolérance.
- La maîtrise de la qualité est l'ensemble des techniques et activités à caractère opérationnel utilisées pour satisfaire un besoin et des exigences pour la qualité. Maîtriser la qualité, ce n'est autre chose que de définir et mettre en œuvre les dispositions nécessaires (techniques, juridiques et administratives) pour créer un produit ayant les caractéristiques techniques contenues dans le cahier des charges.

- En fait, il s'agit d'un domaine où les calculs sont insuffisamment présents et où l'expérience et le métier sont nécessaires. Les règles de construction en grande masse existent et doivent être appliquées (compactage des remblais, règles de réutilisation, portance des plates-formes), les non-qualités sont souvent liées à des détails d'exécution (manque de rigueur dans l'application des règles dans un endroit délicat, drain bouché....) ou de conception (drainage mal placé....).
- Par ailleurs, il n'est pas inutile de rappeler l'importance des études géotechniques préalables pour limiter les aléas dus la variabilité de la nature et du comportement des sols.
- L'organisation pour l'obtention de la qualité sur un ouvrage de terrassement doit prendre en compte trois aspects :

➤ **L'exécution correcte des tâches élémentaires :**

Elle passe par des exigences sur l'exécution proprement dite et donc sur la qualification du personnel, l'adéquation des moyens, méthodes et produits utilisés.

➤ **L'ordonnancement correct des tâches :**

Un chantier de terrassement comprend des tâches multiples qui, un peu à la façon d'un chantier du bâtiment, ne s'organisent pas simplement de façon séquentielle. Entre les travaux préalables, l'activité du terrassier proprement dite, l'assainissement, la construction d'ouvrage d'art, la mise en œuvre de couches de forme et les finitions, il y a le plus souvent enchevêtrement des différentes tâches et interaction sur la qualité finale de l'ouvrage. Le bon ordonnancement du chantier est

donc utile pour le respect du coût, du délai et pour l'obtention des performances visées ; il est un des aspects les plus difficiles à obtenir, car lié à la fois à la qualité du projet et à la préparation de chantier par les différents intervenants pour élaborer une stratégie adaptée.

➤ **Les aléas :**

Liés surtout à l'hétérogénéité des sols et à leur comportement, ainsi qu'aux variations météorologiques.

Cette prise en compte nécessite :

- Du personnel, du matériel et des méthodes qualifiés ainsi que les matériaux à mettre en place,
- Un plan d'action détaillé prévoyant les interactions,

□ Des solutions de repli car l'évolution du contexte peut amener des remises en cause importantes et urgentes du plan d'action,

Cela justifie un plan d'action bien étudié au départ, la mise au point de divers scénarios pour l'exécution des points délicats afin de faciliter une éventuelle réorientation et la possibilité de mobiliser, au-delà de la phase projet (pendant le chantier) des compétences intellectuelles de type « conception ».

Dans cet esprit, on peut imaginer l'importance à accorder à la bonne entente des partenaires (maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, entreprise, contrôleurs de qualité).

I.4- Schéma directeur de la qualité :

Le schéma directeur qualité « SDQ » rédigé par le maître d'œuvre à partir de l'esquisse du schéma directeur qualité « SDQ » (en particulier à partir des éléments prévisionnels de celle-ci), en prenant en compte le (ou les) plan d'assurance qualité « PAQ » du ou des entrepreneurs(s). Il doit préciser : [8]

- l'organisation de l'encadrement retenue par l'entreprise et la maîtrise d'œuvre pour mener à bien les travaux sur le chantier. Le schéma directeur qualité « SDQ » précise aussi le rôle de chacun des intervenants,
- la consistance des contrôles interne qui sont faits sous la responsabilité de l'entreprise,
- la consistance du contrôle externe exécuté par la maîtrise d'œuvre, c'est à dire les tâches de chacun des intervenants de la maîtrise d'œuvre,
- l'organisation de la communication des résultats et des informations relatifs à la qualité.
- L'esquisse du schéma directeur qualité « SDQ » trace les grandes lignes de l'organisation de la qualité du chantier de terrassement en fonction des points sensibles recensés lors des études géotechnique (surveillance des sols compressibles, vérification de la difficulté d'extraction de déblai rocheux...)
- L'esquisse du schéma directeur qualité « SDQ » traduit une réflexion du projeteur sur l'organisation de l'assurance qualité qu'il préconise pour maîtrise l'exécution des travaux. Il est donc recommandé de la joindre aux pièces non contractuelles du dossier consultation des entreprises « DCE », transmises à l'entreprise pour faciliter l'établissement de l'offre.

- Le règlement de la consultation « RC » est une pièce non contractuelle constitutive du dossier de consultation des entreprises « DCE ». Il fixe les règles de la consultation pour les opérateurs économiques et complète l'avis d'appel public à la concurrence. Ce règlement est facultatif si les mentions qui doivent y être portées figurent dans l'avis de marché.

I.5- Etablissement du dossier de consultation des entreprises :

Le dossier de consultation des entreprises est le dossier transmis au candidat par la personne publique. Il comporte les pièces nécessaires à la consultation des candidats par le maître d'ouvrage, il s'agit de l'ensemble des documents élaborés par l'acheteur public destiné aux entreprises intéressées par le marché et dans lesquels elles doivent trouver les éléments utiles pour l'élaboration de leurs candidatures et de leurs offres.

Le maître d'œuvre établit la liste des pièces écrites et graphiques nécessaires à la consultation des candidats conformément à un cahier de charge qui contient l'ensemble des exigences en conformité au règlement rigueur.

I.6- Plan d'assurance qualité :

Le Plan Assurance Qualité « PAQ » définit les dispositions spécifiques prises par l'équipe projet et le client pour garantir la conformité des produits livrés avec les exigences spécifiées dans le cadre de la réalisation du projet.

Le Plan Assurance Qualité est un élément constitutif de la réalisation du projet. Les versions ultérieures, une fois approuvées l'équipe projet et le client, viendront se substituer à celle-ci au fur et à mesure de l'avancement du projet.

Le Plan Assurance Qualité est régulièrement actualisé en fonction des remarques et constatations faites au cours de la mise en pratique des procédures. Il n'est pas un document figé, mais un cadre organisationnel destiné à servir de document de référence à l'ensemble des intervenants, et à soutenir en permanence la gestion de la qualité.

Le cahier des clauses techniques particulières « CTTP » précise que le plan assurance qualité « PAQ » est constitué de trois types de documents .

1. Une note d'organisation générale de chantier qui précise :

➤ Les coordonnées des parties concernées : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprise responsable du chantier,

➤ L'affectation des tâches aux différentes entreprises et fournisseurs,

➤ Les moyens généraux en matériels

➤ Les moyens de laboratoire et de contrôle,

➤ La nature des documents remis au maître d'œuvre ou tenus à sa disposition, ainsi que la liste des documents de suivi d'exécution,

- La hiérarchisation des points sensibles propres au chantier considéré,
- L'articulation des actions de contrôle intérieur de l'entreprise avec celles du contrôle extérieur du maître d'œuvre, en donnant notamment les points critiques et les points d'arrêt,
- Les principes de gestion des anomalies.

2. Une ou des procédures d'exécution qui définit :

- les travaux faisant l'objet de la procédure,
- les moyens en personnel et en matériel spécifiques de la tâche considérée, ainsi que les matériaux et fournitures mis en œuvre ou utilisés en précisant la qualité, l'origine, la marque et le modèle exact s'il y a lieu.
- les modes opératoires, méthodologiques et instructions pour l'exécution des travaux, ainsi que les liaisons entre procédures.
- les conditions d'exercice du contrôle intérieur en précisant la nature de ces contrôles, les intervenants, les modalités de réalisation des épreuves de convenance prévues, les points sensibles (points critiques et points d'arrêt), les conditions de gestion des documents de suivi d'exécution (établissement, circulation, archivage).

3. Des documents de suivi d'exécution et de résultats qui répondent à la double nécessité :

- de fournir au maître d'œuvre la preuve que les prescriptions et spécifications du marché ont bien été respectées, afin de donner l'assurance que les travaux réalisés sont bien conformes au marché et aux règles de l'art.
- de recueillir les données nécessaires à l'établissement du dossier de

récolement qui constitue la mémoire du chantier.

Ils sont constitués des fiches de contrôle intérieur fournissant les informations sur les conditions de l'exécution et les résultats et actions ayant suivi ce contrôle. Ils peuvent récapituler également les résultats et conclusions de contrôle extérieur du maître d'œuvre.

Ces documents sont établis par l'entreprise, sur le chantier, au fur et à mesure de déroulement des travaux, à raison d'au moins une fiche par tâche élémentaire et/ou par jour d'activité

Le rôle du Plan Assurance Qualité « PAQ » consiste à décrire et répondre aux :

- Objectifs qu'on veut réaliser.
- Le périmètre et les limites de la prestation.
- Comment le faire ?
- Quand le faire ?
- Qui en a la responsabilité ?
- Qui va le faire ?
- Quels sont moyens humains et matériels à mettre en œuvre ?
- Comment mesurer les résultats ?

Le Plan d'Assurance Qualité (PAQ) s'articule donc autour de trois types de préoccupations :

- **La production** : outils, normes, méthodes, procédures et standards nécessaires à la bonne fin du projet considéré,
- **Le management** : organisation des travaux, mesures d'avancement, information des partenaires, l'ensemble articulé autour de la prise en compte des sept composantes du management de projet (Produit, Acteurs, Processus, Délais, Coûts, Performances et Cohérence globale) ;
- **L'organisation et l'animation du plan assurance qualité « PAQ »** :
Ses caractéristiques, son champ d'action, ses acteurs, ses objets, ses procédures, sa mise en œuvre, son évolution et ses mesures de suivi.

I.6.1- Plan de contrôle :

Le plan de contrôle établi par le maître d'œuvre constitue le document d'harmonisation entre le contrôle interne et le contrôle externe ; il précise les obligations de chacun, notamment en matière d'information réciproque des partenaires. Il est utile de prévoir à l'avance les supports papier pour la circulation des informations et de prévoir des documents utilisables à la fois pour le suivi de chantier et le récolement.

I.6.2- Déroulement du chantier :

Pendant le déroulement du chantier, la mise en application de plans d'assurance qualité nécessite notamment :

- la vérification de la bonne application de la démarche qualité,
- le traitement des anomalies et non-conformités.
- L'adaptation éventuelle du ou des plans d'assurances qualités .

I.7-DEFINITION DES TUFs :

I.7.1-Définition Générale

Les tufs se définissent comme des roches friables, poreuses, légères et de couleur claire. Ces roches datent du quaternaire et sont de constitution variable résultant d'un certain nombre d'échanges par dissolution et précipitations [4].

Les tufs se regroupent en trois catégories.

- les tufs calcaires
- les tufs gypseux
- les tufs mixtes

Notre étude est consacrée sur un tuf calcaire.

I.7.2- Formation des Tufs

I.7.2.1 - Les idées anciennes

Les pédologues ont été les premiers à étudier les croûtes calcaires en Algérie. L'étude pédologique a abouti à une restauration des sols encroûtés. Nous citons dans cette partie certaines idées venant de plusieurs pédologues :

- **RENOU (1848) in [4]:** a consacré l'usage du terme croûte que c'est un enduit de surface qui recouvre tous les terrains, surtout les terrains d'eau douce et qui suit toutes les ondulations de la surface.
 - **LUDOVIC (1852) in [4]:** définit cette formation comme étant un calcaire terreux qui recouvre une grande partie de l'Algérie comme un immense linceul blanc.
 - **POMEL (1883) et PERVINQUIE (1903) in [4]:** ont vu dans la croûte une incrustation stalagmitique due à l'évaporation des eaux remontant par capillarité.
 - **DURAND (1963) in [4]:** distingue plusieurs sortes de croûtes:
 - Les croûtes zonaires ;
 - Les formations pulvérulentes calcaires ;
 - Les encroûtements ;
 - Les nodules.
- **Les croûtes zonaires:** la croûte zonaire se serait formée par dépôt calcaire, précipité au sein d'une nappe d'eau chargée de bicarbonate de calcium ruisselant en nappe sur des pentes douces favorisant son étalement et l'évasion du gaz carbonique. Ce ruissellement était intermittent et permettait aux feuillettes de croûtes de durcir par exposition à l'air.
 - **Les formations pulvérulentes :** c'est un calcaire pulvérulent blanc à fort pourcentage en carbonate de chaux, comportant des granules plus durs et parfois surmontés par une fine pellicule zonaire.
 - **Les encroûtements :** ce sont des formations côtières sableuses à ciment calcaire.
 - **Les nodules :** ce sont des amas de calcaires pouvant être farineux ou concrétionnés. Ces nodules se retrouvent soit dans le calcaire pulvérulent ou soit à l'air libre. Ils proviendraient du lessivage du calcaire des horizons supérieurs. Le perméable.

