

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE

FACULTE DE GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER

En : **GENIE CIVIL**

Spécialité: construction

Par

Mme YAICI née ABERHOUCHE Nedjima

Thème

ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA PROPETE DU SABLE
SUR LES CARACTERISTIQUES MECANQUES ET
RHEOLOGIQUES D'UN ENROBE BITUMINEUX

Soutenu le : 09/06/2004, devant le jury suivant:

Mme F.KHARCHI

M.N.LARADI

M.S.HADDADI

M.D.BENOUAR

M.M.N.OUDJIT

Mme AIT MOKHTAR

Professeur USTHB.

Professeur USTHB.

Chargé de cours USTHB.

Professeur USTHB.

Chargé de cours USTHB.

Chargée de cours USTHB

Présidente

Directeur de thèse

Codirecteur de thèse

Examinateur

Examinateur

Examinatrice

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à Monsieur N.LARADI, Professeur à l'USTHB pour avoir dirigé ce travail et de m'avoir sans cesse prodigué des conseils et des encouragements permanents.

Ma reconnaissance va également à Monsieur S.HADDADI, Chargé de cours à l'USTHB, pour sa perpétuelle aide et ses nombreux conseils sans jamais ménager ses efforts. Je tiens vivement à le remercier.

Je remercie vivement Madame F.KHARCHI, Professeur à l'USTHB, qui me fait le grand honneur de présider le jury de cette thèse.

J'adresse mes remerciements à Monsieur D.BENOUAR, Professeur à l'USTHB qui me fait l'honneur de faire partie du jury, qu'il trouve ici, l'expression de notre profonde reconnaissance.

Mes sincères remerciements sont adressés à Monsieur N.ODJIT, Chargé de cours à l'USTHB, pour ses conseils et qui a accepté de faire partie du jury de cette thèse.

Je tiens aussi à adresser mes remerciements à Madame K.AIT MOKHTAR, Chargée de cours à l'USTHB non seulement pour ses orientations et ses conseils mais également pour avoir bien voulu faire partie du jury .

Je tiens aussi à adresser mes sincères remerciements à Monsieur DJADOUN, Chargé de cours à la faculté des Sciences et de la Terre (USTHB) pour sa collaboration, ainsi qu'à tous les responsables, ingénieurs et techniciens du Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP) d'Hussein Dey et plus particulièrement à Messieurs BOUKEROU, BENSAIBI et EFFENDI.

J'adresse également mes remerciements aux responsables et ingénieurs de l'Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics (CTTP) de Kouba ainsi que les responsables et les techniciens du Laboratoire de la SONATRO de Réghaia .

Enfin, que toutes les personnes qui ont apporté leur aide à la réalisation de ce travail, trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements.

Résumé

Le présent travail rentre dans le cadre de l'utilisation des matériaux pollués dans les mélanges bitumineux.

Les chaussées en général, sont soumises à des agressions dues aux changements climatiques, aux intempéries et au trafic routier, ce qui provoque une détérioration des couches qui les composent.

Afin de palier à ce problème qui se pose avec acuité en Algérie, nous proposons d'étudier l'influence de la propreté du sable sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques d'un enrobé bitumineux.

Dans une première étape, on évalue l'influence de la pollution des sables et l'effet de leurs traitements sur les propriétés mécaniques des enrobés ; et dans une seconde étape, on s'intéresse à leurs effets sur leurs déformations permanentes .

Les résultats obtenus confirment l'amélioration sensible des caractéristiques des enrobés mis en œuvre.

Summary

This work is concerned with the use of materials polluted in the bituminous mixtures.

Roadways are in general subjected to aggressions dues to climatic changes, bad weather and road traffic which cause deterioration of the layers which compose them.

In order to solve this problem which arises acuity in Algeria, it is proposed to study the influence of the cleanliness of sand on the mechanical and rheological characteristics of a bitumen binder.

In a first stage one evaluates the influence of the pollution of sands and the effect of their treatments on the mechanical properties of the bituminous mix.

In a second stage, one is interested in their effect on permanent deformations.

The results obtained confirm a noticeable improvement of the characteristics of the bituminous mix.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I. LES FACTEURS INFLUANCANT LA PROPETE DES GRANULATS	4
INTRODUCTION	4
I.1. LES POLLUTIONS AU NIVEAU DES CARRIERES	4
I.2. LES INSTALLATIONS DE TRAITEMENT	5
I.2.1. Elimination avant le concasseur primaire	6
I.2.2. Elimination avant et après le concasseur primaire	6
I.3. TRAITEMENT DES GRANULATS PAR VOIE HUMIDE	6
I.3.1. Le lavage des granulats	7
I.3.2. Le lavage des sables	8
I.4. FACTEURS INFLUENCANT LA PROPETE DES GRANULATS	8
I.4.1. La qualité de la roche au niveau d'un gisement	8
I.4.2. Le fonctionnement de la chaîne d'élaboration	9
I.5. INFLUENCE DES CONCASSEURS SUR LA QUALITE	9
I.6. INFLUENCE DU STOCKAGE SUR LA QUALITE DES GRANULATS	10
I.6.1. Pollution et contamination	11
I.6.2. Solutions proposées pour éviter ces phénomènes	11
I.7. ANOMALIES GENERATRICES DE NON-QUALITE RELEVES PAR L'AUDIT.	12
I.8. CONCLUSION	12
CHAPITRE II. TRAITEMENT DES SABLES AUX LIANTS HYDRAULIQUES	13
INTRODUCTION	13
II.1. LES TECHNIQUES DE TRAITEMENT	13
II.1.1. L'amélioration	14
II.1.2. La stabilisation	14
II.2. LES SABLES TRAITES AU CIMENT	14
II.2.1. Domaine d'emploi	14
II.2.2. Caractéristiques des sables	14
II.2.3. Constatation concernant ce traitement	16
II.2.4. Traitement d'un sable pollué au ciment	16
II.2.5. Inconvénients du traitement au ciment	16
II.3. TRAITEMENT A LA CHAUX	17
II.4. TRAITEMENT MIXTE	17
II.5. TRAITEMENT AU LAITIER	18
II.5.1. Domaine d'emploi	18
II.5.2. Caractéristiques de la technique	18
II.6. LE TRAITEMENT AUX CENDRES VOLANTES	18
II.7. COMPORTEMENT DES SABLES TRAITES AUX LIANTS HYDRAULIQUES	19
II.7.1. Sables améliorés	19
II.7.2. Sables stabilisés	19
II.8. SOLUTIONS PROPOSEES AFIN DE REDUIRE LES FISSURES.	20
II.8. CONCLUSION	21
CHAPITRE III. ETUDE EN LABORATOIRE DE LA RESISTANCE AU FLUAGE DES ENROBES BITUMINEUX.	22
INTRODUCTION	22
III.1. FACTEURS PROVOQUANT LE FLUAGE DES ENROBES BITUMINEUX	22
III.2. AMELIORATION DE LA TENUE AU FLUAGE	22
III.3. ESSAIS TRIAXIAUX DE FLUAGE DYNAMIQUE	23

III.3.1. Essai avec contrainte latérale cyclique	23
III.3.2. Essai avec contrainte latérale constante	24
III.4. ESSAI DE FLUAGE DYNAMIQUE A L'HYDROPULSATEUR	25
III.5. ESSAI DE FLUAGE AU SIMILATEUR DE TRAFIC	27
III.6. ESTIMATION DU FLUAGE PAR L'ESSAI DE PRESSE A CISAILLEMENT GIRATOIRE	28
III.6.1. Etude du plan K_1, C_1	30
III.6.2. Comparaison des résultats obtenus à la PCG et au simulateur de trafic	30
III.7. COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS PAR LES DIFFERENTS ESSAIS	30
III.7.1. Effet du mode de compactage sur le comportement des enrobés bitumineux	30
III.7.1.1. Essai Marshall.	31
III.7.1.2. Essai de fluage statique.	31
III.7.2. Corrélation des résultats obtenus avec les différentes méthodes d'étude du comportement à l'orniérage	32
III.8. CONCLUSION	33
CHAPITRE IV. ETAT ACTUEL DE LA RECHERCHE	34
INTRODUCTION	34
IV.1. SUBSTANCES POLLUANT LES GRANULATS	34
IV.1.1. Pollution physique	34
IV.1.2. Pollution chimique	34
IV.1.3. Les hétérogénéités	35
IV.2. RECHERCHE DES ARGILES DANS LES SABLES	35
IV.2.1. L'association ES et VB	36
IV.3. MISE EN EVIDENCE DE LA NOCIVITE DES ARGILES PAR L'ESSAI AU BLEU DE METHYLENE TURBIDIMETRIQUE	37
IV.4. INFLUENCE DE L'AJOUT DE FINES DE TYPES CALCAIRES ET ILLITIQUES SUR UNE GRAVES-CIMENT	39
IV.5. NOCIVITE DES FINES ARGILEUSES AU REGARD DES PERFORMANCES D'UN ENROBE A CHAUD	41
IV.5.1. Nocivité des matériaux argileux .	42
IV.5.2. Influence de la pollution argileuse sur les performances de l'enrobe.	43
IV.5.2.1. Formulation du béton bitumineux.	43
IV.5.2.2. Formulation du sable bitume	44
IV.5.2.3. Interprétation des résultats	44
IV.5.3. Les seuils de spécifications granulats-enrobes.	45
IV.6. INFLUENCE DU LAVAGE SUR LE COMPORTEMENT DES ENROBES BITUMINEUX	46
IV.6.1. Influence du lavage et du calibrage des granulats sur les caractéristiques mécaniques	47
IV.6.2. Influence du lavage sur le comportement des enrobés bitumineux en compression simple.	47
IV.7. EFFET DES MINERAUX ARGILEUX SUR L'ENROBAGE PAR DU BITUME	49
IV.8. EFFET DE LA CHAUX SUR L'ENROBE BITUMINEUX	51
IV.9. COMPORTEMENT DES BETONS BITUMINEUX EN FLUAGE STATIQUE.	53
IV.10. CONCLUSION	57
CHAPITRE V. PRESENTATION DES MATERIAUX	58
INTRODUCTION	58
V.1. LES ESSAIS EFFECTUES SUR LES GRANULATS	58
V.1.1. Analyse granulométrique	58
V.1.2. Résistance à l'usure ou attrition	60

V.1.3. Résistance au choc	60
V.1.4. Mesure du coefficient d'aplatissement	60
V.1.5. Mesure des densités spécifiques des granulats	60
V.1.6. Analyse chimique sommaire	61
V.1.7. Mesure de la pollution	61
V.1.7.1. Détermination de la propreté superficielle	62
V.1.7.2. Indice de plasticité	62
V.1.7.3. L'essai d'équivalent de sable à 10% de fines	62
V.1.7.4. Essai au bleu de méthylène	63
V.2. IDENTIFICATION DES MATERIAUX ARGILEUX	63
V.2.1. Diffraction aux rayons X	64
V.3. ANALYSE DE LA CHAUX	65
V.3.1. Analyse par diffraction aux rayons X	65
V.3.2. Analyse chimique sommaire	66
V.4. RESULTATS DES ESSAIS EFFECTUES SUR LE BITUME.	66
V.4.1. Pénétrabilité	66
V.4.2. Point de ramollissement	67
V.4.3. Densité	67
V.4.4. Perte de masse au chauffage	67
V.4.5. Point d'éclair, point de feu	67
V.4.6. Susceptibilité thermique	67
V.5. CONCLUSION	69
CHAPITRE VI. FORMULATION DE L'ENROBE BITUMINEUX	70
INTRODUCTION	70
VI.1. METHODES DE FORMULATION DES ENROBES BITUMINEUX	70
VI.1.1. Composition granulométrique du mélange	70
VI.1.2. Teneur en liant hydrocarboné	71
VI.2. ESSAI MARSHALL	72
VI.2.1. Mesures effectuées à partir de l'essai Marshall.	72
VI.2.2. Résultats expérimentaux	73
VI.3. ESSAI DURIEZ	76
VI.3.1. Principales mesures effectuées.	76
VI.3.2. Résultats expérimentaux	77
VI.4. CONCLUSION	79
CHAPITRE VII. EFFET DES FINES ARGILEUSES SUR LES CARACTERISTIQUES MECANQUES DE L'ENROBE BITUMINEUX	80
INTRODUCTION	80
VII.1. INFLUENCE DES FINES ARGILEUSES SUR LES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SABLE POLLUE	80
VII.2. EFFET DES FINES ARGILEUSES SUR LES CARACTERISTIQUES MECANQUES DE L'ENROBE HYDROCARBONE.	81
VII.2.1. Formulation de l'enrobés bitumineux avec du sable pollué.	81
VII.2.2. Résultats de l'essai Marshall	82
VII.2.3. Résultats de l'essai Duriez	83
VII.3. CONCLUSION	87

CHAPITRE VIII. EFFET DU TRAITEMENT DES SABLES POLLUES SUR LES PERFORMANCES MECANIQUES DE L'ENROBE BITUMINEUX	88
INTRODUCTION	88
VIII.1. EFFET DU TRAITEMENT SUR LES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SABLE POLLUE.	89
VIII.1.1. Influence de la chaux sur la propreté.	89
VIII.1.2. Influence du sable propre sur la propreté.	91
VIII.2. FORMULATION DE L'ENROBE BITUMINEUX TRAITES .	93
VIII.2.1. Détermination et ajustement des courbes du mélange.	93
VIII.2.1.1. Influence de la chaux	93
VIII.2.1.2. Influence du sable propre.	95
VIII.2.2. Détermination des teneurs en liants	95
VIII.2.2.1. Influence de la chaux	95
VIII.2.2.2. Influence du sable propre	95
VIII.3. INFLUENCE DU TRAITEMENT SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES.	96
VIII.3.1. Résultats de l'essai « Marshall »	96
VIII.3.1.1. Influence de la chaux	96
VIII.3.1.2. Influence du sable propre	99
VIII.3.2. Résultats de l'essai Duriez	102
VIII.3.2.1. Influence du traitement sur la résistance à la compression à sec.	102
VIII.3.2.2. Influence du traitement sur les résistances à la compression en immersion	103
VIII.3.2.3. Influence du traitement sur le rapport immersion-compression.	105
VIII.3.2.4. Influence du traitement sur le gonflement volumétrique.	106
VIII.3.2.5. Influence du traitement sur les vides résiduels de l'enrobé bitumineux	108
VIII.3.3. INFLUENCE DES INDICES DE PROPETE SUR LE RAPPORT IMMERSION-COMPRESSION.	109
VIII.3.3.1. Influence de l'équivalent de sable sur le rapport immersion-compression	109
VIII.3.3.2. Influence de la valeur au bleu sur le rapport immersion-compression.	110
VIII.4. CONCLUSION	112
CHAPITRE IX. ESSAI DE FLUAGE EN COMPRESSION SIMPLE	113
INTRODUCTION	113
IX.1. DESCRIPTION DE L'ESSAI	113
IX.2. APPAREIL DE FLUAGE STATIQUE UNIAXIAL	114
IX.3. APPAREIL UTILISE	115
IX.4. CONDITIONS DE L'ESSAI	116
IX.5. EXECUTION DE L'ESSAI	116
IX.6. LA CONTRAINTE APPLIQUEE	117
IX.7. BUT DE L'ESSAI	117
IX.8. EXPLOITATION DE L'ESSAI	117
CHAPITRE X. EFFET DES TRAITEMENTS SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS BITUMINEUX EN FLUAGE STATIQUE	119
INTRODUCTION	119
X.1. COURBES DE FLUAGE STATIQUE.	119
X.1.1. Influence de la température sur le fluage statique de l'enrobé	119
X.1.1.1. Traitement à la chaux	120

X.1.1.2. Traitement avec du sable propre	121
X.1.2. Influence des différentes formulations sur le fluage statique de l'enrobé.	123
X.2. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES DEFORMATIONS ET LES MODULES DE RIGIDITE.	126
X.2.1. Déformation initiale.	126
X.2.2. Module de rigidité initiale.	127
X.2.3. Déformation totale.	128
X.2.4. Module de rigidité totale	130
X.2.5. Déformation finale.	131
X.2.6. Variation de la déformation irréversible (permanente)	132
X.2.7. Déformation réversible	134
X.2.8. Variation du recouvrement viscoélastique (RVE)	135
X.2.9. Variation de la déformation initiale et de la déformation finale comme pourcentage de la déformation totale	137
X.3. CONCLUSION	138
CONCLUSION GENERALE	139
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	144
ANNEXES	151
ANNEXE 1	
ANNEXE 2	
ANNEXE 3	
ANNEXE 4	
ANNEXE 5	
ANNEXE 6	
ANNEXE 7	

INTRODUCTION GENERALE

Etant le constituant essentiel des matériaux utilisés en technique routière, les granulats pour enrobés bitumineux performants, commencent à poser de sérieux problèmes de disponibilité surtout dans les régions géologiquement défavorisées en matériaux nobles.

Une attention particulière doit être accordée au contrôle de la qualité de ces granulats. L'Etat investit énormément dans la construction des ouvrages qui se dégradent continuellement. Cette dégradation est souvent due à la mauvaise qualité des granulats.

Il devient urgent de mettre en œuvre une politique nationale des granulats axée sur la qualité, qui prendra en charge tous les problèmes d'amont en aval et ce, afin de rendre rationnelle et optimale leur utilisation et favoriser la construction de routes durables, confortables et sûres pour l'utilisateur.

Cette politique est primordiale, car les voies de communication en général et les routes en particulier, sont aujourd'hui des facteurs de développement et de modernité.

Dans ces dernières années, la croissance du trafic par camion a mis davantage à l'épreuve les réseaux routiers. Il apparaît donc nécessaire d'approfondir les études menées sur les matériaux de chaussées et en particulier, le bitume, les granulats et les enrobés bitumineux. Un effort important se concentre dans la compréhension, aussi bien en laboratoire que sur la route, de la performance des enrobés bitumineux dans les chaussées telle que la résistance à l'orniérage, la résistance à la fatigue, etc..

Dans un projet de construction routière, une grande attention doit être accordée aux matériaux constituant la chaussée pour que celle-ci réponde aux exigences de la nature elle-même et à celle des usagers pour une sécurité plus grande et une pérennité de l'ouvrage dans une approche de développement durable.

Lors de la formulation en laboratoire d'un enrobé bitumineux, les granulats et le sable qui le composent, doivent répondre à des qualités bien spécifiques pour garantir des caractéristiques mécaniques acceptables.

Malheureusement dans notre pays, la propreté des granulats en générale et du sable en particulier, est ignorée, ce qui influe négativement sur les performances du produit fini.

C'est dans ce contexte que se situe notre travail, c'est à dire l'étude de l'influence de la propreté du sable sur les caractéristiques mécaniques d'un enrobé bitumineux. Nous avons pour cela, étudié dans un cadre expérimental, l'influence des paramètres de composition sur le comportement mécanique des enrobés bitumineux. Les propriétés mécaniques et rhéologiques étudiées sont évaluées par les essais Marshall et Duriez ainsi que l'essai de fluage à la compression uniaxial.

Notre travail se divise en cinq parties.

Dans la première partie, nous avons entrepris une étude bibliographique s'intéressant d'une part, aux paramètres influençant la pollution des matériaux au niveau des gisements et la présentation des installations permettant d'améliorer la qualité des granulats et d'autre part, aux traitements des sables utilisés en technique routière aux liants hydrauliques.

La seconde partie traite de l'étude de la résistance des enrobés bitumineux au fluage. Les principaux essais utilisés dans les laboratoires de recherche, sont passés en revue et ce, afin de comparer les paramètres fournis par les différents dispositifs d'essais et nous avons également développé quelques études et recherches liées à la nocivité des

fines sur les caractéristiques géotechniques et mécaniques des mélanges hydrocarbonés.

La troisième partie est consacrée à la présentation des matériaux à savoir, les sables employés, les granulats, la chaux et le bitume, ainsi qu'à la formulation des enrobés bitumineux.

La quatrième partie traite de l'étude expérimentale de l'influence des paramètres de composition .

Nous avons étudié l'influence de plusieurs facteurs à savoir :

- la nature des fines (argileuses et calcaires).
- La teneur en chaux.
- La teneur en sable propre.

Et ce, pour évaluer d'une part, les caractéristiques de propreté des sables traités et d'autre part, les paramètres de qualité des enrobés bitumineux.

La dernière partie est consacrée à l'étude expérimentale du comportement en fluage statique des bétons bitumineux.

Nous rappelons dans un premier lieu, l'appareillage utilisé pour réaliser l'essai ainsi que les paramètres à déterminer. Dans un second lieu, nous présentons les résultats obtenus sur les mélanges en faisant varier également plusieurs paramètres à savoir :

- La nature des fines.
- La teneur en chaux .
- Le pourcentage de sable propre
- La température.

Nous terminons cette partie par des interprétations détaillées de tous les résultats obtenus.

CHAPITRE I

LES FACTEURS INFLUANCANT LA PROPRETE DES GRANULATS

INTRODUCTION

Etant devenus très important pour la réalisation des grands travaux routiers, portuaires, d'habitat et hydrauliques, les besoins en granulats ont eu pour conséquence un déséquilibre entre l'offre et la demande, lequel a fait naître une multitude de petites carrières, mal exploitées et fonctionnant sans qu'aucune étude sérieuse n'ait été faite au préalable.

Cette situation a engendré une production de granulats de mauvaise qualité, laquelle s'est répercutée inévitablement sur la qualité des ouvrages, notamment les routes.

La présente étude permet de donner des indications sur les caractéristiques qualitatives des matériaux tels que :

- Les différentes pollutions.
- La composition minéralogique (pour identifier et déceler la présence de minéraux altérés).
- Les caractéristiques mécaniques (la dureté qui permet d'orienter le choix des appareils de concassage-criblage).

De même, elle conditionne beaucoup les exigences attendues des granulats à savoir :

La qualité, l'homogénéité et la permanence.

Ces exigences dépendent en grande partie de la pureté de la roche exploitée et des installations de traitement.

1.1. LES POLLUTIONS AU NIVEAU DES CARRIERES [3], [31].

La nature entrave les efforts de tous les intervenants qui participent à l'élaboration des sables et granulats qui doivent répondre aux exigences de la qualité.

• Pollution liée à la genèse du massif

Dans les massifs calcaires, cette pollution correspond essentiellement à :

- Des intercalations de lits argileux ou de lentilles de nature différente du faciès d'ensemble et une altération superficielle.
- Des fissures verticales et des poches de dissolution contenant de l'argile. Ces phénomènes qui sont relativement fréquents, influent directement sur l'état du matériau après abattage.

La propreté des gravillons et du sable par temps humide, est gravement affectée, les blocs sont entourés d'une gangue argileuse entraînant un colmatage des cribles des équipements d'élaboration.

Il n'existe aucun procédé susceptible d'atténuer les conséquences de l'extraction des matériaux de faille à l'exception du lavage.

- **Pollution «accidentelle» .**

La présence de zones très fracturées ou même broyées, peut considérablement gêner une exploitation. Ces zones correspondent très généralement à des matériaux très altérés et impropres à l'utilisation.

Compte tenu des caractéristiques qualitatives des matériaux, les gisements ont été classés en trois catégories [23], [58] :

- ❖ La zone de bonne qualité (présence de moins de 10% d'altération et/ou de minéraux indésirables tels que les argiles et les roches tendres) permet l'utilisation de ces granulats pour tout emploi.
- ❖ La zone de qualité moyenne (présence de 10 à 30% d'altération et/ou de minéraux indésirables) permet leur utilisation en béton hydraulique et assises de chaussée.
- ❖ La zone de mauvaise qualité ou hétérogénéité du gisement (plus de 30% d'altération et/ou de minéraux indésirables) ne permet un emploi normal que sous réserve d'une sélection des parties les plus favorables du gisement ou d'un effort particulier d'élaboration pour éliminer les matériaux les plus tendres, lavage, etc.).

I.2. LES INSTALLATIONS DE TRAITEMENT [1], [2], [3], [6].

Dans une carrière, la pollution se situe à trois niveaux :

- La découverte qui est mal décapée, peut entraîner une pollution généralisée d'un abattage de roche saine.
- Les poches d'argiles qu'il y aura lieu de purger pour éviter l'inconvénient cité plus haut.
- Une pollution diffuse inter stratifiée qu'on retrouve dans les gisements sédimentaires.

Dans les deux premiers cas, l'essentiel de la pollution peut être éliminé par une extraction bien conduite ou par des éliminations au niveau du poste primaire.

Dans le troisième cas, l'élimination est plus difficile dans la mesure où on fait appel au traitement par voie humide.

Une installation de traitement permettant d'obtenir la qualité des matériaux exigés, ne peut être conçue qu'à partir d'une bonne connaissance du gisement.

On s'intéresse à l'élimination des impuretés contenues dans le banc lui-même et provenant du remplissage argileux de fissures ou d'altérations très localisées.

Il est impératif de prévoir un pré-criblage qui est fonction de la granularité du tout venant de la carrière et de sa teneur en éléments argileux dont la présence est indésirable dans un agrégat de qualité et qu'il faut éliminer le plus vite possible avant le concassage.

Ce pré-criblage peut être complété d'un criblage ou d'un lavage pour récupérer les bons matériaux contenus dans les stériles.

L'adoption d'un post-criblage est également recommandée après le concasseur primaire afin d'affiner le matériau en propreté.

ARCHIMBAUD [2] propose deux dispositions constructives :

- ❖ Elimination des stériles avant le concasseur primaire.
- ❖ Elimination des stériles avant et après le concasseur primaire.

I.2.1. Elimination avant le concasseur primaire

Outre l'extraction des stériles, elle permet de soulager le concasseur et d'éviter de polluer les blocs s'y trouvant.

- ❖ Traitement des matériaux avec peu d'éléments fins à éliminer : un pré-crible équipé de deux claies, permet d'obtenir l'extraction totale d'un (O/D) ou d'un (O/d) et par le canal d'un by-pass la tranche (d/D) si celle-ci, est acceptable [Annexe 4].
- ❖ Traitement des matériaux avec beaucoup d'éléments fins à éliminer: il est nécessaire d'opérer avec deux étages de traitement :
Un pré-crible équipé d'une seule surface criblante (D) compatible avec la taille et la quantité de matériaux indésirables à extraire pour avoir la quasi-certitude d'éliminer la totalité des stériles.
Les matériaux (O/D) peuvent être traités par voie sèche ou par voie humide avec éventuellement, l'utilisation d'un laveur débourbeur suivant la nature des éléments de pollution et les possibilités locales en eau [Annexe 4].

Comme dans le cas précédant, il est possible d'envisager l'utilisation des cribles de classement pour la suite des opérations suivant leur degré de propreté.

I.2.2. Elimination avant et après le concasseur primaire

Dans le cas les plus difficiles ou le tout venant contient une forte quantité d'éléments fins avec des blocs recelant des inclusions argileuses, il est nécessaire d'introduire un post-criblage dans le circuit qui permet d'éliminer les indésirables concentrés dans les fines de concassage. [Annexe 4] représente le cas d'un traitement par voie sèche.

I.3. TRAITEMENT DES GRANULATS PAR VOIE HUMIDE [1], [3].

Le traitement des granulats par voie humide, vise à améliorer la propreté des granulats par un lavage qui entraîne et élimine les produits polluants, notamment les fines argileuses.

Ce traitement permet de détacher grâce à des moyens mécaniques, hydrauliques ou vibratoires, les éléments fins agglomérés entre eux ou collés à la surface des granulats afin de les éliminer avec l'eau.

En fonction de l'importance et de la nature de la pollution des matériaux, les actions de lavage qui sont susceptibles d'être incorporées à différents niveaux de traitement, peuvent être :

- Simples comme le rinçage succinct sur crible.
- Complexes avec plusieurs opérations de traitement réalisées par des appareils tels que : débourbeur, cellule d'attrition, roue laveuse, etc.

D'une manière schématique, on peut représenter les circuits de lavage ou de classification par voie humide, en trois étapes :

- Mise en contact de l'eau propre avec les matériaux pour mettre en suspension les éléments polluants.
- Séparation des produits grenus et fins des eaux chargés.
- Décantation des eaux de rejet pour les clarifier avec une «production» inévitable de boues (figure I.1).

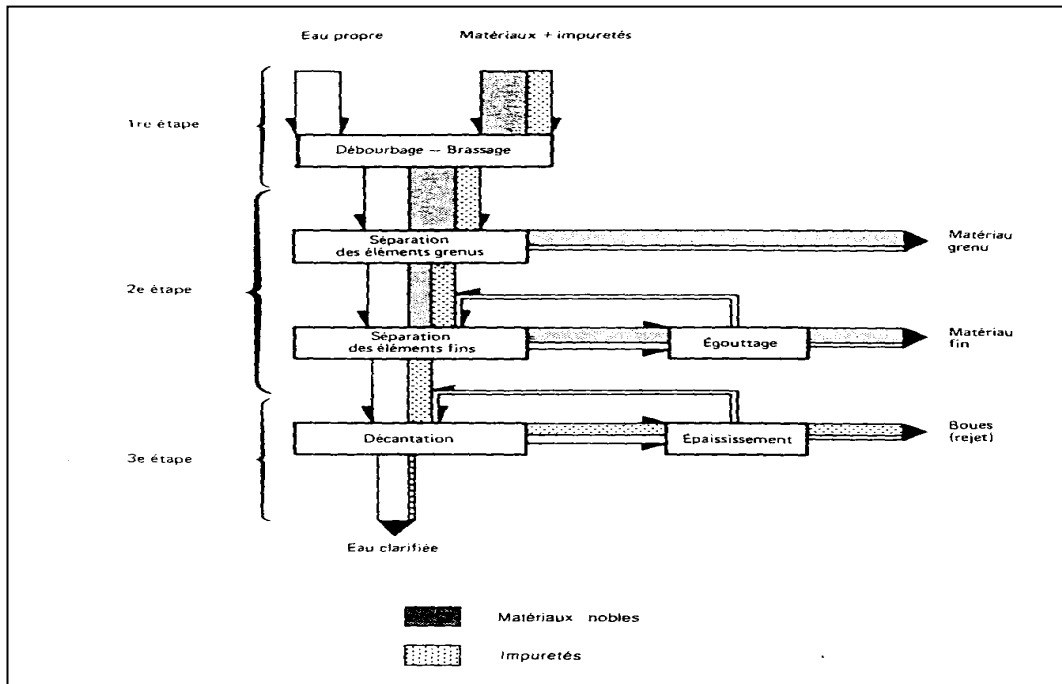


Figure I.1 : Traitement des matériaux pollués. Opérations réalisées dans les trois étapes [1].

I.3.1. Le lavage des granulats.

Le lavage qui est placé en tête de la chaîne de traitement, assure un approvisionnement des concasseurs en gros matériaux propres, condition indispensable à l'obtention de granulats concassés et broyés de propreté satisfaisante.

❖ Avec des matériaux peu pollués.

Le lavage par rinçage sur crible, est utilisé pour les matériaux faciles à laver. Au moment du classement sur crible, on arrose les matériaux avec de l'eau afin de dépolluier et dessabler les granulats [Annexe 7].

Le but recherché est d'obtenir la meilleure efficacité de lavage par une consommation d'eau la plus faible.

❖ Avec des matériaux très pollués.

Le lavage par débourbage et attrition, consiste à déliter l'argile. Pour cela, il faut rompre les forces de cohésion, qui tiennent les particules argileuses agglomérées en boulettes ou collées aux granulats afin de les diluer dans l'eau de lavage.

L'action mécanique d'attrition qui s'opère par le frottement dans l'eau des grains entre eux et contre les parois des appareils, permet de libérer les granulats de la gangue argileuse qui les enrobe.

On procède ensuite à un égouttage sur crible puis un rinçage afin d'éliminer toute trace d'argile.

I.3.2. Le lavage des sables [1]

Dans toute installation que ce soit au niveau primaire ou au stade de la classification des granulats, les sables sont entraînés par les eaux de rinçage, de débouillage et d'attrition qui contiennent également toutes les argiles délitées.

Il est indispensable de séparer par des appareils dits de séparation, les sables des eaux contenant la pollution.

❖ **Appareils de décantation statique [Annexe 7].**

❖ **Appareils de séparation par décantation statique avec extraction mécanique [Annexe 7].**

La décantation est réalisée dans des cuves équipées de système d'extraction des sables décantés.

L'appareil le plus utilisé est la roue essoreuse

Pour le traitement de gisement peu pollué et le cas de petites installations, un seul appareil peut réaliser plusieurs fonctions. On utilise soit un crible pour classer et laver les granulats soit une roue pour laver les sables et les séparer des eaux sales.

I.4. FACTEURS INFLUENCANT LA PROPRETE DES GRANULATS [7], [12], [17], [57].

Les granulats produits en carrière, proviennent du concassage de roches. Les formations rocheuses sont d'abord fracturées au moyen d'explosifs puis concassées à la dimension voulue.

La qualité des granulats est influencée essentiellement par deux facteurs (figure I.2):

- La qualité de la roche.
- Le fonctionnement de la chaîne d'élaboration.

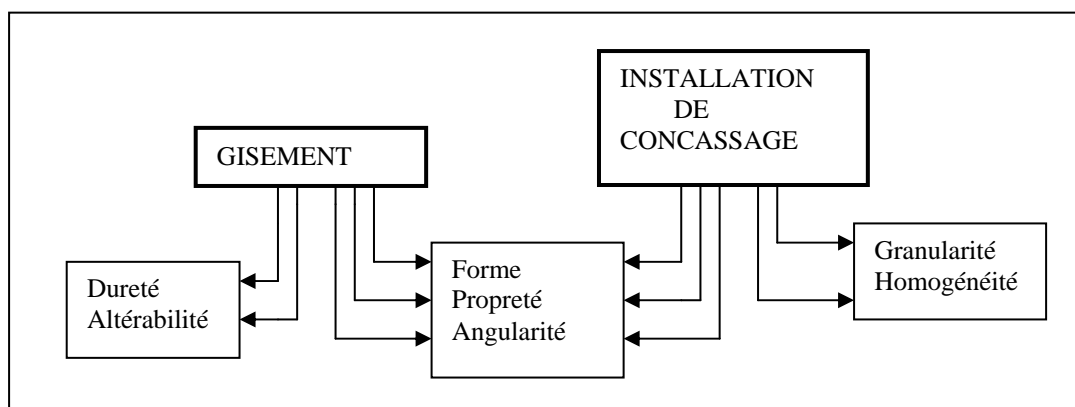


Figure I.2: Paramètres influençant la qualité des granulats [17]

I.4.1. La qualité de la roche au niveau d'un gisement

Les roches sont extraites généralement d'un gisement dont l'étude s'avère nécessaire afin d'examiner comment seront produit les granulats [Annexe 5].

Si le gisement est non-homogène, on peut retrouver une certaine homogénéité au niveau des granulats mais rarement au niveau des sables car les matériaux les plus tendres ont tendance à se concasser en éléments beaucoup plus fins que les matériaux durs.

La pureté et la santé d'une roche déterminent la rentabilité d'un gisement et influent directement sur les caractéristiques intrinsèques, la forme et la propreté des gravillons et des sables produits.

I.4.2. Le fonctionnement de la chaîne d'élaboration [22], [57], [60], [119].

Autant que la qualité de la roche, le bon fonctionnement de la chaîne d'élaboration (dispositifs d'élimination, ouvertures des concasseurs, lavage et débouillage etc.) est un gage certain pour l'obtention de la qualité.

Le pré-crible

Effectué au moyen d'une grille fixe à barreaux parallèles, il a pour but d'éliminer les matériaux altérés, d'éviter des surcharges des fractions dont la dimension ne leur permet pas d'être concassées (comme les argiles, les indésirables) et par conséquent, on soulage les concasseurs.

L'élimination des éléments pollués contribue au raffinage en dureté des granulats car les éléments les plus tendres proviennent des parties altérées de la roche.

Le concassage-criblage

L'installation de concassage criblage devra permettre l'élimination totale des éléments argileux. Les produits d'abattage amenés au concasseur primaire, subissent suivant les cas, avant ou après concasseur primaire voire les deux à la fois, une élimination des produits altérés.

Au niveau du concassage primaire, il se produit une première réduction des matériaux accompagnée d'un affinage en propreté et en dureté par criblage et extraction du circuit des produits fins provenant du concassage.

Avec le concassage secondaire, tertiaire voire quaternaire, les produits sont de plus en plus élaborés et affinés aussi bien en granularité qu'en forme et propreté.

Il est bien entendu que chaque étape de concassage est complétée par un criblage correspondant et ayant pour fonction :

- D'extraire les produits livrables avec des coupures normalisées.
- De sélectionner les produits devant alimenter les concasseurs en aval

Lorsque que le gisement est pollué par des fines argileuses, on est alors contraint d'effectuer un lavage ou un débouillage éventuels soit sur le tout-venant (amont de l'installation) soit sur les sables (aval de l'installation).

I.5. INFLUENCE DES CONCASSEURS SUR LA QUALITE [17].

Le choix des concasseurs destinés à effectuer les opérations de concassage et de broyage, est difficile à réaliser en ce sens qu'ils présentent tous des avantages et des inconvénients selon le type de roche à exploiter et l'utilisation prévue des granulats produits.

Un choix judicieux du type de concasseur reste nécessaire afin d'assurer une certaine qualité.

Afin d'améliorer la production des granulats en terme de qualité, l'audit [7] réalisée par l'Organisme de Contrôle Technique de Travaux Publics (CTTP) et le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris (LCPC) dans le cadre d'un protocole d'accord portant assistance technique, recommande le recours systématique aux types de matériels suivants :

- Le concasseur à mâchoires (concasseur primaire) est à réserver pour le débitage des roches par préférence au concasseur giratoire et ce, eu égard à la taille des carrières.
- Le concasseur à marteaux (ou à percussion) est à réserver aux roches calcaires car il permet une très grande réduction des éléments.
- Le concasseur giratoire sera réservé pour la réduction secondaire et tertiaire.

Parfois les concasseurs secondaires sont des « faux secondaires » parce que le matériau provenant de ce concassage dit secondaire, n'est pas criblé à part mais est envoyé au crible unique de l'installation.

On obtient finalement un mélange de granulats provenant du concassage primaire (qui sont pollués et comportent des éléments tendres) et de granulats provenant du concassage secondaire (qui sont beaucoup plus propres et plus durs).

Les sables des divers étages sont également très souvent mélangés alors qu'ils doivent être systématiquement séparés pour être utilisés dans de bonnes conditions.

Un sable dur et propre est utilisé pour les couches de surface en enrobé alors qu'il est toléré un sable moins propre et moins dur pour les couches de fondation.

I.6. INFLUENCE DU STOCKAGE SUR LA QUALITE DES GRANULATS [4], [12], [17].

D'autres facteurs qui peuvent être à l'origine de la mauvaise qualité des granulats, sont entre autres :

- Les conditions de stockage et de reprise sur les stocks.
- Les conditions de transport.

Les travaux routiers sont soumis à des aléas climatiques et sont donc saisonniers, les travaux de bâtiments sont plus repartis mais présentent eux aussi des variations saisonnières importantes, dont les pointes et les creux coïncident avec ceux de l'industrie routière. La demande étant donc fortement saisonnière, on doit stocker une partie importante de la production.

Le stockage des granulats est une opération qui n'a pas toujours reçu les soins et l'attention souhaités dans les installations de concassage.

A la sortie des cribles, les gravillons et les sables sont stockés dans des trémies ou sur des aires de stockage couvertes ou découvertes.

Généralement, les trémies et les silos étant limités par leurs capacités de stockage (jusqu'à 200t), il est souvent nécessaire de stocker les matériaux dans des aires de stockage.

Les modes de stockage et de reprise sont sources de phénomènes qui peuvent affecter la qualité initiale des granulats et des sables et qui sont :

- La contamination.
- La pollution.

Le constat qui se dégage après l'exploitation des essais, est le suivant :

- Les granulats et sables stockés dans les trémies sont plus propres.
- Les granulats et sables stockés dans des aires à découvert sont moins propres.

I.6.1. Pollution et contamination [5], [61].

Au cours des manutentions successives et sur le lieu de stockage, le matériau initialement propre peut être pollué par :

- Des poussières entraînées par l'air.
- Les produits que contiendraient les engins de transport.
- La boue entraînée par les roues des appareils de manutentions.

Ces manutentions peuvent aussi détériorer les arrêtes vives des matériaux anguleux et modifier la granularité par attrition.

Il faut éviter d'une part, le mélange des différents produits et d'autre part leur souillure soit par la poussière régnant au voisinage de la carrière soit par le sol naturel si celui-ci n'est pas aménagé.

Il s'avère donc nécessaire d'apporter beaucoup de soin à la préparation des aires de stockage. Lorsque des tas présentant des propriétés différentes, sont disposés les uns à côté des autres, il existe entre les deux tas, une zone de chevauchement provoquant un mélange des matériaux.

- Si la reprise est automatique à partir d'orifices à travers un tunnel par des extracteurs et transporteurs d'évacuation, la zone de chevauchement des tas ne doit pas s'approcher de ces orifices, entraînant un stock mort inutilisable.
- Si les matériaux sont repris à la chargeuse, il faut alors élever des murs de séparation afin d'éviter cette contamination.

I.6.2. Solutions proposées pour éviter ces phénomènes[12], [61], [119].

❖ Sur les lieux d'utilisation

On privilégiera le stockage par couches horizontales successives appelé aussi stockage stratifié qui consiste à mettre en place les matériaux par déversement des camions en couches superposées.

Ce stockage présente les avantages suivants :

- Ségrégation limitée
- Homogénéisation des matériaux à la reprise (qui se fait par tranche verticale)

On évite le stockage à « la déverse » source de ségrégation et de contamination des tas.

❖ Sur les aires de stockage.

Une aire de stockage comprend également plusieurs zones de dépôt pour chaque classe granulaire mise en stock.

Afin d'éviter la pollution, ces lieux doivent :

- Etre propres
- Etre bien drainés (pour les sables extraient de l'eau, ils nécessitent un essorage avant leur l'emploi).
- Présenter une chape en béton ou enrobé.

I.7. ANOMALIES GENERATRICES DE NON-QUALITE RELEVÉES PAR L'AUDIT [7].

A titre indicatif, il ressort de l'audit technique que les insuffisances constatées règnent à plusieurs niveaux :

❖ Au niveau du gisement

Il a été observé de nombreuses intercalations argileuses dans la majorité des gisements visités, la pollution argileuse concerne plus particulièrement les gisements calcaires (exemple les gisements de Sétif).

Les autres sources de pollution sont :

- Le remplissage de cavités dans les gisements calcaires (exemple le gisement ENOF Keddara).
- L'altération dans les gisements volcaniques (cas de celui de SONATRO-Boumerdes) et plutoniques (celui de l'ENG-Thénia).

Cette pollution se répercute assez fréquemment en aval dans les produits fabriqués, particulièrement dans le cas où les producteurs ne procèdent pas aux opérations de pré criblage ou ne le font pas de manière correcte.

❖ Au niveau de l'exploitation du gisement

Les principales anomalies constatées sont dues au fait que :

- L'exploitation se fait de manière anarchique car lors de l'abattage, la roche saine n'est pas distinguée de la roche altérée.
- L'abattage sélectif n'est pas réalisé. Cette procédure entraîne lors du chargement mécanisé, le mélange de roche de qualités différentes.

L'exploitation sélective permet de réserver les matériaux les plus tendres aux corps de chaussée, les plus durs seront destinés aux couches de surface et ceux pollués seront éliminés.

❖ au niveau de l'élaboration des granulats

L'élimination avant débitage primaire des matériaux pollués n'est pas toujours effectuée. Lorsqu'elle existe, la grille du pré-crible est souvent soit :

- Colmatée par la fraction argileuse.
- Trop inclinée, conduisant au cas précédent car les matériaux circulent avec une trop grande vitesse qui les empêchent de passer au travers.

I.8. CONCLUSION

Eu égard aux considérations ci-dessus évoquées, on conçoit aisément la nécessité d'une reconnaissance approfondie du gisement qui doit permettre seulement, de définir les quantités et la nature de matériaux exploitables mais aussi les conditions et les modalités d'exploitation.

L'installation d'élaboration joue aussi un rôle important vu que les concasseurs tendent à concentrer dans les fractions les plus fines, les éléments les plus friables et les plus altérés et par conséquent, la propreté des sables croît avec le nombre d'étages de concassage et avec le nombre d'éliminations des fractions fines.

Le traitement des granulats par voie humide, est réservé pour la production des matériaux nobles car l'élimination des produits stériles par pré-criblage (avant concasseur) ou par post criblage, est en général suffisante .

Il sera donc indispensable de bien cerner les variations du gisement à prendre en compte pour concevoir le processus de traitement adéquat.

CHAPITRE II

TRAITEMENT DES SABLES AUX LIANTS HYDRAULIQUES

INTRODUCTION

L'épaisseur de la structure des chaussées et la technique employée nous donnent une idée sur les quantités énormes de matériaux à utiliser dans l'industrie routière qui jusqu'à récemment, était limité à l'utilisation de certains matériaux dits «nobles ».

Pour des raisons diverses notamment économiques, la tendance actuelle est d'adapter la technique routière à l'emploi des matériaux locaux notamment des sables et d'orienter la recherche vers leur utilisation.

Cette orientation trouve ses justifications économiques et techniques, dans de nombreuses raisons qui sont en particulier les suivantes :

- Plusieurs régions sont pauvres en matériaux doués de caractéristiques qui répondent aux spécifications exigées par la technique routière actuelle, nécessitant le transport de matériaux satisfaisants (économie de transport).
- Le transport des granulats pose le problème du coût de transport de grandes quantités de granulats et de la dégradation du réseau routier créée par la circulation des véhicules lourds [26].
- La cadence d'exploitation des matériaux nobles nécessaire à la construction routière, épuise vite les gisements de ces matériaux.

Comment traiter les sables ?

La technique de traitement est choisie selon la fonction de la couche à traiter, des conditions climatiques et économiques de chaque région et évidemment, contenu des caractéristiques du sable à traiter.

Cette technique est souvent un compromis nécessaire pour la recherche de caractéristiques contradictoires.

A titre d'exemple, pour corriger l'instabilité, le traitement qui consiste à combler les vides par l'addition de matériaux plus fins, facilite le compactage est peut donc être suffisant pour une couche de forme mais cela ne contribue pas à l'amélioration des résistances mécaniques de ces sables.

II.1. LES TECHNIQUES DE TRAITEMENT [27], [47], [89], [108].

Les sables traités aux liants hydrauliques, voient généralement, leur compacité et stabilité augmenter et en conséquence, leurs performances mécaniques.

Les techniques de traitement visent :

- Soit à améliorer un sable.
- Soit à le stabiliser.

Dans les deux cas, il s'agira d'un traitement du sable par un liant.

II.1.1. L'amélioration

Elle concernera les sables les plus riches en fines (une teneur supérieure à 25%) pour lesquels l'indice de plasticité est supérieur à 12.

Il s'agira d'améliorer leur tenue à l'immersion.

Les liants utilisés sont :

- La chaux.
- Le ciment.

Par un tel traitement, on ne modifie pas le comportement mécanique du matériau qui est caractérisé par la mesure de la portance.

La chaux est plus efficace que le ciment pour ce type d'amélioration. De plus, il faut souvent trois à quatre fois plus de ciment que de chaux.

II.1.2. La stabilisation

La stabilisation d'un sable par un liant hydraulique modifie son comportement. Il ne sera plus celui d'un matériau naturel mais celui d'un matériau semi-rigide qui est caractérisé par sa résistance en traction.

Pour que l'action du liant soit efficace à des dosages qui ne soient pas prohibitifs sur le plan économique, il faut que le matériau présente :

- Un indice de plasticité inférieur à 12 (pas ou peu plastique).
- Une teneur en fines inférieure à 25%.

Les liants employés pour ce type de traitement sont :

- Le ciment.
- Le laitier.
- Les cendres-volantes.

Les dosages en liants sont supérieurs à ceux utilisés pour améliorer le sable (4 à 7% dans le cas du ciment)

II.2. LES SABLES TRAITÉS AU CIMENT [27], [47], [115].

II.2.1. Domaine d'emploi

Les sables améliorés ou stabilisés au ciment, sont utilisables en chaussées neuves, en couche de base pour des trafics faibles à modérés et inférieurs à 1000 véhicules/jours pour les sables améliorés et à 6000 véhicules /jours pour les sables stabilisés.

Pour des trafics importants, la limitation d'emploi tient à la difficulté d'accrocher parfaitement la couche de roulement sur la surface du sable surtout lorsque celui-ci est fin.

Selon le niveau de trafic et la nature de la plate-forme, les épaisseurs employées pour la couche terminée, se situent entre 15 et 25cm, 15cm est un minimum technique et 25cm comme l'épaisseur maximale au-delà de laquelle il est difficile de compacter un matériau de façon homogène sur toute son épaisseur (pour une épaisseur supérieure, il est préférable d'utiliser deux couches).

II.2.2. Caractéristiques des sables.

Tout sable convient à un traitement au ciment. Toutefois, les sables fins à granulométrie serrée ont montré des difficultés pratiques et des performances médiocres. Leur malaxage in situ n'induit pas une homogénéité suffisante de la teneur en eau et de celle en ciment dans le corps de la chaussée.

Utilisés en assise à niveau supérieur et soumis à un trafic lourd, ils ont montré l'apparition de signes de dégradation.

L'amélioration ou la stabilisation d'un sable par un liant hydraulique n'a pas pour but d'assurer la cohésion mais de conférer au matériau des caractéristiques permanentes. Il faut donc que le matériau ait soit naturellement soit après correction granulométrique, une bonne portance et ce, avant la prise du ciment.

Ceci nécessite donc un minimum d'exigences au niveau de la granulométrie et de la teneur en fines et n'exclut pas une certaine plasticité. Mais à l'inverse, un excès de fines ou de plasticité rendra le matériau trop sensible à l'eau, ne permettra pas une bonne dispersion du liant et nécessitera des dosages en liant trop important.

A titre indicatif, Le tableau II.1 regroupe les spécifications des sables susceptibles d'être employés.

Le tableau II.1: Les spécifications des sables utilisables pour un traitement par un liant hydraulique .

Paramètres	Sable améliorable		Sable stabilisable Ciment
	Chaux	Ciment	
Indice de plasticité IP	12 < Ip < 35	< 25	< 12
Pourcentage des fines	< 50 < 40	(fondation) (base)	5 < % fines < 25

Une plasticité et /ou une teneur en fines excessive entraînent la formation de nodules au malaxage. Ces nodules sont d'autant plus nombreux, leur taille d'autant plus importante et leur consistance d'autant plus forte que la plasticité et/ou la teneur élevée en fines (figure II.1.a.).

A ces deux facteurs, s'ajoute la valeur de la teneur en eau qui lorsqu'elle est en excès, vient accentuer le phénomène.

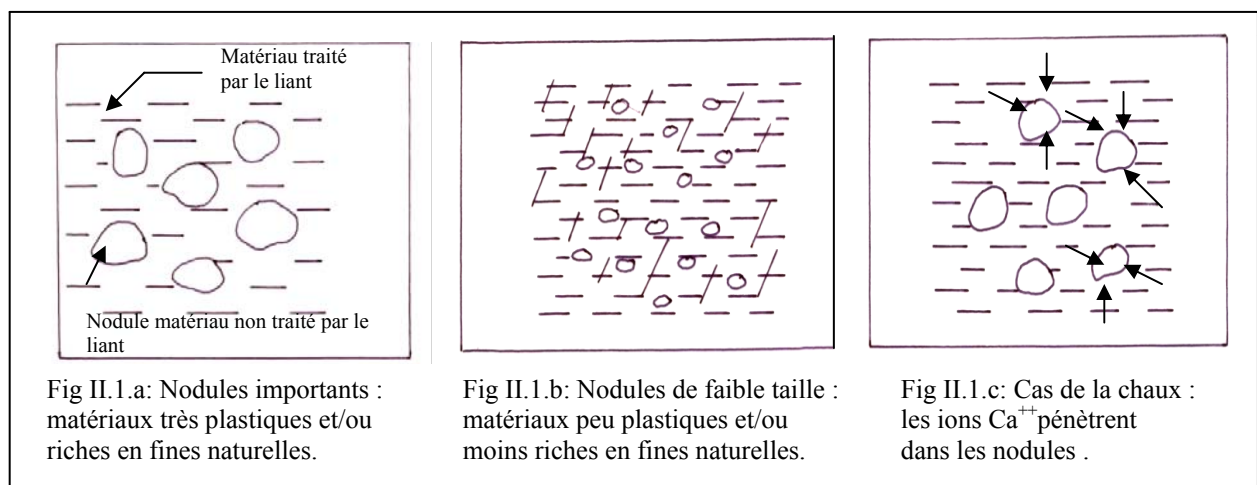


Figure II.1: Effet de la chaux sur les nodules des matériaux [27].

Dans ces conditions, le traitement perd de son efficacité puisqu'une partie importante du matériau n'est pas soumise à son action et reste sensible aux variations de la teneur en eau sauf si le dosage en ciment est très important et bloque ces nodules dans une matrice très rigide (figure II.1.b).

Par contre, la chaux peut avoir une action plus complète (figure II.1.c) mais cependant lente : les ions calcium à partir de la matrice traitée, peuvent progressivement migrer dans les nodules et neutraliser l'argile de la même façon que dans la matrice.

II.2.3. Constatation concernant ce traitement [37], [47].

Le sable traité au ciment est une technique utilisée en Suède pour la construction des pistes d'aviation et des routes dans leurs différents niveaux de chaussée.

Ainsi, les spécifications techniques de « National Swedish Road Board » citent les emplois suivants :

- Sable-ciment pour couche de base.
- Sable-ciment pour couche de fondation.
- Sable-ciment pour couche de forme (sables argileux).

Des exigences suédoises pour un tel matériau, il ressort que la couche de base doit :

- Avoir une durabilité et une bonne capacité portante
- Conserver un uni satisfaisant pendant plusieurs années
- Permet le maintien de la surface en bon état.

Les différents contrôles réalisés sur les routes, ont montré que la capacité portante statique du sable-ciment au jeune âge, est très bonne et plus forte que celle des graves bitume.

Par contre, les caractéristiques de surface (l'uni) se sont détériorées avec le temps.

II.2.4. Traitement d'un sable pollué au ciment [47], [55].

Le traitement au ciment des sables pollués, est très efficace car le ciment réduit le Ip (indice de plasticité) et le gonflement.

Les dosages en ciment varient de 4 à 6% pour les couches de forme et de 6 à 9% pour les couches de fondation.

Les sables traités avec 6 à 10% de ciment, ont bien résisté pendant les 25 à 30 dernières années aux U.S.A. dans des routes à trafic faible et moyen ainsi que dans les aérodromes avec couches de fondation en sol-ciment couvert par une couche bitumineuse de surface.

II.2.5. Inconvénients du traitement au ciment [47], [98].

Les sables traités au ciment, ont montré de bonnes performances vis-à-vis du trafic routier, du climat et du temps. Ils recèlent aussi quelques défauts (fissures) qui n'incombent pas au sable ciment mais aux plates formes et aux couches de surface.

Le problème essentiel du traitement au ciment, est la fissuration par retrait thermique et la transmission de ces fissures vers la surface. Les fissures commencent à apparaître transversalement sur la chaussée ensuite longitudinalement en formant un maillage complet. Ces fissures très fines au début, s'élargissent au cours du temps rendant ainsi la chaussée hors de service à cause des grandes déformations dans la couche de surface et ensuite à cause des grandes déformations dans la couche de base en sable-ciment, dues à l'action destructive de l'eau.

II.3. TRAITEMENT A LA CHAUX [47], [63].

Cette technique de traitement est très efficace pour les sables argileux dont l'indice de plasticité est assez élevé. La chaux rend le matériau non plastique et réduit au maximum le gonflement .

THOMSON [63] a constaté que les matériaux traités à la chaux, peuvent être utilisés dans tous les niveaux de la chaussée parce qu'ils présentent des caractéristiques variées selon :

- Le matériau traité.
- La nature et le pourcentage de la chaux utilisés.

La chaux qui est également très efficace pour faire sécher les sols hydrophiles et réduire le gonflement, a été d'ailleurs introduite avec succès au-dessous des couches de chaussées (par des pores) pour résoudre le problème du gonflement des « plates-formes ».

II.4. TRAITEMENT MIXTE (CHAUX-CIMENT) [27], [115].

Dans ce type de procédé, on réalise un premier traitement à la chaux suivi d'un second au ciment .

Le but du premier traitement à la chaux est de modifier le comportement géotechnique du matériau (diminution de l'indice de plasticité) pour le rendre apte à la stabilisation et pour faciliter la manutention du matériau et ses aptitudes à être malaxé et à s'écouler dans les trémies.

Les modifications dues à la chaux, permettent d'améliorer aussi la tenue à l'immersion après traitement au ciment.

La teneur en chaux à adopter dépend de la nature et du pourcentage des fines contenues dans le sable (figures II.2 et II.3).

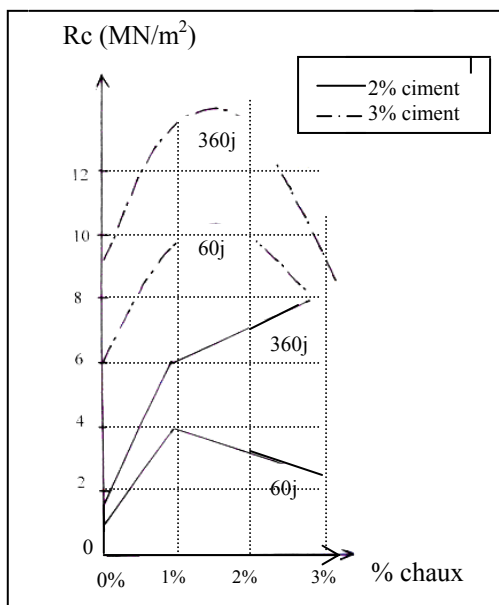


Figure II.2: Résistance à la compression simple en fonction du dosage en chaux $I_p=13$ [27].

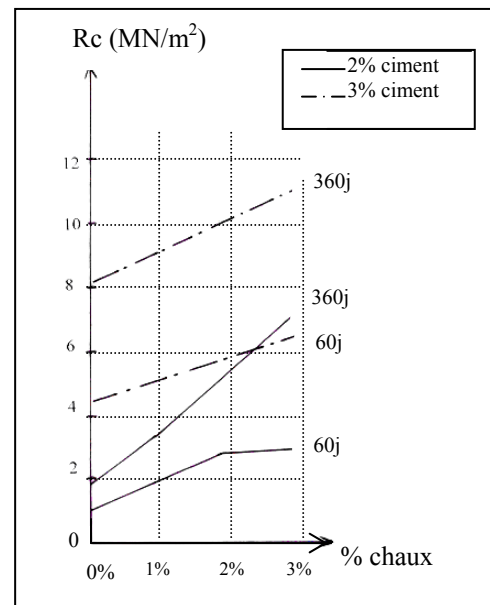


Figure II.3: Résistance à la compression simple en fonction du dosage en chaux $I_p=26$ [27].

* I_p étant l'indice de plasticité.

On peut considérer le matériau prétraité à la chaux comme un nouveau matériau et le traitement au ciment peut être différé ultérieurement sans pour autant que le matériau perde les propriétés acquises par ce pré-traitement à la chaux.

Très souvent, plus le dosage en chaux est élevé, plus celui du ciment sera faible et inversement.

Le traitement à la chaux peut être fait in situ et le matériau repris en stock, subit un traitement au ciment au niveau de la centrale.

II.5. TRAITEMENT AU LAITIER [47], [65].

II.5.1. Domaine d'emploi

Le traitement des sables au laitier est bien répandu en France où cette technique a été développée et utilisée à une grande échelle dans les couches de fondation et les couches de base.

L'utilisation des sables fins-laitier a été limitée aux couches de fondation en raison de leurs faibles performances mécaniques et leur faible stabilité immédiate. Toutefois, l'incorporation de sables correcteurs a permis l'amélioration de leur stabilité et donc, de leurs performances.

II.5.2. Caractéristiques de la technique [40], [41].

Les caractéristiques propres de cette technique sont les suivantes :

- La prise lente du mélange entraîne une souplesse de la mise en place et du compactage et permet la mise immédiate du mélange frais sous circulation pour assurer une bonne stabilité sans attendre la prise hydraulique. Ainsi, on évite la rupture des liaisons chimiques en acquérant la stabilité avant que ces liaisons ne se développent.
- L'homogénéité des mélanges est due à la teneur élevée en liant (10 à 25 % en laitier dont la courbe granulométrique est celle d'un sable).
- L'insensibilité aux excès d'eau (due à la nature plus ou moins perméable de ces mélanges).

Les sables laitiers présentent :

- Des résistances aux charges répétées suffisantes après prise.
- Une faible stabilité quel que soit le type de sable utilisé (fins ou gros roulés).

