



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa -

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Académique

En : Travaux Publics

Spécialité : Voies et Ouvrages d'arts

Présenté par : DJABRI Hatem
BEN AOUA Khaled

Encadré par : Melle MALAOUI Rachida

MEMOIRE

VALORISATION DU SABLE DE MINES
DANS LES FORMULATIONS DES BETONS
BITUMINEUX.

Présenté et soutenu publiquement, le 22 / 09 / 2020, devant le jury composé de :

MAA

BOUCHOUCHA Abd Allah

Président

MAA

BEN ALI Ridha

Examineur

MAA

MALAOUI Rachida

Rapporteur

Promotion: 2019/2020



Remerciements

Nous remercions ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage et la force pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons tout d'abord à remercier notre encadreur MALAOUI Rachida pour ses orientations et ses précieux conseils qui nous ont beaucoup aidés dans notre travail.

Ainsi que le responsable de laboratoire de l'université de Larbi TEBESSI ACHI Souad. Et le directeur avec l'employeurs DJABRI Ala, ZOGHLAMI Mohamed, et HOMANA Halim .

de la direction de travaux publics de Tébessa .

Ensuite, nous tenons particulièrement à remercier la Société des Mines de Phosphate

(SOMIPHOS) SPA, Complexe Minier de Djebel-Onk, Bir El-Ater à Tébessa, et tous ceux qui y travaillent ; MOHAMED Ali qu'ils nous ont donné un aperçu de ce que notre centre de recherche est à propos de.

De plus ; nous tenons de remercier le directeur de Laboratoire Des Travaux Publics LTP de Lest Annaba tous ceux qui y travaillent qu'ils nous ont aidés pour réaliser nos recherches.

Nous tenons à remercier vivement tous ceux qui de près ou de loin ont participé à la rédaction de ce travail.

Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à tous ceux qui m'ont aidé, surtout mes parents
qui se sont vraiment sacrifiés pour que je réussisse ma vie, ainsi que mes
études et de m'avoir élevé dans de bonnes conditions, et je souhaiterais
vraiment les satisfaire avec mon travail qui le fruit de mes efforts.*

Je le dédie également à mes frères, mes sœurs

Toute ma famille.....

A toutes mes amies

A tous les étudiants de fin d'étude de

Travaux Public

« Promotion 2020 »

Table des matières

Titre	Page
<i>Remerciements</i>	
<i>Dédicace</i>	
<i>Table des matières</i>	
<i>Liste des Tableaux</i>	
<i>Liste des Figures</i>	
<i>Nomenclatures</i>	
<i>Résumé</i>	
<i>Introduction Générale</i>	01
<i>Chapitre I</i>	
<i>Description De site D'étude Djbel El-Onk (Kef-Esnnoun)</i>	
I.1 Introduction	03
I.2 Présentation de l'entreprise	03
I.3 Aperçu sur l'origine des phosphates	03
I.4 Historique succinct la région de Djebel Onk	04
I.5 Situation géographique	05
I.5.1 Situation géographique régionale de Djebel Onk	05
I.5.2 Situation géographique de Kef-Esnnoun	06
I.6 Contexte géologique	06
I.6.1 Géologie régionale de Djebel Onk	06
I.7 Stratigraphie	07
I.7.1 Etude stratigraphie et lithologique	08
I.8 Tectonique	10
I.9 Conclusion	11
<i>Chapitre II</i>	
<i>Généralités sur le sable</i>	
II.1 Introduction	13
II.2 Les différents constituants du sable	13
II.2.1 Le silicium	13
II.2.2 La silice (ou quartz SiO ₂)	13
II.2.3 Les silicates	13
II.2.4 Les argiles	13
II.2.5 Les carbonates	13
II.3 Classifications des sables	13

II.3.1	La granularité	13
II.3.2	La propreté et la teneur en fines	13
II.3.3	La nature minéralogique	13
II.4	Les types des sables selon Leurs provenances	14
II.5	Les caractéristiques du sable et ses applications	14
II.5.1	Les caractéristiques du sable	14
II.5.2	La courbe granulométrique	14
II.5.3	La forme du grain	14
II.5.4	Autres caractéristiques techniques	14
II.6	Les principales applications du sable	14
II.7	Les ressources des sables en Algérie	15
II.8	Exploitations des carrières de sable pour la construction	18
II.9	Conclusion	19
<i>Chapitre III</i>		
<i>Les bétons bitumineux</i>		
III.1	Introduction	21
III.2	Les bétons bitumineux	21
III.3	Les types des bétons bitumineux	21
III.4	Composition de béton bitumineux	22
III.4.1	Liants hydrocarbonés	22
III.4.2	Bitume	23
III.4.3	Granulat	29
III.4.3.1	Types des granulats et leur classification	29
III.4.3.2	Généralités sur les granulats routiers	30
III.4.3.3	Caractéristiques et spécifications des granulats	31
III.5	Composants minéraux	33
III.6	Formulation du béton bitumineux	34
III.7	Paramètres influençant le choix d'une formulation	34
III.8	La compacité	35
III.9	Les propriétés mécaniques des bétons bitumineux	35
III.9.1	Essai Marshall (NF P98-251-2)	35
III.9.2	Essai Duriez (NF P98-251-1)	36
III.10	Conclusion	37
<i>Chapitre IV</i>		
<i>Etude expérimentale des propriétés physiques Et chimiques du sable</i>		
IV.1	Introduction	39
IV.2	Echantillonnage	39

IV.2.1	But et Principe de l'échantillonnage	39
IV.2.2	Appareillage	39
IV.2.3	Exécution de l'essai	40
IV.2.4	Prélèvement sur le tas (sables et graviers)	40
IV.2.5	Échantillonnage en laboratoire	41
IV.3	Quartage	41
IV.4	Propriétés physique	42
IV.4.1	Analyse granulométrique par tamisage	42
IV.4.2	Calcul le module de finesse	46
IV.4.3	les masses volumiques des particules	47
IV.4.4	Équivalent de sable	49
IV.4.5	Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux	52
IV.4.6	Mesures de porosité	55
IV.4.7	Détermination des masses volumiques minimale et maximale des sols non cohérents	56
IV.4.8	La perméabilité (charge constante)	60
IV.4.8.1	Mesure du coefficient de perméabilité au laboratoire	60
IV.4.8.2	Perméamétrie à charge constante	60
IV.5	L'Analyse chimique	64
IV.5.1	La Mesure du pH	64
IV.6	Propriétés mécanique	66
IV.6.1	Résistance au cisaillement des sols	66
IV.6.2	Cisaillement rectiligne à la boîte	69
IV.7	Conclusion	78
<i>Chapitre V</i>		
<i>Formulation de béton bitumineux</i>		
V.1	Introduction	80
V.2	Confection des éprouvettes	80
V.2.1	Préparation des mélanges	80
V.2.2	Confection des éprouvettes pour l'essai Marshall (NFP 98-251-2)	82
V.2.3	Confection des éprouvettes pour l'essai Duriez (NFP 98-251-1)	84
V.3	Equipement et Procédures d'essai	85
V.3.1	Essai Marshall	85
V.3.2	Essai Duriez	87
V.4	Détermination de la densité apparente par pesée hydrostatique	87

NFP 98-250-6	
V.5 Détermination de la densité théorique ou absolue	88
V.6 Détermination le pourcentage d'imbibition W (%)	88
V.7 Essais des agrégats utilisés	89
V.7.1 Masse volumique (NF P18-301)	89
V.7.3 Propreté superficielle (NF P 18-591)	90
V.7.4 Essai d'aplatissement (NF P18-561)	91
V.7.5 Essai Los Angeles (NF P 18-573)	91
V.7.6 Essai micro-deval (MDE) (NF P 18-572)	91
V.8 Caractéristiques du bitume utilisé	92
V.9 Description des mélanges étudiés	92
V.10 Détermination des mélanges a étudié	93
V.11 Conclusion	96
<i>Conclusion générale</i>	98
<i>Recommandations</i>	99
<i>Bibliographie</i>	101

Liste des Tableaux

Titre	Page
Tableau II.1 : réserves en sable de Djebel Onk Sud.	18
Tableau III.1 : Fractions granulaires 0/14 des BB	34
Tableau IV.1 : caractéristiques de la courbe granulométrique de sable blanc	44
Tableau IV.2 : les facteurs du courbe granulométrique	44
Tableau IV.3 : La classification des sols grenus	45
Tableau IV.4 : caractéristiques de la courbe granulométrique de sable jaune	46
Tableau IV.5 : L'évaluation du type de sol et constituants par Poids spécifique γ_s	49
Tableau IV.6 : Equivalent de sable des deux types	51
Tableau IV.7 : La nature et qualité du sable en fonction du ES.	51
Tableau IV.8 : L'évaluation de la catégorie du sol par le VBS.	55
Tableau IV.9 : Le type de sol en fonction de porosité	56
Tableau IV.10 : Qualificatif de compacité du sol.	60
Tableau IV.11 : Les résultats des charges hydrauliques de sable.	63
Tableau IV. 12 :L'ordre de grandeur de la perméabilité pour divers sols	63
Tableau IV.13 : fiche technique du sable blanc	64
Tableau IV.14 : fiche technique du sable jaune	64
Tableau IV.15 : L'évaluation du type de sol par le Ph	66
Tableau IV.16 : les résultats de la teneur en eau de l'éprouvette avant et après l'essai CD (Sable Jaune)	73
Tableau IV.17 : Le calcul de la contrainte du cisaillement d'essai CD.	74
Tableau IV.18 : les résultats de la teneur en eau de l'éprouvette avant et après l'essai CD (Sable blanc)	75
Tableau IV.19 : Le calcul de la contrainte du cisaillement d'essai CD.	76
Tableau V.1 : Masse volumique absolue et apparente des agrégats utilisés	89
Tableau V.2 : Analyse granulométrique des graviers utilisés	90
Tableau V.3 : Caractéristiques des graviers utilisés	92
Tableau V.4 : Caractéristiques de bitume utilisé	92
Tableau V.5 : Fuseau de spécifications 0/14	93
Tableau V.6 : Pourcentages des agrégats utilisés (BB avec SJ)	93
Tableau V.7 : Composition granulaire (BB ordinaire avec SJ)	94
Tableau V.8 : Pourcentages des agrégats utilisés (BB avec SB)	95
Tableau V.9 : Composition granulaire (BB ordinaire avec SB)	95

Liste des Figures

Titre	Page
Figure I.1 Organisation de SOMIPHOS	03
Figure I.2 : Carte géologique des gisements de phosphate actuellement en exploitation au monde.	04
Figure I.3 : Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk (D'après SO.NA.R.E.M., 1978)	05
Figure I.4 : Carte de situation géographique de la région de Djebel Onk	06
Figure I.5 : Coupe transversal du Djbel Onk	07
Figure I.6 : Coupes géologiques à travers le gisement de Kef -Esnoun	07
Figure I.7 : Colonne stratigraphique de la région de Djebel El Onk (D'après Cielensky, Benchernine et Watkowski, 1987)	10
Figure II.1 : Situation géographique des ergs de l'Algérie.	16
Figure II.2 : Zone d'activité - carrière de sable Zone I.	17
Figure III.1 : Composition de béton bitumineux .	21
Figure III.2 : Types de Liants hydrocarbonés .	23
Figure III.3 :Fabrication des bitumes par raffinage du pétrole.	24
Figure III.4 : Séparation d'un bitume en asphaltènes, résines et huiles	25
Figure III.5 : Classe de comportement du bitume	27
Figure III.6 : Principe de l'essai de pénétrabilité.	28
Figure III.7 : Principe de ramollissement.	29
Figure III.8 : Les deux familles de granulats	30
Figure III.9 : forme de granulats	32
Figure III.10 : Machine d'essai Marshall	36
Figure III.11 : Machine d'essai Duriez	37
Figure IV.1 : Echantillonneur	40
Figure IV.2 : Opération de quartage	41
Figure IV.3 : Schéma d'une opération de quartage	41
Figure IV.4 : l'organisation de la colonne des tamis	42
Figure IV.5 : Courbe granulométrique du sable blanc	44
Figure IV.6 : Courbe granulométrique du sable jaune	46
Figure IV.7 : principe de l'essai de cisaillement direct pour la détermination de la courbe intrinsèque	67
Figure IV.8 : principe de l'essai triaxial pour la détermination de la courbe Intrinsèque	68
Figure IV.9 : courbes effort-déformation et variations de volume au cours d'essais triaxiaux sur un sable à différentes compacités	68
Figure IV.10 : phénomène de résistance au cisaillement du sol grenu	70
Figure IV.11 : Principe d'un essai de cisaillement rectiligne à la boîte	71
Figure IV.12 : Schéma de la boîte de cisaillement — Exemple avec la demi-boîte inférieure mobile	71
Figure IV.13 : Courbe de cisaillement direct du sable consolidé non drainé.	74

Figure IV.14 : Détermination de l'angle de frottement et de la Cohésion du sable CU	75
Figure IV.15 : Courbe de cisaillement direct du sable non consolidé non drainé	77
Figure IV.16 : Détermination de l'angle de frottement et de la Cohésion du sable blanc	77
Figure V.1 : Etape de formulation	80
Figure V.2 : Principe de l'essai Marshall	86
Figure V.3 : Courbe granulométrique	91
Figure V.4 : Pourcentage des compositions SJ	94
Figure V.5 : Courbe granulométrique du mélange (BB avec SJ)	94
Figure V.6 : Pourcentage des compositions SB	95
Figure V.7 : Courbe granulométrique du mélange (BB avec SB)	96

Liste des Photos

Titre	Page
Photo I.1 : Carrière de kef- Esnnoun	06
Photo II.1 : Les sables du Kef-Esnnoun Zone I.	17
Photo III.1 : Vue d'une installation de concassage criblage	31
Photo IV.1 : les échantillons	43
Photo IV.2 : La pesée de l'échantillon	43
Photo IV.3 : la mise de chaque échantillon	43
Photo IV.4 : l'agitation et l'organisation pour peser	43
Photo IV.5 : L'opération D'Essai de la masse volumique avec pycnomètre	48
Photo IV.6 : la repose de l'éprouvette	50
photo IV.7 : La lecture de la hauteur h1	50
Photo IV.8 : La descente du piston	50
Photo IV.9 : La lecture de la hauteur h2 dans l'éprouvette	50
Photo IV.10 : Principe d'essai d'équivalent de sable	51
Photo IV.11 : La solution de bleu méthylène	53
photo IV.12 : L'agitation du sable avec l'eau distillée	53
Photo IV.13 : La mise de bleu de méthylène	53
Photo IV.14 :L'essai positif dans la burette	53
Photo IV.15 : La pesée du moule vide	57
Photo IV.16 : La pesée du moule et de son contenu	57
Photo IV.17 : Le coulage du sable dans le moule au-dessus de la table vibrante	57
Photo IV.18 : La pesée du moule et de son contenu après la vibration	58
Photo IV.19 : Schéma de Principe d'un Perméamétrie à charge constante	61
Photo IV.20 : Perméamétrie à charge constante	61
Photo IV.21 : Le mélange du sable.	61
Photo IV.22 : La mise du sable dans le moule	61
Photo I.23 : La mise du disque poreux sur le sable	62
Photo IV.24 : Moule cylindrique à deux couvercles	62
Photo IV.25 : Perméamétrie pour différents charges hydrauliques.	62
Photo IV.26 : Les matériels utilisés et la matière	65
Photo IV.27 :L'immersion du papier test dans l'échantillon	65
Photo IV.28 : La lecture du résultat	66
Photo IV.29 : La secousse du papier test	66
Photo IV.30 : La forme des grains microscopique du sable jaune	69
Photo IV.31 : La forme des grains microscopique du sable blanc	69
Photo V.1 : Opération de malaxage	82
Photo V.2 : Exemple d'éprouvettes Marshall	82
Photo V.3 : Remplissage du moule	83
Photo V.4 : Opération de compactage	83
Photo V.5 : Opération de démoulage	83
Photo V.6 : Eprouvettes Duriez obtenues	84

Photo V.7 : Remplissage du moule	84
Photo V.8 : Opération de compactage	85
Photo V.9 : Le bain thermostatique	86
Photo V.10 : Eprouvette entre les mâchoires	86
Photo V.11 : Les éprouvettes dans un bain normalisé de 18°C	87
Photo V.12 : Eprouvettes paraffinées	88
Photo V.13 : classes des agrégats utilisées	89
Photo V.14 : machine d'analyse granulométrique	90

Nomenclatures

SONAREM : Société Nationale des Recherches Minière.
EREM : Entreprise de recherche minière.
SOFREMINES/BRGM: Société Française des Recherches Minières.
E.N.FERPHOS : Entreprise Nationale de Fer et de Phosphate.
ORGM : Office National des Recherches Géologiques et Minières.
ONEX : Office National des Explosifs.
CERAD : Centre d'Étude et des Recherches Aux Développement
DMT: DMT Consulting Gmbh
UTM: Universal Transverse Mercator
SJ : Sable jaune
SB : Sable blanc
BB : Béton bitumineux
Cc : Coefficient de courbure
Cu : Coefficient d'uniformité
 γ_s : Poids spécifique
Es : Equivalent de sable
Vbs : valeur de bleu de méthylène
emax : Indice des vides maximal
emin : Indice des vides minimal
 γ_{dmax} : La masse volumique maximale
 γ_{dmin} : La masse volumique minimale
 I_D : Indice de densité
K : Coefficient de perméabilité
n : Porosité
e : Indice des vides
Cc : Coefficient de compression
C_S : Coefficient de décompression
C_g : Coefficient de gonflement
E : Module de Young
C : cohésion
 φ : Angle de frottement interne
 τ : Contrainte tangentielle
w : teneur en eau
 γ_b : Densité du bitume
 γ_{abs} : Densité absolue du matériau enrobé (g/cm³)
V_v : Pourcentage volumétrique des vides de l'éprouvette (%)
ML : Masse du bitume (g)
MA : Masse de mélange des agrégats (g)
W : Pourcentage d'imbibition (%)

Résumé:

L'utilisation des stériles minières en tant que matériaux pour la construction est l'une des plus grandes préoccupations saisissant l'attention de nombreux pays miniers. Comme ces matériaux sont délaissés, des solutions plus efficaces ont été faites pour compenser une partie des matériaux de construction, et pour éviter la pollution de l'environnement. Les sables des mines de gisement de kef - Essnoun des mines de Djebel Onk sont des matériaux sédimentaires de plusieurs variétés de couches avec des épaisseurs variables et valent de loin jusqu'à plus de 300m en profondeur.

Dans la zone d'activité de kef- Essnoun, tous les sables sont de type moyen à grossier et sont déchargés et accumulés d'une énorme quantité estimée de plus de 48234375 tonnes. Cet état de « ressource » a une grande importance de manière à être orienter vers les domaines de travaux publics et génie civil afin d'atteindre les propriétés acceptables pour cette ressource.

Cette recherche permet d'étudier la possibilité de valorisé les matériaux locaux pour réaliser du béton bitumineux, grâce à son utilisation dans la couche de roulement.

La méthode utilisée dans cette étude consiste à utiliser deux types du sable des mines: le sable blanc et sable jaune, en plus d'étudier les propriétés des granulats pour obtenir les meilleurs résultats selon les deux principaux essais de Marshall et Duriez.

Les résultats des essais ont montré que les propriétés du sable mines jaune sont acceptables par rapport au sable mines blanc dans la formulation du béton bitumineux.

Mots-clés : Stériles minières, Valorisé, Sable des mines, béton bitumineux, Couche de roulement.

Abstract :

The use of mine wastes as construction materials is one of the biggest concerns which attracted the attention of numerous mine countries. Since these materials are abandoned, more effective solutions have been made to offset a part of constructing materials, as well as to avoid environmental pollution. The sands of Kef-Essnoun deposit mine of Djebel Onk mines are sedimentary materials with several varieties of layers and different thicknesses, also they are worth far more than 300 m deep.

In the area of activity, Kef-Essnoun, all sands are medium to coarse type and they are discharged and accumulated with a huge estimated quantity of more than 48234375 tons .This case of resource has a great importance so as to be oriented towards the fields of public works and civil engineering in order to achieve the acceptable properties for this resource.

This research permits to study the possibility of valorizing the local materials to realize a asphaltic concrete, thanks to their use in the realization of the wearing course.

The method used in this study consists of using two types of mine sand: white sand and yellow sand, in addition to studying the properties of aggregates to obtain the best results according to the two main tests of Marshall and Duriez.

The results of the tests have shown that the properties of yellow mining sand are acceptable compared to white mining sand in the formulation of asphalt concrete.

Key terms: mine wastes, Valorizing, mine sands, asphalt concrete, wearing course.

ملخص:

يعتبر استخدام مخلفات المناجم كمواد للبناء من أكبر الاهتمامات التي لفتت انتباه العديد من البلدان المنجمية. وبما أن هذه المواد تم التخلي عنها فقد تم وضع حلول أكثر فعالية لتعويض جزء من مواد البناء ، وكذلك لتجنب التلوث البيئي. تتميز رمال منطقة كاف - السنون بمنجم جبل العنق بكونها مواد رسوبية ذات عدة أصناف من الطبقات و سماكة مختلفة يصل عمقها لأكثر من 300 متر.

وتعتبر رمال منطقة النشاط كاف السنون من النوع المتوسط إلى الخشن حيث يتم تفرغها وتراكمها بكميات ضخمة تقدر بأكثر من 48234375 طن. تعتبر هذه الحالة من الموارد ذات أهمية كبيرة بحيث تكون موجهة بشكل عام نحو مجالات الأشغال العامة والهندسة المدنية لتحقيق الخصائص المقبولة لهذا المصدر الطبيعي .

يسمح هذا البحث بدراسة إمكانية ترمين المواد المحلية لتحقيق الخرسانة الإسفلتية ، وذلك بفضل استخدامه في طبقة السير.

تتمثل هذه الطريقة المتبعة في دراسة نوعين من الرمال المنجمية: رمل أبيض ورمل أصفر ، و دراسة خصائص الحصى للحصول على أفضل النتائج وفقاً للاختبارين الرئيسيين مارشال ودورياز. أظهرت نتائج التجارب أن خصائص الرمل الأصفر المنجمي مقبولة مقارنة مع الرمل الأبيض المنجمي في تشكيل الخرسانة الإسفلتية.

الكلمات المفتاحية : مخلفات المناجم، ترمين، الرمال المنجمية، الخرسانة الإسفلتية، طبقة السير.

Introduction Générale

Introduction Générale

Dans la plupart des pays, le réseau routier représente le patrimoine le plus important qui appartient essentiellement à l'état. Chaque année, plusieurs kilomètres de rues, de routes, d'autoroutes, de pistes d'aérodromes sont construits pour accroître les échanges et désenclaver les agglomérations lointaines. Les administrations routières doivent entretenir, exploiter, améliorer, remplacer et préserver ce patrimoine tout en gérant avec soin les ressources financières et humaines qui doivent servir pour aboutir à ces objectifs.

La recherche d'économie dans les projets, ainsi que la nécessité d'utiliser correctement les ressources naturelles, conduisent à une tentative de tirer le meilleur parti de tous les matériaux locaux disponibles sur le site.

À cette fin, la recherche devrait être orientée vers l'utilisation des matériaux locaux, tels que les déchets des sables mines de djebel el Onk et leur valorisation dans les installations techniques et les routes.

Compte tenu de la nécessité et de l'importance d'exploiter et de valoriser ces matériaux locaux.

Objectifs

Nos travaux est de remplacer les sables concassés utilisés dans les mélanges bitumineux traditionnels par du sable mines local de djebel el Onk. Déterminer ensuite les performances mécaniques de différents mélanges de béton bitumineux à partir du sable local afin de déterminer l'évolution des propriétés de ce dernier par rapport aux spécifications du béton bitumineux affectées au couche de roulement.

Méthodologie

Pour aboutir à cet objectif, on a divisé le présent mémoire en deux grandes parties ; partie bibliographique et partie expérimentale.

➤ La première partie est consacrée à une revue bibliographique contient de trois chapitres.

- **Le premier chapitre** : est une présentation de l'aperçu géologique de djebel el Onk et la situation de la zone de prélèvement (kef-Essnoun).

- **Le deuxième chapitre** : est une présente les éléments bibliographie sur la rhéologie des sables.

- **Le troisième chapitre** : résume des généralités sur les bétons bitumineux ; définition, compositions et sollicitations engendrées ainsi que les connaissances actuelles sur les enrobés bitumineux.

➤ La deuxième partie est consacrée à une étude expérimentale contient de deux chapitres.

- **Le quatrième chapitre** : étude les propriétés physiques, chimiques, et mécaniques de sable utilisé.

- **Le cinquième chapitre** : étude les propriétés des agrégats utilisé. ainsi que présenter les principales étapes expérimentale de tous les mélanges proposés et leur pourcentage dans la formulation. avec la détermination les différents paramètres de chaque essai Marshall et Duriez.

Enfin nous avons terminé notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

*Description De site D'étude
Djebel El-Onk (Kef-Esnnoun)*

I.1 Introduction:

Dans ce chapitre nous allons, tout d'abord, donner un bref sur l'origine des phosphates, historiques des recherches et les travaux effectués dans la région de Djebel Onk (kef-Esnoun) ensuite ,décrire la situation géographique, la géologie vu qu'elle est une base de tous projets miniers, qui a pour but d'étudier les parties superficielles de la terre et d'expliquer la disposition des roches retracées à travers le temps.

I.2 Présentation de l'entreprise

FERPHOS : (L'entreprise nationale du fer et du phosphate) est l'une des plus importantes Entreprises minières en Algérie. Dans ses activités d'exploitation des mines de phosphate, de fer et de pouzzolane, FERPHOS utilise les technologies et procédés les plus récents, Recherche l'excellence, emploie les hommes qualifiés, intègres et motivés. [1]

SOMIPHOS : (Société des Mines de Phosphates Filiale) de FERPHOS groupe. SOMIPHOS est une société par action à capital public, détenu à 100% par FERPHOS group. Elle a pour objet la recherche, l'exploitation, le traitement, l'enrichissement, la transformation le transport et la commercialisation des phosphates et produits connexes ou analogues. Extrait le phosphate brut du sol grâce à des carrières à ciel ouvert dans le bassin Phosphatier de Djebel Onk. Le minerai est par la suite criblé, lavé et séché. Traité, est alors expédié aux Installations Portuaires de Annaba, soit par voie ferrée ou par transport routier. Le complexe du Djebel-Onk est la principale Stratégique Business Unité de FERPHOS pour la Production de phosphates. Composé de deux mines à ciel ouvert et d'une usine de traitement de phosphate, le Complexe est en phase finale de certification aux normes de L'International Standardisation Organisation, ISO 9001 Version 2000 (Système de Management de la Qualité) et ISO 14001(Système de Management Environnemental) ... [1]

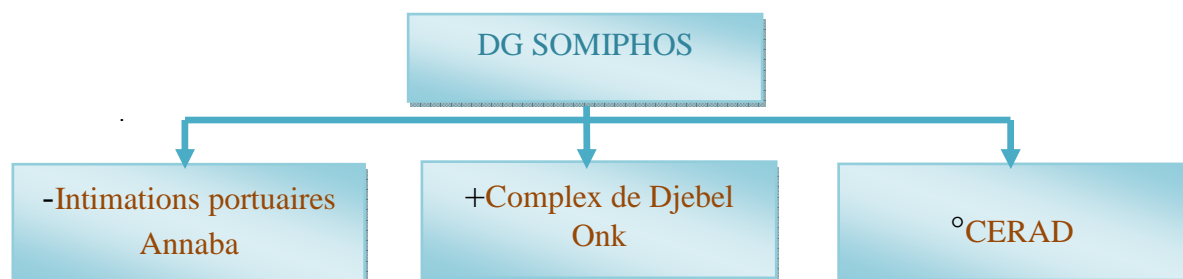


Figure I.1 Organisation de SOMIPHOS

- Centre logistique pour l'exportation des phosphates
- +Mines de phosphate
- +Unité de production du phosphate
- +Unités de traitement
- °Centre d'études et de recherches appliquées au développement

I.3 Aperçu sur l'origine des phosphates

La région de Bir El Ater de la wilaya de Tébessa est connue par sa richesse en phosphates, ces minéraux se trouvant dans des formations d'âge géologique très différentes (ex : Cambrien, Permien, Crétacé supérieur, Éocène...). ... [1]

Les gisements phosphatés sont en générale des minerais d'origines ignées (magmatiques) ou des dépôts sédimentaires. ... [2]Le dépôt des phosphates provient de la conjonction de plusieurs phénomènes. En simplifiant : à l'Éocène inférieur, la région subit une subsidence, le

climat est chaud, aride, et ne permet pas la dissolution des cadavres d'animaux ; les sédiments ainsi accumulés constituent progressivement les phosphates sédimentaires sur de grandes épaisseurs ... [3]

Le dépôt des phosphates Algéro-Tunisiens s'est effectué dans une partie de la Mésogée où l'étroit bras de mer sur Tyrrhénien, s'élargissant vers le Nord et Vers le Sud, formait un golfe profondément enfoncé dans la plate-forme saharienne. Mais l'irrégularité des conditions bathymétriques, dans diverses zones de ce golfe, y a déterminé certaines différences biologiques qui se retrouvent dans la composition de la faune fossile et même dans la nature lithologique des dépôts. C'est ainsi que, dans la région axiale et dans le Nord de ce bras de mer, dominant des formations sub-bathyales à petits foraminifères, sans dépôts phosphatés importants, tandis que, plus au Sud, des formations néritiques à Nummulites renferment des niveaux importants de phosphates calcaires durs : ce sont les gisements de phosphates tendre de la région du Gafsa et du Djebel Onk...[4]

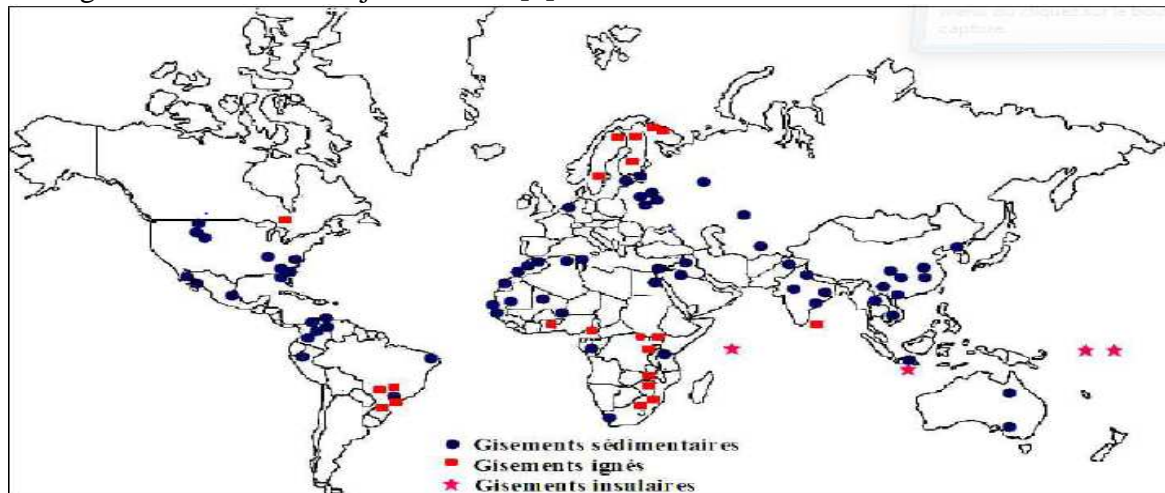


Figure I.2 : Carte géologique des gisements de phosphate actuellement en exploitation au monde.

I.4 Historique succinct la région de Djebel Onk

Les phosphates Algériens ont été découverts à Boughari par Thomas Ph., en 1873. Dans la période (1907 -1908) Joleau à découvert le gisement de Djebel Onk. Des Information plus complètes ont été présentées par Dussert.

En 1931 les phosphates de Djebel Onk font l'objet d'une première concession par la compagnie des phosphates de Constantine qui a été le principal producteur en Algérie. Par la Suite, une filiale est fondée : Société du Djebel Onk (S.D.O) en 1936.

En 1963, les études géologique et minière précédant l'exploitation du gisement de Djemi Djema ont été réalisées par la société SERMI, pour la S.D.O. Parallèlement, la société française SOFREMINEs rédige un avant-projet d'exploitation du gisement de Kef- Esnoun En Février 1965, l'exploitation du gisement du Djemi Djema fut débutée.

En 1986, le gisement de Kef Esnoun a été reconnu en détail par l'EREM grâce 32 Sondages carottés réalisés à la maille de 250 x 300 m et 22 tranchées réalisées dans les bressants.

En Novembre 1989, l'entreprise FERPHOS fait connaître son cahier des charges pour des études de développement du complexe minier de Djebel Onk.

En 1993, BRGM a fourni UN rapport d'expertise géologique de tous les gisements de Djbel Onk.