I.7.2.2 - Les idées récentes

Que ce soit dans les formations alluviales et colluviales ou dans les horizons pédologiques qui se développent au sommet de ces formations, le calcaire peut être individualisé de trois façons différentes :

- Distribution diffusée ;
- Distribution discontinues ;
- Distribution continues.

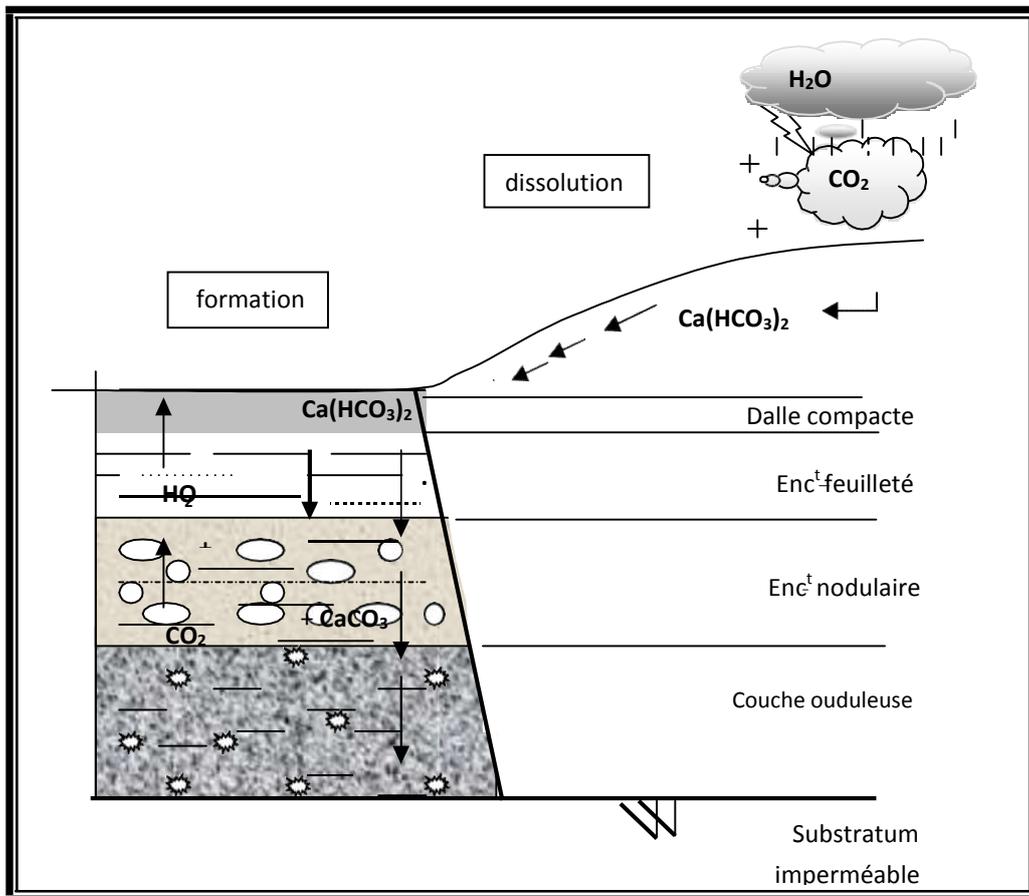
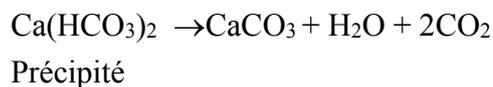


Figure I.4- Schéma du circuit de la formation des tufs calcaires [4].

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 :



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

I.7.3- Classification des tufs calcaires

I.7.3.1- Classification selon la teneur en carbonate de calcium (CaCO3)

Cette classification a été établie par **Ruellan in [4]**: où il caractérise les

encroûtements calcaires suivant la teneur en CaCO_3 . Il propose trois catégories :

- Distribution diffusée : la teneur en calcaire est très faible. Il n'est pratiquement pas visible à l'œil nu.
- Concentrations discontinues : la teneur en calcaire devient plus élevée, elle est de 40 à 60 %.

Concentrations continues : lorsque la concentration en calcaire se poursuit (dépasse 60 %), elle devient continue, on a alors affaire aux encroûtements calcaires proprement dits. Cette classe est résumée dans le tableau I-2 par Ruellan.

Tableau I.1 - Classification d'encroûtements proprement dits [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 sensu strictu	Feuillets superposés et discontinus d'encroûtement massif ou nodulaire d'épaisseur millimétrique à centimétrique croissant du bas en haut.	> 70	Quelques centimètres à > 1 m	Sous les croûtes, il y a presque toujours des encroûtements non feuilletés. Les dalles compactes n'existent qu'au sommet des croûtes et peuvent remplacer entièrement celles-ci. Des pellicules rubanées sont presque toujours associées à la dalle compacte dont elles tapissent la surface supérieure et les fissures.
	Dalles compactes	Feuillets de croûte pétrifiés, épaisseur de quelques centimètres à plusieurs décimètres			

I.7.3.2- Classification selon le processus pédologique

Le phénomène pédologique transforme les différents horizons des sols. D'après Ruellan in [4], ce phénomène se produit à partir d'un certain stade de concentration. L'évolution finale du processus de formation des croûtes calcaires est l'encroûtement mûr figure(5). A ce stade, la formation comprend les horizons suivants :

a) - Horizon A :

Pauvre en calcaire, c'est la terre végétale d'une épaisseur de 30 à 50 cm.

b) - Horizon B :

Riche en calcaire (40 à 90 %) d'une épaisseur de 1 à 2 m, il est constitué de trois couches de haut en bas, d'une dalle compacte très dure à forte teneur en carbonate, d'une croûte constituée de feuilletés de dureté plus faible que la dalle et d'un encroûtement nodulaire qu'il s'agit de nodules de calcaires durs pris dans une gangue calcaire plus au moins pulvérulente.

c) - Horizon C :

C'est le sol origine, c'est un matériau poudreux ou l'enrichissement en calcaire est faible.

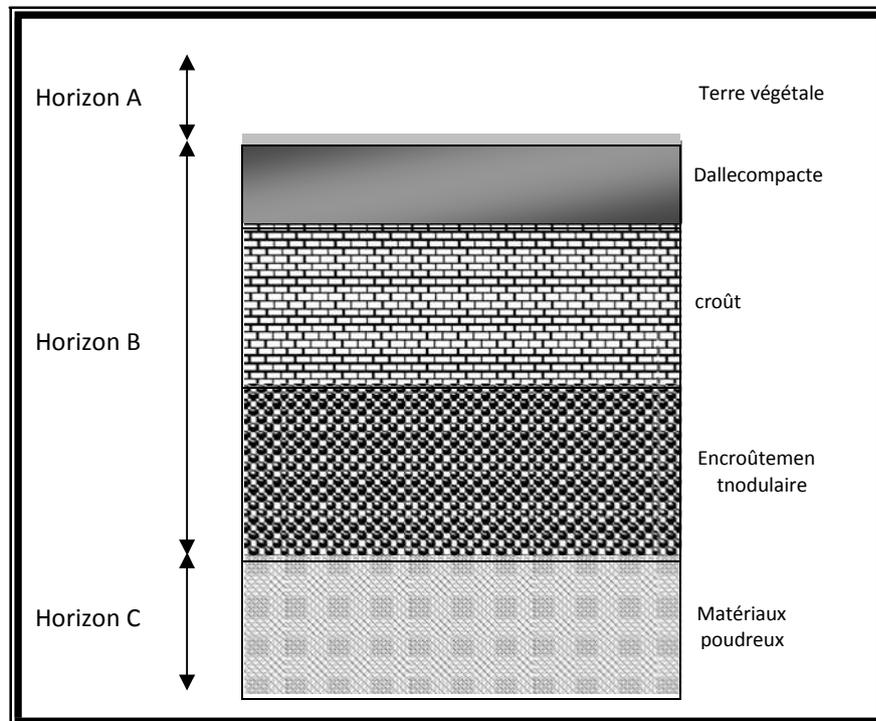


Figure I.5– Classification des encroûtements calcaires d'après Ruellan à partir du processus pédologique (encroûtement mûr) [4].

I.8- RECHERCHE ET EXPLOITATION DES GISEMENTS :

I.8.1- Recherche d'un gisement

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

- Permettre d'extraire dans des conditions économiques raisonnables, un granulat ayant les qualités souhaitées;
- Posséder un ressource suffisante;
- Etre situé le plus près possible du chantier ou au voisinage du centre de gravité des divers lieux d'utilisation.

Un certain nombre d'indicateurs en relation avec les travaux de recherches sont utilisées avant d'effectuer une prospection par sondage ou méthode géophysique. Par exemple, on les recherchera dans les zones arides à subhumides dans les terrains à faibles pentes, dans les zones habitées ou cultivées.

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 des inconvénients 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 .

I.8.2- Exploitation d'un gisement

L'exploitation est très variable 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.

I.8.2.1- Découverte

La découverte est réalisée au Bouteur, après que la terre végétale dont l'épaisseur est généralement faible (20 à 30 cm) a été décapée.

I.8.2.2- Extraction

La croûte et la dalle sont fragmentées à la défonceuse et extraites au boteur. Selon la granulométrie souhaitée pour le matériau, on limite l'extraction à la croûte ou bien on extrait aussi certaines épaisseurs de la couche pulvérulente. Les matériaux extraits sont en générale gerbés en tas, ce qui permet une certaine homogénéisation. 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, un 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 peut être ainsi évité des échecs trop coûteux.

I.9- UTILISATION DES TUF CALCAIRES EN CONSTRUCTIONS ROUTIERES :

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

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

I.9.1- Assises de chaussées

a) 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 plateforme et l'importance du trafic (Forte, moyen ou faible).

Le critère fondamental de convenance est le CBR mesuré après 4 jours d'imbibition et pour une densité de 95 % de la densité maximale.

b) 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 I-3). 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.

I.9.2- Remblais

Le tableau suivant résume quelques critères pour l'utilisation des tufs calcaires en assise de chaussées et en remblais.

D'autres spécifications pour l'utilisation des tufs en construction routière en Algérie ont été proposées par **Struillou et Alloul in [4]**.

Tableau I.2 - Critères d'utilisation des tufs calcaires en Algérie (pour assises de chaussées et aux remblais) [4].

	Assises de chaussées		Remblais
	Couche de fondation	Couche de base	
Granulométrie	Suivant le fuseau (Annexe I)	Suivant le fuseau (Annexe I)	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	$Ca CO_3 > 45 \%$	$Ca CO_3 > 45 \%$	$Ca CO_3 > 30 \%$
CBR imbibé	$CV > 20^{(1)}$ $CW > 30^{(1)}$ $RN > 35^{(1)}$	$CV > 20^{(1)}$ $CW > 30^{(1)}$ $RN > 35^{(1)}$	$CBR > 14$
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.

I.10 - APPLICATION DES TUF TRAITES EN CONSTRUCTION ROUTIERE [4] :

Actuellement et presque partout dans le monde, la construction routière est orientée

vers les sols traités aux liants hydrauliques. Les applications des tufs traités à la chaux et au

Ciment sont très nombreux, et dans un grand nombre de pays, mais restent toujours dans le

Cadre de faible trafic. Nous citons quelques exemples :

I.10.1- Cas du ciment :

Le traitement, s'effectue de la manière suivante :

- Par un traitement en place ;
- Par un apport de matériau que l'on dispose en couche et en suite on le traite,
- Par un apport de sol (tuf) traité contenant déjà le ciment,
- Par une couche traitée en place surmontée de la couche supérieure rapportée.

Les exemples de traitement au ciment sont rares, nous citons :

- En Algérie, les essais de traitement d'un tuf au ciment sont anciens puisque la RN 8, par exemple, a été traitée en 1958 entre Sidi Aissa et Ain El Hdjel par 2 à 3 % de ciment. Plus récemment, la piste d'aérodrome d'Es Senia à Oran a été construite avec du tuf traité à 5 % de ciment
- En Tunisie, la route MC 100 entre Quardenine et Msaken a été réalisée, il a plus de quarantaine d'années par traitement en place d'un tuf au ciment.
- Aux Etats-Unis, plus de 100 millions de m² de routes comportent des couches de fondations en sol – ciment
- En Russie, l'ajout de ciment permet d'obtenir des routes résistant bien aux cycles de gel – dégel
- En Grande-Bretagne, en 20 ans, plus de 1 million de m² de sol ont été traités, 164 routes dont les couches de fondations et de base étaient en sol – ciment et âgées de 8 à 23 ans, la plupart sont en excellent état [4].
- Au Brésil, plus de 100 millions de m² de routes ont été traitées au ciment [4].

I.10. 2-Cas de la chaux :

Cette solution semble courante en Afrique de Sud et en Argentine [4]. Elle est beaucoup

Moins fréquente dans les pays du Maghreb qui produisent peu de chaux. En Afrique de Sud, le traitement a été effectué en place par épandage de chaux pulvérulente et mélange à la niveleuse ou à la charrue à disque, le dosage en chaux est le plus Souvent compris entre 2 à 3 %.