Les sables-laitiers se fissurent par retrait thermique.

II.6. LE TRAITEMENT AUX CENDRES VOLANTES [47], [95].

Les sables- cendres volantes utilisés avec succès en France pour les couches de fondation des chaussées à fort trafic, sont caractérisés par des performances mécaniques à long terme très intéressantes.

On traite les sables fins propres aux cendres volantes et ciment car ils sont peu stables avant prise et très sensibles aux excès d'eau alors que les sables plus gros sont traités aux cendres volantes et à la chaux.

Le dosage en cendres volantes est de:

- 20% pour les sables fins.
- 12% pour les sables grossiers.

Selon que les sables-cendres volantes sont utilisés avec la chaux ou le ciment, leurs caractéristiques de stabilité et des performances varient en ce sens que mélangés :

- Au ciment, on obtient une stabilité immédiate plus élevée.
- A la chaux, les résistances mécaniques finales sont meilleures.

La quantité de chaux ou de ciment utilisée, représente environ 20% du poids des cendres volantes.

II.7. COMPORTEMENT DES SABLES TRAITES AUX LIANTS HYDRAULIQUES [27].

II.7.1. Sables améliorés

Le comportement des sables améliorés est similaire à celui des matériaux non traités d'origine dont ils ne se distinguent que par des performances accrues (par une meilleure portance et tenue à l'immersion).

En cas de sollicitations excessives vis à vis de la stabilité de la structure, la rupture s'effectuera par déformations plastiques irréversibles instantanées ou accumulées (figure II.4) dues soit à :

- La portance insuffisante du sable amélioré compte tenu du trafic et des états de teneur en eau que ce sable subit.
- La couche support de ce sable amélioré qui est soumise à des contraintes trop élevées et de l'épaisseur insuffisante du sable amélioré qui la recouvre.
- Une association de ces deux causes.

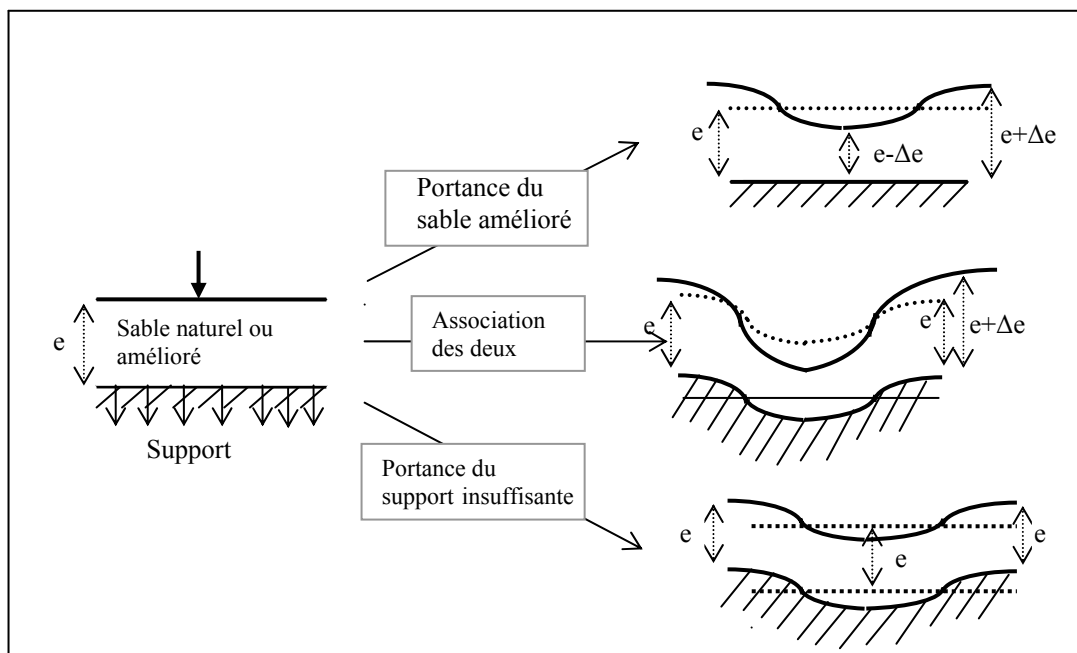


Figure II.4 : Comportement en déformation des sables améliorés [27].

II.7.2. Sables stabilisés

Le comportement des sables stabilisés est différent dans la mesure où la rupture du matériau s'effectuera par fissuration (figure II.5). En effet, par suite de la rigidification apportée par le liant hydraulique, les sollicitations ne sont plus transmises au support mais se traduisent par

une contrainte de traction à la base de la couche de sable stabilisé. De ce fait, si l'effort de traction est trop élevé, il y aura rupture et fissuration du matériau. C'est d'ailleurs cette différence de comportement qui justifie le recours à des essais différents pour l'étude de laboratoire.

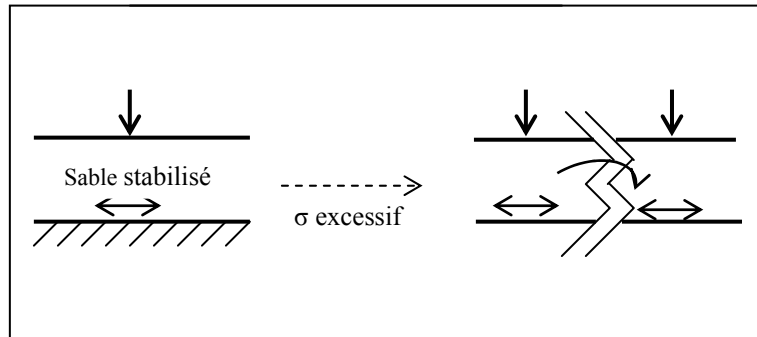


Figure II.5 : Comportement en fissuration des sables stabilisés [27].

La rupture par fissuration est le problème majeur de cette technique mais elle n'est pas uniquement liée aux sollicitations dues aux trafics dans la mesure où les deux autres causes suivantes peuvent intervenir :

- Le retrait thermique (indépendant du trafic).
- La fatigue (liée au trafic).
- le retrait thermique

Il est lié aux variations dimensionnelles dues à celles des températures (dilatation, contraction). Il sera d'autant plus important que les écarts thermiques sont eux-mêmes importants. Un matériau pourra avoir un comportement très différent selon le climat de la région où il est utilisé.

La fissuration par retrait thermique, est transversale à la chaussée et généralement régulièrement espacée.

- La fatigue

Lorsque le matériau est soumis de façon répétitive à une contrainte de traction, il finit par rompre au bout d'un nombre de chargement.

Plus la contrainte qui s'exerce à la base de la couche de sable traité, est élevée, très vite apparaîtront des fissures liées à une rupture par fatigue traduisant un dimensionnement insuffisant du matériau compte tenu de:

- La rigidité du support.
- La résistance propre du sable traité.
- L'épaisseur employée.
- L'intensité du trafic.

II.8. SOLUTIONS PROPOSEES AFIN DE REDUIRE LES FISSURES [47].

On signale que les fissures de sable-ciment peuvent pénétrer une épaisseur de 10cm de grave-bitume placé sur la couche fissurée. Pour contrôler cet effet destructif de la pénétration des fissures dans les couches de roulement, quelques mesures ont été adoptées :

- Incorporation d'une couche intermédiaire entre la couche de base et la couche de surface afin de ne pas transmettre les efforts de cisaillement créés par les fissures. Cette couche d'une épaisseur minimale de 6cm, devrait être peu dosée en liant.
- Pour limiter la formation des fissures avec le temps, il est utile de mettre en place une seconde couche de surface après toutes les 3 à 4 années.
- Utilisation des ciments spéciaux pour limiter ces fissures.

Dans l'optique de supprimer ou de réduire les fissures dans les couches de chaussées et leur transmission en surface, l'utilisation de ciment expansif au lieu de ciment portland, a été étudiée aux U.S.A. [9].

Le corps expansif le plus utilisé qui est le $C_4A_3SO_3$ en présence d'eau, fait prise avec une augmentation initiale de volume. Cette augmentation disparaît pendant le durcissement du liant. Les résultats de cette étude ont montré que le traitement du sable argileux avec le ciment expansif (Chemp-Comp), réduit voire supprime, les fissures de retrait qui se produisent avec le ciment portland.

Il y a lieu de noter que les résistances ne sont pas touchées par l'emploi du ciment expansif.

II.9. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différents types de traitement des sables aux liants hydrauliques tout en ayant précisé pour chacun d'eux, son domaine d'emploi, ses avantages et ses inconvénients.

Nous constatons que le traitement améliore les performances mécaniques des couches en sables traité soit à court terme pour qu'elles supportent le passage des engins de chantier et la circulation au jeune âge avant prise soit à long terme afin d'assurer un bon comportement en service sous l'effet des chargements répétés.

Les observations de chantiers et la recherche en laboratoire ont permis de trouver quelques solutions aux problèmes ayant trait à :

- L'amélioration de la stabilité par incorporation des sables correcteurs et le traitement mixte.
- La limitation des fissures en utilisant des ciments spéciaux.

Les liants hydrauliques confèrent donc aux sables des caractéristiques mécaniques et des stabilités suffisantes pour qu'ils soient aptes à être utilisés dans les différentes couches de chaussée et qu'ils résistent aux sollicitations imposées par le trafic.

CHAPITRE III

ETUDE EN LABORATOIRE DE LA RESISTANCE AU FLUAGE DES ENROBES BITUMINEUX

INTRODUCTION.

La caractérisation des enrobés bitumineux fait appel à une multitude d'essais pratiqués dans de nombreux laboratoires.

Ces essais qualifiés de classiques tel que Marshall, Hubbard-Field et Duriez [34], [104], ont été introduits afin d'évaluer la stabilité des enrobés bitumineux et ont permis d'éliminer les compositions les plus instables sans que les enrobés que l'on a pu ainsi sélectionner aient toujours donné satisfaction sur la route.

III.1. FACTEURS PROVOQUANT LE FLUAGE DES ENROBES BITUMINEUX [50], [113].

Dans le domaine routier, le fluage est un phénomène de déformation permanente des couches de chaussées bitumineuses. Son existence est liée au comportement viscoélastique des liants devant assurer la cohésion des granulats et son apparition est d'autant plus fréquente que le temps et le nombre d'applications de charges sont importants.

Dans tout les cas, une température élevée aggrave le phénomène.

On peut distinguer deux processus différents qui expliquent l'apparition de déformations permanentes :

- Le fluage est dû à l'application des charges statiques et les lieux d'apparition sont :
 - Les parcs de stationnement.
 - Les points d'arrêts même brefs du trafic (feux et signalisation routière, etc.).
- Le fluage dynamique (orniérage) est dû à l'accumulation des déformations résiduelles provoquées par des charges répétées .

L'orniérage qui est un phénomène d'ampleur internationale, affecte la couche de roulement et parfois, la couche d'assise des chaussées supportant un trafic lourd [100].

Ce phénomène est accéléré par un climat chaud durant lequel des températures de 50 à 60°C voir plus, sont couramment enregistrées à la surface des couches de roulement.

Il est aussi lié à la structure de la chaussée. Ainsi, dans le cas des routes sous dimensionnées, le sol de fondation peut se déformer de manière irréversible sous des contraintes trop élevées et le revêtement suit alors le déplacement général sans l'accroître [113].

III.2. AMELIORATION DE LA TENUE AU FLUAGE [50].

La résistance des enrobés bitumineux à la déformation, doit être améliorée grâce à de nouvelles recherches dans le domaine des propriétés des matériaux.

Nous citons quelques mesures à prendre en considération :

- Utilisation des granulats durs afin d'éviter l'attrition et la rupture des grains.
- Utilisation des granulats concassés et augmentation de la taille maximale des grains.
- Utilisation des bitumes durs ou semi-durs.
- Forte compacité des enrobés en place (environ 94% afin d'améliorer le rangement des éléments les uns par rapport aux autres et de diminuer le mouvement relatif des granulats).
- Faible teneur en bitume (excès traduit une lubrification des granulats plutôt qu'une cohésion stable).

III.3. ESSAIS TRIAXIAUX DE FLUAGE DYNAMIQUE [20].

Depuis 1969, un effort considérable a été consacré à des essais à charge répétée et à charge constante, en utilisant un mode d'essai triaxial.

Une grande partie de ces travaux se rapportait aux sols et aux matériaux granulaires non liés mais des techniques identiques ont été également appliquées aux matériaux bitumineux .

Ce sont donc ces essais que nous présentons ici.

III.3.1. Essai avec contrainte latérale cyclique [20], [101].

Un système hydraulique asservi a été mis au point pour réaliser cet essai.

Les contraintes verticale et latérale (figure III.2) qui peuvent être appliquées cycliquement, sont contrôlées par deux boucles d'asservissement indépendantes et de ce fait, les contraintes peuvent être exactement en phase avec la même période (figure III.1.a) ou en phase mais de longueur d'onde différente c'est à dire que la contrainte latérale est appliquée pendant un temps plus long que la contrainte verticale (figure III.1.b) comme cela se produit sur la chaussée.

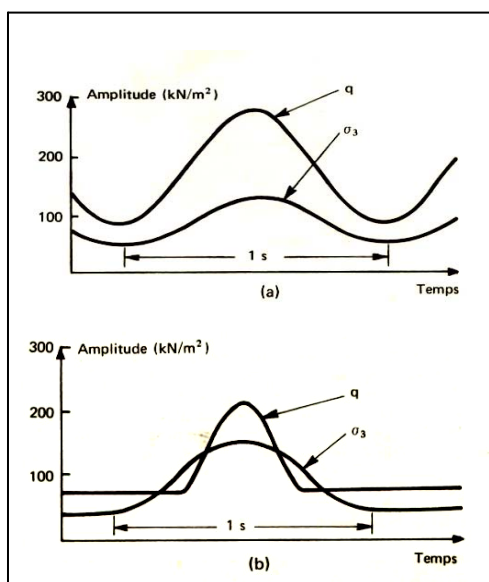


Figure III.1: Formes caractéristiques des ondes de contraintes [20].

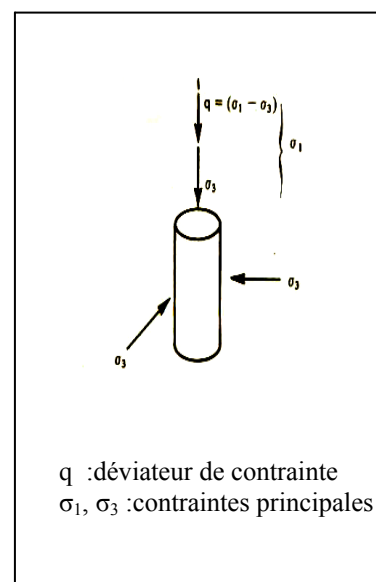


Figure III.2: Distribution des contraintes [20].

III.3.2. Essai avec contrainte latérale constante [8].

Cet essai consiste à placer l'éprouvette dans une enceinte isotherme tout en la soumettant à une contrainte verticale sinusoïdale de compression σ_v dont l'amplitude et la fréquence sont constantes (figure III.3).

On peut superposer une contrainte latérale de compression statique constante σ_h (la contrainte σ_h peut être variable mais cela n'améliore en rien la déformation mais complique plutôt l'appareillage). Sous l'effet de ce chargement, l'échantillon subit une déformation axiale.

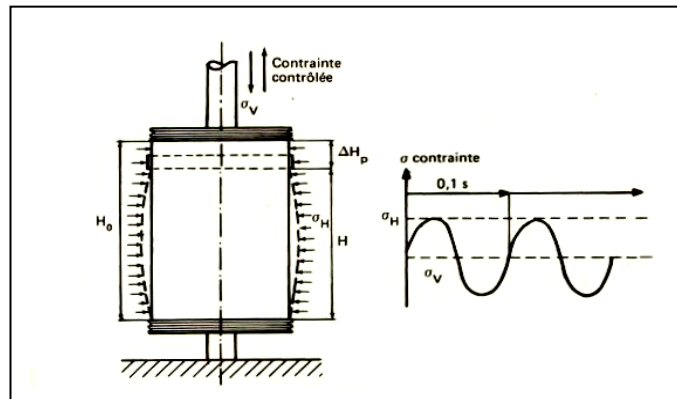


Figure III.3: Schéma de principe de l'essai de fluage dynamique [8].

L'essai est réalisé sur une éprouvette de forme cylindrique de 137mm de hauteur et 100mm de diamètre, qui peut provenir soit d'une carotte extraite de la chaussée soit d'un échantillon de matériaux fabriqué en laboratoire.

Dans le cas de fabrication en laboratoire, il faut la compacter à l'aide d'un compacteur de plaques de manière à reproduire le compactage sur chantier des éprouvettes.

Les figures III.4 et III.5 montrent le comportement au fluage des éprouvettes de même formulation mais le type de compactage est différent.

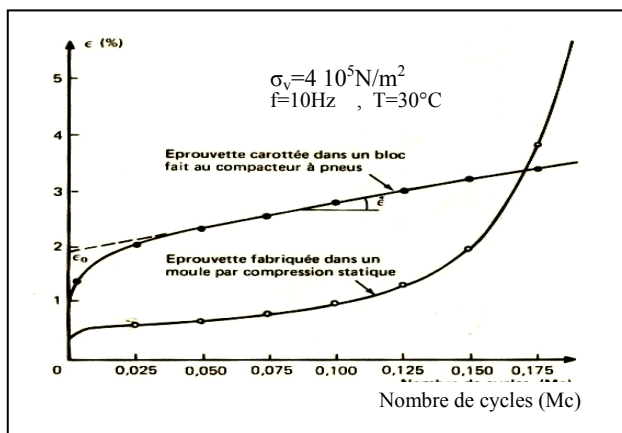


Figure III. 4: Courbes de fluage de deux éprouvettes de même formulation mais fabriquées différemment [8].

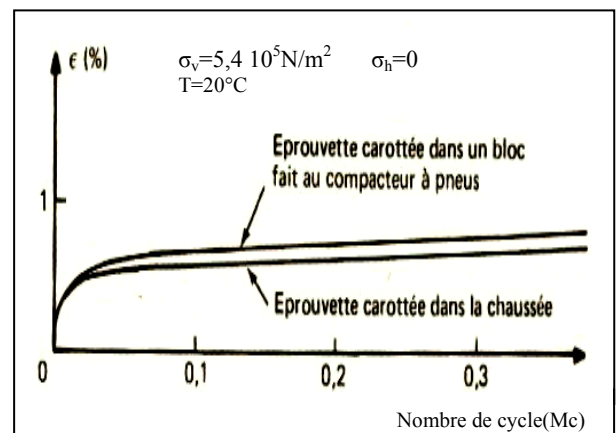


Figure III. 5: Courbes de fluage de deux éprouvettes de même formulation mais obtenues différemment [8].

En pratique, on se borne à étudier systématiquement l'influence sur le fluage des quatre grandeurs indépendantes suivantes :

- Contrainte verticale σ_v .
- La pression latérale σ_h .
- La température T.
- La fréquence f.

Interprétation de l'essai

H_0 : La hauteur de l'échantillon.

ΔH_0 : La variation de la hauteur associée à la partie permanente de la déformation.

$\varepsilon = \Delta H_0 / H_0$: Déformation permanente.

La courbe de variation de la déformation permanente en fonction du nombre de cycles de chargement, est appelée courbe de fluage (figure III.6). Cette dernière présente une « propriété » remarquable en ce sens qu'après une évolution initiale rapide, la déformation permanente varie linéairement en fonction du nombre de cycles.

Si l'essai est poursuivi, on remarque une nouvelle accélération de cette évolution en fin d'expérience avec une destruction de l'éprouvette .

Lorsque la déformation permanente est trop forte, l'éprouvette prend la forme d'un tonneau et se désagrège.

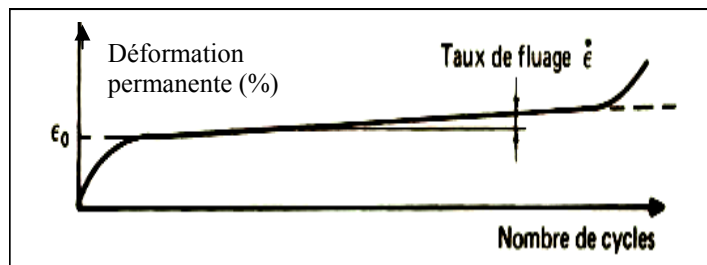


Figure III.6: La courbe de fluage [8].

La droite obtenue en prolongeant la partie linéaire de la courbe de fluage, permet de définir trois paramètres :

- La fluage initial ε_0 exprimé en %, qui est l'ordonnée à l'origine.
- La vitesse de fluage $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dn$ appelée aussi taux de fluage, qui est la pente exprimée en % par million de cycles (% / Mc).
- La durée de vie qui est définie comme étant le nombre de cycles nécessaires pour atteindre une déformation permanente de 6% suivant le processus linéaire.

III.4. ESSAI DE FLUAGE DYNAMIQUE A L'HYDROPULSATEUR [18],[29],[36],[37],[39].

Cet essai pratiqué au niveau de l'Organisme de Contrôle Technique de Travaux Public de Kouba (CTTP), vise à étudier en laboratoire le comportement des enrobés bitumineux au fluage dynamique sous l'influence d'une charge de compression axiale répétée. Il tient compte du fait que sur la route, le chargement est répété.

L'essai consiste à soumettre une éprouvette du type Marshall, à des sollicitations cycliques du type compression axiale répétée comme indiquée sur la figure III.7.

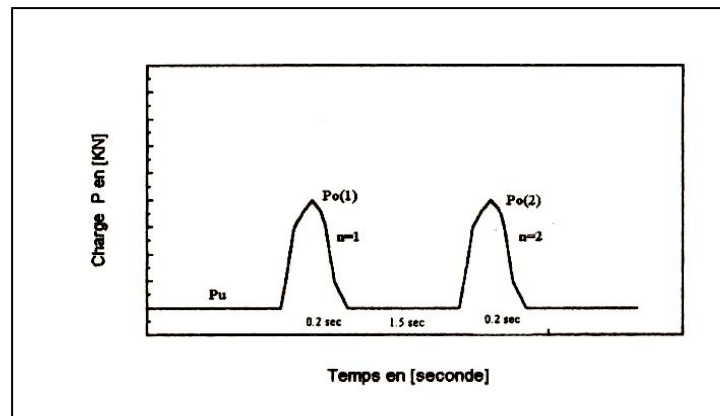


Figure III.7: Mode de chargement en fonction du temps [36].

Conditions de l'essai

Contrainte de conditionnement	: 10 KPa.
Période de conditionnement	: 2 minutes.
Contrainte d'essai	: 100 KPa.
Période d'essai	: 60 minutes.

Une période de conditionnement est utilisée pour obtenir une ferme assise entre les plaques au travers desquelles la contrainte est appliquée sur l'éprouvette.

A chaque cycle de chargement P_0 (charge maximale), l'éprouvette se déforme et l'on relève une déformation permanente (S_i) comme indiqué sur la figure III.8, (P_u) étant la charge minimale de contact.

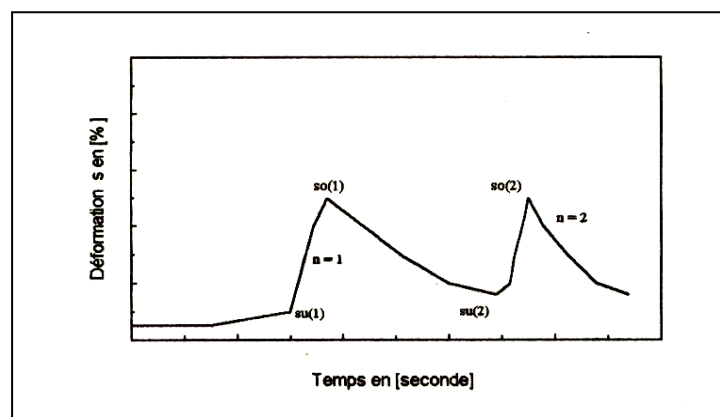


Figure III.8: Déformation en fonction du temps [36].

La répétition du même cycle de chargement dans le temps, permet de constituer d'une part, la courbe de déformation permanente (ϵ) en fonction du nombre de cycle n qui est appelée « courbe de fluage » (figure III.9) et d'autre part, la courbe de vitesse de déformation ($\dot{\epsilon} = \epsilon / n$) en fonction de n . Cette dernière permet d'obtenir de manière constructive les valeurs caractéristiques de la phase linéaire ϵ_w et n_w (figure III.9).

Phase A : Déformation suite au changement de volume par compactage sous l'effet du chargement.

Phase B : Phase linéaire (déformation linéaire en fonction de n) s'effectuant à volume constant (phase la plus importante).

Phase C : Phase de fluage s'effectuant avec changement de volume.

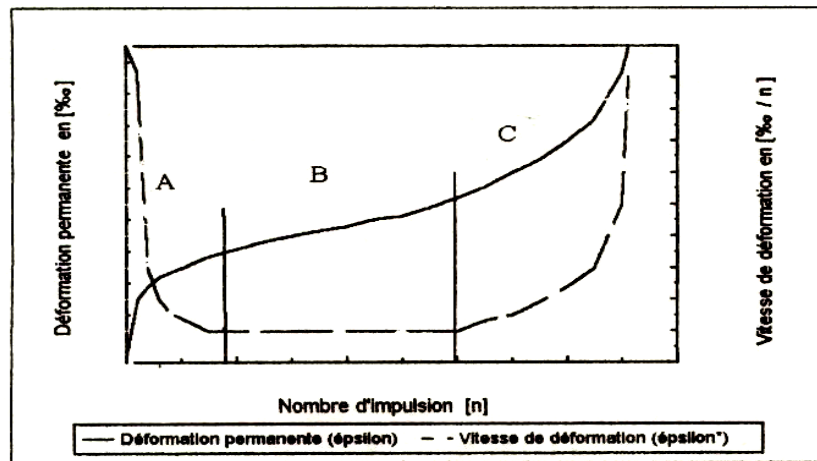


Figure III.9: Courbes de déformation en fonction du nombre de cycles n [36].

Le comportement des mélanges étudiés soumis à l'essai hydropulsateur, se caractérise par une évolution rapide de la déformation permanente (due au recomptage du matériau sous l'effet du chargement répété ou la vitesse de déformation est très élevée) et ensuite, par un ralentissement progressif jusqu'à devenir quasi-linéaire. Si l'essai est poursuivi assez longtemps pour atteindre de grandes valeurs de ϵ , on observe alors une nouvelle accélération de cette évolution qui se termine rapidement par la destruction de l'éprouvette.

Exploitation des résultats

Des courbes de déformations obtenues, on déduit graphiquement les paramètres suivants :

- n_w : nombre de cycles de chargement obtenu dans la phase linéaire.
- ϵ_w : déformation permanente correspondant à la phase linéaire exprimée (‰).
- $\dot{\epsilon}_w$: vitesse de déformation permanente exprimée en ‰/n, appelée aussi taux de fluage.

III.5. ESSAI DE FLUAGE AU SIMULATEUR DE TRAFIC [16], [44], [47], [54], [71].

C'est un essai qui reproduit au laboratoire, le phénomène de circulation sur la route pour tester le comportement de matériaux bitumineux soumis à la circulation, essentiellement sous l'angle de leur résistance vis-à-vis des déformations du type orniéage-fluage. Pour ce faire, les échantillons subissent le passage d'un pneumatique dans des conditions de charge et de pression voisines des sollicitations engendrées par les véhicules lourds, entraînant ainsi une déformation permanente.

La profondeur de cette empreinte ou « ornière » en fonction du nombre de cycle (1 cycle = 1 aller et retour, soit deux passages), va servir à caractériser le comportement de l'échantillon soumis à cet essai d'orniéage.

Conditions de l'essai

- Eprouvettes parallélépipédiques de dimensions : L=500mm, l=180mm, h=100mm.
- Pression des pneumatiques: 6bars.
- Charge appliquée de 5kN par roue contrôlée à l'aide de deux manomètres.
- Température de l'essai : 60°C pour couche de roulement et 50°C pour une couche de base (température contrôlée à l'aide d'une sonde noyée dans les plaques).
- Vitesse des roues en mouvement : 1 cycle /s.
- L'essai est mené jusqu'à 10⁵cycles (une quinzaine d'heures environ).

Exploitation de l'essai

L'ornièrre est définie comme étant le déplacement vertical moyen de la partie circulée de la plaque.

Au cours de l'essai, on relève à l'aide d'un comparateur ou d'une jauge de profondeur, la profondeur d'ornièrre en fonction du nombre de cycles.

De ces valeurs, on déduit la courbe d'évolution de l'ornièrre en fonction du nombre de cycles. Elle est représentée en général par une droite en coordonnées semi-logarithmiques.

On peut estimer qu'un béton hydrocarboné présente une bonne résistance à l'ornièrage si la profondeur d'ornièrre correspondante à 10 000 cycles, est inférieure à 10mm pour une plaque de 10cm d'épaisseur [54].

III.6. ESTIMATION DU FLUAGE PAR L'ESSAI DE PRESSE A CISAILLEMENT GIRATOIRE [50], [70], [92].

Compte tenu des sollicitations de plus en plus intenses subies par les revêtements hydrocarbonés sous le trafic routier et des risques d'ornièrage et de fluage que cela entraîne, la presse à cisaillement giratoire, a été créée pour rechercher la formulation optimale des enrobés.

Des études ont montré que le compactage des éprouvettes destinées aux essais mécaniques, devait se faire par cisaillement giratoire[96].

Cette méthode qui conduit à resserrer la structure granulaire par orientation des grains des matériaux, présente les avantages suivants :

- Les compacités obtenues sont importantes.
- Les évolutions granulaires sont très faibles.
- Elle facilite le compactage sans destruction excessive de la granularité.

Le principe de fonctionnement consiste à soumettre des éprouvettes à un action de pétrissage obtenue par un cisaillement giratoire de l'enrobé dans son moule et une compression statique simulant l'action des compacteurs de chantier.

L'enrobé est enfermé dans un moule cylindrique dont l'axe décrit un cône pendant l'essai comme l'indique la figure III.10. La forme de l'éprouvette est un cylindre oblique à extrémités parallèles dont l'une reste fixe et l'autre décrit un cercle.

Conditions de l'essai [35], [54], [92].

- L'échantillon est placé dans le moule chauffant porté à la température de compactage.
- Maintenir la température de compactage pendant la durée de l'essai.
- L'angle d'inclinaison φ est de 1 degré.
- Appliquer une pression verticale moyenne de 0,6MPa.
- Vitesse de rotation : 6 tours /min.
- Effectuer le nombre de girations fixé.

- Le diamètre des moules est de 160mm et la hauteur de l'éprouvette finale avoisine 150mm.

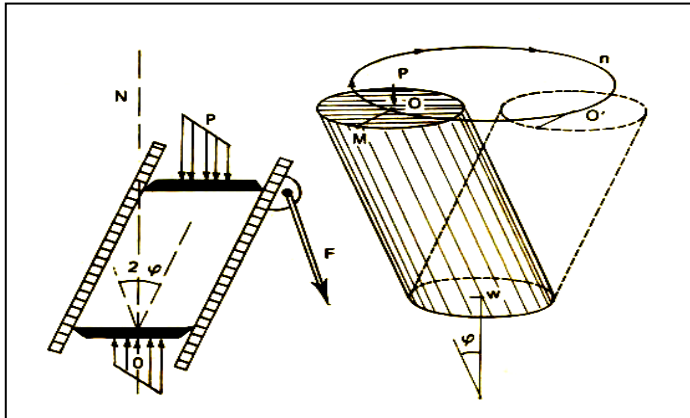


Figure III.10: Principe du compactage à la presse à cisaillement [54].

Interprétation de l'essai [54], [70], [92].

L'essai est répété pour quatre éprouvettes. Au cours de l'essai, on enregistre la variation de la hauteur de l'éprouvette (à l'aide d'un capteur de déplacement), permettant ainsi de définir la compacité (moyenne sur quatre éprouvettes) en fonction du nombre de giration.

Les points reportés sur le graphique compacité-nombre de giration $C_i = f(N_i)$ s'alignent dans une représentation semi-logarithmique (figure III.11). La droite de régression correspondante aux points compris entre 5 et 200 girations, est définie par l'équation :

$$C = C_1 + K_1 \ln N \quad \text{avec}$$

C_1 : Compacité à l'origine à 1 giration, caractérise la mise en place du béton bitumineux.

K_1 : Pente de la droite de régression, caractérise l'évolution du compactage après la mise en place du mélange.

C : Compacité à n girations.

n : Le nombre de girations.

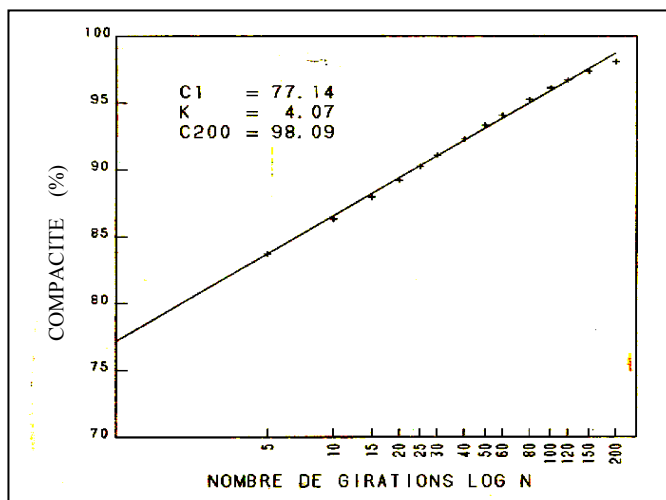


Figure III.11: Courbe de compacité PCG en fonction du nombre de girations [54].

III.6.1. Etude du plan (K_1 , C_1) [70], [54].

Une interprétation complémentaire consiste à reporter dans un repère ayant pour abscisse C_1 et pour ordonnée K_1 (figure III.12).

Des résultats représentant les mélanges bitumineux testés, on admet que :

- Plus le point représentatif est à droite, plus la sensibilité à l'orniérage (déformation permanente) est grande.
- Deux points appartenant à une même iso-compacité peuvent avoir des coefficients C_1 et K_1 très différents (formules 1 et 2). Il est évident que le choix se portera sur la formule ayant le coefficient C_1 le plus faible.
- Si le point représentant un mélange j , se trouve au-dessus de la perpendiculaire aux droites d'iso-compacité passant par le point représentant le mélange i , le mélange j présente alors un meilleur comportement (déformation permanente, compactabilité) que le mélange i (formules 4 et 3).

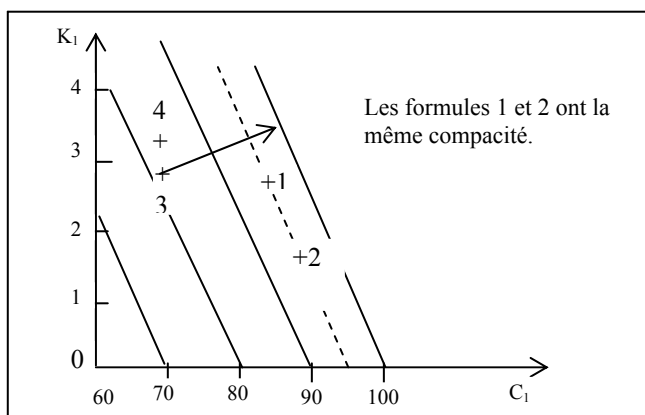


Figure III 12 : Interprétation sur le plan (K_1 , C_1) [70]

III.6.2. Comparaison des résultats obtenus à la PCG et au simulateur de trafic

Une comparaison des coefficients C_1 avec les résultats d'orniérage a montré préalablement que plus C_1 était élevé, plus l'orniérage était important, confirmant donc que l'orniérage et C_1 évoluent dans le même sens.

III.7. COMPARAISON DES RESULTATS OBTENUS PAR LES DIFFERENTS ESSAIS [54].

Des essais ont été réalisés au sein du Laboratoire des Voies de Circulation de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, avaient pour objet d'étudier la résistance des bétons hydrocarbonés aux déformations permanentes.

Cette étude qui avait pour but de comparer les résultats fournis par les différents dispositifs d'essais, s'est limitée aux quatre méthodes suivantes:

- Essai Marshall.
- Presse à cisaillement giratoire.
- Essai de fluage statique uni axial.
- Simulateur de trafic.

III.7.1. Effet du mode de compactage sur le comportement des enrobés bitumineux

Le mode de fabrication des éprouvettes influence le comportement du matériau lors des essais. Trois types de compactage ont été retenus lors de la fabrication des éprouvettes :

- Compactage Marshall (50 coups par face) : noté (M).
- Compactage à la PCG (40 girations) : noté (G).
- Compactage au compacteur à pneus (50 passes) : noté (L).

Pour les deux derniers types de compactage, le nombre de girations et de passes est fixé de façon à obtenir des compacités des éprouvettes carottées aussi proches que possible de la compacité Marshall.

Les essais sont réalisés sur 13 formulations telle que la teneur en gravillons est de 66% (I - VI) et 54% (VII - XIII).

III.7.1.1. Essai Marshall.

L'essai Marshall a été réalisé non seulement sur des éprouvettes obtenues par compactage Marshall (M) mais également sur des éprouvettes carottées dans des plaques (L) ou des échantillons obtenus à la presse à cisaillement giratoire (G).

Les résultats obtenus sont les suivants:

- La stabilité Marshall (SM) obtenue sur les éprouvettes « L », est du même ordre de grandeur que la stabilité Marshall standard « M ». Cependant, pour les formulations à forte teneur en gravillons, elle est plus élevée alors que c'est le contraire qui se produit pour les faibles teneurs en gravillons.
- La stabilité des éprouvettes « G » est plus élevée que la stabilité « M » et est équivalente ou supérieure à la stabilité « L ».
- Le fluage « L » est pratiquement le double de « M » et le fluage diminue avec la teneur en gravillons (66% à 54%) (figure III.13).
 - Le fluage « G » est plus grand que celui de « M ».

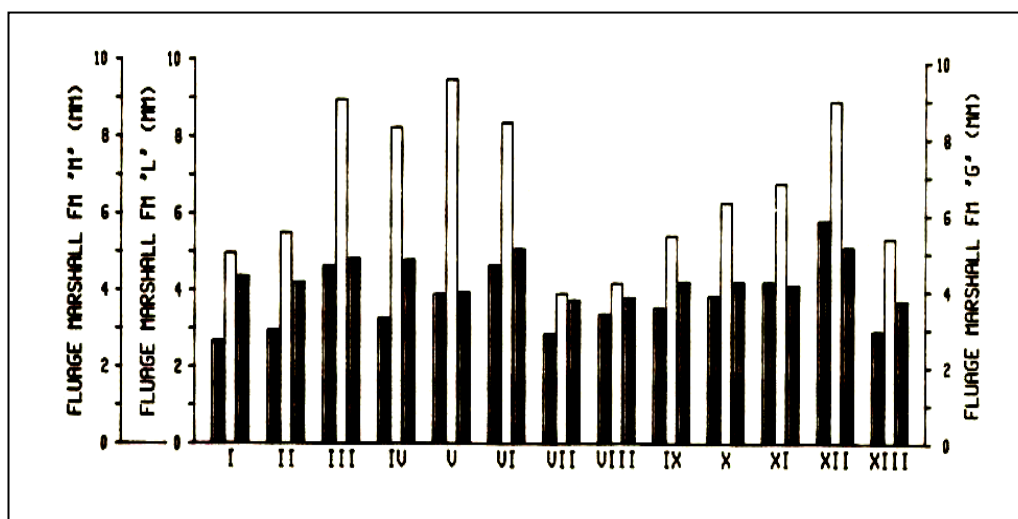


Figure III.13: Flouge Marshall (FM) des éprouvettes « M », « L » et « G » [54].

III.7.1.2. Essai de fluage statique.

L'essai de fluage statique est réalisé sur des éprouvettes de type Marshall mais compactées différemment avec « M », « L » et « G ».

- Le fluage total à 60 minutes (FT60) des éprouvettes « L », est nettement plus élevé que celui des « G » et des « M » (figure III.14).
- Le fluage total à 1 minute (FT1) des éprouvettes « L », est nettement plus élevé que celui des « G » et des « M ».

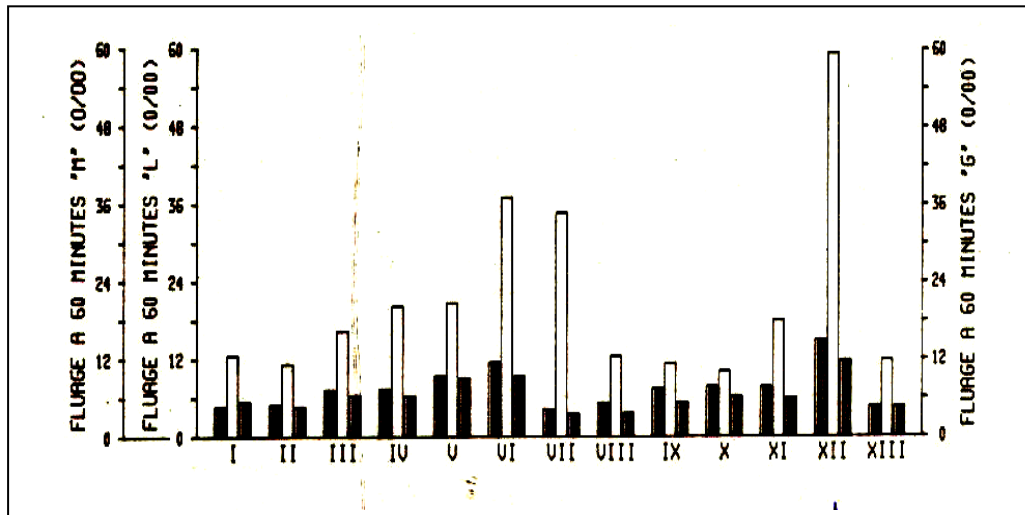


Figure III.14: Le fluage total à 60 minutes des éprouvettes « M », « L » et « G » [54].

III.7.2. Corrélation des résultats obtenus avec les différentes méthodes d'étude du comportement à l'orniérage [54].

Les corrélations obtenues entre d'une part l'essai à l'ornièreur et d'autre part, les essais PCG, Marshall et de fluage uni axial sont mises en évidence à la figure III.15.

Les valeurs de l'orniérage à 1 000 et 10 000 cycles ont été dans certains cas, établies à partir de deux points seulement (arrêt de l'essai après 300 cycles). En retenant pour une bonne corrélation un coefficient ($r > 0,8$), on constate que :

- Essai PCG : Les compacités à l'origine C1 et à 80 girations C80 présentent une excellente corrélation aussi bien avec l'ornière à 1 000 cycles qu'avec l'ornière à 10 000 cycles.
- Essai Marshall : Il n'y a aucune corrélation entre la stabilité Marshall et la profondeur d'ornière à 1 000 cycles et 10 000 cycles.
- Essai de fluage statique : Il convient de différencier entre les trois modes de compactage.
 - Compactage « M » : La corrélation entre le fluage total à 60 min et l'ornière 1000 et 10 000 cycles est bonne alors qu'il n'y en a aucune avec le fluage total à 1 min et la pente de la courbe de fluage (BFL).
 - Compactage « L » : La corrélation entre le fluage total à 60 min et à 1 min et l'ornière à 1000 et 10 000 cycles est bonne.
 - Compactage « G » : Il n'y a pas de corrélation acceptable entre les résultats de l'essai de fluage et ceux de l'essai d'orniérage.

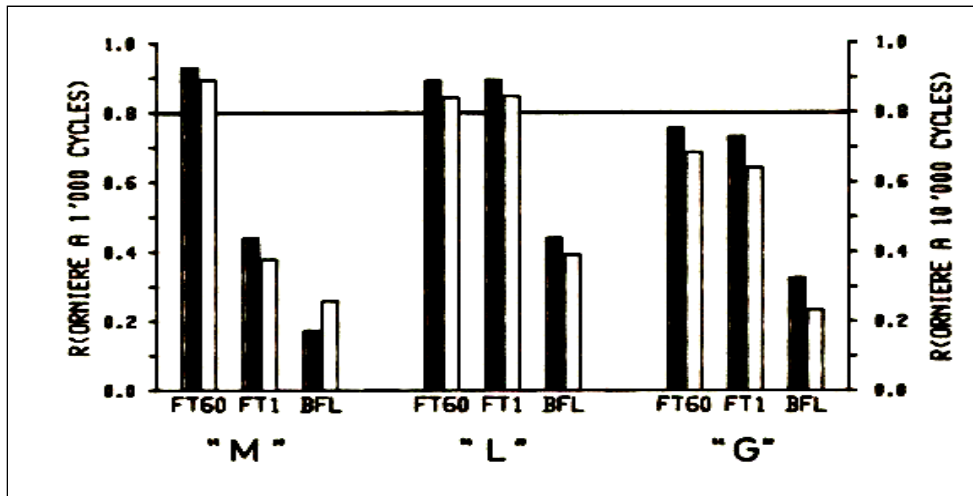


Figure III.15: Coefficient de régression entre l'essai de fluage statique et l'essai d'orniérage [54].

III.8. CONCLUSION

L'étude en laboratoire des matériaux bitumineux montre clairement la nécessité d'un chargement répété. Mais, on considère en général que l'apparition de la déformation permanente avec les applications de charge correspond avant tout, à un phénomène de fluage. Les essais de fluage statique demandent un appareillage beaucoup plus simple que celui utilisé pour des chargements répétés et par conséquent, offrent dans la pratique, une possibilité d'emploi plus étendue.

Il est essentiel de retenir un mode de fabrication des éprouvettes représentatives du chantier. Les compacteurs de plaques utilisant des pneumatiques, semblent une solution intéressante de compactage.

CHAPITRE IV

ETAT ACTUEL DE LA RECHERCHE

INTRODUCTION

Dans les techniques routières, la propreté doit être l'une des caractéristiques essentielles des sables soit pour l'obtention d'un niveau élevé de qualité et d'une pérennité de l'ouvrage soit pour les facilités de mise en œuvre .

Le terme propreté des sables présume l'absence d'éléments fins nocifs, notamment les argiles qui constituent le risque le plus fréquent. Ces éléments se trouvent dans les sables par :

- Une présence originelle des matériaux argileux.
- Une contamination par des matériaux organiques.
- Une infiltration des argiles dans les gisements sableux propres.

Le pourcentage et la nocivité des fines contenues dans les sables, dépendent du mode de concassage, de la nature des roches constitutives (nature minéralogique), de leur finesse et de leur qualité.

IV.1. SUBSTANCES POLLUANT LES GRANULATS [10], [105], [106].

On peut classer ces substances en trois catégories :

- Celles qui constituent un écran entre les liants et les granulats et qui jouent le rôle physique.
- Celles qui réagissent avec les liants et qui jouent un rôle chimique.
- Celles qui constituent des hétérogénéités.

IV.1.1. Pollution physique

Par leur grande surface spécifique, les argiles jouent un rôle d'écran entre le granulat et le liant. Par leur aptitude à absorber de l'eau, elles entraînent des chutes de résistance et par leur plasticité (c'est-à-dire leur aptitude au glissement entre les lamelles en présence d'eau), elles conduisent à des difficultés lors de la mise en œuvre des assises de chaussées.

Un pour cent d'argile dans un sable peut constituer un écran parfait vis-à-vis des liants. Mais, d'une façon générale les argiles ne sont ni parfaitement divisées ni parfaitement dispersées.

Pour prévoir l'action des argiles, il faudrait donc tenir compte de :

- Leur surface externe qui varie avec l'état de division des particules.
- Leur surface interne qui est liée aux possibilités d'adsorption d'eau mais, qui varie sous l'action des liants : hydrophobation partielle due au bitume.

Il apparaît donc que l'appréciation d'une pollution argileuse n'est pas simple.

IV.1.2. Pollution chimique

Les substances jouant un rôle chimique, n'intéressent que les liants hydrauliques. On trouvera dans les publications de THEISSING [105], une analyse très complète de l'effet des différentes impuretés sur les bétons hydrauliques.

IV.1.3. Les hétérogénéités

Elles sont constituées par toutes les substances présentes dans les granulats et ayant une résistance mécanique beaucoup plus faible. Ce sont soit :

- Les fragments de roche altérée qui libèrent des argiles qui gonflent en présence d'eau.
- Les boulettes d'argiles qui se comportent comme des grains poreux si elles restent entières et peuvent polluer les sables si elles se désagrègent.
- Les fragments de bois et les résidus végétaux.

IV.2. RECHERCHE DES ARGILES DANS LES SABLES [10], [24], [106],[109].

Les argiles contenues dans un sable dont les dimensions restent inférieures à $2\mu\text{m}$ voire un peu plus, englobent beaucoup de minéraux inertes.

De nombreux essais cherchent à provoquer une réaction qui affecte les argiles mais pas les minéraux inertes.

Dans l'essai d'équivalent de sable (ES), on mesure la hauteur occupée par les matériaux argileux et l'importance du floculat dépend du degré de division des argiles, de leur état d'hydratation, de leur nature et de leur proportion.

Cet essai comporte quelques défauts :

a- Forte sensibilité aux fines inertes pour peu qu'elles soient trop fines.

b- Piégeage dans le floculat argileux, d'une partie des minéraux inertes fins (inférieures $200\mu\text{m}$) qui les assimilent à des argiles.

c- Importance que prend le floculat avec l'argile la moins nocive appelée la kaolinite. Toutes les études sur les matériaux composites montrent effectivement quand peut tolérer 2 à 3 fois plus de kaolinite que d'autres argiles. Mais, plus de kaolinite traduit aussi une très faible valeur de l'équivalent de sable, entraînant une incompatibilité avec les spécifications [25], [53], [114].

d- Dispersion des argiles qui augmente avec la teneur en eau et donc souvent, avec la durée du stockage non protégé et les diverses manutentions dont le transport. Cela conduit à la formation d'un floculat plus important, piégeant encore plus de fines.

Les travaux de CAMPANAC [24] ont montré que la fraction $0-10\mu\text{m}$ des inertes influe très fortement sur le volume du floculat.

Cependant, il ne faudrait pas conclure de ces quatre points que l'équivalent de sable n'a que des défauts. Il faut lui reconnaître deux avantages non négligeables:

- Lorsque la teneur en fines est faible ($< 2\%$), il est très significatif.
- Un bon ES correspond toujours à un bon sable (pour ce qui est des argiles)

Pour les techniques d'assises de chaussées utilisant des sables à teneur en fines élevées (10 à 30%), la limitation de la teneur en fines dans l'essai d'équivalent de sable à 10% de fines (noté PS ou ES10) [74], a quelque peu amélioré les défauts «a» et «b». On bloque ainsi un paramètre et la valeur du PS représente la nocivité des argiles.

On ne maîtrise pas les inertes dans l'essai d'équivalent de sable même en fixant la teneur en fines car ils interviennent aussi par leur granularité [106], [114].
Les défauts « a », « c » et « d » qui subsistent toujours, ne peuvent être résolus qu'en partie par l'essai au bleu de méthylène.

TRAN NGOC LAN [79], [109], [112] affine l'essai au bleu de méthylène pour évaluer la nocivité des argiles dans un sable. Cet essai n'a pas que l'avantage de corriger en partie le défaut « d » de l'ES mais, il en a d'autres liés aux propriétés de certaines argiles.

La molécule organique de bleu de méthylène qui est adsorbée sur les surfaces externes puis internes des argiles, se fixe sur toutes les surfaces des minéraux accessibles à l'eau. La quantité de bleu adsorbée par les fines inertes non argileuses est négligeable comparativement à celle de bleu adsorbée par les argiles.

Parmi les avantages de l'essai au bleu, on peut citer :

- Il est peu sensible à l'état de division et de dispersion des argiles (contrairement à l'essai de floculation).
- Il évite de pénaliser les sables à fines inertes et riches en particules inférieures à 10µm.
- Il évite de pénaliser les sables à pollution kaolinique qui ayant une faible surface, adsorbe très peu de bleu.

Les valeurs ainsi mesurées, nous donnent la surface totale accessible à l'eau de toutes les argiles présentes dans le sable.

Chaque type d'argile réagit dans l'essai en fonction de sa surface spécifique. Ce n'est pas forcément cette même surface qui réagit avec les liants, faisant apparaître une difficulté qui n'est pas résolue.

TRAN NGOC LAN [110] a mis au point une méthode de dosage turbidimétrique du bleu adsorbé qui permet d'obtenir deux valeurs de bleu, l'une proportionnelle à la surface externe des argiles et donc, très proche de leur pourcentage pondérale dans le matériau, l'autre proportionnelle à la surface totale comme dans l'essai à la tache [78].

IV.2.1. L'association ES et VB

CAMPANAC [107] montre que les deux essais ES et VB qui ne souffrent pas du même défaut, peuvent se compenser mutuellement en ce sens que tel matériau éliminé par l'ES sera racheté par la valeur au bleu.

L'association ES-VB est basée sur le raisonnement suivant :

- Si l'ES ou le PS (ES10) est bon, le sable est accepté sans faire le VB.
- Si l'ES est inférieur à la valeur spécifiée :
 - Parce qu'il y a des fines inertes inférieures à 10µm, le VB sera bon.
 - Parce que trop de fines inertes sont piégées dans le floculat, le VB sera bon.
 - Parce qu'il y a plus de 2% de kaolinite dans le sable, le VB sera bon.
 - Parce que la teneur en eau ou le transport ont dispersé les argiles, le VB sera bon.

La figure IV.1 montre l'intérêt actuel d'associer l'expression VB à ES.

- ES seul accepte les matériaux situés dans les zones A, B et C.
- VB seul accepte les matériaux situés dans les zones A et D.
- ES et VB acceptent les matériaux dans les zones A, B, C et D.

Il est donc évident que dans la plupart des cas, le recours à un seul des essais existants à l'heure actuelle, sera toujours insuffisant.

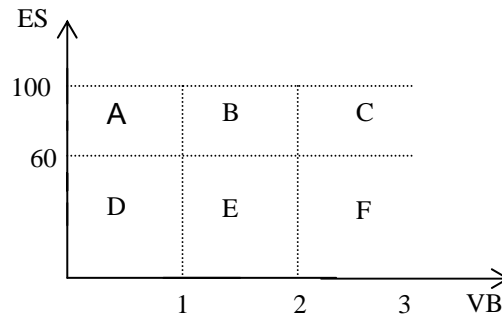


Figure IV.1 : Intérêt d'associer VB et ES [107].

IV.3. MISE EN EVIDENCE DE LA NOCIVITE DES ARGILES PAR L'ESSAI AU BLEU DE METHYLENE TURBIDIMETRIQUE

TRAN et MILLON-DEVIGNE [111] ont mis en évidence les quantités de bleu de méthylène adsorbés par trois types d'argiles à travers l'essai au bleu de méthylène turbidimétrique VB_T .

L'adsorption par voie optique permet de connaître l'activité des argiles .

Si la surface exposée est inerte, les molécules colorantes demeurent libres et dans ce cas, la valeur VB_T est nulle.

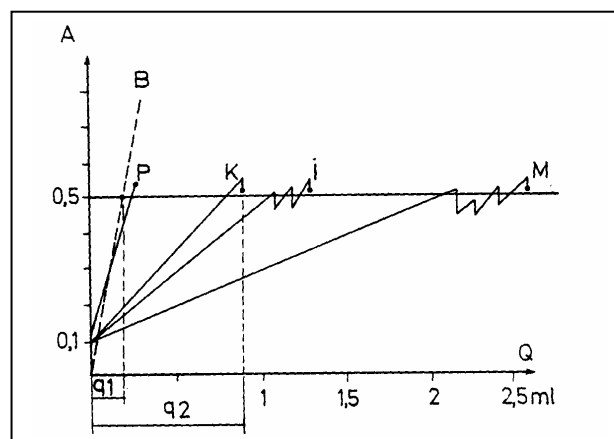


Figure IV.2: Diagramme de principe Adsorption sur trois argiles types [111].

Si elle est active, les molécules de bleu sont adsorbées au fur et à mesure qu'on les ajoute, entraînant ainsi une réduction de l'adsorption lumineuse, laquelle va en augmentant avec l'ordre croissant de l'activité des minéraux : roche saine (B), poudre de roche (P), Kaolinites, Illite et Montmorillonite (figure IV.2).

L'absorbance A est exprimée par : $A = \log_{10} \frac{I_0}{I}$

I_0 : Intensité incidente du faisceau lumineux.

I : Intensité atténuée du faisceau lumineux.

Le tableau IV.1 montre bien que, la quantité ($q_2 - q_1$) et par conséquent, la valeur de bleu turbidimétrique du matériau augmente et sera d'autant plus élevée qu'il y aura d'argiles et que ces dernières seront plus actives.

Tableau IV.1 : Les valeurs de VB_T pour les différentes argiles

Minéraux	VB_T
Kaolinite	0,9
Illite	1,8
Montmorillonite	3,6

De nombreuses études portant sur l'influence des argiles sur les matériaux composites, ont été effectuées dans les Laboratoires des Ponts et Chaussées (LPC).

L'essai au bleu à la tache classique, est utilisé comme indicateur de propreté .

L'objectif est de comparer cet indicateur avec ceux de qualité que l'on définit à partir des essais de comportement .

L'indicateur de qualité étudié est :

- Le rapport r/R des résistances après immersion et à sec pour les enrobés bitumineux [25].

Ces études ont pour la plupart abouti aux mêmes résultats :

- Les nocivités respectives des trois argiles types : Kaolinite, Illite, Montmorillonite sont dans un rapport de 1, 2 et 4 environ.
- Les indicateurs de propreté exprimés en terme de valeurs de bleu classique, se situent eux dans les rapports de 1, 5 et 20.
- Les valeurs de bleu turbidimétrique sont dans les rapports 1, 2 et 4.

Interprétation :

Pour les argiles gonflantes, cette adsorption s'effectue en deux étapes [43] :

- Une étape rapide qui correspond à l'adsorption sur la surface externe.
- Une étape lente qui intéresse la surface interne. Les espaces interfoliaires sont plus ou moins accessibles et l'adsorption qui se produit, ne peut être que progressive.

Au stade de l'adsorption qui correspond dans l'essai turbidimétrique à $A=0,5$, la surface externe est complètement saturée de molécules de bleu. A partir de ce stade, débute le garnissage de la surface interne.

Si après le stade $A=0,5$, on continue à ajouter du bleu de méthylène comme on le fait dans l'essai et on lui laisse le temps de s'adsorber, deux cas peuvent se présenter :

- Si les minéraux ne possèdent pas de surface interne l'adsorbance A est définitivement supérieure à $0,5$ et l'essai est terminé. La valeur au bleu mesurée traduit la surface externe.
- Si les minéraux sont du type gonflant, l'adsorption s'opère alors sur la surface interne. La quantité de bleu mesurée, représente la somme de la surface externe et une proportion de la surface interne.

Le temps d'attente choisi de 2mn est tel que cette proportion reflète le plus fidèlement les nocivités des argiles telles qu'elles sont révélées par les études de comportement des matériaux composites.

Conclusion

L'essai classique au bleu de méthylène pénalise fortement les granulats contenant les argiles gonflantes, en les rendant plus nocives.

L'essai turbidimétrique quant à lui, traduit par conséquent d'une façon plus réaliste, les nocivités de ces matériaux au sein des matériaux composites vu qu'ils s'expriment dans le même rapport.

IV.4. INFLUENCE DE L'AJOUT DE FINES DE TYPES CALCAIRES ET ILLITIQUES SUR UNE GRAVES-CIMENT

BENABEN [11] a montré l'incidence d'une nature d'argile (Illite) et de son dosage non seulement sur les valeurs des essais de propreté mais également sur le niveau des performances mécaniques d'une grave destinée à être traitée par 3,5% de ciment.

Afin d'apprécier l'incidence qualitatif et quantitatif de l'argile, la même étude a été menée en remplaçant les fines argileuses par des fines calcaires.

L'étude a porté sur :

- L'essai d'équivalent de sable (0/2mm à 10% fines).
- L'essai au bleu de méthylène.
- La valeur du rapport immersion-compression à 28 jours .

Les matériaux utilisés pour la confection d'une grave 0/14mm :

- Les granulats provenant du concassage d'alluvions de la Garonne, de dimensions supérieures à 30mm et les classes granulaires choisies, sont : 0/6 et 6/14mm.
- La nature minéralogique : siliceuse.
- Les pourcentages d'apport en fines argileuses (Illite) sont : 0% , 2%, 4% et 8% .
- Le ciment utilisé CPA 45R provenant de l'usine Lafarge à Bousens : dosage 3,5%.
- La formulation adoptée est de : 55% (0/6) et 45% (6/14).

Les résultats obtenus :

- **Influence de l'ajout de fines sur les indices de propreté.**

Les figures (IV.3) et (IV.4) montrent l'influence de la nature des fines sur l'équivalent de sable et la valeur de bleu.