En Avril 1992, signature du contrat entre l'entreprise FERPHOS et le consultant BRGM/SOFREMINES concernant le rassemblement des éléments techniques et économiques permettant d'arrêter un projet de développement de l'exploitation des gisements de phosphate de Djbel Onk. ...[5]

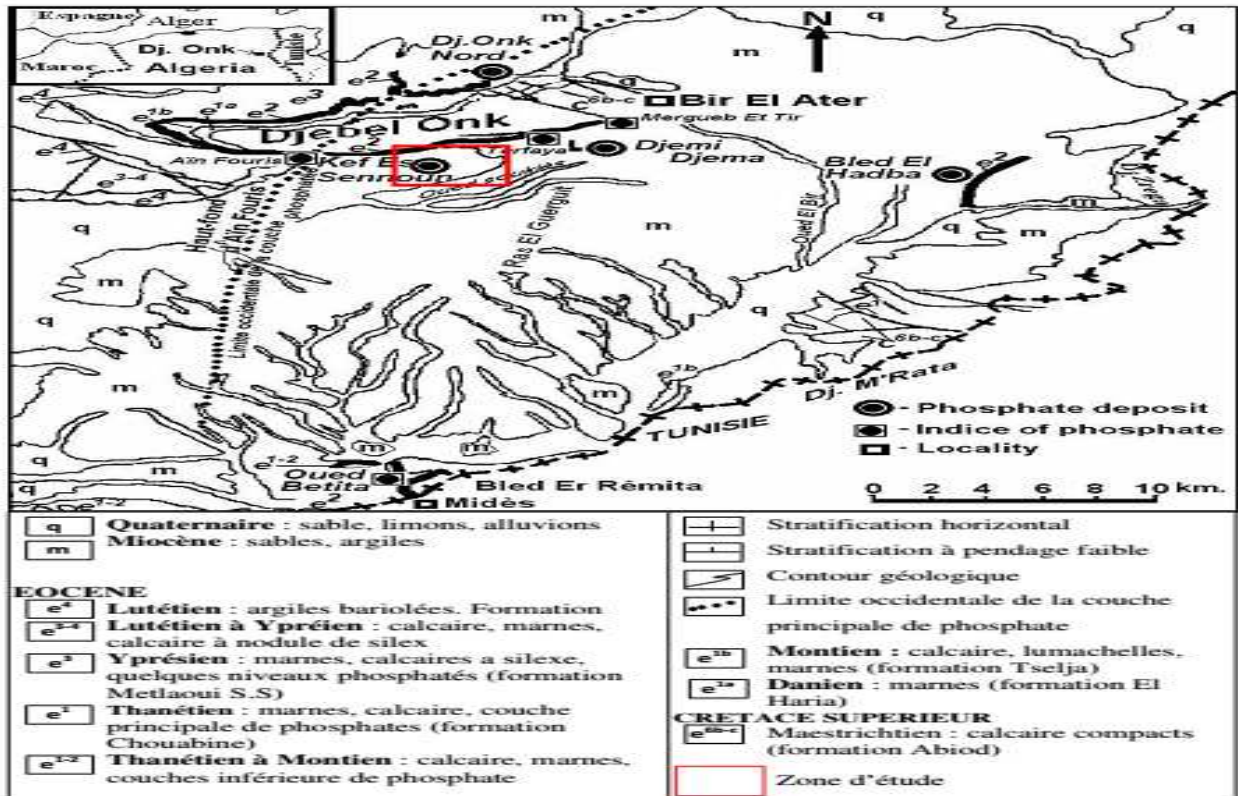


Figure I.3 : Carte de situation géographique des gisements de phosphates de la région de Djebel Onk (D'après SO.NA.R.E.M., 1978).

I.5 Situation géographique

I.5.1 Situation géographique régionale de Djebel Onk

La région du Djebel Onk, est située au Nord-Ouest du Sahara Algérien. Précisément, à l'Est de monts de Nemamcha, à une vingtaine de kilomètres de la frontière Algéro- Tunisienne. Elle constitue la limite géographique naturelle entre les hauts plateaux constantinois et le domaine saharien. Cette région est appartient à la wilaya de Tébessa, elle est éloigné d'environ 100km, la localité la plus importante est la ville de Bir El Ater qui est le siège administratif de la région.

Le massif de Djebel Onk forme un ensemble calcaire de 20 km de longueur qui culmine à 1198 m d'altitude au Djebel Tarfaya. Les altitudes les plus basses au pied du Djebel Onk sont d'environ 635m. ... [06]

La région de Djebel Onk est subdivisée en 5 secteurs miniers: ... [07]

- Gisement de Djemi Djema, (Sud du massif du Djebel Onk).
- Gisement de Kef Esnoun, (Sud du massif du Djebel Onk).
- Gisement de Djbel Onk Nord, (Nord du center minier de Djemi Djema).
- Gisement d'Oued Betita, (Sud-Est du centre minier du Djemi Djema).
- Gisement de Bled El Hadba, (Sud-Est de Djebel Onk).

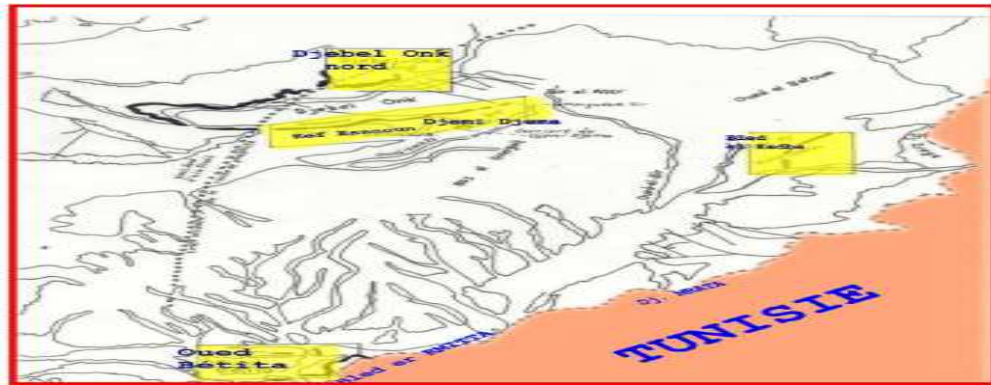


Figure I.4 : Carte de situation géographique de la région de Djebel Onk

I.5.2 Situation géographique de Kef-Esnoun

Les coordonnées de ce gisement sont les suivantes : $x= 951.500$ et $y= 168.0$ à 170.0 . Selon le rapport de l'EREM réalisé par Cieslinski et al. De 1985 à 1987, le gisement de Kef-Esnoun est situé au Sud du massif du Djebel Onk à 4 km de la ville de Bir El Ater, le Siège administratif de la région (Daïra) est à 2 km à l'Ouest du gisement de Djemi Djema Entre le Djebel Fouris et le Djebel Tarfaya. Sa superficie, circonscrite par les sondages de Reconnaissance, est de 2.1Km^2 , soit 2.7Km de longueur sur 0.8Km de largeur. Topographiquement, la zone du gisement, située au pied de Djebel Kef-Esnoun, constitue Un plateau descendant en pente douce vers le Sud-Ouest. Les cotes topographiques varient de 720m au Sud –Ouest à 810m au Nord-Est (dressant Nord). ...[05]



Photo I.1 : Carrière de kef- Esnoun

I.6 Contexte géologique

I.6.1 Géologie régionale de Djebel Onk

Le massif du Djebel Onk est un anticlinal asymétrique en genou, orienté $N 80^\circ$. Le flanc Nord présente des pendages faibles inférieurs à 15° ; le flanc sud, au contraire plonge très rapidement et forme une falaise impressionnante, avec des dressants, dont le pendage est parfois vertical et même renversé. L'ensemble est affecté des failles et de décrochements nombreux. A 750 m au Sud du Djebel Onk, apparaît un second anticlinal : le Djebel Djemi Djema dont la structure est analogue à celle du Djebel Onk mais dont les dimensions sont

plus modestes. Les deux anticlinaux sont situés en bordure de la flexure Sud atlasique zone d'affrontement entre le domaine atlasique mobile et plate-forme saharienne stable. Ils appartiennent à la branche nord de la flexure de direction Est-Ouest, qui s'étend de Khangat sidi Nadji au Djebel Onk. Leur organisation et leur géométrie résultent d'une cinématique en décrochement dextre chevauchement le long de la transversale de N°120 dont l'activation a débuté au minimum au turonien et dont le paroxysme post pliocène... [08]

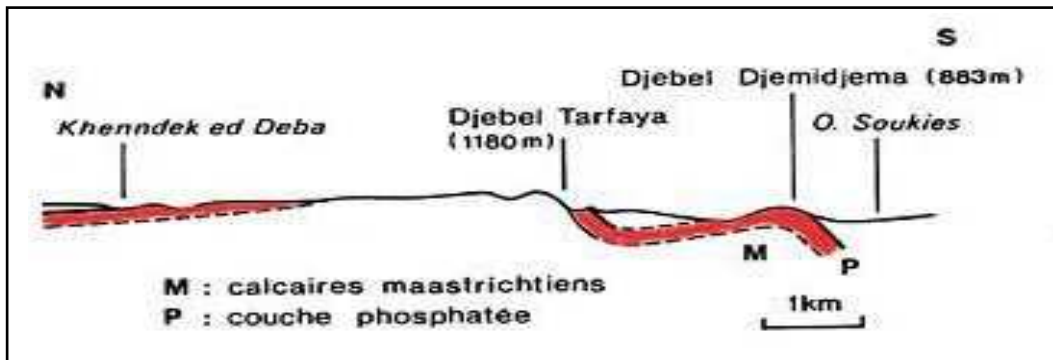


Figure I.5 : Coupe transversal du Djebel Onk

I.7 Stratigraphie

Toute la succession lithologique de Djebel Onk est rencontrée à Kef Esnnoun mais s'indifférencie, cependant, par une épaisseur verticale plus importante du faisceau phosphaté (jusqu'à 53 m dans certains sondages). Le gisement de Kef Esnnoun est constitué de bas en haut par la succession lithologique suivante (Cielensky et al. 1985, 1987) :

∫ Des formations du Thanétien inférieur (le mur du faisceau phosphaté) sont représentées par des marnes feuilletées, sombres dans lesquelles s'intercalent localement, dans la partie inférieure, deux niveaux de phosphates dolomitiques d'épaisseur infra métrique.

∫ Le faisceau phosphaté, appartenant au Thanétien supérieur est constitué par une couche unique de phosphate sans intercalation stérile.

∫ Au toit du faisceau phosphaté, apparaît la série calcaro-dolomitique à silex de l'Yprésien, au-dessus de laquelle se dépose localement les calcaires Lutétien, puis les sables du Miocène et en dernier les dépôts récents du Quaternaire constitués essentiellement d'alluvions. L'épaisseur totale du recouvrement stérile varie de 40 m au nord à 198 m au sud ... [09]

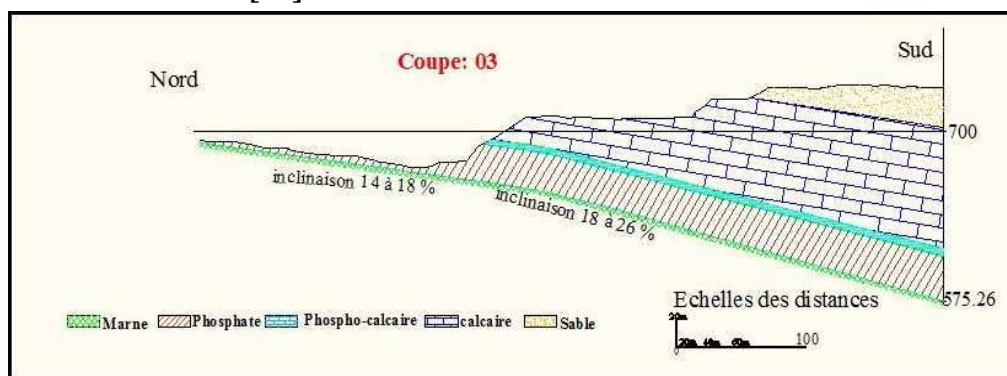


Figure I.6 : Coupes géologiques à travers le gisement de Kef Esnnoun

I.7.1 Etude stratigraphie et lithologique

La stratigraphie de la région de Djebel Onk a été établie par Visse (1952). La série sédimentaire affleurant est exprimée par une succession stratigraphique allant du Crétacé Supérieur (Maestrichtien) à l'Eocène moyen (Lutétien), surmontée par une série sablo - Argileuse continentale datée du Miocène et du Quaternaire.

I.7.1.1 Crétacé : Ce sont les sédiments les plus anciens au cœur de l'anticlinal du Djebel Onk. Tectoniquement, ces formations sont très accidentées, seuls les dépôts du Maestrichtien y affleurent.

- a. Maestrichtien : Les sédiments de cet âge sont représentés par des calcaires blancs massifs avec des intercalations marneuses au cœur de l'anticlinal de Djebel El-Onk. Le sommet est marqué par une surface ferrugineuse et taraudée.

I.7.1.2 Paléocène : Il est représenté par des sédiments marins assez épais (350 m).

- a. Danien

Le Danien est subdivisé litho logiquement en deux sous étages : inférieur et supérieur.

∫ Danien inférieur

Il est représenté par des argiles marneuses et schisteuses, de couleur gris foncé au brun vert, L'épaisseur du Danien inférieur est de 30 à 40 m.

∫ Danien supérieur

Il est formé par des calcaires durs blancs, L'épaisseur varie d'une dizaine de centimètre à un mètre.

- b. Montien

Il est représenté par des calcaires détritiques à lumachelles avec des intercalations de marnes et de dolomie ainsi qu'une faible quantité de silex rencontrée. L'épaisseur moyenne est de 100 m.

- c. Thanétien

C'est l'horizon porteur de la minéralisation. Il est visible sur le flanc de l'anticlinale de Djebel Onk avec une épaisseur de 72 m. Il se subdivise en deux parties :

∫ Thanétien inférieur

Le Thanétien inférieur est représenté par des marnes gris foncé à noires schisteuses. Dans la partie inférieure, on note la présence des conglomérats et de minces lits phosphatés ainsi que deux niveaux de marnes à faunes. La puissance varie de 30 à 40 m.

∫ Thanétien supérieur

Il débute par un niveau dolomitique à gastéropodes, sous – jacent à une couche phosphatée de 30 m d'épaisseur en moyenne à Djebel Onk et à Bled El Hadba, et qui diminue jusqu'à la disparition vers le Nord, l'Ouest et le sud de ce gisement se termine généralement par un niveau lumachellique. La limite entre le Thanétien et l'Yprésien est obtenue seulement par le changement du faciès phosphaté à celui de calcaire marneux à une épaisseur de 0 à 50m.

I.7.1.3 Eocène

- a. Yprésien

Il repose directement sur les dépôts du Thanétien et affleure dans la carrière de Djemi - Djema et au Nord du Djebel Onk, il a une épaisseur de 32 m, on note :

∫ Yprésien inférieur : Il est représenté à la base, par des conglomérats marquant la

Limite avec le Thanétien et sous - jacent une couche à alternance de calcaire, marne, dolomie et de la couche phosphatée. On note la présence de couches minces de silex dans les calcaires. L'épaisseur moyenne de l'Yprésien Inférieur est de 30 m au maximum.

∫ Yprésien supérieur : Il est constitué par l'alternance de calcaires, calcaire dolomitique et marnes, sa puissance est de 2 à 3 m.

b. Lutétien

Les formations de cet étage recouvrent en concordance les séries yprésiennes. Elles sont répandues dans la région de Djebel-Onk (270 m d'épaisseur). On distingue de bas en haut:

∫ Lutétien inférieur

Il est caractérisé par une diminution remarquable des calcaires qui sont remplacés par les marnes blanches crayeuses. On note l'existence de géodes de quartz et de nodules de silex, avec une faune caractéristique (Hemither Sitéa Moracano). Sa puissance varie de 40 à 50m.

∫ Lutétien supérieur

Ce faciès est évaporitique : il est constitué de gypse et d'argile verdâtre, argile phosphatée verte et bancs de calcaire. A la base, on distingue l'argile verte phosphatée et des bancs de calcaire d'une épaisseur de 10 m. Au sommet, des argiles vertes avec banc de gypse intercalé. Son épaisseur est de 65 m.

I.7.1.4 Miocène : La datation des roches de Miocène a été faite grâce à la découverte des rares fossiles (Helix Tissiti), il est formé essentiellement par des sédiments représentés par des roches terrigènes (conglomérats, grès, sables, argile) et des schistes argilo-gréseux. Tandis que les sédiments de la région de Bled El Hadba sont composés de nombreux fragments silicifiés. Le Miocène est subdivisé en trois unités de bas en haut :

∫ Miocène inférieur

débuté par des conglomérats, sable à gros grain présentant une épaisseur d'une dizaine de centimètres à quelque mètre, surmontés par des sables blancs avec intercalation d'argile bruns, ou gris beige, sa puissance atteint plus de 200 m.

∫ Miocène moyen : il est constitué d'argile marron, d'argile à structure schisteuse, Brune, la puissance est d'environ 100 m.

∫ Miocène supérieur : on constate la présence des sables, grès à blanc de graviers, le Matériel est très grossier nettement stratifié.

I.7.1.5 Quaternaire : Les formations quaternaires couvrent de vastes surfaces dans la région. Elles sont représentées par des éboulis de pente, de dépôts sableux, des graviers, de dépôts éoliens, alluviaux et fluviaux [9]

Etage		colonne	Description
Quaternaire			formation alluvionnaire siliceuse
Miocène 900 m	sup		formation argilo sablo conglomératique
	my		Argile-sable
	inf		Sable-calcaire
Lutétien	sup 100 m		Alternance argiles-marnes
	my 40 m		Marnes blanches, nodules de silex et géodes de quartz
Yprésien 70 m	sup		Calcaire, calcaire dolomitique, marnes, nodules de silex
	inf		Intercalation de marnes, calcaires à nodules de silex
Thanétien 80 m	sup		Alternance de marnes, calcaires, dolomies et niveaux phosphatés
	inf		marnes scabres feuilletés niveaux dolomitique
Montien 100 m	Sup		présence de rare nodules à silex
	inf		présence de calcaires détritiques, lumachelle, dolomie, nombreux niveau à huîtres
Danien 100 m			Alternance de marnes dures, marnes schisteuses et argileuses, argile marnreuse à niveau dolomitique et calcaires tabulés
Maastrichtien			Calcaire massif monotone

Figure I.7: Colonne stratigraphique de la région de Djebel El Onk (D'après Cielensky, Benchernine et Watkowski, 1987).

I.8 Tectonique:

La région de Djbel Onk appartient avec l'Atlas tunisien, à l'extrémité orientale de l'Atlas saharien. La série du Crétacé supérieur à Eocène du bassin de Djbel Onk- Gafsa- Mélaoui est structurée en une suite d'anticlinaux et synclinaux dissymétriques, généralement failles dans leurs flancs d'axe le plus souvent SW-NE et décrochés par des accidents transverses N 120° à N 140° E. La principale structure dans la région de Bir El Ater, est l'anticlinal de Djbel Onk, à cœur de Crétacé supérieur, allongé sur une vingtaine de Km et une largeur de 3 km. Cet

anticlinal fortement asymétrique, décrit par Visse (1951)[11] comme une flexure anticlinale Post- Pliocène, présente un flanc Nord à pendage faible, inférieur à 10° supportant le glissement de Djebel Onk Nord et un flanc sud à pendage fort, parfois vertical et même renversé. Le faisceau de failles inverses N 70°E, affectant ce flanc sud détermine un comportement tectonique endressant ... [10]

I.9 Conclusion

Ce chapitre porte une attention particulière à la présentation et aux opérations de Somiphos. En plus de déterminer l'emplacement stratégique de la zone de Kef Esnnoun, nous avons également définir les couches du terrain pour cette zone et son importance nationale.

Chapitre II

Généralités sur le sable

II.1 Introduction

On entend par sable la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 0.080 mm et 5 mm .

Nous allons parler de sable et leurs spécifications. Nous allons aborder les points suivants :

- matériaux entrant dans la composition des bétons bitumineux de sable.
- L'utilisation du sable en béton bitumineux ou dans les chaussées routières.

Ces études bibliographiques serviront à l'analyse de base des facteurs à prendre en compte lors du choix de formulation adéquate pour aboutir à de bonnes performances répondant aux sollicitations dues au trafic et aux températures.

II.2 Les différents constituants du sable

Le sable comporte différentes variétés de minéraux qui sont dérivés de l'élément de base le silicium (Si). Ces principaux minéraux sont classés comme suit : silice, silicates (famille la plus abondante dans la nature, plus de 90 % du poids de l'écorce terrestre), argiles et carbonates. Ces dernières se trouvent généralement sous forme de trace dans le sable [12].

II.2.1 Le silicium

Le silicium est un corps pur de symbole chimique Si, de numéro atomique 14, de poids atomique 28,08 g/mol. Il ne se trouve jamais à l'état natif mais constitué sous forme de silice et de silicate. C'est l'élément le plus abondant de l'écorce terrestre (environ 27,2 %) après l'oxygène (environ 60%).

II.2.2 La silice (ou quartz SiO_2)

Le dioxyde de silicium ou silice occupe parmi les oxydes, une place exceptionnelle. Les nombreuses applications industrielles (optique, électronique, production de matériaux réfractaires, etc.).

II.2.3 Les silicates

Les silicates désignent une importante famille de minéraux dérivants de la silice (SiO_2) car ils constituent environ 97 % de la croûte terrestre. Ces minéraux dont le squelette est essentiellement formé par des tétraèdres de silicium [SiO_4] sont additionnés à d'autres éléments tels l'aluminium, le magnésium, le fer, le calcium, le potassium, le sodium etc..

II.2.4 Les argiles

Les argiles regroupent l'ensemble des matériaux dont les particules n'excèdent pas 2 mm de diamètre équivalent. Ils correspondent à des minéraux spécifiques que l'on ne rencontre jamais en particule plus grosse. Ces minéraux sont des silicates d'aluminium hydratés, ils appartiennent à la famille des phyllo silicates qui présentent une structure cristalline en feuillet.

II.2.5 Les carbonates

Les minerais de carbonate rencontrés le plus souvent dans les sols sont la Calcite CaCO_3 , la Dolomite [$\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$], la Nahcolite (NaHCO_3), la Trona [$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$] et la Soda ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

II.3 Classifications des sables

On peut classer les sables selon dont:

II.3.1 La granularité : permet de séparer les sable en trois catégories sont : Sables fins; Sables moyens; Sables grossiers.

II.3.2 La propreté et la teneur en fines : elle est appréciée par la valeur de l'équivalent de sable .

II.3.3 La nature minéralogique : En général, les sables peuvent être classés comme suit : Sables siliceux ; Sables silico-calcaires ; Sables calcaires.

II.4 Les types des sables selon Leurs provenances : [13]

les sables peuvent être classés comme suit :

- ✓ **Sable de rivière** : il est obtenu par dragage des lits des cours d'eau. Il doit être dur et propre pour qu'on puisse l'utiliser dans les bétons.
- ✓ **Sable de mer** : il provient des côtes de la mer. Pour l'utiliser dans les bétons, il faut qu'il ne soit pas trop fin et qu'il soit lavé de son sel.
- ✓ **Sable de carrière** : Il contient souvent de l'argile qui enrobe les grains et les empêche d'adhérer aux liants. Il est donc à proscrire.
- ✓ **Sable artificiel** : il est obtenu par concassage des roches (calcaires durs, gré ...). Il est souvent plein de filler. Pour qu'il soit utilisable dans les bétons, il faut limiter le pourcentage des fines.
- ✓ **Sable de dune** : c'est une variété des sables de mer. Il est donc très fin. Les sables de dunes et rouvrent dans les régions sud du pays. Ils sont situés en zone présaharienne.

II.5 Les caractéristiques du sable et ses applications

II.5.1 Les caractéristiques du sable

Les principaux critères utilisés pour caractériser un sable sont sa courbe granulométrique et sa rondeur. D'autres caractéristiques sont la teneur en matières argileuses, en coquillages et chlorures [14].

II.5.2 La courbe granulométrique

La granulométrie mesure la dispersion de la taille des grains. Elle est décrite par un intervalle 0/X où X donne la valeur en millimètre pour laquelle 85% des grains ont un diamètre inférieur ou égal à X. Plus X est petit plus le sable est considéré comme fin. La teneur en « fines » d'un sable est aussi prise en compte. Il s'agit de la proportion de grains dont la taille est inférieure à 0,063mm. La teneur en fines affecte la manière dont le sable absorbe l'eau par capillarité. Les sables de concassage, à moins d'être lavés, ont une teneur en fines élevée. À l'inverse, les sables extraits de la mer ou de rivières ou les sables lavés en général ont une teneur en fines plus faible car les fines sont entraînées avec l'eau.

II.5.3 La forme du grain

Suivant l'origine du sable, la forme du grain est différente. Ainsi, un grain rond améliore la fluidité du sable et des mélanges auxquels il participe. À l'inverse, un grain anguleux favorise la résistance du matériau dont il fait partie. Les sables marins ou naturels sont plus ronds. Suivant leur origine les sables de rivière sont plus ou moins ronds. Les sables de concassage sont anguleux.

II.5.4 Autres caractéristiques techniques

Outre la granularité et la forme des grains, le taux de chlorures, les teneurs en argile et en coquillages sont d'autres paramètres importants de la qualité du sable. Une teneur en chlorure trop élevée n'est pas souhaitable dans des applications liées au fer telles que les bétons armés puisqu'ils oxydent le fer et provoquent la rouille de la structure métallique. La présence de sels dans les mortiers ou les matériaux de construction provoque des phénomènes d'efflorescence.

L'argile étant rétenteur d'eau, une présence importante dans le sable affecte les dosages d'eau dans des applications comme le béton ou le mortier. L'argile apporte aussi un composant « gras » qui affecte, par exemple, la plasticité du sable.

II.6 Les principales applications du sable

• Les bétons

Le béton est un mélange dont on désire qu'une fois durci il reproduise les qualités de résistance de la pierre. Son utilisation est très importante dans la construction : il est utilisé pour la fabrication de fondations et de chapes, de matériaux de constructions divers (tuyauteries, poutres, etc.) [14].

- **Maçonnerie et mortiers**

Les sables sont essentiels dans la fabrication de mortiers et de mortiers de jointoiement de façade. Typiquement, un mortier est un mélange de ciment, de sable et d'eau. Suivant les cas, les qualités de mortiers diffèrent très fort. Ainsi, un particulier ou un petit entrepreneur réalise son mortier à partir du sable maçon qu'il trouve chez un négociant en matériau. Par contre, les mélanges sable et ciment pour mortiers préfabriqués vendus en sacs ou en silos ont une composition plus pointue, avec plusieurs types de sables en général [14].

- **Les mélanges bitumeux**

Asphalte coulé et enrobé sont des mélanges bitumeux. Une vision très réductrice des choses est de considérer que les matériaux bitumeux sont des bétons où le liant est du bitume.

L'enrobé est le mélange le plus proche du béton. Outre le bitume, il est composé de fines, de sable et de granulats. Il est utilisé principalement pour le revêtement de chaussées. Excepté l'eau, les enjeux techniques sont les mêmes que pour le béton. L'ouvrabilité est assurée par la température du mélange (200°C) avant mise en œuvre. La rondeur des granulats a un effet favorable mais secondaire [14]. En comparaison de l'enrobé, l'asphalte coulé se caractérise par une plus grande proportion de bitume et de fines. Les fines apportent de la consistance au mélange. Une fois sèche, ce matériau possède une grande étanchéité.

- **L'industrie du verre**

Le sable siliceux (naturel) est la principale matière première dans la fabrication du verre. La silice est en effet l'élément vitrifiant qui donne au verre sa structure. Si la silice vitrifie, les autres composants du sable tels les oxydes de fer et de manganèse sont des impuretés qui diminuent les qualités transparentes du verre. Le sable recherché doit être aussi pur que possible [14]. La granulométrie est aussi surveillée : la présence de fines n'est pas souhaitée car elles génèrent des poussières et les grains trop gros ralentissent le processus de fusion.

- **Autres usages**

Actuellement, le sable est largement utilisé dans le domaine de filtration, par exemple filtration de l'eau et filtration des produits toxiques. Il est aussi utilisé pour les opérations à hautes températures et qui nécessitent des matériaux réfractaires comme le moulage et les fours. Dans le domaine optique, le sable est utilisé pour la production des verres de toutes sortes. On le trouve aussi dans le domaine énergétique, électrique et électronique comme les panneaux et les équipements d'énergie solaire. Le sable est la matière première pour l'extraction de dioxyde de silicium (SiO_2) qui est lui-même la source de silicium (Si) pur [12].

II.7 Les ressources des sables en Algérie

Les pratiques de l'industrie en du béton en Algérie sont conditionnées par les ressources locales et sont relativement routinières. Cependant, l'industrie du béton est confrontée ces dernières années à des changements importants : utilisation d'adjuvants de plus en plus performants, développement de nouveaux bétons (bétons à hautes performances, béton auto-compactant) [13]. Dans notre pays, s'ajoute un bouleversement supplémentaire : l'emploi d'un nouveau type de sable. Trois familles de sables se distinguent :

- **Les sables ronds siliceux**

Dit ronds, sont issus d'un processus naturel d'érosion. En général, ils sont dragués dans les Oueds. Leur usage est courant depuis des années et est même recommandé. Cependant, les réserves disponibles sont proches de l'épuisement ou protégées par de nouvelles règles environnementales en matière de dragage des Oueds. Ce matériau est donc devenu moins intéressant économiquement.

- **Les sables de concassage calcaires**

Sont le produit d'un processus industriel contrôlé de concassage, de lavage et de criblage appliqué à des roches calcaires exploitées en carrières, la contrainte du coût de revient élevé, le rends économiquement moins intéressant.

- **Le sable de dune**

Le sable de dune de l'erg occidental occupe 6% de la surface du Sahara Algérien. La figure II.1 présente la situation géographique des ergs de l'Algérie.

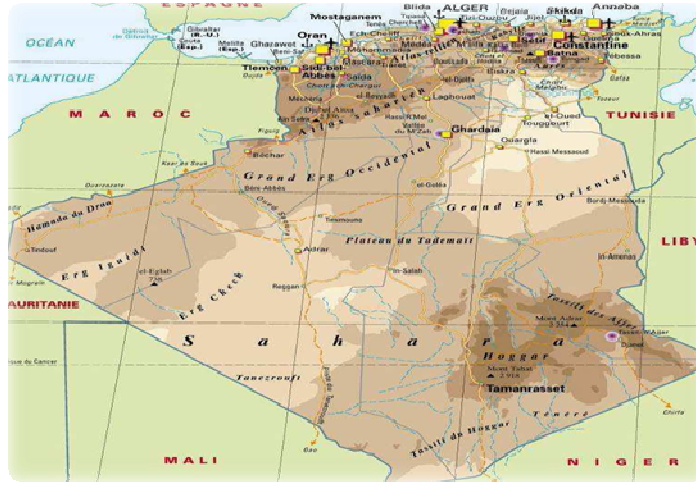


Figure II.1: Situation géographique des ergs de l'Algérie [15].

Ce type de sable spécialement est un matériau d'une grande disponibilité en Algérie. Ce matériau est pratiquement non exploité, malgré les éventuelles caractéristiques qu'il peut présenter. L'utilisation de ce nouveau matériau dans le secteur de construction, peut soulager davantage le domaine d'habitat, et contribuer au développement des régions du sud algérien, très riches en sable de dune [15].

- **Sable de la zone de Kef-Essnoun**

Les sables sont hétérogènes et hétéro granulaires dans leur ensemble. Ils forment des couches à stratification entrecroisée très nette et où l'on note un certain granulo-classement. Dans la partie inférieure, les sables sont grossiers, mais très vite ils passent à des sables fins à moyens blanchâtres non calcareux. Ces sables sont intercalés de bancs de grés stratiformes et irréguliers centimétriques. [16]

Localement on peut observer des affleurements de sable fin de couleur beige, jaune ou blanc jaunâtre. Ces sables se localisent surtout vers l'Ouest et l'Est du secteur.

Dans la zone d'activité de Kef-Essnoun (voir figure II.2), tous les sables rencontrés sont de type moyen à grossier avec des niveaux plus fins. Ce sont des sables quartzueux blancs à transparent formant des couches à stratification entrecroisée.