I.11 -APPLICATION DU TRAITEMENT IN-SITU

I.11.1 Épandage de liant :

L'agent chimique (chaux, ciment, liant combiné) est épandu de manière uniforme sur la surface à traiter. L'opération doit être menée de façon à réduire au maximum la production de poussière.



Photo I.1 Préparation du sol à l'aide d'un charrue



Photo I.2 Incorporation de la chaux ou du ciment à l'aide d'un épandeur

I.11.2-Malaxage sol-liant :

Le malaxage s'effectue immédiatement (endéans le 1/4 h) après l'épandage pour éviter la dispersion de l'agent de traitement par le vent et la carbonatation de la chaux avec le CO₂.
d'une manière générale, le malaxage doit être assuré les fonctions suivantes:

- meilleure homogénéité du mélange
- réduction des émissions de poussière



Photo I.3 Malaxeur

I.12- CONCLUSION :

La reconnaissance des matériaux qui a été présentée dans le chapitre I nous a permis d'avoir une idée sur les matériaux qui peuvent constituer la chaussée, spécialement les tufs d'encroûtements qui restent un revenu en matériaux routiers intéressants et économiques pour de nombreux pays à climat aride ou semi-aride dans le monde.

En Algérie des routes ont été réalisées, dans l'ensemble avec succès, en tufs d'encroûtements calcaires dans les zones semi-arides et en tufs d'encroûtements gypseux ou gypso-calcaires en zone saharienne aride. Parmi les objectifs majeurs de l'utilisation des tufs d'encroûtements dans les projets routiers, on peut citer :

- valoriser et défendre les ressources en matériaux routiers;
- diminution de l'épaisseur des couches des chaussées;
- réduction de l'enveloppe du coût global du projet routier.

CHAPITRE II

L'ETUDE GEOTECHNIQUE

ROUTIERE

II.1-INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, nous avons montré une représentation générale de la formation des tufs calcaires, afin de bien comprendre leurs propriétés géo-mécaniques ainsi que leurs comportements.

Nous nous intéressons dans ce deuxième chapitre, à l'étude d'identification géotechnique de ces matériaux à l'aide des essais de laboratoire classique.

Dans le but d'une valorisation des matériaux locaux de la région d'Adrar, nous allons déterminer les propriétés physiques et mécaniques des échantillons prélevés dans les carrières à ciel ouvert pour une utilisation en construction routière.

II.2-PRESENTATION DES ECHANTILLONS :

Notre travail est orienté vers la valorisation des tufs de la région d'ADRAR (zone Bouda) en technique routière. Nous avons prélevés des échantillons des carrières qui ont fait leurs preuves de bon comportement dans la construction routière (corps de chaussée) relative à notre thème de recherche (voir figures II.1 et II.2)

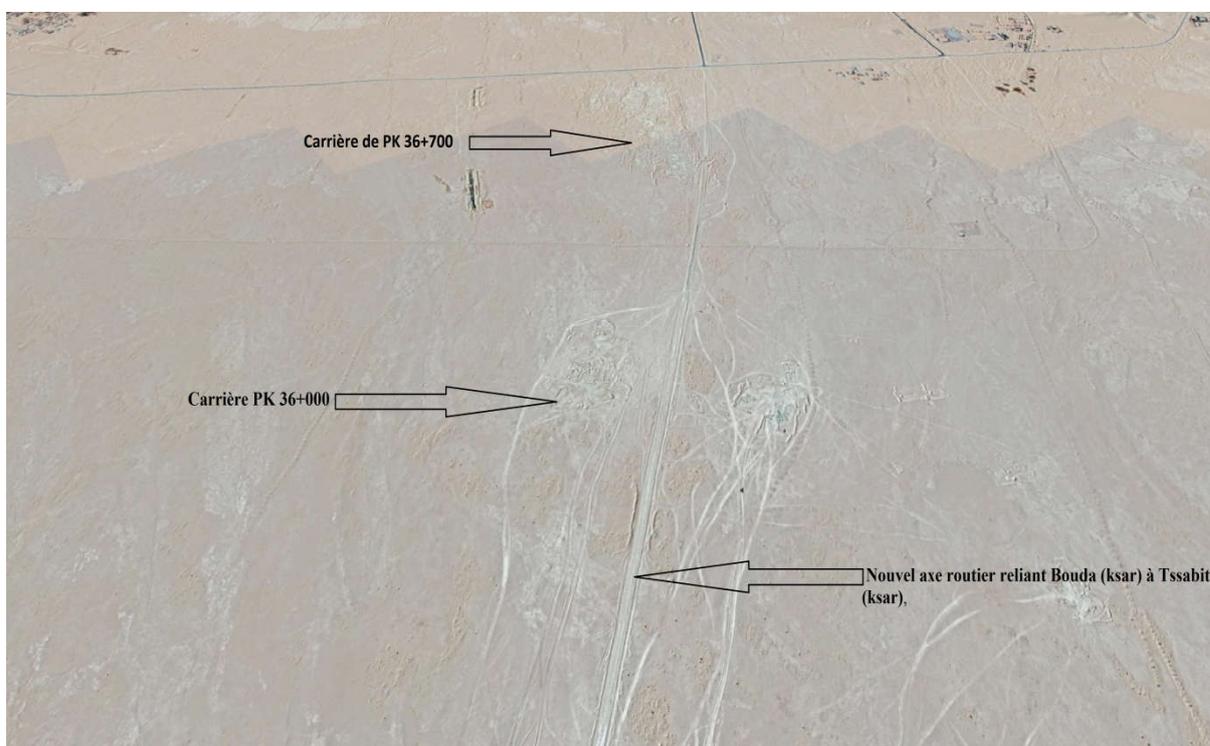


Figure II.1-Carte de localisation des carrières étudiées (tuf) (image satellitaire) [5].

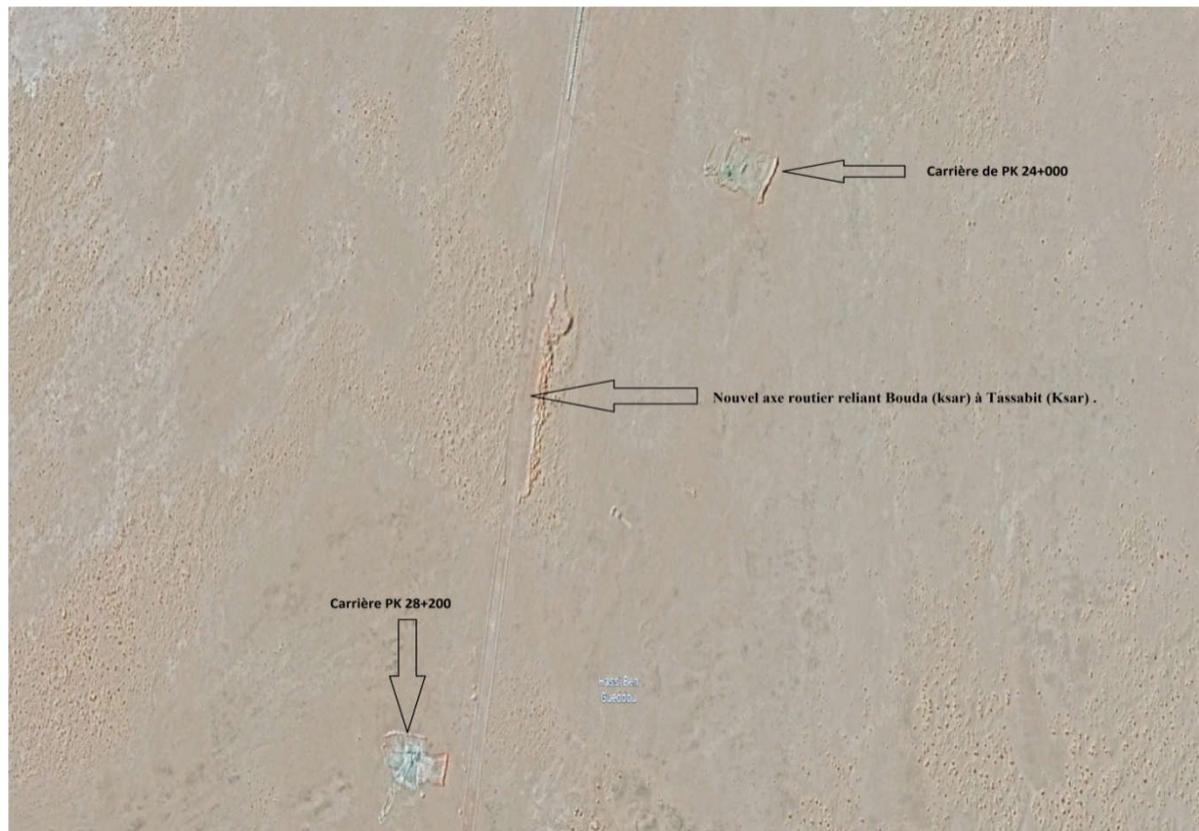


Figure II.2 – Carte de localisation des carrières étudiées (tuf) (image satellitaire) [5].

II.2.1-Explication sur les carrières

❖ Carrière de PK 36+700 gauche vers Tsabit

Cette carrière n°1 qui est montrée sur la photo II.1, elle se trouve au **PK 36+700 gauches vers Tsabitville**. Le matériau est de couleur blanchâtre.



Photo II.1 – Carrière de PK 36+700 gauche vers Tssabit

❖ Carrière PK 36+000 gauche vers Tssabit

La carrière est située au **PK 36+000 gauche vers** la ville de Tssabit. Le matériau présente une couleur blanchâtre (voir la photo II.2).



Photo II.2 –Tuf de Carrière de PK 36+000 gauche vers Tssabit

❖ Carrière PK 28+200 gauche vers Tssabit

Cette carrière est située au **PK 28+200 gauche vers** la ville de Tssabit, Le matériau présente une couleur verdâtre (voir la photo II.3).



Photo II.3 –Carrière de PK 28+200 côté gauche vers Tssabit

❖ Carrière de PK 24+000 côtégauche vers Tassabit

Cette carrière n°4 qui est figurée dans la photo II.4, elle se trouve au **PK 24+000** côté gauches vers Tassabitville. Le matériau est de couleur blanchâtre (voir photo II.4).



Photo II.4 – Carrière de PK 24+000 côtégauche vers Tsabit

Dans le but de déterminer les caractéristiques géotechniques et mécaniques des matériaux des différentes carrières, nous avons réalisés une série d'essais au laboratoire en respectant les différentes normes, à savoir :

- Analyse granulométrique Norme NFP 94-056
- Bleu de méthylène Norme NFP 94-068
- Limites d'Atterberg Norme NFP 94-051
- Proctor modifié Norme NFP 94-093
- Essai de CBR Norme NFP 94-078
- Analyses chimiques

II.3-ESSAIS AU LABORATOIRE:**❖ Echantillons des différentes carrières :**

- ✓ P1- Du pk 36+000 côté gauche versTsabit
- ✓ P2- Du pk 36+700 côtégauche vers Tsabit
- ✓ P3- Du pk 28+200 côté gauche vers Tsabit
- ✓ P4- Du pk 24+000 côtégauche vers Tsabit

II.3.1-Essais d'identification

❖ Analyse granulométrique

Selon la norme **NFP 94-056** l'analyse granulométrique a pour objet la classification des granulats d'après les dimensions de leurs grains à l'aide d'une série de tamis normalisés à mailles carrés ou circulaires (passoires). En ce qui concerne les éléments inférieurs à 0.08mm, on procède à l'analyse par sédimentométrie.

Les résultats obtenus sont représentés par les courbes granulométriques en annexes.

Le tableau III montre les différentes proportions des éléments des échantillons des quatre carrières P1, P2, P3 et P4 en fonction du diamètre des tamis.