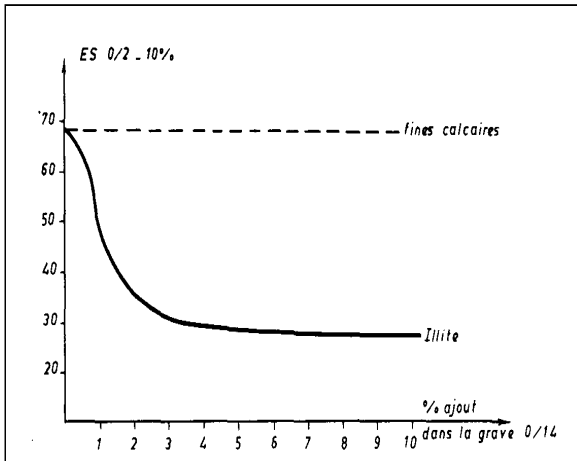


Figure IV.3: Influence de l'ajout de fines sur la valeur de l'ES à 10% de fines [11].

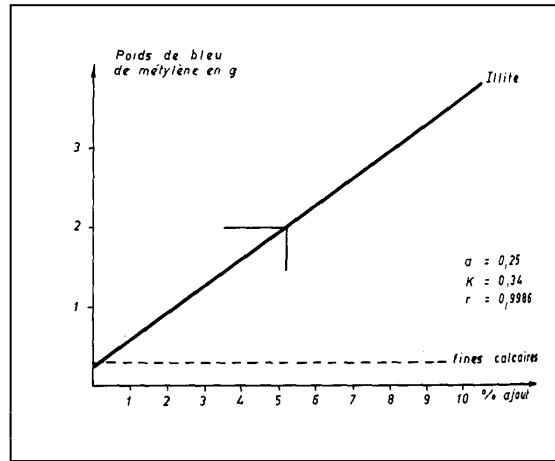


Figure IV.4: Influence de l'ajout de fines sur la valeur de bleu de méthylène [11].

- **Influence de l'ajout de fines sur les indices de qualité.**

L'ajout de fines a une incidence sur les valeurs des résistances en compression à sec (R) et après immersion (r) (tableau IV.2).

Lorsque les fines sont argileuses, la valeur du rapport immersion-compression (r/R) décroît pour arriver à la valeur de 0,8 alors que lorsqu'elles sont calcaires, la valeur de r/R reste voisine de 1 (figure IV.5).

Tableau IV.2: Valeurs des rapports immersion-compression à 28 jours.

% ajout de fines	0			2			4			8		
	R	r	r/R	R	r	r/R	R	r	r/R	R	r	r/R
Illite	6,78	6,7	0,99	6,02	5,95	0,99	5,42	4,97	0,92	5,62	4,53	0,8
Fines calcaires	6,78	6,7	0,99	5,88	5,4	0,92	5,75	5,4	0,94	5,8	5,7	0,98

C'est donc bien la nature de l'argile qui fait évoluer la valeur du rapport r/R et non l'ajout de fines. Il est à remarquer que la résistance à la compression est fonction aussi de la nature des fines.

Valeurs préconisées

Pour les graves-ciment, les valeurs spécifiées sont :

- Indicateur de propreté (circulaire n°77.168 du 26 décembre 1977)
 - * $ES > 30$ (trafic $< 25PL/j$ en couche de base et fondation)
 - * $ES > 40$ (trafic $> 25PL/j$ en couche de base)

Si l'équivalent de sable est inférieur à ces valeurs, la valeur de bleu doit être inférieure à 2g pour 100g de fines.

- Indicateur de qualité : Rapport immersion-compression $> 0,75$.

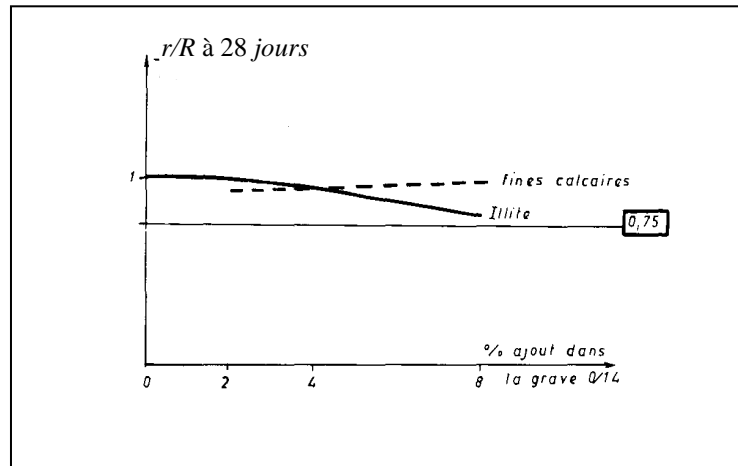


Figure IV.5: Evolution des résistances à la compression simple [11].

Interprétation des résultats

- L'ajout de fines calcaires satisfait tous les indicateurs quel que soit le dosage pris en compte.
- L'ajout de fines argileuses (illite) quant à lui, satisfait :
 - L'indicateur de propreté (bleu de méthylène) jusqu'au dosage de 5%.
 - Le rapport immersion-compression jusqu'à un dosage de 8%.

L'indicateur de propreté qui est donc le plus sévère, permet l'utilisation de l'illite jusqu'à 5%.

Conclusion :

Afin d'éliminer l'incidence de l'augmentation de la teneur en fines, la même étude qui a été menée en remplaçant les fines argileuses par des fines calcaires, a montré les points suivants :

- Les fines argileuses ont une incidence sur les indicateurs de propreté (équivalent de sable, essai au bleu de méthylène) alors que les fines calcaires n'en ont pas, montrant bien que c'est l'argile qui influe.
- Les fines argileuses font baisser la valeur du rapport immersion-compression alors que les fines calcaires sont sans effet.

La comparaison des valeurs atteintes vis-à-vis des valeurs préconisées pour une grave-ciment, a montré que :

- La qualité est atteinte lorsque les fines sont calcaires.
- Le dosage maximal d'illite est de 5% si l'on se reporte à l'indicateur de propreté. A ce dosage, les indicateurs de qualité satisfont les valeurs préconisées.

IV.5. NOCIVITE DES FINES ARGILEUSES AU REGARD DES PERFORMANCES D'UN ENROBE A CHAUD.

Cette étude entreprise par CAMPANAC [25], fait suite aux publications sur l'équivalent de sable [24] et l'essai au bleu de méthylène [112].

Chacun de ces essais représente une propriété particulière liée aux argiles présentes dans les sables.

L'équivalent de sable rend compte de leur aptitude à la floculation et la valeur au bleu quantifie leur surface accessible à l'eau.

Cette approche de comportement liants-granulats à travers ces deux essais, ne peut être qu'imparfaite vu que les argiles mises en présence de liants hydrocarbonés, voient leurs propriétés modifiées (les fines argileuses mises en contact avec le bitume, n'ont plus les mêmes propriétés vis-à-vis de l'eau).

Dans cette étude, les aspects suivants ont été examinés :

- Résultats des « essais de nocivité » de granulats pour de différentes minéralogies et de concentrations d'argile.
- Résultats de l'essai Duriez pour les formulations élaborées à partir de ces matériaux à de différentes concentrations.
- Comparaison des seuils de spécifications granulats/enrobés.

IV.5.1. Nocivité des matériaux argileux .

Du point de vue géotechnique, la « nocivité » des argiles a été quantifiée à l'aide de l'essai d'équivalent de sable et d'adsorption de bleu de méthylène.

La figure IV.6 représente les droites de nocivité des différentes argiles utilisées.

- La relation entre le pourcentage de matériau argileux et la quantité de bleu adsorbé, est linéaire.
- Certains matériaux argileux se pulvérisent difficilement et restent agglomérés, entraînant ainsi des difficultés quant à la détermination de la valeur au bleu.
- La valeur au bleu de méthylène pénalise les matériaux pollués par de la montmorillonite (A, J, F).
- L'équivalent de sable pénalise les matériaux pollués par de la kaolinite.

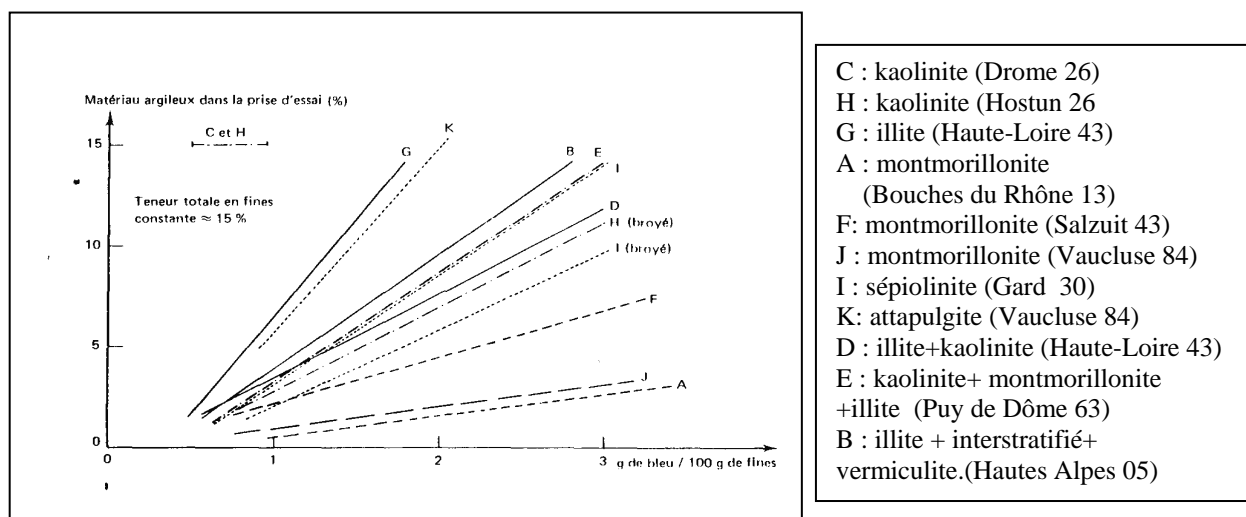


Figure IV.6: Droites de nocivité des différentes argiles [25].

IV.5.2. Influence de la pollution argileuse sur les performances de l'enrobe.

Les sables pollués sont préparés de manière à maintenir une teneur en fines constante égale à 15%.

- Sable de Durance défini +15% argile (soit 100% d'argile dans les fines).
- Sable de Durance défini +13% de fines de Durance +2% d'argile (soit 13,3% d'argile dans les fines).

Les performances sont déterminées par l'essai Duriez (béton bitumineux et sable bitume).

IV.5.2.1. Formulation du béton bitumineux.

Les matériaux utilisés sont :

- Bitume pur 80/100 : teneur de 5%.
- Gravillons de Durance 10/14mm : 60%.
- Sable 0/4mm : 40 %.
 - Fraction 2/4mm : 4%.
 - Passant à 2mm : 36%.
 - Passant à 80µm : 5,4% (soit 15% de fines sur 0/2mm).
- Argiles :
 - B: 25% de matériaux argileux contenu dans les fines (15,1% de fines sur 0/2mm).
 - D: 25% de matériaux argileux contenu dans les fines (15,2% de fines sur 0/2mm).
 - E: 35% de matériaux argileux contenu dans les fines (15,7% de fines sur 0/2mm).

Les résultats sont donnés dans le tableau IV.3 :

Tableau IV.3 : Caractéristiques mécaniques du béton bitumineux.

			Essai Duriez à 18°C – résultats à 7 jours				
Dénomination de l'échantillon	VB	ES10	Taux d'imbibition %	Gonflement volumétrique %	R (10 ⁵ Pa)	r (10 ⁵ Pa)	r/R
Sable témoin	0,40	69	3,3	3,0	50	43	0,86
B	1,30	54	4,0	3,7	47	33	0,70
D	1,50	41	3,9	3,9	46	34	0,74
E	1,60	42	4,1	3,9	46	33	0,72

R : Résistance à la compression à sec.

r : Résistance à la compression en immersion.

r/R : Rapport immersion-compression.

Ces valeurs sont à comparer aux seuils de spécifications retenues pour les enrobés bitumineux : r/R > 0,75.

IV.5.2.2. Formulation du sable bitume

Le sable enrobé (trente-huit formulations) a été formulé de la façon suivante :

- Bitume pur 80/100 : teneur de 5%.
- Matériau argileux suivant la proportion choisie.
- Sable 0/4mm de Durance recomposé de façon à ce que la teneur totale en éléments inférieurs à 80µm, soit voisine de 15% sur la fraction 0/2mm.
 - Fraction 2/4mm : 10%.
 - Passant à 2mm : 90%.
 - Passant à 80µm : 13,5% (soit 15% sur la fraction 0/2mm)

La figure IV.7 illustre l'influence de la nature et de la proportion d'argile sur les propriétés des sables bitumes.

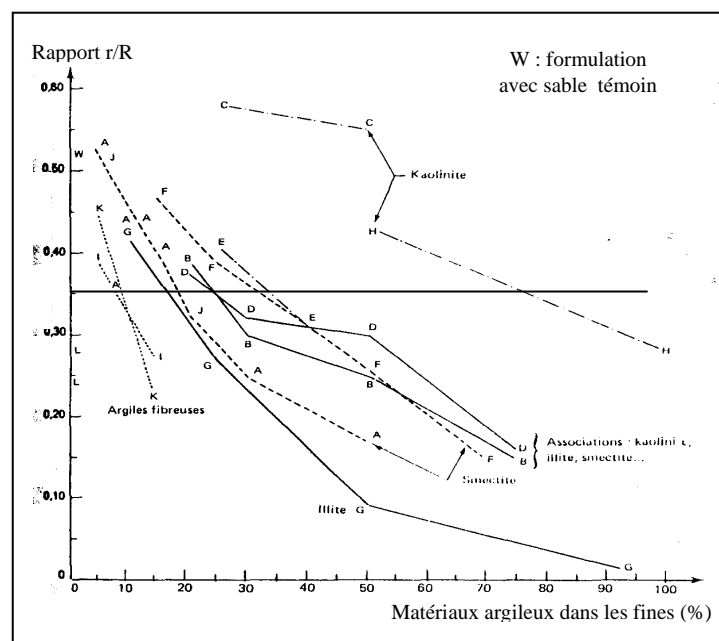


Figure IV.7: Evolution du rapport r/R en fonction de la nature minéralogique [25].

IV.5.2.3. Interprétation des résultats

Le pourcentage et la nature minéralogique des argiles influent sur les caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux en ce sens que :

- Plus les fines sont riches en argiles, plus le rapport r/R diminue.
- La pente croît nettement quand on passe de la kaolinite (C,H) aux argiles fibreuses (K ,I) qui apparaissent comme étant les plus nocives.

Parmi les trente-huit formules en sable-bitume testées, seul dix-huit se sont avérées acceptables c'est à dire que les sables correspondants devraient être acceptés selon les critères de qualité (les spécifications $r/R > 0,35$).

IV.5.3. Les seuils de spécifications granulats-enrobes.

Les figures IV.8 et IV.9 montrent que compte tenu de la dispersion des résultats, il faudrait retenir comme valeurs limites 60 pour l'équivalent de sable et 1 pour la valeur au bleu.

L'essai d'équivalent de sable effectué sur la fraction 0/2mm ramenée à 10% de fines et appliqué comme seul critère de propreté comme c'était le cas jusqu'ici, conduit à reconnaître huit bons matériaux sur dix-huit.

L'utilisation conjointe des deux critères ES et VB, permet d'en identifier treize sur dix huit. Il reste donc encore cinq bons matériaux qui seront éliminés, entraînant ainsi une perte inacceptable en ressource de bonne qualité.

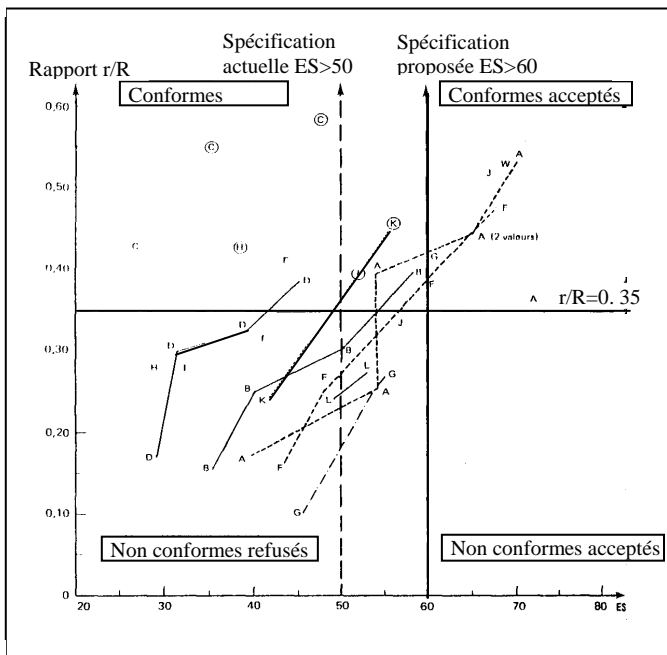


Figure IV.8: Comparaison des spécifications ES et r/R [25].

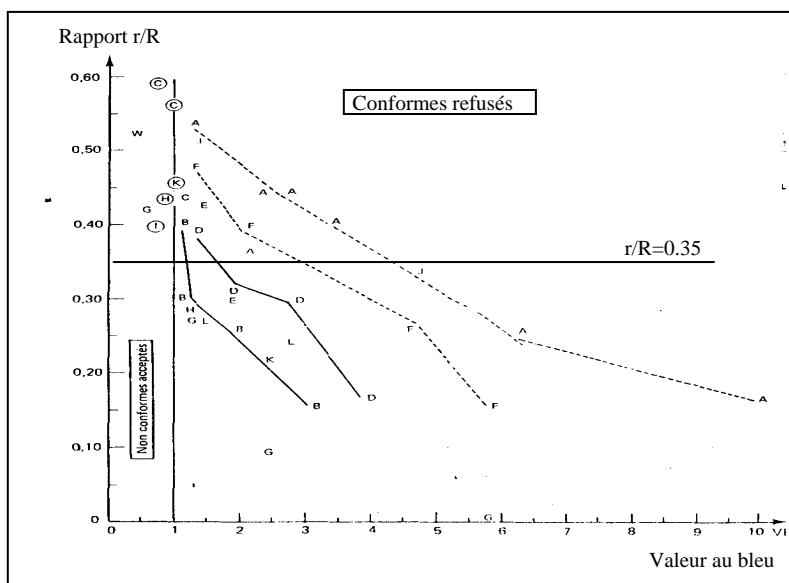


Figure IV.9: Comparaison des spécifications VB et r/R [25].

Conclusion

Cette étude a montré que le choix d'un seuil de conformité, est un problème difficile pouvant avoir des répercussions importantes sur le plan économique.

Elle a conduit à des propositions de modification du seuil de conformité (propreté) des sables destinés aux enrobés bitumineux à savoir:

ES \geq 60sable accepté.
ES < 60 et VB < 1.....sable accepté.
ES < 60 et VB > 1.....sable refusé.

Cette façon de présenter les spécifications permet dans le cadre de cette étude, de récupérer la moitié des sables que l'usage du seul ES éliminerait.

IV.6. INFLUENCE DU LAVAGE SUR LE COMPORTEMENT DES ENROBES BITUMINEUX

Ce travail a été réalisé dans le cadre de la préparation d'une thèse de magister et initié par le Laboratoire des Routes et Aéroports de la Faculté de Génie Civil au niveau de l'USTHB [46].

Cette étude a mis en évidence l'effet du lavage des granulats sur :

- Les caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux.
- Le comportement de ces enrobés bitumineux en compression simple sous des sollicitations prédéfinies (le comportement des enrobés dépend de la nature des granulats présents dans le mélange).

Matériaux utilisés :

Le tableau IV.4 ci dessous donne les pourcentages de matériaux utilisés selon les classes granulaires choisies.

Tableau IV.4 : Les pourcentages des matériaux.

Nature des matériaux	classes	Matériau lavé et calibré	Matériau non lavé et non calibré	Matériau lavé et non calibré
Calcaire (Keddara)	8/15	35%	35%	35%
	3/8	30%	35%	35%
	0/3	35%	30%	30%
	Bitume(80 /10)	6%	6%	6%

Le lavage des granulats de classe 3/8 et 8/15 se fait dans un tamis de 80 μ m.

Le calibrage des classes 0/3, 3/8 et 8/15 consiste à cerner la classe d/D (éliminer les passants au tamis d et le refus au tamis D).

IV.6.1. Influence du lavage et du calibrage des granulats sur les caractéristiques mécaniques

Les essais ont été réalisés avec des éprouvettes de types Marshall.

L'influence du lavage et du calibrage sur les caractéristiques mécaniques, a été étudiée sur des granulats lavés et calibrés, non lavés et non calibrés, lavés et non calibrés.

Cette étude a montré que :

- Les compacités et les stabilités obtenues sur les enrobés bitumineux à base de matériaux non lavés et non calibrés, sont acceptables par rapport à ceux obtenus avec les matériaux lavés et non calibrés (figure IV.10).
- Le fluage des mélanges bitumineux à base de matériaux non lavés et non calibrés, est du même ordre de grandeur que celui des mélanges à base de matériaux lavés et non calibrés (figure IV.11).
- Le lavage et le calibrage des granulats conduisent à une diminution des caractéristiques mécaniques des mélanges hydrocarbonés c'est à dire à une diminution de la compacité et de la stabilité et à une augmentation du fluage.

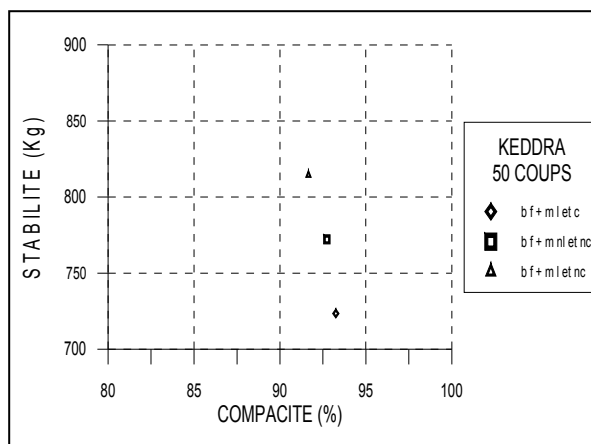


Figure IV.10 : Variation de la stabilité en fonction de la compacité [46].

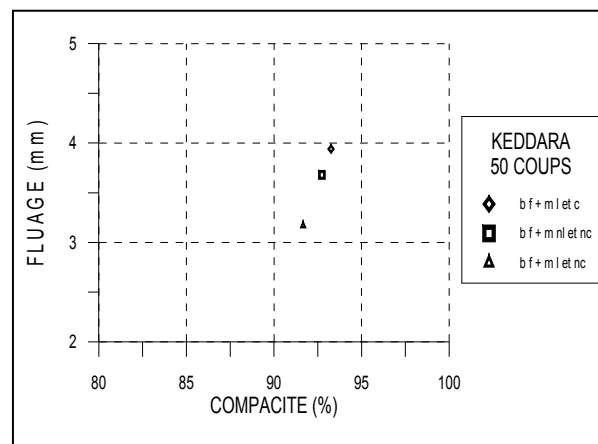


Figure IV.11 : Variation du fluage en fonction de la compacité [46].

IV.6.2. Influence du lavage sur le comportement des enrobés bitumineux en compression simple.

L'essai de compression simple permet de mesurer la contrainte axiale et la déformation axiale de l'éprouvette en fonction du temps. Celle-ci qui est la moyenne sur toute la génératrice, est donnée directement par la presse.

La sollicitation choisie en compression simple, est représentée sur la figure IV.12.

Les matériaux utilisés sont ceux présentés au tableau IV.4.

Les éprouvettes testées sont du type Duriez (H=100mm, D=80mm et C=91 à 94%).

La vitesse de chargement et de déchargement est constante et égale à 1%/min.

Dès que la contrainte chute sensiblement, l'éprouvette est maintenue sous la déformation axiale constante pendant un certain temps jusqu'à la stabilisation de la contrainte.

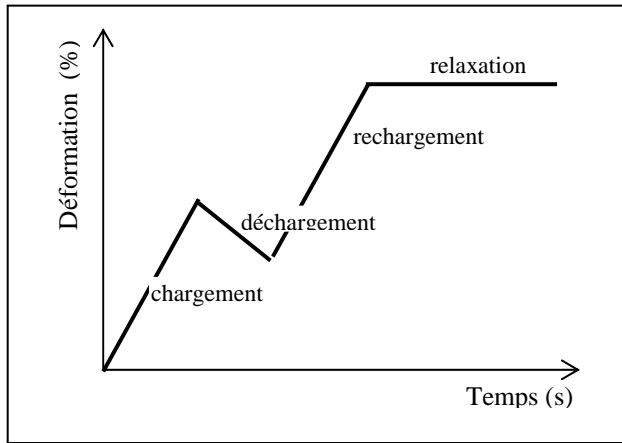


Figure IV.12 : Allure de la sollicitation [46].

L'analyse des résultats obtenus a montré que :

- Les enrobés bitumineux obtenus avec des granulats lavés et calibrés, présentent de meilleures résistances comparées à celles obtenues sur des mélanges à base de granulats non lavés et non calibrés (figure IV.14).
- Les éprouvettes de mélanges hydrocarbonés utilisant des granulats lavés et calibrés, se déforment moins que les autres (figure IV.13) .
- Le fait d'avoir observé un temps de repos dans la sollicitation, a permis au matériau de récupérer, donc de se ressourcer.

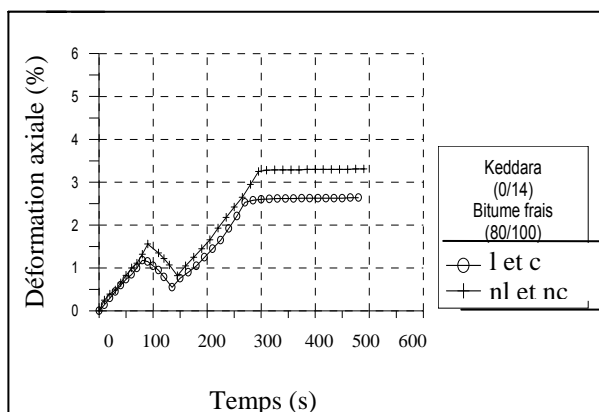


Figure IV.13 : Variation de la déformation axiale en fonction du temps [46].

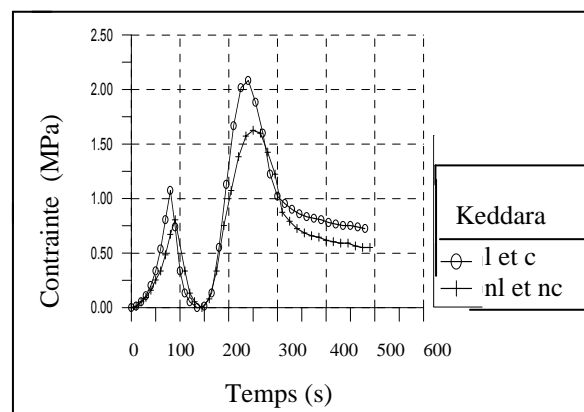


Figure IV.14: Variation de la contrainte en fonction du temps [46].

Conclusion :

Cette étude aidera les ingénieurs et autres utilisateurs du domaine de la construction routière, à élaborer des formulations plus performantes vu que le lavage et le calibrage des matériaux ne sont pas indispensables et qu'ils n'influent pas sur la formulation. Cependant, ils améliorent considérablement le comportement rhéologique sous compression simple des enrobés bitumineux

IV.7. EFFET DES MINÉRAUX ARGILEUX SUR L'ENROBAGE PAR DU BITUME [42].

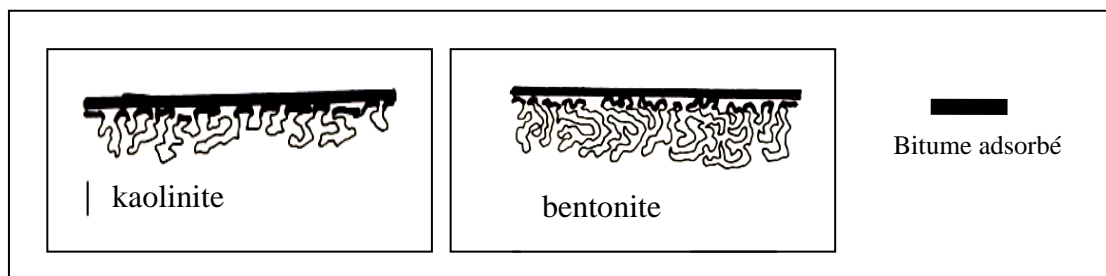
Les problèmes posés par les argiles contenues dans les granulats après enrobage à chaud, sont dus à l'action de l'eau sur les matériaux.

En effet, en mettant en regard la surface accessible à l'eau (surface mesurée au bleu de méthylène) des argiles et les surfaces réellement accessibles au bitume, on obtient le tableau suivant :

Tableau IV.5 : Les valeurs des surfaces accessibles au bitume

Matériau	Surface accessible à l'eau (m ² /g)	Surface accessible au bitume (m ² /g)	Pourcentage de surface accessible au bitume (%)
Kaolinite	38	16,5	43,5
Bentonite	607	8,8	1,5

Cette situation est schématisée comme suit :



Il ressort que plus de 98% de la surface accessible à l'eau de la bentonite n'est pas enrobée. L'eau rencontre des surfaces externes d'argiles exemptes de bitume, pénètre dans leur surface interne disponible et fait gonfler les argiles.

Ce phénomène constitue l'une des causes probables de la chute de résistance mécanique de l'enrobé.

Cette forme de nocivité n'est effective qu'au delà d'un certain seuil de pollution argileuse. En dessous de ce seuil, il semble qu'il y ait :

- Peu d'argile pour que le gonflement réduise la résistance mécanique de l'enrobé.
- L'excès de bitume par rapport à l'argile, lui permet d'enrober cette dernière d'une manière externe mais parfaitement homogène et continue.

Il n'existe pas de seuil qui détermine le taux de pollution argileuse acceptable dans les enrobés et ce, du fait qu'il faut évaluer l'incidence des argiles (minéralogie et teneurs) sur les résistances mécaniques des enrobés après immersion dans l'eau.

Les essais mécaniques lourds ne pouvant servir à contrôler tous les granulats sortis de carrière, il faut les corrélés avec un essai simple et rapide de caractérisation des argiles en l'occurrence l'essai au bleu de méthylène qui lié à l'étendue de leurs surfaces accessibles à l'eau, permet de déterminer leur activité.

Ces valeurs d'activité ne sont pas corrélées aux nocivités des argiles dans les enrobés. Ainsi une bentonite 20 ou 30 fois plus active qu'une Kaolinite, n'est en fait que trois ou quatre fois plus nocive dans un enrobé bitumineux. Néanmoins, la valeur de bleu reste l'indicateur privilégié en utilisant des granulats pollués puisqu'elle indique la surface maximale accessible à l'eau.

HUET [42],[52] propose un pré-traitement des granulats pollués qui consiste à enrober ces derniers par une « coque externe de bitume » de façon homogène et continue, afin de réduire la nocivité des argiles. Ainsi, il a mis en évidence l'effet du traitement des granulats argileux sur les résistances mécaniques.

Matériaux utilisés

Des éprouvettes d'enrobés ont été immergées pendant plusieurs jours avant de procéder à l'étude de leur résistance à l'écrasement.

La pollution des granulats fins utilisés (<2mm), a été obtenue en leur ajoutant des quantités variables d'argiles (Kaolinite, Bentonite).

Fines témoin : fines de Malavaux.

Fines d'apport : fines calcaires de Gannat.

Mélange composé de 85% de 0,08/2 mm.

A₁, A₂, A₃ : Pourcentage de Bentonite dans le mélange.

B₁, B₂ : Pourcentage de Kaolinite dans le mélange.

Résultats expérimentaux

- **L'enrobé bitumineux avec argiles non traitées.**

Le tableau IV.6 montre que les chutes de résistance mécanique après immersion dues aux argiles sont importantes et traduisent la forme de nocivité liée à leur enrobage trop partiel.

Tableau IV.6 : Résistance à la compression des enrobés bitumineux pollués.

Nature des fines dans le mélange		Témoin	D'apport	A ₁	A ₂	A ₃	B ₁	B ₂
% de fines dans le mélange		15%	15%	14,1	13,6	13	12	9,3
% de Bentonite		-----	-----	0,9	1,4	2	----	----
% de Kaolinite		-----	-----	----	----	----	3,0	5,7
% des vides résiduels		17	17,5	16,8	17,9	17,9	18,5	18,8
Compacité		83	82,50	83,3	82,2	82,2	81,6	81,2
Résistance à la compression à 18°C – la vitesse 1mm/s (MPa)	Après 7 jours dans l'air : R	5,93	6,22	5,48	5,54	5,64	5,21	4,96
	Après 7 jours dans l'eau : r	3,25	3,67	2,30	2,09	1,85	2,51	1,92
Rapport immersion –compression r/R		0,55	0,59	0,42	0,38	0,33	0,48	0,39

- **L'enrobé bitumineux avec argiles traitées**

Pour remédier à ce problème, les argiles (kaolinite, bentonite) ajoutées aux granulats, sont enrobées préalablement d'une couche de bitume.

Des éprouvettes d'enrobés sont confectionnées avec ces argiles traitées.

Les résultats d'écrasement sont regroupés dans le tableau IV.7.

Tableau IV.7: Résistance à la compression des enrobés bitumineux dont les fines argileuses sont traitées.

Mélange (85%de 0,08/2mm)	A ₃	B ₂
%de bentonite traitée	2	-----
%de Kaolinite traitée	-----	5,7
%de fines de Malavaux	13	9,3
Résistance a la compression après 13 jours dans l'eau (MPa)	1,78	3,00

La kaolinite n'induit plus aucune perte de résistance mécanique par rapport aux fines de Malavaux ou aux fines calcaires. Elle se comporte donc comme un filler inerte. Ce phénomène résulte de deux causes principales :

- Le procédé permet d'enrober l'argile d'une coque hydrophobe de bitume.
- Cette coque « hydrophobe » du fait de l'adhésivité active (enrobage) du bitume sur la kaolinite, résiste au désenrobage par l'eau et rend de ce fait, la kaolinite inerte.

L'absence d'adhésivité active de la bentonite avec le bitume en permet le désenrobage par l'eau au cours de l'immersion prolongée de l'éprouvette. La pénétration d'eau dans la surface hydrophile de la bentonite non enrobée (98% de la surface totale) provoque alors la perte de résistance mécanique.

Conclusion

Le pré-traitement proposé par HUET, permet d'améliorer les résistances mécaniques de l'enrobé bitumineux à base d'argile de type kaolinique dans la mesure où son adhésivité avec le bitume est meilleure que celle de la bentonite .

On conclue que ce type de pré-traitement ne dépend pas de la teneur en argile mais est plutôt lié à la nature minéralogique de cette dernière.

IV.8. EFFET DE LA CHAUX SUR L'ENROBE BITUMINEUX [94], [116], [118].

En Europe, dans le domaine des matériaux hydrocarbonés, la chaux hydratée est reconnue comme agent d'adhésivité entre bitume /granulats. Toutefois, son utilisation a pratiquement disparu au cours de ces dernières années au fur et à mesure que s'améliorait la production des granulats.

Aujourd'hui, un important programme de recherche américain comportant des essais en laboratoire, a été financé entre 1996 et 2000 par le groupe LHOIST producteur de chaux, pour mieux caractériser les interactions entre la chaux et les composants des enrobés et pour évaluer leurs répercussions sur les performances finales. Il en ressort que si le rôle d'agent d'adhésivité est confirmé, la chaux hydratée apporte également d'autres réponses .

Les principaux résultats

- Action de Ca(OH)_2 comme agent d'adhésivité contre le désenrobage

En Belgique, des essais ont été réalisés par VERHASSELT [117] avec l'essai de tenue à l'enrobage dans l'eau bouillante. Il a pu observer que l'introduction de Ca(OH)_2 à sec dans les agrégats, améliore la résistance au désenrobage lorsque Ca(OH)_2 représente un taux de 20 à 30 % de la masse du bitume.

HOPMAN [51] a réalisé des essais similaires au Centre de Recherche routier (CRR), appuyés par des essais Marshall (après immersion de 48 h) sous différentes conditions de conservation et les agrégats utilisés étaient de nature siliceuse.

D'une manière générale, les résultats ont montré qu'un optimum de 10 à 15 % de Ca(OH)_2 dans la fraction filler du mélange, permettait d'assurer à l'enrobé une très bonne résistance au dés enrobage.

En France au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC), HIERNAUX [116] a réalisé des essais de résistance au désenrobage sur des éprouvettes de type Duriez en immersion et à sec sur des matériaux de nature siliceuse.

Avec 1% de Ca(OH)_2 dans le mélange granulaire le rapport immersion -compression r/R dépasse toujours 0,9.

- Effet de Ca(OH)_2 sur la résistance à l'orniérage

Dans une autre étude HIERNAUX [116], a mis en évidence l'effet bénéfique de la chaux hydratée sur la résistance à l'orniérage d'un béton bitumineux 0/10 mixte (gravillons siliceux et sable calcaire) utilisé en couche de liaison.

Plus récemment, une étude a été effectuée en 1999 par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) à la demande de la société LHOIST et pour tester une formulation de béton bitumineux 0/14 pour couche de roulement (béton bitumineux semi-grenu à granularité continue).

Malgré l'utilisation de bitume dur 35/50, cette formule était sensible à l'orniérage à cause de l'utilisation d'un sable broyé particulier. Des mélanges contenant 1,25 et 2% de chaux hydratée, ont été soumis à des essais d'orniérage, la chaux étant introduite soit dans les granulats avant enrobage soit après l'introduction du bitume.

Cette étude a montré que la chaux a un effet sensible sur la résistance à l'orniérage en particulier lorsqu'elle est introduite après le bitume. Il apparaît aussi qu'une teneur élevée en chaux est plutôt défavorable et que la teneur optimale se situe entre 1 et 1,5%.

- Effet de Ca(OH)_2 sur la résistance au vieillissement

Au début de l'année 2000, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) a voulu appréhender le vieillissement du bitume^(*) au sein de l'enrobé d'une part, au cours de l'enrobage pendant la fabrication et d'autre part, sur la chaussée par un essai expérimental de simulation de vieillissement de galettes d'enrobés placées dans un PAV durant 20 h à 100 °C sous une pression d'air de 2,1MPa.

Les résultats montrent que l'introduction de la chaux (2 à 3%) dans les enrobés, augmente sensiblement la résistance au vieillissement des enrobés que ce soit au cours de l'enrobage ou sur la chaussée.

(*) Le test le plus connu est le Rolling Thin Film Oven Test RTFOT (qui simule le vieillissement du bitume au cours de l'enrobage en centrale de malaxage) et plus récemment, le test dit Pressure Aging Vessel ou PAV qui simule le vieillissement du bitume au sein de l'enrobé sur la chaussée après un certain nombre d'années.

Conclusion

L'action de la chaux hydratée ne se limite pas à l'adhésivité bitume/granulat mais intervient également sur le comportement du bitume et des enrobés. Elle joue le rôle d'agent multifonctionnel améliorant le bitume et les enrobés. Ce constat se traduit par :

- Une amélioration de la tenue au désenrobage.
- Une résistance à l'orniérage accrue.
- Une meilleure tenue au vieillissement.

Ainsi, un ajout de 1 à 2% de chaux hydratée par rapport à la masse globale des agrégats dans les enrobés permet de fabriquer des enrobés à la fois plus performants et plus durables. Pour un coût supplémentaire faible, un gain important (20 %) peut être enregistré en terme de durée de vie du revêtement bitumineux.

IV.9. COMPORTEMENT DES BETONS BITUMINEUX EN FLUAGE STATIQUE.

Un des défauts les plus marqués qui affecte actuellement les routes à revêtement hydrocarboné, est le fluage. Le laboratoire de Routes et Aéroports de la Faculté de Génie Civil (USTHB) n'est pas resté à l'écart de ce problème .

Des études s'appuyant sur des essais de fluage en compression statique, ont été développées au sein de ce laboratoire en vue d'apprécier le comportement des enrobés bitumineux en fluage. Cet essai permet de donner des indications sur les caractéristiques rhéologiques des bétons bitumineux et le contrôle de l'enrobé mis en œuvre après une étude de formulation.

Parmi les études déjà effectuées, on peut citer :

- ❖ L'influence de la teneur et de la classe du bitume ainsi que l'énergie de compactage des éprouvettes aux différentes températures de l'essai sur le fluage en compression statique [64].

Les matériaux utilisés :

Granulats :

- Sable 0/3 (37%) : calcaire de Keddara
- Les gravillons 3/8 (26%) et 8/15 (35%) : basaltiques de Cap djinet

Bitume :

- Trois classes de bitume sont utilisées : le 40/50, 60/70 et 80/100.
- La teneur en liant est égale à 5 %.
- La variation des teneurs en liant est de : 3 à 9% avec un pas de 2%.

Les éprouvettes confectionnées sont de type Marshall compactées avec une énergie de 50 coups par face.

La variation de l'énergie de compactage est de : 30, 50 et 75 coups /face.

Les températures d'essais sont de : 20, 45 et 60°C.

Les résultats expérimentaux

- Influence de la classe du bitume et de la température d'essai sur les déformations permanentes (figure IV.16).

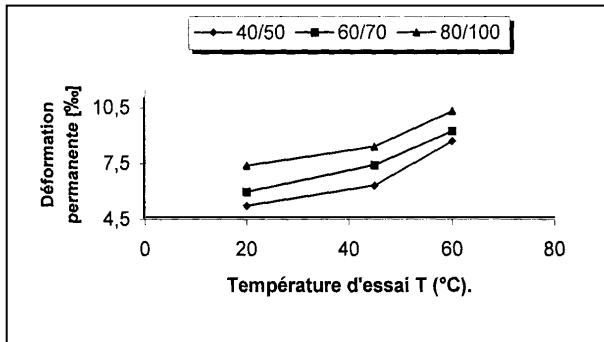


Figure IV.16 : Variation de la déformation permanente en fonction de la classe du bitume et de la température de l'essai [64].

- La déformation permanente des mélanges bitumineux augmente avec la température et lorsqu'on passe d'un bitume dur à un bitume mou.
- La déformation totale du béton bitumineux est d'autant plus grande que son bitume est mou et la température est élevée .
- Influence de la teneur en liant et de la classe du bitume (pour une température d'essai de 45°C) sur les déformations permanentes (figure IV.17).

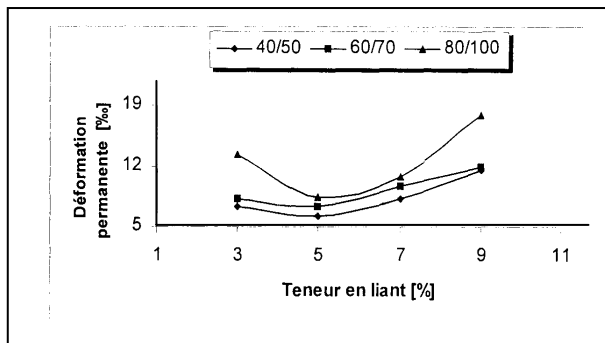


Figure IV.17: Variation de la déformation permanente en fonction de la teneur en liant et de la classe du bitume à 45°C [64].

Les mêmes variations sont obtenues pour des températures de 20 et 60°C .

- Les courbes de déformations initiale, totale et permanente en fonction de la teneur en liant, présentent globalement la même allure.
- Pour toute les classes de bitume, les déformations totales, initiales et permanentes diminuent jusqu'à atteindre une teneur de 5% qui correspond à la teneur optimale puis augmentent au delà de cette valeur.
- Influence de l'énergie de compactage des éprouvettes sur les déformations permanentes pour une température d'essai de 60°C (figure IV.18).

Des variations similaires sont enregistrées pour les températures d'essais de 20°C et 45°C.

- Pour une même énergie de compactage, la déformation permanente augmente avec la pénétrabilité du bitume et avec la température de l'essai.
- Les courbes de déformations initiale, totale et permanente en fonction de l'énergie de compactage, présentent globalement la même allure.

- Les bétons bitumineux « sur compactés » présentent les déformations permanentes les plus élevées.

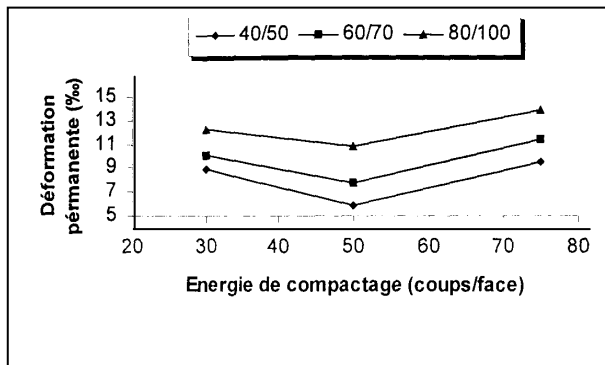


Figure IV.18 : Variation de la déformation permanente en fonction de l'énergie de compactage à 60°C [64].

conclusion

Les enrobés bitumineux sous dosés en liant et compactés à 50 coups par face (éprouvettes type Marshall), présentent un meilleur comportement rhéologique. L'emploi des bitumes durs est recommandé dans ce cas.

- ❖ L'influence des dimensions et du mode de fabrication des éprouvettes sur l'évolution du fluage en compression simple et ce, en prenant la température comme paramètre variable. Les éprouvettes confectionnées sont de type Duriez et Marshall compactées à 50 coups par face [59].

Les matériaux utilisés :

Granulats :

- Sable 0/3 (40%) : calcaire de Keddara
- Les gravillons 3/8 (20 %) et 8/15 (40%) : basaltiques de Cap djinet

Bitume :

- La classe de bitume utilisée est le 40/50
- La teneur en liant égale à 6,07%.

Les températures d'essais sont de :20, 45 et 60°C.

Les résultats expérimentaux

- Les variations de la déformation totale (figure IV.19) et de la déformation irréversible après déchargement (figure IV.20) en fonction de la température d'essai pour les deux types d'éprouvettes, montrent que :
 - La variation de la déformation totale augmente avec la température de l'essai.
 - Les déformations totales les plus élevées correspondent aux éprouvettes type Marshall.
 - La variation de la déformation permanente augmente avec la température de l'essai et les déformations permanentes les plus élevées correspondent aux éprouvettes type Marshall.
 - Les déformations initiales varient d'une manière analogue aux déformations totales est permanentes.

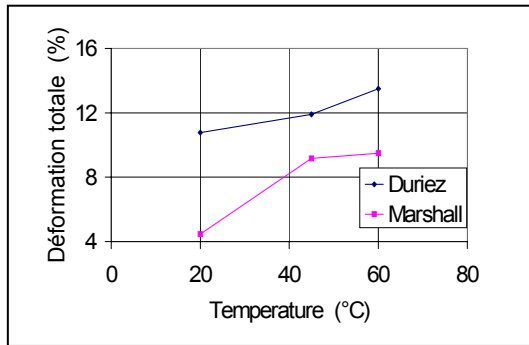


Figure IV.19 : Variation de la déformation totale avec la température [59].

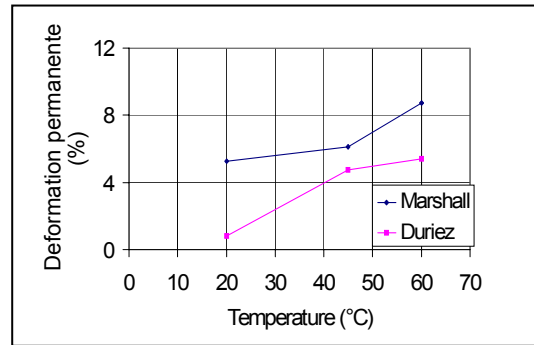


Figure IV.20: Variation de la déformation permanente avec la température [59].

Conclusion

Cette étude montre que les éprouvettes de types Duriez présentent de faibles déformations par rapport aux éprouvettes Marshall, lesquelles résistent mieux aux déformations permanentes vu qu'elles sont plus élancées.

- ❖ L'influence de la teneur en polymère du bitume modifié et de la température de l'essai sur le comportement des bétons bitumineux en fluage statique [13].

Matériaux utilisés :

Granulats :

- Sable 0/3 (40%) : calcaire de Keddara.
- Les gravillons 3/8 (18%) et 8/15 (40%) : basaltiques de Cap djinet.
- Filler d'apport (2%) : chaux.

Bitume :

- La classe de bitume utilisée est le 35/50.
- La teneur en liant est égale à 6%.

Les teneurs en polymères sont de : 0% , 3%, 5% , 7% et 10%.

Les températures d'essais sont de : 20, 45 et 60°C.

Les éprouvettes de type Marshall (50 coups/face).

Les résultats obtenus :

Les variations de la déformation permanente (figure IV.21) et de la déformation totale (figure IV.22) en fonction de la teneur en polymère et de la température, montrent que:

- L'amélioration de la déformation totale après une heure de chargement, est plus importante pour un pourcentage en polymère de 5%.
- La déformation initiale présente la même allure que la déformation totale. Ces déformations initiales sont plus faibles pour une teneur en polymère de 5%.
- Un surdosage en polymère engendre des déformations initiales plus importantes

- La déformation permanente présente la même allure que la déformation totale. Les plus faibles déformations s'obtiennent avec une teneur en polymère de 5%.

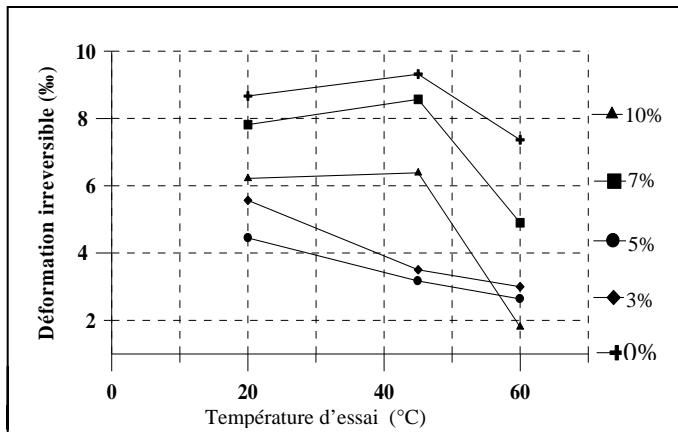


Figure IV.21 : Variation de la déformation permanente en fonction de la température [13].

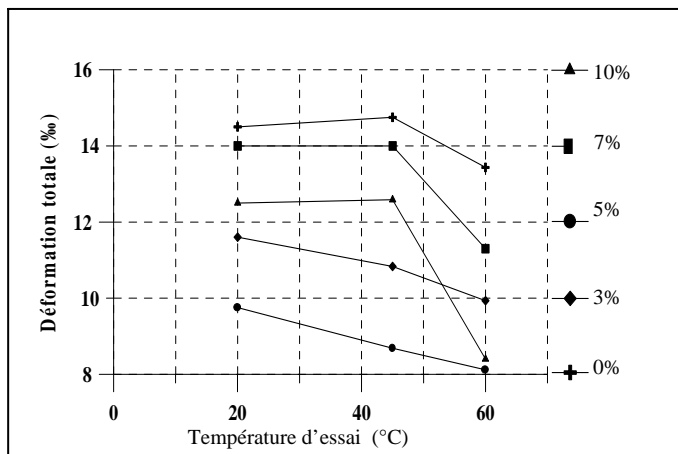


Figure IV.22 : Variation de la déformation totale en fonction de la température [13].

Conclusion

La diminution des propriétés d'un mélange bitumineux est surtout observée dans le cas d'un « surdosage » que dans la cas d'un « sous dosage » en polymère.

Les enrobés avec une teneur en polymère de 5%, possèdent des déformations initiales, totales et permanentes les plus faibles .

IV.10. CONCLUSION

La propreté d'un sable dépend beaucoup de la nature des fines qui y sont présentes et qui ne sont en général, détectées qu'a partir des critères de propreté.

Ces critères restent insuffisants en ce sens qu'ils ne nous renseignent pas sur les caractéristiques mécaniques des matériaux hydrocarbonés, lesquelles varient selon la nature des fines (nocives ou inertes) contenues dans le sable.

Les enrobés bitumineux à base de matériaux pollués, présentent des résistances et des rapports immersion-compression faibles. C'est pourquoi, leur traitement s'avère nécessaire afin d'améliorer leurs performances mécaniques .

Il n'existe pas de seuil qui détermine un taux de pollution acceptable dans les enrobés bitumineux.

Pour cette raison, il faudra faire preuve de prudence quant aux choix des matériaux présentant de bonne qualité.

CHAPITRE IX

ESSAI DE FLUAGE EN COMPRESSION SIMPLE

INTRODUCTION

Les déformations permanentes des revêtements de chaussées peuvent être provoquées par des charges statiques (poinçonnements sur des aires de stationnement par exemple) ou par des charges dynamiques.

L'étude de ces déformations doit être une préoccupation importante dans la construction et l'entretien d'un réseau routier car un bon uni de surface est une des qualités premières d'une route.

Ces déformations permanentes sont fonction du trafic d'une part et d'autre part des conditions climatiques et du temps.

Les matériaux les plus exposés à ces effets sont les matériaux de surface, c'est à dire les couches de roulement.

IX.1. DESCRIPTION DE L'ESSAI [30], [92].

Cet essai consiste à soumettre une éprouvette d'enrobé à une charge constante et à mesurer sa déformation en fonction du temps, tout en veillant à ce que les deux bases de l'éprouvette soient bien parallèles et lubrifiées (graisses aux silicones) pour éviter les efforts parasites.

Sur une éprouvette cylindrique de section «S » et de hauteur « H », on applique une force « F » (figure IX.1).

L'éprouvette se déforme sous l'action de cette charge et on enregistre la réduction de hauteur « ΔH » en fonction du temps.

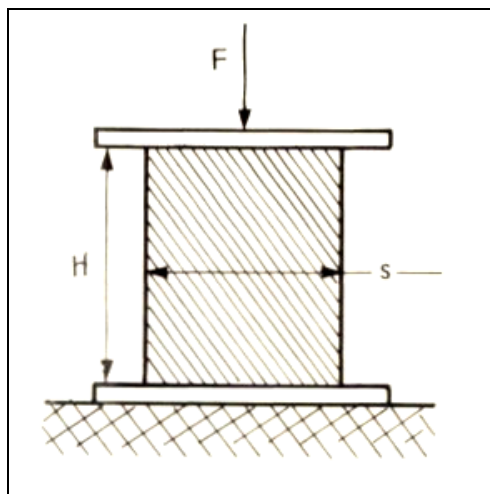


Figure IX.1 : Principe de l'essai de fluage en compression simple [92].

IX.2. APPAREIL DE FLUAGE STATIQUE UNIAXIAL [44], [113].

Les appareillages qui sont utilisés pour effectuer de tels essais, permettent d'appliquer une force constante sur l'éprouvette par l'intermédiaire de deux plateaux parallèles, dont l'un fixe et l'autre mobile (figure IX.2).

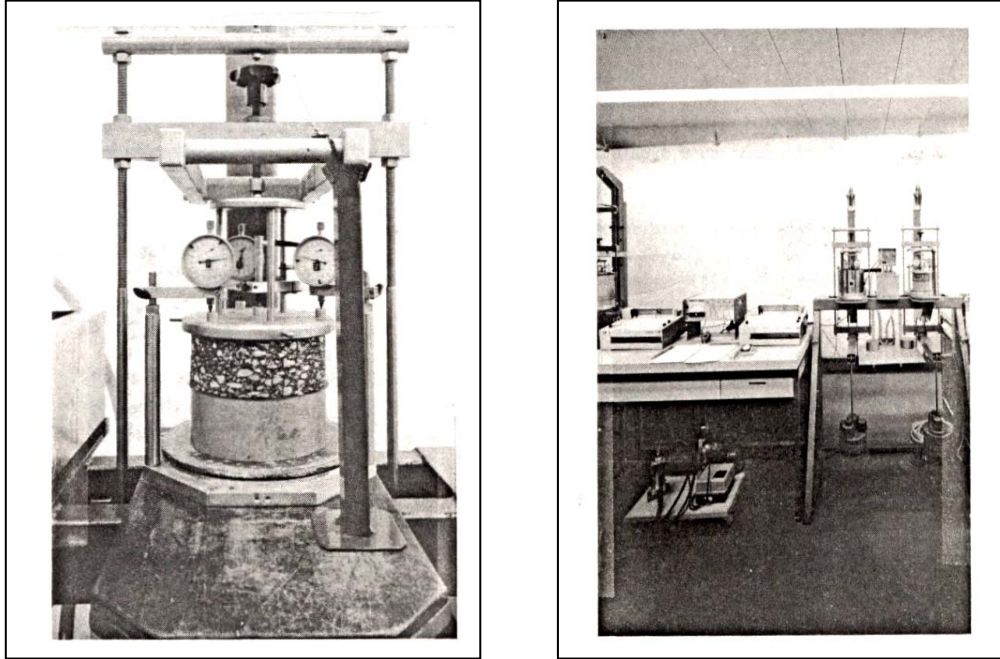


Figure IX.2 : Vue de l'appareillage de l'essai de fluage statique uniaxial [44].

Citons à titre d'exemple un appareil utilisé par UGE & VAN DE LOO [113] pour mesurer la consolidation des sols (l'oedomètre).

Le plateau supérieur est fixe et le plateau inférieur peut être chargé par des poids au moyen d'un système de leviers (figure IX.3). Un dispositif spécial de mise en charge permet de bien fixer le début de l'expérience.

Le déplacement relatif des plateaux au cours d'un essai est indiqué par un comparateur situé dans l'axe de l'éprouvette.



Figure IX.3 : Oedomètre de Wykeham Farrance à l'intérieur d'un aéromètre [64].

IX.3. APPAREIL UTILISE

Le dispositif utilisé dans notre travail, est représenté à la figure IX.4. Rappelons que ce matériel à été mis au point au laboratoire des Routes et Aérodrômes de la faculté de Génie-Civil de USTHB [64].

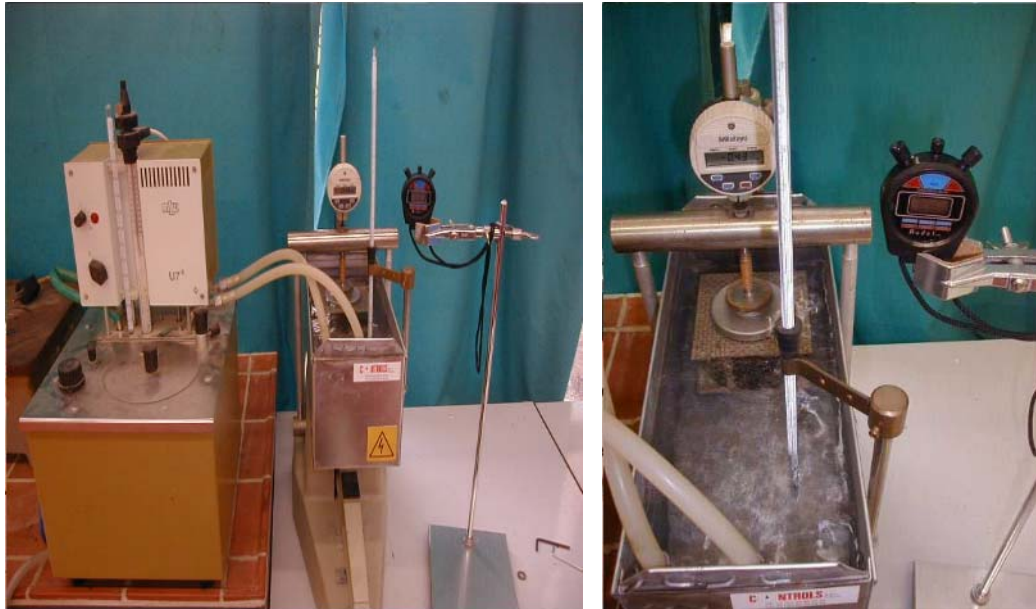


Figure IX.4 : Appareillage mis au point au laboratoire pour des essais de fluage en compression simple.



Figure IX.5 : Vue de l'appareil de fluage

L'éprouvette est placée entre deux plaques métalliques perforées (pour permettre l'arrivée de l'eau à l'éprouvette) parallèles se trouvant à l'intérieur d'un bac rempli d'eau. Ce dernier, qui est relié par une tuyauterie à un bain-marie muni d'une pompe hydraulique, permet de conserver une température d'essai constante.

L'éprouvette est chargée par des poids au moyen d'un système de leviers. La charge se transmet à l'éprouvette grâce à un vérin à vis incorporé au portique de chargement. L'une des extrémités de ce vérin à la forme d'une demi-sphère destinée à épouser un évidement à la surface d'un disque posé sur une plaque au dessus de l'éprouvette et l'autre qui actionne la tige d'un comparateur, permet la mise à zéro de ce dernier.