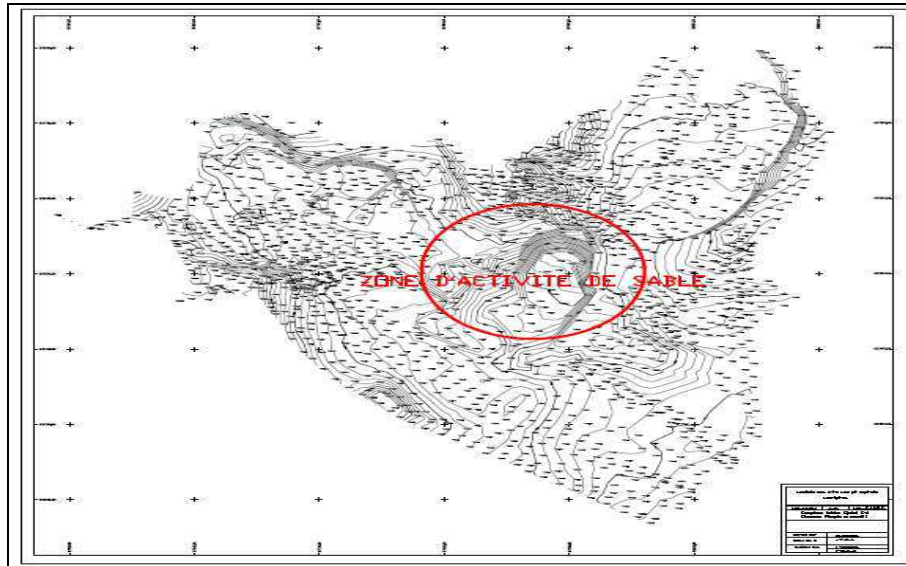


Figure II.2: Zone d'activité - carrière de sable Zone I. [16]



Photo II.1 : Les sables du Kef-Essnoun Zone I.

- **Réserves en sable**

Pour le calcul des réserves, on a utilisé la méthode des blocs géologiques la plus simple : on limite les blocs géologiques à partir des données des sondages ,on assimile ces blocs à des figures géométriques simples, afin de pouvoir calculer leurs surfaces pour aboutir en fin aux volumes de ces blocs.[16]

En prévision d'une éventuelle exploitation du sable de la région de Djebel Onk sud, kef esnoun zone I,une estimation des réserves géologiques exploitable a été entamée en se basant sur la méthode la plus pratique qui est celle des blocs et elle a donné un tonnage de 48234375 T . (voir le tableau II.1)[16]

Tableau II.1 : réserves en sable de Djebel Onk Sud. [16]

Secteur	Bloc	Surface (m ²)	Puissance moyenne (m)	Volume (m ³)	Densité (t/m ³)	Tonnage (t)
Kef Essenoun	A	551250	50	27562500	1,75	48234375
Djemi- Djema zone III	B	737850	60	44271000	1,75	77424250
PROLONGEMENT de Djemi – Djema zone III	C	1200000	70	84000000	1,75	147000000
RAS MARGUEB ET TIR	D	1150625	60	69037500	1,75	120815625
TOTAL						393474250

II.8 Exploitations des carrières de sable pour la construction

L'exploitation des carrières de sable est considérée, jusqu'à aujourd'hui, comme la plus importante des activités extractives entreprises en Haïti. Ces matériaux de carrières s'avèrent, en effet, des produits de base indispensables à l'économie et assurent à tous des services quotidiens en raison de leurs utilisations dans les secteurs du bâtiment, du génie civil et des travaux publics. Les granulats (sables, graviers et cailloux) sont extraits sur tout le territoire national soit dans les lits de rivières (matériaux alluvionnaires) soit sur les flancs des montagnes de calcaires broyés naturellement (matériaux de carrières).

a) Localisation des exploitations

Les carrières ont été localisées dans :

- Le massif de la Selle au Morne l'Hopital (versants Nord et Sud), au Carrefour Dufort(Léogane) et à Fond Parisien.
- La chaîne des Matheux au Morne à Cabrits, aux Sources puantes et à Montrouis.

En ce qui a trait aux matériaux alluvionnaires, ils sont extraits essentiellement dans les litsvifs de la Rivière grise et de la Rivière Momance.

Ces régions ont été retenues pour exploitation en raison de leur potentiel en matériaux et de leur proximité des lieux d'utilisations (Port-au-Prince, La plaine du Cul-de-sac, Croix-des-Bouquets, Montrouis, La Boule, Kenscoff, Carrefour, Léogane, Grand-Goâve etc.)

b) Mode de fonctionnement des exploitations

Le dernier inventaire des carrières de sable opérant de façon permanente dans le Département de l'Ouest a été réalisé au cours de l'année 1995 par le Bureau des Mines de l'Energie et a dénombré près d'une quarantaine de carrières produisant annuellement 1.5 millions de m³ de sable. Cette production représente environ 80 % de la production nationale estimée à près de 2 millions de m³ de sable par an, c'est-à-dire une consommation de 0.30m³/hab./ an. Dans les pays industrialisés cette consommation est estimée à environ 4m³/habit. /an ou 7t/hab./an, indice de développement des infrastructures et du bâtiment.

c) Environnement

Le facteur environnemental n'est nullement pris en considération dans l'exploitation des carrières de sable. Les exploitants ne considèrent que le côté commercial des exploitations qui présentent aujourd'hui un sérieux défi à l'environnement.

II.9 Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de faire la synthèse de connaissances existantes sur le sable et ses caractéristiques.

Dans le suivant chapitre, On va étudier le béton bitumineux avec différents types de sables, et analyser son comportement mécanique. Aussi nous allons étudier les différentes caractéristiques physiques et mécaniques des bétons bitumineux avec la caractérisation du sable obtenus.

Chapitre III

Les bétons bitumineux

III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous allons définir les enrobés bitumineux. Tout d'abord nous présentons brièvement quelques généralités sur l'enrobé bitumineux et ses composants (bitume et granulats) avec les caractéristiques appropriés de chacun d'eux et quelques types de bétons bitumineux utilisés dans la couche de roulement.

Ensuite, nous étudier la formulation de l'enrobé en considérant les paramètres suivant: la teneur du bitume, la dureté du bitume et la grosseur des granulats, qui ont des influences sur la compacité, la mise en œuvre et la durabilité..., ainsi que les principaux essais de caractérisation selon les normes pour obtenir un enrobé selon le choix désiré.

III.2 Les bétons bitumineux

Béton bitumineux est un enrobé riche en bitume constitué d'un mélange de granulats (sable, gravier et fines), utilisé principalement pour les couches de roulement, c'est-à-dire pour les couches supérieures de la chaussée. Les bétons bitumineux se classent en fonction de leur granulométrie. Ils sont toujours posés sur une couche de base en matériaux hydrocarbonés ou traités au liant hydraulique ou sur une couche de liaison en enrobés pour les couches minces. [17]

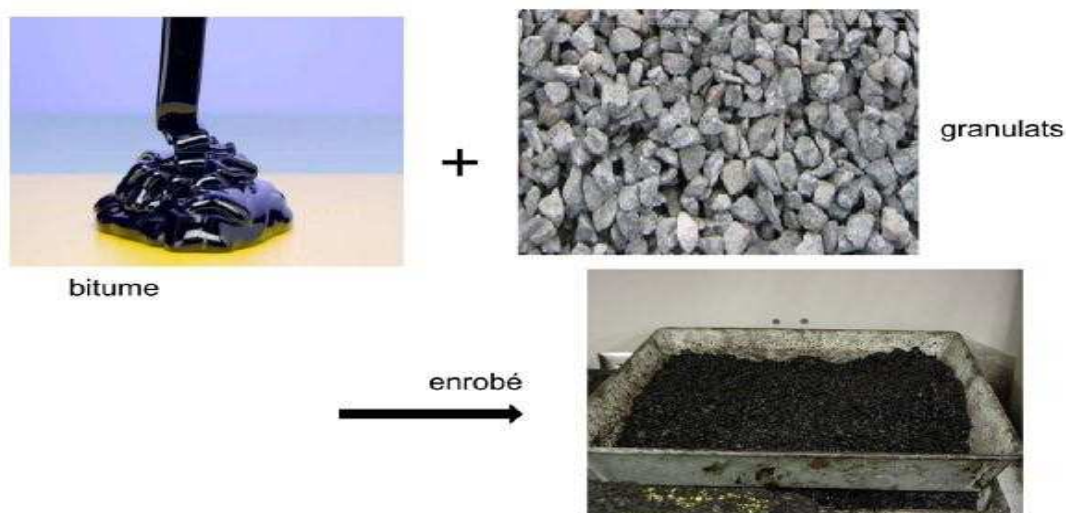


Figure III.1 : Composition de béton bitumineux [17]

III.3 Les types des bétons bitumineux

On distingue de nombreux types de béton bitumineux, chacun avec ses caractéristiques et l'utilisation propre: [18]

- **Le béton bitumineux mince (BBM)** : possède une granulométrie de 0/10 ou 0/14. Ce béton bitumineux est facilement compactable et est parfaitement imperméable. Principalement utilisé pour les parkings ou les trottoirs, son épaisseur varie de 2.5 à 5 cm.
- **Le béton bitumineux très mince (BBTM)** : c'est sans doute l'enrobé le plus intéressant en termes de rapport qualité-prix. En effet, il dispose d'une très bonne durée de vie ainsi que d'une facilité de mise en œuvre. Quelle que soit la granulométrie (0/10 ou 0/6), le BBTM dispose d'une épaisseur comprise entre 1.5 et 3 cm.
- **Le béton bitumineux ultra mince (BBUM)** : destiné à une couche de roulement, c'est-à-dire en contact direct avec les pneumatiques des véhicules, il est tout indiqué pour un parking par exemple. Son épaisseur varie de 1 à 1.5 cm.

- **Le béton bitumineux souple (BBS)** : comme son nom l'indique, ce béton est constitué d'un bitume assez mou pour obtenir un enrobé déformable. Cependant, il possède une faible résistance à l'orniérage.
- **Le béton bitumineux drainant (BBDr)** : l'avantage principal de ce type de béton bitumineux réside dans son excellente adhérence, aussi bien par temps de pluie ou de forte chaleur. De plus, il réduit le bruit de roulement. Pour une allée de jardin, il est alors parfaitement adapté
- **Le béton bitumineux semi-grenu (BBSG)** : celui-ci est l'enrobé à chaud de référence. En effet, il répond à de nombreux besoins (trottoir, allée...) et est très adapté pour un trafic aussi bien moyen que lourd. Son épaisseur varie de 3 à 9 cm, suivant la granulométrie.
- **Le béton bitumineux à modules élevés (BBME)** : ce béton bitumineux fait partie des enrobés structurants. Il possède une excellente rigidité, une durée de vie importante et une bonne résistance à l'orniérage. Son épaisseur peut varier de 4 à 9 cm par couche.

D'autres aspects seront étudiés avant le choix du BB : le climat de la région sera pris en compte pour le choix du futur revêtement [19]:

- le bitume utilisé peut se ramollir si la chaleur est trop forte.
- le béton peut durcir par trop basses températures.
- la pluie ou la neige tassée sont également des critères à prendre en compte, car le BB peut geler et favoriser la formation de verglas.

III.4 Composition de béton bitumineux

Le béton bitumineux est composé de différents éléments :

- Gravillons.
- Sable.
- Filer.
- bitume utilisé comme liant.

Le béton bitumineux crée généralement la couche supérieure des chaussées appelée couche de surface. [17]

III.4.1 Liants hydrocarbonés

Les liants hydrocarbonés est d'une manière générale un matériau adhésif (un liant) contenant du bitume, du goudron ou les deux, cet élément agrégé avec des granulats fournit des « matériaux enrobé », la masse volumique du bitume est prise égale à 1.03 t/m³, également qui jouent un rôle important dans la technique routière moderne, sont connus et utilisés depuis longtemps.

On distingue trois familles de liants hydrocarbonés: [17]

- **Asphalte**: roche calcaire imprégnée de bitume. Expression qui désigne le revêtement des routes.
- **Bitume**: composé de carbone et d'hydrogène, d'où le nom d'hydrocarbure. Il peut être d'origine naturel ou provenir de la distillation du pétrole.
- **Goudron**: Produit provenant de la distillation de diverses substances: charbon, bois, tourbe. Il est moins soluble que le bitume.

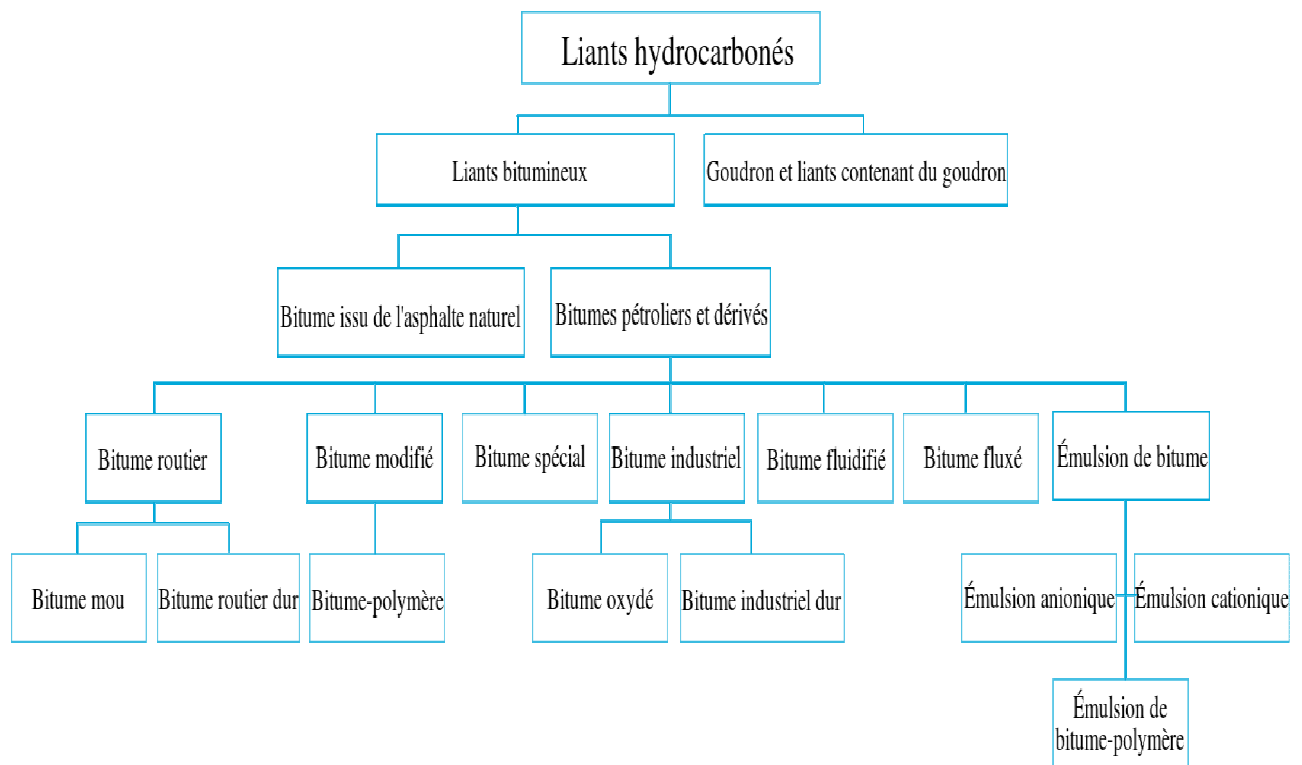


Figure III.2 : Types de Liants hydrocarbonés [17]

III.4.2 Bitume

Les bitumes sont des sous-produits d'hydrocarbures lourds, résidus noirs de pétrole brut obtenus soit par distillation naturelle, soit par distillation en raffinerie. Les bitumes de distillation directe sont utilisés pour la confection d'enrobés à chaud. [17]

- **Historique**

On distinguera, très schématiquement, les périodes suivantes :

- De 1900 à 1930 : Goudron de houille.
- De 1930 à 1950 : Emulsions de bitumes.
- Les années 70 : les bitumes polymères.
- Les années 80 : les liants modifiés et les additifs.
- Les années 90 : les bitumes spéciaux.

- **Origine du bitume**

Tous les bitumes sont des produits du pétrole brut où ils se trouvent en solution. Ils sont le résultat de l'élimination des huiles servant de solvant par évaporation ou distillation du pétrole brut. Sachant que de tels processus pourraient se produire dans la nature, au niveau des couches souterraines, les bitumes proviennent en conséquence de deux sources : naturelle ou industrielle. [20]

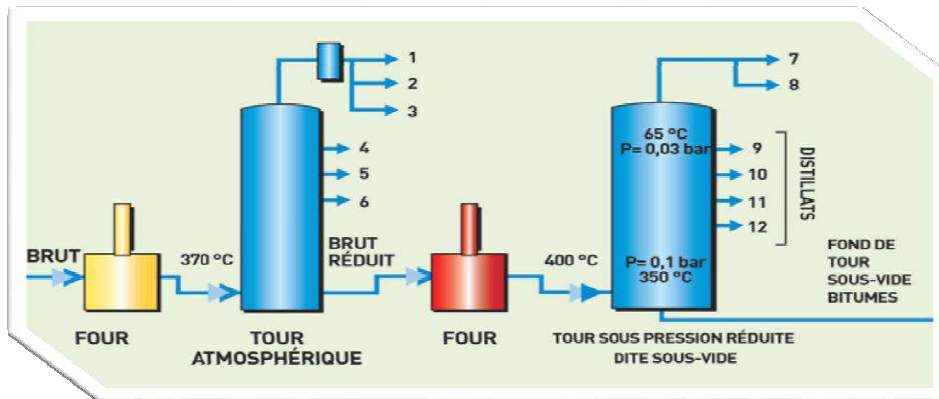
- **Origine naturelle:** La production mondiale est très faible puisqu'elle ne dépasse pas 200 milles tonnes.
- **Origine industrielle.**

Ce dernier compose deux parties :

- **Distillation direct :** Distillation atmosphérique : Ce mode de raffinage consiste à chauffer en continu par passage dans un four, le brut préalablement décanté et dessalé. Ce brut, porté à une température voisine de 340 °C, est envoyé dans une colonne de fractionnement maintenue à la pression atmosphérique. Le produit récupéré en fond de tour

est le brut réduit. [20]

- **Distillation sous vide** : A ce stade, le brut réduit provenant de la distillation atmosphérique est, après réchauffage aux alentours de 400 °C, envoyé dans une colonne où règne une pression réduite à quelques dizaines d'hPa². Il est possible, dans ce type d'unité, de fabriquer directement toutes les classes de bitumes du 20/30 au 160/220. [20]



1- Gaz	4- Carburateur	8- Gasoil sous -vide
2- Essence légère	5- Gasoil	9- 1 ^{er} Sous -vide
3- Essence	6- Vers éjecteurs de vapeur	10- 2 ^e Sous -vide
4- White-spirit	7- Gasoil entrainé	11- 3 ^e Sous -vide

Figure III.3 : Fabrication des bitumes par raffinage du pétrole. [20]

- **Composition du bitume:**

A température ordinaire, les bitumes se présentent comme des corps visqueux ou des solides susceptibles de fluer sous leurs poids propre. [19]

La séparation du bitume par solvant permet de séparer les bitumes en **asphaltènes** et en **maltènes**: les asphaltènes représentent 10 à 30% des bitumes, ils constituent la partie insoluble des bitumes dans les solvants de type n-alcanes et se présentent sous la forme d'un solide dur friable, brun-noir qui contribue largement à la couleur noir du bitume. Les maltènes, partie soluble correspondent à l'association des résines et des huiles; les résines ont un rôle essentiel vis-à-vis la stabilité colloïdale du bitume, les huiles représentent 40% à 60% du bitume. [19]

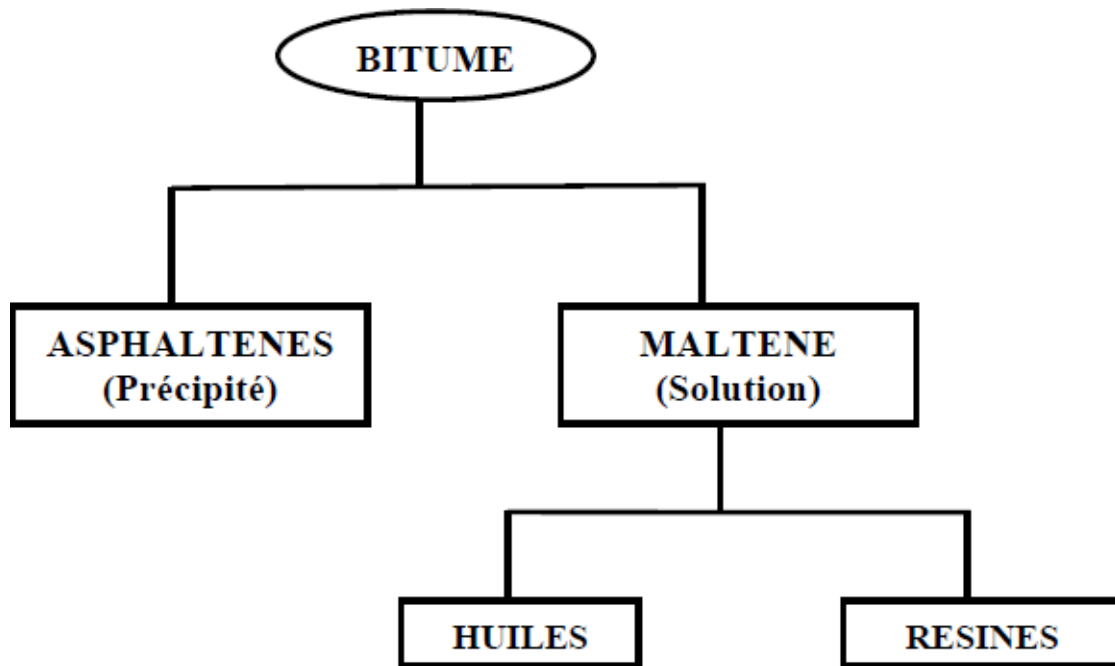


Figure III.4 : Séparation d'un bitume en asphaltènes, résines et huiles [19]

- **Différents types de bitume**

Le bitume utilisé dans les enrobés confère des propriétés viscoélastiques aux revêtements de chaussées. Un bitume ayant les caractéristiques appropriées assure des performances élevées sur le plan de la résistance à l'orniérage, à la fissuration thermique, à la fissuration de fatigue et l'arrachement ; ses caractéristiques contribuent à la réalisation de revêtements sécuritaires, durables et économiques.

On rencontre les types suivants de liants à base de bitume :

- **Les bitumes purs**

Ils sont obtenus par raffinage de bruts pétroliers et ne comportent aucun ajout. D'après leur mode de fabrication, on peut obtenir des bitumes dont la consistance est variable. Les conditions climatiques et le type de projet déterminent le choix du type approprié. On distingue ainsi cinq principaux types de bitume allant du plus dur aux plus mous identifiés par les classes : 20/30 ; 35/50 ; 50/70 ; 70/100 et 180/220.

- **Les cut-backs**

Ce sont des bitumes fluidifiés obtenus par un mélange de bitume pur soit avec des fractions légères de distillation du pétrole telles que le kérosène, soit avec des huiles légères provenant de la distillation de la houille afin de réduire leur viscosité. À leur exposition aux conditions atmosphériques, les solvants s'évaporent et laissent le bitume semi-dur remplir sa fonction. On utilise les cut-backs pour des enrobés pour couches de scellement et couches d'accrochage.

On distingue ainsi :

- ✓ **Les cut-backs à prise rapide (RC)** : Cut-backs composés d'un ciment bitumineux et d'un diluant de haute volatilité comme l'huile de naphte ou de gazoline.
- ✓ **Les cut-backs à prise moyenne (MC)** : Cut-backs composés d'un ciment bitumineux et d'un diluant de volatilité moyenne comme le kérosène.

✓ **Les cut-backs à prise lente (SC) :** Cut-backs composés d'un ciment bitumineux et d'huiles de volatilité lente.

➤ **Les bitumes fluxés**

Ce sont des bitumes purs dont on a diminué la consistance par incorporation de produits provenant de la distillation du pétrole pour au moins cinquante pour cent des ajouts, et de la distillation de goudron de houille.

➤ **Les bitumes composés**

Mélanges comportant au moins cinquante pour cent de bitume pur. On utilise comme additifs du brai de houille ou du goudron de houille.

➤ **Les bitumes modifiés**

Ce sont des bitumes composés avec ajout de substances; le plus souvent macromoléculaires autres que les fines minérales ou additifs d'adhésivité.

➤ **Les émulsions de bitume**

Les émulsions de bitume sont des dispersions de fines particules de bitume dans l'eau au moyen généralement d'un agent émulsif qui est un type de savon résineux qui stabilise le produit. L'une des particularités des émulsions est qu'ils éliminent les dangers d'incendie et l'effet toxique ; ce qui n'est pas le cas pour les cut-backs.

On distingue également plusieurs types d'émulsions suivant la teneur en agent émulsif :

- ✓ Les émulsions à prise rapide (RS).
- ✓ Les émulsions à prise moyenne (MS).
- ✓ Les émulsions à prise lente. [20]

- **Propriétés des bitumes**

Le bitume a été choisi comme matériau principal dans l'élaboration des routes pour sa souplesse d'emploi, ses propriétés d'adhésivité, de plasticité, d'élasticité, d'insolubilité dans l'eau et d'inertie à de nombreux agents chimiques.

➤ **Réactivité**

En général, le bitume est inerte chimiquement vis-à-vis de la plupart des composés hydrocarbonés, mais, les composés aromatiques peuvent réagir notamment avec l'oxygène. Les bitumes soufflés ou oxydés sont d'ailleurs préparés grâce à ce type de réaction. Outre ces réactions d'oxydation, des réactions de condensation peuvent avoir lieu à des températures supérieures à 160°C en présence de H₂S [21]. Les acides présents dans les résines du bitume sont aussi sensibles à certaines attaques basiques.

➤ **Adhésivité**

Le bitume se comporte comme une colle de très bonne qualité qui assure une liaison entre les granulats. Il adhère sur la plupart des roches. Cette adhésivité se manifeste d'une manière active par le collage solide des granulats secs et propres entre eux et d'une manière passive en permettant une résistance aux phénomènes de désenrobage dus à l'eau et aux attaques chimiques. Seuls les produits chimiques dérivés du pétrole, tel que le kérosène et le gazole, peuvent endommager l'enrobé.

➤ **Cohésion**

Même lors de contraintes particulières exercées sur la chaussée, l'enrobé ne se désagrège pas. La ductilité du bitume permet un écoulement lent au sein de l'enrobé et non une rupture, tandis que sa ténacité assure une résistance suffisante sous l'effet de contraintes de traction.

➤ **Viscoélasticité**

Le bitume n'est ni un fluide newtonien, ni un solide élastique, il a un comportement

intermédiaire suivant la température, et la charge appliquée. La viscoélasticité confère des propriétés mécaniques de souplesse et de fermeté au bitume. Mais ce caractère est largement dépendant de la température et de l'origine du bitume. En première approximation, le bitume peut être considéré comme un solide ou un liquide visqueux à haute température ($> 80^{\circ}\text{C}$), un liquide ou un solide viscoélastique de 0°C à 80°C , et un solide élastique fragile à basse température $< 0^{\circ}\text{C}$. Le comportement du bitume suivant la température a été résumé par Olard et coll. [22] (Figure III.5)

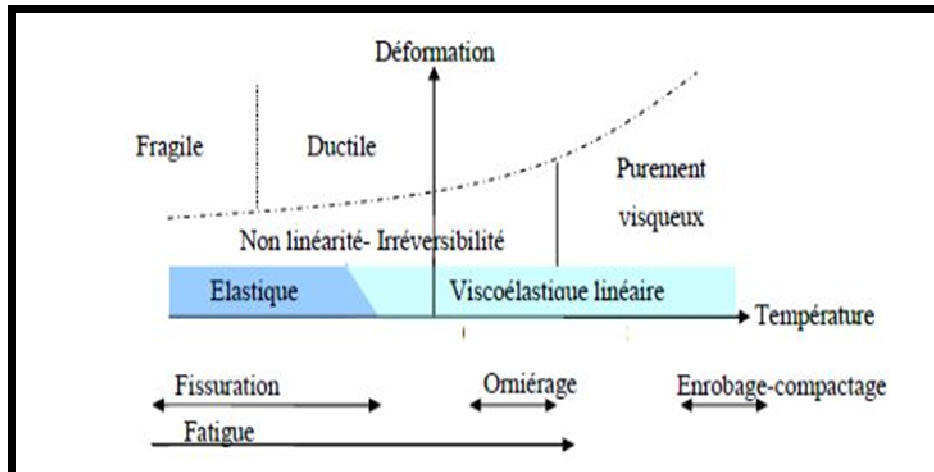


Figure III.5: Classe de comportement du bitume [22]

Ainsi, à basse température, pour des temps de charge très courts, le bitume se comporte comme un fluide élastique, la déformation est proportionnelle à la charge appliquée et le fluide retrouve sa position initiale si la charge est annulée rapidement. A -20°C , le module de cisaillement G tend vers une valeur fixe de 1 GPa indépendamment des conditions de mesure. Il se trouve en fait dans le domaine vitreux des maltènes [23], le liant est alors très fragile. Pour des températures supérieures à 60°C et une contrainte appliquée lentement, le bitume se comporte comme un fluide newtonien de viscosité σ , la déformation est continue. Pour des températures intermédiaires, le bitume a un comportement viscoélastique. La viscoélasticité du bitume peut être mise en évidence en soumettant un échantillon de bitume à une sollicitation périodique et en analysant sa réponse.

- **Propriétés mécaniques et rhéologiques du bitume :**

Le bitume confère à l'enrobé sa flexibilité et sa capacité à résister à certaines dégradations causées par plusieurs facteurs dont le trafic, les conditions climatiques du site, etc. A température de service élevée, le bitume doit demeurer suffisamment visqueux afin d'éviter que ne se produise le phénomène d'orniéage. A l'opposé, à basse température, le bitume doit conserver une certaine élasticité pour éviter le phénomène de fissuration par retrait thermique et la fragilisation de l'enrobé. Aux températures intermédiaires, il doit être résistant à la fatigue sous l'effet du trafic répété. [24]

- **Essais de caractérisation des bitumes :**

➤ **Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF T66 – 004) :**

• **Définition**

La pénétrabilité est exprimée étant la profondeur, en dixième de millimètre, correspondant à la pénétration verticale d'une aiguille de référence dans un échantillon d'essai du matériau, dans des conditions prescrites de température, de charge et de durée d'application de la charge.

• **Principe d'essai**

Mesurer la pénétration d'une aiguille de référence dans l'échantillon d'essai conditionné (bitume). Les conditions opératoires qui s'appliquent aux pénétrations inférieures ou égales (500 x 0,1mm), sont : Température 25 °C, Charge appliquée 100g, Durée d'application de la charge 5s. Pour les pénétrations supérieures à cette limite, la température d'essai doit être de 15 °C, alors que la charge appliquée et sa durée d'application restent inchangées.

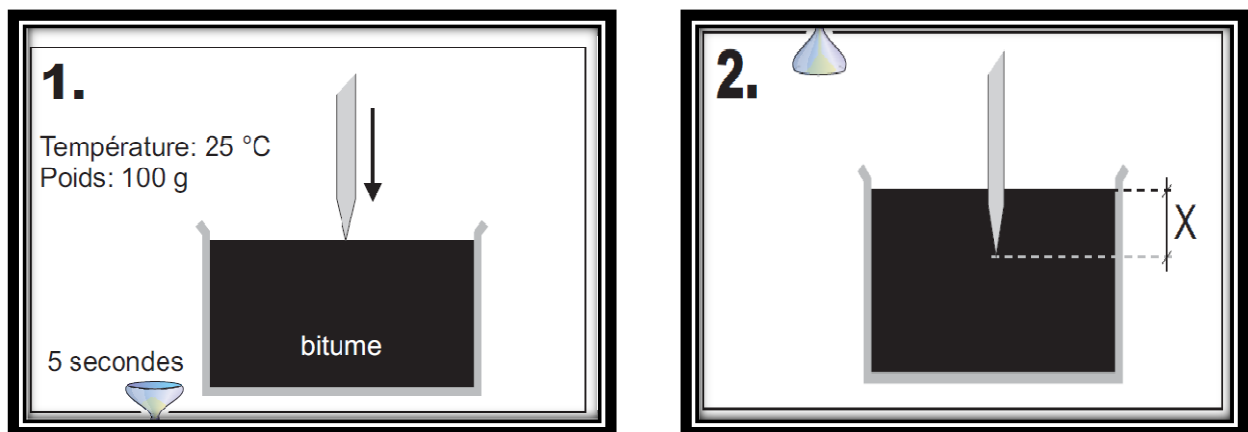


Figure III.6 : Principe de l'essai de pénétrabilité. [25]

➤ **Essai de point de ramollissement bille et anneau (NF T66 – 008) :**

• **Définition**

Température de ramollissement c'est à laquelle le matériau dans les conditions de référence de l'essai atteint une certaine consistance. Donc cet essai concerne à déterminer la température du ramollissement des bitumes et des liants bitumineux, dans la plage des températures de 30 °C à 200 °C.

• **Principe d'essai**

Deux disques horizontaux de bitume, moulés dans des anneaux de laiton à épaulement, sont chauffés dans un bain liquide avec un taux d'élévation de la température contrôlé, alors que chacun soutient une bille d'acier. La température de ramollissement notée doit correspondre à la moyenne des températures auxquelles les deux disques se ramollissent suffisamment pour permettre à chaque bille, enveloppée de liant bitumineux, de descendre d'une hauteur de 25mm.