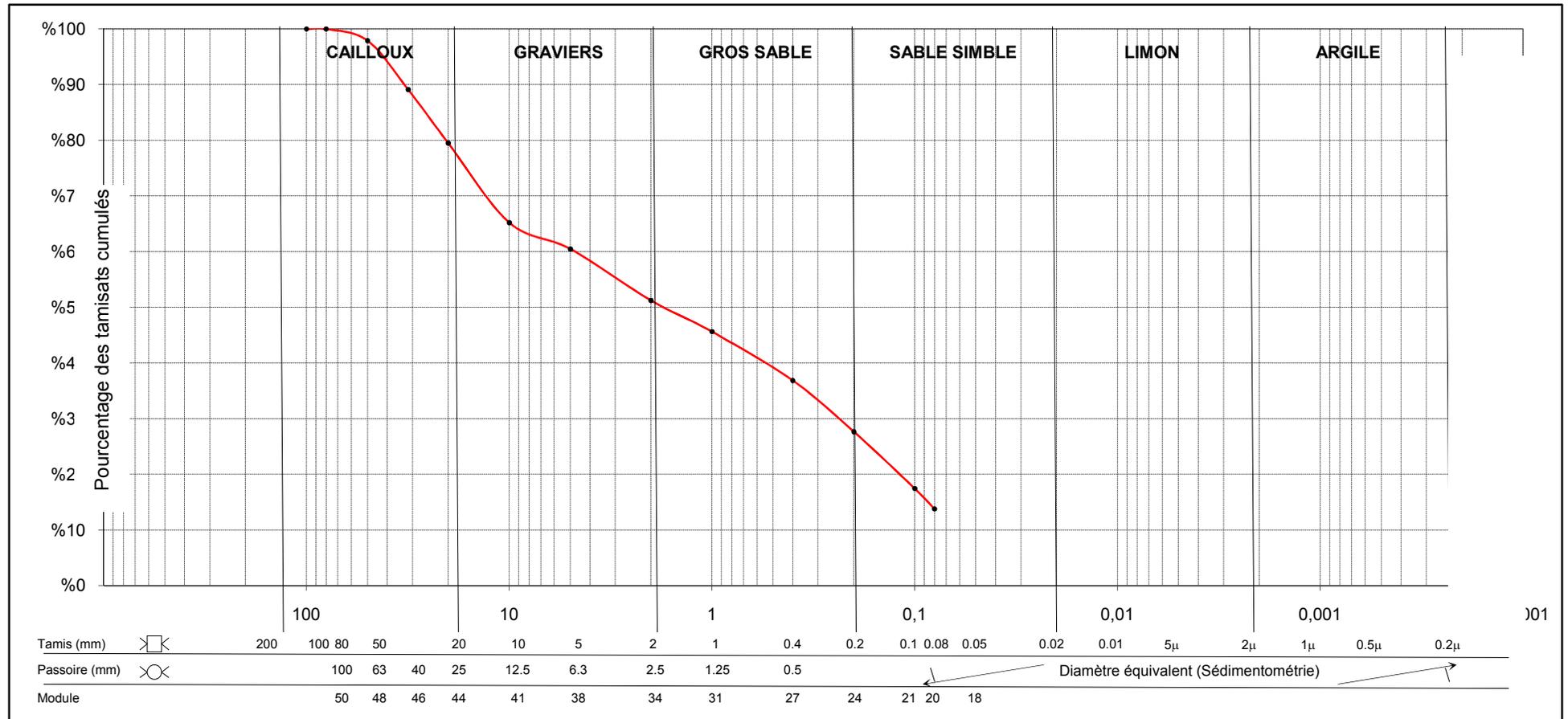
Tableau II.1-Les essais d'analyse granulométrique

Provenance	Carrière BOUDA												
	80	63	50	31.5	20	10	05	02	01	0.4	0.2	0.1	0.08
Echantillon P1 (%)	100	100	95	89	76	61	58	55	52	48	42	25	19
Echantillon P2 (%)	100	100	97	88	78	76	70	61	56	47	36	27	23
Echantillon P3 (%)	95	89	85	75	70	64	62	57	54	42	21	12	09
Echantillon P4 (%)	100	94	84	71	63	55	51	45	41	36	27	18	16

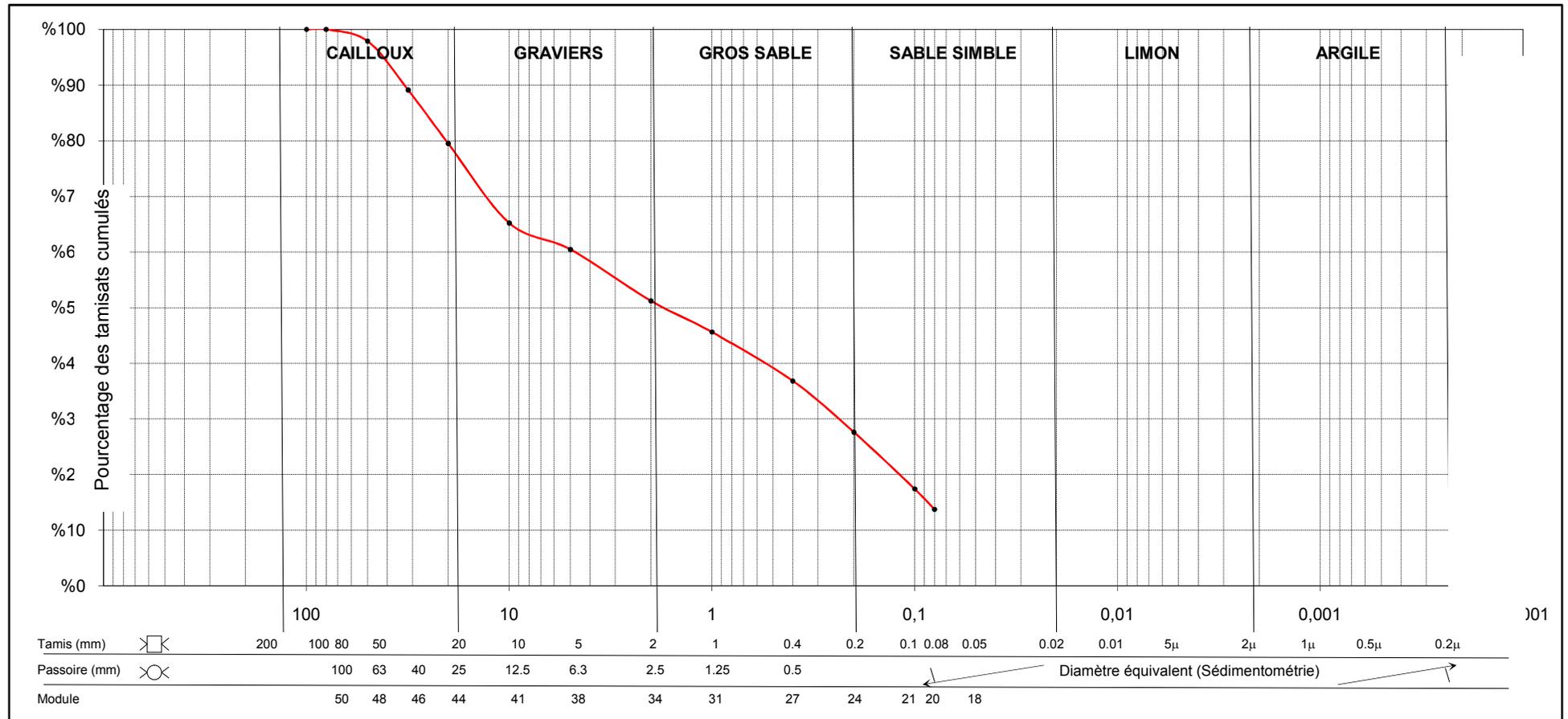
-Suite aux résultats obtenus, les matériaux présentent :

- 1/des courbes granulométriques continues et étalées
- 2/des pourcentages de fillers qui varient entre 9% à 23%
- 3/ les gros éléments plus de 45%
- 4/ les éléments fins varient entre 33% à 45%

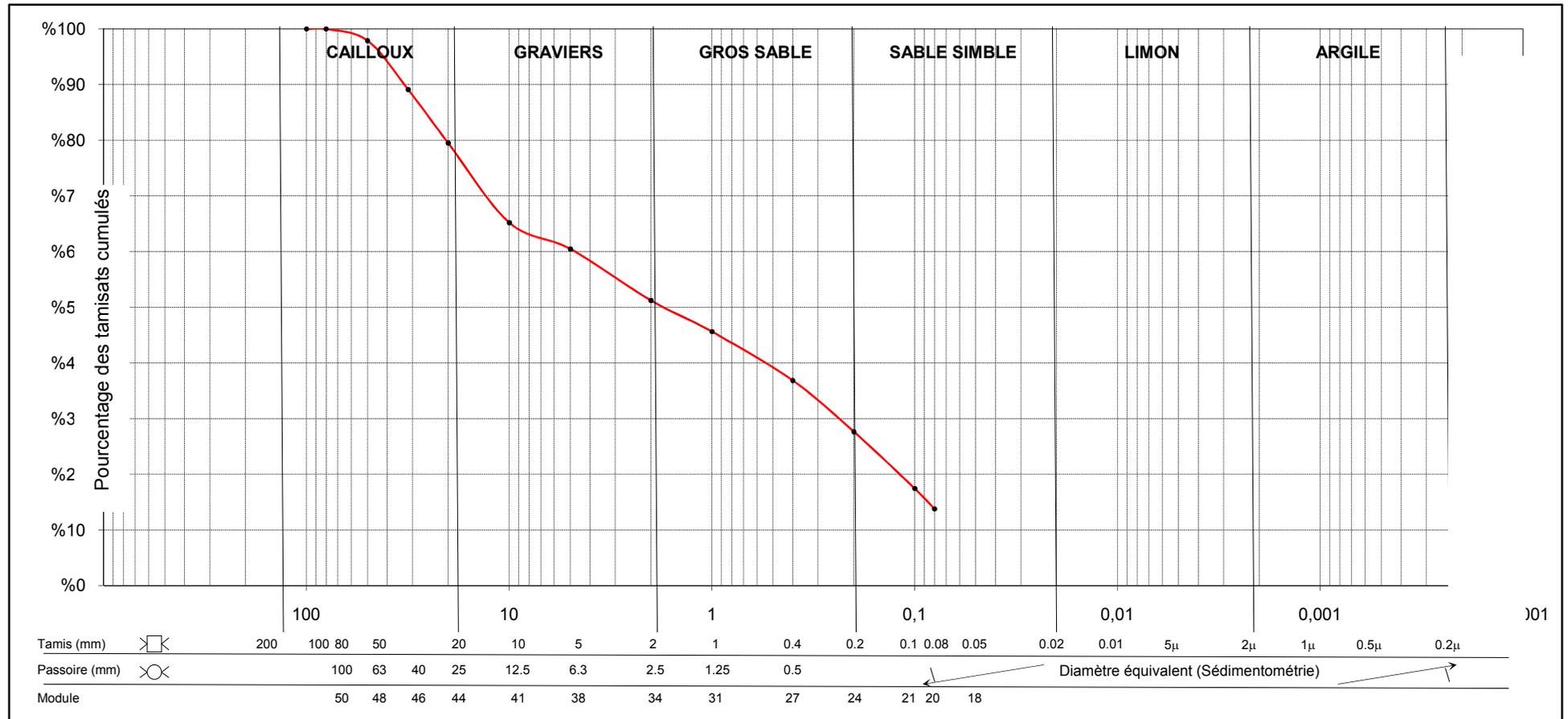
ANALYSE GRANULOMETRIQUE AU PK 36+700

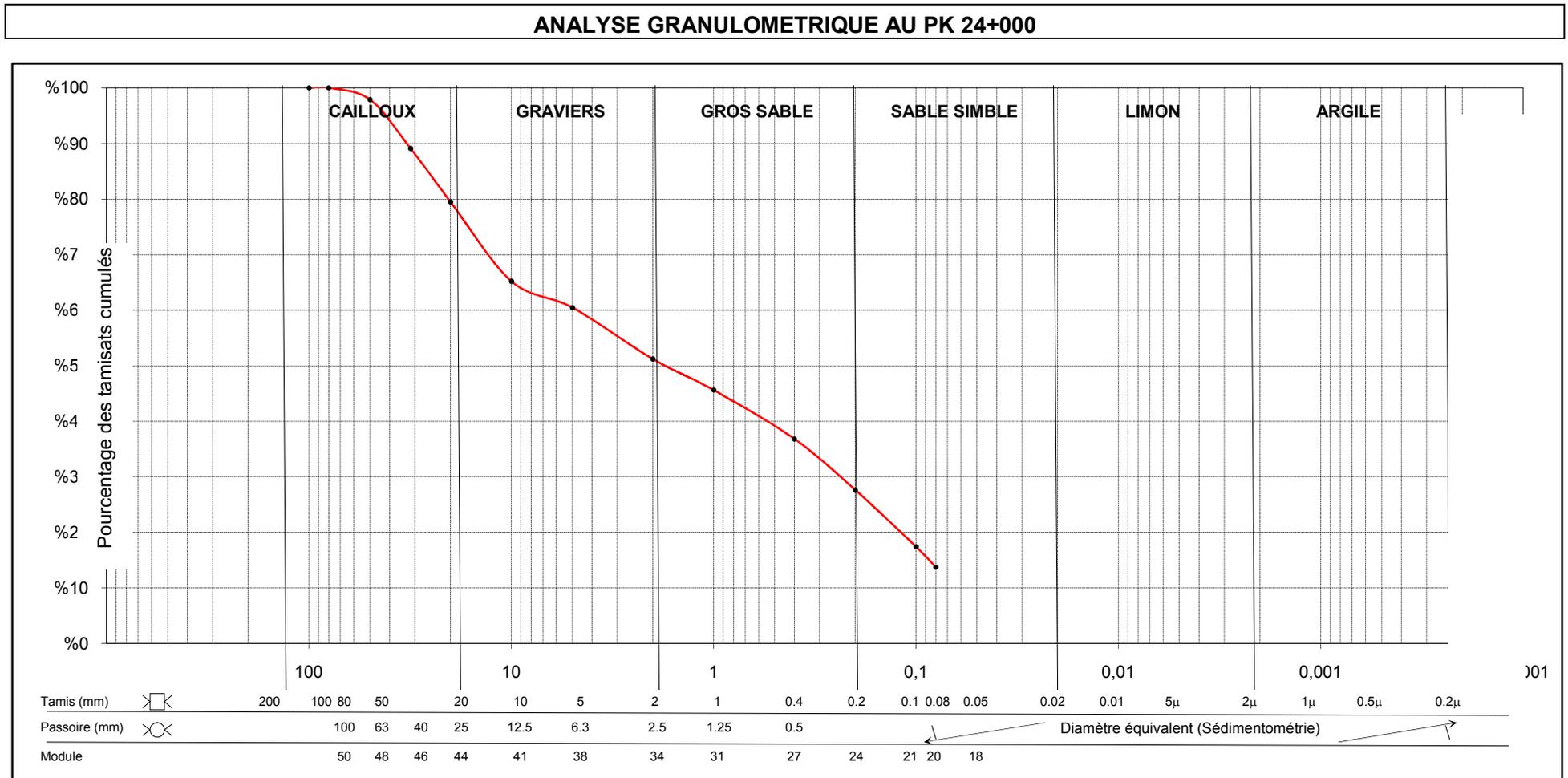


ANALYSE GRANULOMETRIQUE AU PK 36+000



ANALYSE GRANULOMETRIQUE AU PK 28+200





❖ Limite d'Atterbeg

Selon la norme (NFP 94 -0 5 1)