Un vérin à vis est incorporé au pied de l'appareil pour bloquer temporairement le levier. Il évite également tout mouvement de l'éprouvette pendant la mise en place des poids.

Le déplacement relatif des deux plaques au cours de l'essai est indiqué par un comparateur, situé dans l'axe de l'éprouvette.

IX.4. CONDITIONS DE L'ESSAI [19], [44], [64], [113].

- Le temps de conditionnement des éprouvettes est de six heures, à l'intérieur d'une enceinte climatique portée à la température de l'essai [59].
- Les éprouvettes utilisées sont de type Marshall. Toutefois des éprouvettes prismatiques peuvent être utilisées mais la dispersion des résultats est cependant moindre avec une géométrie cylindrique.
- Les températures d'essais sont de 20°C, 45°C et 60°C.
- La contrainte de compression appliquée est de 0,14MPa.
- L'écart maximum d'épaisseur toléré suivant plusieurs génératrices est de 0,1mm.
- La durée de l'essai est de deux heures, dont une pour le chargement et une pour le déchargement.
- Les intervalles de lecture des déformations au cours du chargement sont : toutes les quinze secondes pendant la première minute, puis chaque minute pour les dix premières minutes, puis toutes les cinq minutes jusqu'à une heure ,c'est à dire la fin du chargement.
- Lors du déchargement, on mesure le retour des déformations avec le même intervalle de temps.

IX.5. EXECUTION DE L'ESSAI [113].

L'exécution de l'essai se fait en suivant les étapes suivantes :

- Régler le bain-marie à la température de l'essai.
- Retirer l'éprouvette de l'enceinte climatique portée à la même température, la placer entre les plaques perforées de sorte qu'elle soit totalement immergée.
- Faire les opérations nécessaires pour avoir l'équilibre complet de l'éprouvette.
- Placer le comparateur, de telle sorte qu'il soit en contact avec l'éprouvette et le régler à zéro.
- Appliquer la contrainte de compression de $1,4 \cdot 10^5 \text{N/m}^2$ pendant la première heure de l'essai et mesurer la déformation axiale .
- Décharger, tout en mesurant le retour des déformations.

Pour chaque température, nous avons effectuée l'essai sur trois éprouvettes présentant des compacités pas très différentes.

IX.6. LA CONTRAINTE APPLIQUEE [113].

Les contraintes appliquées ne doivent pas être trop grandes, car des phénomènes de non - linéarité apparaissent au-delà d'un certain seuil.

UGE [113] a trouvé une meilleure corrélation entre les simulateurs de trafic utilisés et l'essai de fluage en compression simple quand la contrainte appliquée est relativement faible de l'ordre de 10^5N/m^2 . Ceci est probablement dû au fait que sous l'action des roues en mouvement, les temps de charge sont tellement courts que les déformations restent toujours dans le domaine linéaire.

Il ne faut pas non plus que la contrainte soit insuffisante car la déformation de l'enrobé est alors très faible et la précision de la mesure en pâtit.

Une gamme de contraintes entre $0,5$ et $1,5 \cdot 10^5 \text{N/m}^2$ est un bon compromis et l'on peut tester ainsi la plus grande partie des mélanges bitumineux routiers..

IX.7. BUT DE L'ESSAI [113].

L'essai de fluage en compression simple uniaxial, peut être effectué sur tous les types de matériaux bitumineux, il a été corrélé avec des expériences d'orniérage conduites sur des structures routières réelles.

Il complète les essais de formulation classiques et permet de confirmer l'influence des paramètres de formulation et de fabrication sur la stabilité au fluage des enrobés bitumineux . Ce comportement est très influencé par les conditions climatiques.

IX.8. EXPLOITATION DE L'ESSAI [19].

La contrainte appliquée et la courbe de déformation en fonction du temps au cours du chargement et déchargement sont représentées sur la figure IX.6.

On exploite la courbe de fluage statique en compression simple, pour évaluer les paramètres suivants :

- σ_0 : Contrainte de compression appliquée sur l'éprouvette.
- ϵ_{Tot} : Déformation totale enregistrée après une heure de chargement.
- ϵ_{init} : Déformation initiale enregistrée après quinze secondes de chargement.
- ϵ_{final} : Déformation finale complémentaire.
- ϵ_{irrev} : Déformation irréversible ou permanente.
- ϵ_{rev} : Déformation réversible.

- Les déformations durant l'essai sont calculées par :

$$\epsilon(t, T) = \Delta H * 1000 / H_0 \quad (\text{‰})$$

Avec :

- $\epsilon(t, T)$: Déformation axiale de l'éprouvette durant le temps (t) de chargement en secondes à la température (T) en °C.
- H_0 : La hauteur initiale de l'éprouvette .
- ΔH : La variation de la déformation axiale (variation de la distance entre les surfaces chargées).

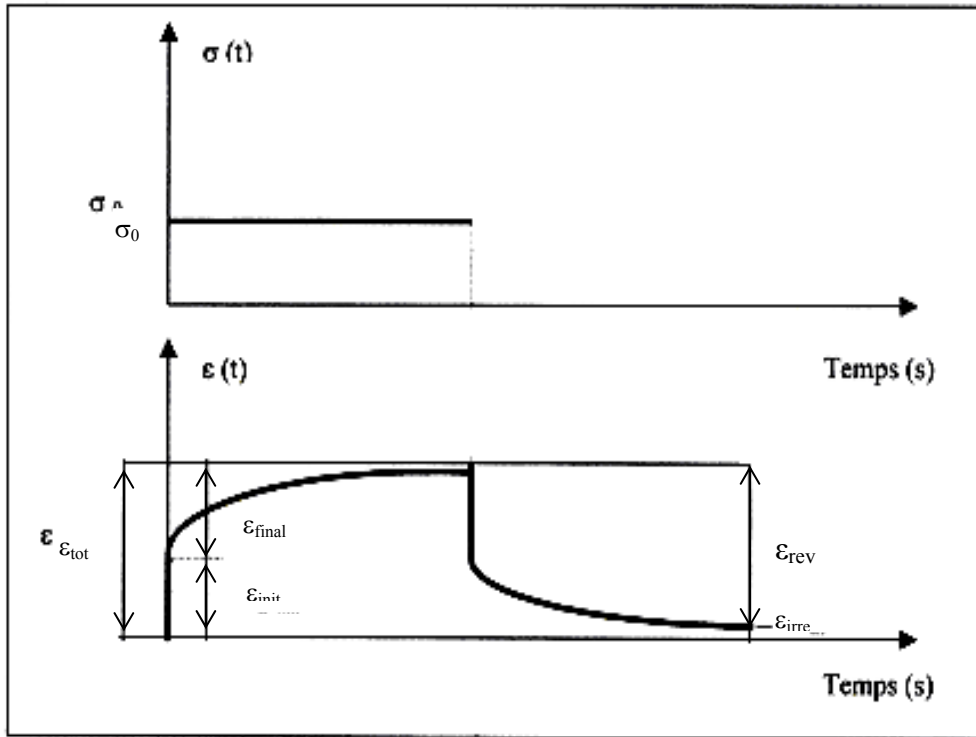


Figure IX.6 : Courbe de fluage statique en compression simple 59].

Les roues d'un véhicule provoquent des déformations lors de son passage sur une chaussée. Ces dernières disparaissent dès qu'il change de position, cependant une petite déformation permanente restera.

Avec l'effet des poids des roues supplémentaires, celle-ci augmentera et des ornières vont apparaître et provoqueront une dégradation de la chaussée.

- Le module de rigidité en fluage statique est calculé par la formule suivante :

$$S_M(t, T) = \sigma_0 / \epsilon(t, T) \quad (\text{MPa})$$

- Le recouvrement viscoélastique est défini par le quotient de la déformation réversible après une heure de déchargement et la déformation totale après une heure de chargement [120].

$$\text{RVE} = \frac{\epsilon_{\text{rev}} \text{ après 1h de déchargement}}{\epsilon_{\text{Tot}} \text{ après 1h de chargement}} * 100 \quad (\%)$$

- La résistance aux déformations permanentes peut être connue, en évaluant les variations de la déformation initiale et de la déformation finale comme pourcentage de la déformation totale [120].

$$\text{Variation def} = \epsilon_{\text{init}}(T) / \epsilon_{\text{Tot}}(T) * 100 \quad (\%)$$

CHAPITRE V

PRESENTATION DES MATERIAUX

INTRODUCTION

Les granulats utilisés pour la mise en œuvre des éprouvettes d'enrobés bitumineux proviennent de la carrière de Keddara située dans la wilaya de Bouira. Cette carrière exploitée actuellement, fait partie de la série des calcaires.

Les fractions granulaires extraites de ces carrières sont :

- Le sable 0/3
- Les gravillons 3/8
- Les gravillons 8/15

Préparation du sable pollué

L'absence de sable pollué au moment des essais, nous a conduit à polluer volontairement le sable de Keddara préalablement lavé (sous tamis 80 μ m) et étuvé, par des argiles prélevées à proximité de cette même carrière.

L'argile dans son état humide (prélèvement en période hivernale) se présente sous forme de mottes et pour pouvoir répartir les fines argileuses dans le sable d'une façon homogène, nous avons séché cette argile dans une étuve à 40°C [25], puis désagrégée dans un broyeur à barres et homogénéisé dans un malaxeur.

Le matériau obtenu a été tamisé et les passants à 80 μ m (les fines argileuses) ont été utilisées pour polluer le sable de Keddara.

V.1. LES ESSAIS EFFECTUES SUR LES GRANULATS.

V.1.1. Analyse granulométrique [72].

- Remarque concernant le sable pollué

La quantité de fines calcaires éliminées par lavage du sable de Keddara a été remplacée par des fines argileuses dans le but de travailler avec un pourcentage de fines constant mais de nature différentes.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés au tableau V.1.

Ce qui nous permet de tracer les courbes granulométriques pour chaque classe granulaire comme indiqué sur la figure V.1.

Nous remarquons que les trois classes granulaires présentent une granularité continue.

Tableau V.1 : Analyse granulométrique

Diamètre du tamis (mm)	Tamisats (%)			
	0/3 (Keddara)	0/3 (pollué)	3/8	8/15
20				100
16				100
12,5			100	89,48
10			100	53,40
8	100	100	99,66	30,44
6,3	100	99,95	91,62	11,81
5	100	99,86	72,17	05,43
4	98,76	98,90	29,06	01,72
2	80,19	81,55	06,88	01,16
1	59,08	60,91	04,63	01,13
0,500	40,16	42,30	03,76	01,11
0,400	36,94	38,22	03,64	01,11
0,315	32,07	33,12	03,47	01,09
0,200	25,63	26,82	03,23	01,06
0,100	19,32	19,99	02,96	01,01
0,080	16,99	17,36	02,77	00,96

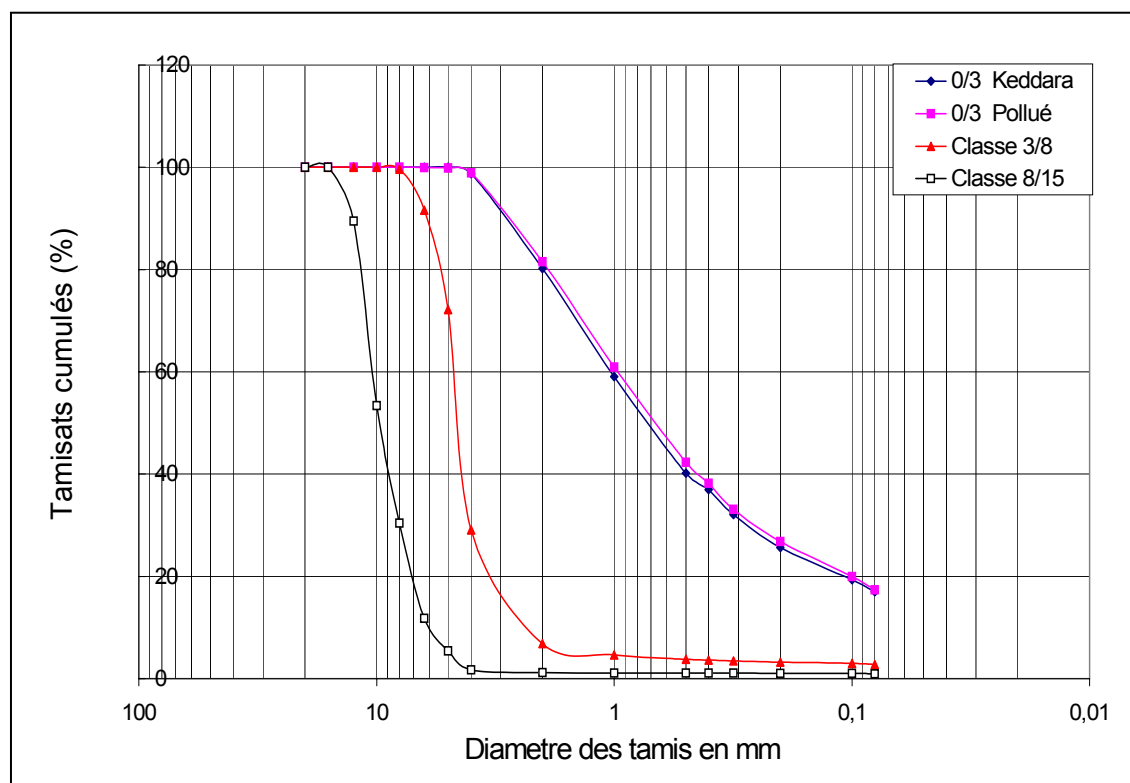


Figure V.1 : Courbe granulométrique des granulats

V.1.2. Résistance à l'usure ou attrition [80].

Lors de la fabrication d'un enrobé bitumineux, le malaxage est source de frottements intenses entre les grains, les pneus de véhicules tendent aussi à user les granulats par frottement, ce qui tend à produire des éléments fins.

La simulation de ce phénomène au laboratoire se fait au moyen de l'essai « Micro-Deval » en présence d'eau (MDE).

Cet essai est représentatif de la résistance à l'usure par frottement et de la durée de vie des arrêtes des granulats.

V.1.3. Résistance au choc [81].

Les granulats doivent résister aux chocs produits par le trafic, comme par exemple ceux résultant par l'utilisation des pneus cloutés en hiver.

Selon que le granulat sera dur ou tendre, les impacts créés par le passage des véhicules et par les engins de compactage auront plus ou moins tendance à le fragmenter.

Pour étudier ce phénomène au laboratoire, on se sert de l'essai « Los Angeles » représentatif de la résistance aux chocs répétés (LA).

Les caractéristiques intrinsèques obtenues sont données dans le tableau V.2.

Tableau V.2 : Résistance à l'usure et au choc

Classe granulaire	LA (%)	MDE (%)
3/8	26	16,44
8/15	24,48	15,93

Les deux classes granulaires 3/8 et 8/15 présentent une bonne attrition et une dureté moyenne [Annexe1].

Toutefois, ces résultats restent satisfaisants [67].

V.1.4. Mesure du coefficient d'aplatissement [85].

En technique routière, les granulats utilisés présentent généralement une forme ramassée à l'exclusion des granulats plats, qui conduisent à des couches de roulement trop glissantes.

Cet essai consiste à déterminer la forme des gravillons.

La mesure du coefficient d'aplatissement « A » a donné les résultats récapitulés dans le tableau V.3.

Tableau V.3 : Coefficient d'aplatissement

Classe granulaire	3/8	8/15
A (%)	19,36	10,46

La classe granulaire 3/8 présente un pourcentage d'éléments plats plus important que celui de la classe granulaire 8/15.

Toutes fois ces pourcentages restent acceptables [Annexe 1].

V.1.5. Mesure des densités spécifiques des granulats [84].

Cet essai consiste à déterminer la densité des différentes classes granulaires.

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau V.4.

Tableau V.4 : Densité des granulats

Classe granulaire	0/3 (Keddara)	0/3 (pollué)	3/8	8/15
Densité	2,63	2,64	2,68	2,70

V.1.6. Analyse chimique sommaire

Le sable et les granulats proviennent de la carrière de Keddara , issus donc d'une même roche mère, d'où la nécessité de faire une analyse chimique sur l'une des trois fractions granulaires pour connaître la nature minéralogique des granulats.

Les résultats de l'analyse chimique sont récapitulés dans le tableau V.5.

Tableau V.5 : Analyse chimique sommaire du sable de Keddara

Constituants (%)	Fraction 0 /3
Insolubles (silice SiO ₂ +Silicates)	12,03
Oxyde de fer et d'Alumine (Fe ₂ O ₃ ,Al ₂ O ₃)	3,17
Carbonates CaCO ₃	83,76
Chlorures NaCl	0,23
Anhydride sulfurique SO ₃	Traces
L'eau de constitution H ₂ O	0,92
Perte au feu	37,77
Anhydride carbonique CO ₂ ↑	36,85

L'analyse chimique sommaire révèle que les granulats issus de la carrière de Keddara, sont constitués d'un pourcentage élevé de carbonates (CaCO₃) avoisinant les 84%.
Eu égard à cette constitution, nous avons des granulats calcaires.

Notons que par sa nature calcaire, le sable et les granulats présentent une excellente adhésivité et une bonne tenue à l'eau avec les liants hydrocarbonés, certaines entreprises l'utilisent comme « dope » en l'employant dans des formules dont les granulats présentent une mauvaise adhésivité.

V.1.7. Mesure de la pollution

La propreté signifie l'absence dans les granulats d'éléments indésirables qui sont soit des fines liées à la pollution du gisement soit des fines dues au concassage des roches.

Le manque de propreté d'un granulat est lié à la présence d'éléments qui, même en faible quantité, sont indésirables pour des raisons diverses.

Ces éléments de pollution peuvent soit faire chuter la résistance des matériaux composites soit entraîner des difficultés de mise en œuvre soit s'opposer à une bonne adhésivité des liants aux granulats .

Ils sont détectés :

- Pour les gravillons par l'essai de propreté superficielle.
- Pour les sables par :
 - L'essai d'équivalent de sable à 10% de fines (PS).
 - L'essai au bleu de méthylène (VB).
 - L'indice de plasticité (Ip).

V.1.7.1. Détermination de la propreté superficielle [75].

La propreté superficielle est définie comme étant la proportion d'éléments passants au tamis 0,5mm, y compris les éléments adhérant aux granulats .
Les résultats obtenus sont donnés dans la tableau V.6.

Tableau V.6 : Propreté superficielle des gravillons

Classes	Propreté Superficielle (%)
3/8	1,4
8/15	0,69

La propreté superficielle des deux classes granulaires est $\leq 2\%$, ce qui est conforme pour les couches de roulement [Annexe 1].

V.1.7.2. Indice de plasticité [76].

Pour les sables destinés aux assises de chaussée, il est prescrit un indice de plasticité non mesurable [25].

Nous avons déterminé la valeur de l'indice de plasticité sur les sables étudiés.

En outre, cet indice est en bonne liaison avec le pourcentage d'éléments fins contenus dans le sable, et en particulier avec les éléments argileux qui sont toujours à redouter par le technicien constructeur.

Les résultats obtenus sont donnés au tableau V.7

Tableau V.7 : Indice de plasticité.

Echantillon	Ip
0/3 Keddara (<0,400mm)	Non mesurable
0/3 pollué (<0,400mm)	14,21

Un indice de plasticité non mesurable ($Ip < 7$) indique que les fines contenues dans le sable ne sont pas argileuses .

V.1.7.3. L'essai d'équivalent de sable à 10% de fines [74] .

L'indice de plasticité non mesurable ne traduit pas forcément l'inexistence d'éléments polluants. C'est pourquoi on réalise un essai d'équivalent de sable qui mettra en évidence l'activité des argiles.

L'essai d'équivalent de sable à 10% de fines, est effectué sur la fraction d'un sable passant au tamis de 2mm et dont la proportion des éléments passant au tamis 0,080mm a été ramenée à

10% à l'aide d'un sable correcteur (si cette teneur en fines à l'état naturel est supérieure à 11%).

Cet essai rend compte globalement de la quantité d'éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

Les résultats trouvés sont représentés dans le tableau V.8.

Tableau V.8 : Equivalent de sable à 10% de fines

Echantillon	PS piston (%)	PS visuel (%)
0/3 Keddara	68,57	69,70
0/3 Pollué	30,03	33,40

$PS \geq 50$, pour le sable de Keddara, ce qui est conforme pour les couches de roulement, donc notre sable est propre [17]. On vérifie aussi que le sable défini auquel on a rajouté des fines argileuses, est bien pollué ($PS < 50$).

V.1.7.4. Essai au bleu de méthylène [79].

Cet essai détermine la capacité d'adsorption ionique des sols et des sables. En fait, il mesure surtout l'abondance et la capacité d'adsorption des minéraux argileux des sables et permet d'évaluer le stade de pollution des matériaux par l'argile [14].

Le bleu de méthylène a pour caractéristique d'être rapidement adsorbé sur les surfaces externes et internes des minéraux argileux. Par contre, son adsorption par les autres minéraux demeure négligeable, donc la quantité de bleu adsorbé reflète bien la surface active des minéraux argileux.

Le résultat de cet essai est communément appelé la « valeur au bleu » (VB).

Les résultats sont présentés dans le tableau V.9.

Tableau V.9 : Valeur au bleu de méthylène

Echantillon	VB
0/3 Keddara	0,12
0/3 Pollué	1,5

$VB < 1$, ce résultat confirme encore une fois la propreté du sable de Keddara [Annexe 1].

V.2. IDENTIFICATION DES MATERIAUX ARGILEUX

Le paramètre « propreté » ne dépend pas seulement de la quantité d'éléments fins, mais aussi de leur qualité et de leur nature minéralogique.

Une analyse diffractométrique aux rayons X sur l'échantillon argileux s'avère nécessaire.

V.2.1. Diffraction aux rayons X

La diffraction aux rayons X a été réalisée à la Faculté des Sciences et de la Terre (USTHB) et porte sur un échantillon formé d'une poudre finement broyée, dont les grains ont des dimensions de l'ordre de 1 à 10µm.

L'essai consiste à déterminer les distances réticulaires et à chaque distance mesurée lui correspond une intensité diffractée qui lui permet d'identifier les espèces solides sans les altérer contrairement à l'analyse chimique.

L'essai est réalisé sur un échantillon dans lequel on a éliminé les matières organiques, en utilisant de l'eau oxygénée H₂O₂ et du HCl.

Les résultats obtenus dans le tableau V.10 montrent que :

Tableau V.10 : Analyse par diffraction RX de l'argile.

2θ	d (Å°)	I ₀ /I _n (%)	Kaolinite	Illite	Illite+Kaolinite+Montmorillonite
12,290	7,2014	10,45	+		
19,978	4,4460	8,86		+	
20,920	4,2462	24,99	+		
25,096	3,5482	9,70	+		
26,719	3,3363	100	+		
29,515	3,0266	37,86	+		
34,955	2,5668	8,55			+
36,709	2,4481	11,41		+	
39,549	2,2786	14,63	+		
43,384	2,0880	9,70	+		
45,723	1,9843	6,74		+	
47,575	1,9113	7,76			+
48,672	1,8707	7,05	+		
50,213	1,8169	11,37	+		
55,174	1,6647	5,29			+
60,029	1,5411	9,78	+		

2θ : L'angle de détection.

d : La distance réticulaire.

I₀ : L'intensité diffractée.

I₀/I_n : L'intensité relative.

Les matériaux constituant l'argile sont :

- Kaolinites 40 %
- Illite 25 %
- Montmorillonite... 30 %
- Quartz..... 5 %

Eu égard à cette analyse, on conclue que l'argile utilisée est de nature Kaolinitique.

V.3. ANALYSE DE LA CHAUX

La chaux utilisée nous a été livrée par ENEPAG de Oued-smar, c'est une chaux éteinte dont les caractéristiques sont données ci-après :

- Une teneur en fines de 93% (refus au tamis 80µm ≤ 10%).
- La densité est de 2,83.

V.3.1. Analyse par diffraction aux rayons X

Une analyse par diffraction aux rayons X a été réalisée sur un échantillon de chaux préalablement étuvé à 28°C.

Les résultats obtenus dans le tableau V.11 montrent que :

Tableau V.11 : Analyse par diffraction RX de la chaux.

2θ	d (Å)	I ₀ /I _n (%)	CaCO ₃	Ca(OH) ₂
18,08	4,9	74		+
23,02	3,86	2	+	
28,66	3,112	23		+
29,40	3,035	17	+	
34,08	2,628	100		+
39,40	2,285	4	+	
43,14	2,095	4	+	
47,12	1,927	42		+
47,48	1,913	5	+	
50,80	1,796	36		+
54,34	1,687	21		+
59,30	1,557	3		+
62,54	1,484	13		+
64,22	1,449	13		+
71,78	1,314	8		+
77,70	1,228	1		+
79,00	1,211	1		+
81,82	1,1762	3		+
84,72	1,1432	11		+
86,18	1,1275	2		+

La chaux utilisée est composée de :

- Calcite.
- Oxyde de calcium.

Ces résultats révèlent qu'il s'agit d'une chaux de nature calcique.

V.3.2. Analyse chimique sommaire

Cette analyse est effectuée pour déterminer les pourcentages des différents minéraux constituant la chaux.

Les résultats obtenus sont mentionnés sur le tableau V.12.

Tableau V.12 : Analyse chimique sommaire de la chaux

Constituants (%)	Chaux
Insolubles (silice SiO_2 + Silicates)	7,38
Oxyde de fer et d'Alumine (Fe_2O_3 , Al_2O_3)	1,03
Perte au feu	29,26
Chlorures NaCl	0,55
Oxyde de calcium CaO	91,04

L'analyse chimique sommaire révèle que la chaux est de nature calcique et comporte quelques impuretés.

V.4. RESULTATS DES ESSAIS EFFECTUES SUR LE BITUME [15], [49], [99].

Dans les applications routières à chaud, il est nécessaire d'amener le bitume à l'état liquide pour réaliser de façon satisfaisante le mélange bitume-granulat, opération qu'il est souhaitable de faire à basse température pour des raisons économiques.

Le bitume est un matériau qui se comporte comme un corps viscoélastique, ses caractéristiques dépendent de la température et du temps de charge.

Il est caractérisé par un certain nombre d'essais, effectués selon des modes opératoires bien définis.

Les résultats de ces essais permettent un classement des bitumes en fonction de leur consistance et leur utilisation dans différentes régions du pays en tenant compte de l'environnement climatique, des épaisseurs d'enrobés mises en œuvre (pour des couches épaisses, on utilise un bitume plus dur) et des classes du trafic.

Dans notre étude il s'agit d'analyser les caractéristiques du bitume de classe 40/50.

V.4.1. Pénétrabilité [86].

L'essai de pénétrabilité à l'aiguille permet d'apprécier la consistance d'un bitume à différentes températures, il caractérise aussi sa dureté .

La mesure de la pénétrabilité à 25°C sert à classer les bitumes purs en différentes catégories, tandis que les mesures effectuées à des températures différentes permettent d'apprécier la susceptibilité de ces bitumes.

A une température donnée, plus un bitume est dur plus sa pénétrabilité est faible .

V.4.2. Point de ramollissement [77].

Les bitumes n'ont pas de point de fusion franc, leur consistance décroît progressivement lorsque la température s'élève. On a fixé arbitrairement un repère de changement de consistance : c'est le point de ramollissement appelé aussi température bille et anneau (T_{BA}).

V.4.3. Densité [73].

La densité des bitumes est mesurée au pycnomètre généralement à une température donnée (25°). Elle exprime le rapport entre la masse d'un volume de ce produit à celle d'un égal volume d'eau à une même température.

Tous les liquides se dilatent lorsqu'ils sont chauffés et se contractent au refroidissement pour ces raisons il faut mentionner la température du bitume est celle de l'eau.

La densité est voisine de 1 pour tous les bitumes à la température de 25°C [69].

V.4.4. Perte de masse au chauffage [87].

Cet essai permet de s'assurer de l'absence d'une fraction volatile liée à une pollution éventuelle et de déterminer l'effet de la chaleur sur le bitume [69].

Après avoir chauffé le bitume à 163°C pendant 5 heures, on mesure :

- La variation du poids de l'échantillon qui est généralement inférieure à 1%.
- La chute de la pénétrabilité qui elle est toujours inférieure à 30%.

V.4.5. Point d'éclair, point de feu [88].

Appelé aussi point d'inflammabilité Cleveland (appareil Cleveland à vase ouvert).

Le point d'éclair du bitume placé dans une coupe ouverte, est la température minimale à laquelle les vapeurs émises par le liant s'enflamment spontanément en présence d'une flamme pilote.

Cette température intéresse la sécurité liée au transport et à la manipulation des produits inflammables.

Si après avoir atteint le point d'éclair, on continue à chauffer le bitume en vase ouvert celui-ci brûle de plus en plus longtemps après avoir été enflammé.

La température à laquelle le bitume brûle pendant 5 secondes, est désignée sous le nom du « point de feu ».

V.4.6. Susceptibilité thermique [38], [69].

La susceptibilité des bitumes à la température, c'est à dire la mesure de la variation de leur consistance en fonction de la température, est généralement caractérisée par un nombre dénommé « indice de pénétrabilité (IP) » dans le domaine où la pénétrabilité est mesurable.

PFEIFFER [69] montre expérimentalement que lorsque la température s'élève, le bitume se ramollit et la pénétration augmente suivant :

$$\text{Log } P = AT + B \dots\dots\dots (1)$$

T : représente la température choisie.

P : représente la pénétrabilité du bitume.

L'indice de pénétrabilité est lié à A par la relation suivante :

$$IP = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \dots\dots\dots (2)$$

Cet indice est évalué par deux méthodes :

- Méthode LCPC

Dans la pratique, l'indice de pénétrabilité et A sont déterminés à partir des mesures de pénétrabilité à cinq températures afin de contrôler la linéarité de la relation (1), ensuite à partir des températures extrêmes T₁ et T₂ (avec T₁>T₂) on calcule :

$$A = \frac{\text{Log}P_1 - \text{Log}P_2}{T_1 - T_2}$$

Avec :

P₁ : étant la pénétrabilité mesurée à la température T₁.

P₂ : étant la pénétrabilité mesurée à la température T₂.

Les cinq températures d'essais pour les différentes classes de bitume sont données en [Annexe2].

- Méthode de « Pfeiffer ».

L'indice de pénétrabilité défini par Pfeiffer et Van Doormaal est déterminé à partir la pénétrabilité à 25°C et la température bille et anneau en estimant à 800 la pénétrabilité à T_{BA}.

$$A = \frac{\text{Log}800 - \text{Log}P_{25}}{T_{BA} - 25}$$

Ces deux IP sont en général un peu différents du fait que la pénétrabilité de tous les bitumes à T_{BA} n'est pas toujours égale à 800, on se contentera par conséquent de calculer uniquement l'IP (LCPC).

Les valeurs de IP varient de (-1) pour des bitumes très susceptibles à la température jusqu'à environ (+1) pour les bitumes les moins susceptibles à la température [69].

La mesure de la pénétrabilité à cinq températures conventionnelles est représentée sous forme de graphique figure V.2. Cette mesure nous a permis de calculer l'indice de pénétrabilité.

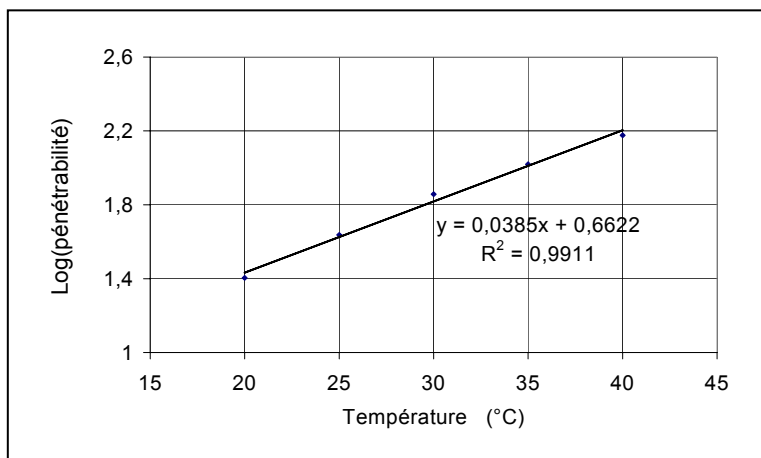


Figure V.2 : Susceptibilité thermique du bitume

IP=0,26 donc notre bitume est peu susceptible à la température [69].

Les températures d'essais permettant de déterminer les cinq pénétrabilités dépendent de la classe du bitume utilisé [Annexe 2].

Les résultats obtenus pour tous ces essais sont regroupés dans le tableau V.13.

Tableau V.13 : Résultats des essais d'identification du bitume

Pénétrabilité à 25°C (1/10mm)	44
Point de ramollissement T_{BA} (°C)	52
Point d'éclair (°C)	310
Point de flamme (°C)	326
Perte de masse au chauffage (%)	0,46
(%) de pénétration restante après perte de masse au chauffage par rapport à la pénétration initiale.	81,82
Densité relative	1,05
IP (LCPC)	0,26

Les résultats obtenus sont conformes à la classe du bitume [Annexe2]

V.5. CONCLUSION

En construction routière, les granulats qui constituent la part essentielle des matériaux utilisés pour la mise en œuvre des chaussées, représentent 80 à 100% selon la technique envisagée. D'où la nécessité de les étudier.

De cette étude, nous constatons que notre choix des matériaux est acceptable dans la mesure où ils présentent de bonnes caractéristiques intrinsèques et de fabrication et de ce fait, les spécifications sont respectées.

L'ensemble des résultats obtenus sur les caractéristiques du bitume, a permis de:

- Vérifier qu'il répond aux spécifications.
- Confirmer la classe du bitume 40/50.
- Conclure que le bitume utilisé n'est pas susceptible à la température.

CHAPITRE VI

FORMULATION DE L'ENROBE BITUMINEUX

INTRODUCTION

L'enrobé bitumineux est un mélange de granulats minéraux et de liant hydrocarbonés (bitume pur) dosé dans des proportions convenables. C'est aussi un corps hétérogène dont le bitume lui confère son caractère visqueux, alors que sa partie minérale est responsable de sa résistance.

Dans leur domaine d'utilisation, les enrobés présentent des caractéristiques mécaniques variables selon leur sollicitation par le climat et le trafic routier.

VI.1. METHODES DE FORMULATION DES ENROBES BITUMINEUX [32], [56], [93].

Afin de satisfaire les exigences posées par la mise en place des enrobés bitumineux, il faut procéder à des adaptations des techniques d'essai de laboratoire. C'est ainsi que ce sont développés les premières méthodes de formulation dites traditionnelles suivies de nouvelles méthodes qui permettent d'appréhender la compactabilité (PCG), l'orniérabilité (Ornièreur) et la fatigue qui donnent une estimation des propriétés mécaniques de l'enrobé à partir de sa composition.

Les méthodes traditionnelles reposent sur des essais mécaniques provoquant la rupture plastique d'une éprouvette dans des conditions « normalisées » de température et de charge. Il y a lieu de noter que ces essais ne déterminent qu'un seul des aspects de leur comportement mécanique.

L'étude de formulation des enrobés bitumineux consiste à chercher la teneur optimale en liant pour assurer un certain seuil de stabilité, de compacité, de résistance à l'eau (désenrobage) et au fluage.

Les essais classiques Marshall et Duriez utilisés dans les Laboratoires Algériens, sont employés pour déterminer les formules satisfaisantes.

Nous avons confectionné des mélanges hydrocarbonés couramment utilisés en Algérie dans les couches de surface des chaussées. En pratique, ces mélanges sont nommés bétons bitumineux.

VI.1.1. Composition granulométrique du mélange

Après avoir analysé les granulats et le bitume qui constituent l'enrobé bitumineux, l'étude de la formulation consiste à déterminer la composition du mélange et ce, afin de préciser le pourcentage à prendre pour chaque constituants.

En pratique, Il n'existe pas de méthode type dans la mesure ou les pourcentages entrant dans la composition de l'enrobé bitumineux seront choisis d'une manière arbitraire jusqu'à l'obtention d'une courbe de mélange s'insérant dans le fuseau de référence qui correspond dans notre cas, au béton bitumineux 0/14 semi-grenue.

Après plusieurs essais, il s'avère que la courbe qui s'insère le mieux dans le fuseau granulométrique (figure VI.1) est celle qui correspond aux pourcentages de mélanges suivants :

40 % de 0/3 (sable Keddara)
 15 % de 3/8
 45 % de 8/15

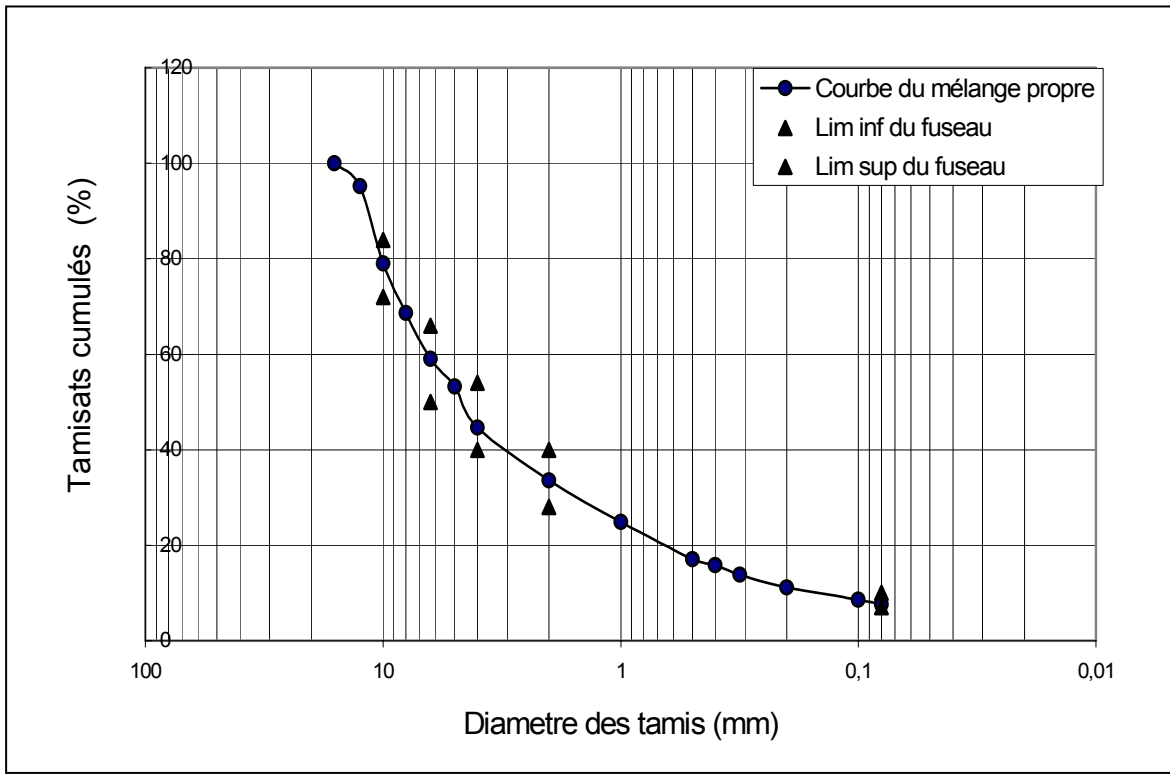


Figure VI.1: Courbe granulométrique du mélange avec sable propre

Mélange propre : Mélange avec sable de Keddara (sable PR)

VI.1.2. Teneur en liant hydrocarboné [66].

La teneur en liant à retenir pour le chantier, sera définie à partir d'une étude de laboratoire qui portera sur au moins quatre teneurs en liant.

Pour déterminer les teneurs en liants sur lesquelles portera l'étude, on utilise la formule suivante :

$$\text{Teneur en liant} = k \alpha \sqrt[5]{\Sigma} \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{2,65}{\Sigma pidi}$$

$$\text{et} \quad \Sigma = 0,25 G + 2,3 g + 12 s + 135 f \quad (\text{m}^2/\text{kg})$$

* α coefficient correcteur : il est destiné à tenir compte du poids spécifique des granulats.

* Σ : il représente la surface spécifique conventionnelle qui est donnée par la formule suivante :

- G : % des refus à 6,3 mm dans la courbe du mélange.
- g : % des éléments compris entre 6,3 et 0,315mm.
- s : % des éléments compris entre 0,315 et 0,080mm.
- f : % des éléments inférieurs à 0,080mm (% des fines).

p_i, d_i : ils représentent respectivement le pourcentage et le poids spécifiques de la fraction i .

* k module de richesse : il représente l'épaisseur du film de liant enrobant les grains, c'est la richesse en liant qui commande la souplesse du revêtement, sa faculté d'adaptation, de même que sa rigidité et son indéformabilité.

Pour un béton bitumineux, le module de richesse varie de 3,3 à 3,9.

Les résultats obtenus sont :

$$\alpha = 0,9925$$
$$\Sigma = 12,2046 \text{ m}^2/\text{kg}$$

Tableau VI.1: Les teneurs en liant retenues

Module de richesse k	3,45	3,55	3,65	3,75
Teneur en liant (%)	5,65	5,81	5,98	6,14

Après le choix de la courbe du mélange (figure VI.1), on détermine la teneur optimale en bitume à l'aide de deux essais classiques qui sont :

- L'essai Marshall
- L'essai Duriez.

Le mélange obtenu doit avoir :

- Suffisamment de bitume pour donner un pavage durable.
- Une stabilité suffisante pour satisfaire les exigences du trafic routier sans déformation.
- Suffisamment de vides après compactage pour permettre un compactage additionnel léger dû aux charges du trafic.
- Une maniabilité suffisante pour permettre une mise en place efficace du mélange.

VI.2. ESSAI MARSHALL [33], [50], [83], [93].

L'essai Marshall permet de déterminer la « stabilité » et le « fluage » Marshall d'une éprouvette cylindrique soumise à une compression exercée suivant sa génératrice et ce, pour un compactage énergétique donné (50 coups de marteau appliqués en 55 secondes environ sur chaque face de l'éprouvette) (figure VI.2).

Cette compression est appliquée sur l'éprouvette à une vitesse de 0,86mm/s après une demi-heure d'immersion à 60°C.

Cet essai s'applique à tous les enrobés à chaud ne comportant pas de granulats de dimensions supérieure à 20mm.

VI.2.1. Mesures effectuées à partir de l'essai Marshall.

- La « stabilité » Marshall (SM) ou la charge maximale atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette, exprimée en kilogrammes.
- Le « fluage » Marshall (FM) ou l'affaissement de cette même éprouvette jusqu'à sa rupture par compression (figure VI.3).

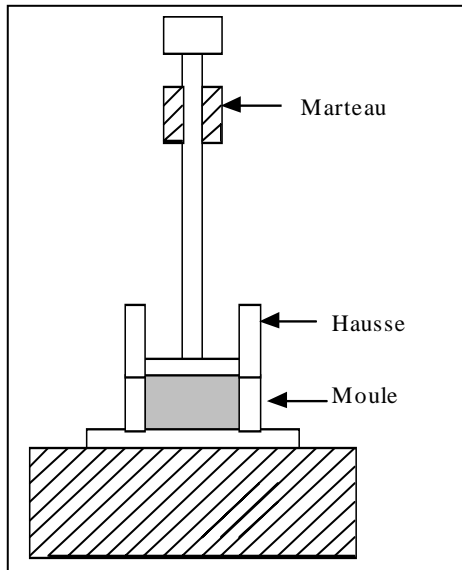


Figure VI.2: Compactage Marshall [50].

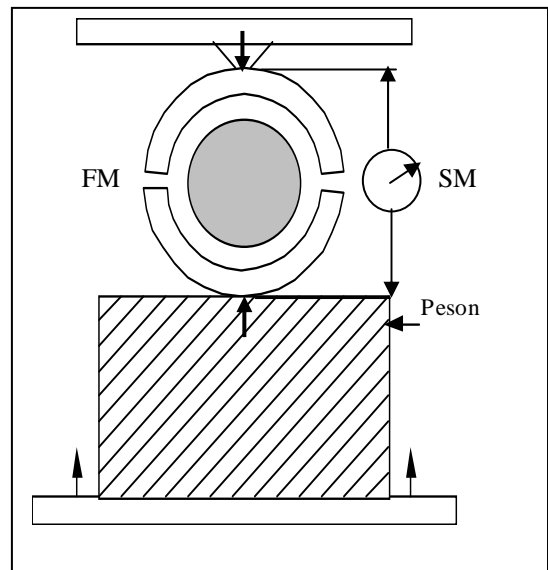


Figure VI.3: Principe de mesure de stabilité et de fluage [50].

La directive pour couche de surface [66] impose seulement une valeur maximale de la compacité Marshall au-delà de laquelle on risque d'avoir des enrobés trop maniés, se compactant trop facilement à la mise en œuvre et sous la circulation et entraînant par la suite non seulement un orniérage et un fluage mais également un ressuage.

Cette valeur maximale de la compacité Marshall a été fixée à 97% pour les enrobés de couche de roulement [Annexe 3].

VI.2.2. Résultats expérimentaux

D'après le mode opératoire de l'essai Marshall, les éprouvettes sont préparées selon des écarts de teneur en bitume au-dessus et au-dessous de la teneur optimale estimée, en utilisant quatre valeurs du module de richesse.

Le nombre d'éprouvettes utilisé pour chaque teneur en bitume, est de cinq dont une qui sera destinée pour la mesure de la compacité.

Les résultats obtenus sont représentés sous forme de graphiques.

Les figures VI.4 et VI.5 montrent que :

- La stabilité augmente avec la teneur en bitume, au-delà d'une teneur de 5,8%, celle-ci commence à chuter.
- La stabilité passe par un maximum en fonction des teneurs en liant croissantes choisies. Le pic obtenu représente la teneur en bitume optimale qui assure la meilleure stabilité.
- Un excès de liant peut entraîner une chute de stabilité [48].

- Une teneur en liant inférieure à cet optimum entraîne un mélange non stable en raison de l'insuffisance de l'enrobage et de compacité.
- Les compacité et les teneurs en liant varient dans le même sens. De forte teneur en liant n'améliore pas toujours la compacité mais, provoque plutôt un ressuage de l'enrobé.

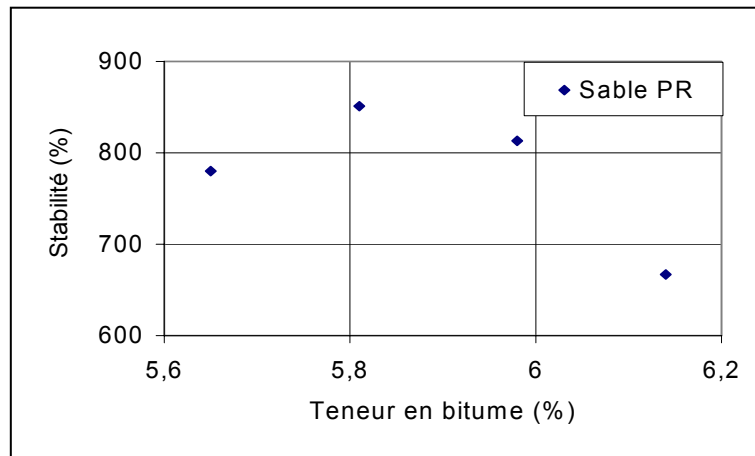


Figure VI.4: Variation de la stabilité en fonction de la teneur en bitume

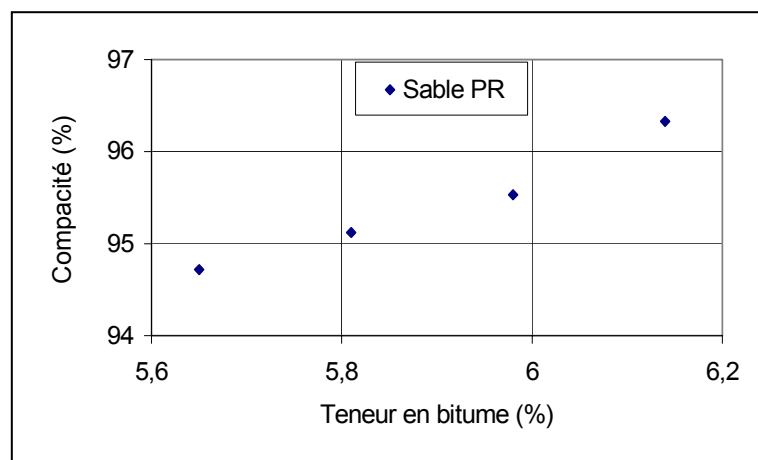


Figure VI.5: Variation de la compacité en fonction de la teneur en bitume

Interprétation de la figure VI.6

- On constate que l'augmentation de la teneur en liant, ne fait qu'augmenter le fluage, donc l'enrobé bitumineux devient plus déformable.
- On atteint une déformation minimale de l'enrobé bitumineux pour une teneur en liant de 5,81%.

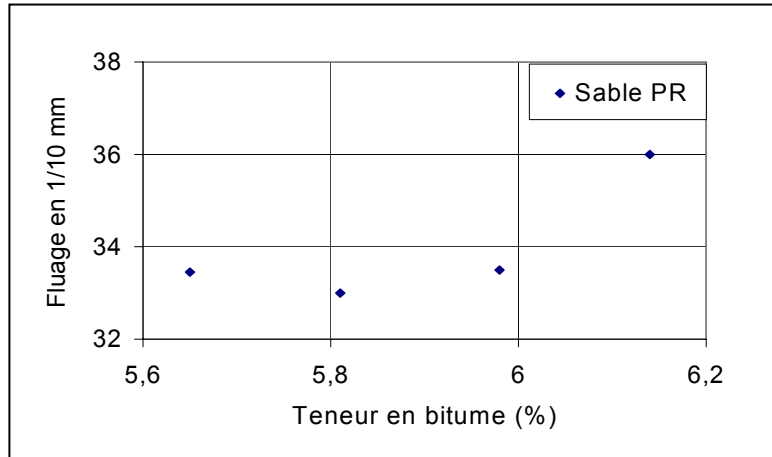


Figure VI.6: Variation du fluage en fonction de la teneur en bitume

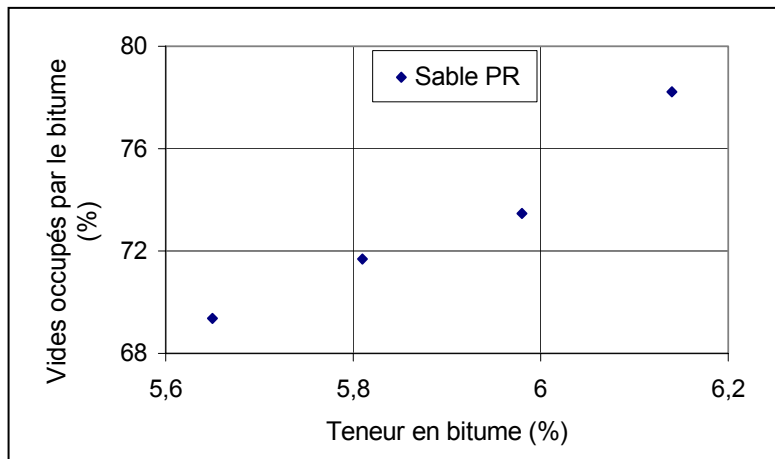


Figure VI.7: Variation du pourcentage de vides occupés par le bitume en fonction de la teneur en bitume

- Les teneurs en vides occupés par le bitume augmentent avec la teneur en bitume (figure VI.7).

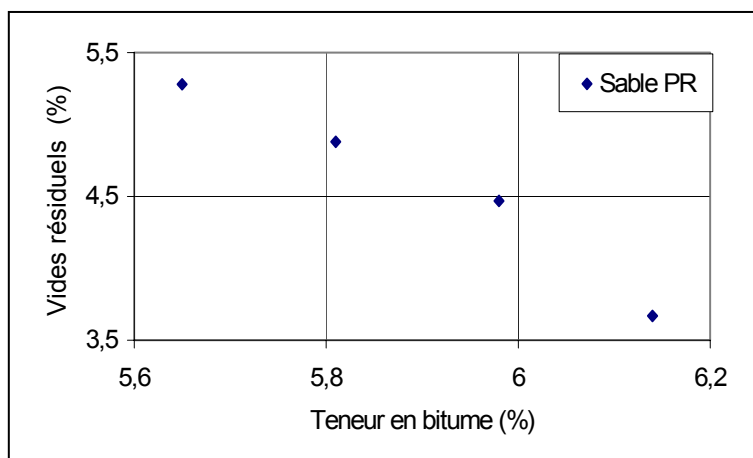


Figure VI.8: Variation du pourcentage des vides résiduels avec la teneur en bitume

- Les teneurs en vides résiduels diminuent lorsque la teneur en liant augmente (figure VI.8).

Conclusion

A travers cet essai, on constate qu'une stabilité maximale est atteinte et lui correspond une déformation minimale. La compacité obtenue pour cette situation reste acceptable. Mais ces résultats restent insuffisants vu que le comportement de ces enrobés en présence d'eau reste inconnu.

Afin de choisir le mélange idéal, il est impératif de compléter cet essai par un essai Duriez, en vu de déterminer les caractéristiques mécaniques à sec et en immersion en présence d'eau.

VI.3. ESSAI DURIEZ [33], [50], [82], [93].

L'essai Duriez a pour but de déterminer, pour un compactage donné, les qualités de résistance mécanique et de résistance au désenrobage par l'eau d'éprouvettes cylindriques d'enrobés.

Pour les enrobés dont la granularité est inférieure à 14mm, les éprouvettes sont de forme cylindriques et ayant un diamètre de 80mm.

Le compactage est à double effet (figure VI.9) sous l'effet d'une force de 60 KN (pression de 120 bars) pendant 5 minutes à une vitesse de 1mm/sec.

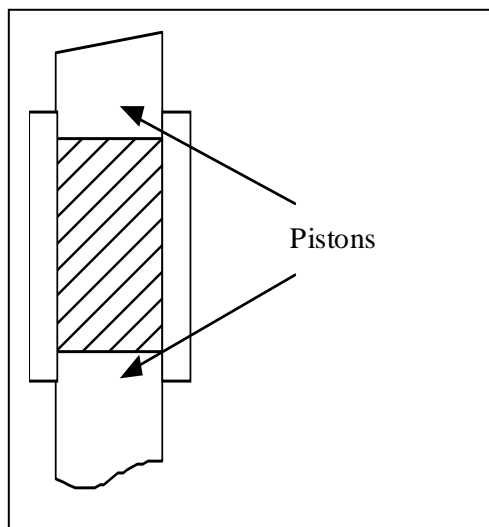


Figure VI.9: Compactage Duriez [50].

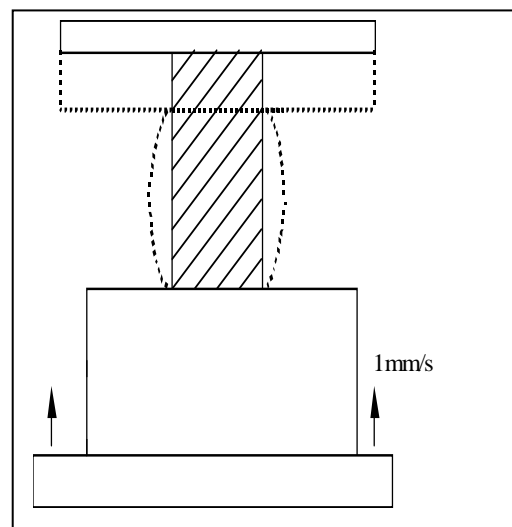


Figure VI.10: Principe d'écrasement Duriez [50].

VI.3.1. Principales mesures effectuées.

Sept éprouvettes au moins ont été confectionnées afin de déterminer:

- La résistance à la compression des éprouvettes confectionnées à chaud après huit jours de conservation à sec (valeurs R mesurées sur trois éprouvettes) (figure VI.10).
- La résistance à la compression des éprouvettes confectionnées à chaud après huit jours dont sept jours en immersion dans l'eau (valeurs r mesurées sur trois éprouvettes).

- Mesure de la densité apparente par pesée hydrostatique sur une éprouvette.
- Mesure du pourcentage d'eau absorbée en poids (% d'imbibition), du gonflement volumétrique et du pourcentage d'affaissement des éprouvettes
- Le rapport immersion-compression (r/R) résultant de la comparaison des résultats après une immersion aux résultats obtenus après une conservation à sec, permet d'appréhender dans une certaine mesure, le risque de désenrobage.

La valeur de ce rapport dépend de la nature des granulats, de leur propreté, du pourcentage des vides dans le mélange, ainsi que des propriétés d'adhésivité du liant.

La température normale de conservation et d'essai est de 18°C.

VI.3.2. Résultats expérimentaux

Les résultats obtenus sont représentés sous formes de graphiques :

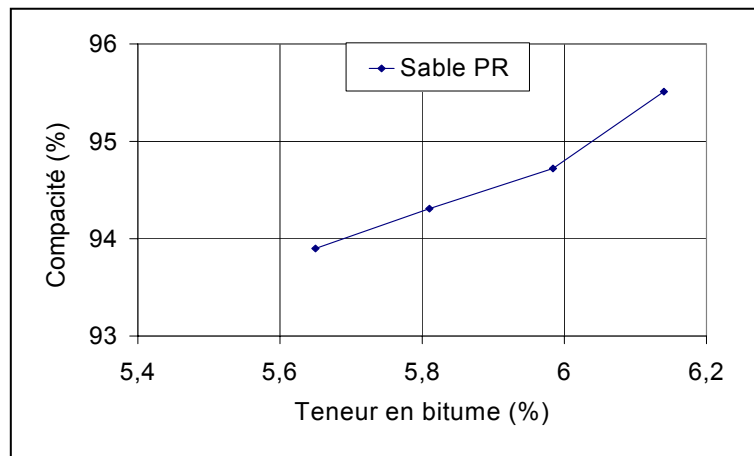


Figure VI.11: Variation de la compacité en fonction de la teneur en bitume

- La compacité ne fait que croître en augmentant la teneur en bitume.
- Les valeurs des compacités restent toujours dans l'intervalle des compacités préconisées par les spécifications [Annexe 3].

Interprétation de la figure VI.12.

- On augmentant la teneur en bitume les résistances en compression à sec de l'enrobé diminuent.
- Pour des teneurs en liant supérieures à 5,98%, l'enrobé présente des résistances à sec insuffisantes et sont au dessous du seuil fixé.

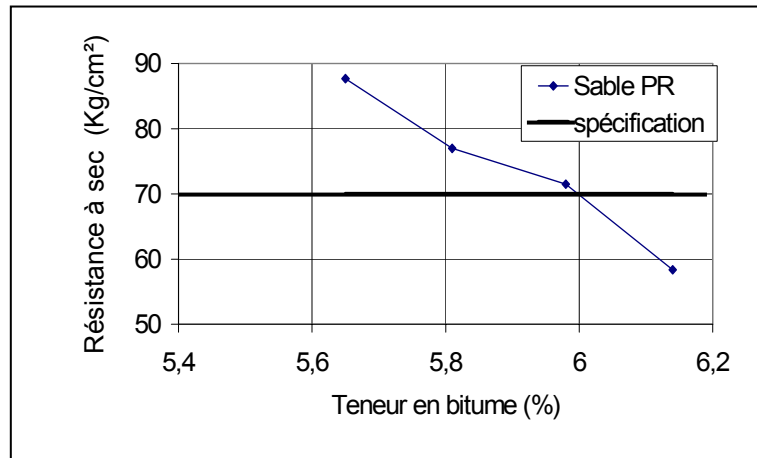


Figure VI.12: Variation de la résistance à sec en fonction de la teneur en bitume

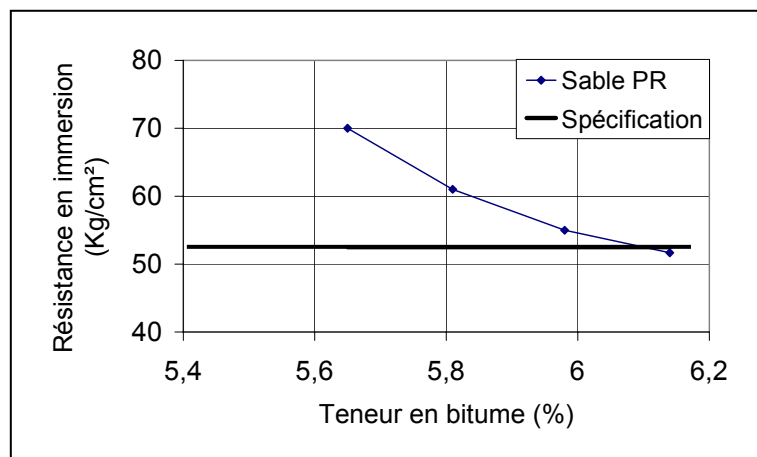


Figure VI.13 :Variation de la résistance en immersion en fonction de la teneur en bitume

- Les résistances en immersion diminuent en augmentant la teneur en liant (figure VI.13).
- La diminution de ces résistances n'est probablement pas due à un phénomène de désenrobage en présence d'eau, mais c'est plutôt la teneur en liant élevée qui la provoque vu que les résistances à sec varient aussi dans le même sens .
- Ces résultats concordent avec [107] qui montre que les calcaires ont une excellente adhésivité avec les liants hydrocarbonés.