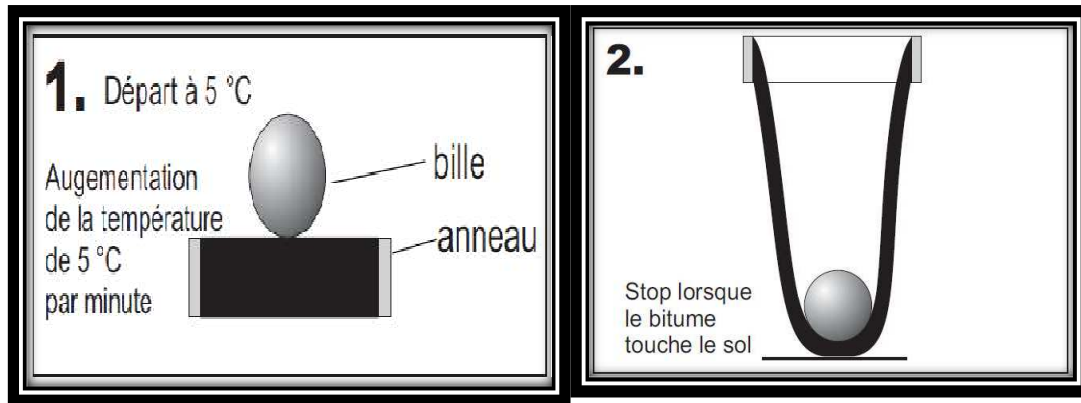


Figure III.7: Principe de ramollissement. [25]

Caractéristiques et spécifications générales des bitumes algériens

Le bitume de distillation, se présente comme un système colloïdal dans lequel les asphaltènes peptisés par les résines constituent les micelles, tandis que les huiles représentent la phase inter micellaire . Ce système peut être considéré comme un sol présentant les caractéristiques des liquides newtoniens. C'est en particulier le cas des bitumes dits "soufflés" ou "oxydés" dans lesquels des phénomènes de déshydrogénation, de polymérisation des asphaltènes et des résines leur donnent quelquefois le comportement des composés thixotropes. Suivant le caractère sol ou gel, les propriétés diffèrent. C'est ainsi que les bitumes sols présentent une excellente résistance aux sollicitations rapides, en contrepartie ils seront plus sensibles que les bitumes gels aux sollicitations lentes ainsi qu'aux variations de température, mais entre ces deux types de comportements extrêmes, il existe toutes les variantes intermédiaires possibles. [26]

III.4.3 Granulat

Les granulats proviennent de carrières où les roches massives sont concassées, ou bien sont d'origine alluvionnaire. [20]

Les granulats sont répartis en différentes classes granulaires normées qui sont définies par le diamètre minimal et le diamètre maximal du granulat.

L'intégration des granulats dans le mélange bitumineux nécessite de connaître différentes caractéristiques :

- Celles qui tiennent à la nature de la roche d'origine (dureté, résistance au polissage, résistance aux chocs).
- Celles qui résultent de la fabrication des granulats (propreté, forme, granularité, angularité, homogénéité).

En outre les essais mécaniques permettent d'établir un classement selon :

- La résistance à la fragmentation par les essais Los Angeles.
- La résistance à l'usure et à l'attrition par l'essai Micro -Deval humide. [20]

III.4.3.1 Types des granulats et leur classification

Les granulats utilisés pour composer un béton sont soit d'origine naturelle, artificielle [20]

- **Granulats Naturels :**

Les granulats naturels d'origine minérale sont issus de roches meubles (alluvions) ou de roches massives, n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique (tels que concassage, broyage, criblage, lavage). Ceux issus des gisements alluvionnaires, dits roulés,

dont la forme a été acquise par érosion. Ce sont surtout des dépôts alluvionnaires trouvés dans un lit de rivière ou en mer éventuellement. [20]

Géologiquement parlant, les granulats naturels sont de nature :

- Éruptives : granites, basaltes porphyres.
- Sédimentaires : calcaires, grès, quartzites.

Métamorphiques : gneiss, amphibolites

• **Granulats Artificiels :**

Les granulats artificiels sont soit des sous-produits de l'industrie sidérurgique, soit fabriqués en vue d'obtenir un produit particulier. Ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique des roches ou des minerais. Les plus employés sont le laitier cristallisé concassé, obtenu par refroidissement lent à l'air ; le laitier granulé de haut fourneau, obtenu par refroidissement rapide dans l'eau et les granulats allégés par expansion ou frittage (l'argile ou le schiste expansés). Les granulats artificiels peuvent être employés pour réaliser des bétons à usage spécifique. [20]

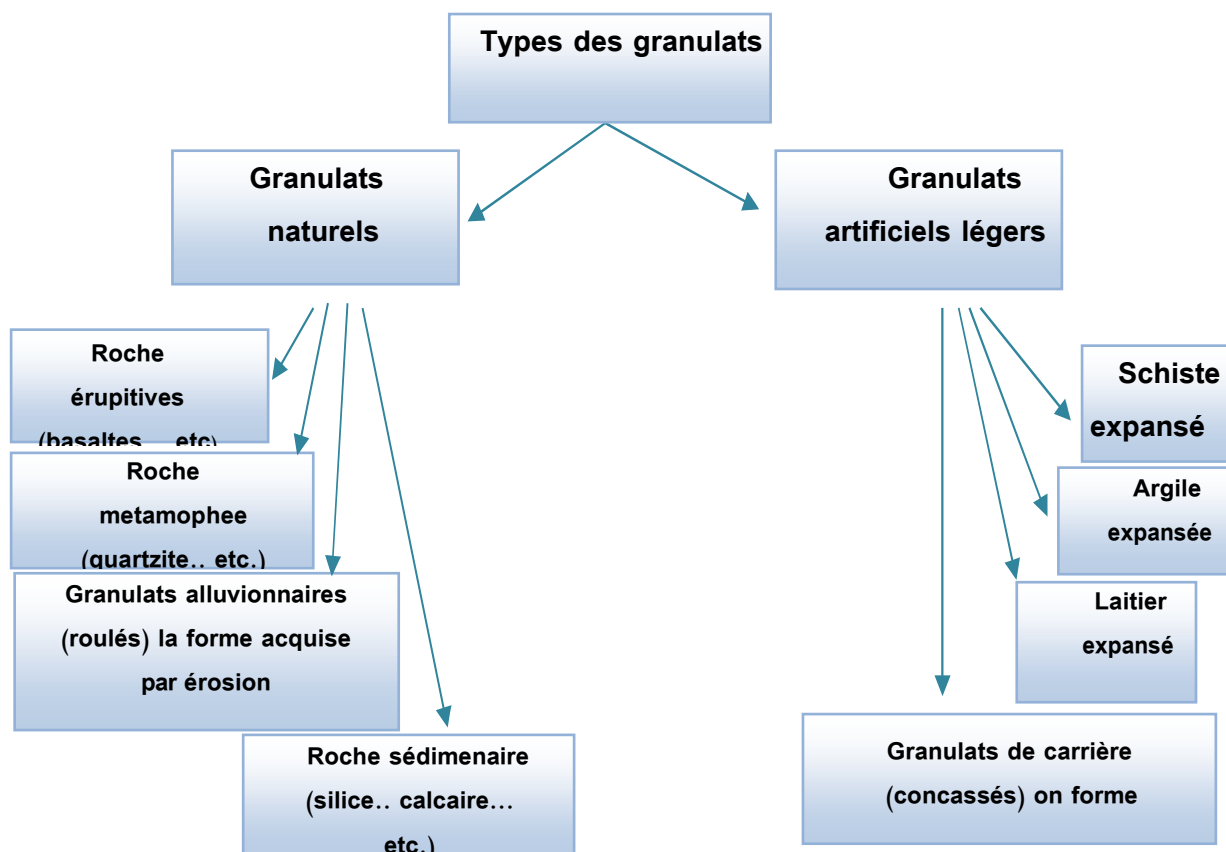


Figure III.8: Les deux familles de granulats [20]

III 4.3.2 Généralités sur les granulats routiers :

D'une manière générale, les granulats destinés à la fabrication des bétons bitumineux peuvent avoir des origines différentes : [27]

- ✓ Carrières de roches massives.
- ✓ Carrières de matériaux alluvionnaires (ballastières).

La fabrication des granulats est assurée par des installations de concassage-criblage dont la taille et la nature des différents composants varient selon l'importance des chantiers et la

nature des matériaux bruts à traiter. [27]

Les équipements standards communs à toutes les installations de concassage-criblage sont :

- ✓ Trémies d'alimentation et trémies tampon.
- ✓ Concasseurs primaires à mâchoires.
- ✓ Des concasseurs giratoires à cône (secondaire ou tertiaire).
- ✓ Des cribles vibrants.
- ✓ Des convoyeurs ou sauterelles.

L'assemblage et le nombre de ces différents équipements est défini par la nature et les caractéristiques des granulats à produire, la nature du matériau brut à traiter. [27]

Les stations de concassage-criblage sont souvent caractérisées par leur capacité de production exprimée en Tonne/heure, toutes catégories confondues. [27]



Photo III.1: Vue d'une installation de concassage-criblage

1. Trémie d'alimentation
2. Concasseur primaire à mâchoires
3. Trémie tampon
4. Convoyeur
5. Crible vibrant
6. Concasseur giratoire à cône

Les installations de production de granulats concassés varient en fonction de la nature de la roche exploitée et du débouché commercial des granulats produits qui couvre une large gamme: 0/3, 3/8, 8/15, 15/25, 25/40 et les tout-venants de concassages 0/25, 0/40, 0/60. [27]

III.4.3.3 Caractéristiques et spécifications des granulats:

Le comportement mécanique et la rhéologie des bétons bitumineux dépendent étroitement des caractéristiques physiques et mécaniques des granulats qui les constituent. On distingue deux types de caractéristiques : [27]

✓ **Caractéristiques intrinsèques** : elles sont liées à la nature minéralogique de la roche ou des matériaux bruts ayant servi à la fabrication des granulats. on citera l'exemple de la dureté.

✓ **Caractéristiques extrinsèques** : elles sont liées au mode de fabrication des granulats (granularité, propreté, forme et angularité).

- **Dureté** :

Elle est caractérisée par deux principaux coefficients : [27]

- ✓ **Coefficient Los Angeles (LA) :**

Il caractérise la résistance aux chocs des granulats . l'essai consiste à faire subir à un échantillon de granulats une série de chocs avec des boulets en acier de nuance Z 30 C13 , de 47 mm de diamètre et d'un poids de 420 à 445 g, et de déterminer la quantité de fines

(éléments <1,6 mm) qui se sont produites au cours de l'essai. Le coefficient Los Angeles est calculé selon la formule suivante :

$$LA = (m/M) \times 100$$

où

m : masse des fines produites au cours de l'essai

M : masse de l'échantillon avant essai (M=5000g)

✓ **Coefficient micro Deval humide (MDE) :**

Il caractérise la résistance à l'usure des granulats. L'essai consiste à faire subir à un échantillon de granulat de masse M= 500 g , un total de 12 000 tours dans un cylindre en acier en présence d'une charge abrasive et de l'eau. La charge abrasive est constituée de 2 à 4 Kg de billes de diamètre 10 mm , en acier inox de nuance Z 30 C13. Après essai, on procède à la détermination de la masse des fines (éléments < 1,6 mm) qui se sont produites au cours de l'essai. Le coefficient MDE est calculé par la formule suivante :

$$MDE = (m/M) \times 100$$

où

m : masse des fines produites au cours de l'essai

M : masse initiale de l'échantillon (M= 500 g)

• **Forme :**

La forme d'un granulat est caractérisée par le coefficient d'aplatissement (CA) qui représente le pourcentage d'éléments tels que $G/E > 1,58$ avec : [27]

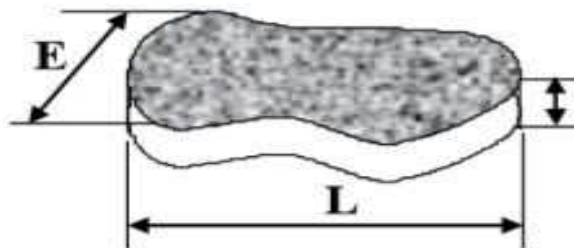


Figure III.9 : forme de granulat

G : grosseur du granulat

E: épaisseur du granulat

En pratique, l'essai consiste à fractionner un échantillon du matériau à tester au moyen d'une série de tamis et de passer le retenu de chaque tamis dans une grille à fentes parallèles. On détermine ensuite la masse des passants par chaque grille. Le coefficient d'aplatissement est alors calculé par la formule :

$$CA = \sum mi / M$$

où

mi : masse des passant à la grille i

M : masse de l'échantillon soumis à l'essai

- **Propreté :**

Elle est appréciée par les essais d'équivalent de sable : [27]

- ✓ **L'essai d'équivalent de sable :**

Consiste à faire flocculer les particules fines contenues dans un échantillon de sable au moyen d'une solution lavante et de mesurer, après un temps de repos, la hauteur du sable sédimenté (h) et la hauteur totale sédimentée du sable et du flocculat (h') . L'équivalent de sable est donné par la formule :

$$ES = (h / h') \times 100$$

- **Granularité :**

Il s'agit de définir la classe granulaire du granulat en procédant à l'essai d'analyse granulométrique par tamisage. L'essai consiste à fractionner le matériau à tester au moyen d'une série de tamis et de déterminer par suite les pourcentages cumulés des passants à chaque tamis. [27]

Un granulat est dit de classe granulaire d/D lorsqu'il satisfait aux conditions suivantes:

- ✓ Le refus au tamis d'ouverture D est inférieur à x %
- ✓ Le tamisât au tamis d'ouverture d est inférieur à x %
- ✓ Le tamisât au tamis d'ouverture d/2 est inférieur à y %

Avec :

$$x = 10 \text{ si } D/d \geq 2 \text{ et } x = 15 \text{ si } D/d < 2$$

$$y = 3 \%$$

Pour les sables 0/D, la dénomination d'une telle classe est valable si le refus au tamis d'ouverture D est inférieur à 10 %

- **Angularité :**

Elle définit le pourcentage d'éléments concassés contenus dans un matériau donné. Elle est caractérisée par l'indice de concassage ou le rapport de concassage . [27]

L'indice concassage (IC) d'un matériau d/D est égale au pourcentage de passants au tamis d'ouverture D contenus dans la matériau brut utilisé pour sa fabrication.

Le rapport de concassage (RC) d'un matériau d1/D1, fabriqué à partir d'un matériau d2/D2 est égal au rapport d2/D1 un matériau est dit concassé pur lorsque son rapport de concassage est supérieur à 4. [27]

III.5 Composants minéraux

Les composants minéraux constituent environ 95% de la masse d'un enrobé bitumineux (80-85% du volume). Cette prépondérance des matériaux granulaires dans le mélange a une influence sur les caractéristiques mécaniques et sur les performances du matériau bitumineux. [19]

Les granulats sont l'ensemble des sables, gravillons ou pierres concassées qui proviennent du creusement d'un gisement ou d'une extraction à partir d'une roche mère compacte. Les granulats sont utilisés soit comme matériaux en vrac, soit après transformations (criblage, concassage, tamisage, dépoussiérage, lavage...). Les granulats sont désignés par d et D, qui représentent respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions demandées. [17]

III.6 Formulation du béton bitumineux

Formuler un enrobé hydrocarboné est déterminer le meilleur mélange de granulats de diverses dimensions et d'un liant (le bitume) permettant d'atteindre des performances visées: imperméabilité, rugosité, résistance mécanique (à l'orniérage et la fatigue). Donc l'objectif de formulation est de déterminer un mélange de différentes classes granulaires qui constitue un squelette granulaire ayant un pourcentage de vides ni trop faible ni trop élevé. Un faible pourcentage de vide empêche l'introduction d'une quantité du liant suffisante pour enrober l'ensemble des grains sans saturer le mélange, et un pourcentage de vides élevé favorise le développement des déformations permanentes par post-compactage. [19]

Une étude de formulation d'un enrobé bitumineux comporte deux phases principales, à savoir la composition granulométrique et le dosage en liant optimale à l'aide des résultats de l'essai Marshall. [17]

III.7 Paramètres influençant le choix d'une formulation

Les principaux caractères consistent à choisir les granulats, le liant et les ajouts utilisés pour la fabrication de l'enrobé. Ceci sur la base des considérations suivantes: [28]

- Trafic ; volume, pourcentage de poids lourds, charge par essieu.
- climat : pluviométrie, gel-dégel, température, ensoleillement.
- position de la couche : roulement, base, fondation liée.
- fonction de la couche : adhérence, perméabilité, bruit, orniérage, etc...

Méthodologie de formulation en Algérie :

La formulation en Algérie est basée sur la vérification des caractéristiques des composants ainsi que sur les essais Duriez et Marshall en fonction des matériaux granulaires. On choisit une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait donner une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné. Les fractions granulaires sont choisies parmi les suivantes : 0/3, 3/8, 8/15, les caractéristiques des granulats sont représentés comme suit : [17]

- Fuseau granulométrique :

Tableau III.1 : Fractions granulaires 0/14 des BB

Passant Tamis (mm)	BB 0/14
20	/
14	94-100
10	72-84
6.3	50-66
4	40-54
2	28-40
0.08	7-10

Avec :

- **G** : pourcentage en poids des éléments de dimensions supérieur à 6,3 mm.
- **S** : pourcentage en poids des éléments de dimensions comprises entre 6,3 et 0,315 mm.
- **s** : pourcentage en poids des éléments de dimensions comprises entre 0,315 mm et 0,08 mm.
- **f** : pourcentage en poids des éléments de dimensions inférieurs à 0,08 mm.

III.8 La compacité

La compacité "**C**" est une conséquence directe de la formulation : [19]

$$C = 100 - \% \text{ vides}$$

Pour ce calcul, il faut connaître la densité apparente de l'éprouvette, la densité du bitume, la densité de chacun des agrégats, les pourcentages en poids de chacun des constituants rapportés à 100 (liant et filler compris).

Soit :

- γ_{app} : la densité apparente de l'éprouvette.
- γ_b : la densité du bitume.
- γ_{G1} : la densité de l'agrégat 1.
- $\gamma_{G2}, \gamma_{G3}, \dots$ celles des agrégats 2, 3...etc.
- P_b : le pourcentage en poids du bitume.
- $P_{G1}, P_{G2}, P_{G3} \dots$ ceux des agrégats.

Donc la densité réelle γ_{rel} du matériau enrobé est:

$$\gamma_{rel} = \frac{100}{(P_b/\gamma_b) + (P_{G1}/\gamma_{G1}) + (P_{G2}/\gamma_{G2}) + \dots}$$

Le pourcentage volumétrique des vides V_v de l'éprouvette est:

$$V_v = \frac{100(\gamma_{rel} - \gamma_{app})}{\gamma_{rel}}$$

La compacité **C** : $C = 100 - V_v$

III.9 Les propriétés mécaniques des bétons bitumineux :

Pour connaître les propriétés mécaniques d'un enrobé bitumineux, on fait un essai ou le plus souvent une série d'essais normalisés. [17]

III.9.1 Essai Marshall (NF P98-251-2)

L'essai Marshall est un essai destructif, effectué en laboratoire selon un mode opératoire bien précis. L'essai permet de déterminer pour une température et une énergie de compactage données le "pourcentage de vides", la "stabilité" et le "fluage" dits Marshall d'un mélange hydrocarboné à chaud.

- **Domaine d'application :**

L'essai s'applique aux mélanges hydrocarbonés à chaud fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier (grave bitume, béton bitumineux, et autres mélanges hydrocarbonés à chaud).

- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à compacter des éprouvettes d'enrobés par damage dans un moule cylindrique de 101,6 mm de diamètre à l'aide de chocs (cinquante coups par face) produits par la chute d'une dame de poids normalisé tombant d'une hauteur bien définie selon un procédé opératoire déterminé, puis à les soumettre à un essai de compression suivant une génératrice dans des conditions bien définies. Sur les éprouvettes ainsi confectionnées, on détermine entre autre :

- La stabilité Marshall: C'est la résistance à l'écrasement de l'éprouvette à la température de 60°C.
- Le fluage Marshall: C'est l'affaissement de la même éprouvette au moment de la rupture.



Figure III.10 : Machine d'essai Marshall [30]

III.9.2 Essai Duriez (NF P98-251-1)

- **Domaine d'application :**

L'essai Duriez est appliqué essentiellement aux matériaux denses ou demi-denses enrobés avec du bitume, dont les agrégats passent en totalité au tamis de 20 mm (maille carrée).

- **Principe de l'essai :**

Cet essai consiste à déterminer la résistance à la compression d'une éprouvette d'enrobé de poids et de section déterminés. Il permet également de définir la tenue en eau dans l'enrobé à partir du rapport des résistances à la compression après et avant immersion de l'éprouvette dans un bain d'eau thermostatique.

L'essai Duriez diffère de l'essai Marshall par deux caractéristiques importantes :

- Température de l'essai, qui est de 18°C au lieu de 60°C dans l'essai Marshall.
- Mode d'application de la contrainte, qui est diamétrale dans l'essai Marshall, elle est axiale dans l'essai Duriez.



Figure III.11: Machine d'essai Duriez [29]

III.10 Conclusion

Comme nous avons vu précédemment, le béton bitumineux est constitué de deux éléments principaux, les granulats et le bitume. La liaison entre ces deux composants est très complexe et pour formuler un enrobé convenable plusieurs critères sont à prendre en considération telle que le trafic, les conditions climatiques et les matériaux existants...etc. Le mélange bitume-agrégat obtenu doit avoir:

1. Suffisamment de bitume pour donner un pavage durable.
2. Une stabilité suffisante pour satisfaire les exigences de trafic.
3. Suffisamment de vides pour pallier aux phénomènes d'expansion liés aux propriétés spécifiques du bitume (dilatation thermique).
4. Une maniabilité suffisante pour permettre une mise en place efficace du mélange.

Par ailleurs les essais de caractérisation et de contrôle des bétons bitumineux nécessitent du matériel spécifique et une technicité propre, surtout dans les régions où les conditions d'exploitation sont particulièrement sévères (à l'exemple des régions sahariennes : trafic intense des poids lourds et température élevée).

Chapitre IV

*Etude expérimentale des
propriétés du sable
mines*

IV.1 Introduction

Ce chapitre est pour étudier les différents essais appliqués sur le sable mine et utiliser dans la valorisation.

Aussi pour objet de connaître les propriétés physiques, chimiques et mécaniques de chaque type de sable.

. Les essais de laboratoire

On dispose d'un nombre considérable d'essais de laboratoire et on en invente tous les jours, pour voir clair dans ce maquis.

. Les essais d'identification

Sont les essais d'identification minéralogiques, physico-chimiques et mécaniques.

Chacun d'entre eux concerne un aspect particulier du matériau qu'il importe ou non de connaître selon le matériau et le genre d'étude que l'on réalise. Ils sont spécifiques, indépendants de toutes considérations théoriques et en principe aussi de l'appareil de mesure.

La plupart d'entre eux peuvent être réalisés sur des échantillons remaniés.

IV.2 Echantillonnage

La préparation d'un échantillon pour essai pour la norme [XP P 18-553] On appelle :

- Échantillon global : la réunion des différents prélèvements,
- Échantillon pour laboratoire : la masse de matériau nécessaire pour effectuer dans de bonnes conditions le ou les essais. Il est indispensable que cette quantité soit au moins deux fois plus grande que la masse nécessaire pour le ou les essais,
- Échantillon pour essai ou prise d'essai : la masse de matériau soumise à l'essai.

Tous les résultats des essais dépendent du soin apporté à la réalisation de cette opération de préparation [32]

IV.2.1 But et Principe de l'échantillonnage

Les essais effectués en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites de matériaux, celles-ci devant permettre de mesurer des paramètres caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on a fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble. Ce problème est complexe à résoudre mais il conditionne en grande partie la fiabilité des résultats obtenus au cours des essais de laboratoire. [32]

Le prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :

- Prélèvement sur le chantier, la carrière ou l'usine d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui sera utilisée pour l'essai proprement dit.
- Au laboratoire, prélèvement de la quantité nécessaire à l'essai et qui soit également représentative de l'échantillon de départ. [32]

IV.2.2 Appareillage

➤ Appareillage d'usage courant

- Plateau en tôle pouvant entrer sous le plus grand des diviseurs.
- Balance dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1 %.
- Pelles et truelles.

➤ **Appareillage spécifique**

Des diviseurs à couloirs (figure IV.1), avec bacs et pelles adéquats ou un diviseur à ouvertures réglables.



Figure IV.1: Echantillonneur

IV.2.3 Exécution de l'essai

➤ **Séparation par quartage**

- Brasser le matériau.
- Constituer un tas homogène, étalé sur une surface lisse.
- Séparer le tas étalé en quatre parties à peu près égales, suivant deux axes perpendiculaires et prélever deux parties opposées.
- Mettre en tas étalé ces deux parties opposées et refaire l'opération si cette quantité est trop importante pour l'essai que l'on veut effectuer. [32]

➤ **Séparation au moyen de diviseurs**

- Verser le matériau à l'aide de la pelle dans le diviseur (figure IV.1). Veiller à ce qu'il soit uniformément réparti sur toute la surface de la pelle correspondant à l'appareil utilisé.
- La largeur des couloirs doit être supérieure ou égale à $2D$, D exprimé en millimètres est la plus grande dimension spécifiée.
- S'assurer que le nombre de couloirs est pair (en obstruant au besoin l'un des couloirs extrêmes), supérieur ou égal à 14 et que leur largeur est identique.
- Si la quantité obtenue dans chaque bac est trop importante pour l'essai envisagé, recommencer l'opération avec le matériau d'un des deux bacs.

IV.2.4 Prélèvement sur le tas (sables et graviers)

Lorsque un matériau granulaire est mis en stock, les gros éléments ont tendance à rouler en bas du tas tandis que le haut est plus riche en éléments de faibles diamètres, On prélèvera donc les matériaux en haut, en bas, au milieu et à l'intérieur du tas de granulats, afin d'avoir un échantillon aussi représentatif que possible de l'ensemble. Ces diverses fractions seront

mélangées avec soin.

Dans le cas des matériaux de carrière, il faudra également prendre en compte l'hétérogénéité des différents bancs rocheux exploités. [32]

IV.2.5 Échantillonnage en laboratoire

Le passage de l'échantillon total prélevé sur le tas à l'échantillon réduit, nécessaire à l'essai, peut se faire par quartage ou à l'aide d'un échantillonneur.

L'échantillon doit être séché à l'étuve à 105°C s'il est exempt de minéraux argileux, ce qui est rare, ou à 60°C dans le cas contraire [32].

IV.3 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 (voir la figure IV.2). [32]

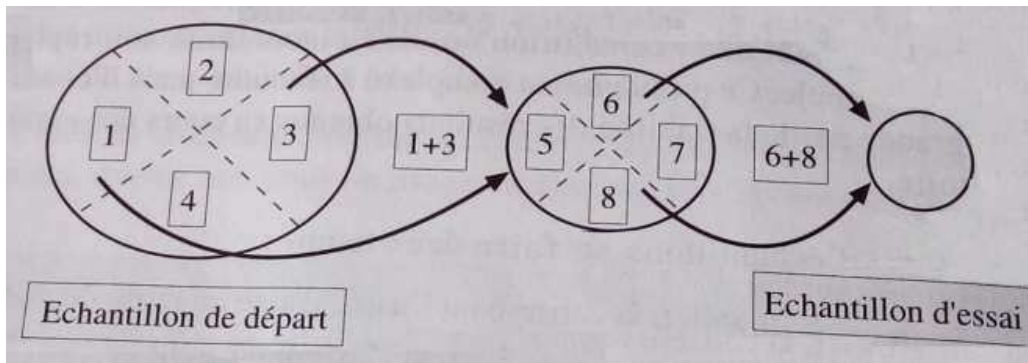


Figure IV.2 : Opération de quartage

- Échantillonneur

Cet appareil de laboratoire 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, après trois ou quatre opérations identiques, la quantité de matériaux représentative et nécessaire à l'essai envisagé.

Le procédé peut être résumé par la figure IV.3 ci-dessous. Celle-ci permet de sélectionner une masse m à partir d'un prélèvement de masse $3m$. [32]

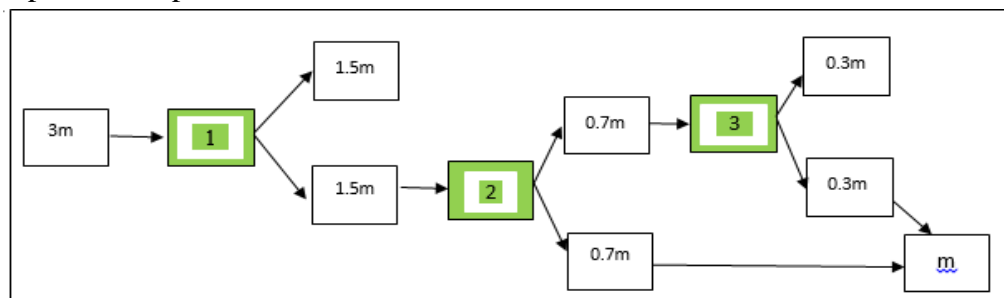


Figure IV.3: Schéma d'une opération de quartage

IV.4 Propriétés physique

IV.4.1 Analyse granulométrique par tamisage

La granularité se mesure par tamisage par voie sèche après lavage pour les sols dont les éléments sont supérieurs à $80\mu\text{m}$ pour la norme actuelle (NF P 94-056) et $63\mu\text{m}$ pour la nouvelle norme (P94-512-4) et par sédimentation pour les éléments inférieurs ou égaux $80\mu\text{m}$ (NF P 94-057). L'analyse granulométrique du sol jusqu'au diamètre de $80\mu\text{m}$ (P18-560) ou $63\mu\text{m}$ (P94-512-4) se fait en utilisant une série de tamis. [32]

- But d'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 6,3 mm, à l'exclusion des fillers. A noter qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. [32]

- Principe

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisats sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

- Appareillage

- Bacs
- Tamis
- Balance
- Étuve ventilée réglée à $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$
- Machines de Tamiseuse électrique
- Dimension de tamis utilisés
- On utilisera général les tamis de modules 0,08 ; 0,2 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 5 ;
- 6,3 (mm) (voir la figure IV.4)

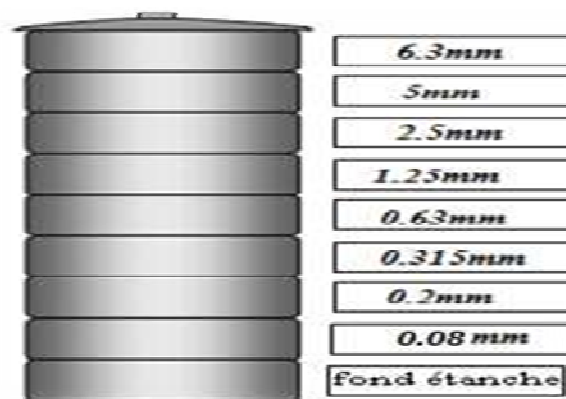


Figure IV.4 : l'organisation de la colonne des tamis

- Mode opératoire

Après peser la masse de l'échantillon qui est $M=3000g$.nous apportons les tamis et en les classant de haut en bas dans l'ordre de mailles décroissantes. nous versons le sable dans la colonne de tamis, et en la fermant .Nous agitons mécaniquement cette colonne par l'appareil de tamisage, puis reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture en adaptant un fond et un couvercle et nous pesons chaque tamis.