- Principe de l'essai

L'essai s'effectue sur la fraction 0/400 μm en deux phases :

- Détermination de la teneur en eau W_L pour laquelle une rainure pratiquée dans une coupelle se ferme à 10 mm, suite à 25 chocs répétés.
- Détermination de la teneur en eau W_P pour laquelle un rouleau de sol de diamètre 3 mm se fissure.
- Limite de Liquidité : W_L (frontière entre l'état plastique et liquide)
- Limite de Plasticité : W_P (frontière entre l'état solide et plastique)

-Résultats et interprétations

Les limites d'Atterberg permettent de calculer l'indice de consistance

$$IP = W_L - W_P$$

$$I_c = (W_L - W_N) / IP$$

avec W_N : teneur en eau naturelle. de la fraction

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

$I_c = 1$ si le matériau est à l'état solide

Tableau II.2- Classification des sols selon l'indice de plasticité I_p

Indice de plasticité	Type du sol
$IP < 1$	Sol pulvérulent
$1 \leq IP \leq 7$	Sable argileux
$7 \leq IP \leq 17$	Argilesablonneuse
$17 \leq IP$	Argile

Tableau II.3-Classification de l'argilite d'un silt (limon) selon IP

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 < IP < 5$	Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs)
$5 \leq IP < 15$	Moyennement plastique
$15 \leq IP < 40$	Plastique
$40 \leq IP$	Très plastique

Le tableau II.4 montre les résultats des limites d'Atterberg des différents échantillons.

Tableau II.4-Ordres de grandeur de W_L , W_P et IP

	P1	P2	P3	P4
Limite de liquidité W_L (%)	25,30	36,25	28,1	34,6
Limite de plasticité W_P (%)	18,31	28,79	21,1	21,86
Indice de plasticité IP	7	7,45	7,00	10,2

Les indices de plasticité obtenus montrent que les matériaux sont dans un état moyennement plastique. La figure I.1 justifie la plasticité des échantillons selon l'abaque de Casa grande..

II.3.2-Essais chimiques :

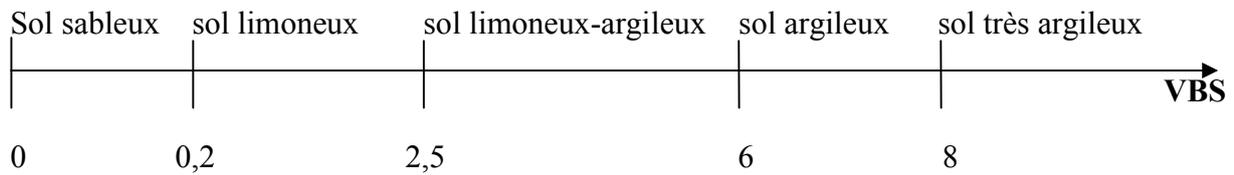
❖ Valeur au bleu de méthylène du sol (VBS)

L'essai au bleu de méthylène, également appelé « essai au bleu », en utilisant cette essai en Géotechnique pour déterminer l'argilosité d'un sol.

Cette valeur est déterminée par l'essai au bleu de méthylène. Elle est mesurée sur la fraction 0/5 mm et exprime en grammes de bleu par cent grammes de la fraction 0/50 mm du sol sec étudié, elle est notée valeur au bleu de méthylène du sol « VBS ».

Cet essai est applicable pour tous les sols ainsi pour certains matériaux rocheux.

La surface spécifique totale de la prise d'essai est donnée par : $SST (m^2/g) = 20,93 \times VBS$

Classification :

Le tableau II.5 montre la valeur au bleu des différents échantillons analysés.

Tableau II.5-Valeur au bleu de méthylène des sols P1, P2, P3 et P4

Echantillon	P1	P2	P3	P4
VBS	0,9	0,9	0,8	1,08

La valeur au bleu de méthylène du sol VBS obtenu sur les quatre carrières varie entre 0.2 et 2.5, selon la classification, les différents sols sont **limoneux**.

❖ **Teneur en carbonate de calcium $CaCO_3$**

On utilise le calcimètre de Bernard, l'essai consiste en une attaque d'une prise d'essai du matériau (fraction granulométrique < 0.2 mm) par l'acide chlorhydrique HCl concentré. L'essai est réalisé suivant la norme NF P 18-553.

La teneur en carbonate (W_{CaCO_3}) de calcium d'un échantillon de sol est le rapport entre le volume de gaz carbonique (CO_2) dégagé par 0.5 g d'échantillon au volume de gaz carbonique (CO_2) dégagé après attaque dans les mêmes conditions d'une prise d'essai de carbonate de calcium pur.

$$W_{CaCO_3(\%)} = \frac{\text{Volume de } CO_2 \text{ dégagé par 0.5 g d'échantillon}}{\text{Volume de } CO_2 \text{ dégagé par 0.5 g de } CaCO_3 \text{ pur}}$$

La réaction chimique qui se produit est :



Le tableau II.6 montre les différentes analyses chimiques des quatre échantillons.

Tableau II.6- Analyses chimiques

Designation	Echantillon			
	P1	P2	P3	P4
% carbonates CaCO_3	30,40	25,7	12,2	4,10
% sulfate SO_4	0,82	1,64	6,15	10,25
% chlorures CL	0,53	0,39	0,53	0,27
% insolubles $\text{SiO}_2\text{-MGO-AL}_2\text{O}_3\text{+Fe}_2\text{O}_3$	68,25	72,27	81,12	84,98

Les résultats obtenus des deux matériaux (tuf) P1 et P2 présentent un taux de sulfate moyennement agressif d'une part et d'autre part les deux autres P3 et P4 ont un taux de sulfate agressif vis-à-vis du bitume.

Dans ce cas, quelques précautions et traitements doivent être prises avant l'utilisation de P3 et P4 aux corps de chaussées, même le tuf P2 doit être utilisé avec précaution (voir le chapitre suivant sur le traitement des sols).

II.3.3-Essais mécaniques

❖ Essai Proctor modifié

L'essai se fait suivant la norme NF P94-093, il a pour but de déterminer pour un compactage normalisé d'intensité donnée, la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale correspondante. L'essai consiste à compacter un certain nombre d'échantillons dans un volume donné, à différentes teneurs en eau et à un même niveau d'énergie de compactage. L'énergie de 2472 t/m^3 est appliquée aux matériaux en :

- 5 couches de 55 coups de dame Proctor modifié dans le moule CBR (fraction 0/20mm).
- 5 couches de 25 coups de dame Proctor modifié dans le moule Proctor (fraction 0/5mm).

Dans la pratique, la densité maximale obtenue à l'essai Proctor modifié correspond à celle que permettent d'obtenir les compacteurs modernes pour le compactage des matériaux à leurs humidités optimales, utilisés en assises de chaussées.

La courbe Proctor représentée sur l'annexe représente la variation de la densité sèche γ_d en fonction de la teneur en eau ω du matériau étudié. Nous pouvons donc déterminer la teneur en eau optimale ω_{opt} et la densité sèche maximale $\gamma_{d \text{ max}}$ à l'optimum Proctor.

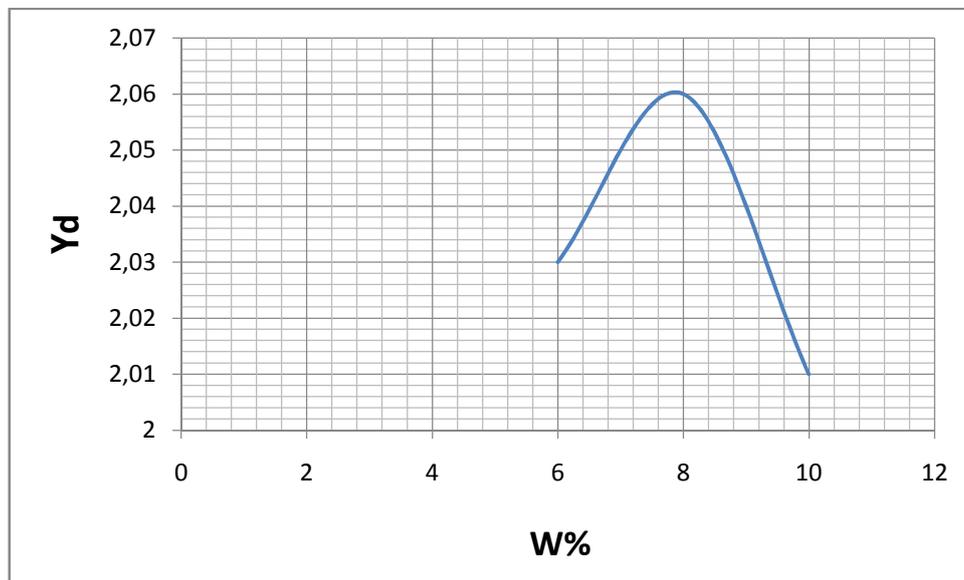
Nous montrons dans le tableau 09, les valeurs des paramètres de l'optimum Proctor modifié en fonction de la nature des matériaux.

Les valeurs à l'optimum Proctor sont : $\gamma_{\text{dopt}} = 2.03 \text{ t/m}^3$ et $W_{\text{opt}} = 9.16 \%$; ces valeurs sont proches d'un matériau appelé grave non traité (voir tableau IX).

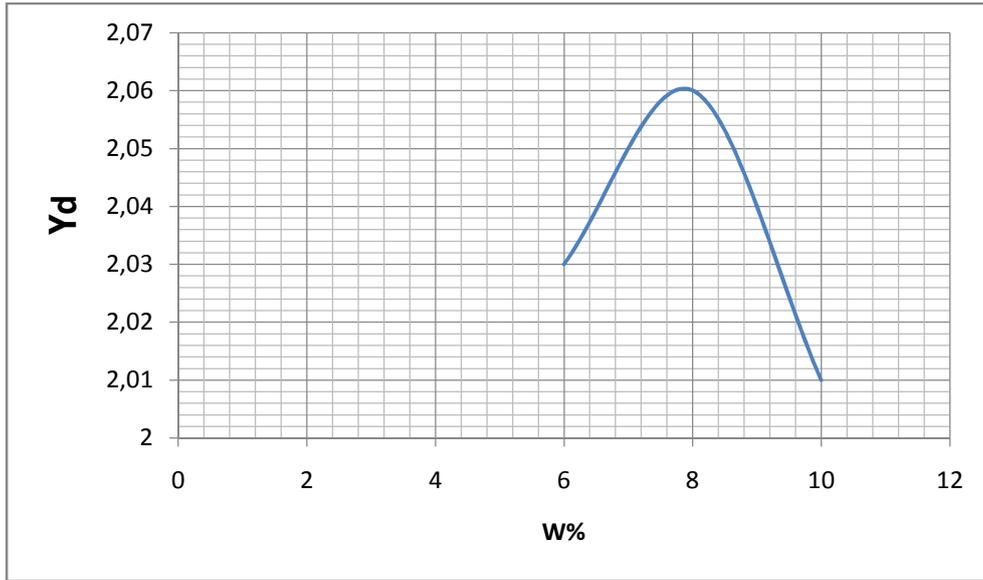
Tableau II.7 : Caractéristiques optimales de l'essai Proctor des différents échantillons

Echantillon	P1	P2	P3	P4
Densité (KN/m^3)	20,6	20,00	20.3	20,3
Teneur en eau (%)	8	10	8.7	6