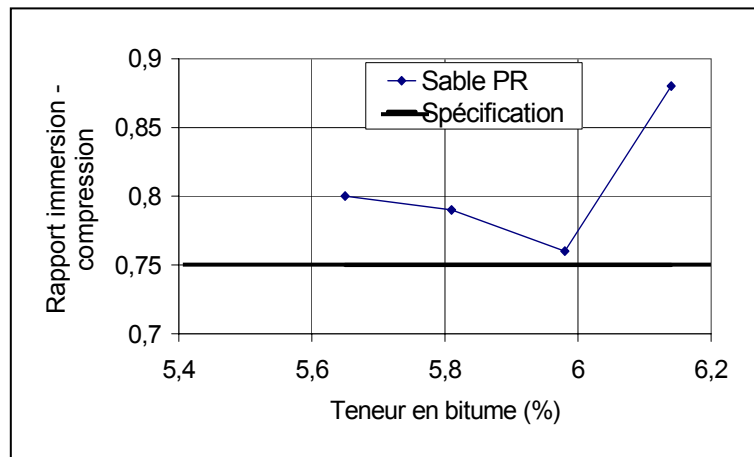


Figure VI.14: Variation du rapport immersion-compression en fonction de la teneur en bitume

- Les valeurs obtenues des rapports immersion –compression pour les différentes teneurs en liant, sont toutes au dessus du seuil de spécifications (figure VI.14).
- Le rapport immersion compression reste supérieur à 0,75 même dans le cas où l'enrobé présente des résistances à sec et en immersion insuffisante .

VI.4. CONCLUSION

L'étude de la formulation est une étape très importante qui permet en premier lieu de définir les teneurs adéquates des différents constituants afin d'obtenir les mélanges les plus performants. Au vu des résultats obtenus par l'essai Marshall et Duriez, il ressort que :

- Pour des teneurs en liant excessives, les enrobés obtenus présentent d'une part un fluage important et d'autre part une stabilité insuffisante.
- Les teneurs en liant élevées, influent négativement sur les résistances à la compression à sec et en immersion.
- La teneur en liant optimale à retenir est de 5,81% non seulement pour ses bonnes performances mais également pour son aspect économique.

CHAPITRE VII

EFFET DES FINES ARGILEUSES SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DE L'ENROBE BITUMINEUX

INTRODUCTION

La pollution est caractérisée par la présence dans le sable, d'éléments indésirables notamment les argiles du fait de leur fréquence dans les gisements des roches massives, de leurs surfaces hydrophiles et de ce fait, sont donc les plus à craindre.

Présentes dans les granulats destinés aux bétons bitumineux des assises de chaussées et des couches de roulement, les argiles peuvent induire la chute de résistance sous immersion des matériaux, avec au bout du compte une possible destruction de la chaussée.

La question qui vient à l'esprit est la suivante :

Quel est l'effet des fines argileuses sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux ?

En vu de trouver une réponse à cette question, on se propose de présenter dans ce chapitre les résultats d'essais effectués sur des éprouvettes confectionnées avec du sable pollué, pour mieux comprendre l'influence des fines argileuses sur les performances des bétons bitumineux.

VII.1. INFLUENCE DES FINES ARGILEUSES SUR LES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SABLE POLLUE

La présence de fines argileuses dans un sable, peut être mise en évidence par l'équivalent de sable qui rend compte de leur aptitude à la floculation, par la valeur de bleu de méthylène qui quantifie leur surface accessible à l'eau et par l'indice de plasticité.

Pour ce faire les deux sables ont été analysés : le sable propre (Keddara) contenant des fines calcaires et le sable pollué dont les fines sont argileuses.

Les résultats obtenus sont donnés au tableau VII.1.

Tableau VII.1 : Effet des fines calcaires et argileuses sur les caractéristiques géotechniques.

Echantillon	0/3 Pollué	0/3 propre
PS	30,03	68,57
VB	1,5	0,12
Ip	14,21	Non mesurable

Interprétations

- Le PS du sable pollué qui est inférieur à celui du sable propre, est dû à la floculation des argiles restantes en suspension, alors que les fines calcaires sédimentent plus rapidement, phénomène qui améliore l'équivalent de sable.

- La valeur au bleu du sable pollué qui est supérieure à celle du sable de Keddara, trouve son explication dans le fait que la molécule de bleu de méthylène se fixe sur toutes les surfaces des minéraux accessibles à l'eau, alors que la quantité de bleu adsorbé par les fines inertes (calcaires) est négligeable devant le bleu adsorbé par les fines argileuses.
- Vu leur plasticité, les fines argileuses permettent d'évaluer l'indice de plasticité sur le sable pollué, alors que sur celui contenant des fines calcaires, il reste non mesurable.

Conclusion

La présence de fines calcaires dans un sable n'influe nullement sur les caractéristiques géotechniques, et les résultats obtenus restent conformes. Au contraire, les fines argileuses contenues dans un sable les modifient et les résultats obtenus sont hors spécifications.

VII.2. EFFET DES FINES ARGILEUSES SUR LES CARACTERISTIQUES MECANQUES DE L'ENROBE HYDROCARBONE.

Nous allons analyser l'influence des fines argileuses sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé hydrocarboné. A cet effet, nous procédons à des essais classiques « Marshall » et « Duriez » sur des éprouvettes confectionnées avec le même bitume 40/50, les mêmes fractions granulaires 3/8, 8/15 et avec du sable 0/3 pollué.

Sachant qu'un module de richesse choisi trop faible peut donner un revêtement cassant et friable, par contre un module trop élevé donne un revêtement souple, adaptable, mais déformable et manquant de stabilité sous le trafic.

Afin d'éviter ces problèmes d'enrobage des granulats par le liant bitumineux, nous avons choisi pour la formulation de cet enrobé bitumineux, le module de richesse correspondant à la teneur optimale obtenue lors de la formulation avec du sable propre de Keddara.

Remarque

Les résultats des essais « Marshall » et « Duriez » obtenus sur des mélanges à base de sable propre de Keddara sont ceux mentionnés au chapitre II.

VII.2.1. Formulation de l'enrobés bitumineux avec du sable pollué.

- Détermination et ajustement de la courbe granulométrique du mélange.

Après plusieurs essais, il s'avère que la courbe granulométrique qui se rapproche le mieux de celle obtenue avec les mêmes classes granulaires 3/8, 8/15 mais avec le 0/3 propre de Keddara et s'insérant dans le fuseau de référence (0/14 semi-grenue), est celle représentant un mélange de :

39 % de 0/3 (pollué).
16 % de 3/8.
45 % de 8/15.

La courbe du mélange avec du sable pollué est représentée sur la figure VII.1.

- Détermination de la teneur en liant.

Après le choix de la courbe du mélange, on détermine la teneur en liant correspondante.

Les résultats obtenus sont les suivants :

$$\begin{aligned}
 k &= 3,55 \\
 \alpha &= 0,9925 \\
 \Sigma &= 12,2188 \text{ m}^2/\text{kg} \\
 \% \text{ liant (avec 0/3 pollué)} &= 5,81
 \end{aligned}$$

VII.2.2. Résultats de l'essai Marshall

Cet essai est effectué pour d'une part, voir l'effet des fines argileuses sur la stabilité, la déformation (fluage), la compacité, et la proportion des vides résiduels des éprouvettes confectionnées avec du sable pollué et d'autre part, faire une comparaison avec ceux obtenus sur des éprouvettes à base de sable propre.

Cinq éprouvettes ont été confectionnées avec du sable pollué afin de réaliser l'essai.

Les résultats sont mentionnés dans le tableau VII.2.

Tableau VII.2 : Résultats de l'essai Marshall (sable propre- sable pollué)

Mélange	(0/3) Propre	(0/3) Pollue	Δ (%)
Stabilité (kg)	896	697	199
Compacité %	95,12	93,49	1,63
Fluage ou déformation 1/10 mm	33,45	51,33	17,88
% vides résiduels	4,88	6,51	1,63

Interprétations

- A module de richesse égal, on constate effectivement que la présence de fines argileuses influe considérablement sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux.
- La compacité et la stabilité obtenues sur l'enrobé bitumineux à base de fines calcaires sont nettement supérieures à celles du mélange avec des fines argileuses et répondent aux spécifications exigées.
- Le fluage et le pourcentage des vides du mélange à base de fines argileuses, restent supérieures à ceux obtenus avec le sable propre.
- La présence de fines argileuses dans un enrobé bitumineux, influe beaucoup plus sur la stabilité et à un degré moindre sur la déformation (l'écart est moins important).

Conclusion

C'est la nature minéralogique des fines contenues dans un sable qui modifient les caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux.

Les enrobes obtenus avec des fines calcaires sont plus stables et présentent une meilleure compacité, donc ils sont plus compacts et moins déformable.

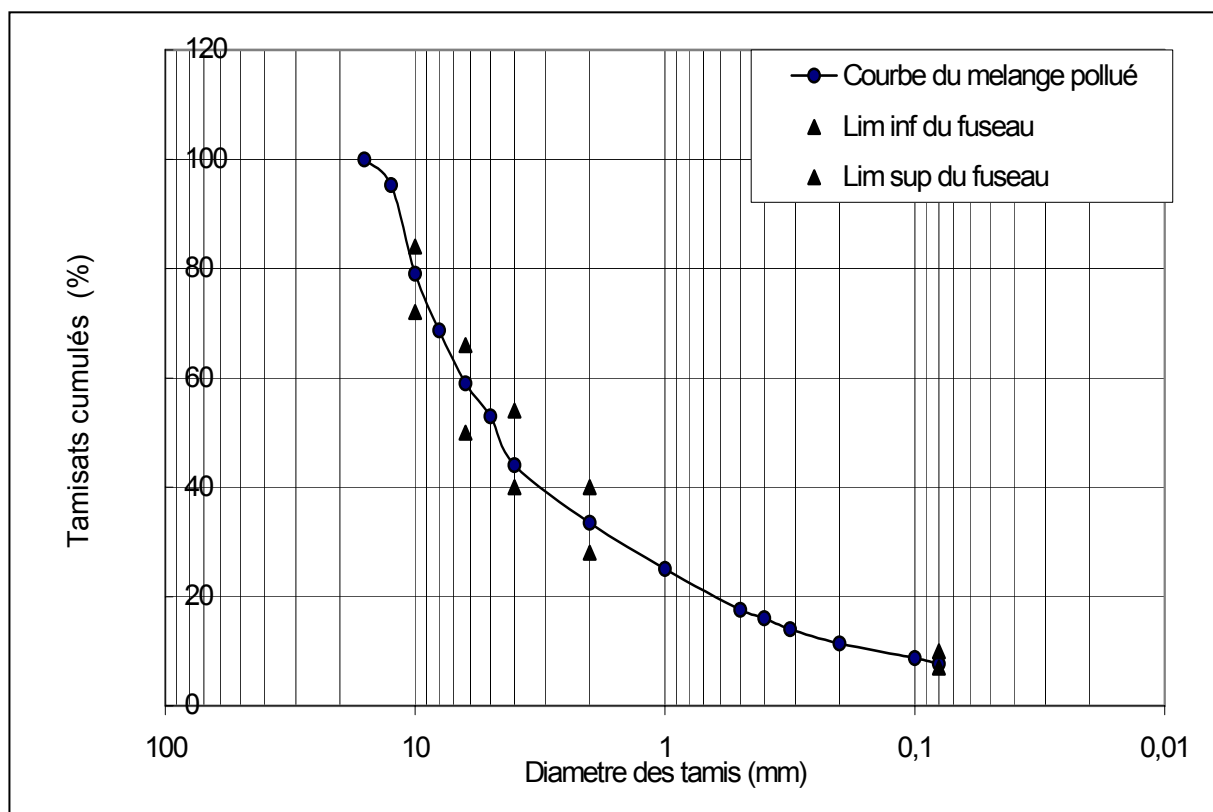


Figure VII.1 : Courbe granulométrique du mélange avec sable pollué

VII.2.3. Résultats de l'essai Duriez

L'essai Duriez nous permettra d'apprécier la nocivité des fines argileuses, au regard des performances mécaniques de l'enrobé bitumineux.

Afin de mieux cerner le comportement du sable pollué en présence d'eau, nous avons confectionné des éprouvettes d'enrobés bitumineux composées de sable pollué, soumises à l'essai Duriez afin d'évaluer les résistances à la compression à sec et en immersion ainsi que le rapport immersion –compression.

Une comparaison avec les résultats obtenus sur un mélange à base de sable propre s'avère nécessaire.

Sept éprouvettes ont été confectionnées avec du sable pollué afin de réaliser cet essai.

Constatations :

Après immersion des éprouvettes confectionnées à base de sable pollué, on a observé une formation de « micro lentilles de boue » qui devenaient de plus en plus apparentes au fur et à mesure que la durée d'immersion était plus longue. Les résultats sont mentionnés dans le tableau VII.3.

Tableau VII.3 : Résultats de l'essai Duriez pour les deux types d'enrobés

Mélange		0/3 Pollué	0/3 Propre	Δ (%)
Résistance à la compression à 18°C (kg / cm ²)	Après 7 jours a sec : R	68	76,67	8,67
	Après 7 jours en immersion : r	41,66	61	19,34
Rapport immersion compression : r/R		0,61	0,79	0,18
Compacité (%)		92,68	94,31	1,63
Les vides résiduels (%)		7,32	5,69	1,63
Les vides occupés par le bitume (%)		62,42	68,35	5,93
L'imbibition (%)	Après 2 heures	0,78	0,69	0,09
	Après 2 jours	1,36	1,01	0,35
	Après 7 jours	2,34	1,71	0,63
Le gonflement volumétrique (%)	Après 2 heures	0,52	0,18	0,34
	Après 2 jours	2,05	0,40	1,65
	Après 7 jours	3,13	0,64	2,49

Interprétations :

- Le pourcentage de fines contenues dans les deux types de sable étant le même, c'est n'est donc pas la quantité de fines qui modifie le comportement d'un enrobé mais plutôt leur nature minéralogique.
- Les compacités obtenues sur les mélanges hydrocarbonés testés sont peu variables.
- Les résistances à la compression à sec et en immersion obtenues avec le mélange à base de sable propre, sont nettement plus élevées que celles du mélange à base de sable pollué.
- Les résistances en immersion sont beaucoup plus affectées par la présence de fines argileuses comparativement aux résistances à sec (écart plus important).
- L'effet de la pollution argileuse, est plus important pour des durées d'immersion plus longues (écart important à 7 jours).

Toutes les insuffisances observées dans les caractéristiques des enrobés à base de sable pollué sont dues probablement aux conditions d'enrobage de ces derniers [42].

Les enrobés présentent des défauts d'enrobage. La « coque externe » de bitume à la surface des argiles n'est certainement ni continue ni homogène (figure VII.2) vu que, le bitume s'adsorbe sur des surfaces très externes des agrégats argileux .



Figure VII.2 : Défaut d'enrobage [42].

L'eau qui peut alors rencontrer les surfaces externes d'argiles exemptes de bitume, pénètre dans l'énorme surface interne disponible et fait gonfler les argiles, ce qui est l'une des causes probables de la chute de résistance mécanique sous immersion des enrobés contenant de l'argile.

C'est donc le manque d'homogénéité du film de bitume adsorbé sur les surfaces externes d'agrégats argileux, qui est en cause et provoque après enrobage à chaud la destruction sous immersion de l'enrobé.

Les valeurs du gonflement volumétrique sont représentées sur la figure VII.3.

La variation du gonflement volumétrique montre que :

- Les mélanges à base de sable pollué, présentent un gonflement plus important que ceux des enrobés à base de sable propre ceci est dû probablement à la nature des fines contenues dans le sable pollué.
- Pour des durées d'immersion plus longue, l'enrobé à base de sable propre présente une variation du gonflement nettement plus faible que celle obtenue avec le mélange à base de sable pollué.
- Ce gonflement volumétrique est dû probablement à la nature minéralogique et la structure des argiles.

L'argile contenue dans le sable pollué est composée de montmorillonite, celle-ci présente de faibles liaisons entre les feuillets [Annexe 6] ce qui, permet une pénétration de l'eau.

L'eau présente dans l'espace inter foliaire provoque une rupture des liaisons avec écartement des feuillets et entraîne le gonflement de l'enrobé.

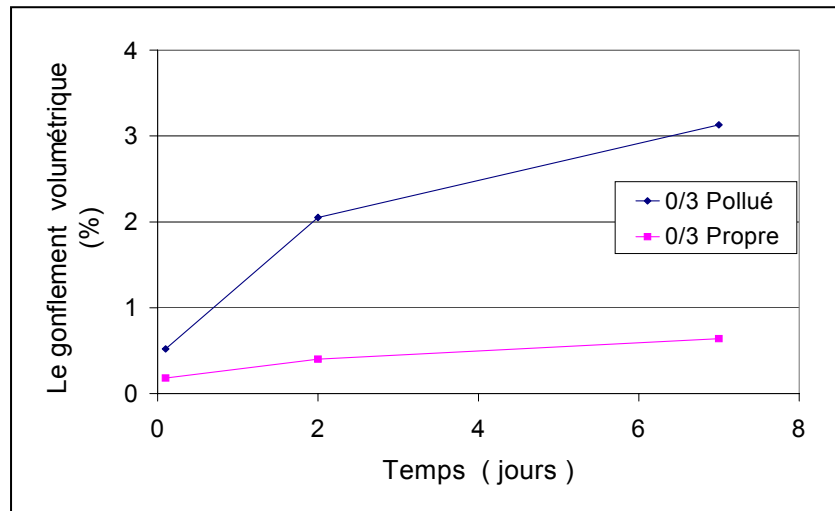


Figure VII.3 : Variation du gonflement volumétrique pendant les sept jours en immersion.

La variation du pourcentage d'imbibition est représentée sur la figure VII.4.

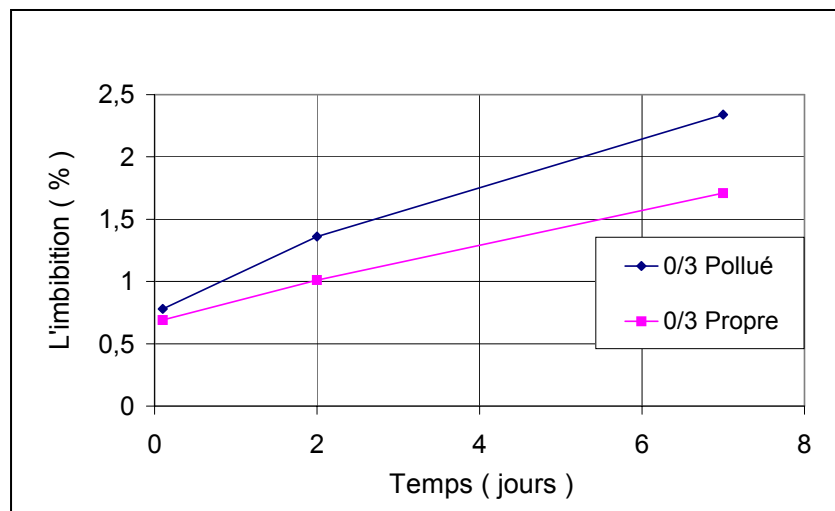


Figure VII.4 : Variation du pourcentage d'imbibition pendant les sept jours en immersion.

Le pourcentage d'imbibition représente la variation relative du poids des éprouvettes en immersion.

- En cours d'immersion, le pourcentage d'imbibition pour les deux types d'enrobés varie de la même façon.
- L'imbibition est plus accentuée pour des durées d'immersion plus longues.
- L'imbibition est plus importante dans le mélange à base de sable pollué, ce phénomène s'explique par le fait qu'étant donné que les deux mélanges sont des enrobés de types denses (les teneurs en vides < 8%) et que la teneur en vides de l'enrobé à base de sable pollué, est plus élevée que celle du mélange à base de sable propre, ces vides seront occupés par l'eau et provoqueront des variations d'imbibition plus importantes.

Ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés par les autres chercheurs [25].

VII.3. CONCLUSION

Au vu des résultats obtenus dans ce chapitre, il ressort que :

- ❖ Les fines calcaires sont sans effet sur les caractéristiques géotechniques et mécaniques des enrobés.
- ❖ La présence de fines argileuses dans un sable influe considérablement sur les caractéristiques de propreté de celui-ci.
- ❖ Les fines nocives sont les seules responsables des insuffisances obtenues sur les enrobés à base de sable pollué.

L'emploi du sable pollué dans les mélanges bitumineux ne présente pas des caractéristiques mécaniques satisfaisantes pour réaliser les couches de chaussée et pour répondre aux différentes sollicitations du trafic routier.

D'après les spécifications, ces caractéristiques restent insuffisantes et ont pour origine essentiellement les caractéristiques intrinsèques de ce sable.

CHAPITRE VIII

EFFET DU TRAITEMENT DES SABLES POLLUES SUR LES PERFORMANCES MECANQUES DE L'ENROBE BITUMINEUX

INTRODUCTION

Les sollicitations sévères dues au trafic lourd et dense, les conditions climatiques, l'uni et le confort, exigent des matériaux de construction routière de bonnes qualités et des caractéristiques élevées qui peuvent être obtenues par traitement. En effet, les sables pollués n'ont pas de caractéristiques mécaniques satisfaisantes et ne répondent pas aux spécifications routières.

Ces sables présentent :

- Un manque de propreté.
- Des résistances mécaniques insuffisantes.
- Un rapport immersion compression faible.
- Une stabilité médiocre.

Pour ces raisons, le traitement des sables pollués devient nécessaire dans la plupart des couches de chaussées. Il a pour but d'améliorer les performances mécaniques des enrobés bitumineux, permet des économies sur les distances de transport des granulats nobles et réduit l'utilisation des sables propres qui sont généralement plus coûteux .

Avant d'opter pour un traitement donné, l'ingénieur doit d'abord rechercher et étudier les matériaux susceptibles d'être employés afin d'améliorer les caractéristiques du sable pollué.

La technique de traitement est une solution locale, peut être économiquement intéressante ,si les produits de traitement ne la rendent pas trop onéreuse.

Deux types de traitement sont envisagés dans cette étude, l'un par incorporation d'un liant hydraulique (chaux éteinte) et l'autre par ajout de sable propre.

Dans ce chapitre, nous présentons les performances mécaniques obtenus sur des mélanges bitumineux à base de sable pollué préalablement traités.

Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans ce chapitre, sont les mêmes que ceux décrit au chapitre V aussi bien pour les matériaux granulaires que pour le liant hydrocarboné.

- Les granulats

Les granulats de classe 3/8 et 8/15.

Le sable 0/3 pollué noté : PL

Le sable 0/3 propre noté : PR

- Le liant bitumineux

Le bitume de classe 40/50 avec un module de richesse $k=3,55$.

- Le traitement envisagé

- La chaux éteinte, les pourcentages incorporés sont : 1%, 2%, 3% et 4%.

- L'ajout de sable propre, les pourcentages choisis empiriquement sont : 25%, 50% et 75%.

Les pourcentages choisis d'ajout de chaux ou de sable propre doivent être limités pour assurer un compromis entre les performances mécaniques désirées et l'aspect économique.

L'intérêt de varier la teneur en chaux et en sable propre est de montrer les variations des performances de sable pollué ainsi traité. Cela permettra ensuite, de choisir les teneurs convenables pour assurer un certain niveau de performances lié à la fonction d'une couche de chaussée.

Il y a lieu de noter que la chaux est stockée dans des trémies ou silos, elle est introduite au mélange hydrocarboné à l'aide d'une vis doseuse .

VIII.1. EFFET DU TRAITEMENT SUR LES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DU SABLE POLLUE.

L'évolution des caractéristiques géotechniques du sable pollué traité à la chaux et au sable propre, est mise en évidence par l'équivalent de sable, la valeur au bleu et par l'indice de plasticité.

Avant de confectionner l'enrobé, nous avons incorporé la chaux et le sable propre en proportions variables et déterminer les caractéristiques des mélanges obtenus.

VIII.1.1. Influence de la chaux sur la propreté.

Les mélanges retenus sont :

- 99% PL + 1% chaux
- 98% PL + 2% chaux
- 97% PL + 3% chaux
- 96% PL + 4% chaux

Les figures VIII.1, VIII.2 et VIII.3, illustrent l'évolution de la propreté du sable pollué avec ajout de différents pourcentages de chaux .

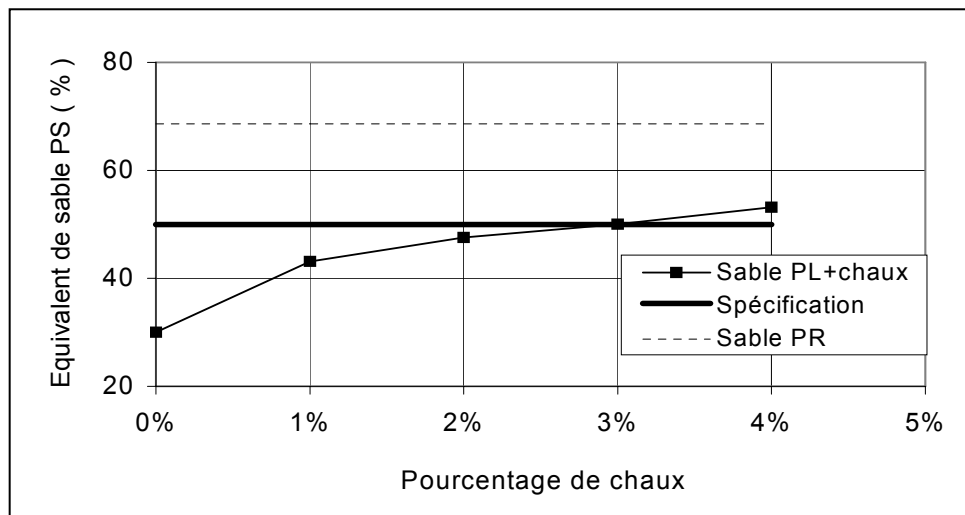


Figure VIII.1: Variation de l'équivalent de sable en fonction de la teneur en chaux .

La figure VIII.1 montre que :

- Les valeurs de l'équivalent de sable à 10% de fines, sont plus élevées que celle du sable pollué. On observe une nette amélioration de l'équivalent de sable avec ajout de chaux .
Donc la chaux favorise la décantation du floculat .
- Après un ajout de 3% chaux, les valeurs de l'équivalent de sable à 10% de fines sont satisfaisantes et répondent aux spécifications.

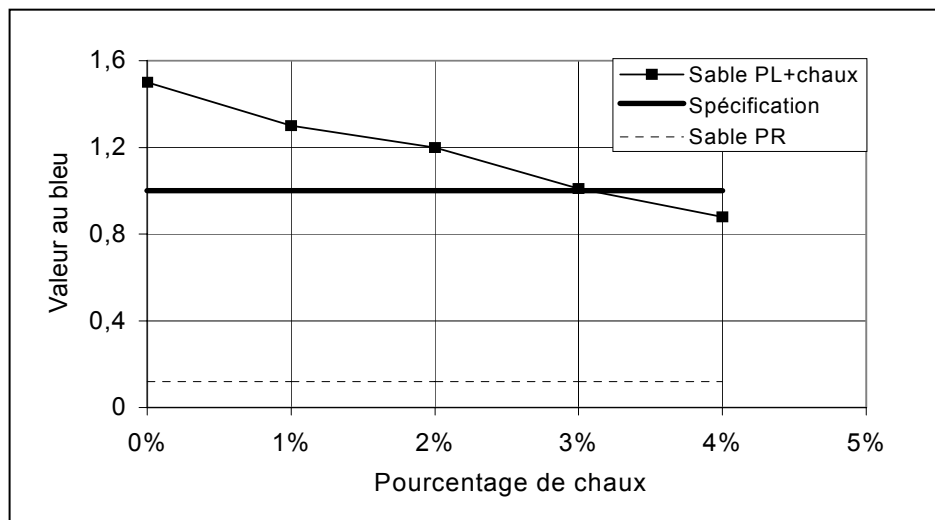


Figure VIII.2 : Variation de la valeur au bleu en fonction de la teneur en chaux .

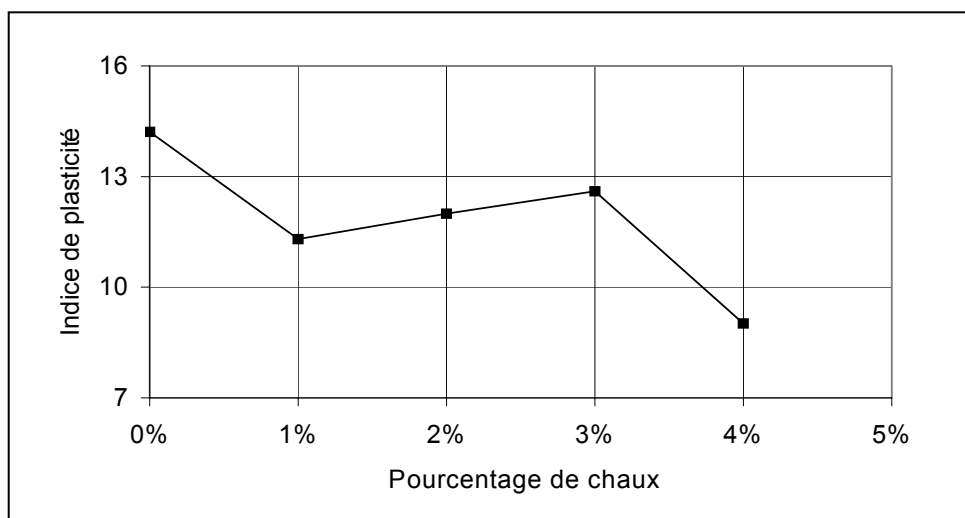


Figure VIII.3 : Variation de l'indice de plasticité en fonction de la teneur en chaux .

La figure VIII.2 qui illustre l'évolution de la valeur au bleu, montre que :

- En augmentant les teneurs en chaux, les valeurs au bleu des mélanges traités diminuent.
- Les valeurs au bleu sont acceptables avec un ajout de 3% de chaux.

La variation de l'indice de plasticité représentée sur la figure VIII.3 montre que :

- Les valeurs de l'indice de plasticité obtenues sont améliorées avec ajout de chaux.
- On observe une nette évolution de cet indice, avec 4% de chaux.
L'application de la règle Ip non mesurable peut entraîner l'élimination de sables traités conformes.
Cet essai n'est pas suffisamment sélectif pour être utilisé dans la quantification de la propreté des sables.

Conclusion :

A partir de l'étude de l'influence de la chaux sur la propreté du sable, nous montrons clairement que le traitement est indispensable.

Pour que les indices de propreté répondent aux spécifications exigées, la teneur en chaux retenue est d'au moins 3%.

VIII.1.2. Influence du sable propre sur la propreté.

Les matériaux retenus sont :

25% PR + 75% PL

50% PR + 50% PL

75% PR + 25% PL

Les figures VIII.4, VIII.5 et VIII.6 montrent les variations de la propreté du sable pollué après incorporation des différentes proportions en sable propre.

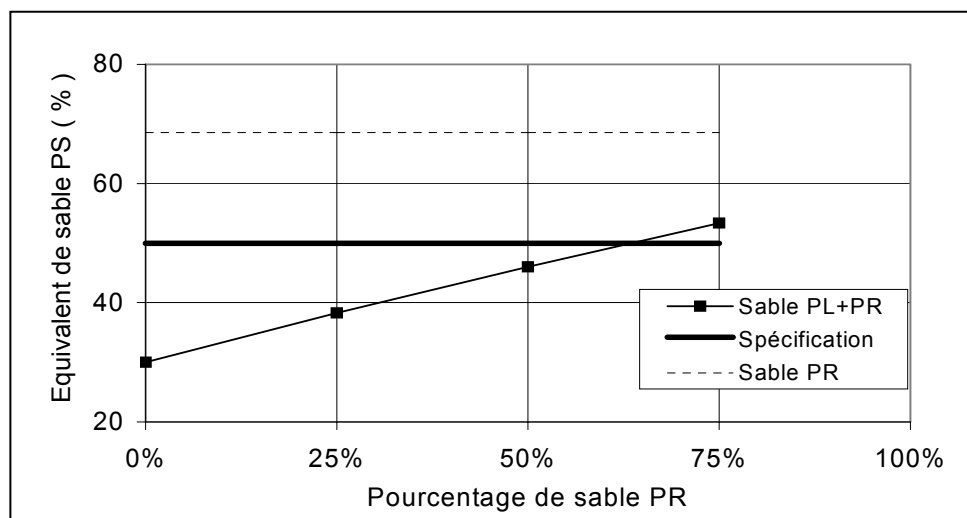


Figure VIII.4 : Variation de l'équivalent de sable en fonction de la teneur en sable propre.

- L'équivalent de sable varie pratiquement d'une façon linéaire avec le pourcentage de sable propre incorporé.
- L'ajout de fines calcaires dans un sable pollué améliore les valeurs de l'équivalent de sable à 10% de fines. Ce résultat est dû à la nature minéralogique des fines incorporées.
Les fines calcaires sédimentent plus rapidement que les fines argileuses.
- La valeur de l'équivalent de sable à 10% de fines, est satisfaisante avec une teneur de 75% en sable propre.

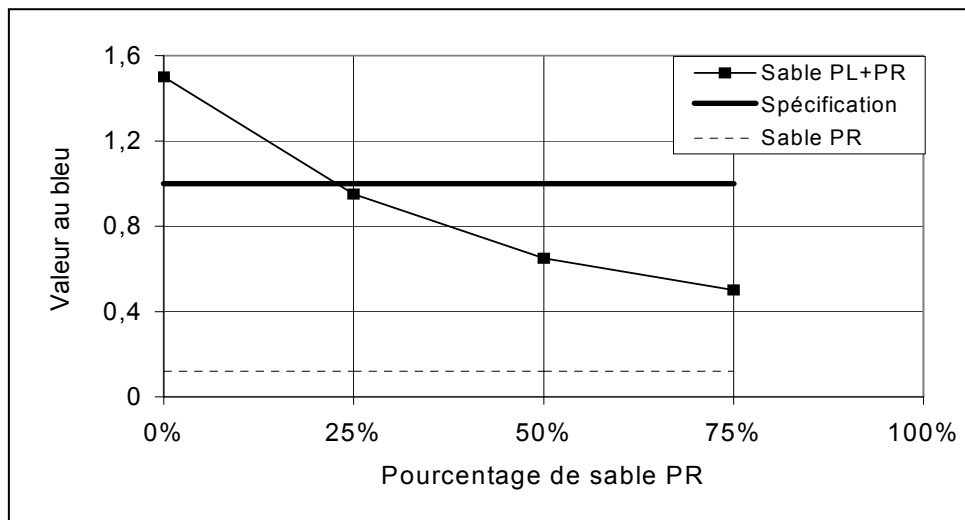


Figure VIII.5: Variation de la valeur au bleu en fonction de la teneur en sable propre.

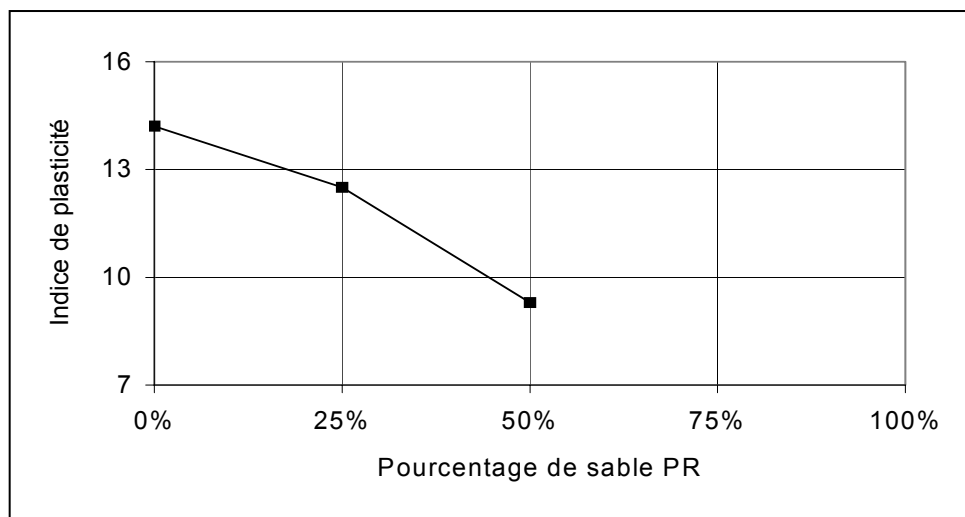


Figure VIII.6: Variation de l'indice de plasticité en fonction de la teneur en sable propre.

La figure VIII.5 montre que :

- Les valeurs au bleu obtenues avec ajout de sable propre sont nettement inférieures à celle du sable pollué.
La quantité de bleu de méthylène adsorbé par les fines contenues dans le sable propre reste faible vu que ces fines sont de nature calcaire et sont donc inertes.
- Après incorporation de 25% de sable propre, les valeurs trouvées confirment les spécifications exigées [Annexe 1].

L'évolution de la plasticité étant indiquée par la figure VIII.6, on constate que :

- En augmentant les proportions du sable propre incorporées, les valeurs de l'indice de plasticité diminuent et de ce fait, elles sont donc améliorées.
- Avec un ajout de 75% de sable propre, le sable pollué se comporte comme un sable propre du fait que l'indice de plasticité est non mesurable.

Conclusion :

Le traitement avec du sable propre améliore les caractéristiques géotechniques du sable pollué. Comparativement aux résultats obtenus avec incorporation de chaux, les valeurs au bleu et l'indice de plasticité sont nettement meilleures avec ajout de sable propre. Les résultats trouvés restent conformes aux valeurs exigées, avec un pourcentage de 75% en sable propre.

VIII.2. FORMULATION DE L'ENROBE BITUMINEUX TRAITES .

Cette étude consiste à faire varier les proportions en chaux et en sable propre, lesquels matériaux sont incorporés au mélange à base de sable pollué .

Cette formulation déterminera les proportions des fractions granulaires 0/3 (pollué), 3/8 et 8/15, ainsi que les teneurs en liant nécessaire pour chaque pourcentage en chaux et en sable propre fixé dans l'enrobé hydrocarboné.

VIII.2.1. Détermination et ajustement des courbes du mélange.

Après plusieurs essais, il s'avère que les courbes granulométriques des mélanges bitumineux traités (chaux-sable propre) qui se rapprochent le mieux de celle obtenue avec le matériau à base de sable propre et qui s'insèrent dans le fuseau de référence (0/14 semi grenue), sont données ci-après :

VIII.2.1.1. Influence de la chaux

Les mélanges retenus avec ajout de chaux sont :

- 1% chaux - 39% (0/3 PL) - 16% (3/8) - 44% (8/15) , noté : M C1
- 2% chaux - 39% (0/3 PL) - 15% (3/8) - 44% (8/15) , noté : M C2
- 3% chaux - 39% (0/3 PL) - 15% (3/8) - 43% (8/15) , noté : M C3
- 4% chaux - 39% (0/3 PL) - 14% (3/8) - 43% (8/15) , noté : M C4

Les courbes granulométriques avec ajout de chaux sont représentées sur la figure VIII.7.

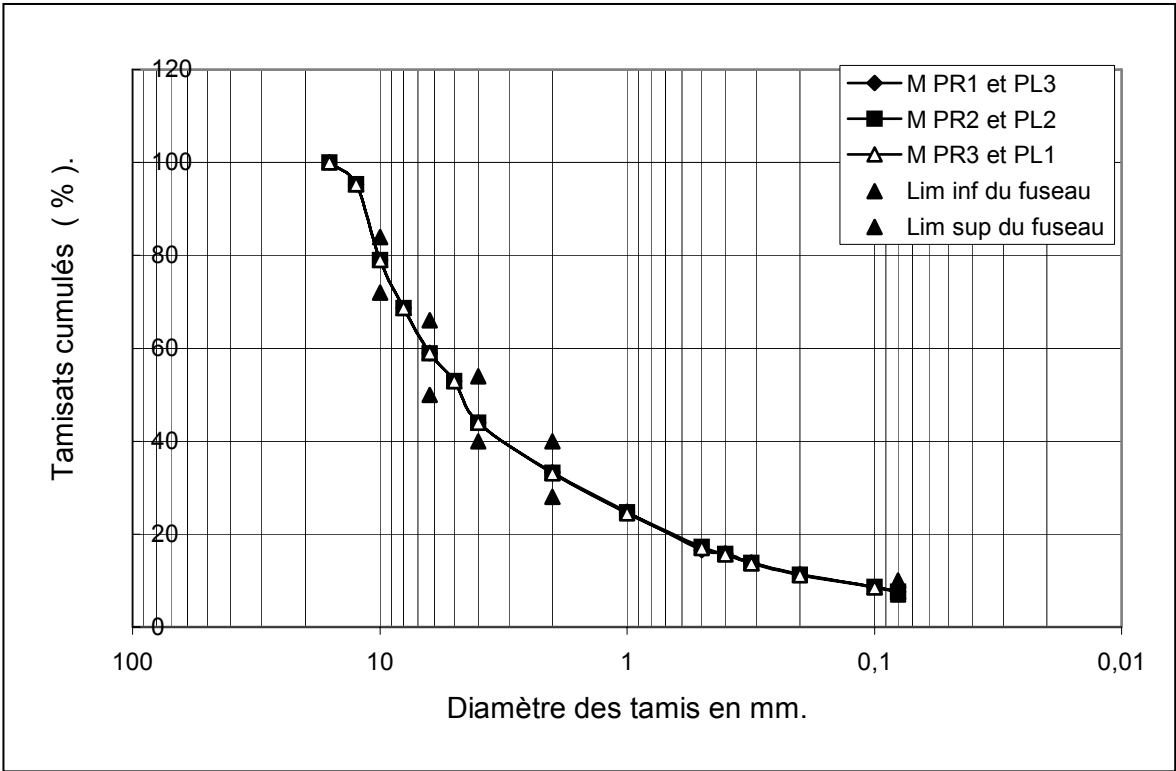


Figure VIII.7: Courbe granulométrique du mélange . Influence du sable propre.

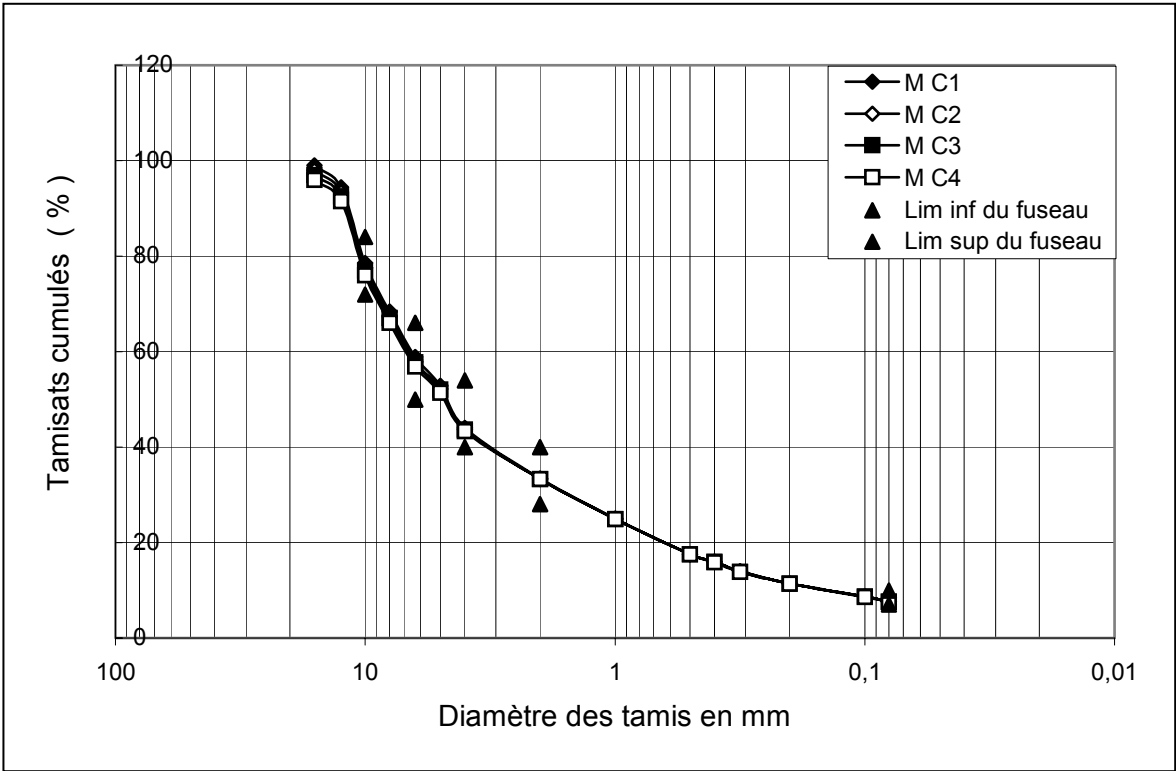


Figure VIII.8: Courbe granulométrique du mélange . Influence de la chaux.

VIII.2.1.2. Influence du sable propre.

Les mélanges retenus avec une incorporation respective de 25, 50 et 75% de sable propre sont :

- 10 % (0/3 PR) - 29 % (0/3 PL) - 16% (3/8) - 45% (8/15) noté : M PR1 et PL3
- 19,5% (0/3 PR) - 19,5% (0/3 PL) - 16% (3/8) - 45% (8/15) noté : M PR2 et PL2
- 29 % (0/3 PR) - 10 % (0/3 PL) - 16% (3/8) - 45% (8/15) noté : M PR3 et PL1

Les courbes granulométriques avec incorporation de sable propre sont illustrées par la figure VIII.8.

VIII.2.2. Détermination des teneurs en liants

Pour la formulation des mélanges bitumineux à base de sable pollué traité (chaux –sable propre), nous avons choisis un module de richesse correspondant à la teneur optimale obtenue lors de la formulation avec du sable propre de Keddara ($k=3,55$).

VIII.2.2.1. Influence de la chaux

Les teneurs en liant obtenues avec ajout de chaux dans le mélange à base de sable pollué sont indiquées au tableau VIII.1.

Tableau VIII.1: Les teneurs en liant avec ajout de chaux.

Teneur en chaux	K	α	Σ (m ² /kg)	% liant
1 %	3,55	0,9925	13,5541	5,93
2 %	3,55	0,9904	14,8429	6,03
3 %	3,55	0,9899	16,1747	6,13
4 %	3,55	0,9894	17,4615	6,22

VIII.2.2.2. Influence du sable propre

Les teneurs en liant avec incorporation de sable propre dans le mélange à base de sable pollué sont mentionnés dans le tableau VIII.2.

Tableau VIII.2: Les teneurs en liant avec incorporation du sable propre.

Teneur en sable propre	K	α	Σ (m ² /kg)	% liant
10 %	3,55	0,9925	12,1634	5,81
19,5 %	3,55	0,9925	12,1045	5,81
29 %	3,55	0,9925	12,0581	5,80

Conclusion :

Nous constatons que les teneurs en liant varient peu avec le pourcentage de chaux et que celles obtenues avec ajout de sable propre restent inchangées et correspondent à la teneur optimale.

VIII.3. INFLUENCE DU TRAITEMENT SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES.

L'utilisation d'un matériau dans le corps de chaussée nécessite la connaissance de son comportement mécanique.

L'étude en laboratoire des caractéristiques mécaniques de ces matériaux constitue donc, une phase indispensable pour leur adaptation en technique routière.

Dans cette partie, nous allons faire varier les paramètres de formulation et voir leur incidence sur l'évolution des caractéristiques mécaniques.

Cette étude permettra aussi de définir les seuils des teneurs en chaux et en sable propre à partir desquels la variation des performances mécaniques est acceptable.

A cet effet, une série d'éprouvettes à base de sable pollué préalablement traité est confectionnée puis soumise aux essais classiques « Marshall » et « Duriez ».

Remarque :

Les résultats des essais « Marshall » et « Duriez » obtenus sur les mélanges à base de sable propre et pollué sont ceux mentionnés respectivement aux chapitres VI et VII.

VIII.3.1. Résultats de l'essai « Marshall »

Cet essai est réalisé avec des proportions variables en (chaux -sable propre) et ceux, pour déterminer l'effet du traitement envisagé sur la variation de la stabilité, la déformation et la compacité des éprouvettes.

VIII.3.1.1. Influence de la chaux

Les mélanges bitumineux testés sont : M C1, M C2, M C3 et M C4.

Pour chaque enrobé, cinq éprouvettes sont confectionnées afin de réaliser l'essai.

Les résultats mentionnés sur les figures VIII.9, VIII.10 et VIII.11 montrent que :

- La stabilité des mélanges traités s'accroît avec l'augmentation de la teneur en chaux, ainsi elle passe respectivement de 697 à 1170 kg pour des teneurs allant de 0 à 4% de chaux.
- Pour des teneurs de 2% de chaux et plus, les stabilités obtenues sont plus grandes que celle du mélange à base de sable propre.

Cela s'explique par le fait que la chaux contribue à une correction de la granulométrie du sable pollué en diminuant le pourcentage des vides, entraînant ainsi une augmentation de la stabilité.

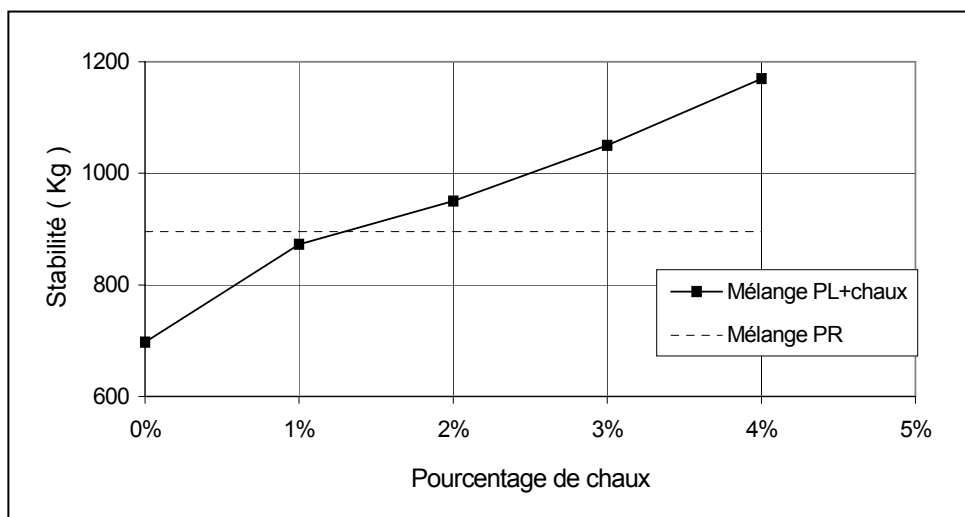


Figure VIII.9 : Variation de la stabilité en fonction de la teneur en chaux .

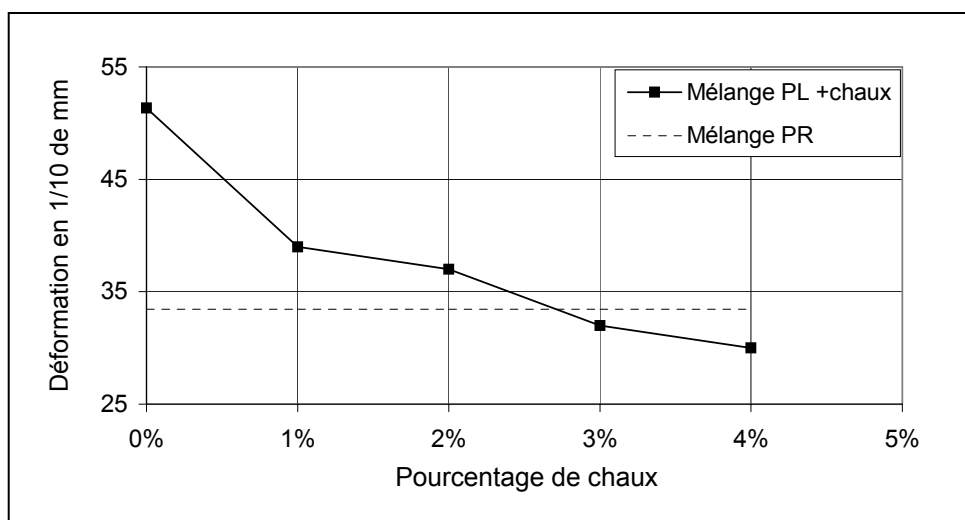


Figure VIII.10 : Variation du fluage en fonction de la teneur en chaux .

- La déformation des matériaux traités, diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux . Elle varie respectivement de 5,13 à 3mm pour des teneurs variant de 0 à 4% de chaux. Les mélanges obtenus avec ajout de chaux fluent moins que l'enrobé à base de sable pollué.
- Après ajout de 3% de chaux, les enrobés bitumineux obtenus sont moins déformables que le mélange à base de sable propre. Cela est dû à la présence de chaux qui contribue à la rigidification de l'enrobé.

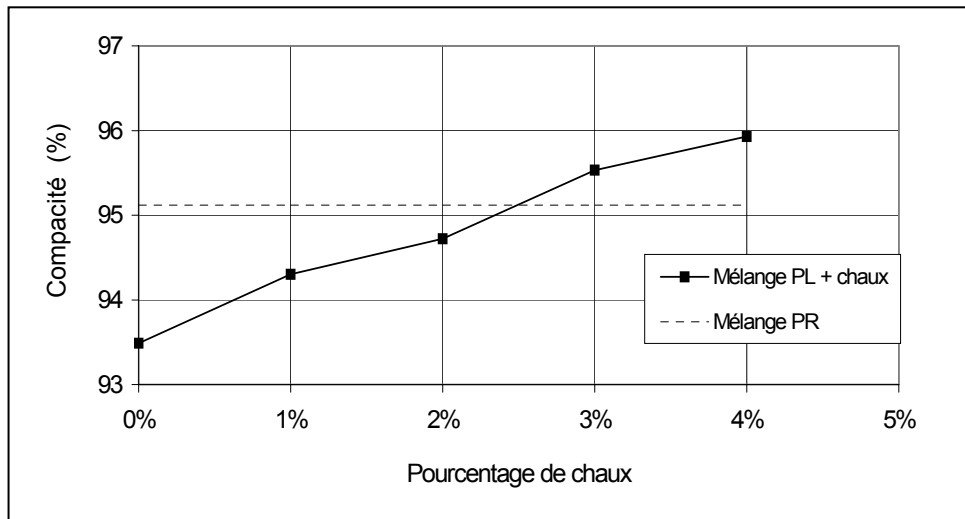


Figure VIII.11 : Variation de la compacité en fonction de la teneur en chaux.

- L'augmentation de la teneur en chaux, entraîne une augmentation de la compacité. Ce résultat s'explique par le fait que, la chaux qui joue le rôle de filler, permet d'occuper les vides, favorisant ainsi l'arrangement des grains suivi d'une élévation de la compacité . De ce fait, la compacité varie de 93,49 à 95,93% respectivement pour 0 et 4% de chaux.
- Avec ajout de 3% de chaux et plus, les compacités obtenues restent supérieures à celle du mélange à base de sable propre.

La variation de la stabilité en fonction de la déformation (figure VIII.12) indique que :

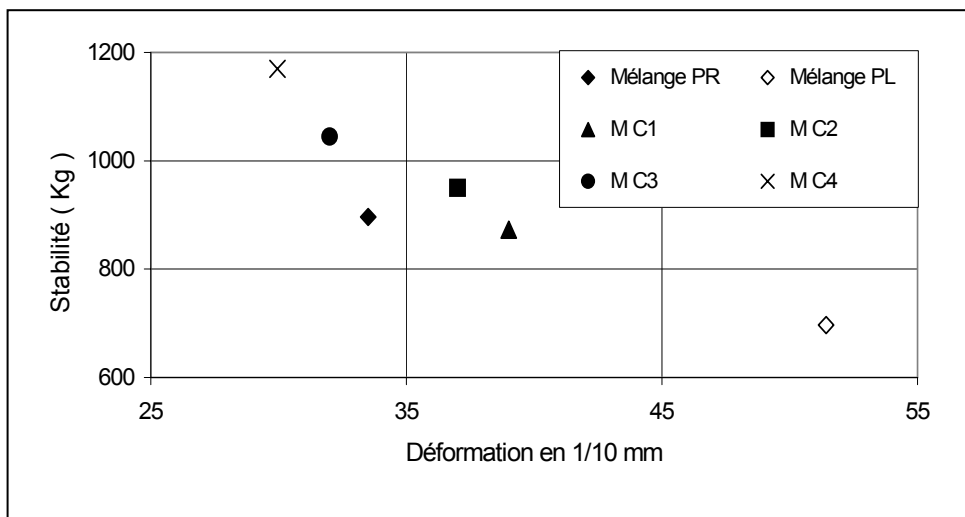


Figure VIII.12 : Variation de la stabilité en fonction de la déformation.

- Le mélange à base de sable pollué est le plus instable et le plus déformable de tous les mélanges hydrocarbonés traités.
L'insuffisance de la stabilité se traduit généralement par un fluage avec formation d'ornières dans la chaussée.
- Le mélange avec 4% de chaux se déforme moins que les autres matériaux et présente une meilleure stabilité.

Conclusion :

L'analyse des résultats obtenus sur les enrobés bitumineux traités, montre que la teneur en chaux joue un rôle prépondérant sur les caractéristiques mécaniques (la stabilité, la compacité et le fluage).

VIII.3.1.2. Influence du sable propre

Pour étudier l'influence du sable propre sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux à base de sable pollué, nous avons incorporé trois proportions variables en sable propre.

Les formulations retenues sont : (M PR1 et PL3), (M PR2 et PL2) et (M PR3 et PL1).

Pour chaque mélange, nous avons confectionnés cinq éprouvettes afin de réaliser l'essai.

Les résultats illustrés par les figures VIII.13 et VIII.14 montrent que :

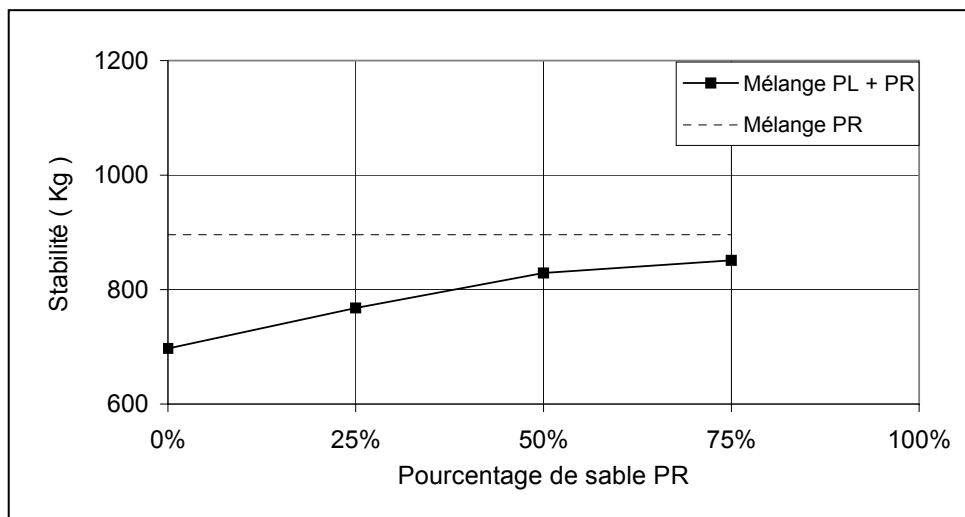


Figure VIII.13: Variation de la stabilité en fonction de la teneur en sable propre.

- La stabilité et la compacité augmentent avec l'accroissement des proportions de sable propre incorporé aux mélanges traités.
- La compacité et la stabilité obtenues sur les enrobés bitumineux avec incorporation de sable propre, restent acceptables comparativement à celles du mélange à base de sable propre.