Photo IV.1 : les échantillons



Photo IV.2 : La pesée d'échantillon

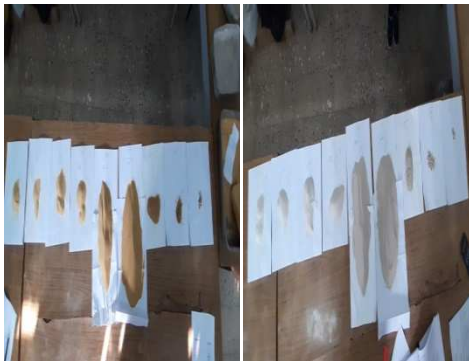


Photo IV.3 : la mise de chaque échantillon



Photo IV.4 : l'agitation et l'organisation pour peser

- les résultats

SABLE BLANC

On détermine en particulier :

- La dimension des plus gros éléments d_{max}
- Le pourcentage de tamisât à 2mm, à 80 μ m
- Le facteur d'uniformité est défini par $C_u = d_{60} / d_{10}$
- Le facteur de courbure par : $C_c = (d_{30})^2 / d_{60} * d_{10}$

Tableau IV.1 : caractéristiques de la courbe granulométrique de sable blanc

Ouverture de tamis	Tamisât (%)
4	99,884
3,15	99,382
2,5	96,948
2	52,182
1,25	13,248
0,63	9,266
0,315	4,388
0,16	1,993
0,08	0,153

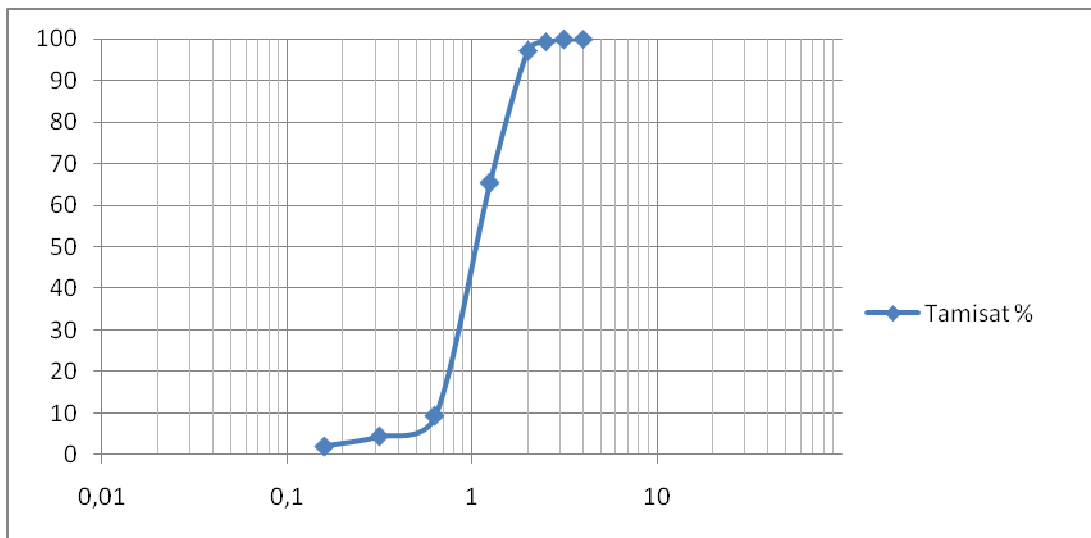


Figure IV.5 : Courbe granulométrique du sable blanc

Tableau IV.2 : les facteurs du courbe granulométrique

<i>d</i> 10	0,24 mm
<i>d</i> 30	0,49 mm
<i>d</i> 60	0,7 mm
<i>Cu</i>	2,91
<i>Cc</i>	1,42

Tableau IV.3 : La classification des sols grenus

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

Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % → on utilise un double symbole.

Cc est entre 1 et 3

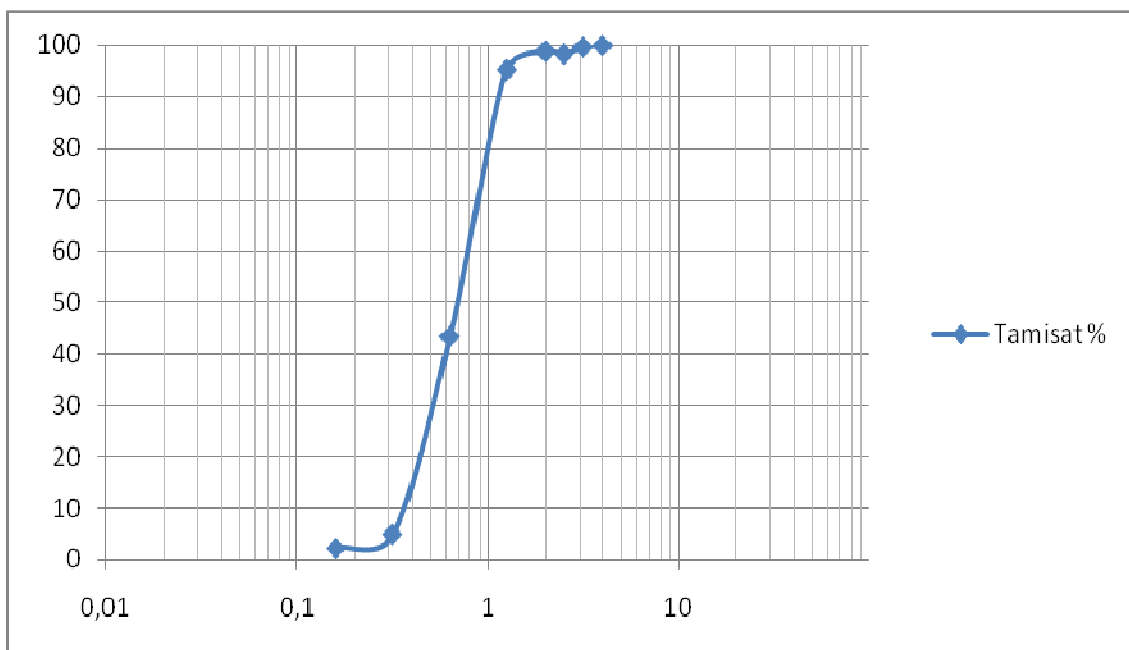
Notre échantillon est UN: sable propre mal graduée.

SABLE JAUNE**Tableau IV.4 :** caractéristiques de la courbe granulométrique de sable jaune

Ouverture de tamis	Tamisât (%)
4	99.87
3,15	99.72
2,5	98.75
2	95.11
1,25	36.11
0,63	7.41
0,315	4.91
0,16	2,318
0,08	1.44

C_c est Entre 1 et 3

Notre échantillon est un: sable propre mal graduée

**Figure IV.6 :** Courbe granulométrique du sable jaune**IV.4.2 Calcul le module de finesse**

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié calcul du module de finesse. Celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis d'ouverture (exprimée en mm) 0.08, 0.20, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5 et 6.3. Ce paramètre est en particulier utilisé dans les calculs.

$$Mf = 1/100 \sum \text{refus des tamis } 0.08, 0.20, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5 \text{ et } 6.3\text{mm}$$

$$Mf (\text{SABLE BLANC}) = 3.02$$

$$Mf (\text{SABLE JAUNE}) = 3.2$$

- interprétation de résultat

Selon le tableau IV.3, le sable a des différentes classifications. Pour savoir quelle classification est notre sable, Nous trouvons que le sable est un sable propre mal gradué.

Après calculer le module de finesse, nous trouvons qu'il égale 3.2 pour le sable jaune et 3.02 pour le sable blanc. Alors ce sable est moyenne a grossier.

IV.4.3 les masses volumiques des particules

La détermination de la masse volumique des particules γ_s (NF p 94-054) s'effectue dans un appareil appelé pycnomètre. Une masse connue de sol séché à l'étuve m_s est introduite dans un petit ballon appelé pycnomètre contenant de l'eau distillée. On mesure le volume d'eau déplacé par les grains v_s après avoir supprimé toutes les bulles d'air.[31]

- But d'essai

La présente norme a pour objet la détermination, au pycnomètre à eau, de la masse volumique des particules solides de sol.

Cette norme définit les termes employés et les paramètres mesurés, spécifie les caractéristiques de l'appareillage, fixe le mode opératoire et précise les résultats à présenter.

- Principe de l'essai

La masse des particules solides est obtenue par pesage. Le volume est mesuré au pycnomètre.

- Appareillage

- Une balance
- Un tamis à maille carrée de 5 mm d'ouverture
- Des pycnomètres de volume minimal 50 cm³ munis de bouchons rodés à tube capillaire
- L'entonnoir

- Mode opératoire

Le pycnomètre et son bouchon sont pesés (M_0) après s'être assuré qu'ils étaient propres et secs Ensuite, après le tamisage du 200g du sable sur un tamis du 5mm, nous l'apportons et nous le coulons dans un pycnomètre. Puis, nous le pesons (M_1) avec son contenu .

Par la suite, nous ajoutons un peu d'eau distillée ou déminéralisée au sable et nous le secouons bien jusqu'à la solution devient homogène. Après l'homogénéité de la solution, nous le remplissons par l'eau distillée jusqu'à la ligne maximale du pycnomètre et nous le pesons (M_2) . En outre, le pycnomètre et son bouchon sont pesés (M_3) après s'être assuré qu'ils étaient remplis par l'eau distillée ou déminéralisée (voir photo IV.5).

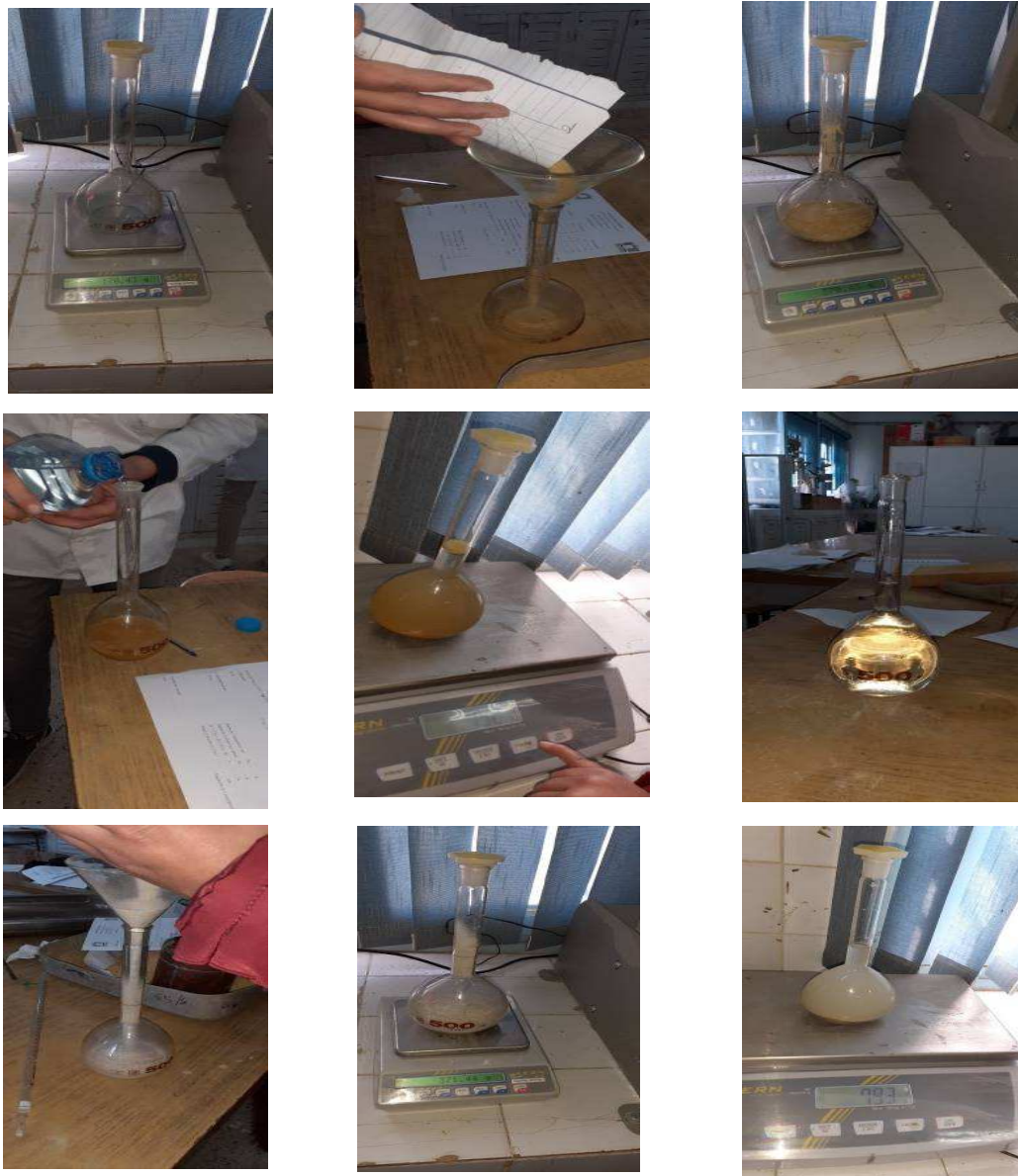


Photo IV.5 : L'opération D' Essai de la masse volumique avec pycnomètre

- **Les résultats**

Masse spécifique (par le pycnomètre):

Sol (sable jaune)

- Masse de pycnomètre M_0
- Masse de pycnomètre et de l'échantillon M_1
- Masse de pycnomètre et de l'échantillon et d'eau M_2
- Masse de pycnomètre et d'eau M_3

S.J

$$p = [(m_1 - m_2) \cdot \gamma_{app}] / (M_3 + M_1 - M_0 - M_2)$$

$$p = (370,45 - 170,45) \cdot 1 / (671 + 370,45 - 170,43 - 790)$$

$$p = 200,02 / 80,02$$

$$p = 2,499 \text{ g /cm}^3$$

$$p = 24,99 \text{ KN /m}^3$$

$$p = 2499 \text{ kg/cm}^3$$

S.B

$$p = (371,44 - 170,43) / (670 + 371,44 - 170,43 - 793)$$

$$p = 201,01/78.01$$

$$P = 2,576 \text{ g / cm}^3 = 25,76 \text{ kn / m}^3$$

$$P = 2576 \text{ kg / cm}^3$$

- Interprétation des résultats

Après calculer le poids spécifique γ_s , nous avons obtenu que $\gamma_s = 2670 \text{ kg/m}^3$. Selon la mesure du Poids spécifique γ_s dans le tableau I.5, il était limité parmi 2600 et 2700. Alors le type de sol est sols minéraux.

Tableau IV.5 : L'évaluation du type de sol et constituants par Poids spécifique γ_s

Quelques sols et constituants	Poids spécifique γ_s (kg.m^3)
Sols minéraux	$2600 < \gamma_s < 2700$
Matière organique	$1200 < \gamma_s < 1500$
Sols organiques (MO>30%)	$1400 < \gamma_s < 2000$
Eau (4°C)	$\gamma_s \approx 1000$
Air	$1 < \gamma_s < 1,5$

IV.4.4 Équivalent de sable

Si le sol grenu est pollué par des particules d'argile ou de limon, on peut déterminer la proportion relative de sil fin et de sol grenu par l'essai d'équivalent de sable. Cet essai est plutôt un essai de géotechnique routière, qui est de moins en moins employé (XP P 18-598).

- But d'essai

L'essai d'équivalent de sable, permettant de mesurer la propreté d'un sable, est effectué sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 5 mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui floclent.

-Principe de l'essai

La valeur de l'équivalent de sable (ES) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du flocculat et de la partie sableuse sédimentée.

-Appareillage

- Éprouvette en plexiglas avec deux traits supérieurs et inférieur.
- Entonnoir pour l'introduction du sable.
- Bonbonne de 5l pour la solution lavant avec son bouchon et siphon et tube souple de 1.5m.
- Tube laveur métallique plongeant.
- Un tamis.
- Machine agitatrice.
- Règle métallique pour mesure.
- Piston taré a masse coulissante de 1kg pour la mesure de ES.

- Mode opératoire

Nous versons une masse sèche de $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de sable soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement, et nous l'ajoutons la même quantité d'eau distillée. Nous frappons fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon. Après, nous la laissons

reposer dix minutes.

À la fin de cette période de dix minutes, nous fermons l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis nous la fixons sur la machine d'agitation. Nous procédons à l'éprouvette 90 cycles ± 1 cycle en 30 s ± 1 s. En la remettant en position verticale sur la table d'essais et nous enlevons le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavant.

En descendant le tube laveur dans l'éprouvette rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette. En outre, nous remontons les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale en procédant de la manière suivante : l'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur, nous relevons le tube laveur, de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à hauteur du trait repère. En arrêtant l'écoulement dès la sortie du tube laveur, et nous laissons reposer pendant 20 min ± 10 s (voir photo IV.6).

Au bout de ces 20 min, nous mesurons à l'aide du réglel la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette (voir photo IV.7). Nous allons descendre à doucement le piston taré dans l'éprouvette (voir photo IV.8), jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appui sur l'éprouvette.

Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, nous bloquons le manchon coulissant sur sa tige. En introduisant le réglel dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston. Enfin, nous lisons la hauteur du sédiment h_2 au niveau de la face supérieure du manchon (voir photo IV.9).



Photo IV.6 : la repose de l'éprouvette



photo IV.7 : La lecture de la hauteur h_1

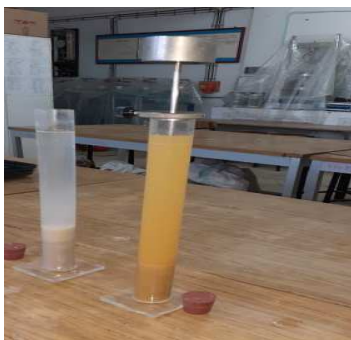


Photo IV.8 : La descente du piston

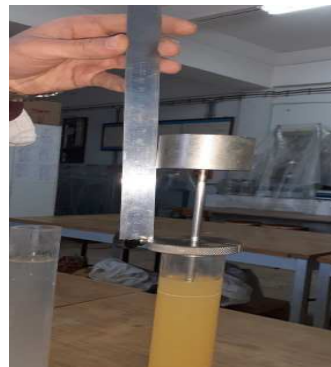


Photo IV.9 : La lecture de la hauteur h_2 dans l'éprouvette

- **Les résultats**

ES est calculée à partir de l'équation :

$$ES = 100. h2 / h1$$

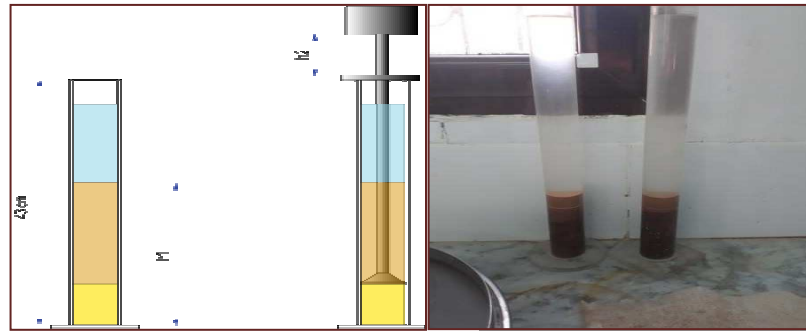


Photo IV.10 : Principe d'essai d'équivalent de sable

Type de sable	Sable 0/3 (SB)	Sable 0/3 (SJ)	Spécifications
ES%	91	70	≥60

Tableau IV.6 : Equivalent de sable des deux types

- **Interprétation des résultats**

Les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons Bitumineux sont les suivantes :

Tableau IV.7: La nature et qualité du sable en fonction du ES.

ES	Nature et qualité du sable
ES < 60	Sable argileux - Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
60 ≤ ES < 70	Sable légèrement argileux - de propreté admissible pour béton de qualité quand on 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.
ES > 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.

L'équivalent de sable de l'échantillon utilisé dans cet essai est 70% pour le sable jaune. Selon le tableau II.6, il était limité parmi 70 ≤ ES < 80 Donc la nature et qualité du sable est Sable propre - à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.

Et ES 91% pour le sable blanc. Selon le **tableau IV.7**, il était limité parmi ES > 80 Donc la

nature et qualité du sable est Sable très propre - l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton bitumineux qu'il faudra rattraper par une augmentation des fines.

IV.4.5 Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux

La valeur au bleu de méthylène VBS (NF P 94-068) représente la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée sur les surfaces externes et internes des particules de sol. Etant donné que dans un sol c'est avant tout la surface spécifique des particules argileuses qui détermine la surface spécifique totale, on considère que la VBS exprime globalement la quantité et l'activité de l'argile contenue dans ce sol. [17]

- But d'essai

L'essai au bleu de méthylène permet d'évaluer la surface spécifique d'échange (ou surface active suivant la fraction de sol utilisée pour l'essai)

D'un matériau argileux.

L'essai a donc pour objet de mesurer la capacité d'adsorption du bleu de méthylène c'est-à-dire la quantité de ce colorant nécessaire pour recouvrir d'une couche mono-élémentaire les surfaces externes et internes de toutes les particules argileuses présentes dans 50g de sol.

- Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau rocheux.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire, on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tâche.

L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tâche.

- Appareillage

- Papier-filtre.
- Tige de verre.
- Burette.
- Agitateur à ailettes capable de vitesses de rotation contrôlées variables pouvant atteindre 600 tr/min avec 3 ou 4 ailettes de 75 mm de diamètre.
- Balance technique.
- Tamis, avec des ouvertures de 2 mm
- Bécher d'une capacité d'environ 1 l à 2 l.
- Fiole d'une capacité de 1 l.
- Etuve ventilée.
- Spatule.

- Mode opératoire

Après le tamisage du 50g du sable sur le tamis 0.08 mm, nous l'ajoutons 500ml d'eau et en le agitant bien dans l'agitateur (**Photo IV.11**), puis en le pesant. Ensuite, nous versons la solution dans un bécher et on le mettait sur "l'agitateur". Par la suite, nous mettons la solution de bleu de méthylène dans la burette (**Photo IV.12**). Cette solution a été préparée par le mélange de 500 ml d'eau distillée avec 50 g de poudre du bleu de méthylène. À l'aide du

dispositif de dosage, introduire dans la suspension 5 cm³ de solution de bleu, au bout de 1 min ± 10 s, nous procédons à l'essai de la tache sur papier filtre. Nous posons le papier filtre sur un support adapté non absorbant. Nous prélevons à l'aide de la baguette de verre une goutte de suspension et la déposons sur le papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau coloré bleu sombre entouré d'une zone humide incolore. Par la suite, nous procédons à des injections successives par pas de 5 cm³ de solution de bleu jusqu'à ce qu'apparaisse une auréole périphérique bleu clair, de largeur millimétrique, dans la zone humide de la tâche. L'essai est dit alors positif (**Photo IV.13**).

Chaque addition est suivie des taches effectuées de minute en minute. Ces opérations sont renouvelées jusqu'à ce que l'essai reste positif pour cinq taches consécutives. Le dosage est alors terminé et l'on détermine le volume total (V) de la solution de bleu qui a été nécessaire pour atteindre l'adsorption totale.

NB : Pendant toute la durée du dosage, l'agitation permanente (vitesse 400 tr/min ± 100 tr/min) doit être telle que toutes les particules de sol en suspension soient mises en mouvement.



Photo IV.11 : La solution de bleu méthylène



photo IV.12: L'agitation du sable avec l'eau distillée



Photo IV.13 : La mise de bleu de méthylène

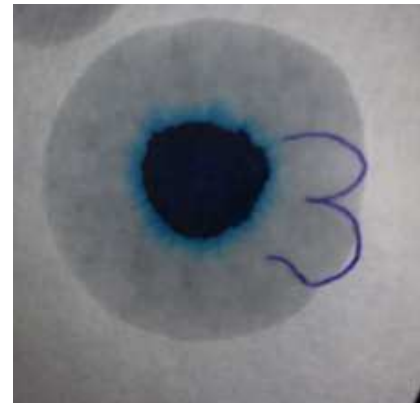


photo IV.14 :L'essai positif dans la burette

- Les résultats

Les calculs à exécuter sont :

- teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai (0/5 mm) ;

$$w = \frac{m_{h2} - m_{s2}}{m_{s2}}$$

- masse sèche de la prise d'essai ;

$$m_0 = \frac{m_{h1}}{1 + w}$$

- masse de bleu introduite (solution à 10 g/l) ;

$$B = V * 0.01$$

- Pour les matériaux dont le Dmax est inférieur à 5 mm, l'expression du résultat est:

$$VBS = \frac{B}{m_0} * 100$$

VBS : est la valeur de bleu de méthylène d'un sol. Elle s'exprime en grammes de bleu pour 100 g de la fraction 0/50 mm du sol étudié.

m_{h1} : est la masse humide de l'échantillon constituant la première prise d'essai (exprimée en grammes).

m_{h2} : est la masse humide de l'échantillon prévu pour être séché, constituant la deuxième prise d'essai (exprimée en grammes).

m_{s2} : est la masse de l'échantillon après séchage, correspondant à la deuxième prise d'essai (exprimée en grammes).

B : est la masse de bleu introduite dans la solution (solution à 10 g/l).

V : est le volume de la solution de bleu utilisée (exprimé en centimètres cubes).

W : est la teneur en eau, exprimée en valeur décimale.

Les calculs à exécuter sont :

$$m_{h1} = 525g$$

$$m_{h2} = 535g$$

$$m_{s2} = 50g$$

$$V = 15cm^3$$

- teneur en eau de l'échantillon soumis à l'essai (0/5 mm) ;

$$w = \frac{m_{h2} - m_{s2}}{m_{s2}} = \frac{535 - 50}{50} = 9.7$$

- masse sèche de la prise d'essai ;

$$m_0 = \frac{m_{h1}}{1 + w} = \frac{525}{1 + 9.7} = 49.06$$

- masse de bleu introduite (solution à 10 g/l) ;

$$B = V \times 0.01 = 15 \times 0.01 = 0.15$$

- Pour les matériaux dont le Dmax est inférieur à 5 mm, l'expression du résultat est :

$$VBS = \frac{B}{m_0} * 100 = \frac{0.15}{49.06} * 100$$

$$VBS = 0.3$$

- Interprétation des résultats

Après calculer la valeur de méthylène VBS, nous trouvons que ce dernier égal 0,3. Selon la mesure du VBS dans le tableau IV.8, il était limité parmi 0,2 et 1,5. Alors la catégorie de sol

est sable limoneux, sensible à l'eau.

Tableau IV.8: L'évaluation de la catégorie du sol par le VBS.[17]

Valeur de bleu de méthylène (VBS)	Catégorie de sol
VBS < 0,1	Sol insensible à l'eau
$0,2 \leq \text{VBS} < 1,5$	Sol sable limoneux, sensible à l'eau
$1,5 \leq \text{VBS} < 2,5$	Sol sable argileux, peu plastiques
$2,5 \leq \text{VBS} < 6$	Sol limoneux de plasticité moyenne.
$6 \leq \text{VBS} < 8$	Sol argileux.
VBS > 8	Sol très argileux.

IV.4.6 Mesures de porosité

Les vides du sol ne sont pas obligatoirement remplis d'eau, de sorte qu'il est nécessaire de fixer l'état de serrage du squelette granulaire par des paramètres commodes. L'indice des vides e est le rapport du volume des vides au volume des pleins. La porosité n est le rapport du volume des vides au volume total ($e = \frac{n}{1-n}$). Le degré de saturation $S\%$ d'un sol est le rapport du volume effectivement occupé par l'eau au volume total des vides. La teneur en eau du sol saturé est notée w_s [33].

- Principe

La porosité est définie comme le rapport du volume des vides contenus dans les grains et accessibles à l'eau, au volume réel de l'échantillon.

- Appareillage

- Tamis de 4mm
- Balance
- Etuve
- Entonnoir

- Mode opératoire

✓ Détermination dans l'air de la masse sèche de l'échantillon

- Laver l'échantillon sur le tamis de 4mm.
- Le sécher à l'étuve à $105 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$ jusqu'à masse constante c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives de l'échantillon, séparées d'une heure, ne diffèrent pas de plus de 0,1%.
- Le laisser refroidir et le peser ; soit M_s sa masse.

✓ Détermination dans l'air de la masse de l'échantillon saturé en eau

- Obtenir la saturation en eau complète de l'échantillon par une désorption sous vide (trompe à eau) pendant 2 h suivie d'une immersion dans l'eau pendant 24 h à 20 °C à la pression atmosphérique. Si la porosité est inférieure à 3 %, il y a lieu de laisser les échantillons immergés dans l'eau une semaine entière à la pression atmosphérique ou 24 h à une pression supérieure à 2 MPa.
- Peser ensuite l'échantillon après l'avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant, les gros éléments étant essuyés individuellement : soit M_w sa masse.

✓ **Détermination dans l'eau de la masse de l'échantillon saturé en eau**

- Après la pesée précédente, placer l'échantillon saturé en eau dans le panier en toile métallique, le suspendre au fléau de la balance, l'immerger dans l'eau à 20 °C à l'aide du récipient prévu à cet effet, agiter le panier afin d'éviter toute présence de bulles d'air avant la pesée.

- Peser l'échantillon soit M'_w , sa masse

- **Les résultats**

Porosité (en pourcentage) :
$$n = 100 \frac{M_w - M_s}{M_w - M'_w}$$

$$M_s = 316,38g$$

$$M'_w = 374,78g$$

$$M_w = 290,14g$$

Donc :

$$n = 31\%$$

- **Interprétation des résultats**

Après calculer la porosité du sable, nous n'avons obtenu que $n = 31\%$. Selon le tableau, il était limité parmi 25% et 35% alors le type de sol est **sables grossiers**.

Tableau IV.9: Le type de sol en fonction de porosité

Les types des sols	la porosité (%)
Sols argileux et silteux	40-60
Sables fins	40-50
Sables moyens	35-40
Sables grossiers	25-35
Graviers	20-30
Sols tourbeux	80-85

IV.4.7 Détermination des masses volumiques minimale et maximale des sols non cohérents

La masse volumique minimale (état lâche) γ_{dmin} (NF p 94-059) est obtenue en mettant en place le sol sec dans un moule approprié sous une hauteur de chute nulle.

La masse volumique maximale (état très compact) γ_{dmax} est obtenue en mettant en place le sol sec dans un moule approprié muni d'une surcharge et placé sur une table vibrante.

On détermine ainsi l'indice des vides maximal e_{max} et l'indice des vides minimal e_{min} . La compacité d'un sol grenu est définie par l'indice de densité I_D :

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} = \frac{\gamma_{dmax}}{\gamma_d} \times \frac{\gamma_d - \gamma_{dmin}}{\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin}}$$

Suivant la valeur de I_D la compacité du sol est lâche, moyenne ou dense [33].

- **Principe de l'essai**

L'essai consiste à mettre en œuvre dans un moule normalisé, selon une procédure déterminée, l'échantillon de sol à étudier, successivement dans un état lâche puis dans un état serré. Par convention, ces deux états sont considérés comme étant caractéristiques respectivement des compacités minimale et maximale du sol considéré.

- **Appareillage**
- Moule d'essai
- Table vibrante
- Bac
- Tamis 5mm
- Balance
- Règle à araser
- Spatule
- Entonnoir
- **Mode opératoire**

Premièrement, nous pesons le moule vide (**Photo IV.14**)

Deuxièmes, après le tamisage du sable sur le tamis de 5 mm, nous le coulons dans le moule par l'entonnoir, où l'hauteur de ce dernier est absente du sable déversé dans le moule. Lorsque le sable est complètement rempli, nous l'écrasons en utilisant la règle à araser. Ensuite, nous pesons le moule pour obtenir sa masse (**Photo IV.15**), et l'utilisons pour calculer γ_{dmin} . Nous mettons le moule rempli au-dessus une table vibrante. La vibration aide de diminuer le volume des vides dans le moule, puis nous continuons couler le sable (**Photo IV.16**) pour obtenir un moule rempli sans des vides (**Photo IV.17**). Ensuite, nous écrasons ce moule en utilisant la règle à araser et on le pesons pour marquer sa masse et l'utilisons pour calculer γ_{dmax} .

- **les résultats**



Photo IV.15 : La pesée du moule vide



photo IV.16: La pesée du moule et de son contenu



Photo IV.17 : Le coulage du sable dans le moule au-dessus de la table vibrante



Photo IV.18 : La pesée du moule et de son contenu après la vibration

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} = \frac{\frac{1}{\gamma_{dmin}} - \frac{1}{\gamma_d}}{\frac{1}{\gamma_{dmin}} - \frac{1}{\gamma_{dmax}}} \text{ avec } e_{max} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{dmin}} - 1 \text{ et } e_{min} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{dmax}} - 1$$

Ou

e : est l'indice des vides du matériau ;

e_{max} : est l'indice des vides maximal du matériau ;

e_{min} : est l'indice des vides minimal du matériau ;

γ_s : est la masse volumique des particules solides ;

γ_d : est la masse volumique sèche du matériau ;

γ_{dmax} : est la masse volumique sèche maximale du matériau ;

γ_{dmi} : est la masse volumique sèche minimale du matériau ;

➤ **Masse volumique minimale γ_{dmin}**

Pour chaque prise d'essai, la masse volumique sèche de l'échantillon est calculée comme suit :

Où :

m_d : est la masse sèche de l'échantillon de sol ($m_d = m - m_m$) ;

V_m : est le volume intérieur du moule d'essai ;

m : est la masse du moule et de son contenu ;

m_m : est la masse du moule d'essai ;

V_m, m_m : sont mesurés lors de l'étalonnage de l'appareillage.

$m_m = 280\text{g}, m = 1932\text{g}$

$m_d = m - m_m = 1932 - 280$

$m_d = 1652\text{g}$

$$\gamma_{dmin} = \frac{m_d}{v_m}$$

$\gamma_{dmin} = 1.65\text{g/cm}^3$

- **Indice des vides maximal e_{max}**

- $\gamma_s = 2.67\text{ g/cm}^3$

$$e_{max} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{dmin}} - 1 \quad e_{max} = 0.61$$

➤ **Masse volumique maximale γ_{dmax}**

Pour chaque prise d'essai, la masse volumique sèche de l'échantillon est calculée comme suit :

$$\gamma_{dmax} = \frac{m_d}{V} = 0.81 \text{ g/cm}^3$$

Où :

m_d est la masse sèche de l'échantillon de sol ($m_d = m - m_m$) ;

V_e : est le volume de l'échantillon de sol ;

m : est la masse du moule avec l'échantillon ;

m_m : est la masse du moule d'essai obtenue lors de l'étalonnage.