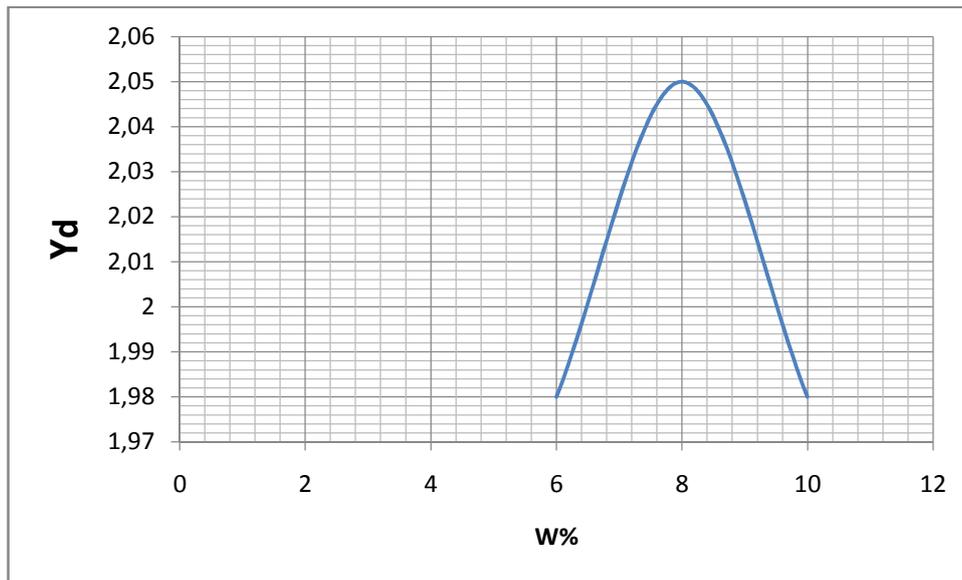
La densité maximale donnée par l'essai Proctor modifié varie dans l'intervalle 20,00 à 20,6 KN/m^3 , pour une teneur en eau qui varie dans l'intervalle de 6 % à 10% .



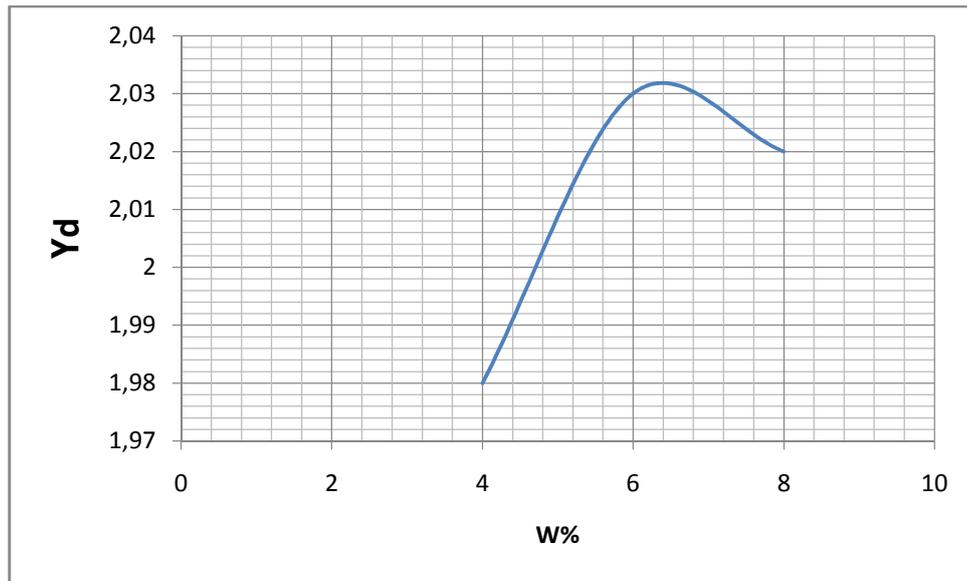
Courbe 1- Proctor modifiée AU PK 36+000



Courbe 2- Proctor modifie AU PK 36+700



Courbe 3- Proctor modifie AU PK 28+200



Courbe 4- Proctor modifiée AU PK 24+000

❖ Essai CBR

Le coefficient le plus généralement utilisé pour donner une épaisseur à un corps de chaussée est l'indice CBR. Cet indice empirique se détermine par un essai au laboratoire réalisé selon la norme AFNOR NF P 94-078, il permet d'estimer la portance du sol compacté à une humidité donnée. Il est basé sur la résistance à la pénétration du sol par un poinçon normalisé. L'éprouvette du sol est compactée dans le moule CBR. Le tableau 10 nous renseigne sur les valeurs des caractéristiques à l'optimum Proctor modifié et la portance du sol.

Tableau II.8 : Caractéristiques de compactage et de portance

Echantillon	P1	P2	P3	P4
CBR	113,49	78	115,4	80,44

L'indice de portance donne une valeur CBR qui varie entre 78 à 115.4.

II.4-CLASSIFICATION GTR (GUIDE TECHNIQUE ROUTIER)

Nous montrons dans le tableau qui se trouve en annexe la classification des sols utilisés dans les routes On a :

- $D_{\max} \leq 50\text{mm}$
- Tamisât à $80\mu\text{m} \leq 35\%$ (**classe B : sols sableux et graveleux avec fines**)
- Tamisât à $80\mu\text{m}$ compris entre 12 et 35 %
- Tamisât à $2\text{mm} \leq 70\%$

- $IP \leq 12$ et $VBS \leq 1,5$

D'après la classification GTR [7], les carrières P1 et P2 sont classés sur

B5 (sables et graves très silteux).

- $D_{max} > 50\text{mm}$
- tamisât à $80\mu\text{m} > 12\%$ ou si le tamisât à $80\mu\text{m} \leq 12\%$, la $VBS > 0,1$

D'après classification GTR, les carrières P3 et P4 sont classés sur

C1Ai (sols comportant des fines et des gros éléments).

II.5-UTILISATION DU MATERIAU ETUDIE :

D'après les essais au laboratoire et la classification GTR, on conclut que les carrières P1 et P2 peuvent être utilisées dans la couche de base car le pourcentage de sulfate est moyennement faible, mais les carrières P3 et P4 sont à utiliser dans la couche de fondation avec un traitement au préalable (voir chapitre suivant).

II.6-CONCLUSION :

Les essais d'identifications géotechnique sont pour but de classer les matériaux et de les situer par rapport aux spécifications et les normes retenues pour leur emploi en corps de chaussée. Ces essais nous ont permis de constater que beaucoup de gisements de tuf se trouvent en abondance au niveau de la région d'Adrar comme dans d'autres régions éloignées du désert saharien. Dans ce chapitre, nous avons caractérisé les matériaux locaux qui sont le tuf (P1, P2, P3et P4).

D'après les essais au laboratoire et la classification GTR, on conclut que les carrières P1et P2 peuvent être utilisées dans la couche de base car le pourcentage de sulfate est moyennement faible, mais les carrières P3et P4 sont à utiliser dans la couche de fondation avec un traitement au préalable, car le pourcentage de sulfate est important (voir chapitre suivant).

CHAPITRE III

LE TRAITEMENT ET

L'AMELIORATION DE LA

PORTANCE DU TUF

III.1-INTRODUCTION :

Le traitement du sol est une technique économique, qui permet de rendre apte à l'usage des matériaux qui ne l'étaient pas. La technique s'inscrit ainsi dans la démarche environnementale du développement durable en préservant les ressources naturelles des produits des carrières, et en valorisant les matériaux du site par leur réutilisation ; pas de transport de matériaux, ni de dépôt, donc diminution du coût! .En effet, la technique du traitement est une solution aux problèmes de dépôts et d'emprunts, et participe à l'optimisation du mouvement des terres. Le traitement du sol permet d'améliorer les performances mécaniques (portance), baisser la sensibilité à l'eau, au gel (protection), homogénéiserait valoriser les matériaux.

III.2 - CONSTAT DES DESORDRES DES ROUTES :

Le désordre des routes est généralement constaté par les points suivants :

III.2.1-Ornières

Affaissements localisés apparaissant sous le passage des véhicules, et pouvant affecter entièrement la couche de roulement.



Photo.III.1 – Ornières [8].

III.2.2- Traverse :Écoulement transversal qui coupe la chaussée.



Photo.III.2– Traverse [8].

III.2.3-Tôle ondulée : Suites d'ondulations de faible longueur d'onde perpendiculaires à l'axe de la route.



Photo.III.3– Tôle ondulée [8].

III.2.4-Ravinement : Saignées ou ravines de plus ou moins grandes dimensions



Photo.III.4– Ravinement [8].

III.2.5-Nidsdepoule : Cavité de forme arrondie à bords plus ou moins francs à la surface de la couche de roulement



Photo.III.5 – Nids de poule [8].

III.2.6-Gonflement de la couche de liaison :

Les deux photos suivantes prises sur le chantier de notre projet montrent la dégradation des routes après avoir étalé la couche de liaison. On remarque un gonflement de la structure de la couche de liaison. Ceci révèle que les matériaux utilisés contiennent un taux de sulfate très élevé, ce qui nécessite un traitement adéquat pour améliorer les caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques. Ce traitement se déroule en additionnant un pourcentage d'ajout composé en chaux et ciment.



Photo.III.6– Gonflement de la couche de liaison (Cas de notre Projet)



Photo.III.7– Gonflement de couche de liaison (Cas de notre Projet)

III.3-TRAITEMENT DES TUF 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.

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.

III.3.1- Traitement au ciment

Le tuf-ciment est un mélange à consistance plus au moins plastique qui se transforme en pierre artificielle cohérente grâce à la réaction entre le ciment et l'eau (l'hydratation).

Au cours de l'hydratation d'un ciment (CRS), il apparaît les constituants suivants :

- Le silicate de calcium hydraté CSH provenant des silicates bi calciques et tricalcique (C2S et C3S);
- Le portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
- L'aluminate de calcium C_4AH_{13} , provenant d'aluminate tricalcique (C3A);
- Le sulfo-aluminate de chaux (par réaction du gypse avec le C3A) ;
- D'abord sous forme d'étringite:



Puis sous forme de mono-sulfo-aluminate :



- Le mélange tuf-ciment, procure une certaine cohésion et une résistance qui croît avec le temps, dues à la croissance des microcristaux, leur enchevêtrement et leur feutrage progressif.

- Les constituants du ciment et leur finesse, la teneur en eau et la température déterminent la vitesse et le taux d'hydratation. L'hydroxyde de chaux $Ca(OH)_2$ formé par l'hydratation du ciment se combine aux éléments argileux du tuf.

III.3.2-Traitement à la chaux :

La chaux, qui était autre fois le seul liant utilisable dans la construction, a été progressivement supplantée par le ciment. Cette désaffection n'est d'ailleurs pas toujours justifiée, car le ciment fournit des résistances surabondantes pour les usages auxquels on le destine.

L'action de la chaux hydraulique sur un sol humide, se décompose en trois phases, deux sont immédiates et la troisième à plus long terme :

❖ Phase de déshydratation :

La déshydratation du sol [4] est le résultat de :

- la réaction d'hydratation de la chaux libre vive CaO , fixe une quantité d'eau suivant la réaction:



- L'évaporation due à l'échauffement par la réaction exothermique;
- Le malaxage diminue de 1.5 % la teneur en eau moyenne. Cette diminution est plus grande dans le cas des conditions climatiques extrêmes.

❖ Phase à plus long terme :

D'après le Roux [4] les PH mesurés au moment du mélange sol-chaux, quel que soit le pourcentage de chaux utilisé, sont compris entre 12.5 et 13. Après 48 heures de contact ils sont encore supérieurs à 11 pour les sols traités à 5 % de chaux et plus. Ils se stabilisent à 9.5 pour les échantillons après un mois de traitement :

- A PH supérieur à 12, la silice SiO_2 et l'alumine Al_2O_3 passent en solution, une

fois libérées, elles se combinent avec la chaux libre éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former des silicates et des aluminates de calcium hydratés (CSH et CAH);

- Au début du traitement, les composés hydratés se développent énergiquement en
- se transformant d'abord en gels amorphes, ensuite et au bout d'une durée de 90 jours de contact argiles-chaux, les composés hydratés se cristallisent lentement;

Perret [4], a constaté que la température ne change pas la nature chimique dans la réaction sol-chaux, elle ne fait qu'accélérer la réaction. Dans ses études de la stabilisation des Sols fins à la chaux, il a observé que la stabilisation s'effectue en trois phases (citées précédemment) et en variant la température de conservation, il a constaté que :

- A 20 °C, les deux premières phases sont observées. Quant à la troisième, elle n'est pas observée (lenteur du phénomène);
- A 40 °C, tous les phases sont observées;
- A 60 °C, la première phase n'est pas observée (très rapide). Quant aux deux dernières, elles sont observées.