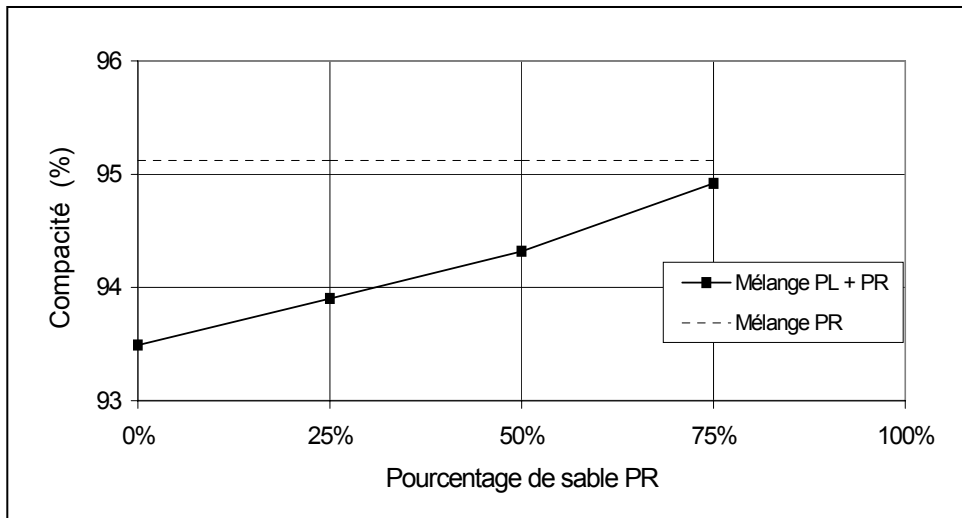


Figure VIII.14: Variation de la compacité en fonction de la teneur en sable propre.

L'évolution du fluage (figure VIII.15) montre que :

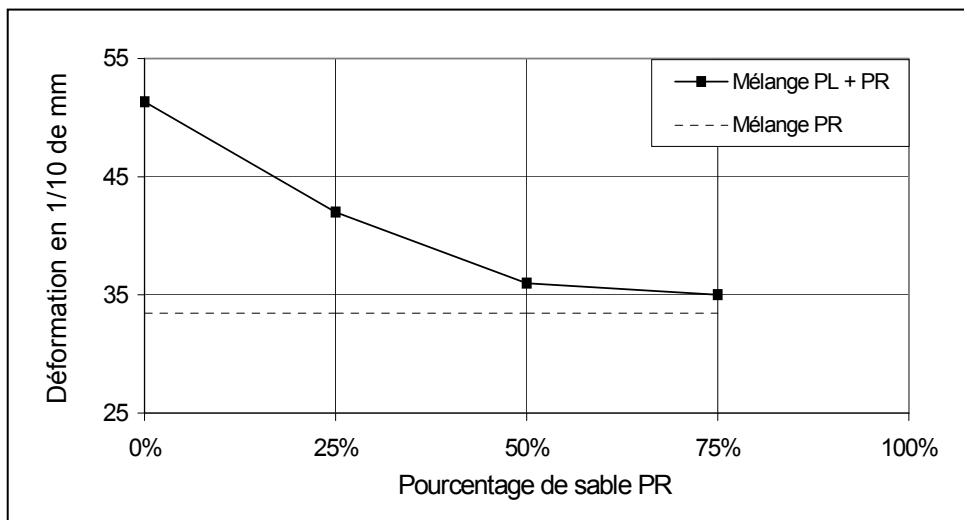


Figure VIII.15: Variation du fluage en fonction de la teneur en sable propre.

- La déformation diminue avec l'augmentation des proportions de sable propre. Ainsi, elle passe respectivement de 5,13 à 3,5mm pour 0 et 75% de sable propre. La présence de fines de nature calcaire dans un enrobé bitumineux le rend moins déformable que lorsqu'elles sont de nature argileuse.
- Avec un ajout de 75% de sable propre, le fluage du mélange bitumineux obtenu est du même ordre de grandeur que celui à base de sable propre.

La variation de la stabilité en fonction de la déformation (figure VIII.16) montre que :

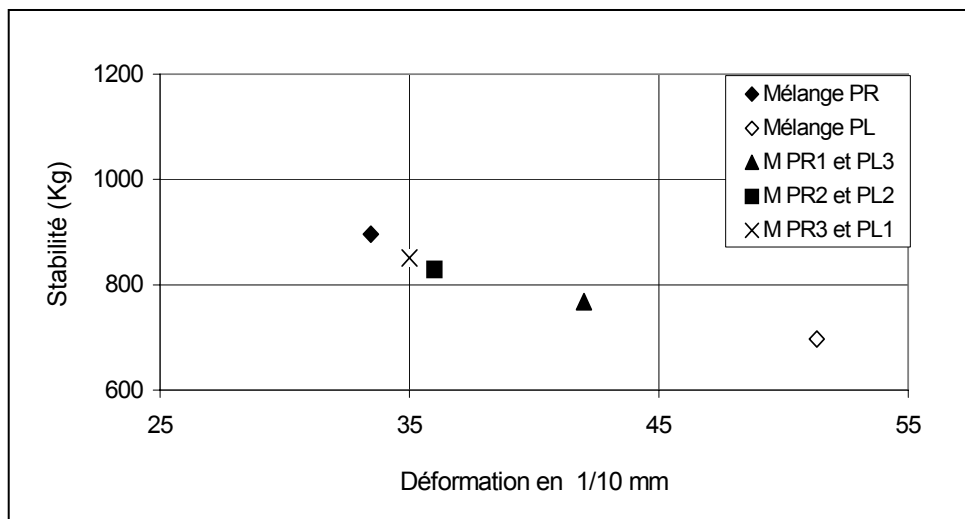


Figure VIII.16: Variation de la stabilité en fonction de la déformation. Influence du sable propre.

- L'enrobé bitumineux à base de sable pollué, est le plus déformable et le plus instable .
- La stabilité et le fluage obtenus avec ajout de 50% de sable propre, sont du même ordre de grandeur que ceux du matériau avec 75% de sable propre.

Conclusion :

L'analyse de tous les résultats montre que :

- Le traitement envisagé (chaux-sable propre) joue un rôle prépondérant sur les caractéristiques mécaniques. Ainsi on constate une nette amélioration de la stabilité et de la compacité avec une diminution du fluage comparativement à ceux du mélange à base de sable pollué.
- Les mélanges bitumineux obtenus avec des teneurs en chaux de 3% et plus, donnent des résultats plus performants que ceux obtenus avec un mélange à base de sable propre.
- Les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux traités avec 75% de sable propre, sont du même ordre de grandeur que celles du mélange à base de sable propre.
- La nature du traitement influe sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux.
Les matériaux traités à la chaux présentent comparativement à ceux des mélanges traités avec du sable propre de meilleures stabilité, de compacité et des fluages plus faibles .

VIII.3.2. Résultats de l'essai Duriez

Pour mieux cerner le comportement des enrobés bitumineux à base de sable pollué traité en présence d'eau, des mélanges ont été préparés puis soumis à l'essai Duriez. Celui-ci nous permettra d'apprécier l'effet du traitement sur les performances mécaniques de l'enrobé bitumineux.

Pour ce faire, nous avons confectionnés des mélanges à base de sable pollué dans lequel on a incorporé des proportions variables en chaux et en sable propre afin d'analyser l'influence des teneurs en chaux et en sable propre sur les caractéristiques de l'enrobé.

Les formulations retenues sont celles testées avec l'essai Marshall.

Avec ajout de chaux : M C1, M C2, M C3 et M C4.

Avec incorporation de sable propre : (M PR1 et PL3), (M PR2 et PL2) et (M PR3 et PL1).

Pour chaque mélange, nous avons confectionnés sept éprouvettes pour réaliser l'essai .

VIII.3.2.1. Influence du traitement sur la résistance à la compression à sec.

Les résultats des variations de la résistance à la compression à sec (figures VIII.17 et VIII.18) montrent que :

- Les résistances à sec augmentent avec l'augmentation des teneurs en (chaux-sable propre) , ainsi elles passent de 68 kg/cm² pour le sable pollué à 81,5 et 73,67 kg/cm² respectivement pour 4% de chaux et 75% de sable propre.
- Pour toutes les proportions en sable propre incorporées, les résistances obtenues restent inférieures à celle du mélange à base de sable propre.
Donc la présence de fines argileuses dans un sable même en faible quantité, influe sur les résistances à sec de l'enrobé bitumineux.

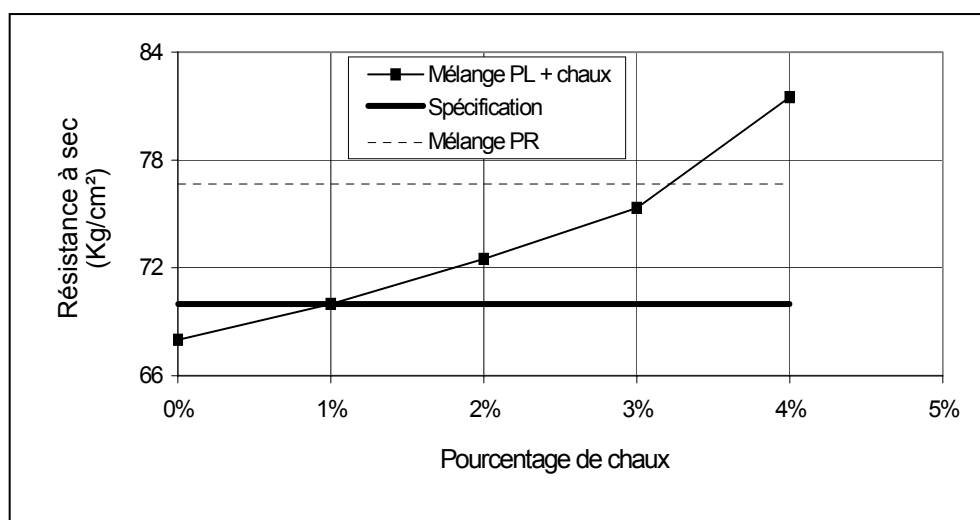


Figure VIII.17: Variation de la résistance à sec en fonction de la teneur en chaux.

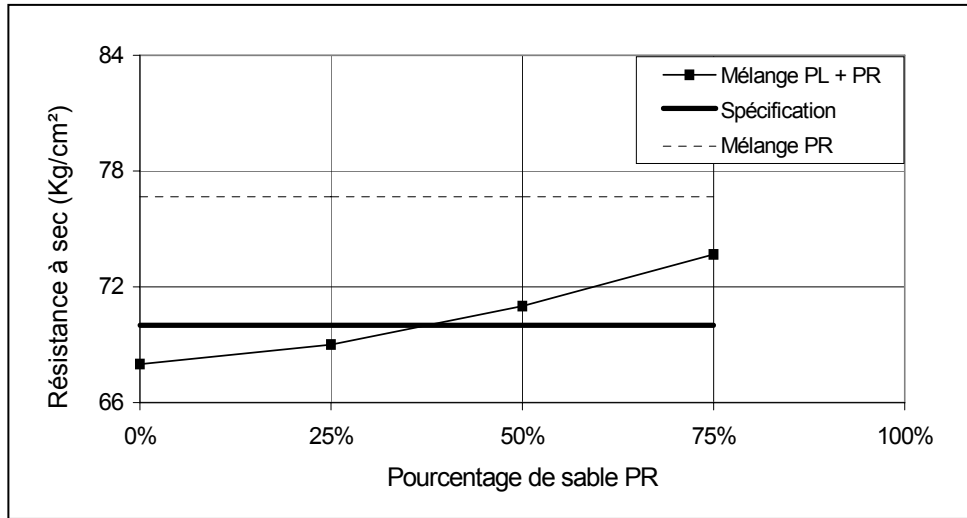


Figure VIII.18: Variation de la résistance à sec en fonction de la teneur en sable propre.

- Avec un ajout de 3% de chaux, la résistance est du même ordre de grandeur que celle du mélange à base de sable propre. Par contre, pour une teneur de 4% les enrobés bitumineux obtenus sont beaucoup plus résistants à la compression.

Cette évolution est due à la présence de chaux qui avec le bitume, forme un mastic qui confère à l'enrobé sa rigidité.

- Les résistances à sec recommandées sont atteintes avec un ajout respectif de 1 et 50% de chaux et de sable propre.

VIII.3.2.2. Influence du traitement sur les résistances à la compression en immersion

Les résultats mentionnés sur les figures VIII.19 et VIII.20, nous permettent de remarquer que :

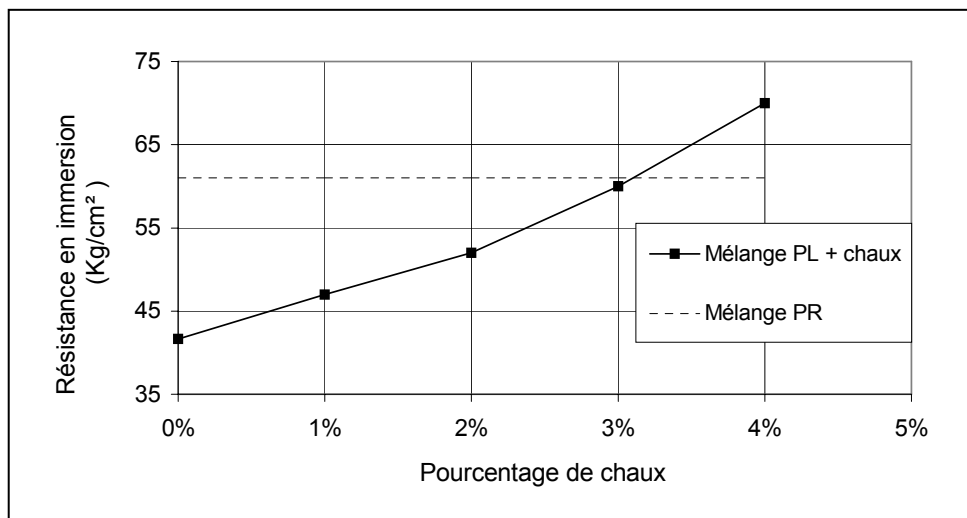


Figure VIII.19 : Variation de la résistance en immersion en fonction de la teneur en chaux.

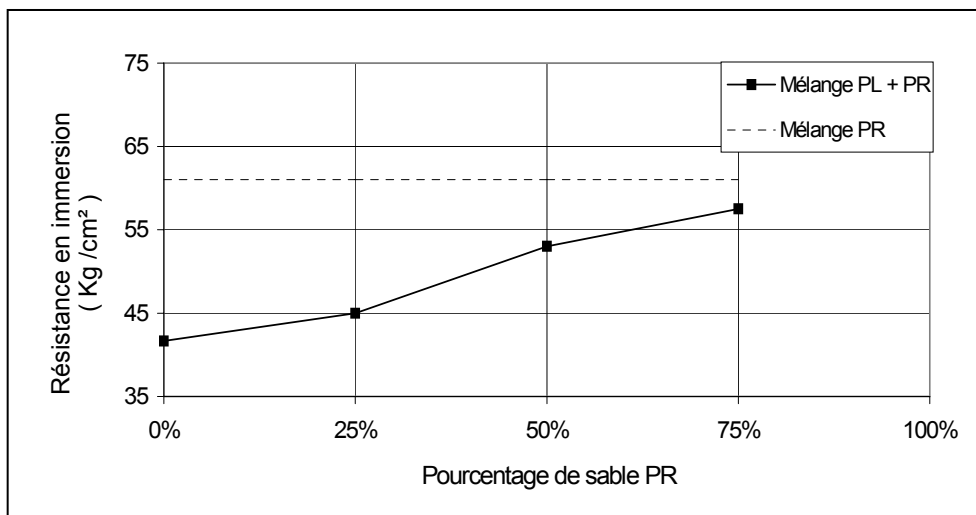


Figure VIII.20: Variation de la résistance en immersion en fonction de la teneur en sable propre.

- En augmentant les teneurs en chaux et en sable propre, les résistances en immersion des mélanges hydrocarbonés testés augmentent. Elles varient de 41,5 kg/cm² pour le mélange pollué à 70 et 57,5 kg/cm² respectivement pour 4% de chaux et 75% de sable propre.
- Les résistances en immersion augmentent avec le pourcentage de sable propre incorporé mais restent inférieures à celle obtenue sur le mélange à base de sable propre. Ceci est dû au fait que les fines contenues dans le sable propre, sont calcaires. Elles présentent une bonne adhésivité avec le bitume en présence d'eau. De plus, ce sont des matériaux hydrophobes (repoussent l'eau).
- Les enrobés bitumineux avec ajout de chaux présentent de meilleures résistances en immersion comparativement à celles obtenues sur les mélanges traités avec du sable propre.
- Les résistances obtenues avec 3% de chaux, sont non seulement du même ordre de grandeur que celle du mélange à base de sable propre mais également meilleures avec une teneur de 4% de chaux.

La variation de la résistance en immersion s'explique par le fait que :

Les particules argileuses présentent dans le sable pollué portent à leur surface des charges négatives, donc ce sont des matériaux hydrophiles (attirent l'eau).

Cette charge négative [102] provient de substitutions au sein du réseau cristallin, résultant du remplacement des cations du réseau par des cations de charge inférieure.

Elle est due aussi aux liaisons rompues en bordure des particules [Annexe 6] et aux imperfections au sein du réseau.

Cette charge de surface peut être neutralisée par des cations dits « compensateurs ». Dans notre cas, les cations Ca²⁺ sont libérés par la chaux en présence d'eau, ces derniers vont neutraliser les argiles présentes dans l'enrobé.

VIII.3.2.3. Influence du traitement sur le rapport immersion-compression.

Afin de mettre en évidence l'influence du traitement sur la tenue à l'eau des mélanges bitumineux, nous avons évalué le rapport immersion-compression (r/R), r étant la résistance à la compression après 7 jours d'immersion dans l'eau à 18°C et R représentant la résistance à la compression après 7 jours à sec à 18°C.

L'analyse des résultats obtenus (figures VIII.21 et VIII.22), nous permet de remarquer que :

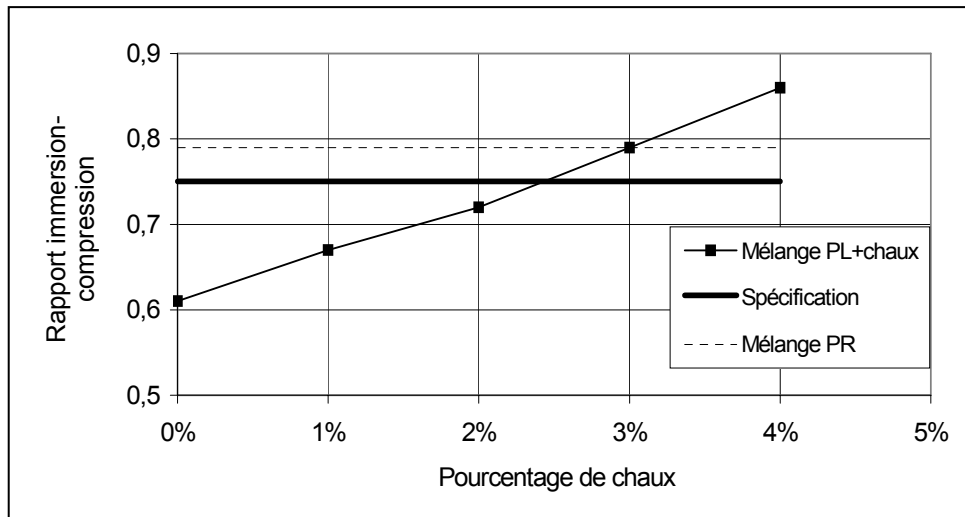


Figure VIII.21 : Variation du rapport immersion-compression en fonction de la teneur en chaux.

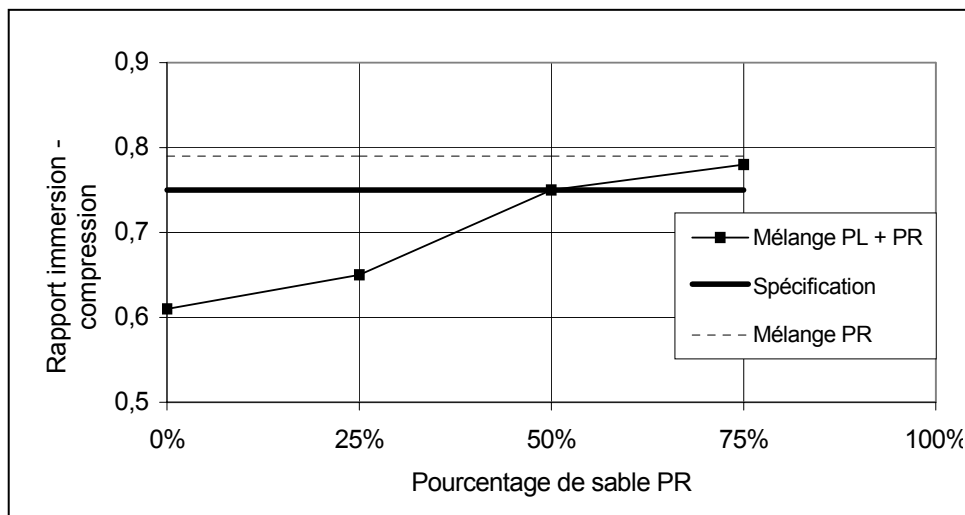


Figure VIII.22 : Variation du rapport immersion-compression en fonction de la teneur en sable propre.

- Les valeurs du rapport immersion –compression augmentent avec l’augmentation des teneurs en chaux et en sable propre.
- Les rapports immersion-compression des matériaux bitumineux testés sont conformes aux spécifications recommandées après ajout de 3% de chaux ou 50% de sable propre.

VIII.3.2.4. Influence du traitement sur le gonflement volumétrique.

On immerge les éprouvettes dans de l’eau après leur démoulage afin de mettre en évidence l’influence du traitement sur le gonflement volumétrique.

Puis, on note les variations de leurs dimensions (figures VIII.23 et VIII.24) durant les sept jours d’immersion.

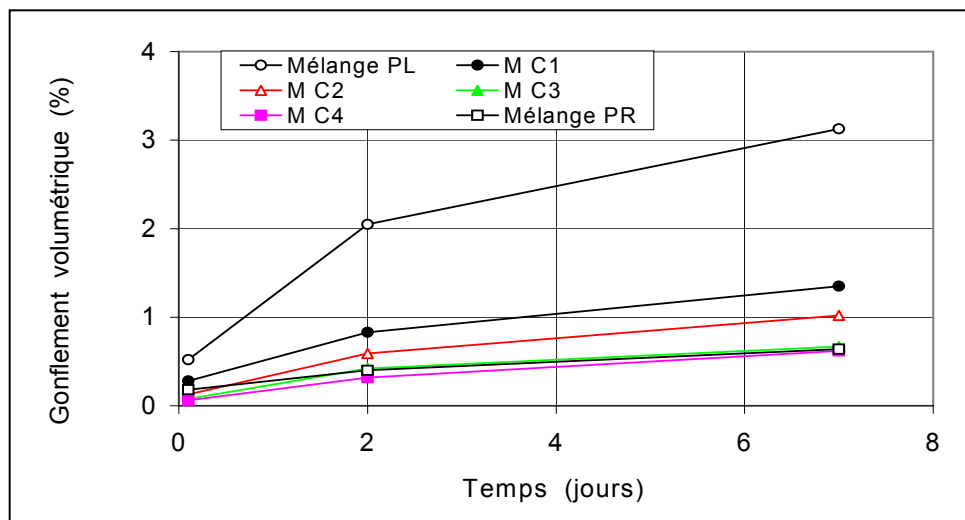


Figure VIII.23 : Taux de gonflement volumétrique au cours du temps à différents teneurs en chaux .

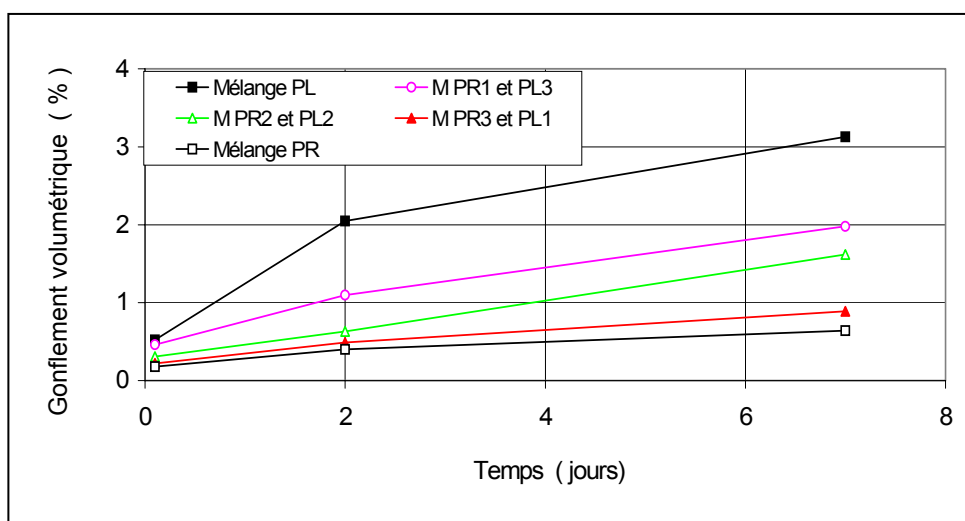


Figure VIII.24 : Taux de gonflement volumétrique au cours du temps à différents teneurs en sable propre .

- Les éprouvettes à base de sable pollué présentent un taux de gonflement volumétrique plus important que celui obtenu avec les autres mélanges.
- Le gonflement volumétrique augmente au cours du temps et ceci pour tous les enrobés bitumineux testés à la chaux ou au sable propre.
- L'ajout de fines calcaires réduit le gonflement de l'enrobé mais pas d'une façon aussi nette que la chaux. Ceci est lié à l'insolubilité des fines calcaires dans l'eau contrairement à la chaux dont la solubilité est importante de l'ordre de 1,7g/l à 20°C. L'écart est d'autant plus perceptible avec une teneur en chaux de 1% .
- Pour une teneur de 75% de sable propre, les résultats obtenus sont du même ordre de grandeur que ceux du mélange à base de sable propre.
- La présence de fines argileuses dans un sable favorise le gonflement de l'enrobé bitumineux lors de son immersion. Mais celui-ci diminue au profit d'une nette amélioration de la teneur en chaux, ainsi le taux de gonflement varie de 3,13 à 0,62% respectivement avec 0 et 4% de chaux pour une durée d'immersion de 7 jours.

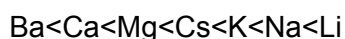
Ce phénomène peut s'expliquer par :

A l'état anhydre, les feuillets argileux sont accolés les uns aux autres [Annexe 6] mais ils s'écartent en présence d'eau en provoquant un gonflement des éprouvettes à base de sable pollué.

L'eau adsorbée en surface des particules argileuses, peut être influencée par l'énergie d'hydratation des cations « compensateurs ».

L'écartement des feuillets et l'hydratation des surfaces internes dépendent de la nature des cations « compensateurs ».

CALVET [21] a pu établir que le gonflement allait dans l'ordre croissant suivant :



Un cation présente une faible énergie d'hydratation lorsqu'il n'y a pas de molécules d'eau entre le cation et la surface. Dans le cas où le cation est totalement hydraté, celui-ci présente une énergie d'hydratation élevée (figure VIII.25).

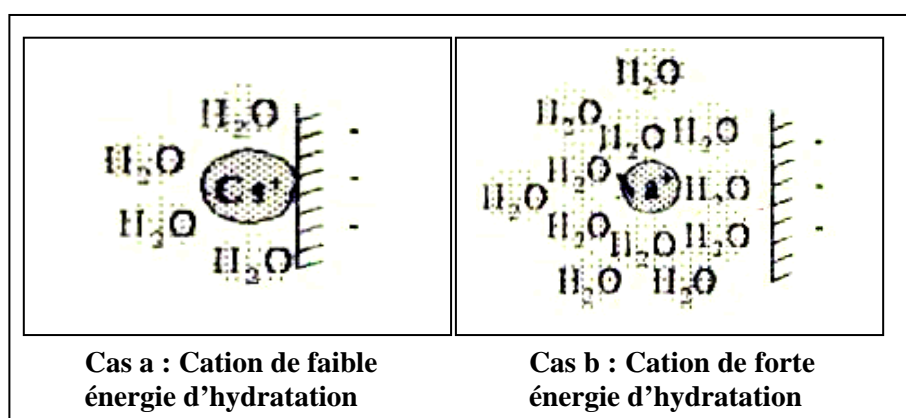


Figure VIII.25: Le phénomène d'hydratation des particules d'argiles avec deux types de cations « compensateurs » [21].

VIII.3.2.5. Influence du traitement sur les vides résiduels de l'enrobé bitumineux

Les variations du pourcentage des vides (figures VIII.26 et VIII.27) montrent que :

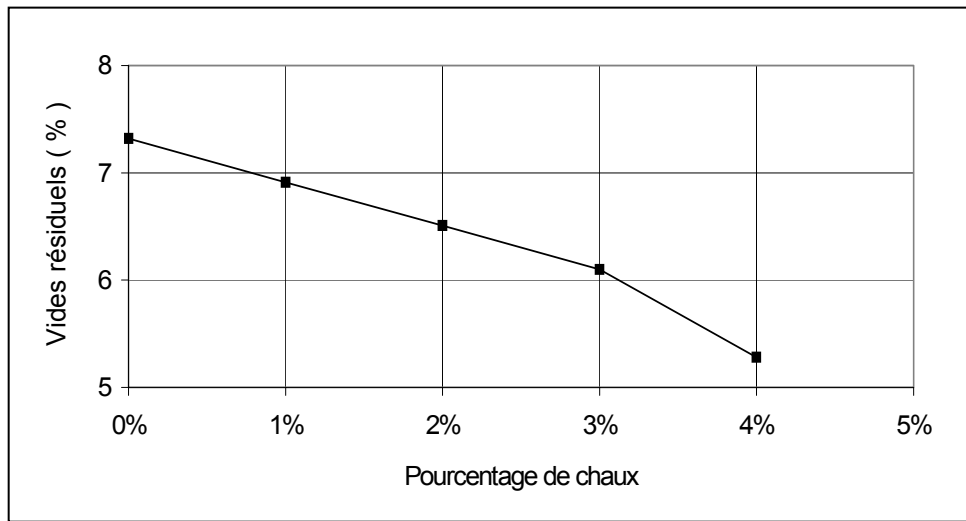


Figure VIII.26 : Variation du pourcentage des vides résiduels en fonction de la teneur en chaux.

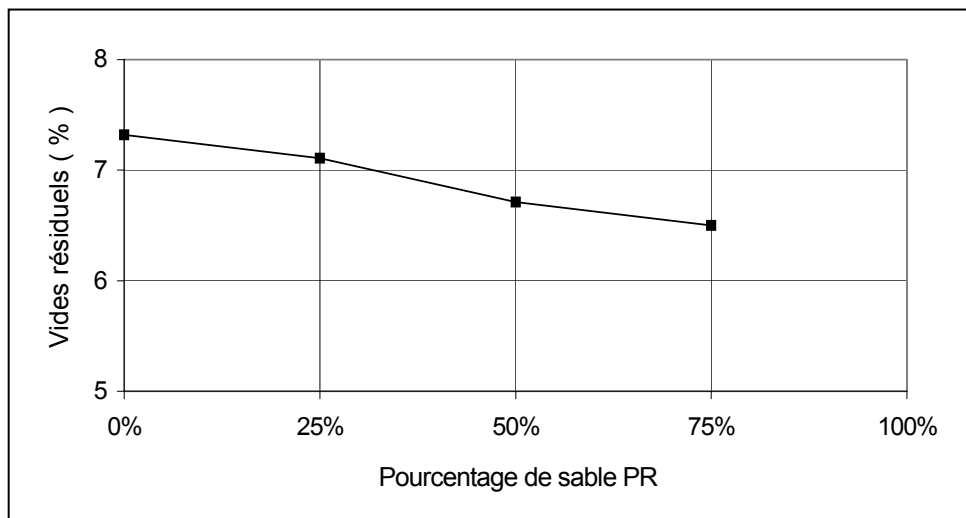


Figure VIII.27 : Variation du pourcentage des vides résiduels en fonction de la teneur en sable propre.

- Le pourcentage de vides résiduels diminue avec l'augmentation des teneurs en chaux et en sable propre.
Ainsi, il passe de 7,32% pour le mélange pollué à 5,28 et 6,5% pour des teneurs respectives de 4% de chaux et 75% de sable propre.

Cette diminution peut s'expliquer par le fait que, l'ajout de chaux ou de sable propre améliore la granulométrie du sable pollué, entraînant ainsi une diminution du pourcentages des vides résiduels suivie d'une augmentation des compacités des enrobés hydrocarbonés traités.

VIII.3.3. INFLUENCE DES INDICES DE PROPRETE SUR LE RAPPORT IMMERSION-COMPRESSION.

Afin de ressortir les meilleures formulations qui répondent à la fois aux exigences de qualité et de propreté, nous avons mis en évidence les variations du rapport immersion-compression en fonction d'une part de l'équivalent de sable et d'autre part de la valeur au bleu de méthylène obtenues avec les différentes proportions de chaux et de sable propre incorporés aux mélanges testés.

VIII.3.3.1. Influence de l'équivalent de sable sur le rapport immersion-compression

Les variations du rapport immersion-compression en fonction de l'équivalent de sable (figures VIII.28 et VIII.29) montrent ce qui suit :

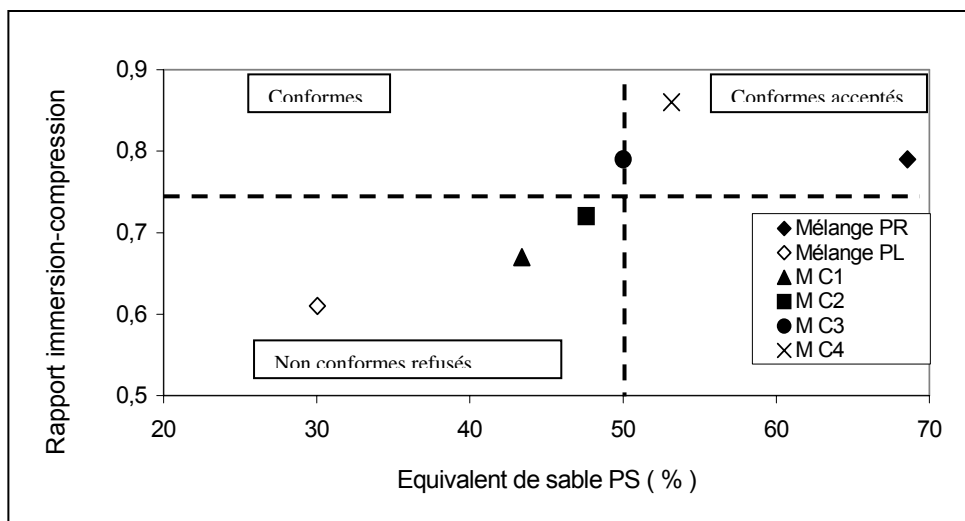


Figure VIII.28: Variation du rapport r/R en fonction de l'équivalent de sable. Influence de la chaux .

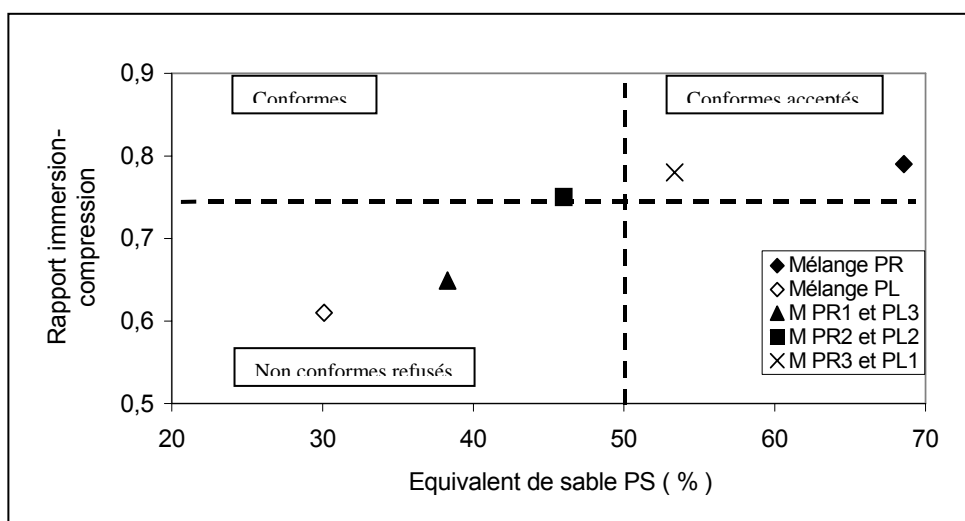


Figure VIII.29: Variation du rapport r/R en fonction de l'équivalent de sable. Influence du sable propre.

A partir de ces résultats, on pourra retenir les mélanges répondant aux spécifications exigés concernant le rapport immersion -compression et l'équivalent de sable à 10% de fines.

Les valeurs limites spécifiées à retenir respectivement pour l'équivalent de sable à 10% de fines et le rapport immersion-compression sont 50 et 0,75.

- Tous les matériaux bitumineux (figure VIII.28) rejetés par l'équivalent de sable à 10% de fines sont non conformes vu que les valeurs du rapport immersion-compression correspondantes restent inférieures à 0,75.

Les matériaux acceptés par l'équivalent de sable à 10% de fines ($PS > 50$), présentent des valeurs du rapport immersion-compression supérieures à 0,75 et de ce fait, ils sont conformes.

Les formulations retenues avec la chaux, sont les mélanges M C3 et M C4.

- Parmi les matériaux traités avec du sable propre (figure VIII.29), il y a ceux (M PR2 et PL2) qui sont rejetés par l'équivalent de sable à 10% de fines et dont le rapport immersion-compression est égale à 0,75, donc ce mélange reste conforme .

Les mélanges qui satisfont l'équivalent de sable à 10% sont conformes, vu que les valeurs du rapport immersion-compression restent supérieures à 0,75.

Les mélanges à retenir avec ajout de sable propre, sont les mélanges (M PR2 et PL2) et (M PR3 et PL1).

VIII.3.3.2. Influence de la valeur au bleu sur le rapport immersion-compression.

L'évolution du rapport immersion-compression en fonction de la valeur au bleu (figures VIII.30 et VIII.31) montrent que :

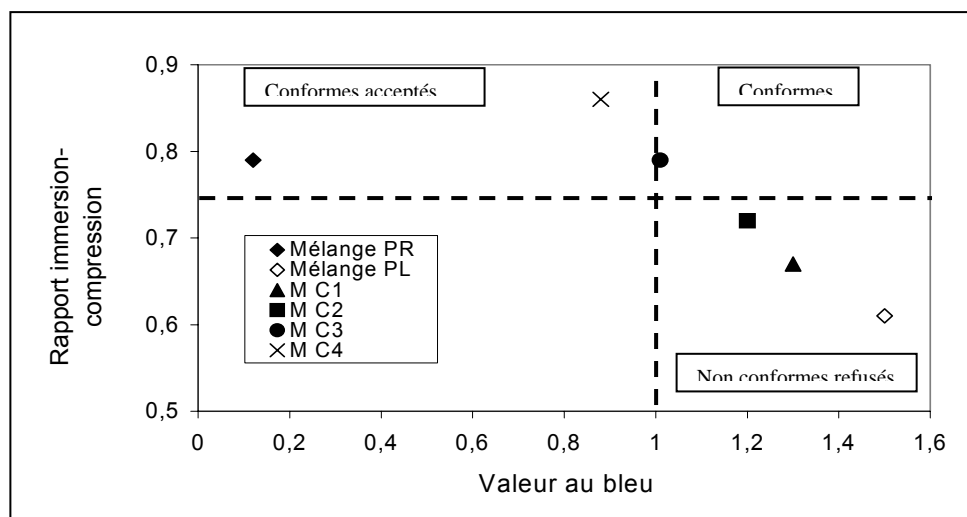


Figure VIII.30: Variation du rapport r/R en fonction de la valeur au bleu
Influence de la chaux.

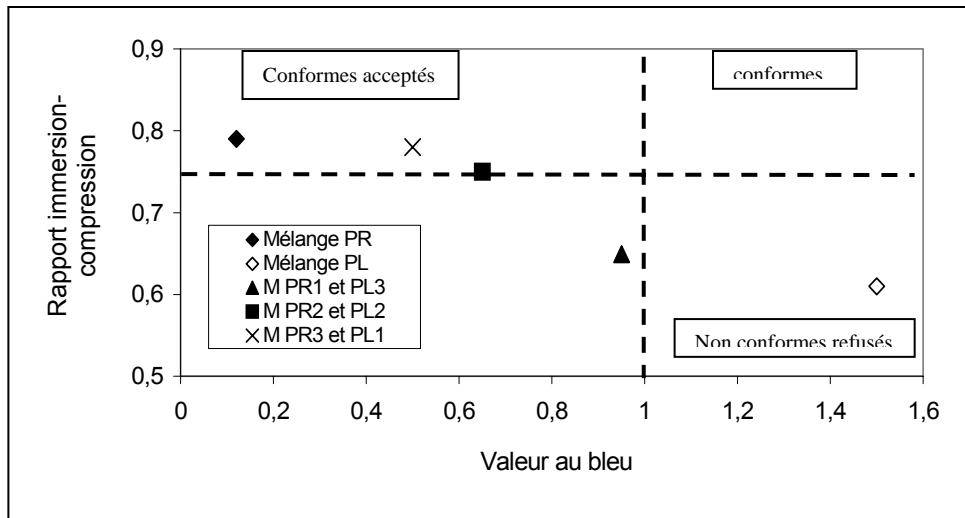


Figure VIII.31: Variation du rapport r/R en fonction de la valeur au bleu. Influence du sable propre.

Dans le cadre de cette étude, cette façon de présenter les spécifications permet de récupérer les sables traités que l'usage seul de la valeur au bleu éliminerait.

Les valeurs limites spécifiées à retenir respectivement pour la valeur au bleu et le rapport immersion-compression sont 1 et 0,75.

- Parmi les matériaux traités à la chaux (figure VIII.30), il y a ceux (M C3) qui ne satisfont pas la valeur au bleu exigée et dont la valeur du rapport immersion-compression reste supérieure à 0,75 donc ce mélange est récupéré puisqu'il est conforme.

Les mélanges qui satisfont la valeur au bleu ($VB < 1$) sont conformes vu que les valeurs du rapport immersion-compression restent supérieures à 0,75.

Donc les mélanges à retenir avec ajout de chaux sont M C3 et M C4.

- Parmi les enrobés bitumineux traités avec du sable propre (figure VIII.31) acceptés par la valeur au bleu, il y a ceux (M PR1 et PL3) qui ne répondent pas au critère de qualité (le rapport immersion-compression inférieur à 0,75) donc ce mélange est à rejeter car non conforme.

Les matériaux retenus avec ajout de sable propre sont : (M PR2 et PL2) et (M PR3 et PL1).

Conclusion

L'analyse de tous les résultats obtenus par l'essai Duriez montrent que :

- Le traitement des sable pollués avec de la chaux et du sable propre conduit, à une amélioration des résistances mécaniques à sec et en immersion ainsi que le rapport immersion-compression.

- L'incorporation respective de 1 et 50% de chaux et de sable propre permet d'atteindre les résistances à sec recommandées.
- Les rapports immersion-compression des matériaux bitumineux testés sont conformes aux spécifications recommandées avec un ajout de 3% de chaux et 50% de sable propre.
- La nature du traitement influe sur les performances mécaniques de l'enrobé bitumineux. Les matériaux traités à la chaux, présentent comparativement à ceux des mélanges traités avec du sable propre, de meilleures résistances à sec et en immersion et ils présentent une meilleure tenue à l'eau.
- Parmi les mélanges retenus qui sont conformes, il y a ceux qui satisfont à la fois les critères de propreté (PS, VB) et de qualité et qui sont : M C4 et (M PR3 et PL1). D'autres restent conformes mais sans satisfaire le critère de propreté. Ce sont les mélanges M C3 et (M PR2 et PL2) dont respectivement $VB > 1$ et $PS < 50$.

VIII.4. CONCLUSION

A partir de l'étude de l'influence du traitement des matériaux pollués sur les caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux, nous montrons clairement que celui-ci est indispensable.

Au vu des résultats obtenus dans ce chapitre, il ressort que :

- L'association de chaux ou de sable propre dans un sable pollué, améliore les caractéristiques géotechniques. Le traitement provoque une augmentation de l'équivalent de sable à 10 % de fines et une diminution de la valeur au bleu.
- Dans un enrobé hydrocarboné, le traitement du sable pollué conduit à une augmentation de la stabilité, de la compacité et une diminution du fluage.
- Le sable pollué traité (chaux ou sable propre) associé à un mélange bitumineux ,provoque une évolution des performances mécaniques (augmentation des résistances à sec et en immersion, ainsi que le rapport immersion-compression).
- Le gonflement volumétrique des enrobés hydrocarbonés diminue au profit d'un net accroissement des teneurs en chaux et en sable propre.
- L'utilisation de la chaux comme traitement améliore d'autant plus les performances mécaniques que le traitement est du sable propre.
- Les mélanges traités retenus qui satisfont à la fois les critères de propreté (PS, VB) et de qualité, sont : M C4 et (M PR3 et PL1).

L'intérêt de cette étude est de récupérer aussi les sable traités qui ne répondaient pas au critère de propreté .

Ainsi, les mélanges M C3 et (M PR2 et PL2) sont retenus pour leurs performances de qualité.

CHAPITRE X

EFFET DES TRAITEMENTS SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS BITUMINEUX EN FLUAGE STATIQUE

INTRODUCTION

Pour évaluer les caractéristiques rhéologiques des bétons bitumineux en fonction des traitements et de la température, il est nécessaire de mettre en évidence le comportement des bétons bitumineux en fluage statique.

Pour ce faire, des mélanges ont été confectionnés en tenant compte des résultats de résistances mécaniques et de stabilité obtenus par les essais présentés dans les chapitres précédents.

Ainsi, tout en gardant la même composition (mélange granulaire et pourcentage de bitume), des éprouvettes types Marshall ont été préparées avec les mélanges suivants :

- Sable propre de Keddara.
- Sable pollué.
- Traitement à la chaux : les mélanges M C3 et M C4.
- Traitement avec du sable propre de Keddara : les mélanges (M PR2 et PL2) et (M PR3 et PL1).

Il y a lieu de noter que pour chaque température et pour chaque type d'enrobé, nous avons effectué l'essai sur trois éprouvettes.

Notre travail qui se situe dans ce contexte, consiste à comparer l'influence des différents traitements sur l'évolution au fluage tout en prenant la température comme un paramètre variable.

Dans ce chapitre, nous présentons dans une première étape, les courbes de déformation en fonction de l'influence des paramètres de formulation (les différents traitements) et des paramètres de sollicitation (la température de l'essai) comme résultats obtenus par l'essai de fluage en compression simple .

Dans une seconde étape, nous déterminons les déformations et les modules de rigidité pour des points particuliers de ces courbes afin de connaître le comportement en fluage statique de ces enrobés.

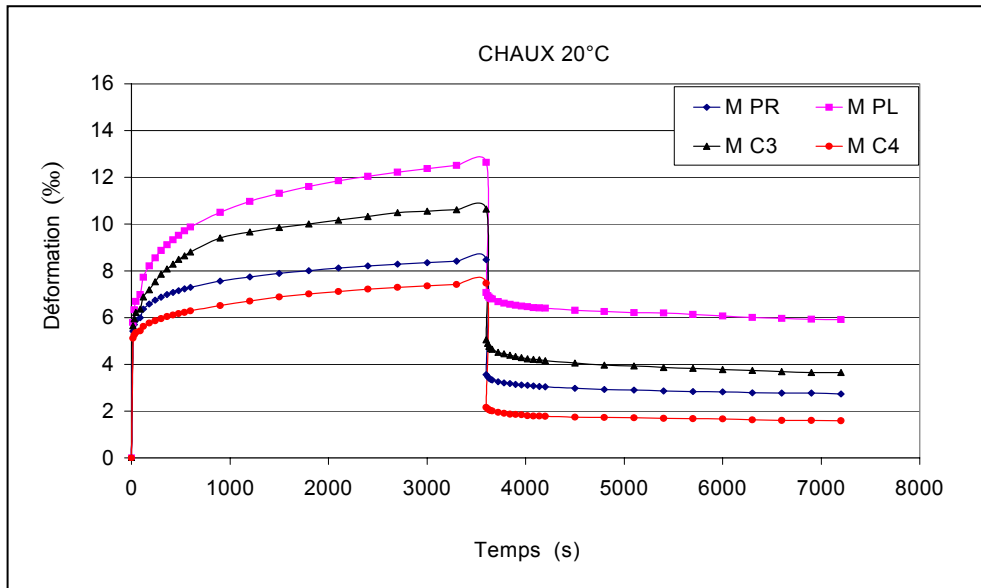
X.1. COURBES DE FLUAGE STATIQUE.

X.1.1. Influence de la température sur le fluage statique de l'enrobé

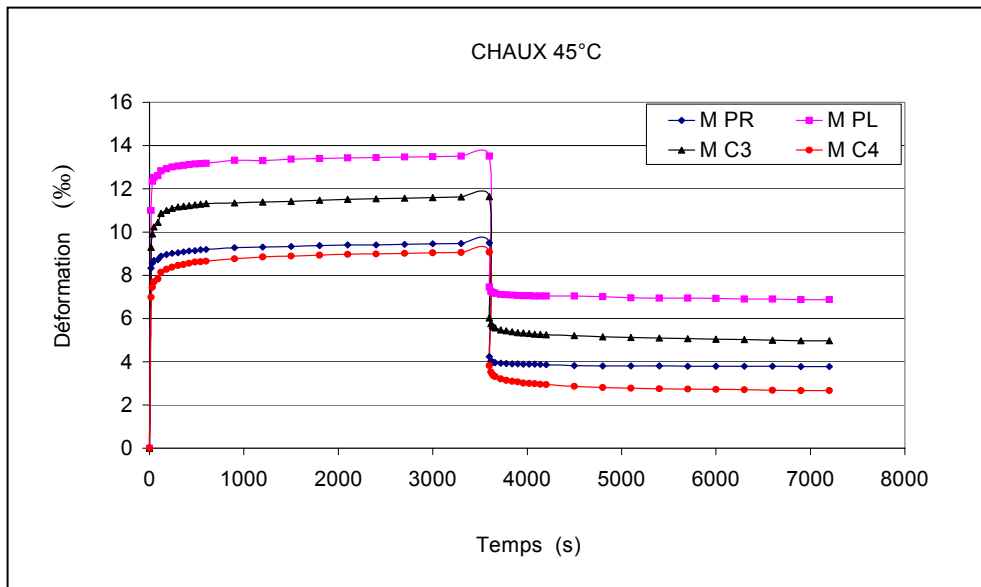
La représentation de la déformation en fonction du temps, permet de comparer les résistances au fluage en compression simple, des différents enrobés traités sous les mêmes conditions de sollicitations .

X.1.1.1. Traitement à la chaux

Les résultats sont représentés sur les figures : X.1, X.2 et X.3.



**Figure X.1 : Courbes de fluage statique à 20°C.
Influence de la chaux.**



**Figure X.2 : Courbes de fluage statique à 45°C.
Influence de la chaux.**

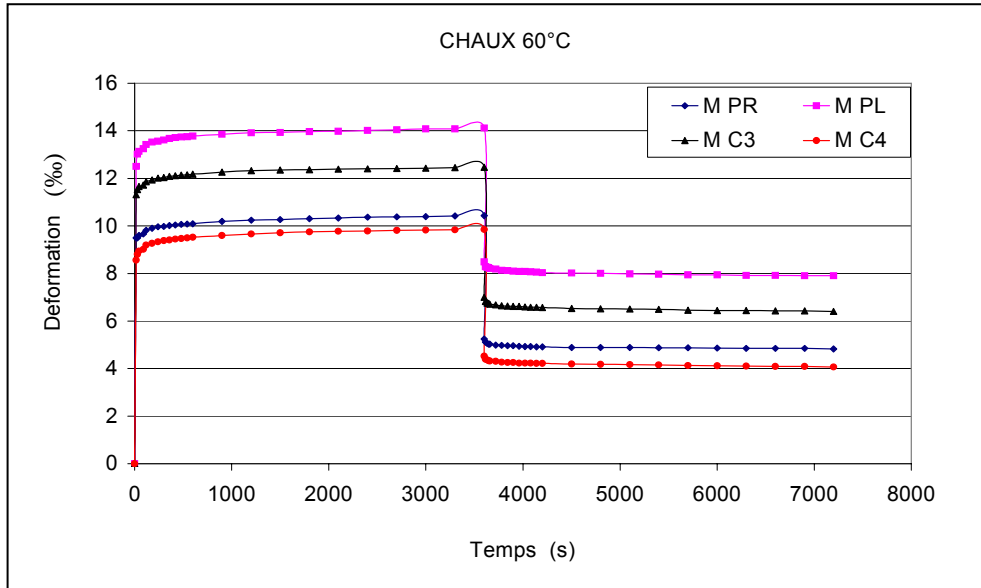


Figure X.3 : Courbes de fluage statique à 60°C. Influence de la chaux.

Les courbes de déformation obtenues en fonction du temps, présentent toutes la même allure. Au cours du chargement, on observe une croissance rapide des déformations dans une première phase, suivie d'une deuxième phase présentant un palier de déformation lent. La troisième phase (augmentation de ϵ au voisinage de la rupture), celle-ci n'est pas toujours atteinte au cours de l'essai vu que celui-ci est lent et il faut donc plusieurs heures.

X.1.1.2. Traitement avec du sable propre

Les résultats sont représentés sur les figures : X.4, X.5 et X.6.

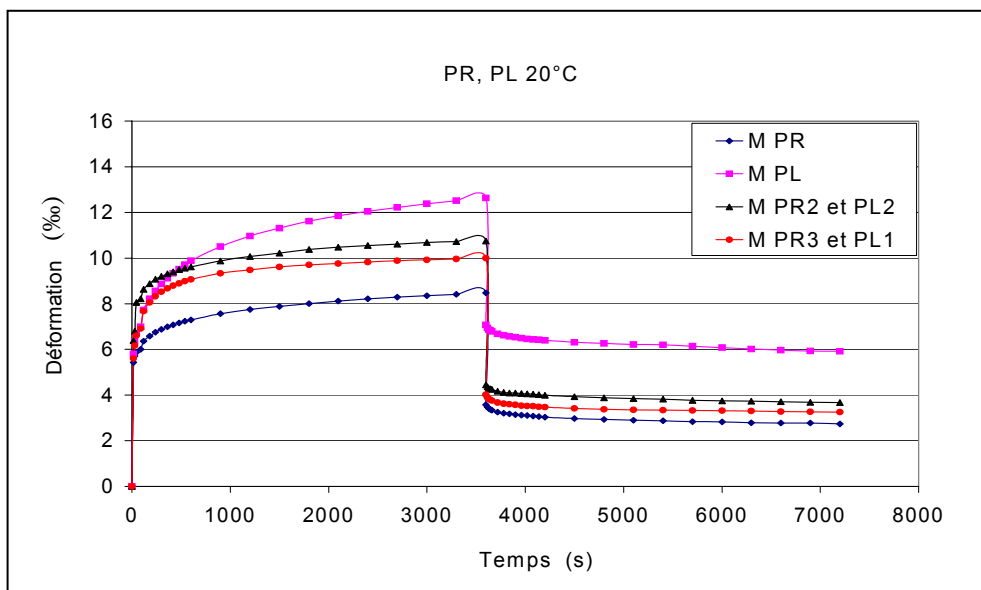


Figure X.4 : Courbes de fluage statique à 20°C. Influence du sable propre

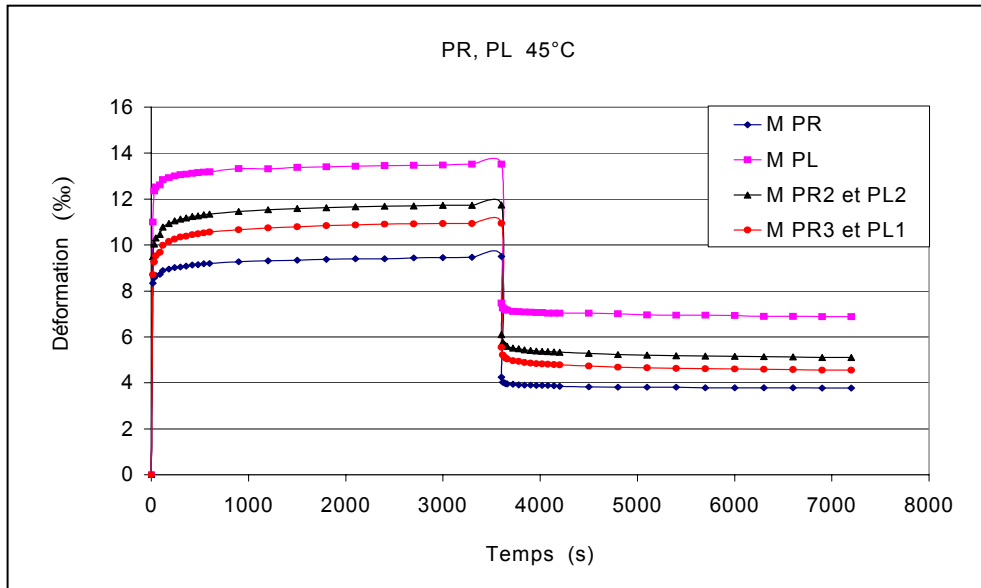


Figure X.5 : Courbes de fluage statique à 45°C. Influence du sable propre

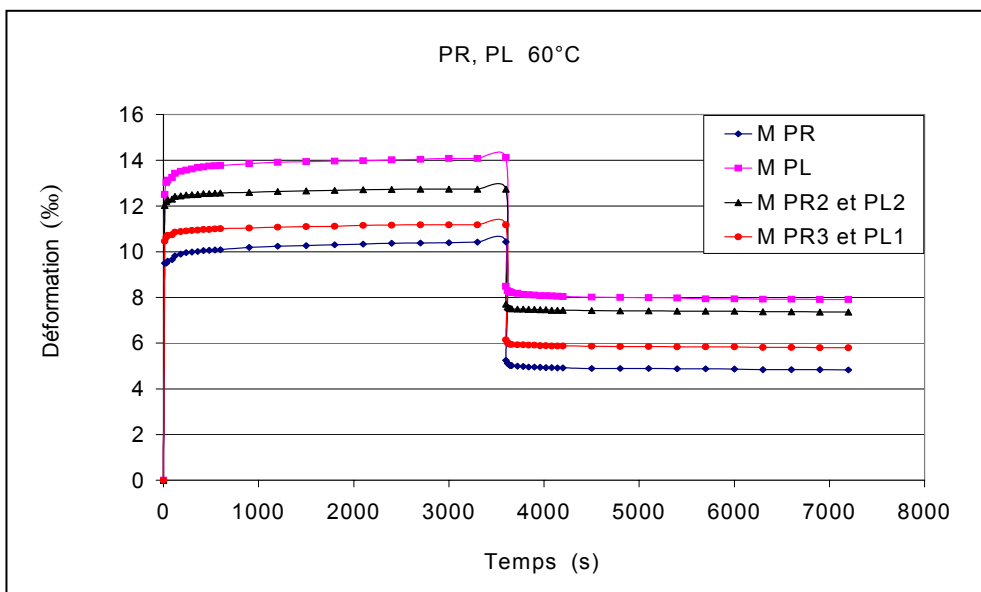


Figure X.6 : Courbes de fluage statique à 60°C. Influence du sable propre

Toutes les courbes présentent la même allure. Autrement dit, les enrobés ont pratiquement le même comportement qui est caractérisé par une croissance rapide de la déformation au départ de l'essai suivi d'une période de croissance lente ou modérée.

Conclusion

Les courbes de déformations en fonction du temps des mélanges bitumineux testés dépendent de la nature du sable employé et du type de traitement envisagé.

Les parties de la courbe de fluage qui sont généralement prises en compte pour l'étude du fluage, sont la première et la seconde phase [92].

X.1.2. Influence des différentes formulations sur le fluage statique de l'enrobé.

Les résultats sont représentés sur les figures X.7, X.8, X.9, X.10, X.11 et X.12.

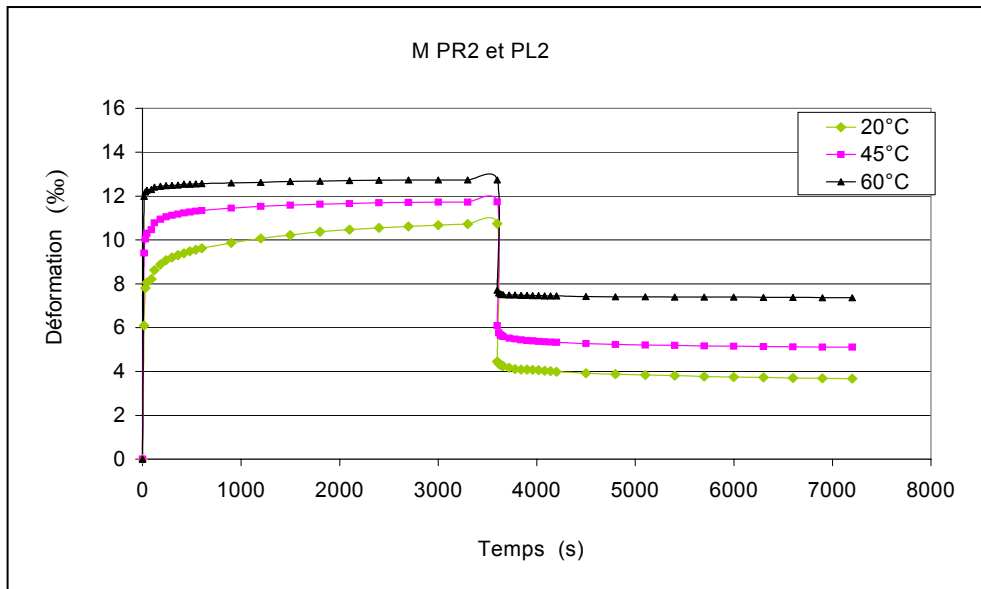


Figure X.7 : Courbes de fluage statique avec le mélange M PR2 et PL2.

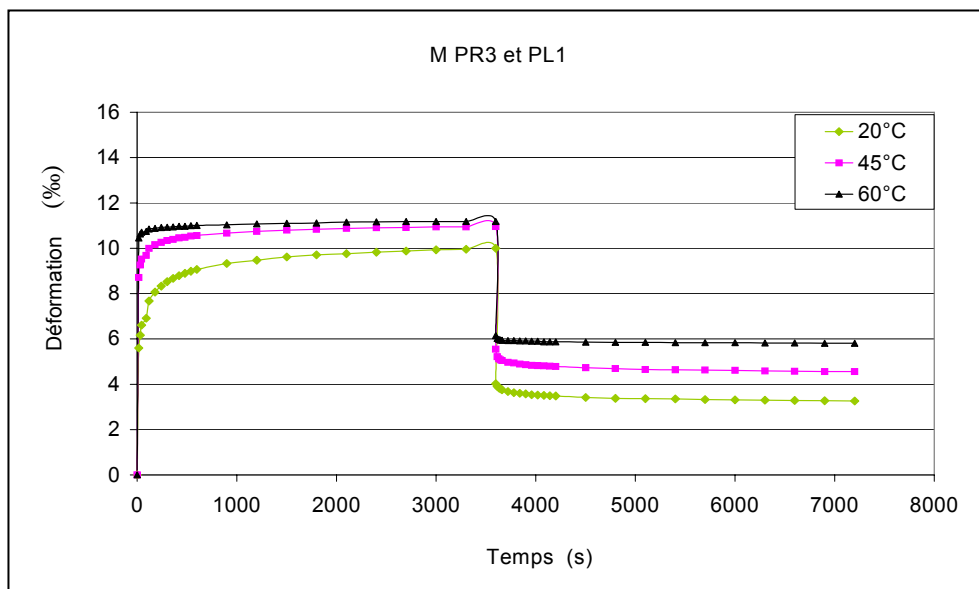


Figure X.8 : Courbes de fluage statique avec le mélange M PR3 et PL1

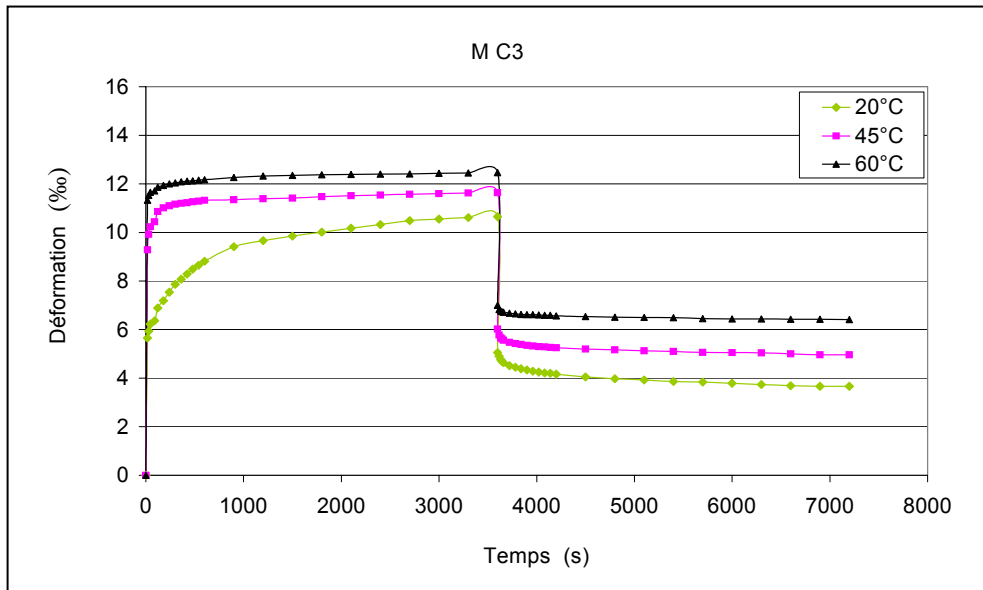


Figure X.9 : Courbes de fluage statique avec 3% chaux.

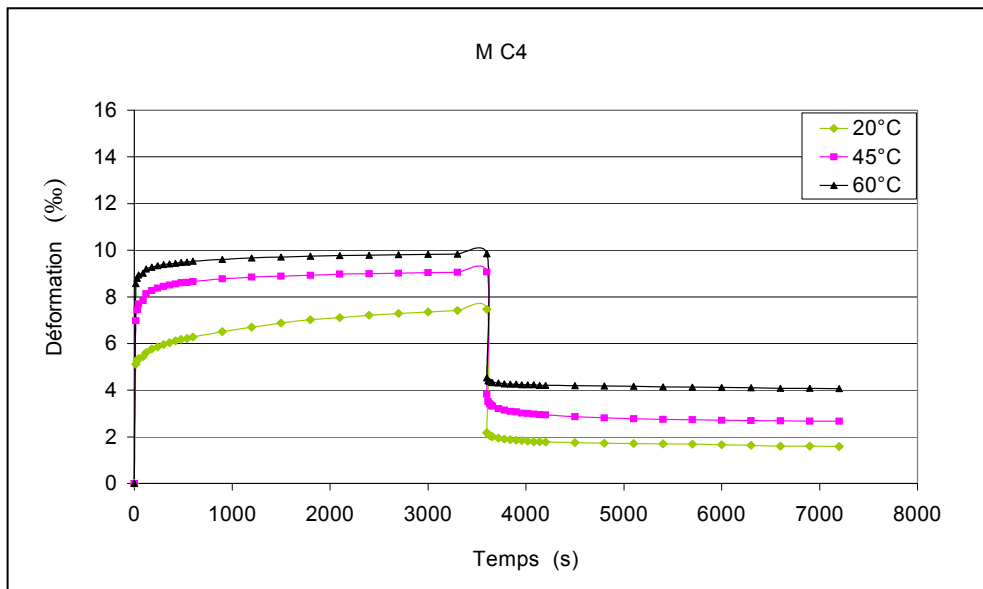


Figure X.10 : Courbes de fluage statique avec 4% chaux.

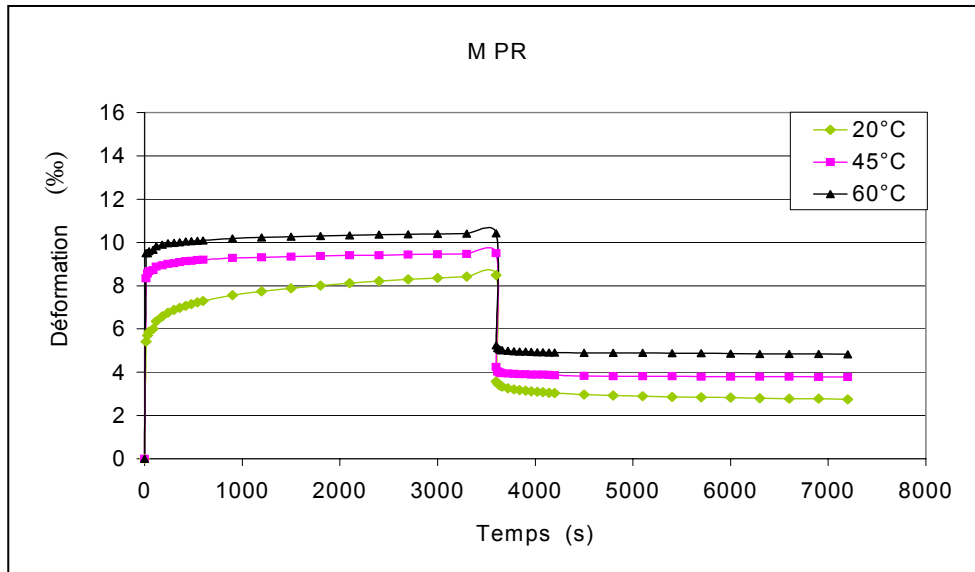


Figure X.11 : Courbes de fluage statique avec sable propre.

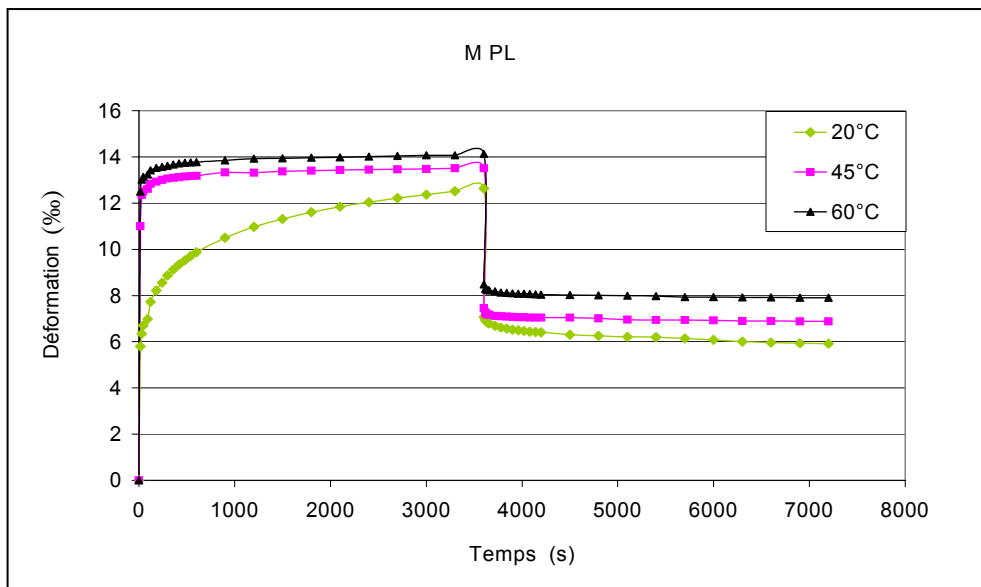


Figure X.12 : Courbes de fluage statique avec sable pollué.

Les courbes obtenues montrent que l'évolution de la déformation en fonction du temps et de la température, présentent la même allure.

On constate que pour une température de 20°C, les enrobés présentent une déformation initiale faible mais qui évolue beaucoup dans le temps alors que pour les températures de 45°C et 60°C, on a des déformations initiales plus importantes suivie d'une évolution lente.

De ce fait, ces enrobés ont une meilleure résistance à l'orniérage sur chaussée pour des températures de 45 et 60°C.

Conclusion

Les courbes de déformations obtenues montrent que la température influe sur le fluage des enrobés bitumineux. Cette influence dépend du type de sable utilisé et du traitement envisagé (chaux ou sable propre).

X.2. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES DEFORMATIONS ET LES MODULES DE RIGIDITE.

Les courbes de fluage obtenues, nous permettent d'évaluer les déformations et les modules de rigidité en fonction de la température d'essais des mélanges hydrocarbonés. Ces paramètres ont été calculés suivants les formules précisées dans la chapitre IX.

X.2.1. Déformation initiale.

Les variations des déformations initiales enregistrées après quinze secondes de chargement pour les deux types de traitement et pour les trois températures d'essais, sont représentées aux figures X.13 et X.14.

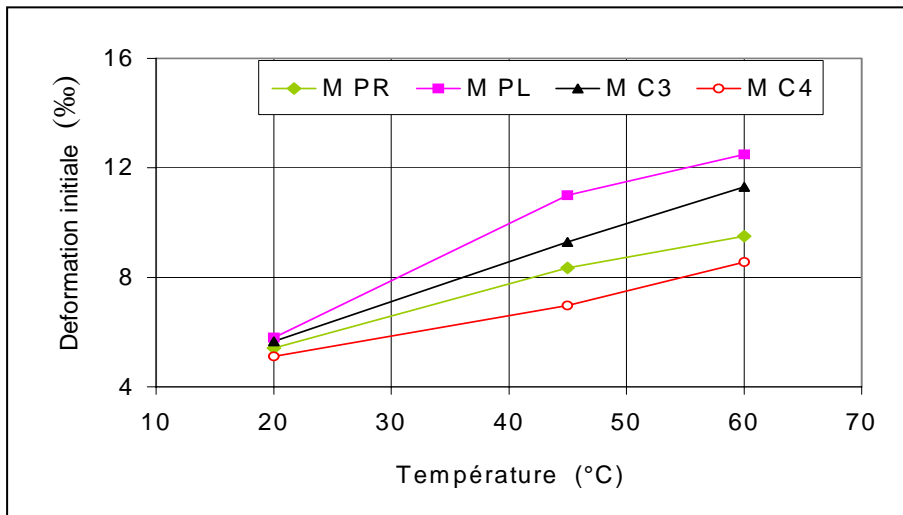


Figure X.13 : Variation de la déformation initiale avec la température.
Influence de la chaux.

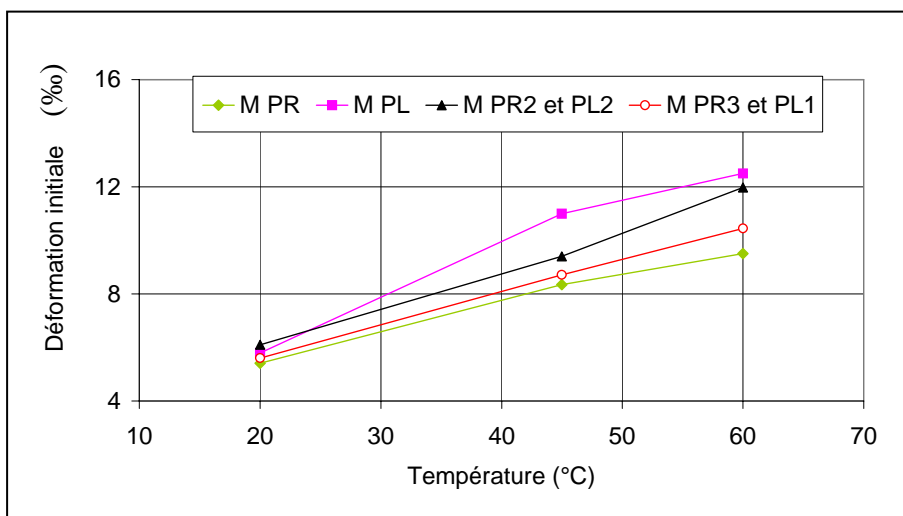


Figure X.14 :Variation de la déformation initiale avec la température
Influence du sable propre

Les figures X.13 et X.14 montrent que :

- Pour tous les mélanges bitumineux testés, la déformation initiale s'accroît avec la température d'essai.
- Les enrobés obtenus présentent une meilleure résistance au chargement de courte durée pour une température d'essai de 20°C.
- Les valeurs des déformations initiales les plus élevées, sont obtenues avec l'enrobé à base de sable pollué. De ce fait, il est le moins résistant après quinze secondes de chargement.
- Les déformations initiales des bétons bitumineux obtenues avec incorporation de 75% de sable propre (M PR3 et PL), sont proches de celles du mélange à base de sable propre.
- Avec une teneur en chaux de 4% (M C4), l'enrobé bitumineux obtenu est plus résistant au chargement de courte durée.

X.2.2. Module de rigidité initiale.

Les modules de rigidité correspondant aux déformations initiales mesurées à quinze secondes sous l'effet des trois températures d'essais et des différents traitements, sont représentés sur les figures X.15 et X.16.

Les variations des modules de rigidité initiale montrent que :

- Le module de rigidité initiale qui dépend lui aussi de la température, diminue lorsque la température d'essai augmente.
- Les variations du module de rigidité sont inversement proportionnelles à celles des déformations initiales.
- L'enrobé bitumineux à base de sable pollué, est le moins rigide, phénomène qui peut s'expliquer par la présence de fines argileuses contenues dans le sable.
- Pour toutes les températures d'essais, on constate une très faible variation entre le module de rigidité du mélange à base de sable propre et celui avec ajout de 75% de sable propre (M PR3 et PL1).
- Le module de rigidité de l'enrobés bitumineux obtenu avec une teneur en chaux de 4%, est plus grand que ceux des autres mélanges traités.

La présence de chaux dans un enrobé bitumineux joue un rôle important dans la rigidification du liant en ce sens que plus cette teneur augmente, plus la rigidité de l'enrobé est élevée.

Mais généralement, ce n'est pas la plus grande rigidité qui est recherchée mais plutôt des enrobés souples afin d'éviter le problème de fissuration.

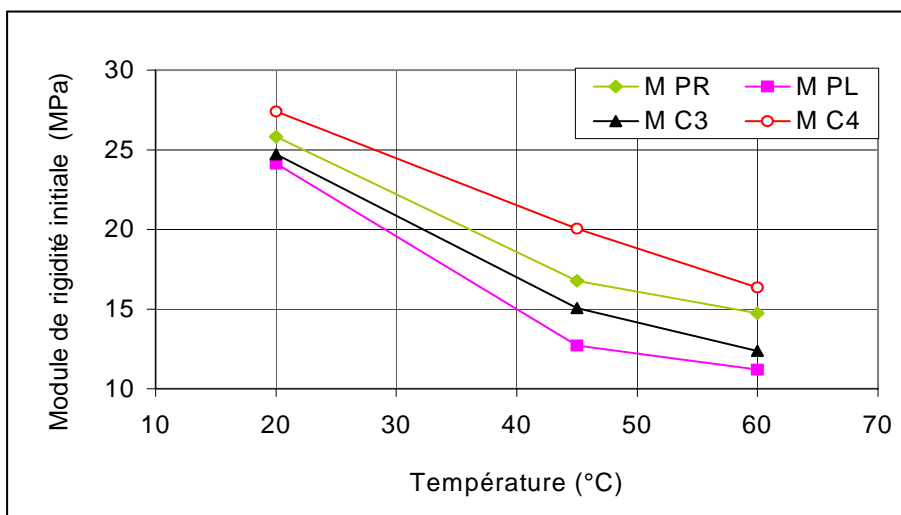


Figure X.15 : Variation du module de rigidité initiale avec la température. Influence de la chaux

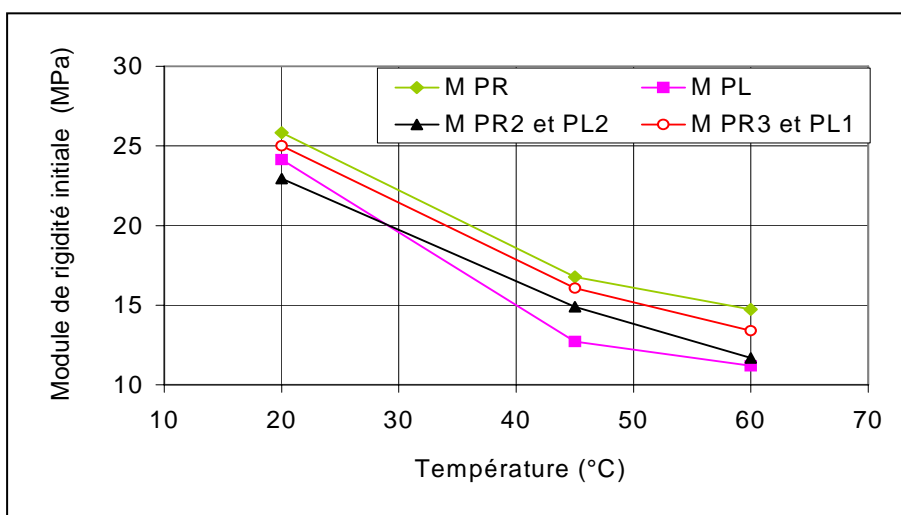


Figure X.16 : Variation du module de rigidité initiale avec la température. Influence du sable propre.

X.2.3. Déformation totale.

Les variations des déformations totales enregistrées après une heure de chargement pour les trois températures d'essais et sous l'effet des différents traitements, sont représentées sur les figures X.17 et X.18.

Les résultats de la variation de la déformation totale en fonction de la température, montrent que :

- La déformation totale après une heure de chargement, augmente avec la température d'essai et ce, pour tous les enrobés testés. Mais, elle reste très peu variable en fonction de la température.

- L'ajout de chaux dans un enrobé à base de sable pollué, réduit la déformation totale qui décroît en augmentant la teneur en chaux.
- L'incorporation de 75% de sable propre (M PR3 et PL1) dans un mélange à base de sable pollué, limite les déformations totales. Les résultats enregistrés sont proches de ceux obtenus avec le mélange à base de sable propre et la variation est moindre à une température de 60°C.
- La déformation totale la plus défavorable, est obtenue avec le mélange à base de sable pollué.
- Pour une teneur en chaux de 4% (M C4), l'enrobé bitumineux présente la déformation totale la plus favorable.

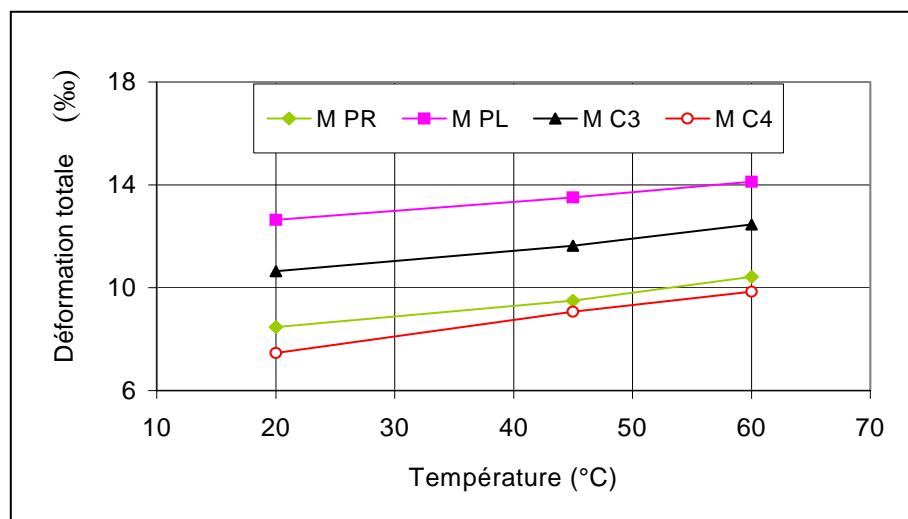


Figure X.17 : Variation de la déformation totale avec la température. Influence de la chaux

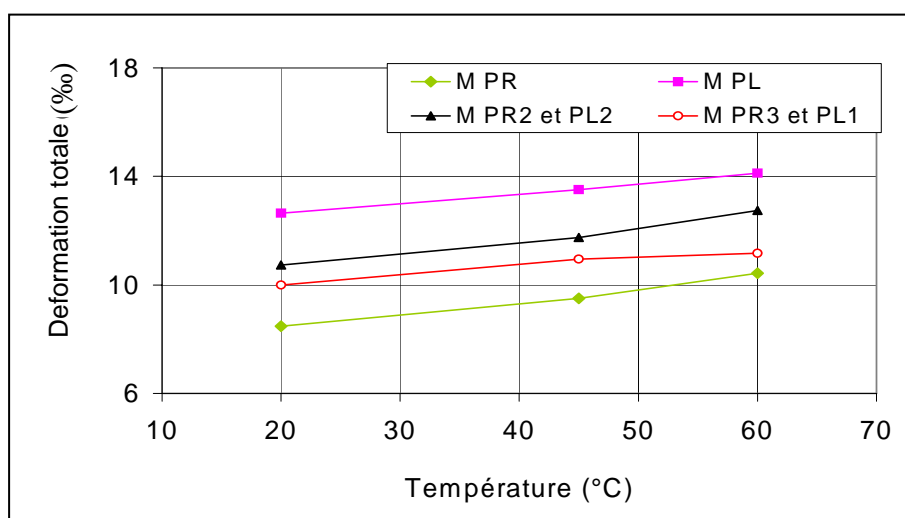


Figure X.18 : Variation de la déformation totale avec la température. Influence du sable propre

X.2.4. Module de rigidité totale

Les modules de rigidité correspondant aux déformations totales mesurées après une heure de chargement sous l'effet des trois températures d'essais et des différents traitements, sont représentés sur les figures X.19 et X.20.

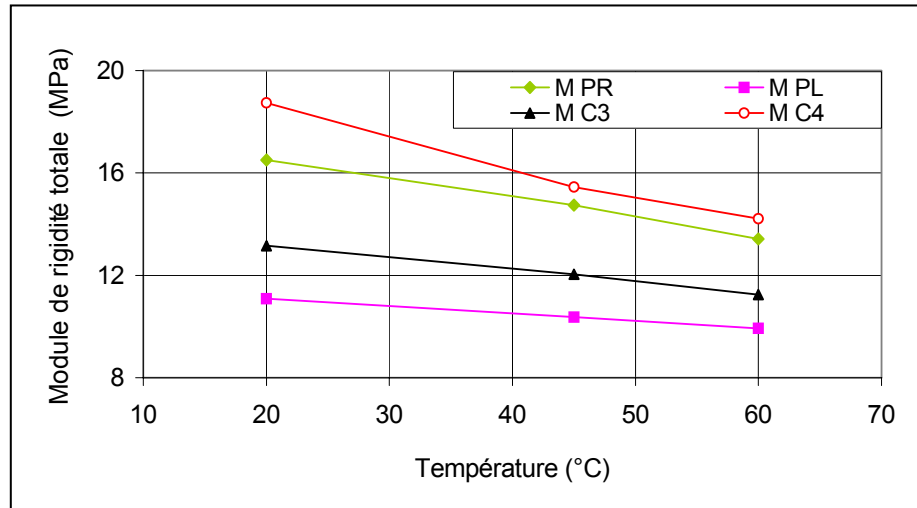


Figure X.19 : Variation du module de rigidité totale avec la température. Influence de la chaux.

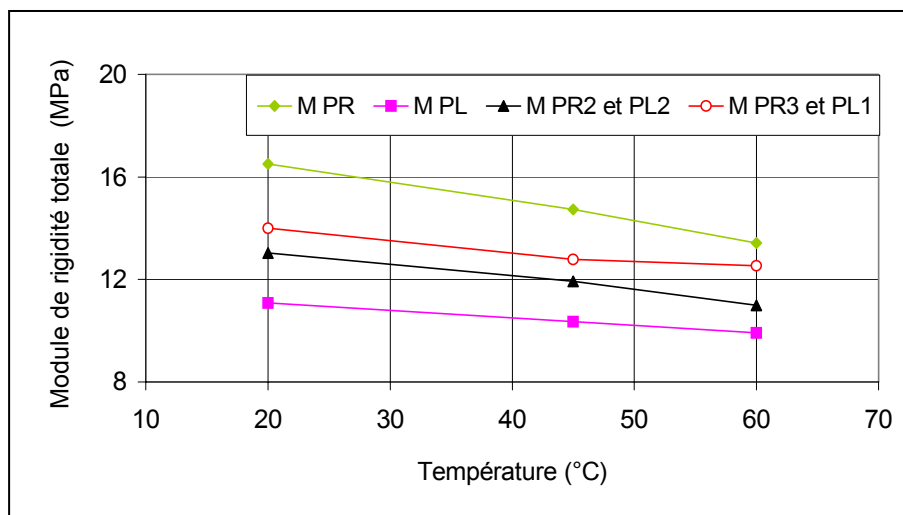


Figure X.20 : Variation du module de rigidité totale avec la température. Influence du sable propre.

Les figures X.19 et X.20 montrent que:

- Le module de rigidité totale après une heure de chargement, dépend de la température en ce sens que lorsque celle-ci augmente, le module diminue.
- Le module de rigidité totale des enrobés bitumineux testés, est inversement proportionnel à leur déformation totale en fluage statique.
- L'incorporation de la chaux dans un mélange bitumineux à base de sable pollué, améliore la rigidité de celui-ci vu que la chaux dans un enrobé joue deux rôles importants à savoir :
 - Contribue à la rigidification du bitume.
 - Neutralise les fines argileuses présentes dans un sable.
- Les modules de rigidité totale de la formulation avec 75% (M PR3 et PL1) et 50% (M PR2 et PL2) de sable propre, sont plus élevés que ceux obtenus avec un mélange à base de sable pollué. Cependant, ils restent inférieurs à celui de l'enrobé à base de sable propre. De ce fait, la teneur en fines calcaires influe donc sur la rigidité de l'enrobé .
- En augmentant la teneur en chaux et après une heure de chargement, le module de rigidité augmente et les valeurs les plus élevées sont obtenues avec un pourcentage de 4% de chaux.

X.2.5.Déformation finale

Les variations des déformations finales avec les températures d'essais et sous l'effet des différents traitements, sont représentées sur les figures X.21 et X.22.

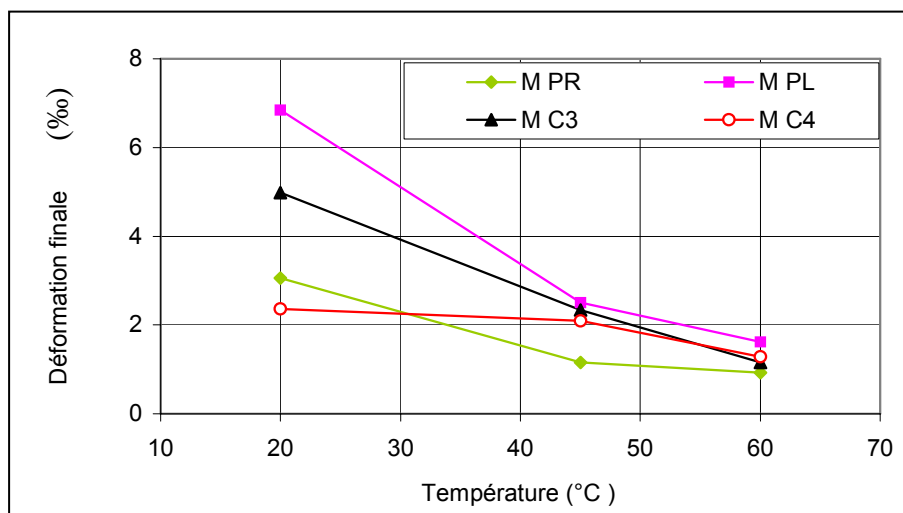


Figure X.21 : Variation de la déformation finale avec la température. Influence de la chaux.

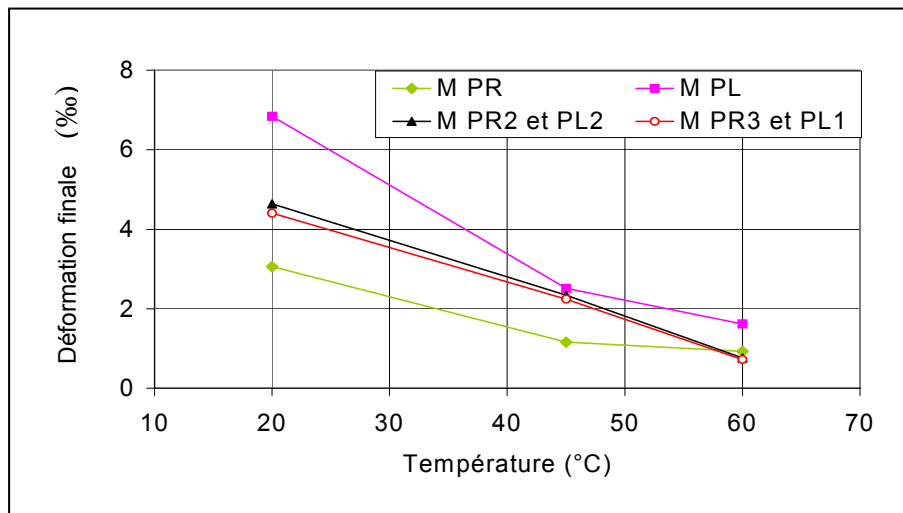


Figure X.22: Variation de la déformation finale avec la température. Influence du sable propre.

Sur les figures X.21 et X.22, nous remarquons que :

- Pour des températures d'essais croissantes, la déformation finale des enrobés bitumineux testés diminue. De ce fait, cette déformation dépend aussi de la température.
- Le mélange à base de sable pollué, est le moins résistant aux chargements de longues durées d'application.
- Pour les deux températures de 45°C et 60°C, les mélanges bitumineux avec ajout de 3 et 4% de chaux (M C3 et M C4), présentent la même résistance aux déformations de longues durées de chargement. L'enrobé bitumineux avec incorporation de 3% de chaux (M C3) et à une température de 20°C, est le moins résistant.
- Les mélanges bitumineux avec ajout de 50 et 75% de sable propre c'est à dire les formulations respectives (M PR2 et PL2) et (M PR3 et PL1), présentent les mêmes déformations finales et leurs variations par rapport à celle de l'enrobé à base de sable propre, sont très faibles surtout pour une température de 60°C.
- Pour toutes les températures d'essais, l'enrobé bitumineux avec 4% de chaux est le plus résistant aux déformations de longues durées de chargement.

X.2.6. Variation de la déformation irréversible (permanente)

Les variations des déformations irréversibles avec les températures d'essais et sous l'effet des différents traitements, sont précisées sur les figures X.23 et X.24.

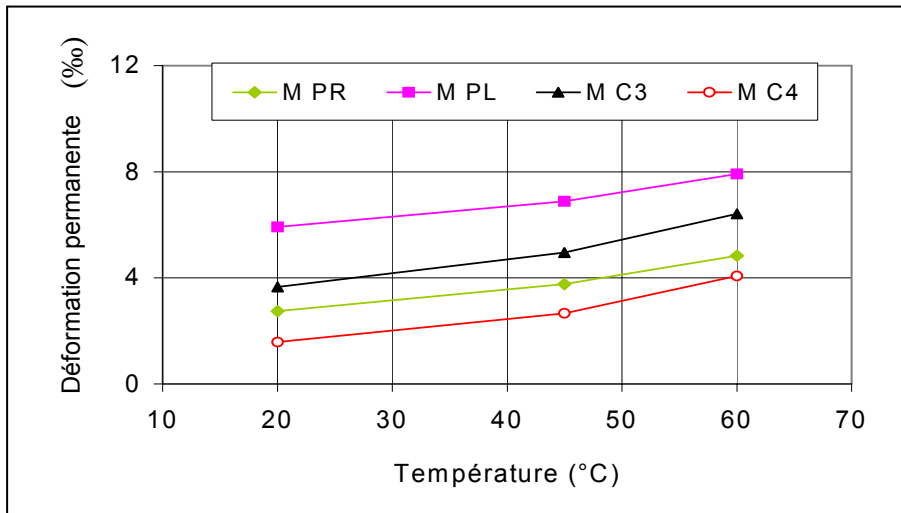


Figure X.23: Variation de la déformation permanente avec la température. Influence de la chaux.

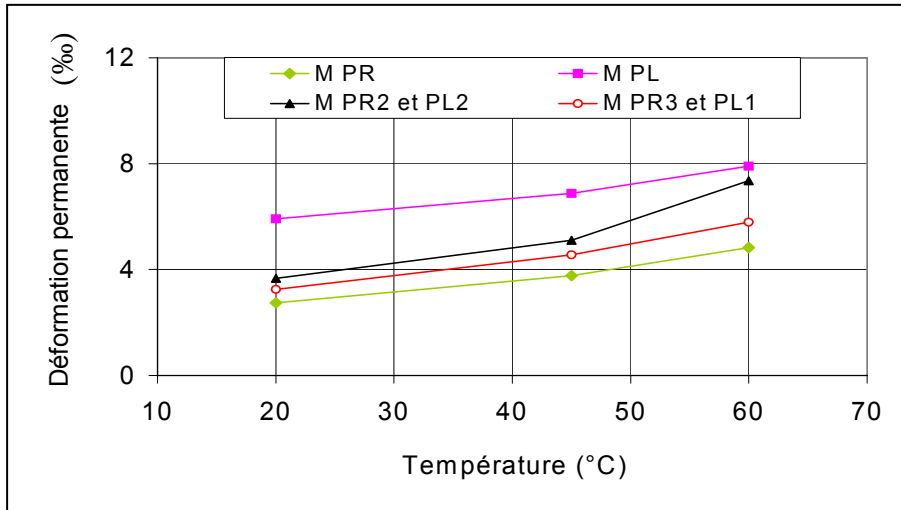


Figure X.24: Variation de la déformation permanente avec la température. Influence du sable propre.

Interprétation des résultats :

Les figures X.23 et X.24 montrent que :

- Après déchargement, les déformations permanentes pour tous les enrobés bitumineux testés, évoluent dans le même sens que la température d'essai.
- Les déformations irréversibles diminuent en passant d'un mélange à base de sable pollué à celui d'un enrobé traité et ce, quel que soit le traitement envisagé.
- L'écart entre les variations de la déformation permanente du mélange à base de sable propre et celui obtenu avec incorporation de 75% de sable propre (M PR3 et PL1), est très faible et ce, pour toutes les températures d'essais.

De ce fait, l'incorporation de fines calcaires dans un enrobé bitumineux à base de fines argileuses, réduit les déformations irréversibles de celui.

- La valeur de la déformation permanente est plus petite pour les enrobés bitumineux avec un ajout de 4% de chaux.

X.2.7. Déformation réversible

Les variations des déformations réversibles avec les températures d'essais sous l'effet des différents traitements, sont représentées aux figures X.25 et X.26.

Interprétation des résultats :

Les résultats indiqués dans les figures X.25 et X.26, montrent que :

- Pour toutes les températures d'essais, la déformation réversible ne varie presque pas pour le mélange bitumineux à base de sable propre.
- En augmentant les températures d'essais et avec incorporation de sable propre (M PR2 et PL2) et (M PR3 et PL1), la déformation réversible des enrobés bitumineux diminue.
- A 60°C, la déformation réversible du mélange obtenu avec ajout de 75% de sable propre (M PR3 et PL1), est identique à celle du matériau à base de sable propre. Cette variation est plus importante lorsque la température d'essai diminue.
- A des températures de 20°C et 60°C, les valeurs de la déformation réversible du mélange bitumineux avec ajout de 4% de chaux, sont identiques à celles de l'enrobé bitumineux à base de sable propre et un écart est constaté à 45°C.
- Pour le mélange bitumineux avec une teneur de 4% de chaux, la variation de la déformation réversible avec la température, présente en premier lieu, une augmentation qui varie entre 20°C et 45°C suivie d'une diminution à une température de 60°C.
- Les plus petites déformations réversibles sont obtenues sur le mélange bitumineux avec une teneur de 4% de chaux.

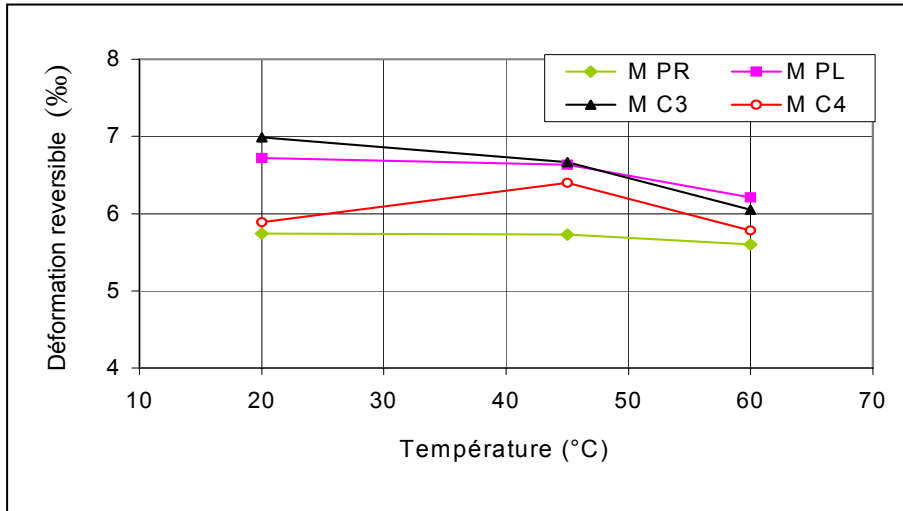


Figure X.25 : Variation de la déformation réversible avec la température. Influence de la chaux.

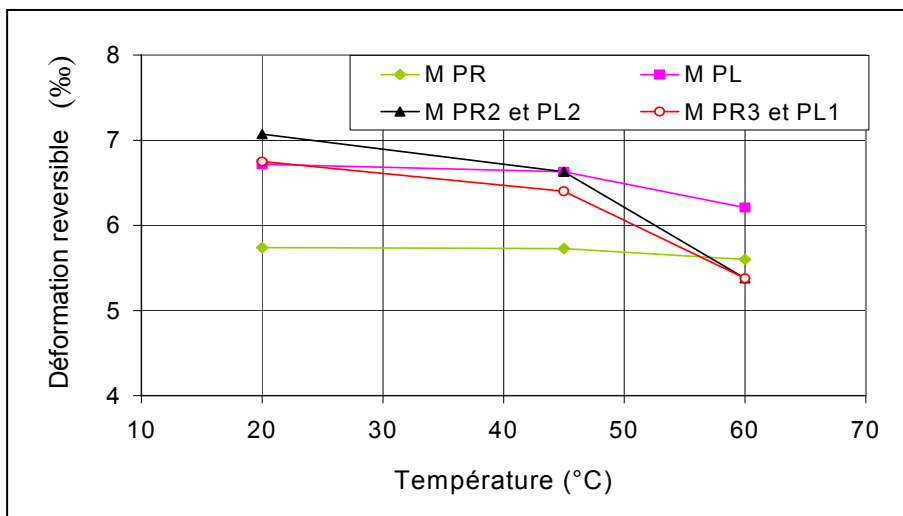


Figure X.26 : Variation de la déformation réversible avec la température. Influence du sable propre.

X.2.8. Variation du recouvrement viscoélastique (RVE)

On rappelle que le recouvrement viscoélastique est défini par le quotient de la déformation réversible après une heure de déchargement et la déformation totale après une heure de chargement.

Avec les températures d'essais et sous l'effet des différents traitements, les variations de ce paramètre sont représentées sur les figures X.27 et X.28.

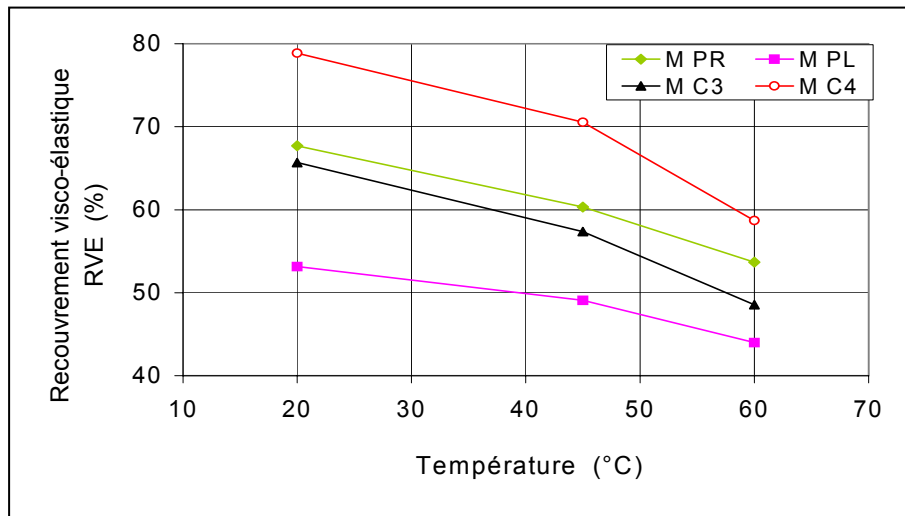


Figure X.27 : Variation du RVE avec la température. Influence de la chaux

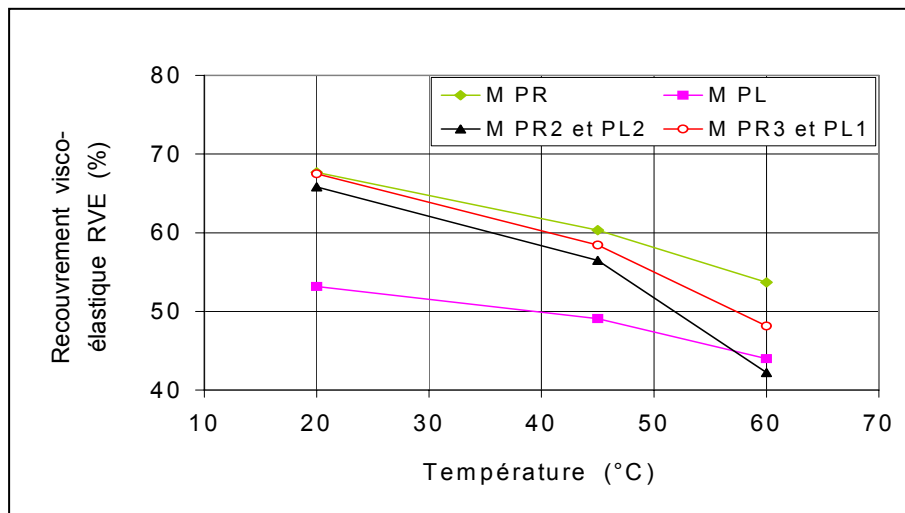


Figure X.28 : Variation du RVE avec la température. Influence du sable propre.

Interprétation des résultats :

Les résultats mentionnés sur les figures X.27 et X.28, montrent que :

- Pour tous les mélanges bitumineux testés, les valeurs du recouvrement viscoélastique diminuent lorsque la température d'essai augmente. Ce qui implique l'augmentation de la déformation permanente avec la température.
- Les valeurs du recouvrement viscoélastique de l'enrobé à base de sable pollué, sont les plus faibles.
- Les mélanges bitumineux avec ajout de sable propre, présentent un recouvrement viscoélastique identique à celui du mélange à base de sable propre avec une faible variation à une température de 60°C.
- Les valeurs du recouvrement viscoélastique les plus importantes, sont obtenues pour une température d'essai de 20°C.
- Le mélange bitumineux avec une teneur de 4% chaux donne les plus grandes valeurs du recouvrement viscoélastique.

X.2.9. Variation de la déformation initiale et de la déformation finale comme pourcentage de la déformation totale

Les variations de la déformation initiale et de la déformation finale comme pourcentage de la déformation totale sous l'effet des différents traitement et des températures d'essais, sont données aux tableaux X.1 et X.2.

Les variations des déformations initiale et finale comme pourcentage de la déformation totale, permet de prévoir la susceptibilité des mélanges bitumineux testés au chargement de longue durée.

Interprétation des résultats :

Les tableaux X.1 et X.2 mentionnent que :

- Pour tous les enrobés bitumineux testés, les 50% de la déformation ont lieu principalement dans la phase initiale c'est à dire dans les quinze premières secondes pour une température d'essai de 20°C.
- Pour les températures de 45°C et 60°C, la déformation initiale dépasse les 75% de la déformation totale et ce, pour tous les mélanges testés.
De ce fait, en augmentant la température d'essai, les enrobés se déforment presque totalement en un temps de chargement très court.
- Les mélanges bitumineux avec ajout de sable propre et de chaux, se déforment presque totalement en un temps très court, présentant ainsi une meilleure résistance à l'orniérage sur chaussées aux températures d'essais de 45°C et 60°C
- Pour les mélanges bitumineux traités avec du sable propre, les plus faibles variations sont obtenues avec incorporation de 75% de sable propre (M PR3 et PL1).
- Concernant les enrobés bitumineux avec ajout de chaux, les plus faibles variations sont données avec une teneur de 4% de chaux (M C4).

Tableau X.1 : Variation de la déformation initiale et finale comme pourcentage de la déformation totale . Influence de la chaux.

Températures	20°C		45°C		60°C	
Déformations (%)	$\epsilon_{\text{initial}}$	ϵ_{final}	$\epsilon_{\text{initial}}$	ϵ_{final}	$\epsilon_{\text{initial}}$	ϵ_{final}
M PR	63,92	36,08	87,79	12,21	91,08	8,91
M PL	45,89	54,11	81,42	18,58	88,53	11,47
M C3	53,2	46,80	79,88	20,12	90,77	9,23
M C4	68,41	31,59	76,97	23,04	86,91	13,09

Tableau X.2 : Variation de la déformation initiale et finale comme pourcentage de la déformation totale .Influence du sable propre.

Températures	20°C		45°C		60°C	
Déformations(%)	$\epsilon_{\text{initial}}$	ϵ_{final}	$\epsilon_{\text{initial}}$	ϵ_{final}	$\epsilon_{\text{initial}}$	ϵ_{final}
M PR	63,92	36,08	87,79	12,21	91,08	8,91
M PL	45,89	54,11	81,42	18,58	88,53	11,47
M PR2 et PL2	56,79	43,21	80,06	19,94	94,03	5,97
M PR3 et PL1	56	44	79,54	20,46	93,55	6,45

X.3. CONCLUSION

Les résultats obtenus suite aux essais de fluage statique en compression simple, nous ont permis d'évaluer les caractéristiques rhéologiques des enrobés testés à savoir :

- Les déformations et le module de rigidité initiale.
- Les déformations et le module de rigidité totale.
- Les déformations permanentes.
- Le recouvrement viscoélastique.
- La variation de la déformation initiale et finale comme pourcentage de la déformation totale.

Une approche globale sur la comparaison des caractéristiques obtenues entre les différents mélanges bitumineux traités à la chaux ou avec du sable propre, nous a permis de parvenir aux résultats ci-dessous :

- Les traitements incorporés aux mélanges bitumineux à base de sable pollué, améliorent les caractéristiques de ces enrobés en fluage statique.
- Les déformations initiales, totales et permanentes des enrobés bitumineux traités, sont plus favorables avec une teneur de 4% de chaux qu'avec un ajout de 75% de sable propre et évoluent avec la température d'essai.
- L'enrobé bitumineux avec ajout de 4% de chaux, est le plus résistant aux déformations de longue durée de chargement et ce, pour toutes les températures d'essais. Ces résultats sont en concordance avec ceux trouvés par les autres chercheurs [116].
- Le module de rigidité initiale des mélanges étudiés, est plus élevé que celui calculé après une heure de chargement. De ce fait, la rigidité de l'enrobé bitumineux diminue avec le temps et avec la température d'essai.
- Les mélanges bitumineux avec ajout de chaux ou de sable propre testés à des températures de 45 et 60°C, se déforment presque totalement en un temps très court. A 20°C, les 50% de la déformation ont lieu dans la phase initiale. Donc ces enrobés présentent une meilleure résistance à l'orniérage sur chaussée à 45 et 60°C.

Le traitement incorporé aux matériaux bitumineux à base de sable pollué, présente un avantage certain en ce sens qu'il améliore le comportement de ces mélanges bitumineux en fluage statique.

Il nous paraît souhaitable de nous orienter vers la formule contenant 4% de chaux que vers celle obtenue avec un ajout de 75% de sable propre vu qu'elle assure un meilleur comportement.

CONCLUSION GENERALE

De nos jours, l'importance du trafic routier nécessite une amélioration permanente de la qualité et de la résistance des chaussées. Lesquelles dépendent beaucoup des matériaux utilisés lors de la formulation des enrobés bitumineux.

La pauvreté de certaines régions en granulats routiers de qualité, nous a conduit à étudier la possibilité d'utiliser des matériaux locaux tel que le sable pollué, afin de réduire l'incidence non négligeable sur le coût de transport.

Le problème de formulation des sables traités employés dans les bétons bitumineux est complexe. Il faut trouver un compromis entre plusieurs paramètres (stabilité, résistance en compression simple et le fluage statique) et ce, afin de se rapprocher le plus possible du comportement réel de ces mélanges.

Vu la complexité des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux, nous n'avons pas pu étudier l'influence des différents paramètres qui régissent ces propriétés. Cette étude aurait nécessité un travail considérablement plus étendu et des moyens dont ne disposent pas les Laboratoires Algériens.

Toutefois, nous avons réussi à mettre en évidence l'importance de certains facteurs dont l'influence semble prépondérante sur les sollicitations que les enrobés bitumineux sont appelés à subir, A savoir l'influence de la pollution des sables ainsi que l'effet de leurs traitements sur les performances mécaniques et rhéologiques.

Les résultats auxquels nous avons aboutis vont d'une part, contribuer certainement au développement des matériaux traités aux liants hydrocarbonnés et

d'autre part, aider les ingénieurs du domaine à élaborer des formulations plus performantes .

Ces résultats montrent que :

- La présence de fines argileuses dans un sable, nuit :
 - A la formulation : diminution de la stabilité, de la compacité et augmentation du fluage.
 - Au comportement mécanique : résistance à la compression à sec et en immersion insuffisante et un gonflement volumétrique important.
 - Accentue les déformations permanentes des enrobés bitumineux.
 - Diminue la rigidité de l'enrobé pour de courte et longue durée de chargement

- La nature minéralogiques des fines contenues dans un sable influe sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques de l'enrobé bitumineux.
A base de sable propre (fines calcaires), l'enrobé présente comparativement au mélange à base de sable pollué (fines argileuses), une formulation et une performance meilleure.

- L'association de la chaux ou du sable propre à un sable pollué, améliore les caractéristiques géotechniques (augmentation de l'équivalent de sable et diminution de la valeur au bleu de méthylène).

- Le type de traitement présente certes un effet sur le comportement de l'enrobé.
Les matériaux traités à la chaux (3% et plus) présentent comparativement à ceux des mélanges traités avec du sable propre (75%) de meilleure stabilité, de compacité et de faible fluage.

- Le sable pollué traité (chaux - sable propre) associé à un mélange bitumineux, présente des résultats acceptables pour les caractéristiques mécaniques (augmentation des résistances à sec, en immersion et diminution du gonflement volumétrique) .

- Le traitement du sable pollué influe positivement sur les caractéristiques rhéologiques des enrobés. Ainsi, les déformations initiales, totales et permanentes des enrobés traités, sont plus favorables avec une teneur de 4% de chaux qu'un ajout de 75% de sable propre.
Ces déformations évoluent avec la température de l'essai. Les résultats trouvés sont en concordances avec [64],[116].
- A des températures de 45°C et 60°C, les mélanges bitumineux traités à la chaux ou avec du sable propre, se déforment presque totalement en un temps très court de chargement.
Ces enrobés présentent une meilleure résistance à l'orniérage.
- La rigidité de l'enrobé bitumineux diminue d'une part avec des températures d'essais élevées et d'autre part, avec de longue durée de chargement.
- Les modules de rigidité (initiale et finale) des enrobés traités avec 4% de chaux sont plus importants que ceux obtenus sur les mélanges avec ajout de 75% de sable propre.

Les résultats auxquels nous sommes parvenus qui ne sont pour le moment qu'a leur début peuvent servir comme base de départ pour une continuité de ce travail.

Comme extension de cette étude, il est possible d'envisager l'étendue des paramètres suivants :

- Nature minéralogique des granulats (basalte).
- Consistance du bitume.
- Energie de compactage.
- Les traitements au sable gypseux et au laitier.
- Nature de fines argileuses (montmorillonite, illite).

Il conviendra aussi de s'orienter sur les problèmes de fatigue et de détermination du module complexe des enrobés bitumineux pour l'application des méthodes rationnelles de dimensionnement des chaussées.

Dans le cadre d'une éventuelle réhabilitation de la technique de traitement de sable pollué dans les mélanges bitumineux en couche de roulement, nous recommandons de réaliser des planches expérimentales pour mieux étudier leurs comportements in situ .

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I	: LES FACTEURS INFLUANCANT LA PROPRETE DES GRANULATS	4
Figure	I.1 : Traitement des matériaux pollués.	7
Figure	I.2 : Paramètres influençant la qualité des granulats.	8
CHAPITRE II	: TRAITEMENT DES SABLES AUX LIANTS HYDRAULIQUES	13
Figure	II.1 : Effet de la chaux sur les nodules des matériaux.	15
Figure	II.2 : Résistance à la compression simple en fonction du dosage en chaux $I_p=13$.	17
Figure	II.3 : Résistance à la compression simple en fonction du dosage en chaux $I_p=26$.	17
Figure	II.4 : Comportement en déformation des sables améliorés.	19
Figure	II.5 : Comportement en fissuration des sables stabilisés.	20
CHAPITRE III	: ETUDE EN LABORATOIRE DE LA RESISTANCE AU FLUAGE DES ENROBES BITUMINEUX	22
Figure	III.1 : Formes caractéristiques des ondes de contraintes.	23
Figure	III.2 : Distribution des contraintes.	23
Figure	III.3 : Schéma de principe de l'essai de fluage dynamique.	24
Figure	III.4 : Courbes de fluage de deux éprouvettes de même formulation mais fabriquées différemment.	24
Figure	III.5 : Courbes de fluage de deux éprouvettes de même formulation mais obtenues différemment	24
Figure	III.6 : La courbe de fluage.	25
Figure	III.7 : Mode de chargement en fonction du temps.	26
Figure	III.8 : Déformation en fonction du temps.	26
Figure	III.9 : Courbes de déformation en fonction du nombre de cycles n.	27
Figure	III.10 : Principe du compactage à la presse à cisaillement.	29
Figure	III.11 : Courbe de compacité PCG en fonction du nombre de girations.	29
Figure	III.12 : Interprétation sur le plan (K_1, C_1) .	30
Figure	III.13 : Fluage Marshall (FM) des éprouvettes « M », « L » et « G »	31
Figure	III.14 : Le fluage total à 60 minutes des éprouvettes « M », « L » et « G »	32
Figure	III.15 : Coefficient de régression entre l'essai de fluage statique et l'essai d'orniérage.	33
CHAPITRE IV	: ETAT ACTUEL DE LA RECHERCHE	34
Figure	IV.1 : Intérêt d'associer VB et ES	37
Figure	IV.2 : Diagramme de principe Adsorption sur trois argiles types	37
Figure	IV.3 : Influence de l'ajout de fines sur la valeur de l'ES à 10% de fines	40
Figure	IV.4 : Influence de l'ajout de fines sur la valeur de bleu de méthylène	40
Figure	IV.5 : Evolution des résistances à la compression simple	41
Figure	IV.6 : Droites de nocivité des différentes argiles	42
Figure	IV.7 : Evolution du rapport r/R en fonction de la nature minéralogique	44
Figure	IV.8 : Comparaison des spécifications ES et r/R	45
Figure	IV.9 : Comparaison des spécifications VB et r/R	45
Figure	IV.10 : Variation de la stabilité en fonction de la compacité	47
Figure	IV.11 : Variation du fluage en fonction de la compacité	47
Figure	IV.12 : Allure de la sollicitation	48
Figure	IV.13 : Variation de la déformation axiale en fonction du temps	48
Figure	IV.14 : Variation de la contrainte en fonction du temps	48
Figure	IV.15 : principe d'adsorption du bitume par les minéraux argileux	49

Figure	IV.16	: Variation de la déformation permanente en fonction de la classe du bitume et de la température de l'essai	54 54
Figure	IV.17	: Variation de la déformation permanente en fonction de la teneur en liant et de la classe du bitume à 45°C	54
Figure	IV.18	: Variation de la déformation permanente en fonction de l'énergie de compactage à 60°C	55
Figure	IV.19	: Variation de la déformation totale avec la température	56
Figure	IV.20	: Variation de la déformation permanente avec la température	56
Figure	IV.21	: Variation de la déformation permanente en fonction de la température	57
Figure	IV.22	: Variation de la déformation totale en fonction de la température	57
CHAPITRE V : PRESENTATION DES MATERIAUX			58
Figure	V.1	: Courbe granulométrique des granulats	59
Figure	V.2	: Susceptibilité thermique du bitume	68
CHAPITRE VI : FORMULATION DE L'ENROBE BITUMINEUX			70
Figure	VI.1	: Courbe granulométrique du mélange avec sable propre	71
Figure	VI.2	: Compactage Marshall	73
Figure	VI.3	: Principe de mesure de stabilité et de fluage	73
Figure	VI.4	: Variation de la stabilité en fonction de la teneur en bitume	74
Figure	VI.5	: Variation de la compacité en fonction de la teneur en bitume	74
Figure	VI.6	: Variation du fluage en fonction de la teneur en bitume	75
Figure	VI.7	: Variation du pourcentage de vides occupés par le bitume en fonction de la teneur en bitume	75
Figure	VI.8	: Variation du pourcentage des vides résiduels avec la teneur en bitume	75
Figure	VI.9	: Compactage Duriez	76
Figure	VI.10	: Principe d'écrasement Duriez	76
Figure	VI.11	: Variation de la compacité en fonction de la teneur en bitume	77
Figure	VI.12	: Variation de la résistance à sec en fonction de la teneur en bitume	78
Figure	VI.13	: Variation de la résistance en immersion en fonction de la teneur en bitume	78
Figure	VI.14	: Variation du rapport immersion-compression en fonction de la teneur en bitume	79
CHAPITRE VII : EFFET DES FINES ARGILEUSES SUR LES CARACTERISTIQUES MECANQUES DE L'ENROBE BITUMINEUX			80
Figure	VII.1	: Courbe granulométrique du mélange avec sable pollué.	83
Figure.	VII.2	: Défaut d'enrobage.	85
Figure	VII.3	: Variation du gonflement volumétrique pendant les sept jours en immersion.	86
Figure	VII.4	: Variation du pourcentage d'imbibition pendant les sept jours en immersion.	86
CHAPITRE VIII : EFFET DU TRAITEMENT DES SABLES POLLUES SUR LES PERFORMANCES MECANQUES DE L'ENROBE BITUMINEUX			88
Figure	VIII.1	: Variation de l'équivalent de sable en fonction de la teneur en chaux.	89
Figure	VIII.2	: Variation de la valeur au bleu en fonction de la teneur en chaux.	90
Figure	VIII.3	: Variation de l'indice de plasticité en fonction de la teneur en chaux .	90
Figure	VIII.4	: Variation de l'équivalent de sable en fonction de la teneur en sable propre.	91
Figure	VIII.5	: Variation de la valeur au bleu en fonction de la teneur en sable propre.	92

Figure	VIII.6 : Variation de l'indice de plasticité en fonction de la teneur en sable propre.	92
Figure	VIII.7 : Courbe granulométrique du mélange. Influence de la chaux.	94
Figure	VIII.8 : Courbe granulométrique du mélange. Influence du sable propre.	94
Figure	VIII.9 : Variation de la stabilité en fonction de la teneur en chaux.	97
Figure	VIII.10 : Variation du fluage en fonction de la teneur en chaux.	97
Figure	VIII.11 : Variation de la compacité en fonction de la teneur en chaux.	98
Figure	VIII.12 : Variation de la stabilité en fonction de la déformation. Influence de la chaux.	98
Figure	VIII.13 : Variation de la stabilité en fonction de la teneur en sable propre.	99
Figure	VIII.14 : Variation de la compacité en fonction de la teneur en sable propre.	100
Figure	VIII.15 : Variation du fluage en fonction de la teneur en sable propre.	100
Figure	VIII.16 : Variation de la stabilité en fonction de la déformation. Influence du sable propre.	101
Figure	VIII.17 : Variation de la résistance à sec en fonction de la teneur en chaux.	102
Figure	VIII.18 : Variation de la résistance à sec en fonction de la teneur en sable propre.	103
Figure	VIII.19 : Variation de la résistance en immersion en fonction de la teneur en chaux.	103
Figure	VIII.20 : Variation de la résistance en immersion en fonction de la teneur en sable propre.	104
Figure	VIII.21 : Variation du rapport immersion-compression en fonction de la teneur en chaux.	105
Figure	VIII.22 : Variation du rapport immersion-compression en fonction de la teneur en sable propre.	105
Figure	VIII.23 : Taux de gonflement volumétrique au cours du temps à différentes teneurs en chaux .	106
Figure	VIII.24 : Taux de gonflement volumétrique au cours du temps à différentes teneurs en sable propre .	106
Figure	VIII.25 : Le phénomène d'hydratation des particules d'argiles avec deux types de cations « compensateurs ».	107
Figure	VIII.26 : Variation du pourcentage des vides résiduels en fonction de la teneur en chaux.	108
Figure	VIII.27 : Variation du pourcentage des vides résiduels en fonction de la teneur en sable propre.	108
Figure	VIII.28 : Variation du rapport r/R en fonction de l'équivalent de sable. Influence de la chaux .	109
Figure	VIII.29 : Variation du rapport r/R en fonction de l'équivalent de sable. Influence du sable propre.	109
Figure	VIII.30 : Variation du rapport r/R en fonction de la valeur au bleu. Influence de la chaux.	110
Figure	VIII.31 : Variation du rapport r/R en fonction de la valeur au bleu. Influence du sable propre.	111
CHAPITRE IX : ESSAI DE FLUAGE EN COMPRESSION SIMPLE		113
Figure	IX.1 : Principe de l'essai de fluage en compression simple	113
Figure	IX.2 : Vue de l'appareillage de l'essai de fluage statique uniaxial	114
Figure	IX.3 : Oedomètre de Wykeham Farrance à l'intérieur d'un aéromètre.	114
Figure	IX.4 : Appareillage mis au point au laboratoire pour des essais de fluage en compression simple.	115
Figure	IX.5 : Vue de l'appareil de fluage.	115
Figure	IX.6 : Courbe de fluage statique en compression simple	118

CHAPITRE X	: EFFET DES TRAITEMENTS SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS BITUMINEUX EN FLUAGE STATIQUE	119
Figure	X.1 : Courbes de fluage statique à 20°C. Influence de la chaux.	120
Figure	X.2 : Courbes de fluage statique à 45°C. Influence de la chaux.	120
Figure	X.3 : Courbes de fluage statique à 60°C. Influence de la chaux.	121
Figure	X.4 : Courbes de fluage statique à 20°C. Influence du sable propre	121
Figure	X.5 : Courbes de fluage statique à 45°C. Influence du sable propre	122
Figure	X.6 : Courbes de fluage statique à 60°C. Influence du sable propre	122
Figure	X.7 : Courbes de fluage statique avec le mélange : M PR2 et PL2.	123
Figure	X.8 : Courbes de fluage statique avec le mélange : M PR3 et PL1	123
Figure	X.9 : Courbes de fluage statique avec 3% chaux.	124
Figure	X.10 : Courbes de fluage statique avec 4% chaux.	124
Figure	X.11 : Courbes de fluage statique avec sable propre	125
Figure	X.12 : Courbes de fluage statique avec sable pollué.	125
Figure	X.13 : Variation de la déformation initiale avec la température. Influence de la chaux.	126
Figure	X.14 : Variation de la déformation initiale avec la température. Influence du sable propre	126
Figure	X.15 : Variation du module de rigidité initiale avec la température. Influence de la chaux	128
Figure	X.16 : Variation du module de rigidité initiale avec la température. Influence du sable propre.	128
Figure	X.17 : Variation de la déformation totale avec la température. Influence de la chaux	129
Figure	X.18 : Variation de la déformation totale avec la température. Influence du sable propre	129
Figure	X.19 : Variation du module de rigidité totale avec la température. Influence de la chaux .	130
Figure	X.20 : Variation du module de rigidité totale avec la température. Influence du sable propre.	130
Figure	X.21 : Variation de la déformation finale avec la température. Influence de la chaux.	131
Figure	X.22 : Variation de la déformation finale avec la température. Influence du sable propre.	132
Figure	X.23 : Variation de la déformation permanente avec la température. Influence de la chaux.	133
Figure	X.24 : Variation de la déformation permanente avec la température. Influence du sable propre.	133
Figure	X.25 : Variation de la déformation réversible avec la température. Influence de la chaux.	135
Figure	X.26 : Variation de la déformation réversible avec la température. Influence du sable propre.	135
Figure	X.27 : Variation du RVE avec la température. Influence de la chaux	136
Figure	X.28 : Variation du RVE avec la température. Influence du sable propre.	136

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II	: TRAITEMENT DES SABLES AUX LIANTS HYDRAULIQUES	13
Tableau	II.1 : Les spécifications des sables utilisables pour un traitement par un liant Hydraulique	15
CHAPITRE IV	: ETAT ACTUEL DE LA RECHERCHE	34
Tableau	IV.1 : Les valeurs de VB_T pour les différentes argiles	38
Tableau	IV.2 : Valeurs des rapports immersion-compression à 28 jours	40
Tableau	IV.3 : Caractéristiques mécaniques du béton bitumineux	43
Tableau	IV.4 : Les pourcentages des matériaux	46
Tableau	IV.5 : Les valeurs des surfaces accessibles au bitume	49
Tableau	IV.6 : Résistance à la compression des enrobés bitumineux pollués	50
Tableau	IV.7 : Résistance à la compression des enrobés bitumineux dont les fines argileuses sont traitées	51
CHAPITRE V	: PRESENTATION DES MATERIAUX	58
Tableau	V.1 : Analyse granulométrique	59
Tableau	V.2 : Résistance à l'usure et au choc	60
Tableau	V.3 : Coefficient d'aplatissement	60
Tableau	V.4 : Densité des granulats	61
Tableau	V.5 : Analyse chimique sommaire du sable de Keddara	61
Tableau	V.6 : Propreté superficielle des gravillons	62
Tableau	V.7 : Indice de plasticité	62
Tableau	V.8 : Equivalent de sable à 10% de fines	63
Tableau	V.9 : Valeur au bleu de méthylène	63
Tableau	V.10 : Analyse par diffraction RX de l'argile	64
Tableau	V.11 : Analyse par diffraction RX de la chaux	65
Tableau	V.12 : Analyse chimique sommaire de la chaux	66
Tableau	V.13 : Résultats des essais d'identification du bitume	69
CHAPITRE VI	: FORMULATION DE L'ENROBE BITUMINEUX	70
Tableau	VI.1 : Les teneurs en liant retenues	72
CHAPITRE VII	: EFFET DES FINES ARGILEUSES SUR LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DE L'ENROBE BITUMINEUX	80
Tableau	VII.1 : Effet des fines calcaires et argileuses sur les caractéristiques géotechniques	80
Tableau	VII.2 : Résultats de l'essai Marshall (sable propre- sable pollué)	82
Tableau	VII.3 : Résultats de l'essai Duriez pour les deux types d'enrobés	84
CHAPITRE VIII	: EFFET DU TRAITEMENT DES SABLES POLLUES SUR LES PERFORMANCES MECANIQUES DE L'ENROBE BITUMINEUX	88
Tableau	VIII.1 : Les teneurs en liant avec ajout de chaux	95
Tableau	VIII.2 : Les teneurs en liant avec incorporation du sable propre	95
CHAPITRE X	: EFFET DES TRAITEMENTS SUR LE COMPORTEMENT DES BETONS BITUMINEUX EN FLUAGE STATIQUE	119
Tableau	X.1 : Variation de la déformation initiale et finale comme pourcentage de la déformation totale : Influence de la chaux	138
Tableau	X.2 : Variation de la déformation initiale et finale comme pourcentage de la déformation totale : Influence du sable propre	138

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ARCHIMBAUD, C; BERTHAIL, J; MISHHELLANY, A: Lavage des granulats et traitement des sables. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées .1990, pp 372-410
- [2] ARCHIMBAUD, C; MARTIN-GUILLOU, Y: Influence des caractéristiques des gisements sur la conception des installations. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N°spécial IV juin 1977, pp201-210.
- [3] ARDOUIN, G: La propreté des sables fillerisés. Revue générale des routes et aérodromes. N°592 décembre 1982, pp 27-30.
- [4] ARQUIE, G; CAMUS, A; CHARREAU, M: Le marché des granulats en France. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées .1990, pp 5-35.
- [5] ARQUIE, G; DUPONT, P; FAVREAU, R: Politique des granulats. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées .1990, pp 674-688.
- [6] ARQUIE, G; GUIZOL, C; LASSARTESSE, J: Présentation d'une exploitation. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées .1990, pp 181-193.
- [7] Audit Technique des carrières. Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics .2002, pp 1-38.
- [8] AUSSEDAT, G: L'essai de fluage dynamique dans la formulation des enrobés et le dimensionnement des chaussées. Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N°spécial V décembre 1977, pp 139-152.
- [9] BARKSDALE, R.D; VERGNOLLE, RR: Expansive cement stabilization of bases .National Academy of Sciences. Washington 1968. N°255, pp 30-41.
- [10] BENABEN, J.P; DAC CHI, N; TOURENQ, C: Identification des argiles polluant les graves-ciment par le bleu de méthylène. Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N°164. 1989, pp 5-15.
- [11] BENABEN, J.P: Influence des argiles illitiques sur les graves-ciment. Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N°spécial XIV décembre 1984. Pp 93-97.
- [12] BENDAOU, E.A: Contrôle de qualité des granulats destinés à la construction routière. Journées d'étude du 21 et 22 décembre 1997 à Alger, pp 37-48.
- [13] BENSEBAA, K: Etude rhéologique des liants modifiés, impact du vieillissement intégrant la démarche ,haute qualité environnementale. Thèse de Magister. Faculté de Génie-Civil. USTHB 2003, pp 99-110.
- [14] BERUDE, M.A ; PARADIS, M: Influence de la fraction de sable (80µm-2,5mm) des granulats et du filler minéral(<80µm) sur la résistance à l'orniérage des chaussées routières. Département de géologie et de génie géologique .Université Laval .Quebec.1997, pp50-70.
- [15] Bitume actualité. N°91 juin 1990, pp 19-37.

- [16] BONNOT, J: Essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôle des enrobés bitumineux. Rapport général. Bulletin de liaison de LPC N° 132 juillet-août 1984.
- [17] BOULARAK, M; BENACHOUR, Y: Rôle des laboratoires dans la chaîne qualité. 1eres rencontres nationales sur les granulats. Décembre 1993 à Alger, pp 83-108.
- [18] British Standard Institution BSI DD226. Method for determining resistance to permanent deformation of bituminous mixtures subject to unconfined dynamic loading.1996.
- [19] British Standard Institution BSI 598. Sampling and examination of bituminous mixtures for roads and other paved areas, Part 111: Method for determination of resistance to permanent deformation of bituminous mixtures subject to unconfined dynamic loading.1995.
- [20] BROWN, S.F: Essais tri axiaux sur enrobés bitumineux en chargement répété ou en fluage. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N° spécial V décembre 1977, pp125-138.
- [21] CALVET.R.: Hydratation de la montmorillonite et diffusion de cations compensateurs .Annales agronomies. N°24. 1973, pp 77-133.
- [22] CAMPANAC, R; ALLOMBERT, J; DELOBELLE, T: Le dépoussiérage. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées .1990, pp 411-441.
- [23] CAMPANAC, R; DAMIANI, L; MASSON, M: Schéma d'approvisionnement en granulats du département des Bouches-du-Rhône, France. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées . N°spécial XIV décembre 1984.
- [24] CAMPANAC, R: Equivalent de sable et mesure de la nocivité des sables et concassés. Matériaux granulaires. Colloque international. Rilem, Budapest octobre1980. BLLPC N°107.
- [25] CAMPANAC, R: La nocivité des fines argileuses au regard des performances d'un enrobé à chaud. Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N°111 janvier- février 1981, pp 53-60.
- [26] CAPDESSUS, H; CHAUVIN, J.J: Traitement des sables des landes. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N°67 septembre-octobre1973.
- [27] CHAUVIN, J.J: Les sables .Guide pratique d'utilisation routière. Laboratoire Régional de Bordeaux. Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement du Sud-Ouest, pp55-75.
- [28] CHAUVIN, J.J; SABO, A: Valorisation des matériaux routiers non traditionnels: Approche méthodologique et bilan des applications. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Journées d'informations.11-13 juin 1991, pp 1-7.
- [29] CHOMTON, C; VALAYER, P.J: Etude de l'orniérage en laboratoire, l'essai de fluage dynamique. Revue générale des routes et aérodromes. N°458.1970, p 95.
- [30] DE HILSTER, E; VAN DE LOO, P.J: The creep test, influence of test parameters. Shell. International. Petroleum. London.1978.
- [31] DENIAU, M; ARCHIMBAUD, C: Installations temporaires de production de granulats. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées .1990, pp 586-610.

- [32] DERMECHE, Y: Modules et lois de fatigue des bétons bitumineux Algériens. III Congrès Algérien de la route . Tome1, pp 29-49.Mars 2001.
- [33] DURIEZ, M; ARRAMBIDE, J: Liants routiers et enrobés. Dunod 1959. Paris, p 551.
- [34] DURIEZ, M; ARRAMBIDE, J: Nouveau traité de matériaux de construction. Tome III, édition Dunod. Paris 1962.
- [35] Essai de compactage à la presse a cisaillement giratoire. Projet de mode opératoire. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées(LCPC). Décembre 1981.
- [36] Etude et expérimentation sur les Sand -Asphalt (utilisation de l'hydropulsateur). Catalogue de dimensionnement des chaussées. Rapport de Recherche N° 05/08. Ministère de l'Équipement et de l'Aménagement du Territoire . Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics (CTTP). Septembre 1995, pp18-26.
- [37] Etude et expérimentation sur les Sand- Asphalt (utilisation de l'hydropulsateur). Catalogue de dimensionnement des chaussées. Rapport de Recherche N°08/08. Ministère de l'Équipement et de l'Aménagement du Territoire. Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics (CTTP). Avril 1998, pp 3-10.
- [38] FARCAS, F: Etude d'une méthode de simulation du vieillissement des bitumes sur la route. Etude et Recherche des Laboratoires des Ponts et Chaussées. Septembre1998, p223.
- [39] Formulation de sable bitume. Région de Mostaganem. Ministère de l'Équipement et de l'Aménagement du Territoire .Wilaya de Mostaganem. Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics (CTTP). N°184/95 janvier 1996, pp13-19.
- [40] FRANDI, E: Sable –laitier à haute stabilité immédiate. Laitiers des hauts fourneaux. N°31. 1974, pp 7-35.
- [41] FRANDI, E: Traitement des granulats routiers par le laitier granulé. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N°spécial Q.1970.
- [42] FROUIN, L: Etude expérimentale des interactions surfaces minérales-bitume. Cas particulier des argiles. Rapport de recherche LPC. N°154 juin1989, pp 9-56.
- [43] GIRUOD, J.P; BOTTERO,A: Influence des propriétés physico-chimiques des argiles mono minérales sur leur comportement mécanique. Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N°62 novembre- décembre. 1983.
- [44] GRIMAU, J.P; HIERNAUX, R: Utilisation de l'orniéreur type LPC. Bulletin de liaison des Laboratoires des Pont et Chaussées. N° spécial V décembre 1977, pp166-172.
- [45] GUVEN, N: Smectites. Revue Minéralogique. N°19.1988. Pp 497-559.
- [46] HADDADI, S: Contribution à l'étude des matériaux traités aux liants hydrocarbonés. Influence des paramètres de composition. Thèse de Magister. Faculté de Génie-Civil. USTHB 1995, pp 73-107.
- [47] HAMZE, M: Contribution à l'étude des propriétés de matériaux. Le traitement des sables. Rapport de recherche LPC .N°67.1977.
- [48] HANK, E; SANHADJI, F: Utilisation du sable-bitume en couche de roulement. II congrès Algérien de la route.Décembre1996.

- [49] HARLIN, M: Le bitume. Essais de Laboratoire et spécifications. Ecole des ponts et chaussées. Journées d'Etudes Nationale . 24-26 novembre 1992, pp1-32.
- [50] HARLIN, M; UGE, P: Orniérage des enrobés bitumineux. 1978, pp 304-393.
- [51] HOPMAN, P; VANELSTRAETE, A; VERHASSELT, A: Active filler as asphalt modifier. AIPCR. XXI World Road congress, Kuala Lumpur October 1999.
- [52] HUET, M: Elargissement des possibilités d'utilisation des sables dans les chaussées. Troisième rapport LCPC. Granulats 1987.
- [53] HUET, M: Incidence de la valeur de bleu sur certaines caractéristiques des fines et des enrobés . Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N°161 mai- juin 1989, pp 61-73.
- [54] HUSCHEK, S; PIGOIS, M.L: Orniérage, étude comparative de différents dispositifs d'essai. Laboratoire des voies de circulation (LAVOC) de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Travail de recherche 12/82. Novembre 1984.
- [55] Journées d'information de Nantes. Emploi des sables traités aux liants hydrauliques en assises de chaussées. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et CETE de Nantes. 6 et 8 mai 1974
- [56] LARADI, N: Modélisation du comportement des matériaux traités aux liants hydrocarbonés. Thèse de Doctorat . INSA-ENTP de Lyon. 13 septembre 1990, pp 220-240.
- [57] LARADI, N: Nouvelle approche du contrôle de la qualité des granulats en technique routière. Séminaire du 25 et 26 juin 1995 à Alger, pp84-94. Houari Boumédiène. 1995.
- [58] LEKOUAGHET, A: Méthodes d'étude d'un gisement rocheux. 1eres rencontres nationales sur les granulats. Décembre 1993 à Alger, pp 36-43.
- [59] MADOUNI, N: Influence de la température sur les propriétés rhéologiques des bitumes et des enrobés bitumineux. Thèse de Magister. Faculté de Génie-Civil. USTHB 2001, pp 115-120.
- [60] MALDONADO, A: Qualité totale et élaboration des granulats. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. N°188 novembre- décembre 1993, pp 9-13.
- [61] MALDONADO, A; YERNAUX, M: Manutention , stockage, reconstitution transport des granulats. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées . 1990, pp 443-516.
- [62] MAMY, J: Etude de l'hydratation des sols à l'échelle du minéral argileux. Annales Agronomiques Françaises. Volume 19. 1968, pp 251-292.
- [63] MARSHALL, R; THOMPSON, M.R: Lime treated soils for pavement construction. Journal of the highway division proceeding of the American Society of Civil Engineering. Novembre 1968, pp191-217.
- [64] METICHE, S: Influence des paramètres de formulation sur la stabilité au fluage des sables bitumes et des bétons bitumineux. Thèse de Magister. Faculté de Génie-Civil. USTHB 2001, pp75-95.
- [65] Ministère de l'Equipement. Directive pour la réalisation des assises de chaussées en grave-laitier et sable-laitier. SETRA et LCPC octobre 1973.

- [66] Ministère de l'Équipement et du Logement. Directive pour la réalisation des couches de surface de chaussées en béton bitumineux. SETRA. LCPC 1969, pp 16-19.
- [67] Ministère de l'équipement. Qualité des travaux routiers. Séminaire 24 et 25 février 1992.CTTP, pp 8-12.
- [68] Ministère des transports. Spécifications relatives aux granulats pour chaussées. SETRA. LCPC. Avril 1984, pp 4-8.
- [69] Ministère des Travaux Publics. Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobes bitumineux à chaux.CTTP 2000, pp 23-70.
- [70] MOUTIER, F: Utilisation et possibilités de la presse à cisaillement giratoire . Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N°spécial V décembre 1977, pp 173-180.
- [71] NORETH, H; GAUTHIER, Y: Le simulateur de trafic. Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N° 47 .1970, p 119.
- [72] Norme Française. Analyse granulométrique par tamisage. NF P18-586. Octobre 1978.
- [73] Norme Française. Détermination de la densité. NF T 66 007. Juillet 1979.
- [74] Norme Française. Détermination de la propreté des sables. Equivalent de sable à 10% de fines. NF P 18-597. Décembre1990.
- [75] Norme Française. Détermination de la propreté superficielle. NF P 18-591. Avril 1979.
- [76] Norme Française. Détermination des limites d'Atterberg. NF P 94-051. Mars 1993.
- [77] Norme Française. Détermination du point de ramollissement des produits bitumineux. NF T 66-008. Juillet 1979.
- [78] Norme Française, Essai au bleu de méthylène, méthode turbidimétrique.NF P 18 595.1978.
- [79] Norme Française. Essai au bleu de méthylène. NF P 18-592. Octobre1991.
- [80] Norme Française. Essai d'usure Micro Deval. NF P 18-572. Octobre 1978.
- [81] Norme Française. Essai Los Angeles. NF P 18-573. Octobre 1978.
- [82] Norme Française. Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés. Essai Duriez sur mélanges hydrocarbonés à chaud. NFP 98-251-1. Juillet 1991.
- [83] Norme Française. Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés. Essai Marshall. NFP 98-251-2. Avril 1992.
- [84] Norme Française. Mesure des masses volumiques des gravillons, cailloux et sable. NF P 18-554. Décembre 1979.
- [85] Norme Française. Mesure du coefficient d'aplatissement. NF P18-560. Octobre 1978.
- [86] Norme Française. Pénétrabilité à l'aiguille. NF T 66-004. Décembre 1986.
- [87] Norme Française. Perte de masse au chauffage. NF T 66 011. Août 1991.

- [88] Norme Française. Point d'éclair en vase ouvert. NF T 66 118. Juin 1979.
- [89] Note technique sur le traitement des sables. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. SETRA. 1984.
- [90] ORBOM, B: Experience in Sweden of cement-bound road bases. Translation of a paper presented to the congress of Nordiska Vagtekniska For-bundet. Gothenburg. Juin 1965.
- [91] POIRIER, J.E: Etude des mécanismes accompagnant l'adsorption des tensio-actifs ioniques sur les solides, dans le cas des systèmes à interaction faibles. Doctorat d'Etat. INP de Lorraine. 1984
- [92] RILEM. Essais mécaniques pratiques de formulation et de contrôle des enrobés bitumineux. Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N°132 juillet-août 1984, pp 91-107.
- [93] RILEM. Methodes de formulation et contrôle de qualité des enrobés bitumineux. Séminaire du 24-26 septembre 1986. France, pp 13-45
- [94] SAINTON, A; PUIATTI, D; WALTER, D: Modification du bitume et des enrobés bitumineux par ajout de chaux hydratée. Revue générale des routes et aérodromes. N°770 février 1999.
- [95] SAUTEREY, R; BONNOT, J: Evolution récente des matériaux des chaussées souples. Revue générale des routes et aérodromes. Supplément au N°509 mai 1975.
- [96] SAUTEREY, R: Confection d'éprouvettes de matériaux enrobés. Le compactage par pression et cisaillement giratoire. Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N° 5. 1964, p31.
- [97] SCHOONHEYDT, R.A: Mineral surfaces, Edité par VAUGHAN.D.J. Londres. Chapitre 9 (Clay mineral surfaces), pp 303-332.
- [98] SHARP, D.R: Utilisation of low cost materials in areas deficient in roads tone. The journal of highway engineering. Décembre 1969, pp11-15.
- [99] Shell. Bitume technique et utilisation .Société des pétroles. 1991.
- [100] SIMONCELLI, J.P: Maîtrisons ensemble l'orniérage avec Shell Multigrade Bitumen. Revue générale de routes et aérodromes. N° 713. 1993.
- [101] SNAITH, M.S; BROWN, S.F: Electro-hydraulic servo-controlled equipment for the dynamic testing of bituminous materials. Rilem international symposium. Deformation and rupture of solids subjected to multi axial stresses. Cannes III. 1972, p139.
- [102] SPOSITO, G: Surface reactions in natural aqueous colloidal systems. Chimia N°43 .1989, pp169-176.
- [103] SWARTZEN ALLEN, S.L; MATIJEVIC, E: Surface and colloid chemistry of clays. Chemical Reviews. N°74, pp 385-400.
- [104] The Asphalt Institute. Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types. Manuel séries n°2 .1974.

- [105] THEISSING, E.M: Chemical determination of chemical impurities in aggregates for concrete, Rilem. Colloques international. Matériaux granulaires. Budapest October 1978
- [106] TOURENQ, C; DENIS, A: Les essais sur granulats. Rapport de recherche LPC. N°114 juillet 1982, pp 50-73.
- [107] TOURENQ, C; DENIS, A: Propriétés des granulats. Essais et spécifications. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées .1990, pp 131-165.
- [108] Traitement des sables pour assises de chaussées. Journées de Bordeaux. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.1978.
- [109] TRAN, N.L: L'essai au bleu de méthylène. Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N°88. 1977.
- [110] TRAN, N.L: L'essai au bleu de méthylène, un progrès dans la mesure et le contrôle de la propreté des granulats, matériaux granulaires. Rilem colloques international Budapest octobre 1978. BLLPC N°107.
- [111] TRAN, L; MILLION-DEVIGNE, P: L'essai au bleu de méthylène turbidimétrique. Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N°spécial XIV décembre 1984.
- [112] TRAN, N.L: Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassement routier. Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N°111 janvier- février 1981, pp 5-16.
- [113] UGE, P; VAN DE LOO, P.J: Les déformations permanentes des enrobés bitumineux. Canadian Technical Asphalt Association, Regina 4, 5 et 6 novembre 1974.
- [114] UNIKOWSKI, Z.R: Influence des argiles sur les propriétés des mortiers de ciment. Rapport de recherche LPC. N°110 février 1982, pp 82-86.
- [115] VENUAT, M: Le traitement des sols à la chaux et au ciment. Edition 1980. Paris.
- [116] VERHASSELT, A; SAINTON, A; VERHELST, F: Modification du bitume et des enrobés bitumineux. Centre de recherches routières. Rapport de recherche avril 2003 Belgique.
- [117] VERHASSELT, A: Utilisation de l'hydroxyde de calcium dans les enrobés bitumineux. Journées d'information Benelux Bitume. Wépion avril 1999.
- [118] XIV congrès Belge de la route à Genval. Bulletin du Centre de Recherches Routières. N°49. 2002, pp3-10.
- [119] YERNAUX, M; LIAUTAUD, G: Les granulats en pays neufs. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées .1990, pp 689-717.

ANNEXE 1

Spécifications des granulats utilisés en technique routière : [17], [68].

Micro Deval (MDE)	Los Angeles (LA)	Qualité
$MDE < 13$	$LA < 15$	Très bon
$13 \leq MDE < 20$	$15 \leq LA < 20$	Bon à moyen
$20 \leq MDE < 25$	$20 \leq LA < 30$	Moyen à faible
$MDE \geq 25$	$LA \geq 30$	Médiocre

Propreté des sables et gravillons :

Propreté	$\leq 2\%$
VB (*)	≤ 1
ES 10% ou PS	≥ 50

(*)VB :valeurs de bleu à respecter si la valeur d'ES 10% est inférieure à la valeur spécifiée.

ANNEXE 2

Température de l'essai pour les différentes classes de bitume [69]

Classe de bitume	Température d'essais (°C)
20/30	25- 30- 35- 40- 45.
40/50	20- 25- 30- 35- 40.
60/70	15- 20- 25- 30- 35.
80/100	10- 15- 20- 25- 30.

Spécifications des bitumes purs [15]

Caractéristiques	Bitume 40/50
Pénétrabilité(1/10mm), 25°C, 100g, 5s.	35 à 50
Point de ramollissement « Bille et Anneau » °C	50 à 56
Densité relative à 25°C	1,00 à 1,10
Perte de masse au chauffage (%) (163°C, 5h)	< 1
Pourcentage de pénétrabilité restant après perte de masse au chauffage par rapport à la pénétrabilité initiale	> 70
Point d'éclair (appareil Cleveland) (°C)	250

ANNEXE 3

Performances exigées concernant une couche de roulement [66], [69]:

Essai Duriez

<ul style="list-style-type: none">• Compacité LCPC :	$91 \% \leq C \leq 95 \% (0/10)$ $92 \% \leq C \leq 96 \% (0/14)$
<ul style="list-style-type: none">• Résistance à sec à 18°C en (kg/cm²) : <p style="text-align: center;">80/100 60/70 40/50</p>	<p style="text-align: center;">> 50 > 60 > 70</p>
<ul style="list-style-type: none">• Rapport immersion-compression : r/R	<p style="text-align: center;">> 0,75</p>

Essai Marshall

<ul style="list-style-type: none">• Compacité	$\leq 97 \%$
<ul style="list-style-type: none">• Stabilité (kg) <p style="text-align: center;">40/50 60/70</p>	<p style="text-align: center;">> 700 > 600</p>
<ul style="list-style-type: none">• Fluage à 1/10mm	<p style="text-align: center;">< 40</p>
<ul style="list-style-type: none">• Pourcentage des vides (%)	$3 \leq \% \text{vides} \leq 5$

ANNEXE 4

1. ELIMINATION DES STÉRILES AVANT LE CONCASSEUR PRIMAIRE [2], [3], [7]. 1.1. Traitement des matériaux avec peu d'éléments fins à éliminer.

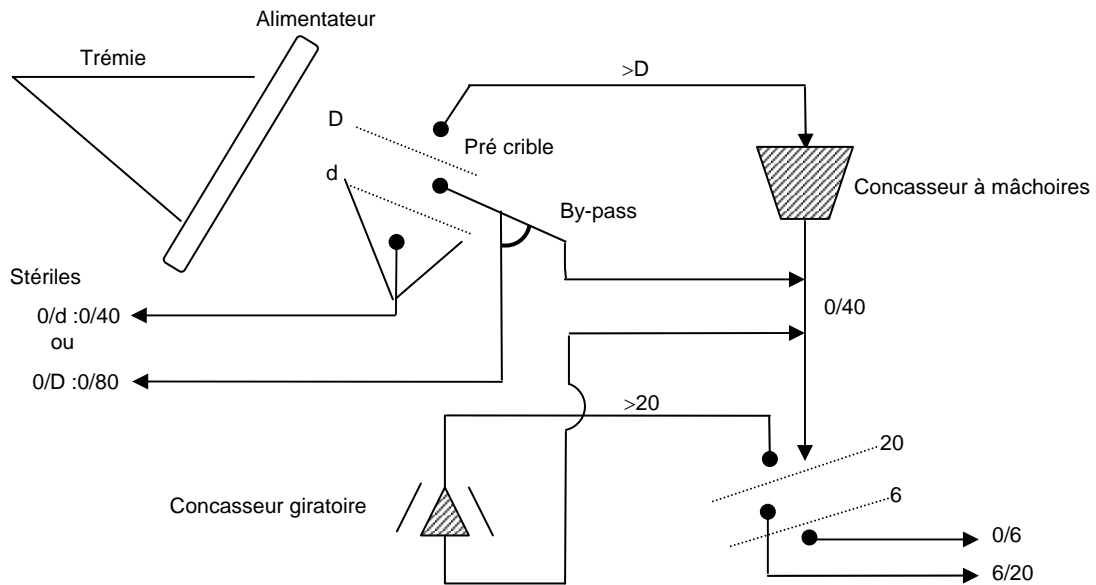


Figure 1: Installation avec peu d'éléments fins à éliminer.

1.2. Traitement des matériaux avec beaucoup d'éléments fins à éliminer 1.2.1. Par voie humide

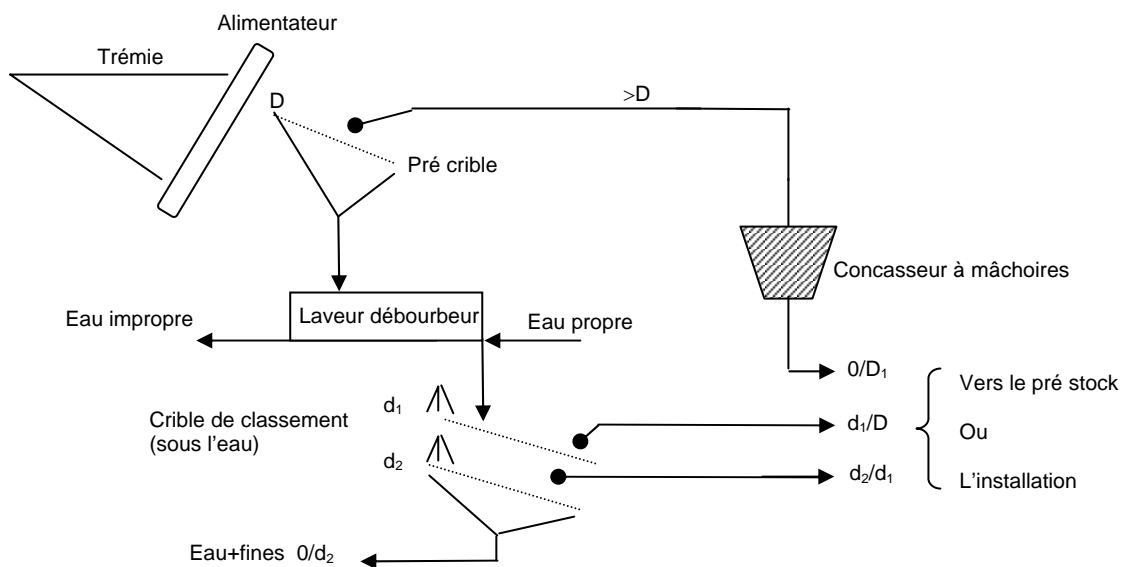


Figure 2: Installation avec beaucoup d'éléments fins à éliminer.
Par voie humide

1.2.2. Par voie sèche

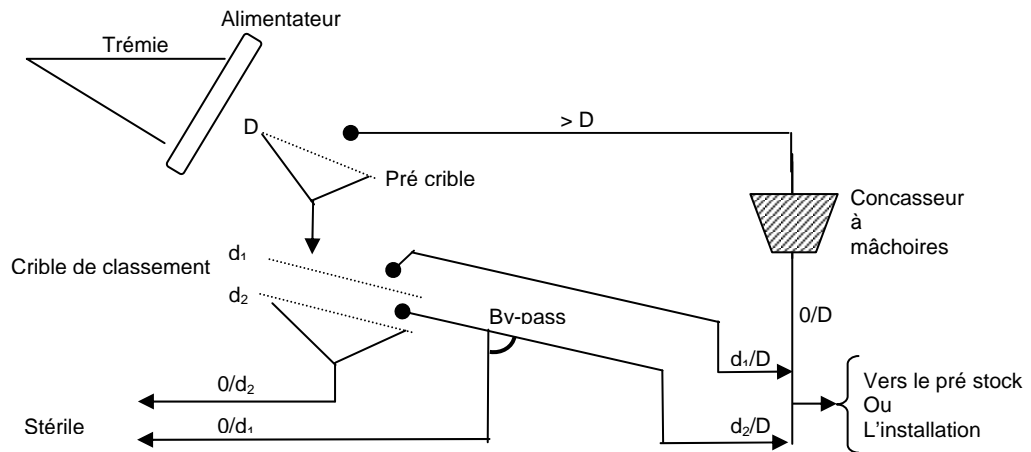


Figure 3: Installation avec beaucoup d'éléments fins à éliminer.
Par voie sèche

2. ELIMINATION DES STÉRILES AVANT ET APRES LE CONCASSEUR PRIMAIRE [2], [3], [7].

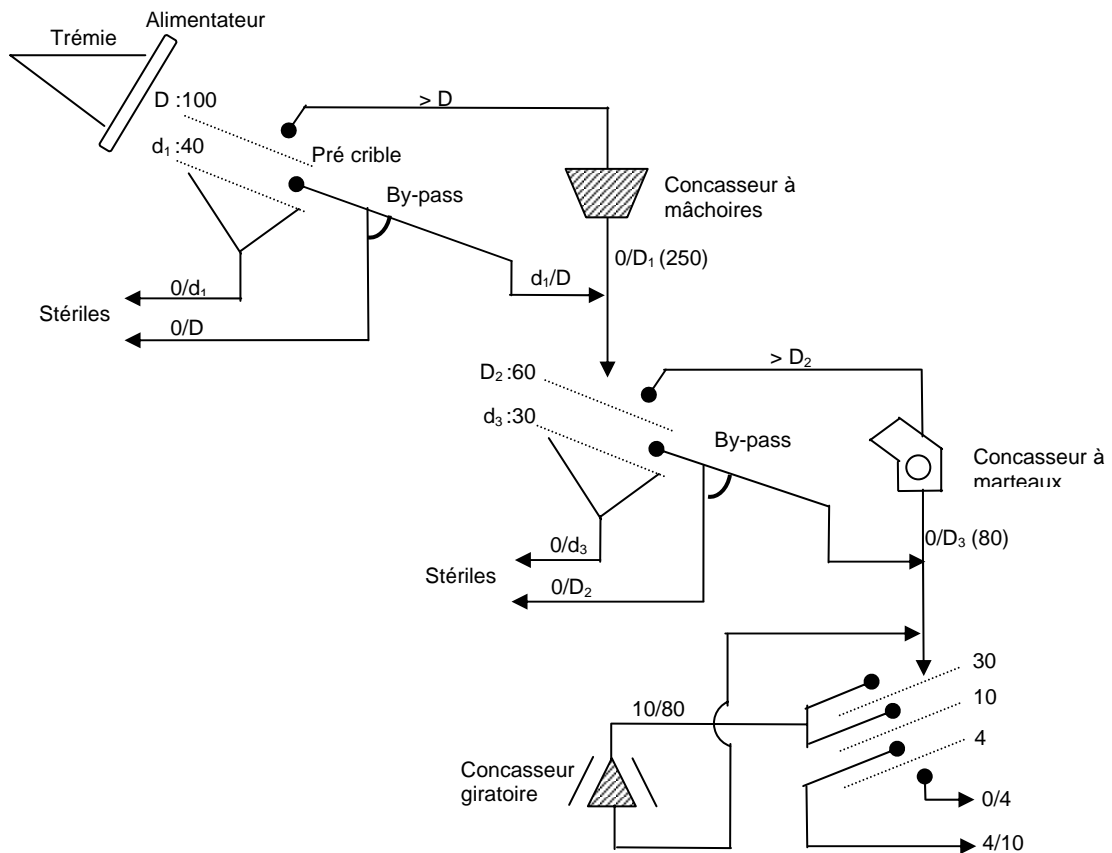
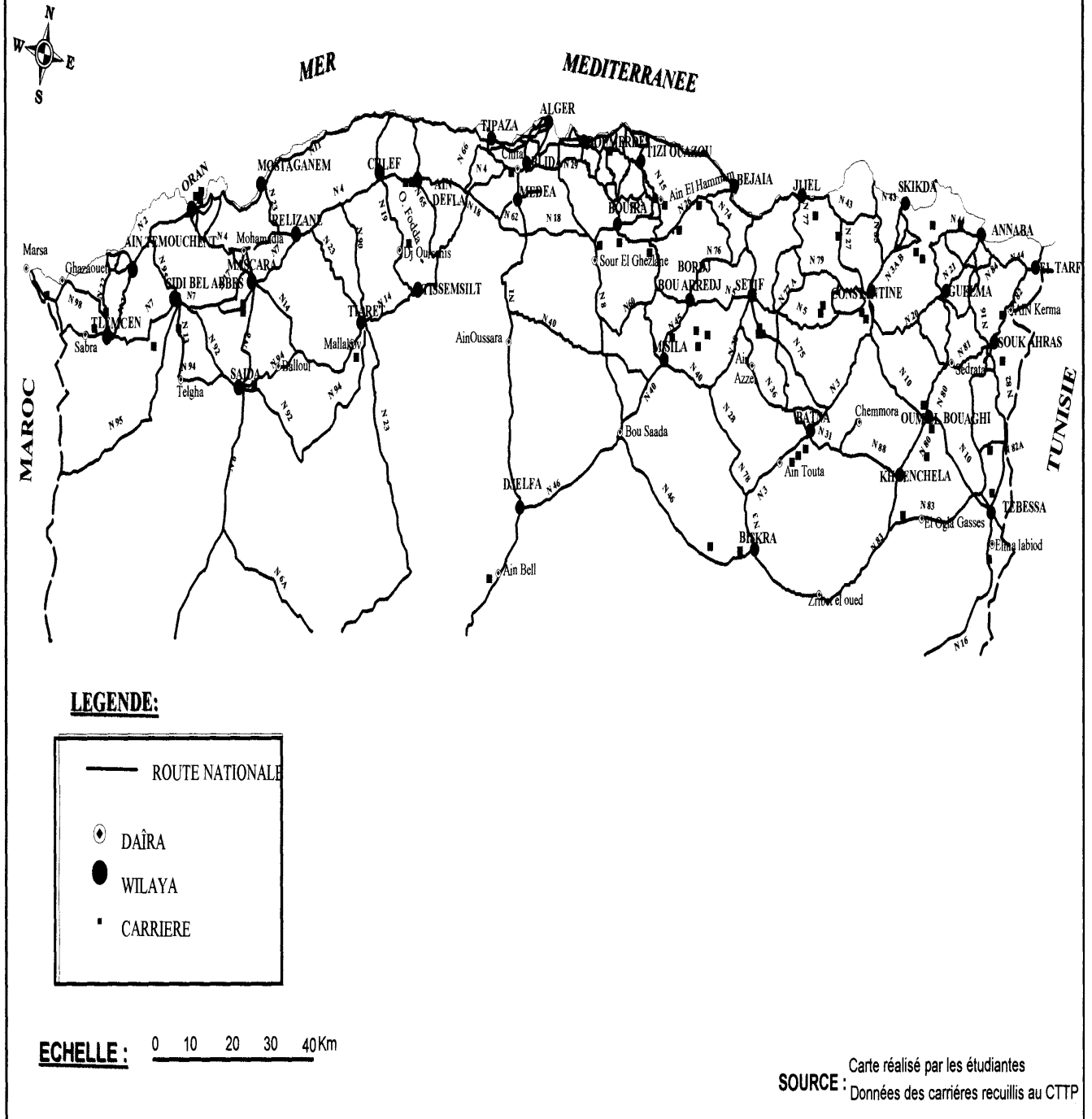


Figure 4: Installation avec élimination des stériles avant et après concasseur primaire

CARTE 1: IMLANTATION DES CARRIERES DANS LE NORD ALGERIEN



ANNEXE 6

1. GENERALITES [42], [102] , [97].

Les argiles sont des roches composées d'une juxtaposition de minéraux extrêmement petits. On ne peut les voir ni à l'œil nu ni à la loupe. Elles se voient rarement même au microscope.

Les minéraux argileux sont étudiés grâce aux techniques de diffraction aux rayons X et au microscope électronique.

Il est primordial de distinguer les minéraux argileux et les argiles. Les premiers sont des minéraux caractéristiques des argiles tandis que les seconds sont des roches ou ces minéraux peuvent être mélangés entre eux ou avec d'autres constituants (sable, calcaire, etc.) pour donner la variété des argiles qui existent dans la nature.

Il existe deux façons de définir les argiles :

- Le point de vue granulométrique qui définit les argiles comme toutes particules inférieures à $2\mu\text{m}$.
- Le point de vue minéralogique qui limite les argiles aux phyllosilicates.

Le second point s'avère être le plus riche puisque c'est la structure même des phyllosilicates qui est responsable du rôle joué par les argiles dans le sol.

Les particules d'argiles sont formées d'un empilement de feuillets (figure 1).

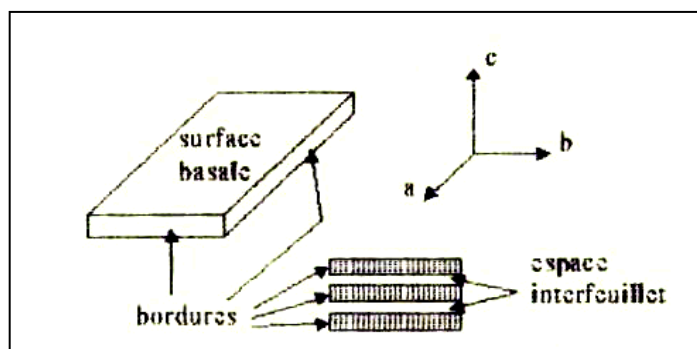


Figure 1: Illustration de l'empilement des feuillets d'argile et les espaces interfeuillets [102].

2. LES MINÉRAUX ARGILEUX [42], [45], [97].

Les minéraux argileux possèdent un réseau cristallin ou une structure cristalline parfaitement organisée. Les éléments oxygène, silicium, aluminium, fer, magnésium et potassium, sont présents à l'état ionique. Ces ions sont des sphères arrangées entre elles comme des pièces d'un jeu de construction et reliées par des forces électrostatiques. Chaque type de construction représente une espèce minérale.

2.1. La kaolinite

La kaolinite est une argile silico-alumineuse composée de plaquettes hexagonales. Chaque plaquette est constituée de multiples feuillets empilés de couche tétraédrique et octaédrique (figure 2).

La diffraction par rayons X révèle que l'espacement entre deux feuillets consécutifs est de 7 \AA .

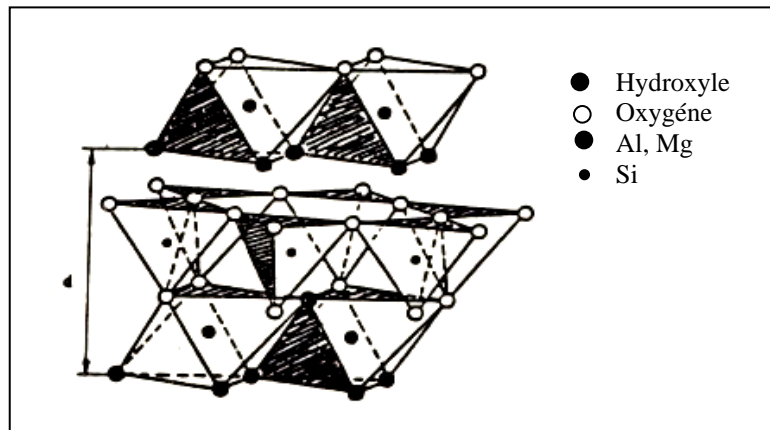


Figure 2: La kaolinite $d=7\text{\AA}$ [42].

2.2. La montmorillonite (sméctite).

Les sméctites sont formées d'un empilement de feuillets composés d'une couche octaédrique (essentiellement aluminium ou magnésium) emprisonnée entre deux couches de silice en coordination tétraédrique (structure dite T.O.T.) (figure 3).

Les liaisons entre les feuillets sont faibles (l'épaisseur totale du feuillet et de l'espace inter feuillet associé est d'environ 14\AA), permettant ainsi une pénétration d'eau dans l'espace inter foliaire. Ces minéraux argileux ont la capacité de gonfler en présence d'eau.

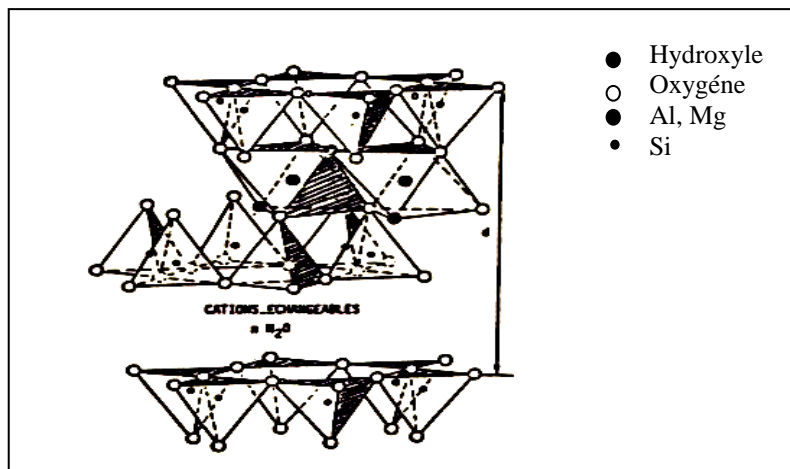


Figure 3: La montmorillonite $d=14\text{\AA}$ [42].

2.3. L'illite

L'illite qui se présente sous forme de minuscule plaquettes, est constituée d'une structure T.O.T. mais l'épaisseur totale du feuillet est plus faible (10\AA). Elles n'ont pas la propriété de gonfler en présence d'eau.

3. COMPORTEMENT DES ARGILES EN PRESENCE D'EAU [42], [91].

Des substitutions localisées dans la couche octaédrique, provoquent des déficits de charges positives qui induisent une charge négative globale à la surface des argiles.

D'autres facteurs interviennent également dans la formation de la charge de surface tels que les imperfections au sein du réseau cristallin et la présence de liaisons rompues entre les feuillets entraînant ainsi la séparation et l'écartement des feuillets laissant l'eau accéder.

4. COMPENSATION DE LA CHARGE DE SURFACE [42], [62].

La charge négative des particules argileuses est neutralisée par l'adsorption de cations échangeables compensateurs (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+}) (figure 4). Ce sont ces cations qui confèrent à l'argile ses propriétés de surface.

Ces cations hydrophiles localisés dans l'inter feuillet (surface interne) et sur la surface externe s'hydratent et leur nature détermine le processus de gonflement caractéristique de l'argile.

Le mécanisme d'hydratation comprend plusieurs phases qui vont de la formation de la première couche d'hydratation des cations échangeables au remplissage de l'espace inter feuillet restant par les molécules d'eau en excès.

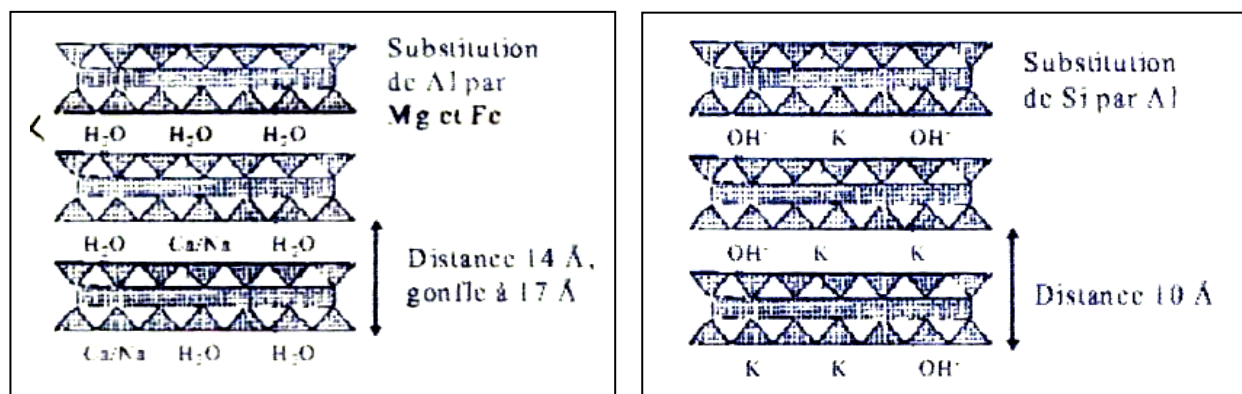


Figure 4 : Représentation schématique de la structure feuilletée des montmorillonites et des illites

Dans le cas des illites, la charge structurale est majoritairement compensée par la présence de potassium dans l'espace inter feuillet, liant ainsi très étroitement les feuillets entre eux et empêchant ainsi le minéral de gonfler en présence d'eau.

5. HYDRATATION ET GONFLEMENT [21], [103].

A l'état anhydre, les feuillets argileux sont accolés les uns aux autres mais s'écartent en présence d'eau (gonflement) ce qui rend accessibles les surfaces basales initialement en contact.

L'eau adsorbée en surface des particules, peut être influencée dans son orientation par son mode de liaison et son énergie d'interaction et par la présence des cations compensateurs. Pour une charge cationique donnée, la quantité d'eau adsorbée à la surface de l'argile augmente avec l'énergie d'hydratation du cation compensateur.

L'écartement des feuillets et l'hydratation des surfaces internes dépendent de la nature des cations compensateurs.

L'intensité du gonflement dépend de la charge du réseau cristallin et de la nature des contre-ions.

ANNEXE 7

1. LE LAVAGE DES GRANULATS [1], [2].

Le lavage des matériaux par rinçage sur crible, n'est efficace que si l'appareil grâce au bon réglage du système de vibration, assure l'étalement des granulats sur les grilles.

La consommation d'eau se situe en général entre 0,5 et 0,8 m³ par tonne de granulats lavés par rinçage sur crible. Les eaux de lavage contenant cependant tous les sables, doivent être traitées dans des appareils de séparation placés dans la chaîne de traitement des matériaux.

- Avec des matériaux peu pollué

Les appareils utilisés pour le lavage par rinçage sur crible sont représentés sur les figures 1 et 2.

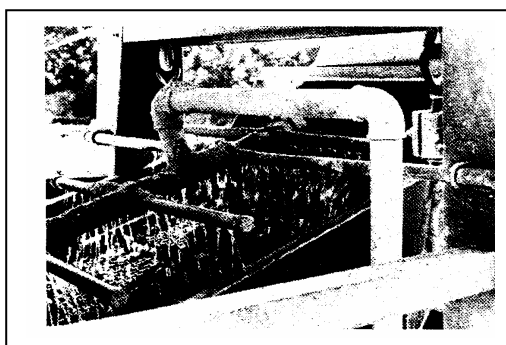


Figure 1 : Cribles équipé de rampes d'arrosage à trous [2].

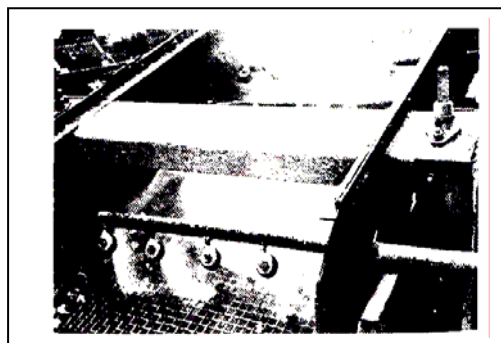


Figure 2 : Cribles équipé de rampes d'arrosage avec buses de pulvérisation [2].

- Avec des matériaux très pollué

On procède à un lavage par débouillage et attrition (les figures 3 et 4). Cette opération est suivie d'un égouttage et d'un rinçage des granulats sur cribles afin d'éliminer toute trace d'argile.

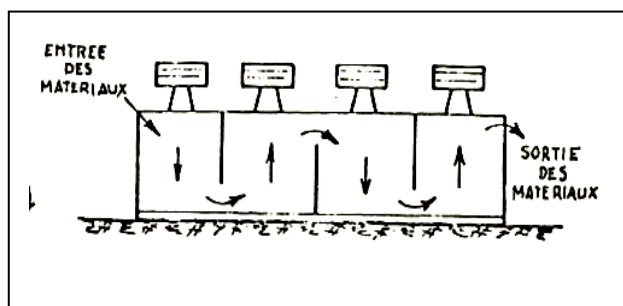


Figure 3 : Cellule d'attrition [1].

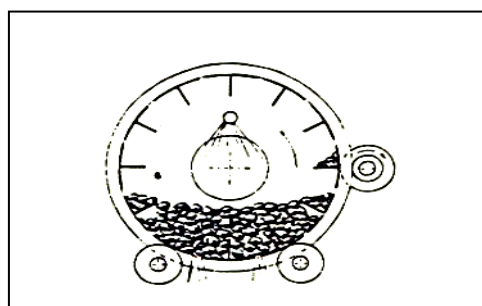


Figure 4 : Coupe du trommel laveur [1].

2. LE LAVAGE DES SABLES

Les sables se trouvent entraînés par les eaux de rinçage qui contiennent également toutes les argiles délitées.

Les appareils de séparation ont pour fonction de séparer les sables des eaux contenant la pollution.

Les appareils utilisés sont :

2.1. Appareils de décantation statique

L'hydro- séparateur à cône (figure 5) qui est constitué par une cuve de décantation conique, ne procède à aucune classification. Le courant superficiel provoque une sédimentation du produit le long des parois de la cuve et entraîne les fines argileuses vers un débordement périphérique. La décharge par une trappe inférieure, est commandée par des palpeurs enregistrant le niveau des matériaux. Ces appareils assurent :

- Une production de sables allant jusqu'à 200 t/h.
- Un débit d'eau compris entre 1 et 1,5 m³ par tonne.

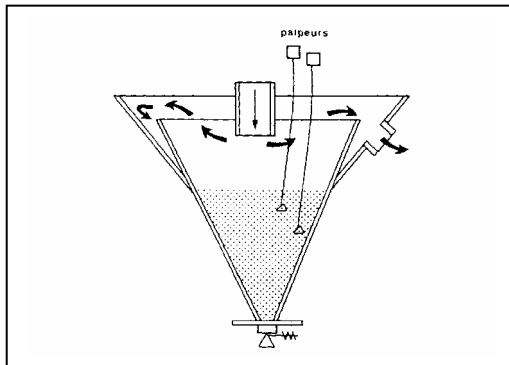


Figure 5: Hydro- séparateur à cône [1].

2.2. Appareils de séparation par décantation statique avec extraction mécanique

La décantation est réalisée dans des cuves équipées de système d'extraction des sables décantés.

- La roueessoreuse

C'est une roue verticale (figure 6) très utilisée, présentant un grand diamètre, travaillant à faible vitesse (évite la perturbation de la décantation) et portant à sa périphérie des godets perforés. La partie inférieure plonge dans un bac de décantation, les godets écopent le sable et l'essore au cours de leur trajet aérien. Les fines et les argiles sont évacuées par le débordement du bac.

- Une production allant jusqu'à 200 t/h.
- Les débits d'eau de lavage varient de 1,5 à 2,5 m³ par tonne.

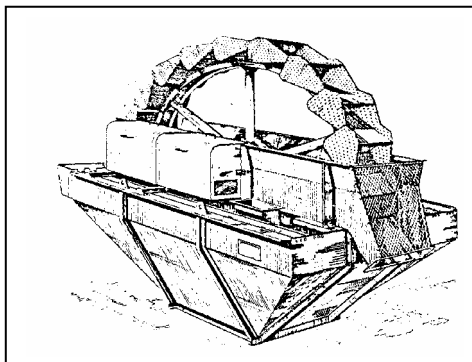


Figure 6: Roueessoreuse [1].