➤ **Détermination du volume de l'échantillon de sol**

Le volume de l'échantillon de sol V_e est calculé à partir des mesures géométriques du moule déterminées lors de l'étalonnage et des lectures des capteurs

$$V_e = A_m \left[H_m - h_c + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \right]$$

A_m : est l'aire de la section droite de la base du moule d'essai ;

H_m : est la hauteur intérieure du moule d'essai ;

h_c : est la hauteur de la cale de mesure ;

h_i : est la distance entre le dessus de la cale de mesure et le sommet du moule d'essai au droit du repère i .

$$A_m = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$V_e = \frac{\pi \cdot D^2}{4} * (H_m - h_c)$$

$$\gamma_{dmax} = \frac{m_d}{V_e}$$

• **Indice des vides minimal e_{min}**

$$e_{min} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{dmax}} - 1$$

$$\gamma_s = 2.67 \text{ g/cm}^3$$

$$e_{min} = 0.3$$

Indice des vides e : $e = 0.45$

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

$$I_D = 0.53$$

- **Interprétation des résultats**

Après calculer l'indice de densité I_D , nous avons obtenu que $I_D = 0.53$. Le rôle de l'indice de densité I_D est la détermination de l'état du sol (voir le tableau IV.9). L'indice de densité était limité parmi 0,4 et 0,5, alors l'état du sol est moyennement dense.

Tableau IV.10: Qualificatif de compacité du sol.

État du sol	I_D
Très lâche	$I_D < 0,2$
Lâche	$0,2 < I_D < 0,4$
Moyennement dense	$0,4 < I_D < 0,6$
Dense	$0,6 < I_D < 0,8$
Très dense	$I_D > 0,8$

IV.4.8 La perméabilité (charge constante)

La perméabilité du sol à l'eau est affectée par la forme des grains, leur grosseur, la structure du sol, sa constitution pétrographique, la porosité ou l'indice des vides, le degré de saturation, le gradient hydraulique, le diamètre effectif des pores qui influence la hauteur d'ascension capillaire, le cheminement des vides à travers le sol, la température et les caractéristiques au fluide telles que densité et viscosité. La porosité est l'expression du rapport du volume de vide (pores) sur le volume total du matériau considéré. Une perméabilité élevée exige une bonne porosité mais l'inverse n'est pas vrai. Une roche très poreuse peut avoir une perméabilité très faible (argiles par exemple). Dans le cas de massif homogène et isotrope, la perméabilité est la même dans toutes les directions. On définit alors un seul paramètre dit coefficient de perméabilité mesurable par différents essais. [17]

IV.4.8.1 Mesure du coefficient de perméabilité au laboratoire

Deux applications directes de la loi de Darcy sont utilisées en laboratoire :

- Mesure sous charge constante pour les sols perméables (gravier, sable, sable argileux)
- Mesure sous charge variable pour les sols peu perméables (argile)

IV.4.8.2 Perméamétrie à charge constante

La quantité d'eau recueillie voir la figure 5.1 pendant l'intervalle de temps t est :

$$Q = s \times v \times t$$

Avec :

$$v = k \times i = \frac{k \times h}{l}$$

Ce qui donne:

$$k = \frac{Q \times L}{h \times s \times t}$$

- K (m/s) : coefficients de perméabilité.
- Q (cm³) : débit d'écoulement (30, 60, 90, 120, 150, 180).
- L (cm) : hauteur de l'échantillon (11.6).
- t (s) : temps
- h (cm) : charge hydraulique (203).

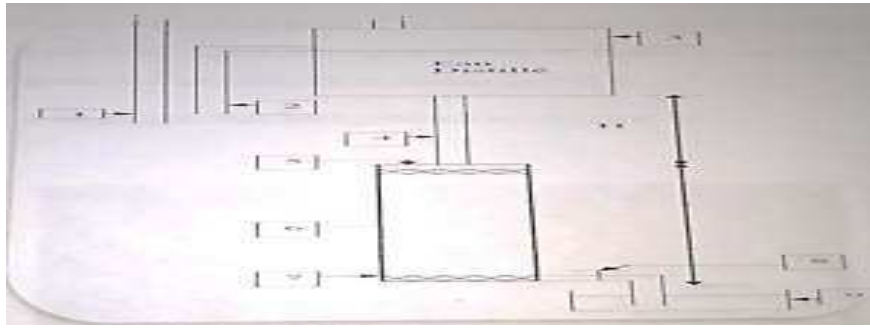


Photo IV.19 : Schéma de Principe d'un Perméamétrie à charge constante.

- 1- Conduite de remplissage d'eau
 - 2- Vidange de trop plein
 - 3- Réservoir d'eau.
 - 4- Tuyau de raccordement réservoir-cellule.
 - 5- Couvercle supérieur de fermeture.
 - 6- Cellule en CU.
 - 7- Pierre poreuse inférieure.
 - 8- Robinet d'arrêt.
 - 9- Récipient pour recueillir d'eau drainé.
- **Mode opératoire**

Les essais ont été réalisés avec un Perméamétrie à charge constant (**Photo IV.19**).



Photo IV.20 : Perméamétrie à charge constante

Après mélanger le sable (**Photo IV.21**), on le place dans un moule cylindrique par un moyennement de compactage (**Photo IV.22**). Nous mettons un disque poreux au-dessus de le côté supérieur du moule (**Photo IV.23**).



Photo IV.21: Le mélange du sable.



Photo IV.22: La mise du sable dans le moule



Photo I.23 : La mise du disque poreux sur le sable.

Le moule cylindrique, d'un diamètre de 10 cm et d'une hauteur de 203 cm, est fermé à ses deux extrémités par des couvercles (**Photo IV.24**)



Photo IV.24 : Moule cylindrique à deux couvercles.

Celui du haut comporte un ajutage qui sert à l'évacuation des eaux. Le couvercle inférieur est raccordé à un réservoir d'eau. Des pierres poreuses coiffent l'échantillon sur ses deux faces à l'intérieur du moule. Les essais sont effectués à charge constante ou le niveau d'eau dans le réservoir est maintenu constant. L'échantillon est saturé sous une charge hydraulique : 180 cm. (**Photo IV.25**)



Photo IV.25 : Perméamétrie pour différents charges hydrauliques.

- Les résultats

Tableau IV.11: Les résultats des charges hydrauliques de sable.

Temps t (s)	Volume d'eau Q (cm ³)	Coefficient de perméabilité K (cm/s)
37	30	5.9022 x 10 ⁻⁴
90	60	4.8529 x 10 ⁻⁴
129	90	5.0786 x 10 ⁻⁴
173	120	5.0493 x 10 ⁻⁴
219	150	4.9859 x 10 ⁻⁴
265	180	4.9445 x 10 ⁻⁴
		Total moyen 5.1355 x 10 ⁻⁴

Le calcul des coefficients de la perméabilité K (cm/s) :

$$K = \frac{Q \times L}{h \times s \times t} \quad \text{Avec} \quad s = \frac{\pi \times D^2}{4} = 78.5 \text{ cm}^2 \quad \text{où} \quad D=10 \text{ cm} \quad \text{et} \quad L=11.6 \text{ cm} \quad \text{et} \quad h=203 \text{ cm}$$

Le coefficient de perméabilité $K = 5.1355 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

- **Interprétation des résultats**

Après le calcul du coefficient k de la perméabilité de l'eau, et selon le tableau III.11 qui détermine la nature du sol et l'adjectif pour qualifier la perméabilité, nous avons obtenu que le coefficient k de perméabilité à l'eau est $K = 5,1355 \times 10^{-6} \text{ m/s}$. Il était limité parmi 10^{-7} et 10^{-5} , alors la perméabilité est moyenne et la nature du sol est **sables fins**.

Tableau IV. 12 :L'ordre de grandeur de la perméabilité pour divers sols

Coefficient k de perméabilité à l'eau (m/s)	Perméabilité intrinsèque k ₀ (darcy)	Adjectif pour qualifier la perméabilité	Nature du sol
$> 10^{-2}$	> 1000	Très élevée	Graviers
10^{-4} à 10^{-2}	10 à 1000	Elevée	Sables et graviers
10^{-5} à 10^{-4}	1 à 10	Moyenne	Sables grossiers
10^{-7} à 10^{-5}	10^{-2} à 1	Faible	Sables fins
10^{-9} à 10^{-7}	10^{-4} à 10^{-2}	Très faible	Limons
$< 10^{-9}$	$< 10^{-4}$	Extrêmement faible	Argiles

IV.5 L'Analyse chimique

Tableau IV. 13 : Fiche technique du sable blanc

Elément	Formule	%
Silice Totale	SiO ₂	97.60
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	0.83
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0.30
Oxyde de calcium	CaO	0.60
Oxyde de Magnésium	MgO	0.70
Oxyde de potassium	K ₂ O	0.50
Oxyde de sodium	Na ₂ O	0.10
Oxyde de titane	TiO ₂	0.049
Oxyde de chrome	Cr ₂ O ₃	0.037
Oxyde de manganèse	MnO	0.011
Anhydride phosphorique	P ₂ O ₅	0.086
Anhydride sulfurique	SO ₃	0.26
Perte au feu	/	0.38

Tableau IV. 14 : fiche technique du sable jaune

Elément	Formule	%
Silice Totale	SiO ₂	96.00
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	0.91
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0.35
Oxyde de calcium	CaO	0.84
Oxyde de Magnésium	MgO	0.20
Oxyde de potassium	K ₂ O	0.30
Oxyde de sodium	Na ₂ O	0.12
Oxyde de titane	TiO ₂	0.042
Oxyde de chrome	Cr ₂ O ₃	0.062
Oxyde de manganèse	MnO	0.011
Anhydride phosphorique	P ₂ O ₅	0.373
Anhydride sulfurique	SO ₃	0.24
Perte au feu	/	0.62

IV.5.1 La Mesure du pH

Le pH qui entoure les particules de terre à l'état naturel est sujet à des variations en fonction des changements dans les rapports terre solution motivés par le climat, la culture et d'autres facteurs. On différencie, les sols acides ($pH < 5-6$), les sols peu acides ($6 < pH < 7$), les sols neutres ($7 < pH < 8$), les sols calcaires ($8 < pH < 9$), les sols sodiques ($pH > 9$). [31]

- Principe de l'essai

Le pH est estimé en comparant la couleur du réactif avec une échelle de référence située sur le diagramme de pH mètre.

- Appareillage

Les matériels utilisés et la matière (**Photo IV.26**)

- Bécher
- L'eau déminéralisée ou distillée
- Le sable
- Les papiers test de pH



Photo IV.26 : Les matériels utilisés et la matière

- Mode opératoire

Prélever quelques grammes de sable à l'aide de la spatule et placer dans le bécher. Ensuite, ajouter l'eau déminéralisée ou distillée jusqu'à ce qu'il recouvre le sable. Après, on les mélanger et attendre 2- 3 minutes. Prendre le papier test et veiller à ne pas le toucher avec les doigts, ce qui pourrait influencer le résultat du test. Et le tremper dans l'échantillon pendant une seconde (**Photo IV.27**), et le secouer pour enlever l'excès de liquide (**Photo IV.28**), enfin lire le résultat en comparant la zone de test avec l'échelle de couleurs (**Photo IV.29**).



Photo IV.27 :L'immersion du papier test dans l'échantillon

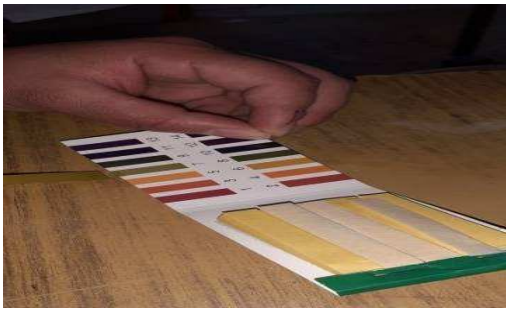


Photo IV.28: La lecture du résultat



Photo IV.29: La secousse du papier test.

- Les résultats et interprétation:

Après l'expérience et la comparaison du résultat avec l'échelle de couleurs du pH, nous avons obtenu le $\text{pH} = 6,8$. Selon la mesure du pH dans le tableau (III.15), il était limité parmi 6 et 7 alors le type de sol est **peu acide**.

Tableau IV.15: L'évaluation du type de sol par le Ph [31]

Le pH	Les types des sols
$\text{pH} < 5-6$	les sols acides
$6 < \text{pH} < 7$	les sols peu acides
$7 < \text{pH} < 8$	les sols neutres
$8 < \text{pH} < 9$	les sols calcaires
$\text{pH} > 9$	les sols sodiques

IV.6 Propriétés mécanique:

IV.6.1 Résistance au cisaillement des sols

- Introduction

Il est usuellement admis que la rupture du sol sous l'effet des surcharges se manifeste par des contraintes de cisaillement au niveau des facettes en rupture. La contrainte de cisaillement maximale mobilisée par le sol est appelée résistance au cisaillement et dépend des caractéristiques mécaniques du sol. Cette partie se propose d'étudier la résistance au cisaillement du sol en exposant le critère de rupture de Mohr-Coulomb, qui est souvent utilisé dans les projets géotechniques. On étudie aussi les caractéristiques mécaniques du sol, à savoir l'angle de frottement interne et la cohésion, et les essais de laboratoire qu'on réalise dans la pratique des projets, pour les mesurer.

- La loi de Coulomb

Sous l'effet sollicitations extérieures excessives, le sol subit des déformations plastiques et des glissements apparaissent. Pour les matériaux pulvérulents la résistance au glissement est liée aux actions de contact et aux frottements entre les grains, l'expérience montre qu'un glissement se produit sur une surface lorsque la contrainte qui agit sur elle atteint une obliquité φ par rapport à la normale à la surface. [17].

On peut écrire au moment du commencement du glissement :

$$\sigma_t = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi$$

Dont la forme est identique à la loi du frottement (En mécanique des sols ou des roches, et en général en génie civil, on adopte le plus souvent une convention de signe où les compressions sont positives.), le coefficient φ est appelé angle de frottement interne. Pour un sable l'angle φ dépend essentiellement de la compacité du milieu. L'expérience donne pour les matériaux granulaires une relation de la forme :

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi$$

(ou c est la cohésion). C'est la loi de Coulomb. [11]

Il ne faut pas attacher à c et φ une signification physique trop précise qui ne résisterait pas à une analyse détaillée, mais il faut les considérer plus comme les deux coefficients d'une approximation linéaire, la droite de Coulomb étant ajustée au mieux d'après les résultats expérimentaux.

Les critères de rupture qui viennent d'être écrits supposent que les contraintes agissent sur les grains. En réalité comme il y a de l'eau dans l'argile l'application de contrainte σ_n normale au plan de glissement fait apparaître une pression interstitielle u . Comme la résistance au cisaillement de l'eau est nulle, la loi de Coulomb doit s'écrire :

$$\tau = c + (\sigma_n - u) \operatorname{tg} \varphi$$

C'est la loi de Hvorslev.

- Mesure de la résistance au cisaillement

Pour mesurer la résistance au cisaillement on utilise deux types d'essais, le cisaillement direct et l'essai triaxial.

Il existe différents types d'appareils de cisaillement direct, le plus connu étant celui de Casagrande. L'échantillon de sol est enfermé dans deux demi-boîtes pouvant glisser l'une sur l'autre (voir la figure IV.7), un effort normal au plan de glissement est appliqué par un piston et on mesure l'effort maximal de cisaillement direct donne donc à la rupture un couple de valeurs (σ_n, τ) qui définit un point dans le plan de Mohr. Le lieu de ces points est la courbe intrinsèque, qui est une droite d'après la relation de Coulomb. Cette droite détermine le domaine des contraintes que le sol peut supporter sans céder [17].

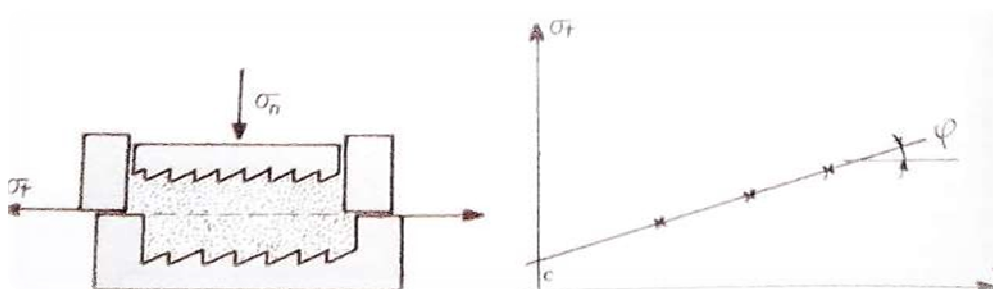


Figure IV.7 : principe de l'essai de cisaillement direct pour la détermination de la courbe intrinsèque.

Dans l'essai triaxial, un échantillon cylindrique gainé est soumis latéralement à la pression d'un fluide ($\sigma_2 = \sigma_3$) et axialement à la charge d'un piston (σ_1) (voir la figure IV.7). On enregistre la courbe (effort axial, déformation axiale). La rupture se matérialise par une déformation excessive ou par un plan de glissement. Cet essai permet de déterminer le cercle de Mohr de l'équilibre ultime. L'enveloppe des cercles de Mohr est la courbe intrinsèque,

c'est-à-dire pour les sols la droite de Coulomb [17].

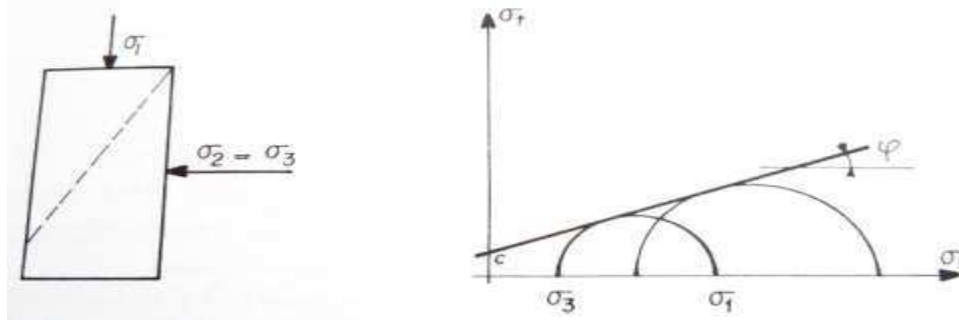


Figure IV.8 : principe de l'essai triaxial pour la détermination de la courbe Intrinsèque.

Pour les matériaux pulvérulents la courbe intrinsèque est rectiligne dans un large domaine. Toutefois sous fortes contraintes, de l'ordre du MPa, pour un sable de rivière comme le sable de Seine, il se produit une attrition, c'est-à-dire une destruction des grains, simultanément la pente de la courbe intrinsèque diminue et elle prend une allure parabolique. Pour une même matière, plus les grains sont petits plus la contrainte à partir de laquelle l'attrition se manifeste est forte. Une forme analogue de la courbe intrinsèque peut être observée sur les argiles, mais à très hautes pressions (20MPa) et probablement sans destruction des particules [17].

- Variations de volume en cours de cisaillement

➤ Les Sables:

Sous l'effet du glissement les grains de sable se disjoignent des variations de volume se produisent qui dépendent de la densité initiale : les sables denses foisonnent, les sables lâches tassent. On appelle densité critique γ_e la densité initiale qui correspond à une variation de volume nulle en cours de cisaillement. La densité critique est une fonction de σ_n .

Après un glissement important les variations de volume cessent et la résistance au cisaillement correspondante est appelée résistance critique (angle de frottement critique φ_c). Les sables dont la densité initiale est supérieure à la densité critique ont une courbe effort, déformation qui présente un maximum (voir la figure IV.9). Dans le cas contraire la courbe est plus aplatie que celle du cisaillement critique. Ces figures sont extrêmement caractéristiques, elles illustrent la relation entre φ et la compacité évoquée plus haut.

Au voisinage de la densité critique l'angle de frottement interne des sables est souvent de l'ordre de 32° [17].

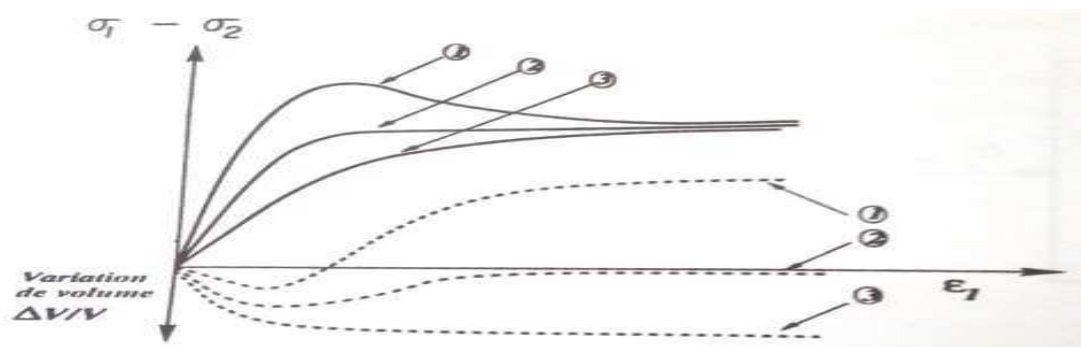


Figure IV.9 : courbes effort-déformation et variations de volume au cours d'essais triaxiaux sur un sable à différentes compacités.

- 1 : sable dense
- 2 : à la densité critique
- 3 : sable lâche

➤ **La matière utilisée :**

Le sable des mines de la zone Kef-Esnoun Djebel Onk est le matériau utilisé dans cette étude. Il contient principalement du Silice avec un pourcentage de 97.60%, à des grains arrondi en forme comme il est vu, en utilisant un microscope, dans la figure 5. D'ailleurs, l'analyse de la courbe granulométrique montre que la classification du sable utilisé est propre et mal gradué.

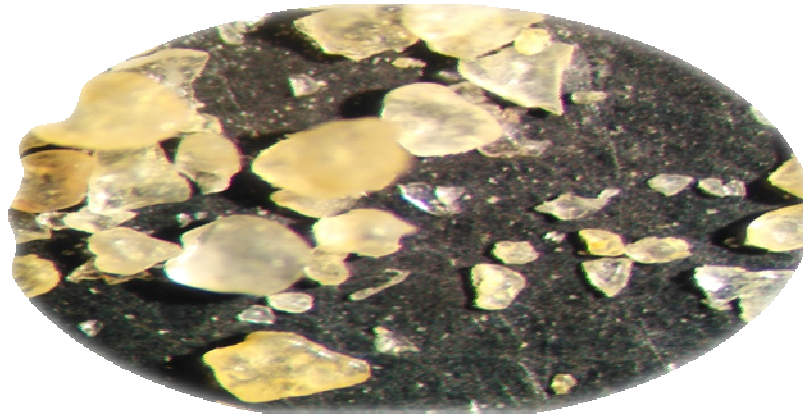


Photo IV.30 : La forme des grains microscopique du sable jaune.

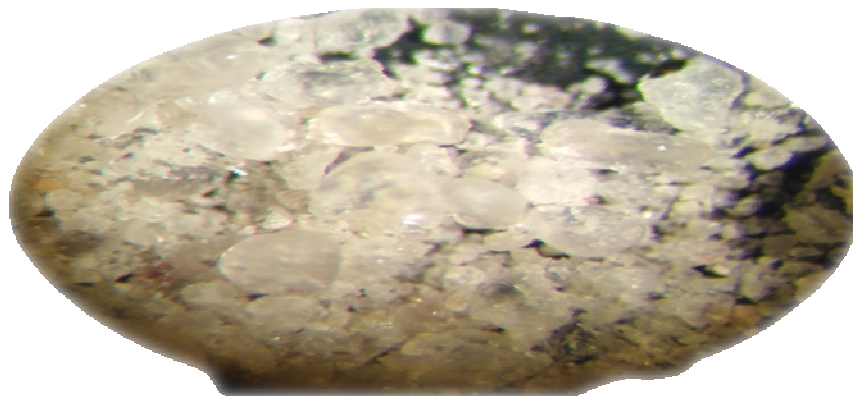


Photo IV.31 : La forme des grains microscopique du sable blanc .

IV.6.2 Cisaillement rectiligne à la boîte

L'élaboration et l'exécution des projets -tel que les structures (bâtiment) ou l'infrastructure (tracer routier)- en site neuf nécessitent une bonne connaissance des terrains traversés. Pour cela, la connaissance géotechnique constitue une source d'information indispensable.

- L'étude de sa capacité portante.
- L'étude des différents types de fondations que l'on peut préconiser....

Ces caractéristiques se traduisent en général par deux paramètres très important qui sont :

- L'angle de frottement interne des grains φ
- La cohésion du sol C

Afin de déterminer ces deux paramètres, nous avons recours à un essai en laboratoire très sollicités par les ingénieurs qui est "L'essai de cisaillement rectiligne" ou "L'essai de cisaillement à la boîte" proposé Mr. Alexandre COLLIN (1846) et mise au point par le Pr. CASAGRANDE.

N.B

Il existe un autre essai toute aussi important et précis pour déterminer l'angle de frottement interne φ et la cohésion C qui est "L'essai triaxial" que l'on exécutera ultérieurement.

Ainsi que des essais in-situ tel que l'essai au scissomètre, le théotest et le pénétromètre.

- Quelques définitions

✓ Sol pulvérulent: (sol grenue):

Les sols pulvérulents regroupent le gravier, le sable et le silt. Ils sont constitués de particules volumineuses, et leur résistance au cisaillement est assurée par le frottement et l'enchevêtrement des particules.

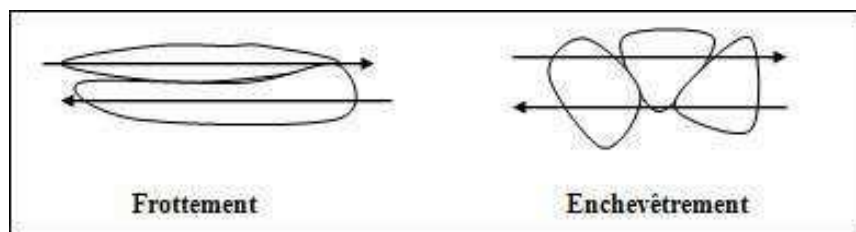


Figure IV.10 : phénomène de résistance au cisaillement du sol grenu

✓ L'angle de frottement « φ »

Angle que fait la réaction du sol avec la normale de l'ouvrage. Cet angle dépend de la rugosité de la surface et de son déplacement relatif par rapport au sol .

✓ La cohésion « C »

Aussi appelée forces de cohésion est la résistance au cisaillement d'un sol sous une contrainte normale nulle.

Les matériaux "normaux" résistent aussi à la traction et ont une certaine cohésion.

Cette cohésion est liée à la présence, à la surface des particules d'argile, de charges électriques qui engendrent des forces d'attraction entre les particules par l'intermédiaire des impuretés contenues dans l'eau qui sature souvent les sols cohérents. Certaines de ces impuretés

On considère qu'un sol est cohérent lorsqu'il comprend plus de 50 % de particules d'argiles. A l'opposé, les sols pulvérulents totalement dépourvus d'argile n'offrent aucune cohésion ; il est d'ailleurs impossible de les façonner.

Il faut cependant souligner qu'un sable partiellement saturé peut manifester une cohésion dite apparente, créée entre autres par la tension [17]

- Essai de cisaillement rectiligne à la boîte

Les essais de cisaillement rectiligne à la boîte s'appliquent en conditions drainées à tous types de sol naturels (NF P 94-071-1). Ils fournissent c' et φ' .

➤ Principe

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi-bottes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi-bottes constitue un

plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette.

Il consiste à :

- ✓ Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) maintenu constant pendant toute la durée de l'essai.
- ✓ Produire après consolidation de l'éprouvette sous l'effort (N) un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi-bottes l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif δl à vitesse constante.
- ✓ Mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant.

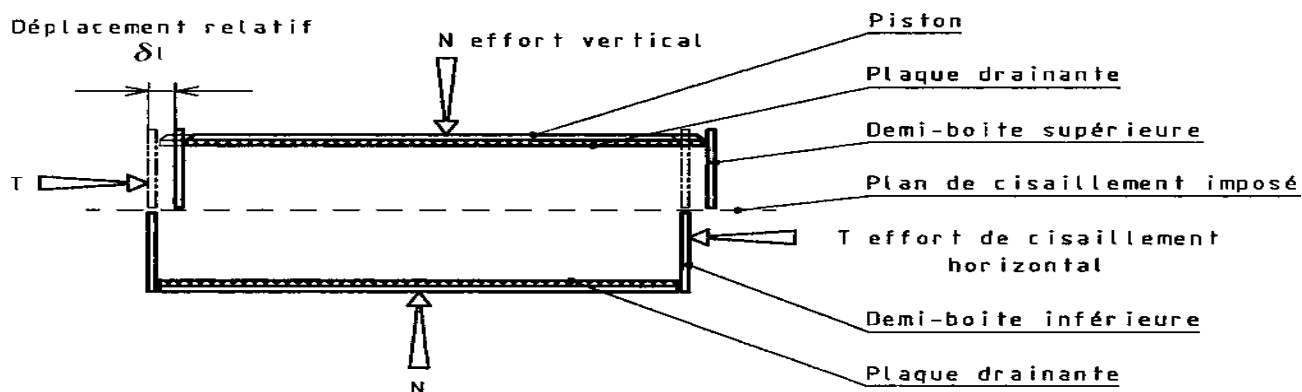


Figure IV.11 : Principe d'un essai de cisaillement rectiligne à la boîte

➤ **Appareillage**

L'appareillage spécifique à l'essai comprend (voir figure IV.12) :

- Le bâti.
- La boîte de cisaillement.
- Le dispositif d'application de l'effort normal sur l'éprouvette.
- Le dispositif produisant le déplacement relatif horizontal entre les deux demi-boîtes.
- Le système de mesure des efforts, des déplacements et du temps.

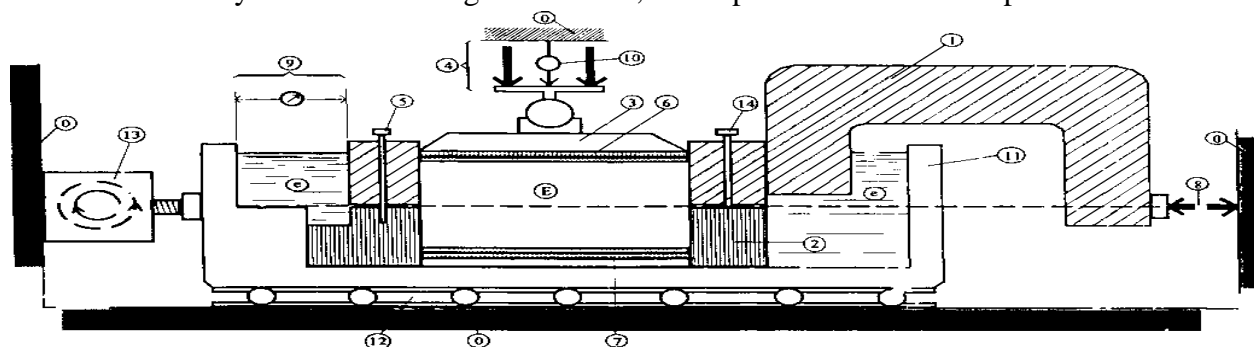


Figure IV.12 : Schéma de la boîte de cisaillement — Exemple avec la demi-boîte inférieure mobile

- 0 Bâti
- 1 Demi-boîte supérieure
- 2 Demi-botte inférieure
- 3 Piston rigide
- 4 Dispositif d'application de l'effort vertical N centré sur le piston

- 5 Solidarisation des demi-boîtes
- 6 Plaque drainante supérieure
- 7 Plaque drainante inférieure amovible
- 8 Dispositif de mesure de l'effort horizontal T
- 9 Dispositif de mesure du déplacement relatif horizontal
- 10 Dispositif de mesure du déplacement vertical 5h
- 11 Châssis étanche
- 12 Glissière sans frottement
- 13 Système de déplacement à vitesse constante
- 14 Vis de soulèvement de la demi-boîte

e : Eau déminéralisée

E : Éprouvette de sol

➤ **Mode opératoire**

- Saturer les plaques drainantes et les recouvrir d'un papier filtre.
- Placer une plaque drainante dans le fond de la demi- boîte inférieure.
- Verser l'échantillon dans les deux demi- boîtes solidarisée.
- Caler l'éprouvette dans la boîte de telle sorte que le plan de glissement la partage en deux parties sensiblement égales.
- Remplir le châssis contenant la boîte de cisaillement d'eau déminéralisée.
- Mesurer le déplacement vertical Δh du piston en fonction du temps pendant 1h au moins et jusqu'à stabilisation.
- Déterminer, à l'issue de la phase de consolidation ; la vitesse maximale de cisaillement par $V_{max} \geq 1mm/min$ puisque notre sol est pulvérulent.
- Cisailier trois éprouvettes de mêmes dimensions et sous trois efforts verticaux différents 0.5, 1, 1.5, 2 bar selon la nature du sol ou exigence client.
- Placer la boîte de cisaillement dans le châssis étanche fixé sur le bâti ainsi que le piston muni de sa plaque drainante sur le sommet de l'éprouvette.
- Noter après fixation du système de mesure de l'effort T et avant application de tout effort, la valeur d'origine du capteur de l'effort T et régler, par la suite, la position du capteur de mesure du déplacement horizontale et noter sa valeur d'origine.
- Positionner le capteur de mesure du déplacement verticale du piston et noter sa valeur d'origine.
- Appliquer l'effort N sur la partie supérieure du piston et mesurer le déplacement vertical du piston en fonction Δh du temps.
- Arrêter le cisaillement soit lorsque la variation de l'effort T pour un intervalle de mesure correspondant à un déplacement horizontal $\Delta h_1 = 0.5mm$ est $<$ à 0.01 de l'effort maximal, soit lorsque Δh_1 atteint au moins 5mm.
- Peser l'éprouvette, déterminer sa teneur en eau final.