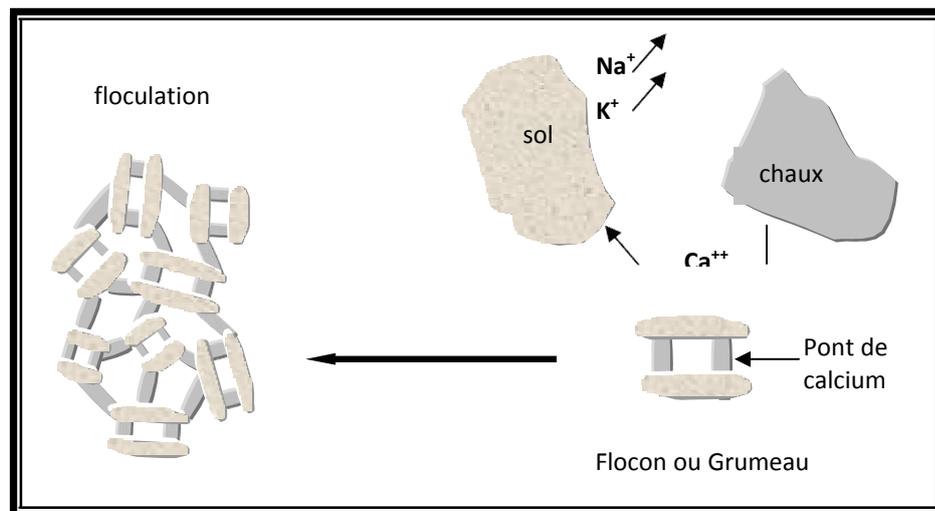


Figure.III.1- Schéma du mécanisme observé lors du traitement [4].

III.3.3-Traitement mixte à la chaux plus ciment

Vu l'importance du tuf qui est considéré comme matériau de base et qui constitue les corps de chaussées dans la région.

Notre étude au laboratoire est composée par la recherche suivante :

Influence de l'ajout la chaux 3% +1% ciment CRS sur les caractéristiques mécaniques, physiques et chimiques.

III.4-ESSAIS DE LABORATOIRE:

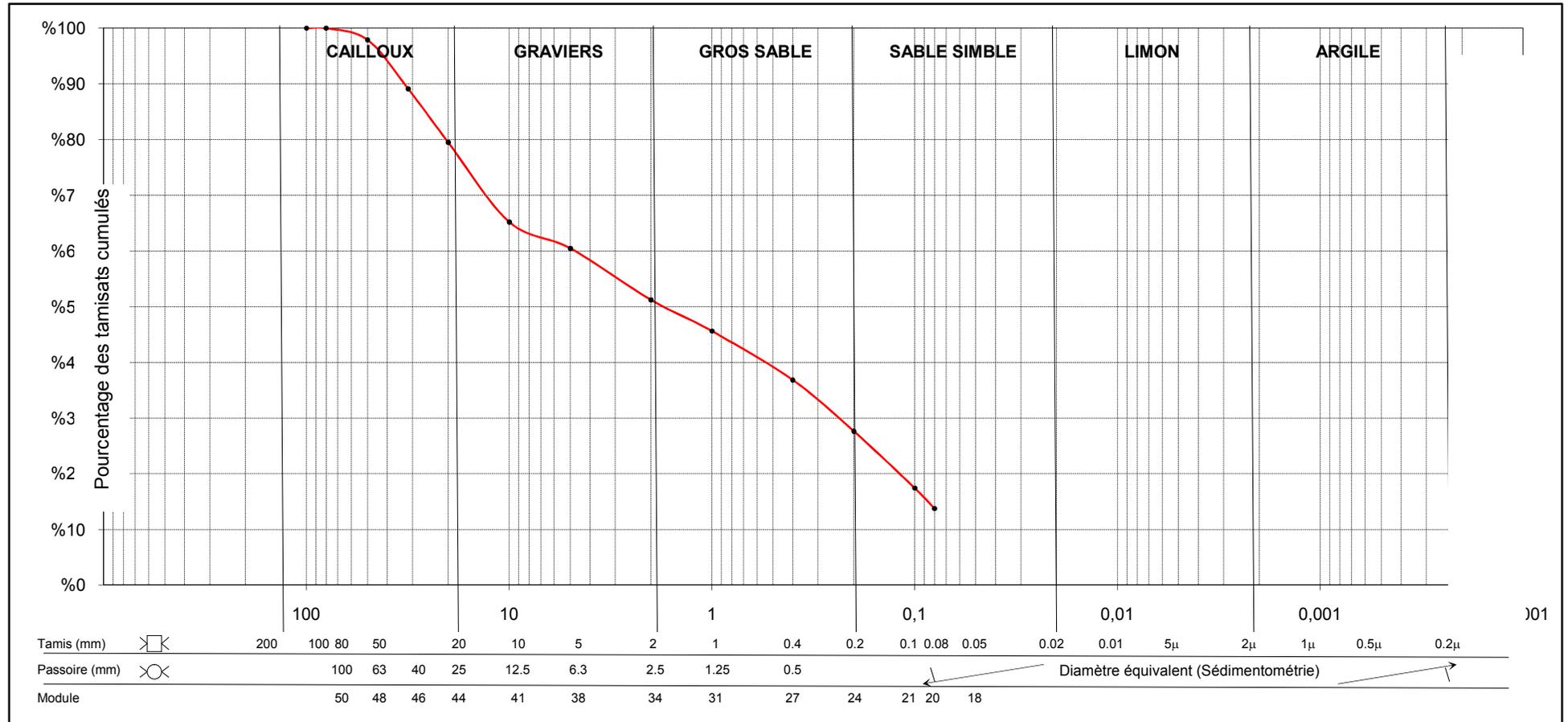
III.4.1-Analyse granulométrique :

Tableau III.1- Les essais analyse granulométrique

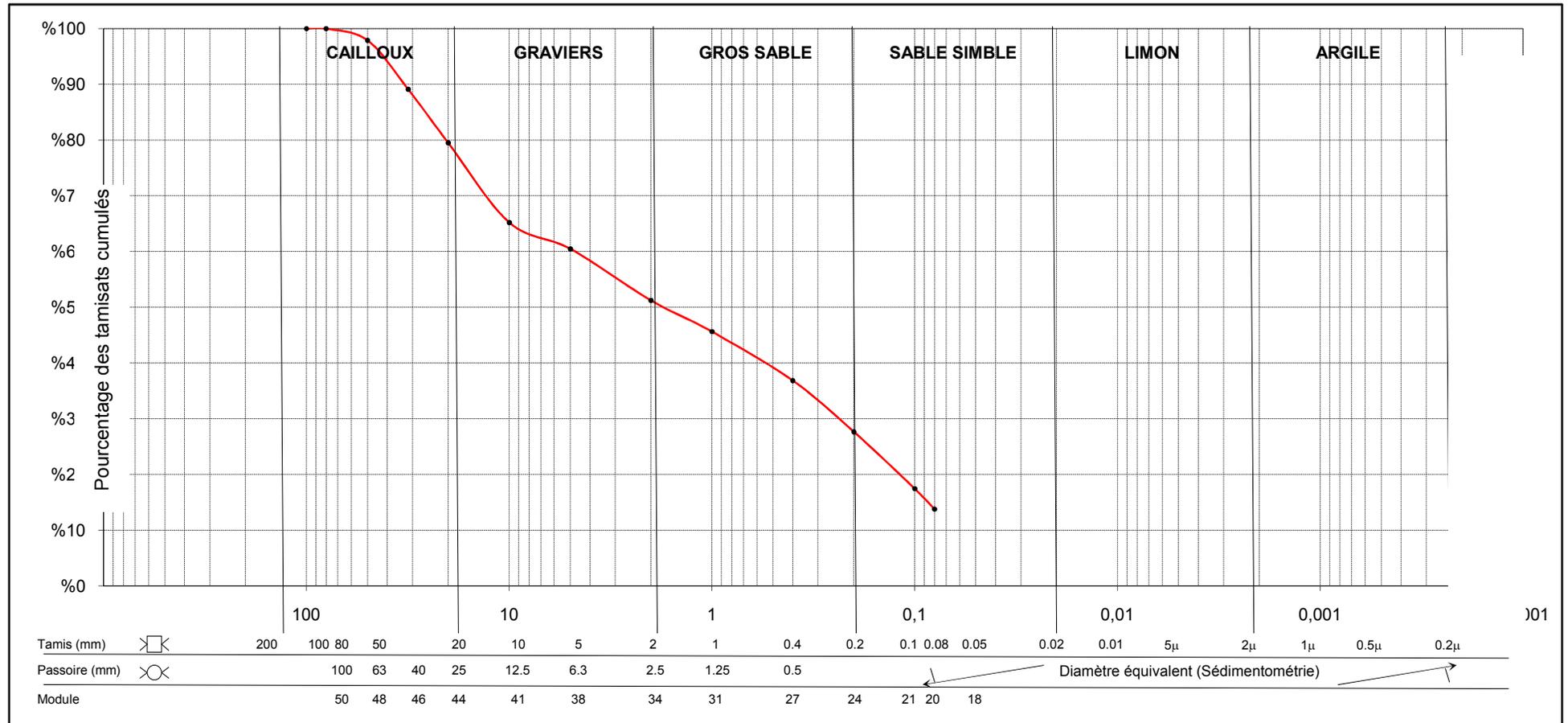
Désignation	Tamis	80	63	50	40	31,5	20	10	05	02	01	0,4	0,2	0,1	0,08
Echantillon P1 (%) PK 29+000		94.03	94.03	91.28	-	84.73	77.12	62.69	55.18	46.66	41.90	33.84	25.76	19.41	13.70
Echantillon P1 (%) PK 29+000 avec traitement		100	100	97.9	-	89.1	79.5	65.2	60.45	51.2	45.61	36.81	27.61	17.41	13.74

Les courbes granulométriques du prélèvement est des courbes continues et donnons une granulométrique étalée, avec un taux de fins varie entre 13.70% à 13.74%.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE AU PK 29+000 normale(Sant traitement)



ANALYSE GRANULOMETRIQUE AU PK 29+000 (Avec traitement)



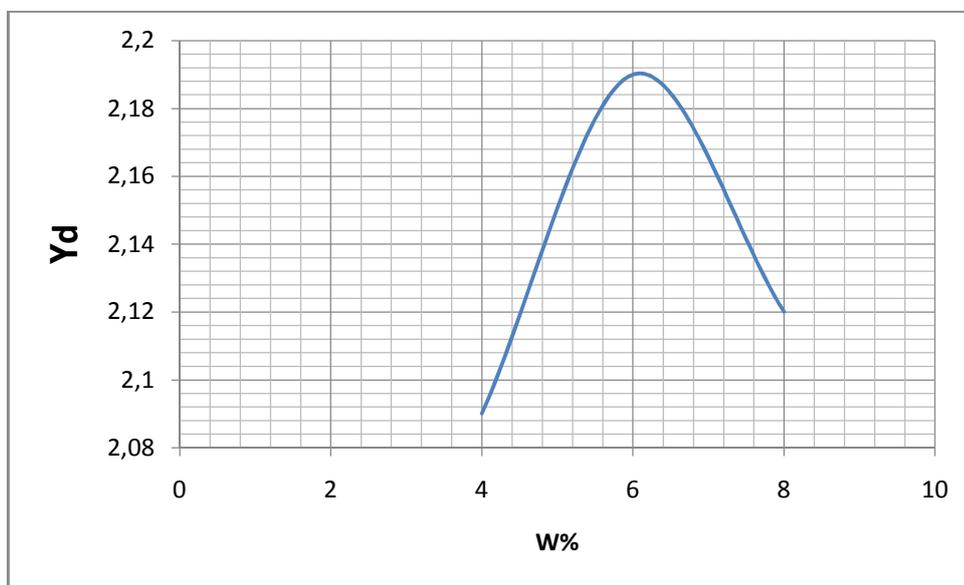
III.4.2-Proctor modifié

Tableau III.2- Caractéristiques optimales de l'essai Proctor et l'indice ICBR

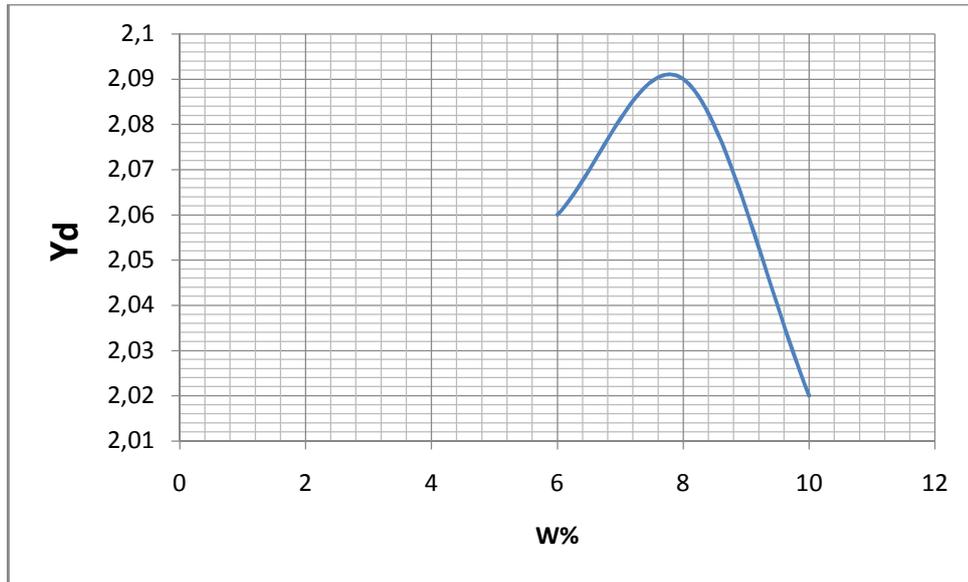
	Echantillon P1 (%) avec traitement	Echantillon P1 (%) Sans traitement
Densité (KN/m ³)	20.4	21,9
Teneur en eau (%)	8	6
ICBR	190.47	178.63

La densité donnée par l'essai Proctor modifié a diminuée sur l'échantillon traitée 20,4 KN/m³ par rapport à celle du début 21,9 KN/m³.