➤ **Les résultats**

- **Essai (CD) consolidé drainé du SJ**

Diamètre = 60 mm, Hauteur = 20 mm, Vitesse de cisaillement = 1,2 mm/min Coefficient Dynamométrique = 0,12

Tableau IV.16 : les résultats de la teneur en eau de l'éprouvette avant et après l'essai CD (Sable Jaune)

Caractéristiques de l'éprouvette	Avant essai				Après essai			
Contrainte σ (kg/cm²)	0,5	1	1,5	2				
Masse humide +trousse (g)	140,8	140,8	140,8	140,8				
Masse de la trousse (g)	46,8	46,8	46,8	46,8				
Masse nette de l'éprouvette (g)	94	94	94	94				
Volume de l'éprouvette (cm³)	56,52	56,52	56,52	56,52				
N° de la tare	BG	BG	BG	BG	D0	A1	RH	WM
Masse totale humide + tare (g)	250	250	250	250	142	144,5	142,9	153,4
Masse totale sèche + tare (g)	249,7	249,7	249,7	249,7	128,2	130,9	129,7	140,5
Masse de la tare (g)	41,7	41,7	41,7	41,7	39,5	40,4	40,6	49,3
Masse de l'eau (g)	0,3	0,3	0,3	0,3	13,8	13,6	13,2	12,9
Masse sèche de l'éprouvette (g)	208	208	208	208	88,7	90,5	89,1	91,2
Teneur en eau W (%)	0,14	0,14	0,14	0,14	15,6	15	14,8	14,1
Teneur en eau de saturation (%)	23,6	23,6	23,6	23,6				
Degré de saturation (%)	0,6	0,6	0,6	0,6				
Masse volumique humide γ_h(g/cm³)	1,66	1,66	1,66	1,66				
Masse volumique sèche γ_d(g/cm³)	1,65	1,65	1,65	1,65				

Tableau IV.17 :Le calcul de la contrainte du cisaillement d'essai CD.

Section S_0	$\sigma = 0,5 \text{ bar}$		$\sigma = 1 \text{ bar}$		$\sigma = 1,5 \text{ bar}$		$\sigma = 2 \text{ bar}$	
	anneau	τ	anneau	τ	anneau	τ	anneau	τ
28,1	78	0,333	83	0,354	113	0,482	109	0,465
28	100	0,428	115	0,493	168	0,72	162	0,694
27,9	112	0,482	145	0,624	208	0,895	218	0,938
27,7	118	0,511	165	0,715	234	1,014	253	1,096
27,5	115	0,502	178	0,777	254	1,108	289	1,261
27,4	111	0,486	195	0,854	272	1,191	315	1,379
27,2	103	0,454	200	0,882	277	1,222	330	1,456
27,1	97	0,429	196	0,868	277	1,226	346	1,532
27,0	91	0,404	192	0,853	274	1,217	361	1,604
26,8	87	0,389	186	0,833	269	1,204	365	1,634
26,7	87	0,391	175	0,786	264	1,186	363	1,631
26,5	87	0,394	171	0,774	252	1,141	357	1,617

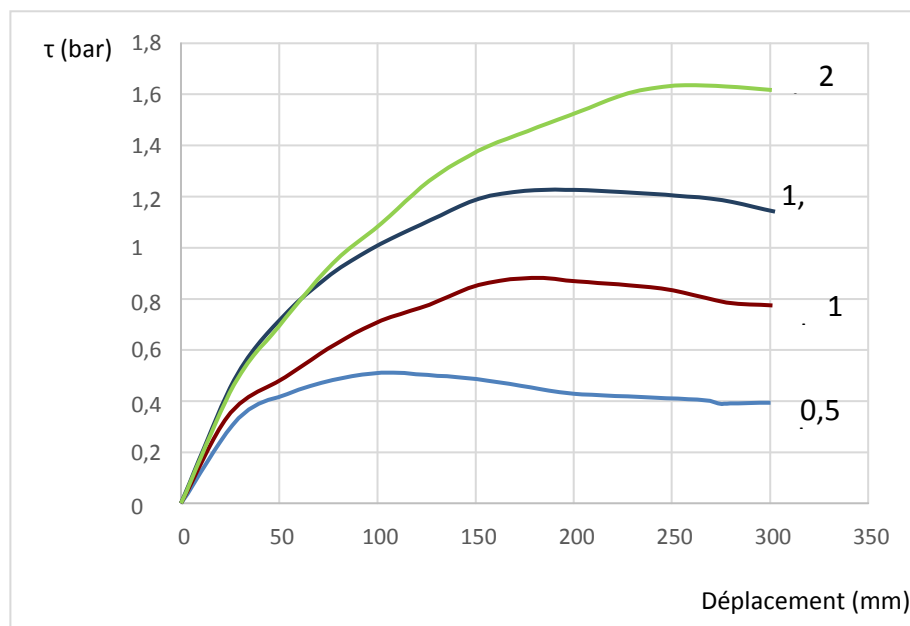


Figure IV.13 : Courbe de cisaillement direct du sable consolidé drainé.

La détermination de la valeur de $\phi = 36^\circ$ et $c = 0.135$ bar en fonction du pic ou palier.

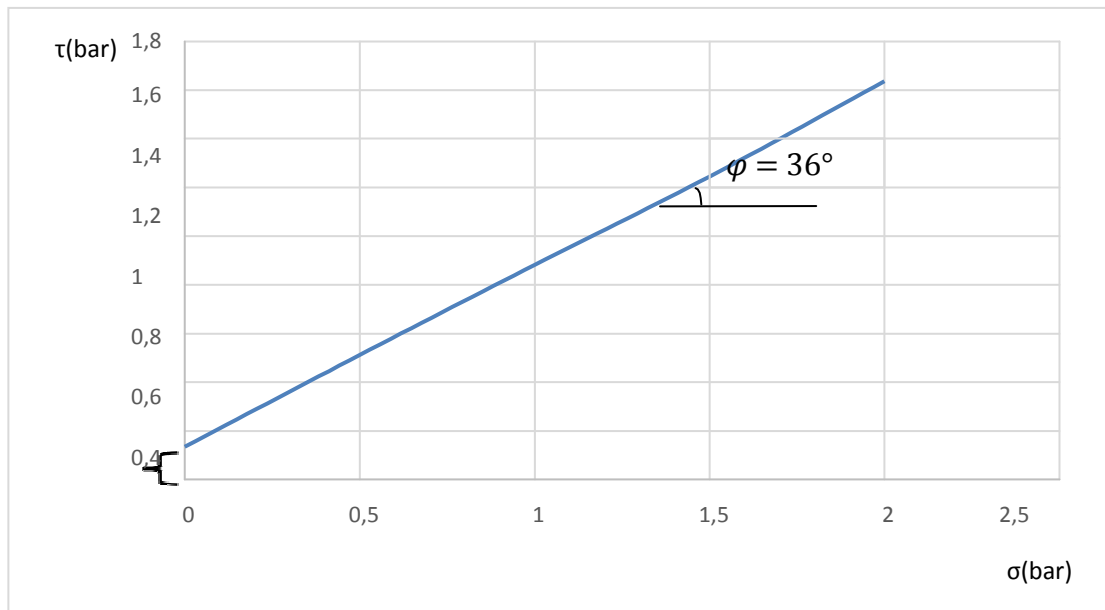


Figure IV.14 : Détermination de l'angle de frottement et de la Cohésion du SJ

- **Essai (CD) consolidé drainé du SB**

Diamètre = 60 mm, Hauteur = 20 mm, Vitesse de cisaillement = 1,2 mm/min , Coefficient Dynamométrique = 0,12

Tableau IV.18: les résultats de la teneur en eau de l'éprouvette avant et après l'essai CD (Sable blanc)

Caractéristiques de l'éprouvette	Après essai				Après essai			
	0,5	1	1,5	2				
Contrainte σ (kg/cm ²)	0,5	1	1,5	2				
Masse humide +trousse (g)	140,8	140,8	140,8	140,8				
Masse de la trousse (g)	46,8	46,8	46,8	46,8				
Masse nette de l'éprouvette (g)	94	94	94	94				
Volume de l'éprouvette (cm ³)	56,52	56,52	56,52	56,52				
N° de la tare	BG	BG	BG	BG	D0	A1	RH	WM
Masse totale humide + tare (g)	251	251	251	251	143	144,6	142,6	153,2

Masse totale sèche + tare (g)	249,9	249,9	249,9	249,9	128,3	130,8	1295	140,7
Masse de la tare (g)	41,7	41,7	41,7	41,7	39,5	40,4	40,6	49,3
Masse de l'eau (g)	0,3	0,3	0,3	0,3	13,8	13,6	13,2	12,9
Masse sèche de l'éprouvette (g)	208	208	208	208	88,7	90,5	89,1	91,2
Teneur en eau W (%)	0,14	0,14	0,14	0,14	15,6	15	14,8	14,1
Teneur en eau de saturation (%)	23,6	23,6	23,6	23,6				
Degré de saturation (%)	0,6	0,6	0,6	0,6				
Masse volumique humide γ_h (g/cm ³)	1,66	1,66	1,66	1,66				
Masse volumique sèche γ_d (g/cm ³)	1,65	1,65	1,65	1,65				

Tableau IV.19: Le calcul de la contrainte du cisaillement d'essai CD.

Section S_0	$\sigma = 0,5 \text{ bar}$		$\sigma = 1 \text{ bar}$		$\sigma = 2 \text{ bar}$	
	anneau	τ	anneau	τ	anneau	τ
28,1	57	0,243	80	0,342	105	0,448
28	80	0,343	116	0,497	164	0,703
27,9	100	0,430	147	0,632	221	0,950
27,7	111	0,481	167	0,723	269	1,165
27,5	116	0,506	190	0,829	313	1,366
27,4	120	0,525	204	0,893	344	1,506
27,2	122	0,538	214	0,944	371	1,637
27,1	122	0,540	218	0,965	390	1,727
27,0	118	0,524	220	0,978	403	1,791
26,8	116	0,519	221	0,989	410	1,836
26,7	110	0,494	221	0,993	412	1,852
26,5	105	0,475	219	0,992	411	1,861

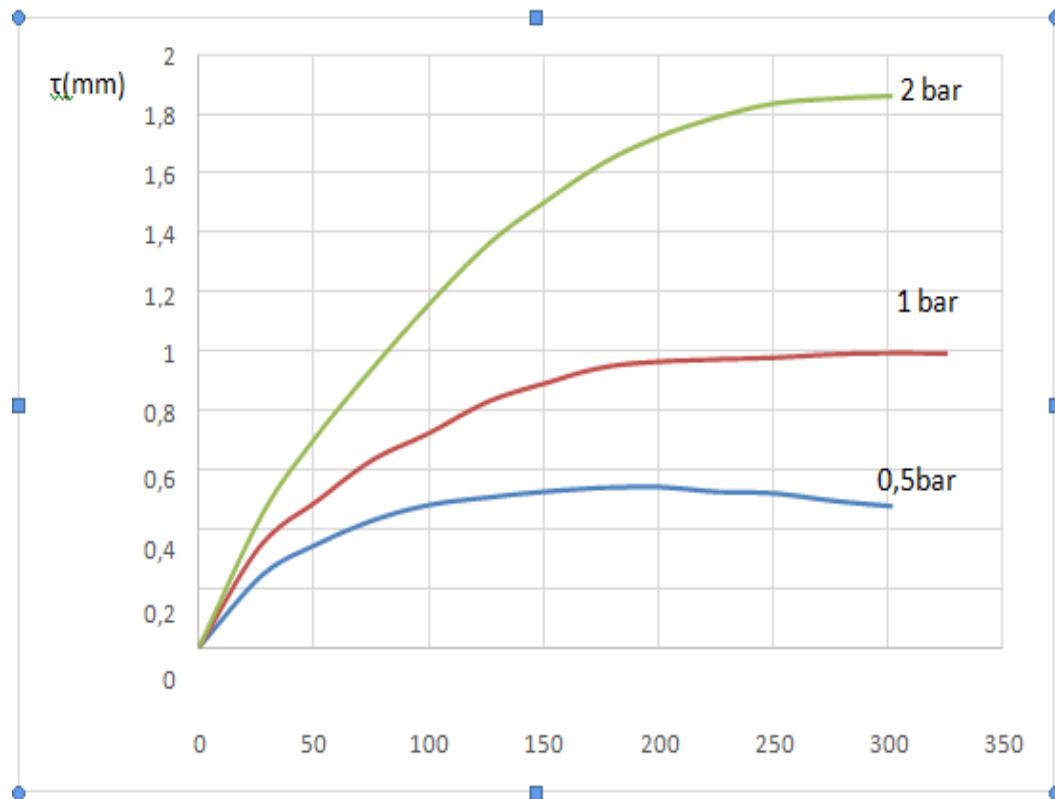


Figure IV.15 : Courbe de cisaillement direct du sable consolidé drainé.

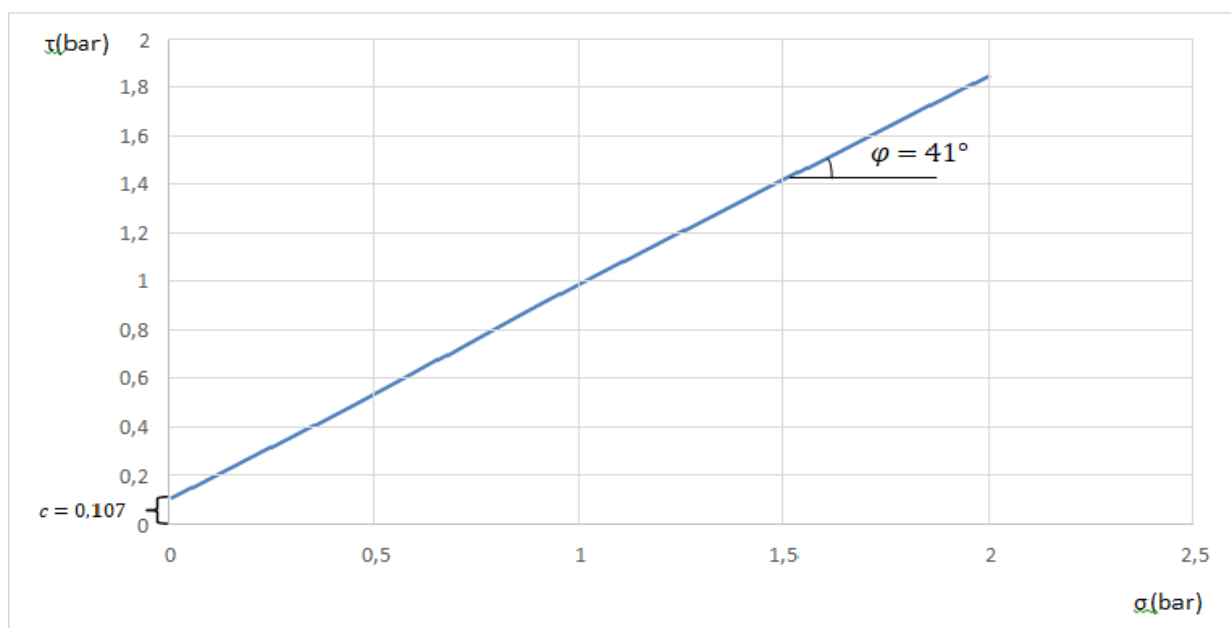


Figure IV.16 : Détermination de l'angle de frottement et de la Cohésion SB

IV.7 Conclusion

Enfin, après l'étude que nous avons appliquée au matériau étudié en laboratoire, à savoir l'extraction du sable, nous avons obtenu les résultats des propriétés physiques, chimiques et mécaniques du sable pour chaque type.

Et sur la base de ces essais de laboratoire et des résultats obtenus, nous avons trouvé que le sable de couleur jaune était préféré pour la valorisation.

Dans le prochain chapitre, nous traiterons de l'utilisation de ce type de sable en complément des granulats et de bitume sur la formulation du béton bitumineux.

Chapitre V

*Formulation de béton
bitumineux*

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer l'étape expérimentale par la réalisation des deux essais mécaniques l'essai Marshall et l'essai Duriez.

Ces essais ont pour but de juger la validité de notre choix des mélanges sélectionnés précédemment et ceci par la détermination des performances mécaniques de chaque mélange. L'étude expérimentale déroulée dans cette étude montrée dans le schéma ci-dessous :

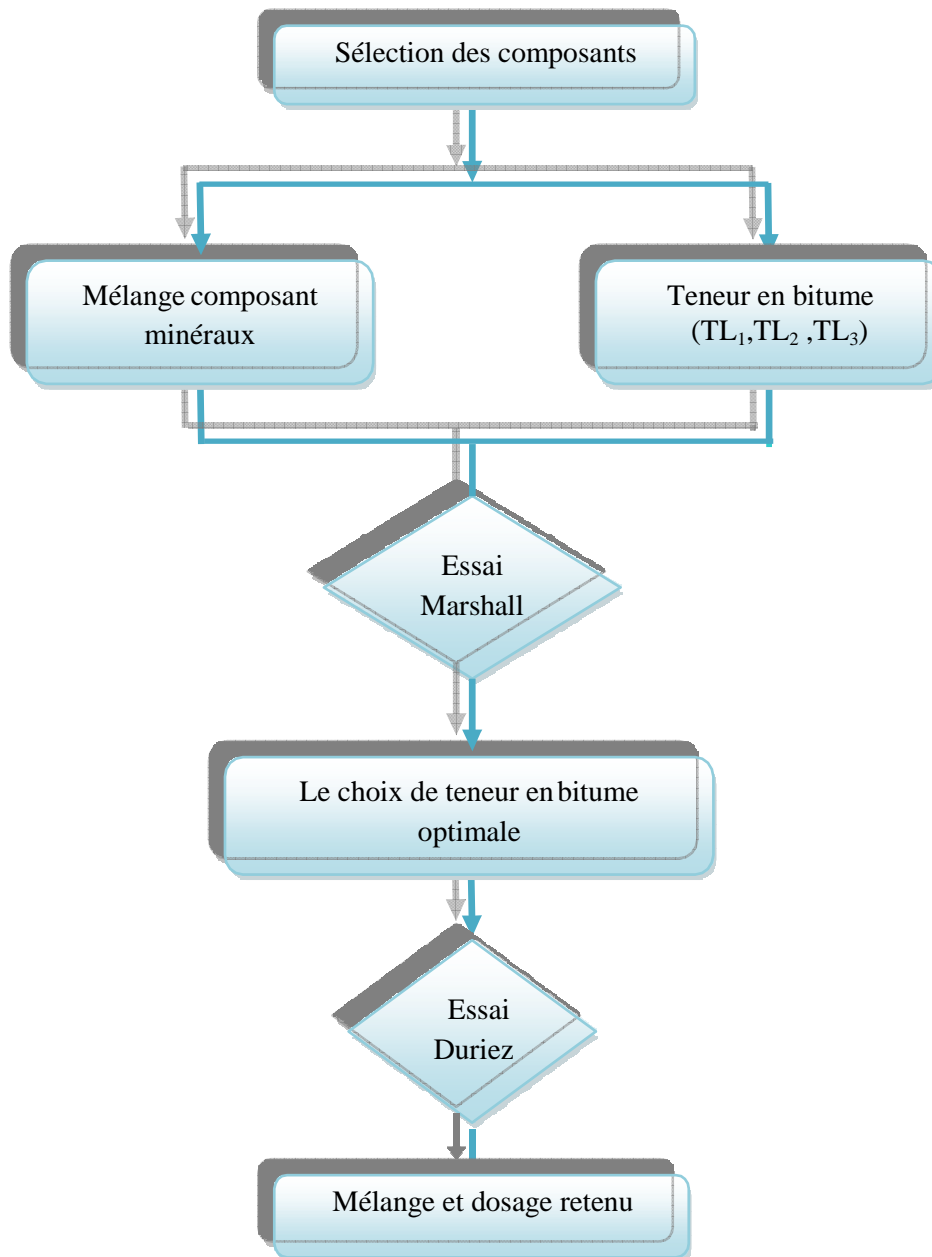


Figure V.1 : Etape de formulation [19]

V.2 Confection des éprouvettes

Les éprouvettes sont confectionnées suivant le type d'essai soit Marshall ou Duriez.

V.2.1 Préparation des mélanges

La fabrication de mélange de béton bitumineux au niveau du laboratoire a été réalisée conformément à la norme NFP 98-250-1 soit pour l'essai Marshall ou pour l'essai Duriez.

- **Préparation des agrégats:**

Chacun des types des agrégats entrant dans la composition du mélange hydrocarboné est prélevé selon la norme P18-553 « préparation d'un échantillon pour essai ».

Les différents agrégats sont chauffés dans des récipients dans une étuve à 160°C de température.

- **Préparation du liant :**

Une quantité de liant correspondant aux besoins de l'essai est prélevée sans dépasser 100°C. Le liant prélevé est placé dans un récipient remplis et fermé. La mise en température du liant est effectuée en deux phases :

- Le récipient rempli et fermé, placé en étuve, est porté à la température de référence - 0°C, + 10°C en moins de 5h. (Dans notre étude la température de référence de bitume 40/50 était entre 160°C et 170°C).
- Le récipient est placé sur une plaque chauffante et son contenu est agité constamment pour homogénéiser sa température, et le maintenir à sa température de référence. Cette opération ne doit pas se prolonger plus de 10mn.
- La température de référence de préparation des mélanges est définie suivant la catégorie de liant hydrocarboné utilisée comme suit (NFP 98-250-1):
 - Bitume 80/100 : 140°C ± 5°C
 - Bitume 60/70 : 150°C ± 5°C
 - **Bitume 40/50 : 160°C ± 5°C**
 - Bitume 20/30 : 180°C ± 5°C

- **Malaxage :**

La cuve contenant les agrégats à mélanger est installée sur le malaxeur en essayant de limiter au maximum les déperditions de température. Le malaxeur (voir la photo V.1) est actionné pendant 30 s ± 5s afin de bien homogénéiser les sables.

Le liant est versé. La masse de liant ne doit pas dépasser de plus de 1% en valeur relative la masse de liant théorique sinon la gâchée est rejetée. La durée de malaxage doit conduire à un mélange visuellement homogène donc la durée totale du malaxage est comprise entre 2 et 3 minute.

Après la fin de malaxage, le mélange doit être utilisé immédiatement avant le refroidissement sinon la gâchée est rejetée.

La masse du bitume se calcule à partir de la masse des agrégats comme l'indique la formule suivante:

Où :

$$ML = \frac{(MA \times TL)}{100}$$

ML : la masse de bitume utilisé.

MA : la masse de mélange des agrégats utilisés.

TL : la teneur en liant utilisé dans un mélange (en %).

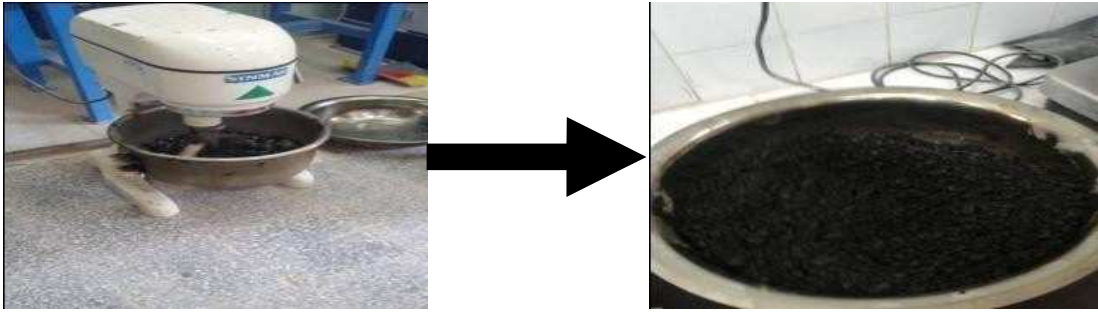


Photo V.1: Opération de malaxage

V.2.2 Confection des éprouvettes pour l'essai Marshall (NFP 98-251-2)

Comme dans les autres méthodes d'analyse, l'éprouvette Marshall est déterminée par confection d'une éprouvette cylindrique (photo V.2), d'une masse indicative de 1200 g, de 105 mm de diamètre et de 63,5 mm de hauteur théorique. [19]



Photo V.2 : Exemple d'éprouvettes Marshall

- **Remplissage des moules et compactage :**

On pèse une quantité m égale 1200 g de mélange à 0,1% près en valeur relative. Après avoir placé un disque de papier en fond de moule, les moules sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes 2 h au minimum, et on met en place la hausse puis on introduit le mélange en une seule fois dans le moule légèrement enduit d'oléate de soude glycéринé (photo V.3). Ensuite, on place le deuxième disque de papier sur le mélange. Mettre le moule de l'appareil de compactage on compacte le mélange 50 coups de marteau de la dame en $55 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$ (voir la photo V.4). On démonte et remonte le moule en intervertissant la base et la hausse et on répète à nouveau le compactage. Le nombre total des coups est 100 coups.

Le moule est conservé 5h au moins à température ambiante (15 à 25° C) après leur compactage. [19]



Photo V.3 : Remplissage du moule



Photo V.4 : Opération de compactage

- **Démoulage :**

Après refroidissement les moules et pour les démouler, on fait passer l'éprouvette dans la hausse en s'aidant du piston extracteur et de la presse comme la photo ci-dessous explique ce démarche :

La confection des autres éprouvettes se fait avec les mêmes étapes précédentes.

Quand les éprouvettes sont prêtes, on commence le déroulement de l'essai Marshall qui on détermine de celui-ci les paramètres suivants :

- La densité apparente de l'éprouvette.
- La densité vraie ou théorique (absolu) de l'éprouvette.
- Compacité de l'éprouvette.
- % des vides résiduels ou vides de l'éprouvette.
- % des vides occupé par l'air et le bitume (vide de l'agrégat)
- % des vides comblés par le bitume.
- Déformation ou fluage Marshall en mm.
- Stabilité Marshall en Kg.

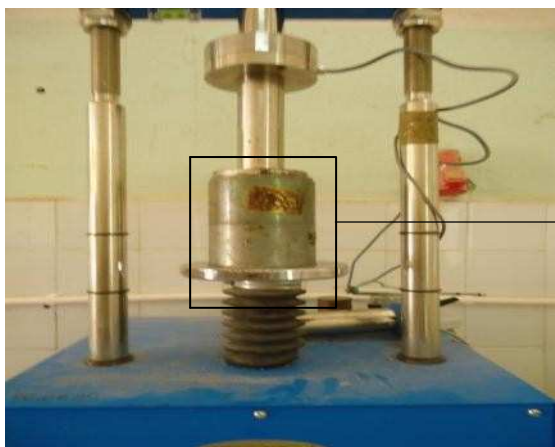


Photo V.5 : Opération de démoulage

V.2.3 Confection des éprouvettes pour l'essai Duriez (NFP 98-251-1)

L'éprouvette de Duriez est déterminée par confection d'une éprouvette cylindrique (**photo V.6**), d'une masse indicative de 1000 g, de 80 mm de diamètre et de 190 mm de hauteur.



Photo V.6 : Eprouvettes Duriez obtenues

- **Remplissage des moules et compactage :**

Un piston est placé à la partie inférieure du moule. On introduit le mélange en une seule fois dans le moule très légèrement enduit d'oléate de soude glycéro (les moules sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes 2 h au minimum) avant l'opération (**photo V.7**) Les moules pleins sont ensuite introduits dans une étuve dont la température à proximité à la température de référence, ils doivent y séjourner entre ½ h et 2 h.

On ajuste le cylindre plein et on porte le tout entre les plateaux de la presse. Le compactage des éprouvettes doit être réalisé par double effet (les opérations doivent être menées de manière à éviter au maximum les déperditions de température). On maintient la pression cinq minutes sachant que la charge appliquée est de l'ordre $60 \text{ KN} \pm 0,5\%$. Les éprouvettes sont conservées couchées dans leur moule au minimum 4 h jusqu'à retour à la température ambiante, puis elles sont démoulées.



Photo V.7 : Remplissage du moule



Photo V.8 : Opération de compactage

- **Démoulage :**

Le démoulage se fera à l'aide de la presse. Les éprouvettes extraites sont réparties en deux lots, les éprouvettes de premier lot (sont au nombre de 2) sont destinées pour déterminer la densité apparente et les éprouvettes de deuxième lot sont destinées pour l'essai de résistance à la compression. Les éprouvettes de deuxième lot sont réparti comme suit : deux éprouvettes se font sans immersion et les deux autres se font avec immersion le tout sont placées dans une armoire spéciale à $18^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pendant 7 jours. Les paramètres issus de cet essai sont :

- La densité apparente de l'éprouvette.
- La densité vraie ou théorique (absolue) de l'éprouvette.
- Compacité de l'éprouvette.
- % des vides résiduels ou vides de l'éprouvette.
- % des vides comblés par le bitume.
- La résistance à la compression " r " après immersion 7 jours à 18°C en Kg/cm^2 .
- La résistance à la compression " R " avant immersion à 18°C en Kg/cm^2 .
- Le rapport " r/R ".
- Le pourcentage d'imbibition W .

V.3 Equipement et Procédures d'essai

V.3.1 Essai Marshall :

Cet essai permet de mesurer en laboratoire, avec une température et une énergie de compactage données, la résistance d'une éprouvette à la déformation sous l'application graduelle d'une charge et la déformation subie par cette éprouvette au moment de sa rupture sous l'application de la charge maximale dite stabilité et fluage Marshall.

- **Principe de l'essai :**

L'essai de stabilité Marshall est un essai de compression exercée suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique semi-frettée (Figure V.2). Cette compression est appliquée sur l'éprouvette après $\frac{1}{2}$ heure d'immersion dans un bain d'eau à 60°C , et à la vitesse de $0,85 \text{ mm/s} \pm 0,1 \text{ mm/s}$.

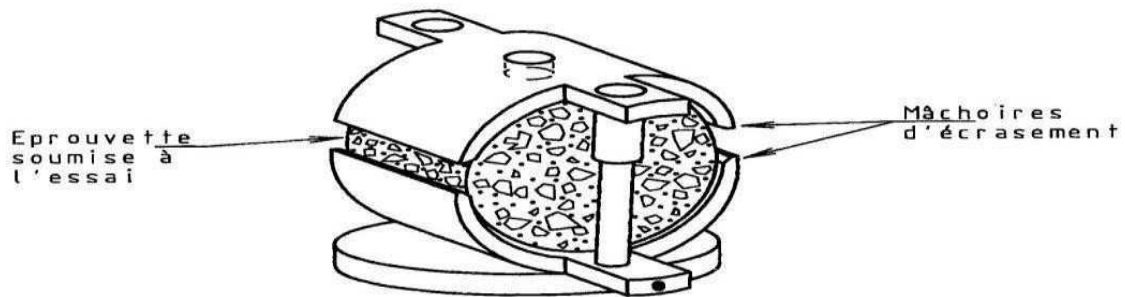


Figure V.2 : Principe de l'essai Marshall [19]

- **Déroulement de l'essai :**

Après confection des éprouvettes, une partie sera réservée pour déterminer la densité apparente et l'autre sera réservée pour déterminer la stabilité et le fluage.

On immerge les éprouvettes dans le bain thermostatique réglé à $60^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ avec les mâchoires d'écrasement pour une durée de 30 mn (± 1 mn).

Pendant ce temps, on installe également le dispositif contrôleur de cadence réglé pour une vitesse $0,85 \text{ mm/s} \pm 0,1 \text{ mm/s}$.

L'éprouvette est placée dans les mâchoires d'écrasement, l'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression. Ces opérations doivent être réalisées en moins d'une minute.

La rupture se produit au moment de l'arrêt de l'appareil puis on note les chiffres qu'indiquent l'écran de l'appareil (stabilité et fluage). Les mêmes étapes sont faites pour toutes les éprouvettes réalisées dans cette étude.



Photo V.9 : Le bain thermostatique



Photo V.10 : Eprouvette entre les mâchoires

V.3.2 Essai Duriez :

L'essai Duriez ou essai de compression-immersion ayant pour but de caractériser les qualités de résistance à la compression et résistance au désenrobage par l'eau des matériaux enrobés.

L'essai Duriez est réalisé sur les éprouvettes qui donnent des meilleures stabilités Marshall correspondant des teneurs en bitumes optimales.

- **Principe de l'essai:**

Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai sont fabriquées par compactage statique à double effet.

Les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression après conservation à 18 °C dans des conditions définies : à l'air pour certaines éprouvettes, en immersion pour d'autres durant 7 jours. La tenue à l'eau est caractérisée par le rapport des résistances avant ou après immersion.

- **Déroulement de l'essai:**

J Étant le jour de confection des éprouvettes, on commence la conservation sans immersion au jour J + 1. Les éprouvettes sont conservées à $18^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et dans une ambiance à $50\% \pm 10\%$ d'humidité relative pendant 7 j.

À jour J + 8, les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression, qu'elles aient été conservées avec ou sans immersion. Pour chaque éprouvette, le délai entre la sortie du dispositif de maintien en température et le début de l'écrasement est inférieur à 2 min. La vitesse du plateau de la presse est réglée à $1\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$. La résistance à la compression simple est déterminée à partir de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette d'essai exprimée en Kg, en divisant sur 50, on a la résistance à la compression exprimée en Kg/cm^2 qu'on s'appelle stabilité Duriez.

Les mêmes étapes sont faites pour toutes les éprouvettes réalisées dans cette étude. [17]



Photo V.11 : Les éprouvettes dans un bain normalisé de 18°C

V.4 Détermination de la densité apparente par pesée hydrostatique NFP 98-250-6

L'éprouvette prévue pour cette mesure est pesée après sa confection et après immergée dans un bain de paraffine fondue (photo (14)). Elle est repesée à la balance hydrostatique, d'abord dans l'air puis dans l'eau, suspendue à un fil métallique. Ces différentes pesées permettent le calcul de la densité apparente. Soit P_0 le poids de l'éprouvette avant paraffinage, P_1 : le poids de l'éprouvette après paraffinage, pesée dans l'air, P_2 : le poids de l'éprouvette après paraffinage, pesée dans l'eau.

La différence ($P_1 - P_2$) correspond au volume de l'éprouvette enduite.

Le volume de la paraffine se calcule, en considérant sa densité égale à 0.9, suivant la formule:

$$(P_1 - P_0)/0.9$$

- Le volume de l'éprouvette nue est donné par :

$$V_0 = (P_1 - P_2) - (P_1 - P_0)/0.9$$

- La densité apparente cherchée se déduit par :

$$\gamma_{app}(g/cm^3) = P_0/V_0$$



Photo V.12 : Eprouvettes paraffinées

V.5 Détermination de la densité théorique ou absolue

Soit :

- γ_{app} : la densité apparente de l'éprouvette.
- γ_b : la densité du bitume.
- γ_{S1} : la densité de sable 1.
- γ_{S2}, γ_{S3} ...celles des sables 2, 3...etc.
- P_b : le pourcentage en poids du bitume.
- P_{S1}, P_{S2}, P_{S3} ...ceux des sables.

Donc la densité absolue du matériau enrobé en (g/cm^3) :

$$\gamma_{abs} = \frac{100 + P_b}{\left(\frac{P_b}{\gamma_{sb}}\right) + \left(\frac{P_{s1}}{\gamma_{s1}}\right) + \left(\frac{P_{s2}}{\gamma_{s2}}\right) + \dots}$$

V.6 Détermination le pourcentage d'imbibition W (%)

Le pourcentage d'imbibition se calcule à partir de la formule :

$$W = \frac{100(P_h - P_0)}{P_0}$$

- P_0 : étant le poids de l'éprouvette avant immersion
- P_h : le poids de l'éprouvette imbibée après 7 jours d'imbibition.

V.7 Essais des agrégats utilisés

Dans notre étude nous avons utilisé les agrégats de carrière EL HMAIMA TEBESSA.



Photo V.13 : classes des agrégats utilisées

V.7.1 Masse volumique (NF P18-301)

- Masse volumique absolue :

Est la masse par unité du volume de la matière qui constitue le sable, sans tenir compte des vides qui peuvent prendre place entre les grains .La formule qui permet de calculer ce paramètre est :

$$\gamma_s = \frac{M}{V_s}$$

Tels que:

γ_s : La masse volumique absolue (g/cm^3)

M : La masse de l'échantillon (g)

V_s : Le volume absolu de l'échantillon (cm^3)

- Masse volumique apparente norme (NFP 94-064) :

Par définition la masse volumique γ_A d'un échantillon est le quotient de sa masse M par son volume V_a qu'il occupe :

$$\gamma_A = \frac{M}{V_a}$$

γ_A = La masse volumique apparente (g/cm^3)

M : La masse de l'échantillon (g)

V_a : Le volume apparent de l'échantillon (cm^3)

Les résultats se résument dans le tableau suivant pour les granulats utilisés:

Tableau V.1 : Masse volumique absolue et apparente des agrégats utilisés

Type d'agrégats	γ_s (g/cm^3)	γ_A (g/cm^3)
Gravier 3/8	2.660	1.317
Gravier 8/15	2.628	1.350

V.7.2 Analyse granulométrique (NFP 18-560)

Cet essai a pour objectif de déterminer la répartition des grains suivant leurs dimensions ou grosseurs pour les granulats supérieurs au diamètre 0,08 mm. Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés sous forme d'une courbe dite courbe granulométrique.



Photo V.14: machine d'analyse granulométrique

Tableau V.2 : Analyse granulométrique des graviers utilisés

Diamètre des tamis (mm)	Tamisât (%)	
	Gravier 3/8	Gravier 8/15
-	-	100
20	-	98
16	-	73
12.5	100	34
10	92	12
8	68	2
6.3	44	1
5	22	0
4	10	-
3.15	2	-
2.5	0	-
fond	0	-

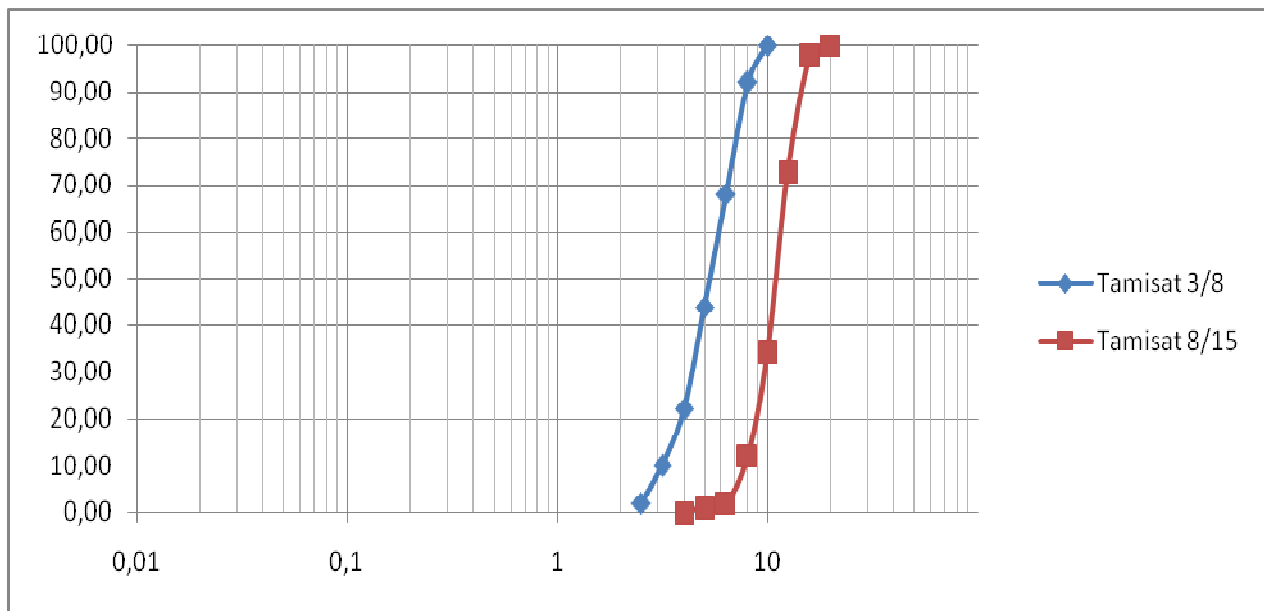


Figure V.3 : Courbe granulométrique

V.7.3 Propreté superficielle (NF P 18-591)

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral des particules inférieures à 0,5mm mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2mm. Ces particules sont séparées par lavage sur le tamis correspondant.

V.7.4 Essai d'aplatissement (NF P18-561)

Plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans la route ou dans les bétons est facile et plus ils sont fragiles. Il est donc important de contrôler le coefficient d'aplatissement des granulats. Ce coefficient permet de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

V.7.5 Essai Los Angeles (NF P 18-573)

Cet essai permet de déterminer la résistance aux chocs des granulats. Il simule les chocs des roues des véhicules sur une route. L'essai consiste à introduire des gravillons dans le cylindre de la machine Los Angeles. Lors de sa rotation, les granulats sont heurtés par des boulets plus lourds que les gravillons. La masse des éléments inférieurs à 1,6mm à la fin de l'essai donne la résistance aux chocs du granulat. Plus le résultat est faible, plus le granulat est résistant aux chocs.

V.7.6 Essai micro-deval (MDE) (NF P 18-572)

Cet essai permet de déterminer l'usure d'une chaussée sous l'effet de frottements (pneus des véhicules).

L'essai consiste à introduire des granulats dans le cylindre de la machine MDE, avec de l'eau et des billes de taille normalisée équivalente à celle des gravillons.

Lors de la rotation du cylindre, les gravillons frottent sur les billes. La masse des éléments inférieurs à 1,6mm à la fin de l'essai donne la résistance à l'usure du granulat. Plus le résultat est faible, plus le granulat est résistant à l'usure.

Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant:

Tableau V.3 : Caractéristiques des graviers utilisés

Les essais	3/8	8/15	Spécification
Essai de propreté	1.00	0.1	≤ 2%
Essai d'aplatissement	20	12.3	≤ 20%
Essai los Angeles	/	24.22	≤ 25%
Essai micro Deval	/	19.80	≤ 20%

Commentaires :

Après les essais sur les granulats, les résultats ont donné:

Les granulats de la carrière EL HMAIMA sont généralement acceptables.

V.8 Caractéristiques du bitume utilisé

Le bitume utilisé est un bitume pur de classe 40/50 provenant des fondoirs du la centre bitumes NAFTAL de Tébessa. Après les essais d'identification réalisés sur ce bitume dans le laboratoire LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'EST on a obtenu les résultats suivants :

Tableau V.4 : Caractéristiques de bitume utilisé

Essai	Unité	Référence norme	Résultat	Spécifications
Densité relative à 25°C	g/cm ³	NA 5224/ NTF 66-007	1.035	1.00 à 1.10
Pénétrabilité à l'aiguille en 25°C	1/10 mm	NA 5192/EN 1426 NTF 66-008	47	40 à 50
Point de ramollissement TBA	°C	NA 2617/EN 1427 NTF 66-008	55	47 à 60

- Commentaire :

Le bitume utilisé accepte bien aux caractéristiques de la classe 40/50 selon la norme NA 5265.

V.9 Description des mélanges étudiés

La formulation en Algérie est basée sur la vérification des caractéristiques des composants ainsi que sur les essais Duriez et Marshall en fonction des matériaux granulaires. On choisi une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait donner une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné. Les fractions granulaires sont choisies parmi les suivantes : 0/3, 3/8, 8/15, les caractéristiques des granulats sont représentés comme suit.

Tableau V.5 : Fuseau de spécifications 0/14

Tamis (mm)	Pourcentage de Passant	
	Minimum	Maximum
14	94	100
10	72	84
6.3	50	66
4	40	54
2	28	40
0.08	7	10

V.10 Détermination des mélanges a étudié

L'objectif visé est de caractériser la disposition granulaire du squelette minéral et choisir une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait conférer une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné.

Le mélange granulométrique utilisé permet d'obtenir un mélange d'enrobé type béton bitumineux (témoin) :

$$\text{Mélange (\%)} = \frac{\text{passant(\%)} \text{ des agrégat (\%)}}{100}$$

Les tableaux suivants présentent les différents pourcentages des agrégats obtenus :

Tableau V.6 : Pourcentages des agrégats utilisés (BB avec SJ)

Tamis	FILLERS	G 0/3	G 3/8	G 8/15	Mélange
20	100	100	100	100	100,0
16	100	100	100	98	99,4
12,5	100	100	100	73	91,6
10	100	100	100	34	79,5
8	100	100	92	12	70,5
6,3	100	100	68	2	60,7
5	100	100	44	1	53,6
4	100	100	22	0	47,2
3,15	100	99	10	0	36,1
2,5	100	99	2	0	28,7
2	100	98	0	0	22,9
1,25	100	95	0	0	17,2
0,63	100	44	0	0	10,8
0,315	100	5	0	0	6,3
0,16	100	3	0	0	4,2
0,08	99	1,4	0	0	3,1

Tableau V.7 : Composition granulair (BB ordinaire avec SJ)

Mélange Granulaire	Composition %
FILLERS	0
G 0/3	41
G 3/8	28
G 8/15	31

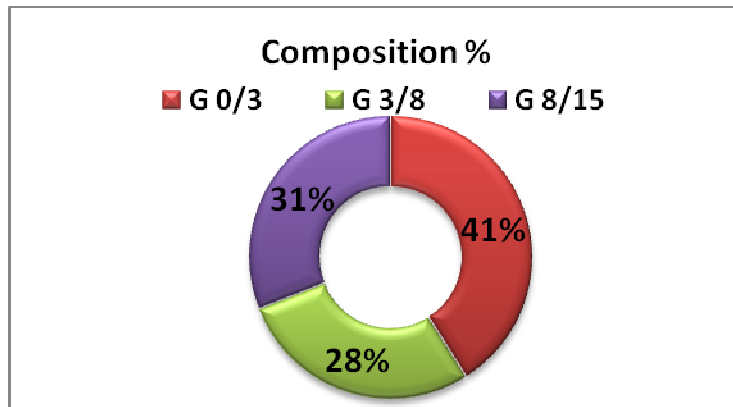


Figure V.4: Pourcentage des compositions SJ

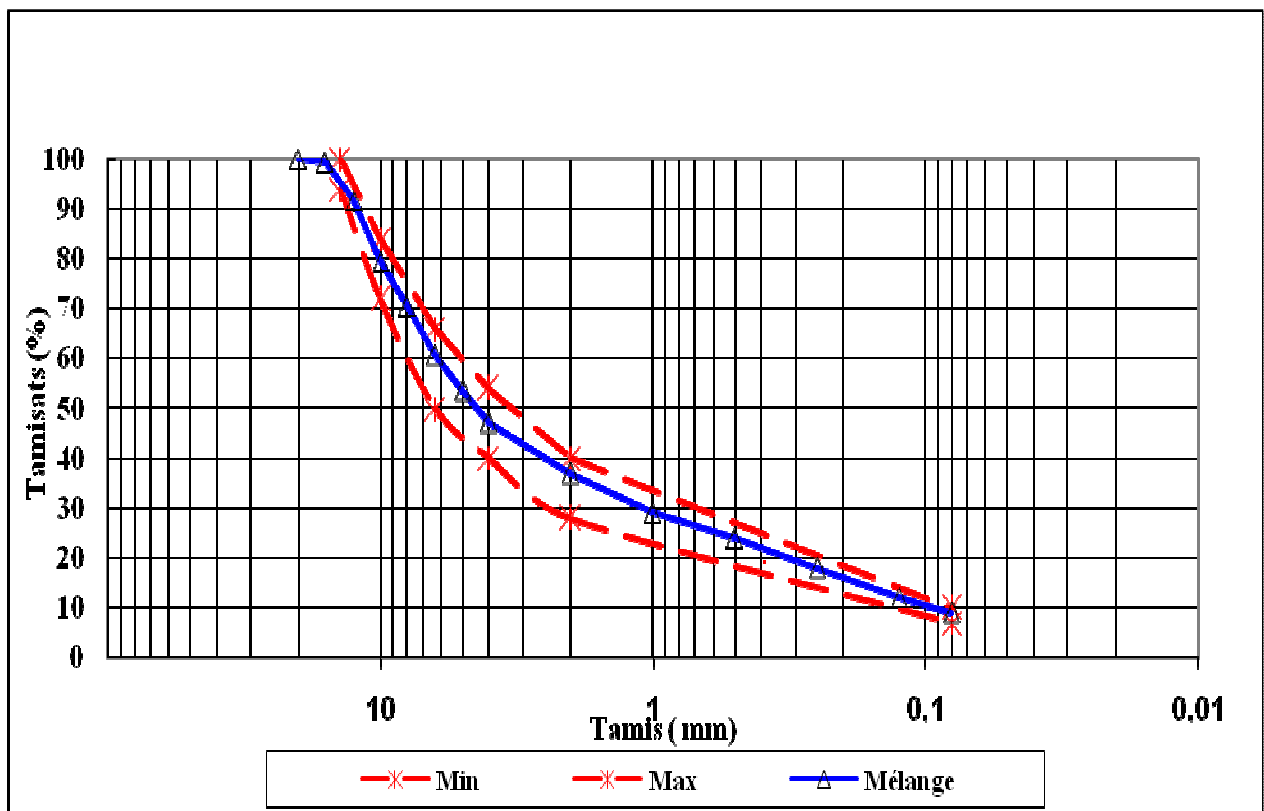


Figure V.5: Courbe granulométrique du mélange (BB avec SJ)

Tableau V.8 : Pourcentages des agrégats utilisés (BB avec SB)

Tamis	FILLERS	G 0/3	G 3/8	G 8/15	Mélange
20	100	100	100	100	100,0
16	100	100	100	98	99,4
12,5	100	100	100	73	91,6
10	100	100	100	34	79,5
8	100	100	92	12	70,5
6,3	100	100	68	2	60,7
5	100	100	44	1	53,6
4	100	100	22	0	49,1
3,15	100	100	10	0	37,2
2,5	100	99	2	0	30,0
2	100	97	0	0	23,5
1,25	100	65	0	0	18,3
0,63	100	9	0	0	11,6
0,315	100	4	0	0	7,4
0,16	100	2	0	0	4,9
0,08	99	1	0	0	2,8

Tableau V.9 : Composition granulaire (BB ordinaire avec SB)

Mélange Granulaire	Composition %
FILLERS	0
G 0/3	45
G 3/8	20
G 8/15	35

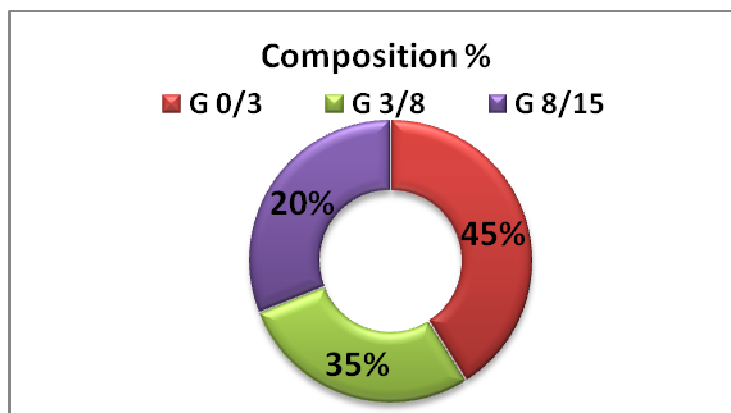


Figure V.6: Pourcentage des compositions SB

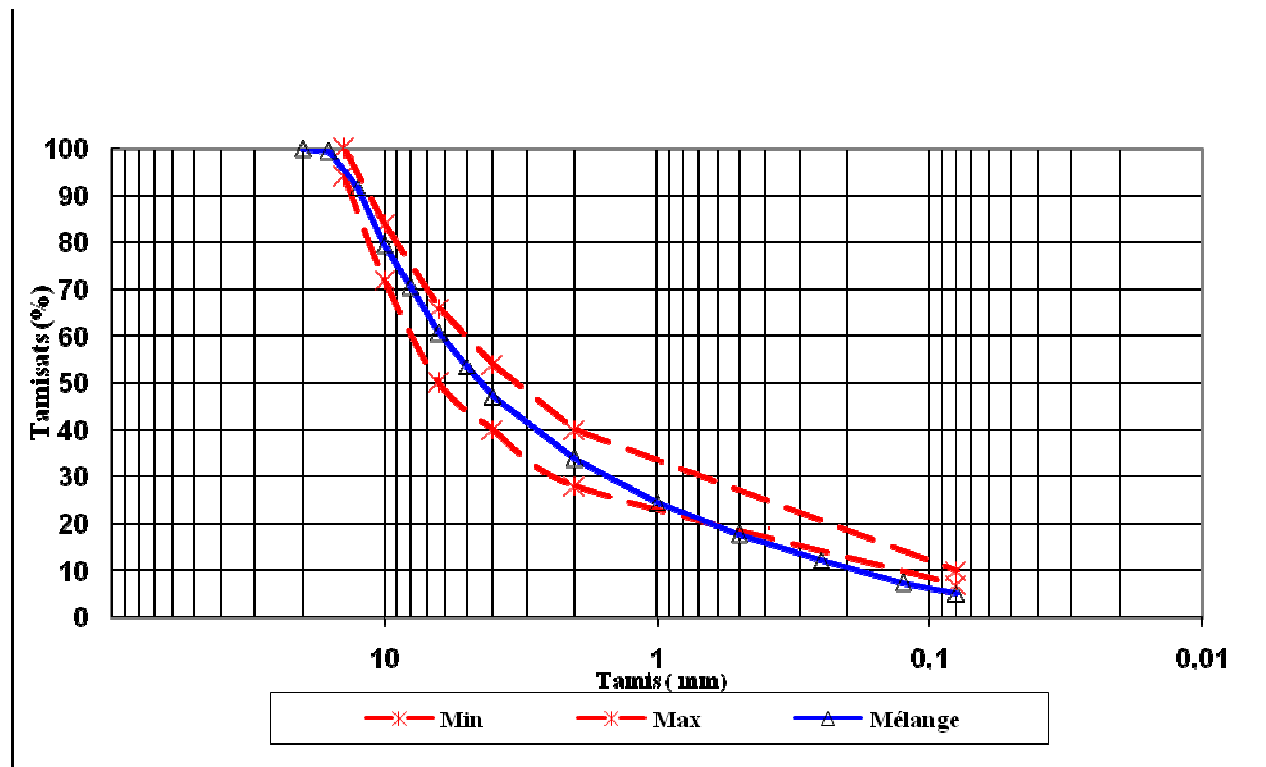


Figure V.7: Courbe granulométrique du mélange (BB avec SB)

Commentaires :

Selon les essais établis, et la formulation de béton bitumineux on a obtenu que le sable jaune est le plus favorable par rapport le sable blanc en raison du manque des fines dans le sable blanc.

V.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenter les principales étapes expérimentales pour connaître les propriétés mécaniques et expliquer les différents paramètres de chaque essai Marshall et Duriez.

Finalement, avec le type jaune de sable mines à zone de kef-Essnoun et les granulats (3/8,8/15) de la zone EL HMAIMA plus le liant hydrocarboné de type (bitume 40/50) ,on obtenus une bonne formulation du béton bitumineux appliqué sur la couche de roulement de route.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons effectué une caractérisation géotechnique des sables de la mine de Djebel-Onk (gisement de Kef-Essnoun) et comment valorisé ces matériaux dans la formulation de béton bitumineux. C'est pour résoudre des problèmes incluant la rapidité d'exécution des routes et pour raison d'économique, parce que le coût du transport des sables nécessaires à la réalisation des projets routiers intervient de manière très significative dans le prix de revient final des ouvrages.

Ce gisement se trouve à 100 Km au sud de la ville de Tébessa et à 20 Km de la frontière algéro-tunisienne sur la route nationale reliant Tébessa à El Oued.

Le gisement de Kef-Essnoun a situé à 5 Km à l'Ouest de la carrière de Djemi-Djema et à environ 10 Km au Sud Ouest de la ville de Bir El Ater. Il se trouve au pied de Djebel Kef-Essnoun constituant un plateau plongeant en pente douce vers le Sud-Ouest. Il s'étend sur une longueur de 2.8 Km et une largeur de 1 Km.

Ces sables sont des matériaux sédimentaires qui se trouvent sous plusieurs variétés de couches, les épaisseurs des ces couches sont variables et valent de loin jusqu'à plus de 300m de profondeur, dans la zone d'activité de Kef-Essnoun tous les sables sont de type moyen à grossier et sont déchargées et accumulées avec une énorme quantité qui est estimée à plus de 48234375 tonnes.

Le prélèvement des échantillons a été effectuée à partir de la zone I de la mine par la méthode d'échantillonnage de faible profondeur, cette méthode s'avère simple et utilise des équipements disponibles. Ces échantillons ont été ramenés vers le laboratoire de l'université de Larbi Tébessi - Tébessa.

Selon les essais réalisés sur le sable nous avons remarqué une petite différence dans les Caractéristiques des sables mines blanc et jaune.

Les essais micro Deval, et Los Angeles ont démontré que le gravier de EL HMAIMA est bon pour la réalisation des routes.

Dans le cadre du programme expérimental, les essais normalisés sont effectués dans des conditions bien définies de températures et de sollicitations.

✓ Après les essais sur les propriétés mécaniques, physiques et chimiques des deux types de sable et d'agrégats utilisés dans cette étude, a montré que les résultats sont acceptables pour les deux.

✓ Cette recherche montre la variabilité des résultats obtenus qui nous ont permis de conclure des Résultats affichés pour les mélanges utilisés dans la formulation BB 0/14 est résumée dans le tableau suivant qui donnée le pourcentage de chaque composant.

Formule granulaire pour le béton bitumineux BB 0/14		
	SB	SJ
0/3%	45	41
3/8%	35	28
8/15%	20	31

✓ Quant au test mécanique, nous n'avons pas pu le compléter en raison de la décision du Ministère de l'Enseignement Supérieur d'annuler le partie pratique des mémoires, ce qui nous a empêché d'obtenir la teneur en bitume du béton bitumineux BB 0/14.

Conclusion Générale

Recommandations

Notre étude qui traite la substitution d'une partie (pourcentage) du sable concassé par les sable mines dans la composition du béton bitumineux et qui a donnée des bons résultats satisfaisantes a aboutit sur les recommandations suivantes ;

- ✓ Une étude de l'évolution de la résistance mécanique avec le temps (résistance à long terme).
- ✓ D'étudier de façon suffisante d'autres types de sable locaux, surtout les sables mines des déférentes zones de djebel el Onk.
- ✓ D'exploiter le volume immense du sable locale pour améliorer les performances de notre réseau routier notamment dans l'est algérien.
- ✓ Impossibilité d'utiliser le sable seul avec le bitume dans les couches de surface des chaussées routières.
- ✓ Pour obtenir une bonne adhérence entre le sable et le béton bitumineux, il est recommandé une augmentation des fines .
- ✓ Suivez l'aspect économique dans le choix des matériaux.
- ✓ On recommande la poursuite des recherches et faire des plusieurs essais pour cet importance domaine.

Bibliographie

- [01]. FERPHOS Rapport technique de l'exploitation de la carrière de Djebel El Onk plan d'exploitation préliminaire du gisement de Bir el Ater rapport interne.
- [02]. **Dumon R.**, Le phosphore et les composés phosphorés (propriétés-utilisations), Edition Masson, France, 1980
- [03]. **Françoise, Francis A.**, Les gisements de phosphate de Gafsa, Tunisie., Mars 2013.
- [04]. **Camille A.**, Les vertébrés fossiles des gisements de phosphate : Maroc, Algérie, Tunisie. Paris 1952.
- [05]. **Douh CH**, traitement de stériles minières de (kef-Esnoun) aux liants hydraulique pour la couche de forme de chaussée, université de CHEIKH LARBI TEBESSI-Tébessa-, 2018, page 7.8
- [06]. **Saadoune A.**, Caractérisation et enrichissement du minerai phosphaté de Djebel Onk (W. TEBESSA), Mémoire de master Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Génie Minier, École Nationale Polytechnique Département de Génie Minier.2010.
- [07]. **Boucif R, Tamourt M.**, Étude de stabilité du flanc Nord de la mines de Kef Esnoun-Tébessa, Mémoire de master pour l'obtention du diplôme en Mines Option : Exploitation minière, Université Abed Erahmen Mira Bejaia, 2015.
- [08]. **Chabou-Mostefai S.**, Étude de la série phosphatée tertiaire du Djebel Onk, Algérie, Stratigraphie, Pétrographie, Minéralogie et Analyse Statistique, Thèse Doctoral, Université droit, d'économie et des sciences d'AIX-MARSEILLE, 1987
- [09]. **Boucif R, Tamourt M.**, 2015, Etude de stabilité du flanc Nord de la mine de Kef Esnoun-Tébessa, Université ABDERAHMANE-MIRA-Bejaia, 2015, P 58
- [10]. **Boudries A.**, Étude géologique et géostatistique de l'Uranium (U) dans le gisement de phosphate de Kef-Esnoun (Algérie orientale), Mémoire pour l'obtention du diplôme de MAGISTER ; Option Recherche et Prospection des Ressources Minérales et Énergétiques. Université Badji Mokhtar-Annaba, 2008.
- [11]. **Visse L.**, Le gisement de phosphate de chaux de Djebel Onk, Rapport interne, P 195
- [12]: **Lazar Khaled** : « CARACTERISATION ET VALORISATION DU SABLE DU GRAND ERG ORIENTAL ». Résumer mémoire de magister,U.S.T.H.B.
- [13] : **Rezig Salima** : « Optimisation de la formulation du béton de sable dans le cadre de valorisation des matériaux locaux », Université Mohamed Khider,Biskra.
- [14]. **Philippe Chevalier Jean-Christophe Van den Schrieck** : « Le sable naturel en Région Wallonne », Août 2011.
- [15]. **Tafraoui Ahmed** : « Contribution à la valorisation du sable de dune de l'erg occidental, (Algérie). Application aux nouveaux bétons »,THESE DE DOCTORAT, Université de Toulouse,2009.
- [16].SociétédesminesdephosphatesSOMIPHOSSpa.FilialedugroupeMANAL.Complexeminier de djebel Onk.DED.
- [17].**Helil.H ; Khoudja.N**, 2017 : « MEMOIRE DE MASTER en Génie Civil » (Etude d'un béton bitumineux à base de sables de dunes).
- [18].bétons bitumineux :[www.guidebeton.com/beton-bitumineux]
- [19].**Khengaoui Safia**, 2013 : « En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Génie Civil » (valorisation du sable de dunes en couche de roulement sable – bitume).
- [20].CTTP : Les Caracterisation D'un Enrobe A Base De Sable De Dune Par Les Essais Des 4 Niveaux De Formulation.
- [21]. **Brion, B., Brûlé, B.**, Etude des mélanges bitumes-polymères Composition-Structure Propriétés : Rapport des laboratoires série Physique chimie, PC 6, Juillet 1986

- [22]. **Olard, F., Di Benedetto, H., Eckmann, B.**, Bull. Liaison. Labo. P et Ch., P 252-253, 3 septembre 2004
- [23]. **Lesueur, D.**, Rhéologie, 2, 1, 2002
- [24]. **M. Merbouh**, (2010):«Contribution a la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux, Influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue», (Thèse Doct. Université BORDEAU 1, sciences technologies).
- [25]. Hauptstrasse 591 CH-4625 Oberbuchsitzen Solothurn Schweiz. www.impbautest.ch
- [26]. Magazine Bitume. Info Numéro special 1. Juin 2005. Disponible sur le site: www.bitume.info/rub_magazine_B1.htm
- [27]. **A.Boumadiane** : [Ingénieur Expert routier] « Les bétons bitumineux, Formulation; Exécution; Contrôle de qualité » (Le Laboratoire d'Expertise d'Essais et d'Etudes L3E).
- [28]. [www.google.com/enrobés bitumineux/PDF](http://www.google.com/enrobés_bitumineux/PDF); « les enrobés bitumineux», les éditions le griffon d'argile, mise à jour 2002. P 117.
- [29]. **Anouar-Abdelaziz** : ZEMMIRI ENTPE de Lyon - Certificat d'études supérieures 2008. www.memoireonline.com
- [30] www.hoskin.qc.ca.com
- [31]. **Martin, Pierre**. *La géotechnique: Principes et pratiques*. Paris: Masson mars1997.252p.
- [32]. **Dupain, R; Lanchon, R** ; Arroman, J.-C.Saint. Granulats sols, ciments et bétons: Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire. 3 ème Ed. Paris : Casteilla, aout 2004.P 236.
- [33] Société des Mines de Phosphate SOMIPHOS. Spa Capital social de Complexe Minier de Djebel Onk.