L'indice de portance donne une valeur d'ICBR imbibé de 178.63 après traitement inférieure à celle du début 190.47.



Courbe 5- Proctor modifie AU PK 29+000 normal (sans traitement).



Courbe 6- Proctor modifie AU PK 29+000 avec traitement

III.4.3-Les limites d'Atterberg

Tableau III.3 - Ordres de grandeur de W_L , W_P et IP

	Echantillon P1 (%) avec traitement	Echantillon P1 (%) normal
Limite de liquidité W_L (%)	37.43	25.16
Limite de plasticité W_P (%)	29.02	17.98
Indice de plasticité IP	8.41	7.18

L'indice de plasticité (IP) obtenus après traitement (IP=8.41) a augmenté par rapport à l'échantillon initial (7.18). Mais les deux valeurs d'IP varient entre 6 et 12 donc le tuf reste Argilessablonneuse avec le traitement.

III.4.4-Essais chimiques

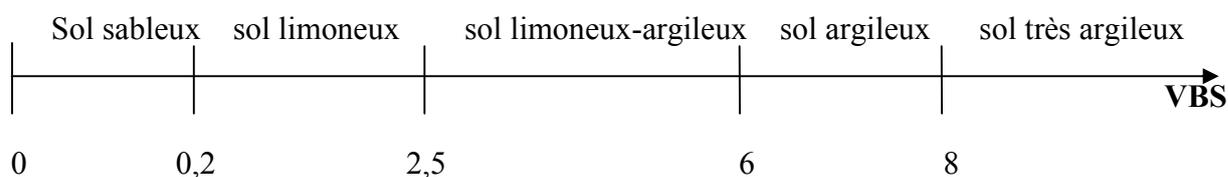
i. Valeur au bleu de méthylène du sol (VBS) :

L'essai au bleu de méthylène, également appelé « essai au bleu », est utilisé en Géotechnique pour déterminer l'argilosité d'un sol.

Cette valeur est déterminée par l'essai au bleu de méthylène. Elle est mesurée sur la fraction 0/5 mm et exprime en grammes de bleu par cent grammes de la fraction 0/50 mm du sol sec étudié, elle est notée valeur au bleu de méthylène du sol « VBS ».

Cet essai est applicable pour tous les sols ainsi pour certains matériaux rocheux.

Classification :



Le tableau III.4 montre la valeur au bleu des différents échantillons analysés.

Tableau III.4-Valeur au bleu de méthylène du sol VBS

Echantillon	P1 sans traitement	P1 avec traitement
VBS	0,7	0,4

A partir de bac de classification on trouve que le VBS varie entre 0.2 et 2.5 donc le sol reste **limoneux** aussi avec le traitement.

ii-Analyses chimiques:

Tableau II.5- Analyses chimiques [9].

Désignation	Echantillon	
	Sans traitement	Avec Traitement
% carbonates de calcium CaCO ₃	24.3	25.7
% sulfate SO ₄	2.82	2.51
% chlorures CL	0.36	0.2
% insoluble SiO ₂ -MGO-AL ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	72.52	71.59

Notons que les résultats obtenus montrent qu'il y a une diminution du pourcentage de sulfates pour l'échantillon avec traitement (2.51%) par rapport à l'échantillon sans traitement (2.82%). Cette diminution de sulfate est faible par rapport au pourcentage de sulfate autorisé (inférieur à 1 %). Nous proposons une couche anti contamination pour augmenter la durée de vie du projet (voir Figure III.8, III.9), entre la couche de base et la couche de fondation.

Cette proposition du traitement de notre tuf, mérite aussi d'être améliorée en variant les pourcentages des ajouts, comme exemple :

- 2 % de ciment CRS plus 5 % de chaux ;
- utiliser d'autres ajouts économiques (traitement sable des dunes plus la chaux.).

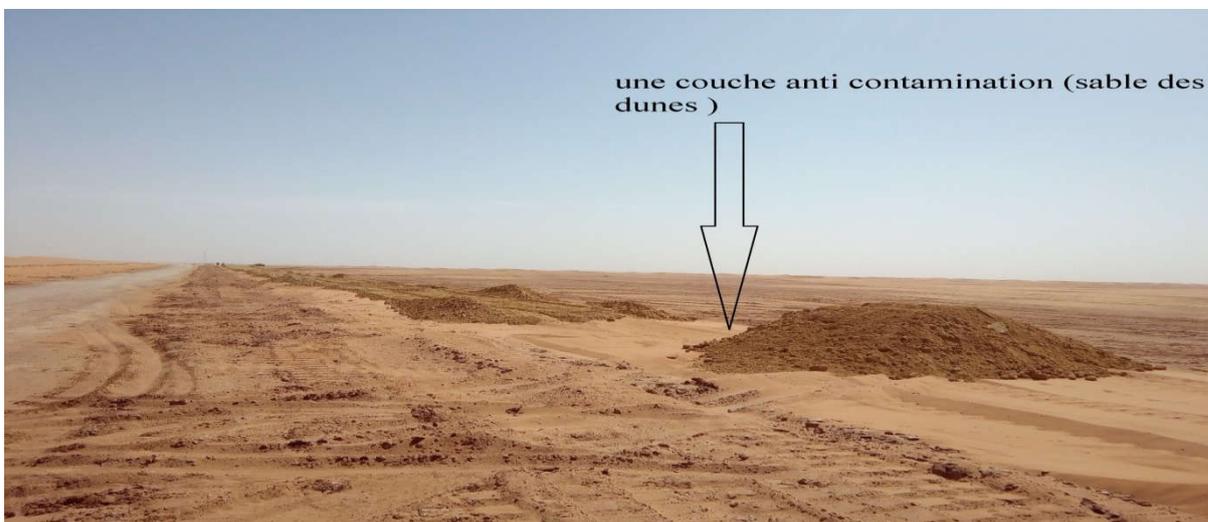


Photo III.8 - une couche anti contamination



Photo III.9 - une couche de base achevée

III-5- CONCLUSION :

Les caractéristiques mécaniques des tufs non traités évoluent avec le temps, cette évolution dépend de la nature du matériau et de l'évaporation de l'eau, mais ces caractéristiques se détériorent juste après immersion.

Le traitement au ciment et à la chaux améliore certes les résistances des tufs, mais cette amélioration est assez faible comparée aux niveaux de performances couramment atteintes par les graves traitées aux liants hydrauliques [10].

Conclusion générale

Conclusion générale.

La qualité des travaux routiers passent par la maîtrise des aspects liés à la nature des matériaux, ainsi que leurs mises en œuvre, les délais et les coûts.

Les travaux de construction des chaussées et des couches de formes représentent une part importante du coût global de réalisation des projets routiers. Cette importance justifie une recherche visant à minimiser les coûts par le choix des matériaux.

Dans notre thème de recherche, nous avons étudié un exemple d'une construction routière entre Bouda et Tsabit. Pour cela, nous avons analysés quatre types de carrières de gisements de Tuf appelés P1, P2, P3 et P4. Les propriétés physiques, chimiques et mécaniques ont été effectuées. Nous avons constaté que le pourcentage de sulfates était élevé pour les échantillons P3 et P4 ainsi que pour P2 (assez élevé).

Nous avons pris un autre échantillon situé au PK 29 + 000 (entre Tsabit et Boudas) qui a un pourcentage de sulfate élevé. Dans le but d'utiliser ce tuf en construction routière, il est nécessaire d'améliorer les caractéristiques physiques, chimiques et mécaniques par un traitement mixte au ciment et la chaux. Ce traitement à améliorer les différentes propriétés du tuf.

Comme perspectives pour les travaux futurs, des essais complémentaires à long terme et en fatigue au laboratoire et sur des planches d'essais sont à réaliser sur un échantillonnage de tufs avec différents traitements et d'ajouts, tels que ciment, chaux, sable.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1].<http://Map.Google.fr/map> consulté le 15-05-2019.
- [2].**FETHI Meriem** : Mémoire master professionnel « apport de la géologie l'exploitation des gisements de granulats (cas d'une carrière dans la région d'Adrar) l'université ABOUBAKER Belkaid-Tlemcen année 2016, pages.2.3.
- [3].**DOKODZO Aaron – Japhet** Projet de fin d'études pour l'obtention de la Licence Professionnelle : étude des dégradations sur la route nationale N°14 sokodé-alibi II.20 KM
- [4].**GOUAL Idriss** :Thèse de doctorat « Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf de sable calcaire de la région de Laghouat : application en construction routière » Université ABOUBAKER Belkaid-Tlemcen le 02/04/2012,
- [5]. **Google Earth** : image satellitaire (14/05/2019).
- [6]. **FELLAHI Wassim** : Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master en Génie Civil caractérisation et résilience des risques géotechniques dans un projet routier 2012 pages.40.41.42.43.
- [7]. **GTR** : Guide Technique Routière, réalisation des remblais et des couches de formes fascicule II, Septembre 1992, 102 pages.
- [8]. **Amadou dyalo** :Dégradations de surface des routes non revêtues (Bamako), Février 2006. Page 26.
- [9].**Rapport d'étude géotechnique technique**, Bechar(laboratoire des travaux Publics de l'ouest, juin 2019).
- [10].**CHABIRA Belkhir** :Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master en Génie Civil Modernisation de la route nationale RN46 avec valorisation du sable de dune dans le grave-ciment comme couche de fondation.2016 page 6.
- [11]**HOSNI Mohammed ElAmine** :Mémoire pour l'obtention du diplôme de MASTER en génie civil Qualité des terrassements dans l'exécution d'un projet routier année 2017 pages 60-65.
- [12].**Pr MEKARTA Belkacem** :Amélioration, stabilisation et renforcements des sols cours des Mécanique des Sols année 2013 pages 38-39.

Annexe

Annexe : CLASSIFICATION GTR (GUIDE TECHNIQUE ROUTIER).

← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS →		Tableau 2 - <i>Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines</i>					
← CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME →							
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	sous classe fonction du comportement
D _{max} ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm ≤ 35%	B	tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS > 0,2	B₄ Graves argileuses (peu argileuses)...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 7 ou w _n ≥ 1,25 w _{OPN}	B ₄ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ th
				7 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 15 ou 1,10 w _{OPN} ≤ w _n < 1,25 w _{OPN}	B ₄ h	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ th
				0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,10 w _{OPN}	B ₄ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ m
						LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ m
				0,6 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}	B ₄ s	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ s
						LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ s
				w _n < 0,6 w _{OPN}	B ₄ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ ts
						LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ ts
		tamisat à 80 μm compris entre 12 et 35% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS < 1,5 ⁽¹⁾ ou I _p ≤ 12	B₅ Sables et graves très silteux...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 5 ou w _n ≥ 1,25 w _{OPN}	B ₅ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ th
						LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ th
				5 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 12 ou 1,1 w _{OPN} ≤ w _n < 1,25 w _{OPN}	B ₅ h	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ h
						LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ h
	12 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 30 ou 0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,10 w _{OPN}			B ₅ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ m	
					LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ m	
	0,6 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}			B ₅ s	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ s	
					LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ s	
	w _n < 0,6 w _{OPN}			B ₅ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ ts	
			LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ ts			
	tamisat à 80 μm compris entre 12 et 35% VBS > 1,5 ⁽¹⁾ ou I _p > 12	B₆ Sables et graves argileux à très argileux	IPI ⁽¹⁾ ≤ 4 ou w _n ≥ 1,3 w _{OPN} ou I _c ≤ 0,8	B ₆ th			
			4 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 10 ou 0,8 < I _c ≤ 1 ou 1,1 w _{OPN} ≤ w _n < 1,3 w _{OPN}	B ₆ h			
			10 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 25 ou 1 < I _c ≤ 1,2 ou 0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,1 w _{OPN}	B ₆ m			
0,7 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN} ou 1,2 < I _c ≤ 1,3			B ₆ s				
w _n < 0,7 w _{OPN} ou I _c > 1,3			B ₆ ts				

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier