

M0006/03B

REPUBLIQUE ALGERINNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
LABORATOIRE CONSTRUCTION ET ENVIRONNEMENT**

MEMOIRE DE MAGISTER

Présenté par :

M^R Guenniche Lamine
Ingénieur d'état en Génie Civil de l'E.N.P.

Pour l'obtention du titre de

Magister en Génie Civil

Thème

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DU
TRAITEMENT HYDROCARBONE D'UN
SABLE DE DUNE DE HASSI BERKINE**

Soutenu le 16/06/2003

Devant le jury composé de :

Président	: BALI A.	Professeur (E.N.P. d'Alger)
Rapporteur	: Kettab R.	Chargée de cours (E.N.P. d'Alger)
Examineurs	: Laradi N.	Professeur (U.S.T.H.B.)
	: Silhadi K.	Maître de conférence (E.N.P. d'Alger)
	: Boutemour R.	Chargé de cours (E.N.P. d'Alger)
Invité	: Boukerrou A.	Chef de département bitume (C.T.T.P)

Laboratoire Construction et Environnement
Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassan Badi, El Harrach, Alger

REPUBLIQUE ALGERINNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
LABORATOIRE CONSTRUCTION ET ENVIRONNEMENT

MEMOIRE DE MAGISTER

Présenté par :

M^R Guenniche Lamine
Ingénieur d'état en Génie Civil de l'E.N.P.

Pour l'obtention du titre de

Magister en Génie Civil

Thème

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DU
TRAITEMENT HYDROCARBONE D'UN
SABLE DE DUNE DE HASSI BERKINE**

Devant le jury composé de :

Président	: BALI A.	Professeur (E.N.P. d'Alger)
Rapporteur	: Kettab R.	Chargée de cours (E.N.P. d'Alger)
Examineurs	: Laradi N.	Professeur (U.S.T.H.B.)
	: Silhadi K.	Maître de conférence (E.N.P. d'Alger)
	: Boutemeur R.	Chargé de cours (E.N.P. d'Alger)
Invité	: Boukerrou A.	Chef de département bitume (C.T.T.P)

Laboratoire Construction et Environnement
Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassan Badi, El Harrach, Alger

إن محاولة تقييم أهلية المواد المحلية للإستعمال في إنجاز الطرق نظرا للأزمة الإقتصادية التي تمر بها بلادنا يعتبر بمثابة الحل الأنجع لتجنب الإستعمال المفرط للمواد الأكثر شيوعا. إن دراستنا هته تدخل في نفس الإطار، فهي ترمي إلى تحسين التركيبة البنيوية لرمال الكثبان الأتية من منطقة حاسي بركين وكذا تزفيتته بمختلف أنواع المواد الزفتية المستعملة في التقنية لطرقية الجزائرية وذلك من أجل قبول صلاحيته كغطاء للطرق الصحراوية ذات الحركة المرورية المحدودة. من أجل ذلك جربت عدة صيغ للرمال المزفت وهذا بإستعمال عدة أنواع من المعدلات وقد أدت النتائج المشجعة لبعض الصيغ إلى تأكيد إمكانية إستعمال الرمال المزفت كمادة أساسية لإنجاز غطاءات بعض الطرق الصحراوية التي تتميز بحركة مرورية محدودة.

Résumé

Devant la conjoncture économique difficile que traverse l'Algérie et afin de répondre aux besoins des régions pauvres en matériaux nobles, la valorisation des matériaux locaux semble être la solution la plus adéquate pour parer aux consommations abusives des matériaux les plus recommandés.

Notre contribution rentre dans ce cadre, elle vise à corriger la granulométrie serrée d'un sable de dune de la région de Hassi Berkine et de le traiter à chaud et à froid avec différents types de liants hydrocarbonés afin de valider son emploi en tant que revêtement de chaussées sahariennes ayant un trafic ne dépassant pas les 1000 véhicules par jour. Pour cela plusieurs formulations du sable enrobé ont été élaborées en incorporant différents pourcentages de sables correcteurs ou de pulvérulents industriels.

Les résultats encourageants obtenus pour certaines formulations permettent de confirmer la possibilité d'utiliser le sable enrobé en tant que matériau de base pour l'exécution des couches de roulement des chaussées à faible trafic.

Mots clés : sable bitume, chaussée à faible trafic, compacité, stabilité, gonflement, imbibition, fluage, affaissement, Sahara, bitume.

Abstract

Due to the difficult economical conjuncture that our country meets and in order to solve needs of regions poor in noble materials, the valorization of local materials seems to be the most adequate solution to deal with the abusive consumptions of the most used materials.

Our study aims to correct the composition of the dune sand of Hassi Berkine and to treat it with different types of black binders in order to validate its use as a layer of the Sahara roadways having a traffic less than 1000 vehicules per day. Thus, several formulations of the sand asphalt have been elaborated with the incorporation of different percentages of corrective sands or hydraulic binders.

The encouraging results obtained with certain formulations allow to confirm the possibility, when the traffic is weak, to use the sand asphalt as a basis material for the execution of layers of pavement rolling.

TABLE DES MATIERES

Liste des figures
 Liste des tableaux

Introduction Générale.....1

CHAPITRE I TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE

I.1. INTRODUCTION.....	3
I.2. L'ENVIRONNEMENT SAHARIEN.....	3
I.2.1. Le climat saharien.....	3
I.2.2. Le sol saharien	4
I.3. PARTICULARITES DE LA TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE.....	5
I.3.1 Historique.....	5
I.3.2. Genèse de la technique routière saharienne.....	5
I.3.3. Définition de la technique routière saharienne.....	6
I.3.3.1. Les idées générales.....	6
I.3.3.2. Principes de la technique.....	7
I.3.4. Les facteurs intervenant dans la structure d'une chaussée au Sahara.....	8
I.3.4.1. Facteur climatique.....	8
I.3.4.2. Facteur du milieu naturel.....	9
I.3.4.3. Facteur du trafic.....	10

CHAPITRE II LES LIANTS HYDROCARBONES

II.1. DEFINITIONS.....	11
II.2. LES BITUMES.....	11
II.2.1. Origine des bitumes.....	11
II.2.1.1. Bitumes naturels.....	11
II.2.1.2. Bitumes artificiels.....	11
II.2.2. Fabrication des bitumes.....	12
II.2.2.1. Distillation atmosphérique.....	13
II.2.2.2. Traitement du résidu atmosphérique.....	13
II.2.3. Les essais sur bitumes.....	15
II.2.3.1. Essai de pénétration.....	15
II.2.3.2. Essai de ramollissement.....	15
II.2.3.3. Essai de fragilité fraass.....	16
II.2.3.4. Mesure de la densité relative à 25° c.....	16
II.2.3.5. Perte de masse au chauffage.....	16
II.2.3.6. Essai de ductilité.....	16
II.2.3.7. Point d'éclair -point de feu.....	16
II.2.3.8. Les Essais de vieillissement.....	16
II.2.4. Les spécifications des bitumes.....	17
II.2.5. Critères de choix des classes de bitume en Algérie.....	18
II.2.6. Marché de bitume en Algérie.....	19

II.3. LES CUT BACKS	20
II.3.1. Introduction.....	20
II.3.2. Définition.....	20
II.3.3. Fabrication des cut-backs.....	20
II.3.4. Domaine d'application des cut backs.....	21
II.3.5. Avantages et inconvénients de l'utilisation des cut backs.....	23
II.4. LES EMULSIONS DE BITUNE.....	23
II.4.1. Définition.....	23
II.4.2. Fabrication des émulsions.....	24
II.4.3. Les essais sur émulsions.....	24
II.4.3.1 Détermination de la teneur en eau.....	24
II.4.3.2 Détermination de la pseudo-viscosité.....	25
II.4.3.3 Détermination de l'indice de rupture d'une émulsion cationique.....	25
II.4.3.4 détermination du signe de la charge des particules de l'émulsion.....	25
II.4.3.5. Stabilité au stockage par décantation.....	25
II.4.3.6. Adhésivité d'une émulsion cationique.....	26
II.4.3.7. Homogénéité par tamisage.....	26
II.4.4. Spécifications des émulsions de bitume.....	26
II.4.5. Domaine d'application des émulsions.....	29

CHAPITRE III

LES ENROBES HYDROCARBONES

III.1. DEFINITION.....	30
III.2. CLASSIFICATION DES ENROBES HYDROCARBONES.....	30
III.2. 1. D'après le mode de fabrication.....	30
III.2.2. D'après la compacité.....	30
III.3. UTILISATION DES ENROBES BITUMINEUX EN TECHNIQUES ROUTIERES.....	31
III.4. QUALITES EXIGEES D'UN ENROBE.....	
III.4.1. La stabilité.....	32
III.4.2. La flexibilité.....	32
III.4.3. L'insensibilité à l'eau.....	32
III.5. ESSAIS SUR LES ENROBES.....	33
III.5.1. Les essais classiques sur les enrobés bitumineux.....	34
III.5.2. Les essais particuliers sur les enrobés bitumineux.....	35
III.5.3. Fatigue des enrobés.....	38
III.5.4. Le module complexe.....	38

CHAPITRE IV

LES ENROBES A FROID

IV.1. INTRODUCTION.....	40
IV.2. DEFINITION.....	40
IV.3. DOMAINE D'UTILISATION.....	40
IV.4. LES ENROBES A FROID AU BITUME FLUIDIFIE (CUT BACK).....	41
IV.4.1. Les cut backs	41
IV.4.2. Les enrobés a froid au cut back.....	42
IV.5. LES ENROBES A FROID A L'EMULTION.....	42
IV.5.1. L'émulsion de bitume.....	42
IV.5.2. Les enrobés à froid à l'émulsion de bitume.....	43
IV.6. FORMULATION D'ENROBE A FROID.....	44
IV.7. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES ENROBES A FROID.....	44

CHAPITRE V

LES SABLES ET LEUR UTILISATION EN TECHNIQUE ROUTIERE

V.1 GENESE.....	46
V.2 SABLES DU SAHARA.....	46
V.3. CLASSIFICATION.....	47
V.4. LES SABLES TRAITES AU BITUME.....	48
V.4.1. Les traitements à froid.....	49
V.4.1.1. Domaine d'emploi.....	49
V.4.1.2. Qualité des constituants.....	49
V.4.1.3. Méthodologie d'étude.....	50
V.4.2. Technique à chaud.....	50
V.4.2.1. Domaine d'emploi.....	50
V.4.2.2. Qualité des constituants.....	51
V.4.3. Spécifications pour les sables traités au bitume pour couche de roulement.....	51
V.4.4. Résultats obtenus sur certaines routes sahariennes.....	51
V.4.4.1. RN 3 HASSI MESSAOUD-EDJEL.....	51
V.4.4.2. RN 3 région de GASSI TOUIL.....	52
V.4.4.3. RN 3 STIL-TOUGGOURT.....	52
V.4.4.4. RN 48 STIL-EL-OUED.....	54
V.4.4.5. RN 49 OUARGLA- HASSI MESSAOUD.....	55

CHAPITRE VI

FORMULATION DU SABLE ENROBE

VI.1. DEFINITION.....	56
VI.2. RAPPELS THEORIQUES.....	56
VI.2.1. Détermination de la teneur en liant.....	56
VI.2.2. Calcul de la compacité Hubbard Field des éprouvettes.....	57
VI.3. PROGRAMME DE L'EXPERIMENTATION.....	57
VI.4. ESSAIS DE LABORATOIRE.....	57
VI.5. PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISES.....	58
VI.5.1. Les sables.....	59
VI.5.2. Les fines d'ajout.....	64
VI.5.3 Les pulvérulents industriels.....	65
VI.5.4. Les liants.....	66
VI.6. PREMIERE SERIE D'ESSAIS (TRAITEMENT A CHAUD).....	68
VI.6.1. Influence de la teneur du bitume pur sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	69
VI.6.2. Influence du pourcentage en sable concassé sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	73
VI.6.3. Influence du pourcentage en sable gypseux sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	77
VI.6.4. Influence du pourcentage en arène granitique sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	81
VI.6.5. Influence du pourcentage en fines gypseuses sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	85
VI.6.6. Influence du pourcentage en fines calcaires sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	89

VI.6.6. Influence du pourcentage en chaux sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	93
VI.6.8. Influence du pourcentage en ciment CPJ 45 sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	97
VI.6.9. Influence du pourcentage en laitier broyé sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	101
VI.6.10. Influence du pourcentage en plâtre sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	105
VI.7. DEUXIEME SERIE D'ESSAIS (TRAITEMENT A FROID).....	109
VI.6.1. Influence de la teneur en cut back et en émulsion sur la stabilité et la compacité HubbardField	110
VI.7.2. Influence du pourcentage en sable concassé sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	114
VI.7.3. Influence du pourcentage en sable gypseux sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	118
VI.7.4. Influence du pourcentage en arène granitique sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	122
VI.7.5. Influence du pourcentage en fines gypseuses sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	126
VI.7.6. Influence du pourcentage en fines calcaires sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	130
VI.7.7. Influence du pourcentage en chaux sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	134
VI.7.8. Influence du pourcentage en ciment CPJ 45 sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	138
VI.7.9. Influence du pourcentage en laitier broyé sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	142
VI.7.10. Influence du pourcentage en plâtre sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.....	146
VI.8. TROISIEME SERIE D'ESSAIS.....	150
VI.8.1. Etude Duriez.....	151
VI.8.2. Etude Marshall.....	158
Conclusion Générale.....	163
Références bibliographiques.....	166

Liste des figures

N°	Titre	Page
II.1	Composition schématique d'un pétrole brut.	12
II.2	Schéma d'une unité de distillation sous vide.	13
II.3	Schéma d'une unité de soufflage.	14
II.4	Pénétrromètre.	15
II.5	Appareil de mesure de la température bille et anneau.	15
II.6	Appareil de mesure du point d'éclair et point de flamme.	16
III.1	Principe de compactage à la presse à cisaillement giratoire.	35
III.2	Schéma de principe de l'essai de fluage statique.	36
III.3	Schéma de principe de l'essai de fluage dynamique.	37
VI.1	Composition granulométrique du sable de dune de Hassi Berkine.	60
VI.2	Composition granulométrique du sable concassé (Haoud El Hamra).	61
VI.3	Composition granulométrique du sable gypseux (Hassi Messaoud).	63
VI.4	Composition granulométrique de l'arène granitique.	64
VI.5	Influence de la teneur en bitume 40/50 sur la stabilité Hubbard Field (100% sable de dune).	70
VI.6	Influence de la teneur en bitume 40/50 sur la compacité (100% sable de dune).	70
VI.7	Influence de la teneur en bitume 80/100 sur la stabilité Hubbard Field (100% sable de dune).	71
VI.8	Influence de la teneur en bitume 80/100 sur la compacité (100% sable de dune).	71
VI.9	Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50).	74
VI.10	Influence de la teneur en sable concassé sur la compacité (bitume 40/50).	74
VI.11	Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100).	75
VI.12	Influence de la teneur en sable concassé sur la compacité (bitume 80/100).	75
VI.13	Influence de la teneur en sable gypseux sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50).	78
VI.14	Influence de la teneur en sable gypseux sur la compacité (bitume 40/50).	78
VI.15	Influence de la teneur en sable gypseux sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100).	79
VI.16	Influence de la teneur en sable gypseux sur la compacité (bitume 80/100).	79
VI.17	Influence de la teneur en arène granitique sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50).	82
VI.18	Influence de la teneur en arène granitique sur la compacité (bitume 40/50).	82
VI.19	Influence de la teneur en arène granitique sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100).	83
VI.20	Influence de la teneur en arène granitique sur la compacité (bitume 80/100).	83
VI.21	Influence de la teneur en fines gypseuses sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50).	86
VI.22	Influence de la teneur en fines gypseuses sur la compacité (bitume 40/50).	86
VI.23	Influence de la teneur en fines gypseuses sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100).	87
VI.24	Influence de la teneur en fines gypseuses sur la compacité (bitume 80/100).	87
VI.25	Influence de la teneur en fines calcaires sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50).	90
VI.26	Influence de la teneur en fines calcaires sur la compacité (bitume 40/50).	90
VI.27	Influence de la teneur en fines calcaires sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100).	91
VI.28	Influence de la teneur en fines calcaires sur la compacité (bitume 80/100).	91
VI.29	Influence de la teneur en chaux sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50).	94
VI.30	Influence de la teneur en chaux sur la compacité (bitume 40/50).	94
VI.31	Influence de la teneur en chaux sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100).	95
VI.32	Influence de la teneur en chaux sur la compacité (bitume 80/100).	95
VI.33	Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50).	98
VI.34	Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la compacité (bitume 40/50).	98
VI.35	Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100).	99
VI.36	Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la compacité (bitume 80/100).	99
VI.37	Influence de la teneur en laitier broyé sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50).	102
VI.38	Influence de la teneur en laitier broyé sur la compacité (bitume 40/50).	102
VI.39	Influence de la teneur en laitier broyé sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100).	103
VI.40	Influence de la teneur en laitier broyé sur la compacité (bitume 80/100).	103
VI.41	Influence de la teneur en plâtre sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50).	106
VI.42	Influence de la teneur en plâtre sur la compacité (bitume 40/50).	106
VI.43	Influence de la teneur en plâtre sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100).	107
VI.44	Influence de la teneur en plâtre sur la compacité (bitume 80/100).	107

VI.45	Influence de la teneur en cut back 400/600 sur la stabilité Hubbard Field (100% sable de dune).	111
VI.46	Influence de la teneur en cut back 400/600 sur la compacité (100% sable de dune).	111
VI.47	Influence de la teneur en émulsion 60 sur la stabilité Hubbard Field (100% sable de dune).	112
VI.48	Influence de la teneur en émulsion 60 sur la compacité (100% sable de dune).	112
VI.49	Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600).	115
VI.50	Influence de la teneur en sable concassé sur la compacité (cut back 400/600).	115
VI.51	Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60).	116
VI.52	Influence de la teneur en sable concassé sur la compacité (émulsion 60).	116
VI.53	Influence de la teneur en sable gypseux sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600).	119
VI.54	Influence de la teneur en sable gypseux sur la compacité (cut back 400/600).	119
VI.55	Influence de la teneur en sable gypseux sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60).	120
VI.56	Influence de la teneur en sable gypseux sur la compacité (émulsion 60).	120
VI.57	Influence de la teneur en arène granitique sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600).	123
VI.58	Influence de la teneur en arène granitique sur la compacité (cut back 400/600).	123
VI.59	Influence de la teneur en arène granitique sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100).	124
VI.60	Influence de la teneur en arène granitique sur la compacité (émulsion 60).	124
VI.61	Influence de la teneur en fines gypseuses sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600).	127
VI.62	Influence de la teneur en fines gypseuses sur la compacité (cut back 400/600).	127
VI.63	Influence de la teneur en fines gypseuses sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60).	128
VI.64	Influence de la teneur en fines gypseuses sur la compacité (émulsion 60).	128
VI.65	Influence de la teneur en fines calcaires sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600).	131
VI.66	Influence de la teneur en fines calcaires sur la compacité (cut back 400/600).	131
VI.67	Influence de la teneur en fines calcaires sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60).	132
VI.68	Influence de la teneur en fines calcaires sur la compacité (émulsion 60).	132
VI.69	Influence de la teneur en chaux sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600).	135
VI.70	Influence de la teneur en chaux sur la compacité (cut back 400/600).	135
VI.71	Influence de la teneur en chaux sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60).	136
VI.72	Influence de la teneur en chaux sur la compacité (émulsion 60).	136
VI.73	Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600).	139
VI.74	Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la compacité (cut back 400/600).	139
VI.75	Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60).	140
VI.76	Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la compacité (émulsion 60).	140
VI.77	Influence de la teneur en laitier broyé sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600).	143
VI.78	Influence de la teneur en laitier broyé sur la compacité (cut back 400/600).	143
VI.79	Influence de la teneur en laitier broyé sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60).	144
VI.80	Influence de la teneur en laitier broyé sur la compacité (émulsion 60).	144
VI.81	Influence de la teneur en plâtre sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600).	147
VI.82	Influence de la teneur en plâtre sur la compacité (cut back 400/600).	147
VI.83	Influence de la teneur en plâtre sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60).	148
VI.84	Influence de la teneur en plâtre sur la compacité (émulsion 60).	148
VI.85	Variation du rapport immersion /compression en fonction de la formulation (bitume 40/50).	153
VI.86	Variation du rapport immersion / compression en fonction de la formulation (cut back 400/600).	153
VI.87	Variation de la compacité en fonction de la formulation (bitume 40/50).	154
VI.88	Variation de la compacité en fonction de la formulation (cut back 400/600).	154
VI.89	Variation de l'affaissement en fonction de la formulation (bitume 40/50).	155
VI.90	Variation de l'affaissement en fonction de la formulation (cut back 400/600).	155
VI.91	Variation du gonflement en fonction de la formulation (bitume 40/50).	156
VI.92	Variation du gonflement en fonction de la formulation (cut back 400/600).	156
VI.93	Variation de la stabilité en fonction de la formulation (bitume 40/50).	159
VI.94	Variation de la stabilité en fonction de la formulation (cut back 400/600).	159
VI.95	Variation de la compacité en fonction de la formulation (bitume 40/50).	160
VI.96	Variation de la compacité en fonction de la formulation (cut back 400/600).	160
VI.97	Variation du fluage en fonction de la formulation (bitume 40/50).	161
VI.98	Variation du fluage en fonction de la formulation (cut back 400/600).	161

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
II.1	Spécifications des différentes classes de bitume.	18
II.2	Choix des classes de bitume selon le guide des renforcements.	19
II.3	Caractéristiques des solvants pétroliers.	21
II.4	Constitution des cut backs selon le viscosimètre STV.	21
II.5	Caractéristiques des cut backs courants à séchage moyen (MC).	22
II.6	Spécifications des émulsions anioniques.	27
II.7	Spécifications des émulsions cationiques.	28
III.1	Classification des enrobés hydrocarbonés.	31
III.2	Essais sur enrobés et informations délivrées.	34
VI.1	Le dosage en émulsion en fonction de la granulométrie des matériaux.	43
V.1	Catégories des sables.	48
V.2	Récapitulation des résultats obtenus sur la RN 3 Stil-Touggourt.	53
V3.3	Récapitulation des résultats obtenus sur la RN 3 Stil- El Oued.	55
VI.1	Analyse chimique sommaire du sable de dunes.	59
VI.2	Composition granulométrique du sable de dune de Hassi Berkine	59
VI.3	Analyse chimique sommaire du sable concassé.	60
VI.4	Composition granulométrique du sable concassé (Haoud El Hamra).	61
VI.5	Analyse chimique sommaire du sable gypseux.	62
VI.6	Composition granulométrique du sable gypseux (Hassi Messaoud).	62
VI.7	Analyse chimique sommaire de l'arène granitique.	63
VI.8	Composition granulométrique de l'arène granitique.	64
VI.9	Composition chimique du laitier broyé.	66
VI.10	Caractéristiques des bitumes 40/50 et 80/100 utilisés.	66
VI.11	Caractéristiques du cut back 400/600 utilisé.	67
VI.12	Caractéristiques de l'émulsion 60 utilisée.	67
VI.13	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le sable de dune de Hassi Berkine (bitume 40/50)	69
VI.14	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le sable de dune de Hassi Berkine (bitume 80/100)	69
VI.15	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable concassé (bitume 40/50)	73
VI.16	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable concassé (bitume 80/100)	73
VI.17	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable gypseux (bitume 40/50)	77
VI.18	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable gypseux (bitume 80/100)	77
VI.19	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de l'arène granitique (bitume 40/50)	81
VI.20	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de l'arène granitique (bitume 80/100)	81
VI.21	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines gypseuses (bitume 40/50)	85
VI.22	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines gypseuses (bitume 80/100)	85
VI.23	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines calcaires (bitume 40/50)	89
VI.24	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines calcaires (bitume 80/100)	89
VI.25	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de la chaux (bitume 40/50)	93
VI.26	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de la chaux (bitume 80/100)	93
VI.27	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du ciment CPJ 45 (bitume 40/50)	97
VI.28	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du ciment CPJ 45 (bitume 80/100)	97
VI.29	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du laitier broyé (bitume 40/50)	101
VI.30	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du laitier broyé (bitume 80/100)	101
VI.31	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du plâtre (bitume 40/50)	105
VI.32	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du plâtre (bitume 80/100)	105
VI.33	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le sable de dune de Hassi Berkine (cut back 400/600)	110
VI.34	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le sable de dune de Hassi Berkine (émulsion 60)	110

VI.35	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable concassé (cut back 400/600)	114
VI.36	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable concassé (émulsion 60)	114
VI.37	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable gypseux (cut back 400/600)	118
VI.38	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable gypseux (émulsion 60)	118
VI.39	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de l'arène granitique (cut back 400/600)	122
VI.40	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de l'arène granitique (émulsion 60)	122
VI.41	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines gypseuses (cut back 400/600)	126
VI.42	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines gypseuses (émulsion 60)	126
VI.43	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines calcaires (cut back 400/600)	130
VI.44	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines calcaires (émulsion 60)	130
VI.45	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de la chaux (cut back 400/600)	134
VI.46	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de la chaux (émulsion 60)	134
VI.47	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du ciment CPJ 45 (cut back 400/600)	138
VI.48	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du ciment CPJ 45 (émulsion 60)	138
VI.49	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du laitier broyé (cut back 400/600)	142
VI.50	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du laitier broyé (émulsion 60)	142
VI.51	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du plâtre (cut back 400/600)	146
VI.52	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du plâtre (émulsion 60)	146
VI.53	Résultats de l'essai Duriez (bitume 40/50)	151
VI.54	Résultats de l'essai Duriez (cut Back 400/600)	152
VI.55	Résultats de l'essai Marshall (bitume 40/50)	158
VI.56	Résultats de l'essai Marshall (cut back 400/600)	158

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le Sahara représente plus de trois quarts de la superficie du territoire algérien. Dans la vie économique de cet immense « pays » la route représente un instrument essentiel et constitue le principal mode de transport des marchandises.

La construction routière en milieu saharien est devenue un besoin actuel, urgent et de plus en plus important. Les régions sahariennes ont toujours été les plus démunies à cause de leurs conditions difficiles et de l'absence totale de ressources naturelles en surface.

La présence de l'homme y est très faible par rapport aux régions du nord, ce qui a limité les projets de construction et d'infrastructure de toutes sortes. Les autorités commencent à mieux explorer ces régions et à y investir pour une exploitation plus large de ce que nous offre la nature. Dans le Sahara, plusieurs activités sont nées, dont :

- La prospection et l'exploitation du sous sol ;
- Le tourisme ;
- L'alimentation et le développement de ces nouveaux marchés.

Il est par conséquent, nécessaire de développer le réseau routier dans les régions sahariennes. Cependant, le milieu saharien présente non seulement les conditions les plus défavorables au développement économique, mais aussi des particularités techniques pour la conception et la réalisation des routes.

La technique routière Saharienne est connue par ses nombreuses particularités. Elle possède son expérience, ses propres normes empiriques et il paraît intéressant de commencer par retrouver sa genèse.

La construction de routes au Sahara est caractérisée par le fait que les travaux de terrassement sont en général peu importants étant donné la monotonie du relief et que la couche de base est réalisée en matériaux naturels locaux prélevés à partir d'emprunts avoisinant le tracé ce qui réduit considérablement le coût de réalisation.

Par contre la couche de roulement en matériaux nobles revient considérablement chère étant donné le coût du transport des constituants de l'enrobé en raison de l'éloignement des sites de concassage ; cette contrainte a poussé les ingénieurs routiers des années 50 et 60 à essayer d'utiliser à la place des agrégats concassés, le sable éolien couvrant de vastes contrées du Nord de Reg oriental ou dans la mesure du possible des sables alluvionnaires qui se trouvent sur les anciens lits d'oued.

Ainsi, la technique de sable enrobé en couche de roulement a vu le jour à l'occasion de la réalisation des premiers tronçons de la RN 3 et de la RN 48 au nord du Sahara, ensuite cela a été généralisé à l'ensemble du réseau routier d'El Oued, Touggourt et Ouergla sur plusieurs kilomètres.

Depuis un certain temps une tendance de réhabilitation de la technique du sable enrobé se dégage avec le lancement de grands chantiers de renforcement et modernisation du réseau principal compte tenu des restrictions financières dues à la conjoncture économique de la décennie passée.

La valorisation est devenue donc l'un des soucis majeurs des ingénieurs routiers algériens.

Le laboratoire Construction et Environnement de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger n'est pas resté en marge de cette préoccupation et notre étude se situe dans ce cadre, qui est la valorisation des matériaux locaux et leur traitement en vue de leur utilisation en technique routière dans les régions nanties par leur richesse en matériaux sableux et en même temps leur pauvreté en matériaux nobles.

Pour ce faire, nous nous sommes intéressés à un sable de dune prélevé de la région de Hassi Messaoud. Le travail consiste à étudier l'influence de plusieurs paramètres (pourcentage et type de liant, pourcentage et type d'ajout) sur les performances mécaniques du sable enrobé obtenu après malaxage des différents constituants du mélange.

Nous avons jugé utile de répartir ce travail en six chapitres à savoir :

- Chapitre 1 ; réservé aux spécifications, spécificités et aux principes de la technique routière saharienne ;
- Chapitre 2 ; dans lequel sont développés les notions de base relatives aux différents types de liants utilisés (origine, fabrication, essais d'identification, avantages et inconvénients d'utilisation) ;
- Chapitre 3 ; traitant la classification, la qualité ainsi que les différents essais classiques et particuliers de l'ensemble des enrobés bitumineux utilisés dans la construction routière ;
- Chapitre 4 ; consacré aux définitions relatives aux différents types d'enrobés à froid et à leur formulation ainsi qu'à leurs avantages et leurs inconvénients d'utilisation ;
- Chapitre 5 ; dans lequel sont recensés les différents types de sable existant dans le Sahara ainsi que leur classification et leurs traitements à chaud et à froid et finalement les résultats obtenus sur quelques éprouvettes carottées dans certains tronçons routiers réalisés dans le sud algérien ;
- Chapitre 6 ; résultant d'un travail expérimental effectué en grande partie au sein du Laboratoire Central de la SONATRO, il englobe quatre parties à savoir :
 - a. Identification des différents constituants de l'enrobé (bitume 40/50, bitume 80/100, cut back 400/600, émulsion 60 ; sable de dune, sable concassé, sable gypseux, arène granitique, fines gypseuses, fines calcaires, chaux éteinte, ciment CPJ 45, plâtre, laitier broyé d'El Hadjar ;
 - b. Traitement à chaud en employant chacun des deux types de bitumes durs 40/50 et 80/100 et en incorporant les différents types d'ajout ;
 - c. Traitement à froid avec l'emploi de chacun des deux liants noirs : cut back 400/600 et l'émulsion 60 et en utilisant les mêmes stabilisants que précédemment ;
 - d. Après la détermination des formulations optimales Hubbard Field pour chaque type d'ajout, des essais complémentaires Marshall et Duriez ont été réalisés pour chaque formulation optimale et en employant chacun des deux liants ; le bitume 40/50 et le cut back 400/600.

CHAPITRE I

**TECHNIQUE ROUTIERE
SAHARIENNE**

I. TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE

I.1. INTRODUCTION [8]

Le Sahara algérien couvre un peu plus de deux millions de kilomètres carrés. Les dessertes reliant les différentes régions sont donc parfois énormes. Les routes, avant 1950, avaient rarement dépassé les Hauts Plateaux.

Avec la découverte des premiers gisements pétroliers en 1955-1956, le Sahara a connu une grande extension des infrastructures routières. En trois ans, il a été construit plus de 1200 Km auxquels s'ajoutaient, entre 1960 et 1962, 1000 Km

La réalisation de ces premières routes sahariennes avait imposé la résolution de grandes difficultés. En effet, l'uniformité des caractères géologiques et minéralogiques sur de vastes étendues où les terrains varient peu sur d'énormes distances, a dû nécessiter l'utilisation impérative des matériaux disponibles, jusque-là non employés dans le domaine des constructions routières.

L'utilisation obligatoire des matériaux locaux dans les solutions de mise en œuvre s'écartaient des normes admises et compte tenu des conditions locales, l'objectif essentiel était de mettre au point une technique particulière propre aux conditions locales et différente des techniques répandues au Nord du pays.

I.2. L'ENVIRONNEMENT SAHARIEN [8]

Le Sahara fait partie des régions désertiques chaudes. Sa plus grande partie se trouve dans le continent africain, mais il se prolonge en Arabie et au-delà du golfe persique.

L'environnement saharien est caractérisé essentiellement par son climat, sa végétation et par la nature et les caractéristiques des matériaux et des sols de surface.

I.2.1. LE CLIMAT SAHARIEN :

- **L'ARIDITE :**

L'aridité est un aspect du climat mondial dépendant de particularités bien établies de la circulation atmosphérique générale. C'est un régime quasi stable et qui ne peut être modifié d'une manière significative à l'échelle d'une vie humaine. On estime qu'une variation climatique périodique ou apériodique importante, due aux changements de l'insolation, a besoin d'une durée de 10000 ans à un million d'années pour produire des effets durables

- **TEMPERATURE :**

A notre époque, le climat saharien a des températures très hautes le jour et faibles la nuit. La variation de la température au cours de la journée a une valeur courante de l'ordre de 50 °C et peut atteindre parfois 70 °C.

Les forts gradients thermiques sont à l'origine de l'altération superficielle des roches et des matériaux, ce qui provoque leur fragmentation et désagrégation.

- **LES VENTS :**

Les vents sont souvent violents et permettent l'accélération de la désagrégation et le transport des produits qu'ils rencontrent sur leur chemin. Ils provoquent ainsi « l'érosion », connue sous l'appellation « d'érosion éolienne ». Les vents, selon leur vitesse, peuvent mettre en mouvement et transporter les sols. Les particules les plus sensibles au déplacement par le vent sont celles ayant un diamètre de 0,08 à 0,2 mm. Les particules les plus grosses sont lourdes et donc plus résistantes au mouvement ; les plus fines présentent une certaine cohésion qui freine leur déplacement.

- **LA PLUVIOSITE :**

La pluviosité dans le Sahara est faible, voir nulle durant plusieurs années. Quand les précipitations ont lieu, elles sont violentes, courtes et orageuses. La moyenne annuelle des précipitations est inférieure à 50 mm, avec d'importantes variations. Les oueds et cours d'eau, quand ils existent, sont très larges et peu profonds.

I.2.2. LE SOL SAHARIEN :

La couverture des zones sahariennes est constituée dans sa quasi-totalité de matériaux du quaternaire. L'éventail des matériaux n'est pas très large. On rencontre essentiellement des roches, des éboulis, des sables, des limons et des argiles.

- **LES SABLES :**

Ils sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable.

- **LES ARGILES :**

Les argiles sont rencontrées essentiellement dans les dépressions et constituent très souvent le support des marécages, des sebkhas et des chotts.

- **LES LIMONS :**

Les limons constituent, en alternance avec les lœss, la couverture en couche mince la plus fréquente, dans les oueds.

- **LES ROCHES :**

Les roches sont anciennes ou récentes et composées le plus souvent de calcaires massifs, de grès, de tufs calcaires, de tufs gypseux, etc. Elles constituent les montagnes et les hauts plateaux.

- **LES EBOULIS :**

Les éboulis sont les matériaux accumulés aux pieds des montagnes, dans les gorges et dans les oueds, ils forment les ergs et sont constitués de fragments de roches ou de granulats de forme et de taille variables. Leurs dimensions sont d'autant plus faibles qu'ils se trouvent éloignés des montagnes où ils ont pris naissance.

I.3. PARTICULARITES DE LA TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE [22] [18]

I.3.1 HISTORIQUE :

En 1955, le Sahara était pratiquement dépourvu de routes. Deux pistes seulement avaient été bitumées sommairement :

- La section de LAGHOUAT à GHARDAIA (225 km) ;
- La section de TOUGGOURT à OUARGLA (160 km).

Dans le cadre de la politique générale de développement de L'ALGERIE et en vue de la prospection pétrolière d'autres axes routiers ont été réalisés à l'époque :

- A l'ouest, la route nationale n° 6 d'ORAN à BECHAR (140 km au Sahara) achevée en 1959 ;
- Au centre, la route nationale n° 1 d'ALGER à EL-GOLEA (250 km construits de 1957 à 1959 entre GHARDAIA et EL-GOLEA) ;
- A l'est, la route nationale n° 3 SKIKDA à TOUGOURT (155 km au Sahara) et son antenne EL-OUED (145 km) achevée en 1959.

Ensuite, les découvertes pétrolières ont totalement modifié l'orientation :

- D'une part, l'intense augmentation du trafic qui a nécessité la reconstruction des deux sections anciennes ;
- D'autre part, la pénétration a été poussée vers l'Est, en direction des gisements par la construction de la route GHARDAIA – OUARGLA – HASSI-MESSAOUD – IN-AMENAS (1000 km).

I.3.2. GENESE DE LA TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE :

La technique routière européenne avait été utilisée en ALGERIE jusqu'en 1950 environ. A l'époque, les problèmes sahariens ne se posaient pas d'ailleurs, puisque les routes n'avaient pas dépassé le Sud des hauts plateaux.

Les premières routes sahariennes, construites vers 1955, ont été étudiées en adoptant les bases de la technique routière européenne, les matériaux utilisés avaient la granulométrie la plus étalée possible et contenaient peu ou pas d'argiles.

Les différentes couches de la chaussée étaient identiques à celles utilisées en Europe et la répartition de bas en haut de ces couches était comme-suit :

- Une couche de fondation dont l'épaisseur était fonction du sol sous-jacent ;
- Une couche de base d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur ;
- Une couche de roulement aussi épaisse que les crédits le permettaient.

Eventuellement, on ajoutait entre la couche de base et la couche de roulement un matériau enrobé avec un faible dosage de liant hydrocarboné pour augmenter la rigidité de la couche de roulement et améliorer la répartition des charges sur la couche inférieure.

Du fait de la grande monotonie de la géologie et de la géographie saharienne, les matériaux traditionnels utilisés en corps de chaussées ne sont pas disponibles ; en effet, ces régions sont complètement dépourvues de cailloux et de graviers.

Cependant, l'utilisation des matériaux traditionnels conduirait à des distances de transports considérables et les prix d'acheminement sur chantier, aggravés par le coût des transports en tous terrains, seraient absolument prohibitifs.

Très vite, les ingénieurs ont cherché à tenir compte des différences importantes, climatologiques et autres, qui existent entre le nord et le Sahara. Parmi les problèmes posés, celui qui retenait le plus l'attention était l'influence de la pluviométrie faible. Heureusement, ces conditions climatiques favorables (en général pas risque d'imbibition complète) permettent de sortir du cadre habituel de la technique routière et d'utiliser des matériaux non traditionnels, qui ne conviendraient pas dans les climats humides. On considérait alors que, comme sous un climat humide, un revêtement hydrocarboné n'est jamais parfaitement imperméable, et que s'il pleut, une certaine quantité d'eau arrive toujours à pénétrer dans le corps de la chaussée. Donc même s'il ne pleut qu'une fois par an, il ne faut pas qu'à cette occasion la chaussée soit dégradée.

La sécurité ne paraissait donnée que par des matériaux insensibles à l'eau ne contenant pas d'argile et très peu d'éléments fins. Ça ne pouvait pas être des matériaux cohérents, il fallait en contrepartie exiger un angle de frottement assez élevé.

Les périodes humides étant courtes, l'imbibition totale n'est pas à craindre car trop improbable. La teneur en eau maximale qu'il paraissait raisonnable de considérer l'était pour certains celle que l'on appelle « la teneur en eau optimum Proctor » et pour d'autres « la limite de plasticité ».

Des chantiers se sont réalisés ainsi, puis assez vite, un matériau aux qualités tout à fait exceptionnelles a attiré l'attention, il s'agit du gypse.

I.3.3. DEFINITION DE LA TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE

I.3.3.1. LES IDEES GENERALES :

- **LE TRAFIC :**

Le trafic saharien est essentiellement composé de camions gros porteurs, souvent, en charge.

Le nombre d'essieux qui circulent annuellement est faible, mais ceux-ci sont pour la plupart très lourds. En effet, ils imposent une chaussée qui accepte, sans désordres, des déformations

élastiques très élevées. Les déflexions sous les pneus peuvent être grandes mais doivent être entièrement réversibles et ne doivent pas laisser de traces de déformations permanentes. Les phénomènes de fatigue doivent apparaître lentement. La solution qui consiste à adopter des chaussées peu déformables est très onéreuse, étant donné l'importance des charges, et ne sera justifiée économiquement.

- **LE CLIMAT :**

Le climat saharien est caractérisé par des températures très variables et très élevées en été, par une extrême sécheresse atmosphérique et par la rareté et l'irrégularité des pluies.

Cette dernière permet de définir la pluviométrie par des moyennes sur 25 ans. Dans ces régions désertiques, la quantité des pluies enregistrée durant l'année ne dépasse pas 50 mm et elle est plus souvent moins de 20 mm. Ces quelques pluies annuelles tombent presque toujours en précipitations relativement importantes pendant un temps très court.

En effet, l'imbibition n'est pas à craindre, à la seule condition que la forme de la surface permet l'écoulement de l'eau (avec le bombement même faible d'une route, il y'a très peu d'eau qui pénètre à travers un revêtement hydrocarboné habituel non fissuré évidemment).

On ne saurait appliquer les normes habituelles qui résultent d'essais pratiques dans l'hypothèse d'une imbibition complète des sols. En effet, non seulement les pluies sont très rares, mais encore les sols de surfaces sont presque toujours sableux ou caillouteux, ce qui exclut toute imbibition par capillarité ; la seule exception concerne quelques bas-fonds qui sont collecteurs d'eaux superficielles ou souterraines.

En dehors de ces bas-fonds, les mesures antérieures ont montré que la teneur en eau des sols et normalement de 2 %, après les pluies, elle augmente jusqu'à 4 à 10 % suivant les cas.

1.3.3.2. PRINCIPES DE LA TECHNIQUE :

Les conséquences pratiques des idées préalablement citées sont résumées ci- après :

1. La couche de roulement cohérente, placée en surface de la chaussée doit être suffisamment souple pour se plier sans se rompre. Cette condition exclut les couches épaisses denses. En effet, considérant la couche comme une poutre fléchie lors d'une déformation, les contraintes sont proportionnelles à l'épaisseur.
Cette couche est formée soit par des enrobés souples en couche la plus mince possible, soit par un enduit superficiel. Ces revêtements doivent avoir l'épaisseur minimale suffisante pour résister aux efforts tangentiels importants appliqués par des essieux lourdement chargés ;
2. Le matériau de la couche de base doit pouvoir supporter des déformations élastiques sans dommages, qui peuvent être relativement importantes à la seule condition qu'elles soient entièrement réversibles (comme dans toutes les autres techniques routières ; aucune déformation permanente ne peut être tolérée). Cette condition, la seule imposée, est beaucoup moins rigoureuse que la précédente et permet d'utiliser de nombreux types de matériaux ;

3. La sécheresse ouvre beaucoup l'éventail des matériaux utilisables notamment en couche de base. Sous un climat humide, il n'est possible d'utiliser que les matériaux à angle de frottement important car, sauf cas tout à fait exceptionnel, les matériaux cohérents contiennent beaucoup d'éléments très fins qui font perdre frottement et cohésion en présence d'eau. La cohésion des sols est en général obtenue par la présence d'argile, mais dès que cette dernière est humide, elle sert de support et maintient l'eau sur les points de contact entre les grains qu'elle lubrifie parfaitement. Par contre, lorsque les matériaux ne risquent pas d'être imbibés, leur résistance aux efforts appliqués peut être obtenue soit par frottement entre grains, soit par cohésion, c'est à dire une liaison plus ou moins rigide entre grains. Ces liaisons peuvent être obtenues par présence d'argiles ou d'éléments fins gypseux
4. L'épaisseur de la couche de base peut être faible, il suffit qu'elle répartisse suffisamment les pressions sur le sol de fondation pour que celui-ci ne subisse pas de déformations permanentes. Le sol de fondation étant généralement sec, sa portance est en général bonne ;
5. La possibilité d'utiliser des matériaux cohérents plus ou moins argileux en couche de base impose de s'assurer du bon écoulement des eaux de pluies. La sécurité demande que le bombement de la route ne soit pas très faible, 2 à 3% paraissent raisonnables pour ne pas avoir de flaques d'eau même après de petites déformations inévitables.

I.3.4. LES FACTEURS INTERVENANT DANS LA STRUCTURE D'UNE CHAUSSEE AU SAHARA :

Le Sahara présente plusieurs particularités relevant essentiellement du climat, du milieu naturel, des matériaux utilisés et du trafic ; tous ces facteurs influent directement sur la couche de roulement.

I.3.4.1. FACTEUR CLIMATIQUE :

La chaussée est directement soumise à l'environnement climatique de la zone dans laquelle elle se situe ; elle se dégrade sous l'agression combinée des véhicules et du climat, d'où l'intérêt de bien connaître les éléments climatiques qui conditionnent son comportement.

- **TEMPERATURE :**

Les conditions thermiques (températures extrêmes, écarts thermiques, ensoleillement..) influent sur la température de surface de la chaussée.

La période sèche, qui dure presque la totalité de l'année a des effets considérables sur l'état et le comportement de la chaussée. Les effets les plus connus sont les suivants :

- Les températures réagissent directement sur les vitesses des réactions chimiques qui se déroulent dans certains matériaux routiers ;
- Les fluctuations de températures se traduisent par des variations des modules de déformations des matériaux des couches de revêtement bitumineux ; elles provoquent surtout des ressues sous l'effet des températures élevées ;
- Les variations de températures ont une influence sur le choix du liant et des formulations des matériaux enrobés aux liants ;
- Les précipitations sont très faibles (inférieures à 80 mm/ an), ce qui favorise la bonne tenue de la chaussée, et permet l'emploi des matériaux sensibles à l'eau sans traitement ;

- Les températures sont très élevées en été, l'insolation est importante ; la couche de surface d'une chaussée est ainsi soumise à une agression thermique contraignante influençant sur le comportement des couches de roulement bitumineuses.

- **PLUVIOMETRIE :**

Les périodes humides sont assez rares durant l'année ; les précipitations sont rares et de courte durée ; elles n'excèdent pas les 80 mm/ an alors qu'elles atteignent 243 à 248 mm/an sur les hauts plateaux et arrivent jusqu'à 566 à 770 mm/an dans les villes côtières.

Sur les chaussées, cette humidité réside et demeure selon l'état des surfaces et du profil en travers. En effet la chaussée peut retrouver son état sec quelques heures après la précipitation si son état permet un bon drainage ; Par ailleurs la plupart des matériaux naturels s'imbibent facilement, mais l'évolution de la compacité est lente par rapport au cycle humidité-sécheresse.

- **HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR :**

L'humidité relative dans le nord est environ deux fois plus importante que le Sahara ; les hauts plateaux se situent au milieu ce qui justifie à priori la classification suivante :

- Humide : zones littorales ;
- Sub-humide : les hauts plateaux (semi-aride) ;
- Aride : le sahara.

- **INSOLATION :**

On appelle insolation la durée de jour exprimée en heures pendant laquelle le ciel est dégagé, ce qui soumet le sol à l'ensoleillement ; là aussi le Sahara se trouve en tête, suivi des hauts plateaux.

- **EVAPORATION :**

Mesurée en moyen de l'évapomètre **PICHE**, elle est un paramètre très important qui conditionne l'équilibre hydrique ; son amplitude annuelle est importante pour le Sahara ; rappelons le régime des sebkhas complètement asséchées en été et inondées d'eau en hiver.

I.3.4.2. FACTEUR DU MILIEU NATUREL:

La construction des chaussées au Sahara se fait avec des matériaux locaux sub-normaux, car ils ne répondent aux spécifications des matériaux classiques ; d'une manière générale on peut les classer comme suit :

- **LES TUFES CALCAIRES:**

Ils proviennent des encroûtements calcaires et se présentent souvent sous forme de graves à granulométrie étalée, les éléments sont moins durs que le calcaire ordinaire et sont essentiellement composés de carbonates de calcium (CaCO_3).

▪ **LE SABLE GYPSEUX :**

C'est un matériau ayant la granulométrie d'un sable, il est complètement dépourvu de squelette solide ; les grains sont essentiellement de nature gypseuse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$).

▪ **TOUT VENANT :**

Les tout-venants sont exploités sur les surfaces de l'erg, ils sont en général des graves composées d'éléments anguleux et contenant une fraction fine argileuse ou carbonatée qui leur confère une importante cohésion.

▪ **LES ARENES GRANITIQUES :**

Elles se produisent de l'altération de roches éruptives ou métamorphiques, essentiellement le granit, et se présentent sous forme de graves, de gros sables ou de matériaux fins.

I.3.4.3. FACTEUR DU TRAFIC :

L'influence du trafic sur les chaussées en zones désertiques est assez complexe et difficile à déterminer car la structure de chaussée en matériaux naturels et très mal connue. Des méthodes rationnelles doivent être utilisées pour la détermination des lois de fatigue pour chaque type de structure.

Les observations sur la tenue des chaussées dans le temps ont prouvé que la notion de fatigue des chaussées en zones désertiques sous l'action du trafic n'est pas déterminante sur la durée de vie de la chaussée ou sur la chute du niveau de service pour deux raisons :

1. Le trafic même, essentiellement lourd et assez faible par rapport aux routes du nord ;
2. Même en interpellant le temps, les chaussées ayant une bonne tenue lors de leur mise en service, conservent parfaitement les performances mécaniques de leur structure ce qui implique que l'intensité du trafic a peu d'influence sur la fatigue des matériaux, par contre une chaussée donnant des signes de fatigue peu de temps après sa mise en service est sûre de voir sa ruine très prochainement malgré que le trafic reste faible.

En conséquence, l'influence du trafic est très peu déterminante dans le temps ou en intensité sauf sur des matériaux non cohérents et évolutifs ou des matériaux cohérents et mal mis en œuvre ou mal conditionnés.

Les résultats du comptage étalé sur cinq années (1985 à 1989) sont les suivants :

- RN 3 entre TOUGGOURT et HADJIRA, le trafic se situe entre 1176 et 2117 véhicules par jour dont 42 à 47 % de poids lourds.
- RN 3 entre PK 618 et PK 691 le trafic est de 5031 V/J dont 60% de poids lourds.
- RN 3 entre PK 711 (HASSI MESSAOUD) et PK 724 le trafic est de 1772 véhicules par jour dont 54% de poids lourds.
- RN 16 le trafic est de 1032 à 1225 V/J dont 21% à 46% de poids lourds
- RN 48 entre STILL et EL-OUED :
 - STILL-HOUBA 110 Km : le trafic est de 718 V/J dont 62 % de poids lourds
 - HOBBA-EL OUED 30 Km : le trafic est de 3186 V/J dont 20% de poids lourds

CHAPITRE II

LES LIANTS HYDROCARBONES

II. Les liants hydrocarbonés

II.1. Définitions : [3]

On désigne par liants hydrocarbonés un ensemble de matières contenant des hydrocarbures et leurs dérivés non métalliques, accompagnés de minéraux plus au moins inertes. Ces produits, généralement colloïdaux sont très visqueux et servent dans la technique routière à la fabrication des revêtements, ils servent également à la stabilisation des couches de fondation et des couches de base ; il existe trois familles hydrocarbonées :

- Les liants naturels ;
- Les goudrons ;
- Les bitumes de pétrole.

En construction routière, on utilise actuellement les trois liants hydrocarbonés suivants :

- Les bitumes purs ;
- Les bitumes fluidifiés ;
- Les émulsions de bitume.

II.2. LES BITUMES

II.2.1. ORIGINE DES BITUMES : [2] [3] [4]

II.2.1.1. BITUMES NATURELS :

Il existe des bitumes naturels, qui sont en fait des pétroles bruts, complètement dépourvus de fractions légères et contenant par contre un certain pourcentage de matières minérales.

Le plus connu est certainement le « bitume de Trinidad » provenant d'un lac de bitume situé dans l'île de la Trinidad (Antilles britanniques).

A l'état naturel, le produit existe sous forme d'une émulsion contenant environ 40% de bitume, 30% d'eau et 30% de matières minérales. Il est suffisamment dur pour devoir être extrait à la pelle mécanique et pour supporter une voie ferrée à la surface du lac. Après épuration (élimination de l'eau et des particules minérales de grosse dimension), on obtient le « Trinidad épuré », bitume contenant environ 40% de matières minérales et présentant une pénétrabilité à 25 °C d'environ 5 et un point de ramollissement (bille et anneau) d'environ 200.

On peut citer également la Gilsonite (Utah Colorado), bitume pur, très dur (pénétrabilité 2, point de ramollissement 300) qui n'est pas utilisé pour la route mais pour les peintures, les accumulateurs et les carreaux d'asphaltes ; l'Elatérite, l'Albértite (Canada), infusibles et extrêmement durs.

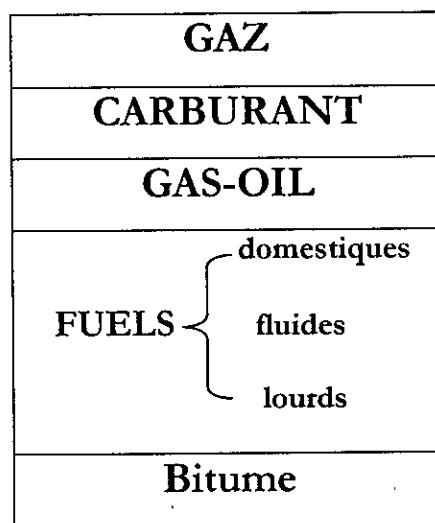
II.2.1.2. BITUMES ARTIFICIELS :

Le bitume est la fraction la plus lourde du pétrole brut, constituée des molécules hydrocarbonées les plus longues.

La composition schématique d'un pétrole brut peut être représentée comme suit :

Le pourcentage de bitume peut varier de très grandes proportions :

- Il peut être pratiquement nul, ou tout au moins suffisamment faible pour que l'extraction n'en soit pas industriellement rentable (cas des pétroles sahariens) ;
- Il peut être très élevé :
 - Pratiquement 100% dans les bitumes naturels ;
 - De l'ordre de 70 à 80 % dans certains pétroles bruts du Venezuela



En fait, on distingue, dans les pétroles bruts :

Figure II.1- Composition schématique d'un pétrole brut

- Les bruts asphaltiques, dans lesquels les fractions lourdes sont effectivement aptes à l'obtention de bitumes routiers (cas des bruts de Venezuela) ;
- Les bruts paraffiniques, dans lesquels les fractions lourdes sont essentiellement constituées de paraffine ou de cire ;
- Les bruts semi-paraffiniques ou asphalto-paraffiniques, qui peuvent également être utilisés pour la fabrication des bitumes routiers, moyennant certains traitements complémentaires.

II.2.2. FABRICATION DES BITUMES : [21] [19] [14]

Le bitume représente les fractions lourdes des bruts pétroliers. Il s'agit d'un mélange complexe de molécules aliphatiques, naphéniques et aromatiques plus ou moins fonctionnalisées. Selon leur origine et leur mode de fabrication, les bitumes ont des caractéristiques chimiques, physico-chimiques et rhéologiques différentes.

Une des premières conditions de fabrication d'un bitume est de choisir un brut suffisamment riche en produits lourds asphalténiques. La fabrication des bitumes comporte deux étapes :

- 1- Une distillation atmosphérique au cours de laquelle il y a séparation des fractions légères du brut, qui passent dans le distillat, et d'une fraction lourde qui reste au fond. Le résidu de la distillation, n'est cependant pas encore un bitume.
- 2- Un traitement du résidu atmosphérique pour qu'il acquière les caractéristiques : (pénétrabilité, température bille et anneau...) conforme aux spécifications relatives à un bitume. Il existe trois types de traitement :
 - La distillation sous vide.
 - Le soufflage.
 - L'extraction ou le désasphaltage.

II.2.2.1. DISTILLATION ATMOSPHERIQUE :

Après décantation et dessalage, le pétrole brut est chauffé et envoyé dans une tour de distillation appelée colonne de fractionnement. Le fond de la colonne est chauffé à une température élevée (350-380°C) qui diminue progressivement de bas en haut de la colonne (110-150°C à la partie supérieure). Les différentes fractions, qui doivent respecter des fourchettes de point d'ébullition, sont soutirées à des points précis de la colonne. Le fond de la colonne est alors recueilli, réchauffé et traité pour qu'il acquière les propriétés requises pour un bitume.

II.2.3.2. TRAITEMENT DU RESIDU ATMOSPHERIQUE :

1. Distillation sous vide :

Ce procédé de fabrication décrit sur la figure II.2 permet d'obtenir des produits lourds sans chauffer démesurément le résidu de distillation atmosphérique.

Un vide de quelques dizaines de millimètres de mercure est obtenu à l'aide d'un système d'éjecteurs. L'opération est menée jusqu'à obtention des caractéristiques désirées pour les différents produits de distillation.

La distillation sous vide permet d'éliminer les constituants volatils sans modification importante des structures chimiques. Les propriétés du bitume ainsi fabriqué dépendent alors directement du type de brut utilisé.

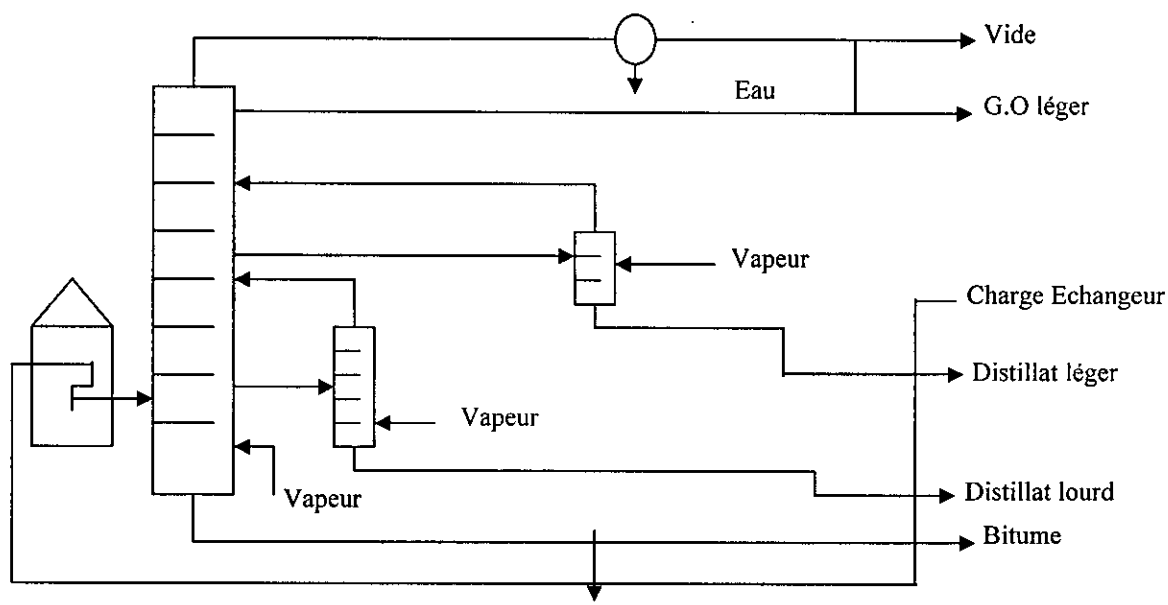


Figure II.2- Schéma d'une unité de distillation sous vide

2. Soufflage :

Le résidu de distillation atmosphérique, trop mou pour constituer un bitume routier est durci par oxydation. Dans cette opération qui se fait à haute température (environ 240-250°C), de l'air est introduit à la base de la colonne, à contre-courant de la charge bitumineuse. L'oxygène de l'air provoque une déshydrogénation des molécules carbonées pour former des groupements hydroxyles, carboxyles, acides et esters. Ces groupements fonctionnels se lient entre eux par des liaisons hydrogènes et provoquent un durcissement du bitume.

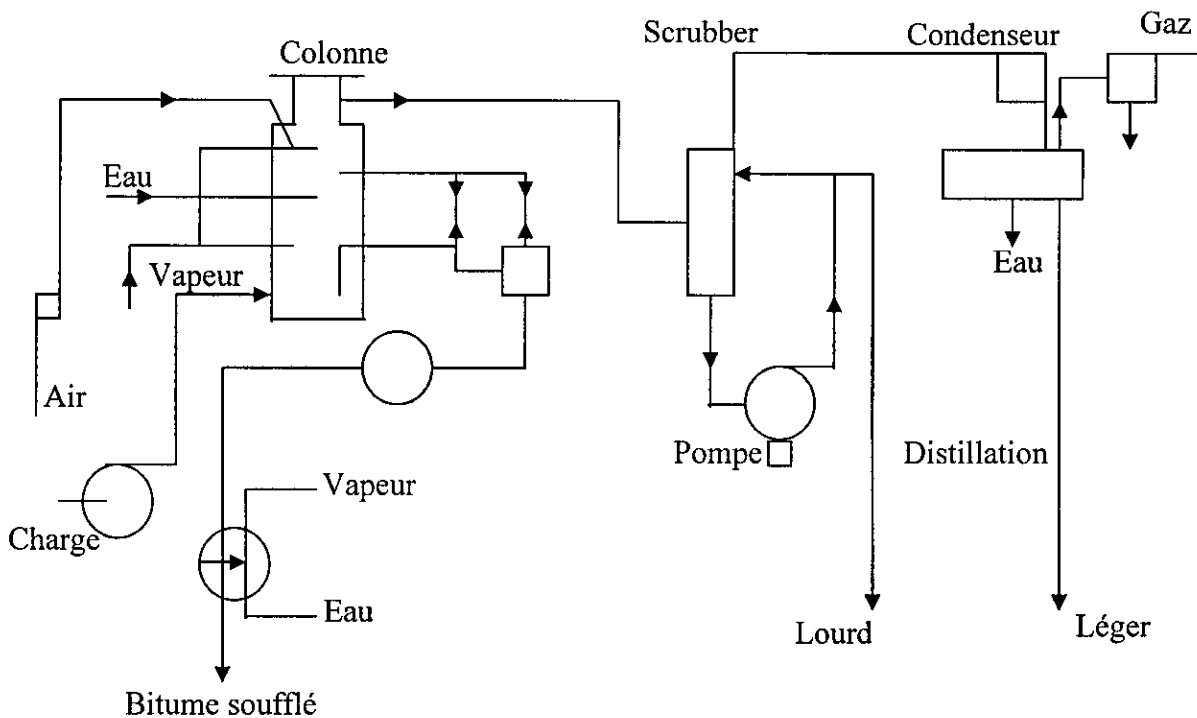


Figure II.3- Schéma d'une unité de soufflage

Le soufflage d'air, en présence de catalyseurs (FeCl_3 , P_2O_5) permet d'accélérer le procédé et d'améliorer certaines caractéristiques.

Les bitumes soufflés ne sont pas utilisés comme bitumes routiers, mais comme produits d'étanchéité.

Les caractéristiques désirées pour un bitume routier peuvent également être obtenues par semi soufflage. Ce procédé consiste à mélanger une base molle issue d'un résidu sous vide et une base dure obtenue par soufflage.

3. Extraction

Ce procédé est encore appelé « précipitation » ou « désasphaltage ». Il s'agit ici d'une séparation physique des constituants des résidus sans modifications de leur structure chimique.

Le principe de la méthode est fondé sur la différence de solubilité des composés du résidu sous vide vis à vis de certains solvants.

Le désasphaltage au solvant est employé comme complément dans le raffinage des bruts à l'huile.

A partir d'une fraction pétrolière choisie, on obtient par séparation par solvant le bitume désiré.

Les solvants utilisés sont des solvants non polaires de bas poids moléculaire comme le n-propane et le n-butane qui présentent la meilleure sélectivité vis à vis du bitume. Les paramètres qui déterminent le choix du solvant sont :

- La tension de vapeur qui conditionne la solubilité de la fraction lubrifiante.
- La susceptibilité à la température de la densité qui assure le rendement de la précipitation de la fraction bitumineuse.

Il est alors possible d'obtenir des bitumes de caractéristiques différentes en faisant varier la nature du fond de distillation sous vide (degrés d'épuisement) et les conditions de fractionnement de l'unité de désasphaltage, notamment la pression.

II.2.3. LES ESSAIS SUR BITUMES :

II.2.3.1. ESSAI DE PENETRATION : NFT 66- 004

La pénétration et l'expression de la profondeur, en 1/10 de mm, à laquelle pénètre une aiguille de dimensions déterminées, dont le poids avec son support est de 100 g, dans un échantillon de bitume au bout de 5 secondes.

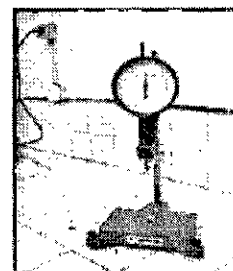


Figure II.4-
Pénétrômetre

II.2.4.2. ESSAI DE RAMOLLISSEMENT : NFT 66- 008

La consistance des bitumes décroît progressivement lorsque leur température augmente. Ils se transforment graduellement et de façon à peine perceptible, de matériaux excessivement épais et d'une fluidité lente à des matériaux mous et d'une fluidité moins visqueuse.

La température de ramollissement, donnée par la méthode « bille et anneau », est la température à laquelle une bille d'acier placée sur un petit disque de bitume contenu dans un anneau de métal, le tout étant chauffé selon un processus bien déterminé, imprime à l'échantillon de bitume, une déformation verticale définie.

Cette température se situe au début du domaine fluide
($+ 30^{\circ} \text{C} \leq T_{\text{BA}} \leq + 130^{\circ} \text{C}$).

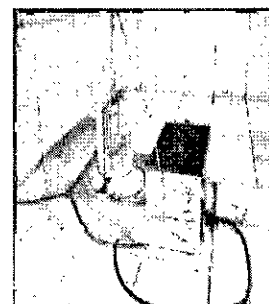


Figure II.5-
Appareil de mesure
de la température
bille et anneau

II.2.3.3. ESSAI DE FRAGILITE FRAASS:

Cet essai, qui ne fait l'objet d'aucune norme, donne la température T_{FR} à laquelle une fissure apparaît dans un film de bitume étalé sur une plaque métallique, refroidie et soumise à la flexion. Cet essai, le seul utilisé à basse température, se situe dans le domaine solide-fragile.

$$(-30^{\circ} \text{C} \leq T_{FR} \leq 0^{\circ} \text{C}).$$

II.2.3.4. MESURE DE LA DENSITE RELATIVE A 25° C : NFT 66- 007

La densité relative d'un bitume, qui varie avec la température, est déterminée, à 25° C, par la méthode du pycnomètre, comme étant le rapport de la masse d'un volume donné de bitume à la masse d'un volume égal d'eau.

II.2.3.5. PERTE DE MASSE AU CHAUFFAGE : NFT 66- 011

L'essai consiste à chauffer, dans une étuve ventilée pendant 5 h à une température de 163°C, Une couche de matériau bitumineux.

On détermine, par cette méthode, l'effet de la chaleur et de l'air sur le bitume en appréciant la réduction de la pénétrabilité et la variation de la masse de l'échantillon.

II.2.3.6. ESSAI DE DUCTILITE : NFT 66- 006

La ductilité d'un matériau bitumineux est l'allongement qui le caractérise avant qu'il se rompe, lorsqu'on l'étire, à une vitesse spécifiée et à une température donnée. La vitesse de l'essai est de 5 cm/min \pm 5%.

II.2.3.7. POINT D'ECLAIR-POINT DE FEU : NFM 07- 019

Le point d'éclair est la température la plus basse à laquelle les vapeurs qui se dégagent d'un échantillon de bitume, chauffé dans les conditions de l'essai, s'enflamment à l'approche d'une flamme.

Le point de feu est la température à partir de laquelle un échantillon de bitume prend feu et brûle pendant au moins 5 secondes.

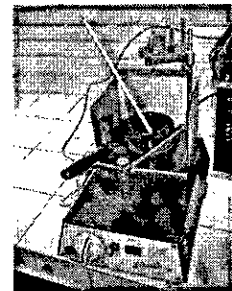


Figure II.6-
Appareil de mesure
du point d'éclair et
point de flamme

II.2.3.8. LES ESSAIS DE VIEILLISSEMENT : [17]

L'évolution du bitume, au cours de son enrobage ou in situ dans la chaussée, a fait l'objet de recherches surtout aux Etats Unis où deux méthodes de simulation du vieillissement du bitume ont été développées et sont actuellement utilisées dans tous les laboratoires de recherche à travers le monde, à savoir :

- Le Thin Film Oven Test (TFOT) qui consiste à étuver pendant 5h à 163° C, un film de liant de 3,2 mm d'épaisseur ;
- Le Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) qui consiste à étuver 35 g de bitume contenus dans une fiole cylindrique animée d'un mouvement de rotation autour de son axe horizontal pendant 75 min à 163° C en présence d'oxygène.

Le bitume incorporé dans un revêtement hydrocarboné subit deux types de vieillissement :

- 1- Rapide, à la construction ;
- 2- Lent, durant sa vie dans la route.

□ LE VIEILLISSEMENT A LA COSTRUCTION :

Lors de la fabrication et la pose des enrobés hydrocarbonés (enrobage, mélange, compactage et refroidissement), le bitume chauffé à une température de 160° C à 170° C en présence d'air subit un choc thermique qui entraîne un vieillissement rapide et limité. Ce vieillissement se traduit par une oxydation chimique importante liée à l'apport énergétique (transformation des liaisons C=C en C=O et S-H en S-O). La plupart des praticiens sont d'accord pour reconnaître que ce vieillissement à la construction se traduit généralement par une chute de la classe de bitume.

Ce type de vieillissement est correctement simulé par le TFOT ou le RTFOT.

□ LE VIEILLISSEMENT EN SERVICE :

De nombreux chercheurs ont étudié l'évolution du bitume in situ. Pour se faire, des chantiers expérimentaux ont été réalisés et des comparaisons entre le bitume original et le même bitume extrait de la route d'un certain âge ont été faites.

Ces comparaisons ont montré que des modifications dans la structure chimique du liant et dans ses propriétés physico-chimique et mécaniques se produisent :

- Augmentation de la teneur en asphaltène.
- Variations importantes des teneurs en aromatiques et en résine.
- Augmentation du point de ramollissement.
- Diminution de la pénétration.
- Augmentation de la température de fragilité Frass.
- Augmentation de la viscosité.

II.2.4. LES SPECIFICATION DES BITUMES :

L'ensemble des spécifications des bitumes les plus utilisés sont consignées dans le tableau II.1 ci-après :

Tableau II.1 : Spécifications des différentes classes de bitume [27]

Caractéristiques	Normes	20/30	40/50	60/70	80/100	180/220
Pénétrabilité à 25°C, 100g, 5 s	NFT 66-004	20 à 30	40 à 50	60 à 70	80 à 100	180 à 220
T° Bille et Anneau T _{BA} (°C)	NFT 66-008	52 à 58	50 à 56	45 à 48	42 à 48	34 à 43
Densité relative (25 °C)	NFT 66-007	1,00 à 1,10	1,01 à 1,10	1,00 à 1,07	1,00 à 1,07	1,00 à 1,07
Ductilité à (25 °C)	NFT 66-006	–	>60	>80	>100	>100
Point d'éclair (°C)	NFM07-019	>250	>250	>230	>230	>230
Solubilité dans le C2C14	NFT 66-012	>99,5	>99,5	>99,5	>99,5	>99,5
Teneur en paraffine %	NFT 66-115	< 4,5	< 4,5	< 4,5	< 4,5	< 4,5
Perte de masse au chauffage en %	NFT 66-011	< 1	< 1	< 1	< 2	< 2
ΔT_{BA} après RTFOT (°C)	–	–	≤8	≤8	A définir	–
T _{BA} min après RTFOT	–	–	≥52	≥47	≥ 44	–
Pénétrabilité résiduelle après RTFOT %	–	–	≥60	≥60	–	–
T limite de pompabilité	–	–	125	120	115	105

Deux classes parmi l'ensemble des bitumes cités dans le tableau précédent sont souvent utilisées en Algérie :

Le bitume dur 40/50 et le bitume semi-dur 80/100.

II.2.5. CRITERES DE CHOIX DES CLASSES DE BITUME EN ALGERIE : [9]

Pour éviter les consommations abusives du bitume 40/50 et afin de tomber sur le choix le plus judicieux, une première approche concernant l'emploi des bitumes purs est apparue dans le guide de renforcement de 1992. Ce dernier donne le meilleur choix en se basant sur deux critères déterminants et qui sont ; le trafic et les conditions climatiques.

Dans cette approche, les bitumes 60/70 et 40/50 restent les plus recommandés, ceci a été justifié par le climat chaud en Algérie.

Reste à vérifier si cette approche prend réellement en compte les problèmes suivants :

- Variation saisonnière de température.
- Le problème de basses températures.
- Le problème d'ensoleillement notamment pour les régions du sud.

Tableau II.2 : Choix des classes de bitume selon le guide des renforcements [16]

Zone climatique estivale	TRAFFIC					
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Chaude	60/70 ou 80/100	40/50 ou 60/70	40/50 ou 60/70	40/50	40/50	40/50
Moyenne	80/100	60/70 ou 80/100	60/70	40/50 ou 60/70	40/50	40/50
Tempérée	80/100	80/100	80/100	60/70	40/50 ou 60/70	40/50

II.2.6. MARCHÉ DE BITUME EN ALGERIE : [39]

Se marché est actuellement dominé par deux entreprises publiques issues de la restructuration de SONATRACH, il s'agit de :

- **NAFTEC** qui s'occupe de l'importation de pétrole brut réduit et son raffinage pour la fabrication de bitume pur
- **NAFTAL** chargée de stockage, de la transformation et de la commercialisation des bitumes.

A ce jour, NAFTAL dispose de presque la quasi-totalité des installations de stockage et de formulation, ce qui lui confère une situation de monopole.

La production nationale de bitume pur se limite à la fabrication de bitume pur de classe 80/100 à partir du raffinage de pétrole brut réduit importé. Cette opération se fait au niveau des deux raffineries d'Arzew et de Skikda avec une capacité totale de l'ordre de 240000 t/an.

Une fois ces bitumes produits, leur stockage se fait au niveau des unités de NAFTAL qui dispose d'une capacité totale de l'ordre de 30000 tonnes.

Finalement et dans l'objectif d'acheminer les bitumes vers leur destination finale dans les moments opportuns, deux moyens de transports sont utilisés :

- La voie maritime, qui est utilisée pour l'approvisionnement des unités côtières à partir des raffineries à l'aide de deux caboteurs ayant une capacité de 4800 tonnes
- Le transport routier, qui est utilisé pour l'approvisionnement des utilisateurs sur site (chantier ou centre de stockage des entreprises de travaux). Ce transport se fait à l'aide des attelages appartenant à NAFTAL, à la SNTR ou à l'utilisateur.

II.3. LES CUT BACKS : [2] [3] [4]

II.3.1. INTRODUCTION :

Compte tenu de la crise économique que traverse l'Algérie et compte tenu de l'importance que l'état accorde à la construction des routes, il s'avère indispensable de trouver des moyens susceptibles de participer à la réduction du taux d'utilisation des techniques de l'enrobé à chaud qui, par les informations recueillies à travers les différents acteurs concernés, sont excessivement coûteux sur tous les plans.

Il existe désormais d'autres techniques qui sont très économiques et qui ont presque les mêmes avantages que les enrobés à chaud : c'est bien entendu les enrobés à froid traités aux liants appelés cut backs ou émulsions.

Il faut reconnaître que cette technique a déjà fait ses preuves durant les années cinquante, Mais cette dernière a été abandonnée avec l'apparition du bitume qui a contribué au développement rapide de l'emploi des enrobés bitumineux.

II.3.2. DEFINITION :

Les cut backs sont des bitumes asphaltiques fluides obtenus par le mélange d'un bitume asphaltique de dureté normale (pénétration comprise entre 80 et 100), soit avec des fractions légères de distillation de pétrole telles que le kérosène, soit avec des huiles légères, ou plus souvent moyennes, provenant de la distillation des houilles.

Les cut backs se distinguent par la rapidité de prise, leur couleur franchement noire, leur pouvoir agglutinant élevé et leur siccativité.

Utilisés en France et certains pays africains, ils se divisent en 03 catégories selon la volatilité de leurs huiles. Dans chaque catégorie, il existe un grand nombre de subdivisions selon la fluidité.

On distingue selon la volatilité :

- **Les rapid-curing-(r-c) :**
Bitume fluide à l'essence avec les caractéristiques, selon STV
A 25°C 10 mm : 25/75 et 150/250 s.
- **Les medium-curing-(m-c) :**
Bitume fluide au kérosène, dont la volatilité est du pétrole lampant. Il existe 05 catégories à intervalles respectifs de viscosités.
(STV , 25°C 10 mm) : 0/1, 10/15, 50/100, 150/250, 400/600 s.
- **Les slow-curing (S-C):**
Bitume fluidifié au gas-oil.

II.3.3. FABRICATION DES CUT BACKS :

Les cut backs sont constitués d'un mélange de bitume généralement de pénétration 80/100 avec du solvant pétrolier ou du pétrole lampant.

Les solvants pétroliers ont les caractéristiques suivantes :

Tableau II.3 : Caractéristiques des solvants pétroliers

	Pétrole léger ou kérosène	Essence lourde
- Densité à 15°C	≈ 0,785	≈ 0,770
- Inflammabilité	≈ 45°C	25°C
- Distillation :		
• Point initial	100/170	125/135
• 95%	205/215	195/200
• Point final	< 230	< 205

Suivant la viscosité mesurée à l'aide d'un viscosimètre standard STV (standards par viscosimètre), la constitution des cut backs se répartit comme suit :

Tableau II.4 : Constitution des cut backs selon le viscosimètre STV

Viscosimètre STV à 25°C en s	Bitume 80-100 en %	Solvant pétrolier %
0/1 orifice 4 mm	65 à 61	35 à 39
10/15 orifice 10 mm	78 à 76	22 à 24
50/100 orifice 10 mm	85 à 83	15 à 17
150/250 orifice 10 mm	86,3 à 85,5	13,7 à 14,5
10/15 orifice 10 mm	88,7 à 88,3	11,3 à 11,7

II.3.4.DOMAINE D'APPLICATION DES CUT BACKS :

Les cut backs sont utilisés très largement dans le secteur routier, allant de l'emploi partiel, imprégnation à l'enrobage. Selon les propriétés rhéologiques, les cut back sont utilisés dans les domaines suivants :

- **Très fluide** : imprégnation de sols relativement compacts ;
- **Fluide** : imprégnation de sols relativement poreux ;
- **Semi-visqueux** : répandage et emploi partiel différé ;
- **Visqueux** : emploi partiel et enrobage ;
- **Très visqueux** : enrobage et répandage par temps chaud.

Tableau II.5 : Caractéristiques des cut backs courants à séchage moyen (MC) [35]

Caractéristiques	Méthode normalisée de référence	Bitumes fluidifiés				
		0-1	10-15	150-250	400-600	800-1400
Pseudo-viscosité mesurée au viscosimètre	NF T 66-003					
- D'orifice 4 mm, à 25° C s		< 30	-	-	-	-
- D'orifice 10 mm, à 25° C s		-	10 à 15	150 à 250	400 à 600	-
- D'orifice 10 mm, à 40° C s		-	-	-	-	80 à 200
Densité relative à 25° C	NF T 66-007	0,90 à 1,02	0,90 à 1,02	0,92 à 1,04	0,92 à 1,04	0,92 à 1,04
Distillation fractionnée (résultats exprimés en pourcentage du volume initial)						
Fraction distillant au-dessous de :	NF T 66-003					
190 ° C %		< 9	-	-	-	-
225 ° C %		10 à 27	< 11	< 3	< 2	< 2
315 ° C %		30 à 45	16 à 28	6 à 15	5 à 12	3 à 11
360 ° C %		< 47	< 32	< 20	< 15	13
Pénétrabilité à 25° C, 100 g, 5 s du résidu à 360° C de la distillation en 1/10 de mm	NF T 66-004	80 à 250	80 à 250	80 à 200	80 à 200	80 à 200
T° limite de pompabilité (°C)	-	20	35	65	70	80
Nature du solvant		kérosène				
Pourcentage moyen de solvant	-	38	24,5	15	12,5	10

II.3.5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'UTILISATION DES CUT BACKS :

□ AVANTAGES :

Un des problèmes qui préoccupent le plus les entreprises de réalisation est celui du prix de revient à la tonne du cut back qui est plus exactement évalué à 17 637 DA HT comparé au bitume routier 40/50 qui est estimé à 10 690 DA HT la tonne, (le prix du cut back revient presque le double de celui du bitume pur)

En effet, on ne peut parler d'économie si on prend uniquement le prix unitaire des produits bitumineux tous confondus dans la mesure où le cut back est plus cher, mais l'économie réside sur les moyens accessibles de cette technique qui ne demande pas de gros investissements (installation d'une centrale d'enrobage avec tous les équipements, bac de stockage, chauffage du bitume et moyens humains).

Si on réalise une étude détaillée, la différence du prix de revient à la tonne est presque trois fois moins chère par rapport aux enrobés à chaud.

La diminution du prix de revient du cut back réside dans l'exécution des tâches répétitives au niveau des chantiers et la maniabilité de l'enrobé avant et après fabrication, avec un gain net en temps, et sans contrainte en stockage de l'enrobé

□ INCONVENIENTS :

• SECURITE :

Les cut back comme tous les produits pétroliers sont inflammables, étant donné les caractéristiques des solvants entrant dans leur constitution, leur point d'inflammabilité est relativement bas. Il convient donc de les manipuler avec précaution, c'est à dire observant les règles élémentaires de sécurité.

• ADHESIVITE

En présence des granulats mouillés, l'emploi des dopes est nécessaire.

II.4. LES EMULSIONS DE BITUME :

II.4.1. DEFINITION :

On appelle émulsion des mélanges intimes, mais constituant toutefois des phases séparées de deux constituants non miscibles l'un dans l'autre. La phase dispersante ou phase continue et dans le cas le plus courant un liquide plus ou moins visqueux ou solide mou ou demi mou tel un bitume ou autre. C'est la dispersion en fines particules d'un liquide dans un autre. Cette mise en suspension n'est possible que dans le cas où :

- Les deux liquides sont insolubles l'un dans l'autre
- Leurs densités sont voisines.

L'émulsion de bitume est une dispersion de bitume dans l'eau, à laquelle est ajouté un agent tensioactif appelé émulsifiant.

Les particules de l'émulsion de bitume dispersée ont généralement un diamètre variant de 1 à 10 microns. Le liquide qui le reçoit (insoluble dans le bitume, de densité presque égale et de surcroît toujours disponible) est l'eau.

Le bitume constitue la phase dispersée, l'eau qui constitue la phase dispersante, n'est qu'un véhicule, alors que dans beaucoup d'émulsion naturelles ou fabriquées les deux ont un rôle noble. Généralement, on divise les émulsions de bitumes en deux grandes familles :

- 1- Emulsion directe : (O-W = Oil-Water), qui est un bitume ou une huile dispersé dans l'eau ;
- 2- Emulsion inverse : (W-O = Water-Oil), constituée par des globules d'eau dispersées dans le bitume ou l'huile.

Pour l'émulsion directe, la phase aqueuse est continue et appelée phase interne. Par contre l'émulsion inverse présente une phase aqueuse discontinue. Selon la polarité, on distingue deux groupes d'émulsion :

- Les émulsions anioniques ;
- Les émulsions cationiques.

Une émulsion est dite cationique si dans une phase d'électrophorèse, les particules du liquide dispersées se dirigent vers le cathode, en effet, elles contiennent des émulsifs qui sont généralement des sels d'anions dits de type $(R-NH)^+ (C1)^-$, qui en solution s'ionisent pour donner un anion négatif $(C1)^-$, et le reste de la molécule devient de charge positive, $(R-NH3)^+$ et confère aux particules de bitume une charge électropositive. Selon leur viscosité les émulsions cationiques sont classées en rapide, lente et sur-stabilisée.

II.4.2. FABRICATION DES EMULSIONS :

La fabrication d'une émulsion nécessite une énergie de dispersion et un émulsif ; qui est un type de savon fabriqué par le raffineur et ayant pour rôle d'empêcher les sphères de bitume de fusionner. Ce procédé consiste essentiellement à faire passer dans une turbine (sorte de pompe centrifuge) un mélange de bitume, d'eau et de produits tensioactifs.

La turbine disperse le bitume en fines gouttelettes dans l'eau et une fois le produit est prêt, il est stocké dans des bacs avant sa livraison.

II.4.3. LES ESSAIS SUR EMULSIONS :

II.4.3.1 DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU : T 66- 023

L'objectif de cet essai est de déterminer la teneur en eau des émulsions de bitume par entraînement à l'aide d'un solvant.

On pèse 40g d'émulsion et on lui ajoute 70 ml de toluène et de la pierre ponce. Le mélange est agité légèrement et les différents éléments de l'appareil sont assemblés. On fait circuler l'eau froide dans le réfrigérant et le récipient de distillation est chauffé jusqu'à ce que le volume d'eau recueilli dans le tube de recette reste constant et qu'il n'y ait plus d'eau visible en aucun autre point de l'appareil. Ce volume est lu à la division de l'échelle la plus voisine de l'interface eau -solvant.

La teneur en eau de l'échantillon en pourcentage, en masse, est exprimée au moyen de la formule suivante :

$$\frac{\text{Volume d'eau, en millimètre, dans le tube de recette} \times 100}{\text{Masse, en gramme, de la prise d'essai}}$$

II.4.3.2 DETERMINATION DE LA PSEUDO-VISCOSITE : T 66- 020

La viscosité des émulsions de bitume se mesure à l'aide de viscosimètre à écoulement, elle n'a qu'une valeur relative car ces produits ne se comportent pas comme des liquides newtoniens. On est donc obligé d'utiliser le terme pseudo-viscosité.

Après avoir noté le temps t_0 d'écoulement de 200 ml d'eau distillée, on note celui des 100 premiers ml d'émulsion t_1 et puis le temps t_2 correspondant à l'écoulement de 200 ml d'émulsion. Si l'écoulement est régulier, le temps t_2 doit être, à 5 secondes près :

$$t_2 = t_1 \times 2,353$$

La pseudo-viscosité de l'émulsion, exprimée en degrés Engler, est égale à : t_2/t_1

II.4.3.3 DETERMINATION DE L'INDICE DE RUPTURE D'UNE EMULSION CATIONIQUE : T 66- 017

L'essai a pour objectif l'évaluation de la rupture d'une émulsion cationique vis-à-vis de fines minérales de référence, il s'agit de l'introduction régulière et suivant un mode opératoire conventionnel d'une quantité de fines siliceuses capable de provoquer la rupture de 100 g d'émulsion.

L'indice de rupture de l'émulsion est calculé de la façon suivante :

$$I = \frac{M}{E} \times 100 \quad \text{où :}$$

E est la masse de l'émulsion

M est la masse de fines de référence introduites

II.4.3.4 DETERMINATION DU SIGNE DE LA CHARGE DES PARTICULES DE L'EMULSION : T 66- 021

L'essai consiste à plonger dans l'échantillon d'émulsion, deux électrodes reliées à un générateur de courant continu dont on peut faire varier l'intensité, et à observer le dépôt de bitume sur l'une ou l'autre des électrodes. Si les particules se dirigent vers l'anode, l'émulsion est anionique ; Les particules étant chargées négativement.

Si les particules se dirigent vers la cathode, l'émulsion est cationique, les particules étant chargées positivement.

II.4.3.5. STABILITE AU STOCKAGE PAR DECANTATION : T 66- 022

La stabilité au stockage est définie comme étant l'épaisseur de la couche superficielle de solution aqueuse qui se forme lorsque l'émulsion est laissée au repos pendant 24 heures ; cette épaisseur s'exprimant en pourcentage par rapport à la plus petite dimension du récipient contenant l'émulsion.

L'essai consiste à mesurer l'épaisseur de la couche décantée au moyen d'une électrode immergée dans l'émulsion et reliée à un pôle positif ou négatif d'un générateur de courant continu (l'autre pôle étant relié au récipient métallique contenant l'émulsion). Après passage du courant, il se produit un dépôt de bitume sur l'électrode par électrophorèse. La distance qui sépare ce dépôt de la surface de l'émulsion est égale à l'épaisseur de la couche de solution aqueuse décantée.

II.4.3.6. ADHESIVITE D'UNE EMULSION CATIONIQUE : T 66- 018

L'adhésivité correspond au pourcentage de surface du granulat recouverte d'un film de bitume. Si le granulat est entièrement recouvert de bitume, l'adhésivité est égale à 100. Si le bitume est séparé du granulat, elle est égale à 0.

L'essai consiste à malaxer l'émulsion et le granulat type, après rupture complète de cette dernière dans des conditions bien déterminées, le mélange est immergé dans de l'eau placée dans un récipient en verre. Au bout d'un temps donné, et dans des conditions déterminées, on évalue d'une manière visuelle le pourcentage de surface recouverte de liant

II.4.3.7. HOMOGENEITE PAR TAMISAGE : T 66- 016

L'essai a pour objectif la détermination de la quantité de grosses particules de liant dans l'émulsion à examiner, ces grosses particules étant classées en deux catégories :

- Particules de diamètres supérieurs à 630 μm .
- Particules de diamètres compris entre 160 et 630 μm .

L'essai consiste à faire passer une certaine masse d'émulsion à travers deux tamis d'ouverture de mailles 630 μm et 160 μm , et peser la quantité de liant retenue sur chacun de ces tamis.

II.4.4. SPECIFICATIONS DES EMULSIONS DE BITUME :

Les principales caractéristiques des émulsions anioniques et cationiques de bitume ne contenant pas de polymère, et employées pour la construction et l'entretien des chaussées, sont consignées dans les deux tableaux suivants dont le premier est réservé aux exigences pour chaque classe d'émulsion anionique et le deuxième pour celles d'émulsion cationique :

Tableau II.6 : Spécifications des émulsions anioniques [35]

Caractéristiques.	Méthodes normalisées de référence	Rapide				Lente			Surstabilisée	
		classes				classes			classes	
		Ear50	Ear55	Ear60	Ear65	Eal55	Eal60	Eal65	Eas55	Eas60
▪ Teneur en eau (%)	NF T66-023	49 à 51	44 à 46	39 à 41	34 à 36	44 à 46	39 à 41	34 à 36	44 à 46	39 à 41
▪ Pseudo-viscosité Engler à 25°C	NF T66-020	< 6	< 15	> 2	> 6	< 15	> 2	> 6	< 15	> 2
▪ Pseudo-viscosité STV à 25°C (D=4mm)		-	-	< 18	-	-	< 18	-	-	< 18
Homogénéité										
- Particules supérieures à 0,63 mm	NF T 66-016	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
- Particules comprises entre 0,63 et 0,16mm		< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25
Indice de rupture	T 66-019	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5	0	0	0	-	-
Stabilité au ciment	NF T 66-024	-	-	-	-	> 2	> 2	> 2	≤ 2	≤ 2
Charge des particules	T 66-021	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

Caractéristiques	Méthodes normalisées de référence	Rapide			Semi-rapide			Lente			Surstabilisée	
		classes			classes			classes			classes	
		ECR 60	ECR 65	ECR69	ECM 60	ECM 65	ECM69	ECL55	ECL60	ECL65	ECS55	ECS60
Teneur en eau (%)	NF T 66-023	39 à 41	34 à 36	30 à 32	39 à 41	34 à 36	30 à 32	44 à 46	39 à 41	34 à 36	44 à 46	39 à 41
Pseudo viscosité Engler à 25°C		2 à 15	>6	-	>2	>6	-	<15	2 à 15	>6	<15	>2
Pseudo viscosité STV à 25°C, diamètre de l'orificed'écoulement(4mm)	NF T 66-020	-	-	>9	<18	-	>9	-	-	-	-	<18
Homogénéité												
Particules supérieures à 0,63 mm %	NF T 66-016	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Particules comprises entre 0,63 mm et 0,16 mm %		<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25	<0,25
Stabilité au stockage par décantation	T 66-022	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Adhésivité -émulsion à stockage limité (1)												
1 ^{ere} partie de l'essai	NF T 66-018	≥90	≥90	≥90	≥90	≥90	≥90	-	-	-	-	-
2 ^{eme} partie de l'essai - émulsion stockable (1)		≥75	≥75	≥75	≥75	≥75	≥75	-	-	-	-	-
Indice de rupture	NF T 66-017	<100	<100	<100	80 à 140	80 à 140	80 à 140	>120	>120	>120	-	-
Stabilité au ciment	NF T 66-024	-	-	-	-	-	-	-	-	-	≤2	≤2
Charge des particules	NF T 66-021	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive	positive

Tableau 2.7 Spécifications des émulsions cationiques [35]

II.4.5. DOMAINE D'APPLICATION DES EMULSIONS :

Les émulsions servent à disperser surtout des substances hydrophobes dans les liquides hydrophiles non-miscibles.

Les émulsions les plus couramment employées sont les émulsions directes.

Etant donné d'une part, leur affinité électrostatique pour les agrégats à caractère acide et d'autres part, les propriétés adhésiphores de la molécule du savon cationique, les émulsions cationiques obtenues permettent d'utiliser aussi bien les matériaux acides que basiques. Leur utilisation permet la stabilisation des fondations et des sols argileux.

Les molécules des savons cationiques présentes dans la phase aqueuse de l'émulsion, peuvent en effet se fixer sur les particules d'argile par phénomène d'échange ionique, les rendant hydrophobes. On peut rencontrer l'émulsion dans chacune des parties de la chaussée :

- **Pour usage superficiel**
 - Enduits gravillonnés ;
 - Enduits de cure ;
 - Enduits de scellement ;

- **Pour usage dans la masse**
 - Graves émulsions ;
 - Enrobés ouverts ;
 - Enrobés denses ;
 - Coulis bitumineux.

CHAPITRE III

LES ENROBES HYDROCARBONES

III. LES ENROBES HYDROCARBONES

III.1. DEFINITION [2] [3] [4]

On appelle « enrobés bitumineux » (enrobés hydrocarbonés) tout mélange de granulats de diverses dimensions et d'un liant hydrocarboné.

Dans un tel mélange, la mobilisation des forces de tension superficielle (ou inter faciale) entraîne la création d'une cohésion qui s'ajoute aux forces dues au frottement interne du squelette minéral, permet d'avoir un matériau doué de certaines propriétés mécaniques (résistance à la compression, à la traction, au cisaillement...).

En faisant varier la composition granulométrique et le liant (qualité et quantité) on peut obtenir une gamme très large de propriétés débouchant sur des applications fort diverses.

III.2. CLASSIFICATION DES ENROBES HYDROCARBONES.

Pour s'y reconnaître dans ce vaste domaine de compositions et utilisations possibles, on a introduit une classification basée sur la granularité et la compacité.

III.2. 1. D'APRES LE MODE DE FABRICATION.

On distingue :

- **Les enrobés à chaud** : caractérisés par le passage des granulats dans un tambour sécheur pour les chauffer et les sécher. Le liant utilisé peut être un bitume pur, fluxé ou fluidifié, un goudron ou un liant composé, mais le plus souvent un bitume pur ;
- **Les enrobés à froid** : préparé à partir de granulats qui ne sont pas passés dans un tambour sécheur. Le liant utilisé peut être un bitume fluxé ou fluidifié, un goudron ou une émulsion.

III.2.2. D'APRES LA COMPACITE.

On distingue :

- Dans le cas des enrobés dont le calibre des plus gros éléments du squelette minéral est compris entre 6,3 et 20 mm :

- **Les enrobés denses** : dans lesquels le pourcentage des vides est inférieur à 10%. A l'intérieur de cette catégorie se placent les bétons bitumineux (ou hydrocarbonés), les enrobés denses de haute qualité caractérisés par des spécifications plus sévères en ce qui concerne la qualité des granulats, la viscosité du liant, la courbe granulométrique, les performances mécaniques et le soin apporté à la fabrication ;
- **Les enrobés semi-denses** : dans lesquels le pourcentage des vides est compris entre 10 et 15 % ;
- **Les enrobés ouverts** : dans lesquels le pourcentage des vides est supérieur à 15 %.

La combinaison de cette classification avec celle résultant du mode de fabrication permet d'aboutir à la classification résumée dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Classification des enrobés hydrocarbonés

	A CHAUD	A FROID
Compacité > 90 %	Enrobés denses à chaud (D.C) béton bitumineux (B.B)	(1)
85% < Compacité < 90%	Enrobés semi-denses à chaud (S.C)	Enrobés semi-denses à froid (S.F)
Compacité < 85%	Enrobés ouverts à chaud (O.C)	Enrobés ouverts à froid (O.F)

- Dans le cas des enrobés dans lesquels le calibre des plus gros éléments du squelette minéral est inférieur à 6,3 mm :

On ne prend pas en considération la classification basée sur la compacité. On leur attribue généralement la dénomination d'enrobés fins. S'il s'agit d'enrobés fins présentant des caractéristiques analogues à celles des bétons bitumineux, on leur attribue le nom de « micro-béton bitumineux » (ou micro béton hydrocarboné).

- Dans le cas des enrobés dont le calibre des plus gros éléments de squelette minéral est supérieur à 20 mm :

On se trouve également en présence de grave-bitume ou de grave-émulsion.

III.3. UTILISATION DES ENROBES BITUMINEUX EN TECHNIQUES ROUTIERES.

Les enrobés bitumineux sont utilisés dans la couche de surface des chaussées ou aire de stationnement (construction neuve, renforcement) ou dans les assises (couche de base et couche de fondation).

Dans le cas de l'utilisation de ces enrobés en couche de surface et tout spécialement en couche de roulement, ils doivent satisfaire les conditions suivantes :

- Offrir au roulement des véhicules une surface convenable quant à la sécurité (propriétés anti-dérapantes) et au confort (uni) ;
- Résister aux sollicitations engendrées par le trafic pour que les qualités précédentes ne soient pas compromises :
 - Sollicitations verticales (poinçonnement, déflexion) ;
 - Sollicitations tangentielles (usure, polissage, fluage, glissement).
- Résister aux sollicitations engendrées par les agents externes, autres que le trafic :

(1) Cette case est vide car les notions à froid et « denses » sont considérées comme incompatibles, étant donné que l'élimination de l'eau (de l'émulsion) ou des fluxants toujours contenus dans les liants utilisés pour l'enrobage à froid, ne peut être effectuée que si la compacité est inférieure à 90 %. Nous verrons plus loin que cette considération est actuellement mise en défaut.

- Soleil, eau, gel ;
- Fondants chimiques (sels de déverglaçage) ;
- Produits pétroliers.

Pour l'entretien, par emplois partiels, le recours aux bétons bitumineux n'est pratiquement pas possible et l'on utilise en général des enrobés à froid ; semi denses ou ouverts.

En ce qui concerne les enrobés bitumineux utilisés en assises de chaussées, les données du problème sont plus simples : il s'agit essentiellement de concilier la résistance à l'orniérage et celle à la fatigue ; c'est dans cet esprit qu'a été mise au point la technique des graves-bitumes.

III.4. QUALITES EXIGEES D'UN ENROBE.

Les qualités essentielles qu'un enrobé doit avoir sont :

III.4.1. La stabilité.

On entend par stabilité, la résistance à la déformation permanente de la couche sous l'effet à la fois des charges statiques et des charges dynamiques.

L'insuffisance de trafic se traduit par un fluage avec des dépressions, d'ornières et d'ondulations.

La stabilité augmente avec l'angle de frottement interne des granulats et la dureté des liants. Ce qui explique la tendance actuelle de l'emploi des bitumes durs (40/50) et des granulats durs et anguleux pour la formulation des bétons bitumineux pour chaussée à trafic lourd.

III.4.2. La flexibilité.

On entend par flexibilité l'aptitude à admettre sans fissuration, les déformations d'ensemble qui peuvent être imposées à la couche d'enrobé par la déflexion des couches inférieures.

L'insuffisance de la flexibilité se traduit par des fissures sur le tapis. La flexibilité dépend en premier lieu de la ductilité du liant, cette dernière doit demeurer acceptable aux basses températures pendant toute la durée de vie de l'enrobé.

Pour obtenir un enrobé à la fois stable et flexible, il faut employer un liant demeurant visqueux en été et qui ne devient pas fragile en hiver et qui de plus résiste au vieillissement.

III.4.3. L'insensibilité à l'eau.

L'incorporation des dopes peut améliorer l'affinité entre le liant et les granulats, et permet de mieux résister au dérobage des matériaux sous l'action de l'eau. Cette action peut altérer les éléments fins de l'enrobé ; par conséquent les fillers doivent contenir peu d'argile. Cette dernière réduit considérablement la stabilité d'enrobé humide.

L'enrobé utilisé en couche de surface doit posséder des propriétés particulières telles que la résistance aux efforts tangentiels et aux efforts de poinçonnement, ainsi que la rugosité ce qui suppose que les granulats ne se polissent pas facilement sous l'action de la circulation et qu'ils gardent des arêtes au contact des pneumatiques.

Une bonne liaison doit exister entre la couche d'enrobé et les couches inférieures pour éviter le décollement éventuel. Un enduit d'accrochage (cut-back ou émulsion à faible dosage) peut s'avérer nécessaire si la couche inférieure est lisse ou humide ou si des actions tangentielles sont susceptibles de s'exercer (cas de fortes déclivités, virage...) ; si la couche d'enrobé est épaisse (5 à 6 cm), l'enduit d'accrochage est généralement inutile.

III.5. ESSAIS SUR LES ENROBES.

Pour cerner au mieux les propriétés des enrobés et l'aptitude qu'ils auront à répondre à une fonction donnée, de nombreux chercheurs ont mis au point de nouvelles méthodes d'essai dans un souci d'une meilleure connaissance de certaines propriétés soit pour chercher l'explication de désordres constatés et tenter d'y apporter remède en affinant les règles de formulation, soit pour essayer de prévoir leur comportement à long terme et fournir des données indispensables aux calculs du dimensionnement des chaussées.

Généralement, il existe deux types d'essais pour caractériser un enrobé en laboratoire :

- 1) Des essais qui tentent de simuler le comportement d'un enrobé lorsqu'on le met en œuvre et qu'on le compacte.
 - Presse à cisaillement giratoire qui caractérise le pourcentage de vides d'un mélange hydrocarboné soumis à un compactage isotherme.
 - L'essai Marshall qui permet de compacter des éprouvettes par damage puis de les soumettre à un essai de compression simple suivant une génératrice.
 - L'essai Duriez ou l'essai de compression simple L.C.P.C qui permet de déterminer, pour une température et un compactage donnés la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à partir du rapport des résistances à la compression avec et sans immersion des éprouvettes dans l'eau.

- 2) Des essais qui tentent de simuler le comportement d'un enrobé en service.
 - Duriez et Marshall (empiriques)
 - L'essai à l'ornièr LPC
 - Les essais de module (intrinsèque)
 - Les essais de fatigue (intrinsèque)

Les informations délivrées par ces essais sont différentes et le choix de l'essai à faire dépend des caractéristiques recherchées car il n'est pas pensable, pour des raisons de durée et de coût, à l'utilisation systématique de tous les essais.

Le tableau suivant donne pour chaque essai, les principales informations délivrées.

Tableau III.2 : Essais sur enrobés et informations délivrées

ESSAI	INFORMATIONS DELIVREES
Duriez	Compacité, résistance à sec, tenue à l'eau
Marshall	Compacité
Orniéreur	Résistance à l'orniérage
Presse à cisaillement giratoire	Maniabilité, prévision de la compacité sur chantier en fonction de l'épaisseur
Module complexe	Rigidité
Fatigue	Durée de vie en fatigue

III.5.1. LES ESSAIS CLASSIQUES SUR LES ENROBES BITUMINEUX.

- **L'ESSAI MARSHALL : [29]**

L'essai Marshall consiste à écraser à 60° C, entre deux mâchoires, Une éprouvette cylindrique de 10 cm de diamètre et de 6,3 cm de hauteur. Les mâchoires s'appuient sur deux génératrices opposées et la vitesse d'avancement est constante et égale à 50 mm par minute. On note l'effort maximum à la presse et la déformation diamétrale de l'éprouvette au moment de la rupture, c'est à dire au maximum d'efforts de la presse. L'effort maximum est la stabilité et la déformation relevée est l'écrasement ;

- **L'ESSAI DURIEZ : [30]**

Le but de l'essai Duriez est de caractériser les qualités de résistances mécaniques et de désenrobage par l'eau des matériaux classiques. Les résultats de l'essai Duriez suffisent à eux seuls à caractériser convenablement la qualité du matériau, dans d'autres cas, on pourrait avoir avantage à les compléter par les résultats d'autres essais (essais Hubbard Field pour les matériaux fins, et l'essai Marshall pour les matériaux à base de granulats ronds ou très anguleux).

L'essai Duriez diffère de l'essai Marshall dans la température de l'essai qui est de 18°C au lieu de 60°C, il lui diffère aussi dans le mode d'application de la charge qui est axiale alors qu'elle était radiale pour l'essai Marshall.

- **L'ESSAI HUBBARD FIELD : (Norme A.S.T.M.-D-1138)**

Le but de cet essai est de déterminer la stabilité Hubbard Field, il consiste à mesurer l'effort maximal s'exerçant sur une éprouvette placée sur un appui cylindrique creux d'un diamètre intérieur légèrement inférieur au diamètre extérieur de l'éprouvette. L'essai s'effectue à 60°C aux Etats Unis, et à 18°C en France. La charge est appliquée à la face supérieure de l'éprouvette à une vitesse de 1 mm/sec, l'effort maximal qui provoque l'extrusion de l'éprouvette est appelé stabilité Hubbard Field.

III.5.2. LES ESSAIS PARTICULIERS SUR LES ENROBES BITUMINEUX.

▪ LA PRESSE A CISAILLEMENT GIRATOIRE : P.C.G : [31]

L'essai consiste à soumettre des éprouvettes à une action de pétrissage, conjuguée à une faible compression statique simulant l'effet de compacteurs sur chantier.

L'action de compactage est réalisée à températures et vitesses de rotation constantes. Elle est suivie par l'enregistrement simultané en fonction du temps, de la hauteur de l'éprouvette et de l'évolution de la force d'inclinaison F nécessaire pour maintenir l'angle ϕ constant. L'essai s'arrête automatiquement après 200 girations.

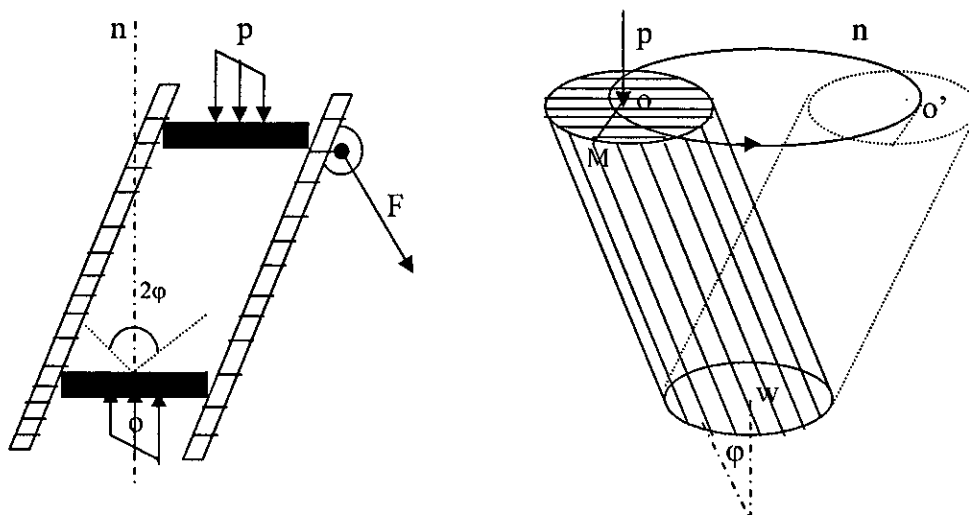


Figure III.1- Principe de compactage à la presse à cisaillement giratoire

Les paramètres de l'essai sont :

- Pression verticale : 6 bars
- Angle d'inclinaison : 1 degré
- Vitesse de rotation : 6 tours/min
- Température de l'essai : en fonction de la dureté du bitume.

▪ L'ORNIEREUR : [32]

L'orniéreur est un appareil destiné à tester le comportement des enrobés bitumineux sous l'effet d'une charge roulante. C'est un simulateur de trafic qui permet de caractériser la résistance à l'orniérage des enrobés. L'essai se fait sur des plaques rectangulaires prélevées sur routes puis sciées, ou sur des plaques fabriquées en laboratoires. Les éprouvettes ont les dimensions suivantes :

- Longueur : 500 mm
- Largeur : 180 mm
- Hauteur : jusqu'à 150 mm

Lors de l'essai, deux roues animées d'un mouvement alterné passent chacune sur une plaque de matériau dont on observe les dégradations. Les caractéristiques essentielles sont :

- Cadence de fonctionnement : 1 aller-retour par seconde
- Vitesse maximale : 1,6 m/s ;
- Accélération maximale : 10 m/s² ;
- Fréquence de mouvement : 1 Hz ;
- Pression de pneumatique : 6 bars ;
- Charge : 500 Kg par roue ;
- Température de l'essai : 60°C pour la couche de roulement et 50°C pour la couche de base.

L'ornièrre est définie par la diminution relative de l'épaisseur de la plaque dans la trace de la roue. L'essai est terminé à 10⁵ cycles. Elle est mesurée à l'aide d'une jauge de profondeur.

La courbe de l'évolution de l'ornièrre en fonction du nombre de cycles est généralement une droite en coordonnées semi-logarithmique d'équation.

$$Y = A + B \lg N$$

Où Y = ornièrre à N cycles

A et B = constantes dépendant de la formulation testée.

On estime qu'un enrobé hydrocarboné présente une bonne résistance à l'ornièrre si l'ornièrre à 10000 cycles est inférieure à 10 mm pour une plaque de 10 cm d'épaisseur, soit 10%

▪ L'ESSAI DE FLUAGE STATIQUE UNIAXIAL.

L'essai consiste à charger axialement, avec une charge constante des éprouvettes cylindriques d'enrobés afin de déterminer la déformation résultante dans la direction de la charge.

La déformation relative égale au rapport $\Delta H/H$ peut être représentée en fonction du temps. Les conditions de chargement sont :

$$F = 500\text{N} ; \sigma = 0,1 \text{ Mpa} ; T = 40^\circ\text{C} ; t = 1 \text{ h}$$

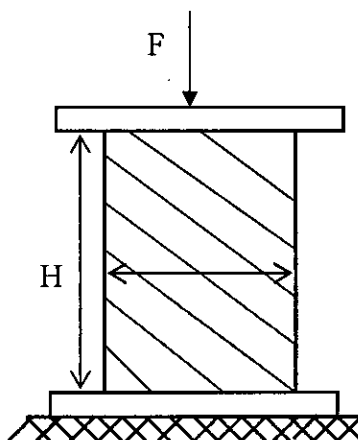


Figure III.2- Schéma de principe de l'essai de fluage statique

▪ L'ESSAI DE FLUAGE DYNAMIQUE.

L'essai consiste à contraindre un échantillon d'enrobé à fluer en lui appliquant une charge dynamique avec des conditions spécifiques de charge, température et fréquence jusqu'à ce qu'une déformation standard soit atteinte. Le temps requis pour atteindre cette déformation standard s'appelle "durée de vie en fluage dynamique". L'aspect spécifique de cet essai est qu'il permet la simulation dynamique du phénomène d'ornièrè.

L'essai s'effectue sur une éprouvette de forme cylindrique (diamètre 10 cm, hauteur 13,7 cm) qui peut provenir soit de la chaussée soit d'un échantillon de matériau fabriqué en laboratoire à l'aide d'un compacteur de plaques de manière à reproduire le compactage sur chantier.

Placée dans une cellule thermorégulée, l'éprouvette est soumise à une contrainte verticale sinusoïdale de compression dont l'amplitude et la fréquence sont constantes. On y superpose une contrainte de compression statique et isotrope. Sous l'effet de chargement, l'échantillon subit une déformation axiale.

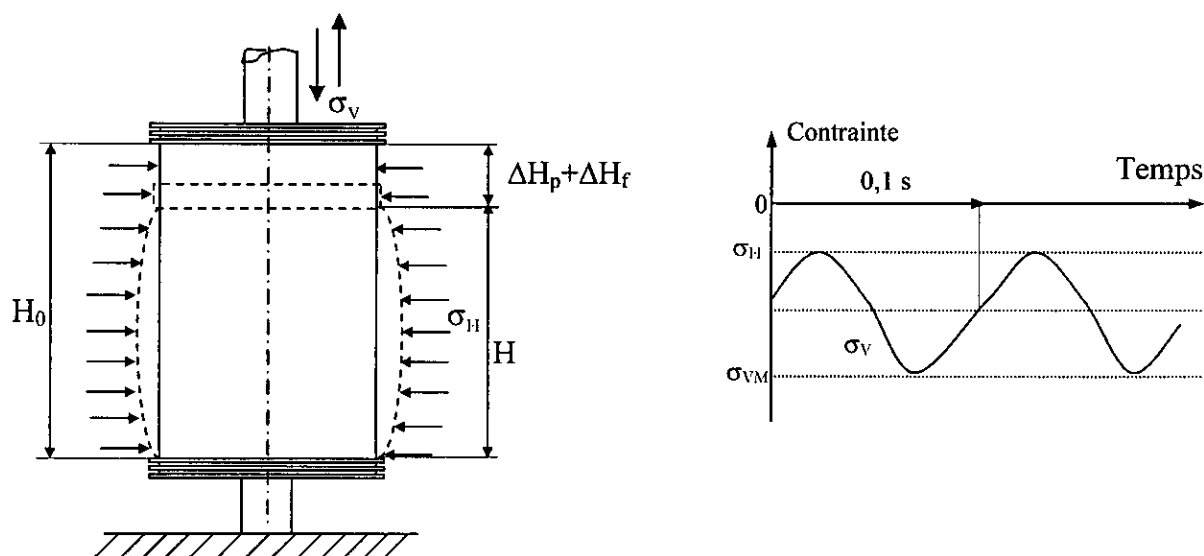


Figure III.3- Schéma de principe de l'essai de fluage dynamique

Soit H_0 la hauteur initiale de l'échantillon et ΔH_p , la variation de hauteur associée à la partie permanente de la déformation. La courbe de variation de la déformation permanente $\epsilon = \Delta H_p / H_0$ en fonction du nombre de cycles de chargement est appelée courbe de fluage. Le prolongement de la partie linéaire de cette courbe permet de définir trois paramètres :

- Le fluage initial ϵ_0 ;
- La vitesse de fluage $\epsilon' = d\epsilon / dN$ ou taux de fluage qui s'exprime en pour cent par million de cycles (% MC)
- la durée de vie à 6%, N_6 , définie comme le nombre de cycles nécessaire pour atteindre une déformation permanente de 6%, elle s'exprime en millions de cycles (MC).

L'essai s'effectue dans les domaines de mesures suivants :

- $0 < f < 0 \text{ Hz}$
- $-10^\circ \leq T \leq 30^\circ \text{ C}$
- Pression latérale dans la cellule comprise entre 0 et 10 bars.

▪ L'ESSAI DE TRACTION DIRECTE : [33]

L'objectif principal de l'essai de traction directe est de permettre de comparer des enrobés du point de vue dimensionnement et fatigue. L'appareil se compose d'une machine d'essai en compression sur laquelle a été adapté un étrier de traction qui réalise l'inversion du mouvement. La machine est mue par un moteur asynchrone, muni d'une boîte de vitesse, qui délivre à l'éprouvette un signal de type $\varepsilon(t) = a t^n$

Cet essai permet d'atteindre une valeur de la résistance à la rupture en traction directe. Il permet en outre de déterminer le module dans le domaine linéaire, en fonction du temps de chargement et à plusieurs températures.

III.5.3. FATIGUE DES ENROBES.

Dans la chaussée, les enrobés subissent des contraintes et des déformations complexes et aléatoires et il est impossible de reconstituer en laboratoire les conditions de travail réelles des matériaux.

Mais, si on admet l'hypothèse de rupture par fatigue par des allongements horizontaux excessifs répétés à la base des couches d'enrobés, les essais de laboratoire conçus à partir de cette hypothèse simplificatrice et en utilisant des formes d'éprouvettes diverses peuvent simuler au mieux le comportement des différents types d'enrobés sur chantier. Nous pouvons grouper ces différentes méthodes d'essai en deux catégories :

1. Essai en flexion (flexion de poutre, de console, de plaque)
2. Essai en traction-compression

Après avoir choisi un mode de sollicitation, un type d'éprouvette, une machine de fatigue, il reste encore un choix essentiel à faire entre :

- 1 Le mode de fatigue à amplitude de contrainte constante
- 2 Le mode de fatigue à amplitude de déformation constante.

III.5.4. LE MODULE COMPLEXE.

Les enrobés bitumineux sont des corps viscoélastiques et, comme tous les corps de ce type, ont des propriétés mécaniques qui dépendent de la durée de la sollicitation qu'ils subissent et de la température à laquelle celle-ci s'exerce.

La caractéristique la plus couramment utilisée pour définir le comportement de tels matériaux est le module complexe.

A l'image de son équivalent élastique (le module de Young), le module complexe opérationnel, déterminé à partir d'un essai dynamique, s'obtient en faisant le rapport entre

$$\text{La contrainte imposée} \quad \sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t)$$

Et la déformation résultante $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$.

Qui, à cause du caractère viscoélastique du matériau, accuse un retard sur la contrainte se traduisant par un angle de phase φ

Le matériau conserve un comportement linéaire, les déformations sont suffisamment petites.

La contrainte et la déformation relative sont reliées par le nombre complexe E^* défini par :

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \varepsilon^{t\varphi}$$

En notation imaginaire, le module complexe s'écrit donc :

$$E^*(\omega t) = |E^*| \varepsilon^{t\varphi} = E_1 + i E_2 \quad \text{où} \quad |E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

E_1 : partie réelle du module, en phase avec la contrainte et qui représente la partie de l'énergie perdue par frottement interne au sein du matériau ;

E_2 : partie imaginaire du module, en quadrature avec la contrainte et la déformation et qui donne une idée de l'énergie perdue par frottement interne au sein du matériau ;

φ : l'angle de phase entre la contrainte et la déformation, et qui donne une idée précise sur la prédominance visqueuse ou élastique du matériau :

$\varphi = 0$ pour un corps purement élastique ;

$\varphi = \pi/2$ pour un corps purement visqueux.

Le rapport des amplitudes respectives de la contrainte et de la déformation relative est appelé module de rigidité et est noté $|E^*|$ ou S (stiffness modulus).

$$|E^*| = S = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$$

La composante $|E^*|$ est la plus importante sur le plan pratique (dimensionnement) et l'angle de phase φ , par contre, intervient dans l'interprétation fondamentale du comportement des matériaux, et permet, notamment, l'estimation du frottement interne et le calcul de l'énergie dissipée dans la matière.

Plusieurs méthodes existent, pour le calcul du module complexe, et que nous classons en deux catégories :

- Les méthodes empiriques
 - Méthode de Heukelom et Klomp [23]
 - Méthode de Saunier [43]
 - Méthode de Verstraeten [44]
 - Méthode de Francken [23]
- Les méthodes expérimentales [23]

CHAPITRE IV

LES ENROBES A FROID

IV. LES ENROBES A FROID

IV.1. INTRODUCTION :

Dans la nomenclature routière, les matériaux sont dits traités à chaud si, au moment de leur élaboration, les granulats qui les composent subissent une brusque et nette élévation de température dans le but de les déshydrater et de les chauffer.

Dans le cas contraire, les matériaux sont dits traités à froid.

Il y a fort longtemps que les assises de chaussées sont réalisées avec des agrégats, et les premiers enrobés à froid ont été fabriqués il y a un demi-siècle, mais par la suite, concurrencés pour des raisons techniques ou économiques, ils ont été abandonnés. Les progrès réalisés dans la formulation ont permis d'envisager à nouveau les techniques à froid avec un nouvel œil.

Les enrobés à chaud qui constituent les revêtements les plus répandus des autoroutes, des routes à fort trafic et des aérodromes, sont remplacés par des enrobés à froid pour diverses raisons :

- Coût de séchage des granulats et de chauffage du liant pour des petits chantiers ;
- Absence de gravillon et exécution de revêtements avec des matériaux tout venants ;
- Distances de transport importantes à partir d'installations fixes, qui conduisent à rechercher des enrobés pouvant être transportés pendant plusieurs heures voire plusieurs jours ;
- Commodité d'emploi pour l'entretien routier (enrobés stockables).

IV.2. DEFINITION : [2] [3] [4]

L'enrobage à froid est un procédé dans lequel les granulats sont généralement enrobés sans séchage préalable et à une température ambiante. Corrélativement le liant doit permettre l'utilisation du bitume à une température nettement inférieure à celle nécessaire pour l'enrobage à chaud au bitume pur. On peut utiliser soit un bitume fluidifié soit une émulsion de bitume.

Les enrobés à froid sont du type ouverts (% des vides supérieur à 12%) ou semi-dense (% des vides compris entre 8 et 12%). Le caractère ouvert de ces enrobés est impliqué par la nature de l'enrobage : il permet en effet soit l'évaporation du solvant contenu dans le cut-back, soit l'évaporation de l'eau après rupture de l'émulsion.

Les avantages essentiels d'enrobage à froid résident d'une part dans le caractère économique que confère l'utilisation d'un matériel beaucoup plus réduit que dans le cas de l'enrobage à chaud, et d'autre part dans le fait que les enrobés sont stockables.

Les postes d'enrobage à froid sont des postes continus de conception simple et facilement transportables.

IV.3. DOMAINE D'UTILISATION :

Cette technique est essentiellement une technique de surface, et donc doit apporter en premier lieu étanchéité et adhérence.

Par rapport aux techniques traditionnelles concurrentes, l'enrobé à froid peut être utilisé lorsqu'un enduit superficiel paraît mal adapté, par exemple :

- Lorsque le trafic poids lourd et le site peuvent faire craindre l'entaille des granulats dans le support ;
- Si le support est trop hétérogène ;
- Lorsqu'il y a usure prononcée des bandes de roulement ;
- Si le niveau sonore doit être limité ;
- En cas de tracé trop tourmenté.

Il est évident que son coût global (y compris préparation éventuelle du support) doit aussi dans ce cas être inférieur à celui d'un enrobé d'entretien.

Les limites d'emploi actuel paraissent être les suivantes :

- Trafic maximal : de l'ordre de 1 000 poids lourds par jour par sens ;
- Déformabilité du support : il est difficile aujourd'hui de fixer la déformation admissible pour garantir une durée de vie suffisante ;
- Orniéage : les enrobés à froid ne répondent pas à ce type de dégradation à moins qu'il ne s'agisse d'un orniéage d'usure ou de post-compactage et qu'il n'excède pas 30 mm. Pour ces ornières importantes, une préparation du support est nécessaire pour amener les déformations à 10 mm maximum.

IV.4. LES ENROBES A FROID AU BITUME FLUIDIFIE (CUT BACK) :

IV.4.1. LES CUT BACKS :

Ce sont des bitumes fluidifiés avec un solvant pétrolier, destinés à permettre un emploi soit à la température ambiante soit après un chauffage modéré. La viscosité du bitume est considérablement abaissée par adjonction d'un solvant, produit pétrolier plus ou moins volatil. Le solvant est destiné à s'évaporer après emploi du cut back, de façon que le liant résiduel soit du bitume (un liant rigide pour résister aux efforts dus aux véhicules).

Ces cut backs, qui se présentent sous la forme de liquide noir plus ou moins visqueux, sont caractérisés schématiquement par :

- La nature du solvant qui conditionne la vitesse de séchage ;
- La quantité de solvant qui conditionne la viscosité à l'emploi.

Les usages de cut back sont multiples :

- Imprégnation de couche de base compactée. Il faudra un liant fluide afin de pénétrer facilement dans la couche traitée et à séchage lent afin que la pénétration ait le temps de se faire avant que la viscosité ait augmenté ;
- Enduits superficiels : il faudra un cut back à séchage rapide afin que les véhicules n'arrachent pas les gravillons et plus ou moins visqueux selon les facilités d'exécution qu'on recherche ;
- Enrobage : il faudra un cut back moyennement visqueux et à séchage rapide selon la durée de stockage avant emploi.

La viscosité du cut back, caractéristique essentielle à contrôler lors d'une livraison, est mesurée par un essai d'écoulement. L'essai se pratique à 25 °C, il consiste à noter le temps en secondes mis par une quantité donnée du liant étudié pour s'écouler au travers d'un orifice de 4 mm (cut back fluide) ou de 10 mm (cut back visqueux).

IV.4.2. LES ENROBES A FROID AU CUT BACK :

Les cut backs souvent utilisés sont les 150/250 ou, selon la période et les conditions d'utilisation le 50/100 (plus fluide) ou le 400/600 (plus visqueux). Pour des raisons de souplesse d'exploitation dans des cas particuliers, on peut aussi utiliser des mélanges bitume cut backs de viscosité équivalente. Il faut éviter d'utiliser un liant trop fluide qui enrobe mal le matériau et est facilement déplacé par l'eau ou un liant trop visqueux qui peut provoquer un collage des enrobés dans la période de stockage. L'augmentation de la viscosité du liant, due à un abaissement de température ou à l'évaporation des solvants qui se produit à la surface du tas d'enrobés stockés, doit rester un phénomène superficiel et ne pas nuire à la reprise et à la maniabilité des matériaux.

Les températures normales d'utilisation des bitumes fluidifiés pour l'enrobage varient de 80 °C à 110 °C selon la viscosité.

L'enrobage, l'adhésivité et la tenue des enrobés à froid dépendent pour une grande part de la nature pétrographique des agrégats, de leurs caractéristiques, de leurs granulométries, de leur propreté et leur taux d'humidité.

Si on a affaire à des matériaux secs, l'enrobage est généralement facile mais l'enrobé obtenu peut être sensible à l'action de l'eau et avoir tendance à se désenrober. La sensibilité à l'eau est alors fortement diminuée par le dopage du liant dans la masse. Cette dope est une huile fluide soluble dans les hydrocarbures et le dosage à utiliser est de l'ordre de 2% par rapport au liant (2 Kg de dope par tonne de liant).

Si les matériaux sont humides, l'enrobage peut présenter des difficultés du fait qu'il faut déplacer de l'eau par le liant à la surface des agrégats. L'enrobage est facilité par le mouillage préalable des matériaux avec une solution aqueuse d'une dope d'interface ; le dosage peut varier de 5 à 10 litres de solution par tonne de gravillons (soit de 0,5 à 1 kg de dope par tonne de gravillons).

IV.5. LES ENROBES A FROID A L'EMULTION:

IV.5.1. L'EMULTION DE BITUME :

Une émulsion est un système hétérogène constitué par une dispersion, plus ou moins stabilisée, d'un liquide sous forme de fines particules (phase dispersée) dans un autre liquide non miscible (phase dispersante). Les émulsions bitumineuses sont des émulsions directes où le bitume constitue la phase dispersée discontinue et l'eau la phase dispersante continue. Le pourcentage de bitume varie généralement de 50% à 70% ; le diamètre moyen des globules de bitume est de quelques microns.

La fabrication et la stabilité des émulsions nécessitent l'utilisation de composés stabilisants tensioactifs appelés émulsifiants. La constitution d'un émulsifiant lui confère une affinité pour les deux phases : affinité pour le bitume (partie lipophile) et affinité pour l'eau (partie hydrophile).

Le rôle de l'émulsifiant est double :

- Faciliter la fabrication de l'émulsion en abaissant la tension inter faciale bitume-eau ;
- Stabiliser l'émulsion en faisant en sorte que les globules, entourées d'une enveloppe d'ions, se repoussent les un des autres.

• **Caractéristiques principales des émulsions :**

- Teneur en eau et en liant ;
- Viscosité ;
- Diamètre des particules ;
- PH ;
- Stabilité au stockage ;
- Vitesse de rupture.

IV.5.2. LES ENROBES A FROID A L'EMULSION DE BITUME :

La possibilité de déposer un film de bitume à température ambiante sur des agrégats non préalablement chauffés est ici donnée par les dispersion du bitume enrobé à froid en globules de faible diamètre dans une phase dispersante constituée par une solution aqueuse d'un savon émulsion.

Les émulsions d'enrobage sont à base de bitume fluide : si on employait des bitumes purs, les enrobés manqueraient de maniabilité et seraient semblables à des enrobés à chaud brusquement refroidis. Le bitume de base du type 180/220 est généralement fluidifié avec un cut back 0/1 dans des proportions qui varient selon la saison (de 10% en été jusqu'à 40% en hiver de cut back par rapport au liant total).

Les émulsions généralement utilisées sont des émulsions cationiques d'enrobage à 60 ou 65% de liant.

Le dosage en émulsion de l'enrobé à froid dépend évidemment de la granularité des matériaux à enrober. A titre indicatif on peut donner les dosages suivants :

Tableau V.1 : Le dosage en émulsion en fonction de la granulométrie des matériaux

Granulométrie des matériaux	2/5 et 5/8	8/12,5 et 5/15	12,5/18
Liant résiduel nécessaire	5,5%	5%	4,5%
Dosage émulsion à 60%	9,2%	8,4%	7,5%
Dosage émulsion à 65%	8,5%	7,7%	7%

Si l'enrobé est surdosé, il devient trop mou ; un excès de liant important peut provoquer des fluages et des déformations diverses sur les enrobés mis en œuvre. Si l'enrobé est sous dosé, le liant est trop mince, l'enrobé manque de cohésion et risque d'être désenrobé.

L'aptitude à la rupture d'une émulsion dépend de la nature minérale des matériaux et de la surface spécifique qui varie de façon importante avec le taux de filler ; une émulsion cationique donnée ne peut prétendre enrober tous les matériaux. Si l'émulsion a une rupture rapide, elle enrobera parfaitement les matériaux propres mais par contre elle rompra trop rapidement sur des

matériaux à surface spécifique élevée : le liant résiduel s'étalera mal sur les surfaces minérales (surtout si celles-ci présentent de nombreuses cavités comme c'est le cas pour les roches éruptives) et le liant aura tendance à former des boulettes avec les matériaux les plus fins.

Si les matériaux sont sales ou très poussiéreux, une émulsion cationique plus riche en émulsifiant facilitera l'enrobage et l'adhésivité.

IV.6. FORMULATION D'ENROBE A FROID :

La formulation d'un enrobé à froid consiste à rechercher dans un premier temps, les meilleures proportions de ses différents constituants, après s'être assuré de leur compatibilité, puis à évaluer à l'aide de tests de laboratoire suffisamment prédictifs, d'une part le comportement de l'enrobé mis en œuvre, et d'autre part sa durabilité sur la chaussée.

Dans la phase malaxage/répannage, qui a lieu presque simultanément, l'enrobé doit être suffisamment liquide pour bien se répandre sur la chaussée et assez épais pour éviter la ségrégation des granulats. A jeune âge, il doit être assez cohésif pour supporter une remise au trafic dans les délais les plus brefs. Au cours de sa vie l'enrobé doit ensuite compter sur un certain nombre de qualités telles que l'imperméabilité, le collage sur le support, une bonne rugosité et une bonne résistance à l'abrasion et à l'orniérage. Ces dernières reposent sur la bonne formulation du liant résiduel, la nature et les propriétés des granulats déterminant la rugosité et la résistance à l'abrasion des enrobés.

Les principales méthodes d'essais existantes pour aider à la formulation d'enrobés à froid sont décrites par l'ISSA. Elles permettent l'évaluation de leur maniabilité et leur cohésion, et la détermination de la teneur optimale du liant nécessaire pour un meilleur enrobage.

Dans la perspective d'un nouveau chantier, le formulateur, après avoir choisi la granularité 0/6, 0/8 ou 0/10 continue ou discontinue, va devoir sélectionner et associer les matières premières décrites précédemment pour atteindre deux objectifs bien distincts :

- Pouvoir fabriquer, mettre en œuvre un enrobé de qualité, ouvrir au trafic le revêtement dans un délai compatible avec les contraintes du trafic, ceci en prenant en compte les conditions climatiques du moment ;
- Obtenir de façon durable une qualité d'enrobage et des caractéristiques de surface (macro texture, adhérence, niveau sonore) requises pour le site considéré.

IV.7. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES ENROBES A FROID :

Les avantages des enrobés à froid résident dans le fait d'une part qu'ils nécessitent un matériel beaucoup plus réduit que celui exigé par l'enrobage à chaud ; d'autre part, les enrobés ainsi obtenus sont stockables et peuvent être donc mis en place à l'instant désiré.

- Le séchage des enrobés à froid doit être possible mais il doit aussi se réaliser avant que la circulation ne soit mise en danger. Ces enrobages dont les performances mécaniques sont très médiocres aux premiers âges doivent avoir un séchage aussi rapide que possible, ce qui suppose à la fois un liant à séchage rapide (émulsion, cut back à séchage rapide) et un enrobé aussi ouvert que possible ;
- La couche d'enrobé ainsi réalisée doit vérifier certains critères :

- Elle doit être étanche afin d'éviter l'infiltration de l'eau dans la chaussée ;
 - Elle doit être stable même enrobée à froid, et ne doit pas voir ses performances mécaniques diminuer en période de pluie.
- Dans le cas d'un enrobé à froid, il convient d'éviter les excès en liant, car ils provoquent une texture fermée qui ne permet pas l'évaporation des solvants et donnent une très grande déformabilité ;
 - Dans certains techniques routières et particulièrement au Sahara, l'utilisation des enrobés à froid est une pratique beaucoup plus apte que les enrobés à chaud ;

Les inconvénients des enrobés à froid sont de plusieurs types :

- Séchage : avec des formules continues, le séchage est difficile, par contre avec des enrobés ouverts il n'y a aucun problème avec des cut back à forte viscosité ou à séchage rapide. Dans le cas de revêtement en forte épaisseur, la première couche doit être très grossière, et la deuxième à texture plus fermée.
- Compactage : il est très difficile de choisir le moment propice au compactage, s'il est prématuré, il ne permet pas une première évaporation, et s'il est trop tardif il devient délicat et ne permet pas une bonne agglutination des grains, le bitume durcissant prématurément ;
- Modification de la viscosité : le bitume résiduel est nettement plus mou que le bitume de base. Des essais de distillation à 360° C montrent qu'il reste 2,5% de solvants dans le bitume résiduel. Ceci modifie les pénétrations standards et la température de ramollissement ;
- L'emploi des enrobés à froid ne doit pas être systématiquement écarté, cependant lorsqu'on désire un produit élaboré et parfaitement maîtrisé en compacité, teneur en liant et viscosité, on aura intérêt à utiliser des enrobés à chaud. Ceci est particulièrement vrai dans le cas de grands ouvrages : autoroutes, aérodromes et routes à forte circulation ;
- L'enrobé à chaud suivra mal les déflexions et les tassements successifs, c'est pour cela que l'enrobé à froid est idéal et sera nettement plus économique que l'enrobé à chaud.

CHAPITRE V

LES SABLES ET LEUR UTILISATION EN TECHNIQUE ROUTIERE

V. LES SABLES ET LEUR UTILISATION EN TECHNIQUE ROUTIERE.

V.1 GENESE : [15]

On appelle couramment sables les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3 mm et dont les passants à 80 μ n'excèdent pas 35%.

Les sables sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation comportant à des degrés divers une décomposition sur place des différentes roches suivies d'un transport fluvial et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz qui devient de plus en plus abondant à mesure que la taille des grains décroît. Les grains de sable peuvent présenter un aspect différent :

- grains émoussés et luisants (usure due au déplacement par l'eau)
- grains ronds (déplacement par le vent)
- grains non usés.

À côté du quartz, on trouvera dans la fraction la plus grossière des débris de roches et, présents en faibles quantités des débris de feldspaths. Il est à noter que ces derniers sont surtout sous forme d'argile obtenue par destruction du réseau minéral par hydrolyse et en particulier en climat tropical par une attaque chimique intense. À cette composition classique des sables, peuvent s'ajouter des sulfates et des carbonates provenant de la cristallisation sous l'action de l'évaporation des sels en solution (en particulier dans les zones arides à faible pluviométrie et forte évaporation).

V.2 SABLES DU SAHARA : [8]

Le sable est l'un des matériaux les plus abondants du Sahara et même à peu près le seul dans de vastes zones.

La technique routière saharienne qui s'élabore actuellement a donc du faire au sable une très large place. Les différents types de sables sahariens sont :

□ DEPOT ALLUVIONNAIRE :

Les sables de rivière rencontrés au Sahara sont, soit dans certains oueds à écoulement fréquent de la bordure de l'Atlas (dépôts actuels), soit dans des lits d'anciens oueds dont l'écoulement remonte à des époques géologiques antérieures. Les principaux types retenus pour les usages routiers sont les suivants :

- Sable graveleux ou non à granulométrie assez étalée et avec fines (15 à 30 %), utilisé pour la couche de fondation et couche de base (technique du sable-argile) ;
- Gros sable de préférence graveleux à granulométrie étalée pour enrobés (enrobés à froid lorsqu'il y a assez de grossier ou sable enrobé à chaud).

□ **SABLES EOLIENS :**

Le classement éolien a pour conséquence au Sahara de réserver la granulométrie des sables. Les dunes sont constituées de sable plus ou moins fin, à granulométrie serrée ou très serrée.

□ **SABLES DE REGS :**

Le reg est une formation de surface qui recouvre de vastes zones plates ou à relief très mou, où l'action du vent a balayé le sable fin et enrichi la surface d'éléments plus gros tels les cailloux, gravier, gros sable, qui se trouvent disposés d'une manière régulière.

□ **SABLES GEOLOGIQUES EN PLACE :**

On peut ranger sous cette dénomination des formations continentales de sols fins, tels que les sables argileux du continental intercalaire (appelé parfois albien) qui affleurent à la bordure ouest et sud du Sahara central et oriental ; Reggane, Adrar, In Salah, plateau du Tahouratine .

□ **SABLES GYPSEUX :**

Nous rangeons dans une catégorie spéciale, en raison de leur large utilisation routière, des sables contenant des proportions variables de gypse et qui peuvent être soit des sables géologiques en place, soit des dépôts alluvionnaires.

□ **SABLES GYPSO-CALCAIRES DES PLATEAUX ENTRE OUARGLA ET HASSI-MESSAOUD**

Dans ces plateaux, on trouve sous une dalle de calcaire assez dure de surface, un mélange de cailloux calcaires mi-durs et de sable gypso-calcaire. Ce tout venant a été utilisé pour la route Ouargla/ Hassi Messaoud. Ces sables gypso-calcaires n'ont pas été utilisés seuls jusqu'ici.

V.3. CLASSIFICATION : [15]

L'intérêt de la classification est de regrouper en familles les matériaux qui présenteront des points communs soit dès leur genèse, soit dans leur comportement lié à un usage précis. On conçoit de ces conditions qu'il n'y a pas une classification, mais des classifications selon l'usage envisagé, chacune répondant à une fonction. Il existe de ce fait des classifications géologiques, pédologiques, géotechniques.

En ce qui concerne l'usage des sables en construction routière, sont plus particulièrement importants :

- Les terrassements, couche de forme, et assises non traitées.
- Les assises de chaussées traitées au liant.

La classification utilisée en terrassement et couche de forme est surtout axée sur la sensibilité à l'eau des matériaux, sur leur état naturel et sur la taille des gros éléments qui les constituent.

Une classification simplifiée a été retenue pour les sables traités, elle est essentiellement basée sur la granulométrie et la propreté.

a- La granulométrie :

On distingue trois catégories de sables :

- **Grossier** : plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2 mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ sont compris entre 0,5 et 5mm.
- **Moyen** : moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2 mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ sont compris entre 0,2 et 2 mm.
- **Fins** : plus de 75% des éléments supérieurs à 80 μ sont inférieurs à 0,5 mm.

b- La propreté :

Elle est appréciée globalement par la valeur de l'essai au bleu, cet essai est réalisé sur la totalité du sable (et non sur les fines uniquement). Le résultat est exprimé en gramme pour 100 g de sable, quatre classes sont définies :

$VB \leq 0,2$	Matériau propre.
$0,2 < VB \leq 0,5$	Matériau légèrement pollué.
$0,5 < VB \leq 1$	Matériau pollué.
$VB > 1$	Matériau très pollué.

Tableau V.1 : Catégories des sables

Granulométrie	> 2 mm	0,5 à 5 mm	0,2 à 2 mm	< 0,5 mm	< 80 μ m
Classe					
Grossier	> 20%	> 50% de (100-f)	-	-	-
Moyen	< 20%	-	> 50% de (100-f)	-	< 35%
Fin	-	-	-	> 75% de (100-f)	-

V.4. LES SABLES TRAITES AU BITUME :

Le sable utilisé est un sable propre ($ES > 40$, $I_p = 0$) généralement ce type de sable manque de fines, les fines d'ajout seront soit des matériaux de concassage-broyage (sables, fines calcaires), soit des pulvérulents industriels (chaux, ciment). L'enrobage s'effectue en centrale à l'aide d'un bitume pur, le plus dur possible pour gagner en cohésion. Les différences essentielles entre les sables bitume et les sables enrobés à froid tiennent deux aspects :

- la nature du matériau ;
- la nature et le rôle du liant.

Les sables utilisés pour réaliser des sables enrobés à froid sont naturellement stables, le liant ayant pour rôle de maintenir cette stabilité dans l'environnement climatique du matériau

(risque d'imbibition ou contraire de dessiccation). A l'inverse, les sables bitumes tiennent la majeure partie de leur cohésion au liant utilisé, le niveau de performance atteint résultant à la fois de la dureté du liant et de la granulométrie du matériau.

V.4.1. LES TRAITEMENTS A FROID :

V.4.1.1. Domaine d'emploi :

Les sables améliorés à l'émulsion de bitume ou au bitume fluidifié sont utilisables en chaussées neuves en couche de base pour des trafics faibles à modérés (inférieurs à 3000 véhicules/j) sous réserve que les performances atteintes le permettent. Leur emploi est également envisageable en couche de base de renforcement mais pour des trafics n'excédant pas 1000 véhicules/j. Les épaisseurs employées se situent entre 10 et 20 cm. 10 cm est un minimum technique, 20 cm est l'épaisseur maximum au-delà de laquelle peuvent apparaître des problèmes d'orniérage par suite de difficultés d'élimination des fractions volatiles du liant.

V.4.1.2. Qualité des constituants :

- **Les sables :**

Il faut que le sable ait une bonne portance, ce qui nécessite un minimum de fines et n'excluant pas une légère plasticité. Les sables suivants sont susceptibles d'être utilisés :

- Teneur en fines inférieure à $80 \mu\text{m}$: 5 à 30% ;
- Coefficient d'uniformité $C_U = D_{60}/D_{10} > 5$;
- Equivalent de sable $15 < E.S < 50$;
- Indice de plasticité $I_p < 15$ avec $L_{\eta} < 35$.

Lorsqu'un sable (en particulier les sables fins) ne répondra pas aux critères de traitement, on pourra envisager une correction granulométrique soit par apport d'un sable riche en fines (dans le cas d'un manque), soit au contraire par l'apport d'un sable grossier propre ou d'un gravillon de concassage de petite taille (dans le cas d'un excès de fines ou de plasticité).

Les traitements à froid n'ont pas pour premier but d'assurer la cohésion du matériau mais de le maintenir en minimisant le rôle de l'eau. A l'inverse, une quantité de fines importante et/ou un excès de plasticité rendra difficile la bonne dispersion du liant et nécessitera des dosages en liant importants et ne permettra pas (par suite d'une faible porosité du matériau) l'élimination des solvants (cas des bitumes fluidifiés) ou provoquera une rupture prématurée (cas des émulsions).

- **Les liants :**

Les liants employés doivent pouvoir bien se disperser dans le matériau à température ambiante.

a- Les émulsions :

On peut employer un bitume de pénétration comprise entre 60 et 100 pour des teneurs en fines inférieures à 15% et des I_p supérieurs à 10. La pénétration du bitume émulsifié devra être donc d'autant plus élevée que la teneur en fines est importante et que la plasticité est forte.

La rupture de l'émulsion ne doit avoir lieu qu'après compactage, elle doit rester parfaitement stable au moment du malaxage pour éviter la formation de nodules de bitume rendant le traitement beaucoup moins efficace, pour cette raison il faut employer des émulsions généralement cationiques soit à rupture lente, soit stabilisées (Norme AFNOR : NF-T 65011 Emulsions de bitume-spécifications).

L'intérêt de l'emploi de l'émulsion de bitume est d'avoir après rupture un liant visqueux (bitume pur) assurant une bonne stabilité ce qui n'est pas le cas des bitumes fluidifiés dont la rigidification est plus progressive.

En ce qui concerne la nature de l'émulsion, on peut également se poser un problème de choix entre émulsion cationique ou anionique. Quand le climat est chaud, les émulsions anioniques sont utilisables ; par contre en climat humide et/ou froid, il est préférable d'employer des émulsions cationiques. D'une façon générale, les émulsions anioniques sont beaucoup plus stables que les émulsions cationiques.

b- Les bitumes fluidifiés :

Contrairement aux émulsions, les bitumes fluidifiés peuvent être employés avec des sables à teneur en eau faible ou nulle ce qui peut présenter un très grand intérêt dans les régions sèches. La stabilité des sables enrobés à sec augmente toutefois plus lentement dans le temps que celle des sables enrobés humides, il est donc préférable dans ce cas, d'utiliser au départ un liant plus visqueux. La gamme des produits disponibles est très large : 0/1, 10/15, 50/100, 150/200, 400/600. Dans la majorité des cas c'est un bitume fluidifié 10/15 ou 50/100 qui est employé.

V.4.1.3. Méthodologie d'étude :

Après identification du matériau et du liant dont on envisage l'emploi, l'étude devra déterminer la teneur en eau et en liant nécessaires :

- A une bonne diffusibilité du liant au malaxage ;
- A un compactage correct du matériau (compactabilité) ;
- A un comportement répondant après compactage aux spécifications (stabilité).

V.4.2. TECHNIQUE A CHAUD :

V.4.2.1. Domaine d'emploi :

Il n'y a pas, à priori de limitation d'emploi comme c'est le cas pour les sables enrobés à froid, les possibilités d'emploi d'un sable bitume sont liées au niveau des performances.

Les formules les moins performantes ne dépasseront pas les possibilités d'emploi des sables enrobés à froid (même critère de sélection).

Les formules les plus performantes pourront par contre avoir les usages comparables à ceux des graves-bitumes : dans ce cas, des critères plus sévères que ceux des sables enrobés à froid seront appliqués.

Selon le niveau de trafic et la nature de la plate forme, les épaisseurs les plus couramment employées se situent entre 10 et 25 cm. En ce qui concerne les fortes épaisseurs, outre l'aspect

économique, la limitation d'emploi tient davantage à des problèmes d'exécution que de la nature du matériau. Pour des épaisseurs supérieures à 25 cm, il y a intérêt à passer en deux couches.

V.4.2.2. Qualité des constituants :

- **Les sables :**

Les sables utilisés doivent être propres ($E.S > 40$) et sans argile (I_p non mesurable). Dans des régions à très faible pluviométrie, on pourra admettre des valeurs d'équivalent de sable plus faibles ($E.S > 20$).

Il n'y a pas a priori, de restriction concernant la granulométrie du matériau toutefois celle-ci aura une grande importance sur le niveau des performances donc sur les possibilités d'emploi.

D'une façon générale, plus la granulométrie sera étalée, plus les performances seront élevées : logiquement elles augmenteront dans le sens :

Sable fin → sable moyen → sable grossier.

- **Le liant :**

Pour un sable donné, les performances seront d'autant plus élevées que le liant employé sera dur, on utilisera donc un bitume pur de pénétration la plus faible possible.

V.4.3. SPECIFICATIONS POUR LES SABLES TRAITES AU BITUME POUR COUCHE DE ROULEMENT :

Pour un trafic inférieur à 1000 véhicules/jour :

- **HUBBARD FIELD.**
 - Compacité : 88% à 95% ;
 - Stabilité minimale à 60° C : ≥ 500 kg.
- **DURIEZ.**
 - Stabilité à sec : ≥ 500 kg ;
 - Stabilité après immersion : ≥ 200 kg ;
 - Compacité : 85% à 92%
- **MARSHALL.**
 - Stabilité minimale à 60° C : ≥ 300 kg ;
 - Compacité : 87% à 94%.

V.4.4. RESULTATS OBTENUS SUR CERTAINES ROUTES SAHARIENNES :

V.4.4.1. RN 3 HASSI MESSAOUD-EDJEL :

Après la découverte de grand gisement pétrolier de Hassi Messaoud et celui d'Edjel plus au sud, on a réalisé une chaussée légère constituée uniquement de 10 cm de sable enrobé à froid

posé directement sur le sol naturel.

Cette tentative constitue un échec dans la mesure où la route fût complètement détruite juste après sa construction. Les causes les plus probables de cette destruction semblent :

- L'épaisseur importante du sable enrobé (10 cm) qui facilite la fissuration dans tous les sens ;
- La couche de base, qui est le sol naturel constitué de sable alluvionnaire, grossier, sans cohésion, n'a pu être une assise pour la couche de roulement épaisse et fortement rigide (contraste important entre les modules de déformation) ;
- L'enrobage à froid effectué probablement avec un cut-back n'est pas un bon choix.

V.4.4.2. RN 3 REGION DE GASSI TOUIL :

Ce tronçon de route traverse sur environ 300 km, un couloir délimité par les dunes de sable au cœur de l'erg oriental, où il n'y a aucune possibilité de trouver une roche concassable.

Le sol naturel est constitué de sable de caractéristiques assez variables, d'origine alluvionnaire, de grains arrondis avec peu de fines. La chaussée a été construite de la manière suivante :

- Le sol naturel a été compacté à l'état humide.
- Une couche de fondation de 8 à 18 cm d'épaisseur en sable à granulométrie étalée et contenant 15 à 35% de fines.
- Une couche de base de 12 cm d'épaisseur du même matériau que la couche de fondation mais traitée à 1% de lignosulfite (résidu de l'industrie de cellulose).
- Une couche d'accrochage du tapis de 1 kg/m² en cut back.
- Une couche de roulement en tapis de 5 cm d'épaisseur en sable enrobé.

La formulation du sable bitume employée est :

- Sable à granulométrie étalée avec un pourcentage de fines compris entre 5 et 8%.
- Teneur en liant (bitume 80/100) entre 6,4 et 6,8%.
- Module de richesse égal à 4.

Ce tronçon de route fût mis en service en 1960 ; deux ans après quelques désordres firent leur apparition sous forme de fissures longitudinales et transversales qui se sont généralisées le long de la route sans pour autant diminuer considérablement le niveau de service, et sans remarquer de déformations en service.

Ce tronçon de route continuait à servir jusqu'en 1984 où les premiers travaux de renforcement ont eu lieu.

V.4.4.3. RN 3 STIL-TOUGGOURT :

Elle a été réalisée au cours de l'année 56/57, le corps de chaussée était constitué de matériaux gypseux sur environ 20 à 30 cm d'épaisseur ; quant à la couche de roulement, elle est en sable enrobé sur toute la longueur de la route (140 Km) avec des épaisseurs variables de 4 à 6cm.

La formulation du sable bitume était comme suit :

- Sable à granulométrie serrée contenant plus de 95% d'éléments inférieurs à 0,4 mm entre 55 et 75% d'éléments inférieurs à 0,2 mm et 22% de fines (<80 μ) ;(sable de M'RAIR).
- Teneur en liant (bitume 80/100) entre 8,5 et 10%.
- Module de richesse égal à 4,13
- Densité apparente Hubbard-Field entre 1,82 et 1,90 g/cm³.
- Stabilité Hubbard-Field à 25 °C : 1775 à 2115 kg.
- Stabilité Hubbard-Field à 60 °C : 720 à 750 kg.

En 1959 plusieurs carottes ont été prélevées et ont donné les résultats suivants :

- Densité apparente entre 1,64 et 1,78 g/cm³.
- Compacité entre 70 et 78%.
- Teneur en liant entre 8,1 et 13,3%.
- Pourcentage en filler entre 21,9 et 32,5%.

Les stabilités obtenues avec les matériaux prélevés, réchauffés, remaniés, et récompactés dans le moule Hubbard-Field étaient :

- Stabilité Hubbard-Field à 25 °C : 1470 à 2465 kg.
- Stabilité Hubbard-Field à 60 °C : 652 à 1083 kg.

La reprise de la route par renforcement n'a été effectuée qu'en 1985, après 20 ans de service environ ; notons que ce tronçon de route est l'un des plus circulés des routes sahariennes (environ 1800 véhicules par jour, dont la moitié sont des poids lourds).

Ci-dessous sont regroupés les résultats obtenus sur carottes prélevées une année après l'exécution du tapis en sand asphalt :

Tableau V.2 : Récapitulation des résultats obtenus sur la RN 3 Stil-Touggourt

PK	43	43	46	46	49	98	10	*	**
Bitume (%)	13,3	11,8	11,3	8,1	8,9	9,45	9,2	8,5	10
Filler (%)	13,1	8,3	10,4	6,4	4,3	10,4	2,9	5,8	21,8
Module K	6,45	5,6	5,35	2,8	4,1	4,5	4,5	4,13	4,13
Densité apparente	1,70	1,68	1,66	1,64	-	1,78	-	-	-
Compacité (%)	74,9	73,9	72,6	70,4	-	78,1	-	-	-
Densité réelle	1,87	1,87	1,86	1,86	1,86	1,88	1,85	1,82	1,9
Stabilité à 25°C	2237	2465	2055	1470	-	1580	1260	2115	1775
Stabilité à 60°C	87	720	652	1083	830	550	370	620	750

*) formule théorique réalisée au LCPC avec le sable de M'RAIER.

**) formule théorique réalisée au LCPC avec le sable de M'RAIER..

Remarques :

- Du PK 43 au PK 46 le bitume utilisé est le 180/200 et le sable utilisé est celui de M'RAIER.
- Du PK 46 au PK 49 le bitume utilisé est le 80/100 et le sable utilisé est celui de M'RAIER.
- Du PK 98 au PK 104 le bitume utilisé est le 80/100, plus 5% de fuel-oil et le sable utilisé est celui de TAMERNA.

V.4.4.4. RN 48 STIL-EL-OUED :

C'est une route de 140 Km de longueur, de configuration nord-sud, reliant la RN 3 à la ville d'El-Oued, elle fût réalisée en 1965, avec un sable gypseux en corps de chaussée, et en revêtement un sable bitume. En absence de tout autre sable, le sable de dune constituait le squelette essentiel du matériau enrobé.

La formulation théorique réalisée au LCPC a donné les résultats suivants :

- 94% de sable de dune (SIF EL MENADI) ;
- 5% de filler d'apport ;
- 1% de chaux ;
- 6,2% de bitume pur 80/100 ;
- Module de richesse égal à 3,45 ;
- Densité apparente Hubbard-Field 1,82 g/cm³ ;
- Stabilité Hubbard-Field à 25 °C : 1624 kg ;
- Stabilité Hubbard-Field à 60 °C : 170 kg .

Trois années après la réalisation de la route, plusieurs carottes ont été prélevées et ont donné les résultats suivants :

- Pourcentage de bitume entre 5,1 et 7,9% ;
- Pourcentage de filler entre 4,3 et 10,4% ;
- Module de richesse entre 3,3 et 3,6 ;
- Densité apparente entre 1,64 et 1,88 g/cm³ ;
- Compacité entre 68,4 et 78%.

Les stabilités obtenues avec les matériaux prélevés, réchauffés, remaniés, et récompactés dans le moule Hubbard-Field étaient :

- Stabilité Hubbard-Field à 25 °C : 1327 et 2065 kg.
- Stabilité Hubbard-Field à 60 °C : 172 et 365 kg.

Cette route n'a bénéficiée que d'un entretien superficiel par pose de temps à autre d'un enduit mono-couche ou bicouche, jusqu'en 1988 où on a décidé de procéder au renforcement d'un premier tronçon à partir de STIL.

Lors de l'étude de renforcement menée au cours de l'année 1986 on a révélé les remarques suivantes :

- La dégradation visuelle de la route est presque générale sous forme de fissurations longitudinales et transversales, et quelques faïençages ajoutés parfois à des ornières de

faibles amplitudes. Les dégradations s'accroissent sur les tronçons de traversées de Chotts et des bas fonds où le sol est constamment humide.

- La mesure de déflexion ne dépasse que rarement cent centièmes de millimètres à l'exception des parties correspondant aux bas fonds.

Les résultats obtenus sur carottes prélevées une année après l'exécution du tapis en sand asphalt sont regroupés dans le tableau ci-après :

Tableau V.3 : Récapitulation des résultats obtenus sur la RN 3 Stil- El Oued

PK	38	43	60	65	75	98	118	138	**
Bitume (%)	6,1	7,9	6,2	6,4	5,1	5,35	3,75	4,6	6,2
Filler (%)	13,1	8,3	10,4	6,4	4,3	10,4	2,9	5,8	7
Module K	3,4	-	3,3	3,6	-	-	-	-	3,45
Densité apparente	1,88	-	1,78	1,73	1,70	1,64	1,82	1,8	-
Compacité (%)	78	-	73	71	69,7	68,4	72,8	73,3	-
Densité réelle	1,87	1,85	1,84	1,82	1,86	1,88	1,81	1,81	181
Stabilité à 25°C	1327	1330	1600	1757	2065	-	1200	-	1624
Stabilité à 60°C	227	181	197	172	355	210	60	95	170

**) Formule théorique réalisée au LCPC avec le sable de SIF EL MENADI.

V.4.4.5. RN 49 OUARGLA HASSI MESSAOUD :

12 Km de cette route ont été réalisés en sable enrobé avec la formulation suivante :

- Sable moyen à grains arrondis contenant 93% d'éléments inférieurs à 2 mm et 17% de fines
- Compacité Hubbard-Field : 80%
- Stabilité Hubbard-Field à 25 °C : 1540 kg.
- Stabilité Hubbard-Field à 60 °C : 620 kg.

Lors de la réalisation, on a utilisé un sable moins fin et les stabilités Hubbard-Field obtenues après plusieurs contrôles se sont échelonnées entre 590 et 260 kg à 60 °C.

Ce tronçon s'est comporté d'une manière satisfaisante pendant plus d'une vingtaine d'années, en présentant toutefois certaines fissurations.

CHAPITRE VI

FORMULATION DU SABLE ENROBE

VI. FORMULATION DU SABLE ENROBE

VI.1. DEFINITION :

Les sables enrobés sont des matériaux qui permettent, d'effectuer des revêtements minces (2,5 à 3,5 cm). Ainsi la technique du sable bitume consiste à partir d'un sable simple ou composé, à choisir une teneur en liant adéquate. On vérifie que le pourcentage des vides est convenable et que la stabilité est conforme aux spécifications.

Une formulation d'un enrobé bitumineux se résume :

- Au choix de la granulométrie de l'ossature qui conduit à un minimum de vides ;
- A la recherche de la quantité de liant capable à la fois d'enrober totalement les grains du mélange et d'en permettre l'agglutination totale suivant le meilleur arrangement.

VI.2. RAPPELS THEORIQUES :

VI.2.1. DETERMINATION DE LA TENEUR EN LIANT.

La teneur d'un enrobé bitumineux dépend de la granulométrie de l'ossature et plus exactement de la surface spécifique. Cette surface est d'ailleurs déterminée en grande partie par la quantité de filler existante dans la masse du matériau et dans une certaine mesure par le sable fin. La teneur en liant sera déduite de la formule suivante :

$$P = \alpha K \sqrt[5]{\Sigma} \quad \text{avec :}$$

α : Coefficient de correction destiné à en tenir compte de la masse volumique des granulates tel que $\alpha = 2,65/\gamma_G$ où γ_G : masse volumique réelle des granulates.

K : Module de richesse.

Σ : Surface spécifique conventionnelle tel que :

$$\Sigma = 4,7 + 1,3 f \quad (\text{Formule de Duriez})$$

f : Pourcentage des fines (d < 80 μm).

▪ Module de richesse.

Dans l'expression précédente la valeur de $K = P / \alpha \sqrt[5]{\Sigma}$ est appelée « module de richesse en liant » ou en abréviation module de richesse ; il caractérise l'épaisseur du film de liant enrobant les grains d'agrégats. Son choix est dépendant de la déformabilité, du climat, de la nature et de l'intensité du trafic. D'une manière générale la valeur du module de richesse K varie entre 3,75 et 4,25.

VI.2.2. CALCUL DE LA COMPACITE HUBBARD FIELD DES EPROUVETTES.

Soit :

- d_m : La densité apparente de l'éprouvette ;
- d_b : La densité du bitume ;
- d_a : La densité de l'agrégat ;
- P_b : Le pourcentage en poids du bitume ;
- P_a : le pourcentage en poids de l'agrégat.

La densité vraie de l'éprouvette est :

$$D_m = \frac{100}{P_b/d_b + P_a/d_a}$$

Le pourcentage volumétrique des vides résiduels ou vides de l'éprouvette est :

$$V_m = \frac{D_m - d_m}{D_m}$$

La compacité **C** ou pourcentage volumétrique des pleins est :

$$C = 100 - V_m$$

VI.3. PROGRAMME DE L'EXPERIMENTATION :

L'objectif essentiel de notre étude est s'essayer d'améliorer les performances mécaniques du sable de dune de Hassi Berkine enrobé avec différents types de liants utilisés dans la techniques routière algérienne. En étant convaincu à l'avance de la médiocrité des résultats qui seront obtenus avec l'utilisation du sable de dune de Hassi Berkine seul, nous avons jugé opportun de le corriger avec différents types de stabilisants et d'étudier l'impact de l'utilisation de ces derniers sur les performances mécaniques du mélange final.

Les différents types de liants utilisés sont les suivants :

- Pour l'enrobage à chaud : bitume 40/50 et bitume 80/100 ;
- Pour l'enrobage à froid : cut back 400/600 et émulsion 60.

En ce qui concerne les stabilisants utilisés nous les avons regroupés en trois familles :

- Les sables correcteurs : sable gypseux, sable concassé, arène granitique ;
- Les pulvérulents industriels : ciment CPJ 45, chaux, laitier de hauts fourneaux, plâtre ;
- Les fines naturelles : fines gypseuses, fines calcaires.

VI.4. ESSAIS DE LABORATOIRE :

Les essais effectués au laboratoire sont les suivants :

1. IDENTIFICATION DES SABLES.

Afin d'identifier les différents types de sables utilisés et pour s'assurer qu'ils répondent aux exigences et recommandations pour utilisation en techniques routières, les essais suivants ont été effectués :

- Granulométrie ;
- Equivalent de sable ;
- Essai de bleu de méthylène
- Friabilité ;
- Poids spécifique.

2. IDENTIFICATION DES LIANTS.

L'ensemble des essais d'identification pour les différents types de liants sont :

- Pour le bitume 40/50 et 80/100 :
 - Essai de pénétrabilité à 25 °C ;
 - Essai de point de ramollissement bille et anneau ;
 - Détermination de la densité relative ;
 - Point d'éclair et point de flamme ;
- Pour le cut back 400/600 :
 - Distillation fractionnée.
 - Détermination de la pseudo-viscosité
- Pour l'émulsion 60
 - Détermination de la teneur en eau ;
 - Détermination de la pseudo-viscosité Engler à 25 °C ;
 - Détermination de l'indice de rupture ;
 - PH de l'émulsion.

3. ESSAIS MECANIQUES.

Après identification des différents composants du sable enrobé, des éprouvettes Hubbard Field ont été confectionnées en utilisant différents pourcentages de stabilisants et différents types de liants et une fois la formulation optimale pour chaque stabilisant a été déterminée, nous avons compléter la série d'essai par d'autres essais mécaniques complémentaires (essai Duriez, essai Marshall) jugés indispensables pour classer un enrobés quelconque et voir s'il est apte ou non à être utilisé dans la construction routière.

VI.5. PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISES :

Dans ce qui suit, nous allons procéder à la présentation des caractéristiques des matériaux de composition de l'enrobé qui sont : les sables, les agents stabilisants, les différents types de liants.

VI.5.1. LES SABLES :

1. SABLE DE DUNE (HASSI BERKINE).

• Caractéristiques physiques

- Poids spécifique = 2,60 ; NFP 18-560
- Equivalent de sable = 87,89 % ; NFP 18-598
- Valeur au bleu de méthylène = 0,10 NFP 18-592
- Friabilité = 6 %. NFP 18-576

• Analyse chimique.

Tableau VI.1 : Analyse chimique sommaire du sable de dunes

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice+Silicates) INS	98,17
Oxydes de fer et d'alumine (R_2O_3)	1,35
Sulfates (SO_4 Ca, $2H_2O$)	Traces
Chlorures (NaCl)	0,11
Carbonates (CO_3 Ca)	1,75
Anhydride Carbonique (CO_2)	0,77
Perte au feu à 1050 °C	0,79
Eau de constitution	0,02
Bilan chimique pondéral	101,4

• Analyse granulométrique:

Tableau VI.2: Composition granulométrique du sable de dune de Hassi Berkine

Tamis (mm)	Tamisât (%)
6.300	100
5,000	100
4,000	100
2,000	100
1,000	100
0,500	99,39
0,400	95,29
0,315	66,41
0,200	25,12
0,100	5,56
0,080	1,36

L'analyse granulométrique est représentée par la figure (VI.1). La totalité des éléments constituant ce matériau ont un diamètre compris entre 0,08 et 0,5 mm. Il s'agit d'un sable propre

de granulométrie serrée. Le pourcentage des fines assez faible (1,36%) dénote de la pauvreté du sable de dune de Hassi Berkine en éléments fins <0,08 mm ce qui nécessite sa correction.

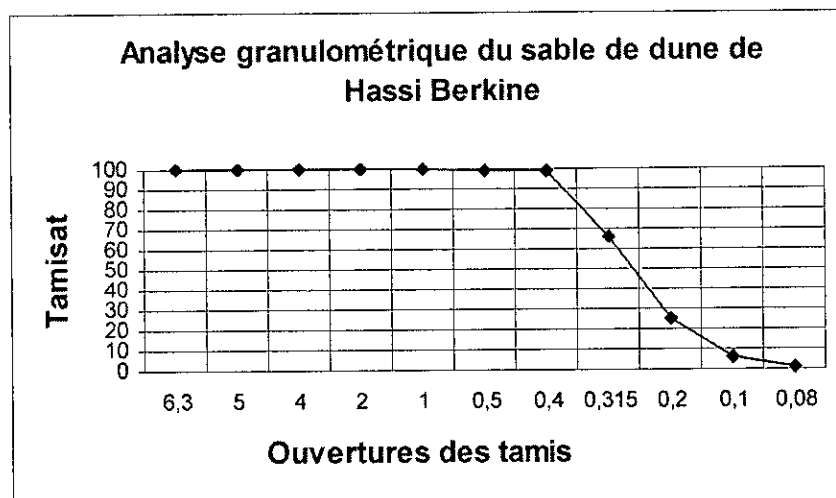


Figure VI.1- Composition granulométrique du sable de dune de Hassi Berkine

2. SABLE CONCASSE (HAOUD EL HAMRA).

- **Caractéristiques physiques.**
 - Poids spécifique = 2,51 ;
 - Equivalent de sable = 42,03 ;
 - Valeur au bleu de méthylène = 0,15 ;
 - Friabilité = 31,4 %.
- **Analyse chimique.**

Tableau VI.3 : Analyse chimique sommaire du sable concassé

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice+Silicates) INS	33,10
Oxydes de fer et d'alumine (R_2O_3)	2,50
Sulfates ($SO_4 Ca, 2H_2O$)	5,14
Clorures (NACL)	0,12
Carbonates ($CO_3 Ca$)	58,82
Anhydride Carbonique (CO_2)	25,88
Perte au feu à 1050 °C	26,00
Eau de constitution	0,12
Bilan chimique pondéral	99,78

- Analyse granulométrique.

Tableau VI.4 : Composition granulométrique du sable concassé (Haoud El Hamra)

Tamis (mm)	Tamisât (%)
8,000	100
6.300	97,87
5,000	96,65
4,000	95,16
2,000	80,06
1,000	61,54
0,500	49,06
0,400	45,65
0,315	42,57
0,200	43,65
0,100	19,58
0,080	16,58

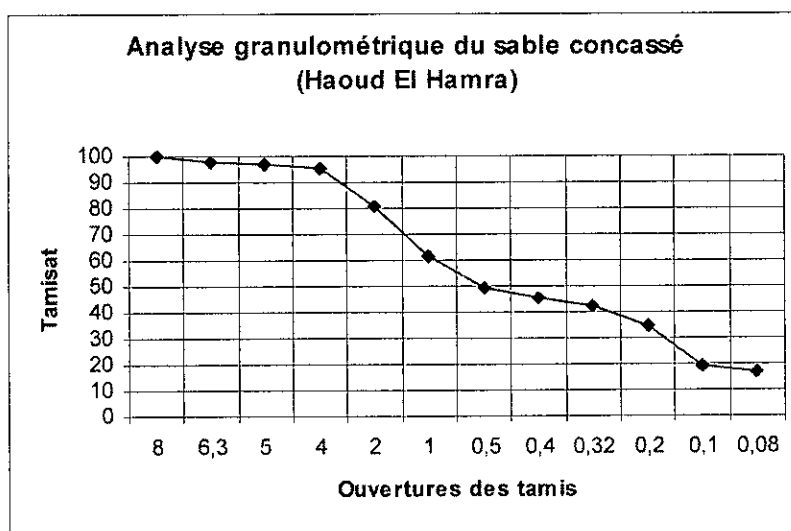


Figure VI.2 : Composition granulométrique du sable concassé (Haoud El Hamra)

Le sable concassé utilisé est riche en fines (16,58%) ; la courbe obtenue est bien graduée

3. SABLE GYPSEUX.

- Caractéristiques physiques.

- Poids spécifique = 2,26 ;
- Equivalent de sable = 38,47 ;
- Valeur au bleu de méthylène = 1,2 ;
- Friabilité = 71,2 %.

- Analyse chimique.

Tableau VI.5 : Analyse chimique sommaire du sable gypseux

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice+Silicates) INS	10,95
Oxydes de fer et d'alumine (R_2O_3)	1,32
Sulfates (SO_4 Ca, $2H_2O$)	8,68
Gypses (SO_4 Ca, $2H_2O$)	49,64
Clorures (NaCl)	0,70
Carbonates (CO_3 Ca)	27,19
Anhydride Carbonique (CO_2)	26,12
Perte au feu à 1050 °C	14,16
Eau de constitution	10,39
Bilan chimique pondéral	102,25

- Analyse granulométrique.

Tableau V.6 : Composition granulométrique du sable gypseux (Hassi Messaoud)

Tamis (mm)	Tamisât (%)
8,000	100
6.300	99,18
5,000	98,37
4,000	96,78
2,000	89,03
1,000	75,53
0,500	57,83
0,400	53,75
0,315	49,56
0,200	43,04
0,100	33,35
0,080	30,79

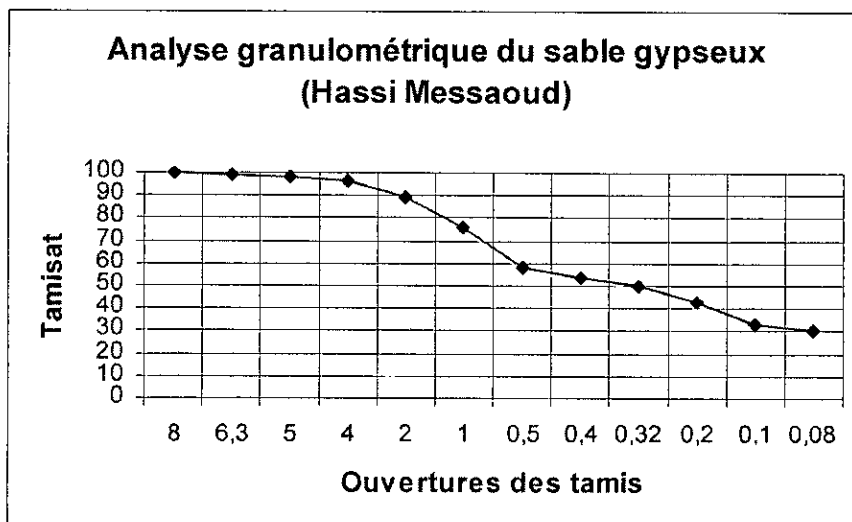


Figure VI.3 : Composition granulométrique du sable gypseux (Hassi Messaoud)

4. ARENE GRANITIQUE.

- **Caractéristiques physiques.**

- Poids spécifique = 2,38
- Equivalent de sable = 47,32
- Valeur du bleu de méthylène = 0,2.
- Friabilité = 25,2 %.

- **Analyse chimique.**

Tableau VI.7. Analyse chimique sommaire de l'arène granitique

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles (silice+Silicates) INS	85.14
Oxydes de fer	8,40
Sulfates (SO ₄ Ca, 2H ₂ O)	0.70
Clorures (NACL)	0,1
Carbonates (CO ₃ Ca)	0,9
Anhydride Carbonique (CO ₂)	1,40

On peut facilement remarquer la prédominance des insolubles par rapport aux autres éléments minéralogiques constituant l'arène granitique.

Le pourcentage des sulfates (0,7%) et des carbonates (0,9%) est insignifiant, ce qui va poser un problème de cohésion de l'enrobé final.

Généralement lorsque l'agent utilisé pour la correction du sable de dune ne contient pas d'éléments qui assurent une bonne cohésion, on fait appel à des pulvérulents industriels tels que la chaux, qui joue un rôle déterminant dans l'amélioration de l'adhésivité de ces agents correcteurs au liant utilisé pour l'enrobage.

Pour des raisons technico-économiques le pourcentage de la chaux employée varie de 2 à 4%, mais son impact sur les valeurs finales de la compacité et la stabilité est considérable.

- **Analyse granulométrique.**

Tableau V.8 : Composition granulométrique de l'arène granitique

Tamis (mm)	Tamisât (%)
8,000	100
6,300	92,32
5,000	89,56
4,000	78,73
2,000	69,54
1,000	61,54
0,500	52,47
0,400	48,62
0,315	42,57
0,200	37,65
0,100	25,58
0,080	12,00

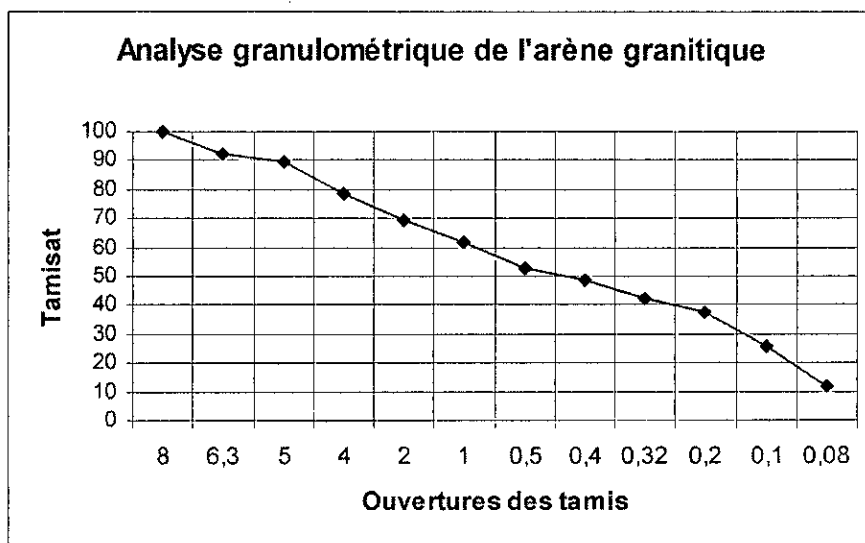


Figure VI.4- Composition granulométrique de l'arène granitique

VI.5.2. Les fines naturelles d'ajout :

Deux types de fines ont été utilisés pour corriger la granulométrie du sable de dune, il s'agit de :

- Fines gypseuses : obtenues par tamisage direct au tamis de 0,08 mm du sable gypseux.
- Fines calcaires: obtenues par broyage et tamisage au tamis de 0,08 mm d'un sable calcaire.

VI.5.3 Les pulvérulents industriels :

Quatre types de liants hydrauliques ont été utilisés pour stabiliser le sable de dune, ils sont :

▪ Le ciment :

C'est un produit qui provient de la calcination poussée pouvant atteindre le point de ramollissement d'un composé de :

- 80 % de marne calcaire ou carbonate de calcium ;
- 20 % d'argile à forte teneur en silice d'alumine.

Ce mélange peut :

Etre sous forme d'une marne argilo-calcaire de composition stable et ayant plus de 8% de silicate d'alumine « ciment naturel » ;

Etre obtenu par un mélange parfaitement dosé de marne calcaire et d'argile « ciment portland artificiel ».

La valeur du poids spécifique du ciment CPJ 45 utilisé est de 2,97 g/cm³.

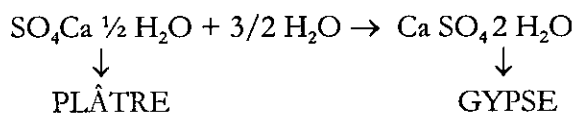
▪ La chaux :

C'est une carbonate de chaux (CO₃Ca) obtenue par calcination d'un calcaire naturel (marne) plus ou moins pur, la présence de silicate d'alumine modifie les caractéristiques du produit après cuisson, la composition de la marne influence la température de calcination, mais de toute façon le résultat est la chaux vive qu'il faut éteindre. (Obtention de chaux éteinte).

La valeur du poids spécifique de la chaux éteinte utilisée est de 2,32 g/cm³.

▪ Le plâtre :

Le plâtre est un hémidrate SO₄Ca + 1/2 H₂O qui, réduit en poudre, puis gâché avec de l'eau, fait prise sous forme d'aiguilles hydratées, pour reconstituer l'hydrate à deux molécules d'eau, ou gypse. La réaction chimique d'hydratation étant :



La valeur du poids spécifique du plâtre utilisé est de 2,73 g/cm³.

- **Le laitier :**

- **Définition.**

Le laitier est un sous produit total de la fabrication de la fonte. Il est introduit dans le haut fourneau une charge solide composée de minerai de fer et de coke et un « vent » aux tuyères. Fonte et laitier ruissellent simultanément vers la partie basse du haut fourneau pour se rassembler dans le réceptacle que constitue le creuset. Ils sont séparés par décantation grâce à leurs masses spécifiques différentes.

Il existe deux types de laitiers :

- le laitier granulé : qui est un sable friable de couleur claire, et utiliser souvent comme liant hydraulique ;
- le laitier solidifié à l'air libre : Qui se présente sous forme de roches prêtes au concassage à la granulométrie voulue. Ce laitier est employé comme granulats de différentes granulométries dans les chaussées.

La valeur du poids spécifique du laitier utilisé est de 2,63 g/cm³.

- **Analyse chimique sommaire.**

Tableau VI.9 : Composition chimique du laitier broyé

Silice (Si O ₂)	Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃	Les sulfates (SO ₄)	Les chlorures (NaCl)	Les carbonates (CaCO ₃)	Anhydride carbonique (CO ₃)
22 %	31.77 %	trace	0.17 %	33.89 %	14.91 %

VI.5.4. LES LIANTS :

Les caractéristiques des différents liants utilisés sont consignées dans les tableaux suivants :

- **Bitume 40/50 et 80/100**

Tableau V.10 : Caractéristiques des bitumes 40/50 et 80/100 utilisés

Classe du bitume	40/50	80/100
Pénétrabilité (1/10 mm)	42	85
Point de ramollissement TBA (°C)	58	55
Point d'éclair (°C)	268	260
Point de flamme (°C)	333	314
Densité relative	1,03	1,02

- Cut back 400/600.

Tableau VI.11 : Caractéristiques du cut back 400/600 utilisé

	Valeurs obtenues	Spécifications
Pseudo-viscosité mesurée au viscosimètre d'orifice 10 mm à 25°C.	585	NFT 66-005 400 à 600
Distillation fractionnée (%) à :		NFT 66-003
190 °C.	0	0
225 °C.	0	0
315 °C.	5,47%	5 à 12%
360 °C.	11,44%	< 15%

La distillation fractionnée a permis de déterminer le pourcentage du kérosène dans le cut back 400/600, il est de 11,44% ce qui donne un pourcentage du bitume résiduel de l'ordre de 88,56 %.

- Emulsion 60.

Tableau VI.12 : Caractéristiques de l'émulsion 60 utilisée

Teneur en eau %	39,5
Pseudo-viscosité Engler à 25°C	9
Indice de rupture	96.4
PH de l'émulsion	3.88

VI.6. PREMIERE SERIE D'ESSAI (TRAITEMENT A CHAUD) :

Dans un premier lieu, nous nous sommes penchés à l'étude de l'influence de la nature du bitume pur (bitume 40/50 et bitume 80/100) et des différents types d'ajout (sables concassé, gypseux, arène granitique, fines gypseuses, fines calcaires, ciment CPJ45, chaux éteinte, laitier de haut fourneau, plâtre) sur les caractéristiques de l'enrobé à chaud obtenu après mélange de sable de dune de Hassi Berkine avec les différents types de stabilisants identifiés précédemment.

Initialement, l'objectif essentiel était de déterminer le pourcentage du bitume pur donnant le maximum de compacité et stabilité Hubbard Field du sable enrobé sans utilisation d'ajouts. Pour cela différents pourcentages de bitumes purs 40/50 et 80/100 variant de 5,5 à 8 ont été utilisés en adoptant un pas de 0,5 g. Cette étape terminée, les différents types de stabilisants ont été incorporés dans le mélange sable de dune-bitume pur pour apporter les corrections escomptées.

Le pourcentage des sables correcteurs et des fines d'apport ajoutés au mélange varie de 5 à 35% avec un pas de 5%. La valeur de 35 % représente la limite tolérée par les recommandations.

Le pourcentage des pulvérulents industriels quant à lui varie de 1 à 6% avec un pas de 1%. De même que pour la valeur de 35% pour les sables d'ajout, la valeur de 6% est considérée comme le seuil économique inscrit dans les recommandations.

Une attention particulière a été apportée au calcul du pourcentage de bitume susceptible de donner un meilleur enrobage pour chaque formulation.

Les bitumes utilisés sont le 40/50 et le 80/100, le choix du premier (40/50) a été justifié par l'utilisation, de plus en plus croissante, dans notre pays de ce liant pour la formulation des différents types d'enrobés destinés à l'exécution de la couche de roulement alors que le deuxième (80/100) a été retenu puisqu'il a été utilisé presque exclusivement pour la réalisation de toutes les couches de roulement en sable bitume. Le choix de l'utilisation de ces deux bitumes repose sur deux raisons essentielles :

- éviter les risques d'orniérage qui peuvent avoir lieu avec des liants moins durs exposés à l'ensoleillement prolongé du Sahara.
- éviter le phénomène de fatigue par vieillissement rapide qui peut avoir lieu avec l'emploi de bitume trop dur par cause de rigidité surtout lorsqu'il s'agit de couche de roulement de faible épaisseur reposant directement sur une couche de base de matériaux naturels non traités.

Avant le confectionnement des éprouvettes Hubbard Field, les températures de réchauffement des différents matériaux constituant l'enrobé ainsi que les moules Hubbard Field ont été les suivantes :

- 140°C pour l'enrobé à base de bitume 80/100, et qui correspond à la température de répandage sur chantier de l'enrobe à base de bitume 80/100 ;
- 160 °C pour l'enrobé à base de bitume 40/50 et pour la même raison que précédemment.

VI.6.1. Influence de la teneur en bitume pur sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en bitume pur 40/50 et 80/100 sur le sable de dune pris séparément, les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.13 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le sable de dune de Hassi Berkine (bitume 40/50)

Bitume 40/50						
% bitume	5,5	6	6,5	7	7,5	8
Module de richesse	3,77	4,11	4,46	4,80	5,15	5,48
Poids à l'air (g)	105,23	105,80	106,32	106,43	107,18	107,75
Densité apparente	1,79	1,80	1,81	1,80	1,82	1,82
Densité théorique	2,28	2,26	2,23	2,21	2,19	2,16
Compacité	78,51	79,47	81,40	81,46	83,25	83,99
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	653,90	689,94	814,49	803,73	732,80	719,11
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	219,43	226,95	246,82	230,62	228,71	221,46

Tableau VI.14 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le sable de dune de Hassi Berkine (bitume 80/100)

Bitume 80/100						
% bitume	5,5	6	6,5	7	7,5	8
Module de richesse	3,77	4,11	4,46	4,80	5,15	5,48
Poids à l'air (g)	105,37	105,85	106,47	106,91	107,38	107,89
Densité apparente	1,79	1,80	1,80	1,81	1,81	1,83
Densité théorique	2,28	2,26	2,23	2,21	2,19	2,16
Compacité	78,51	79,47	81,40	81,46	83,25	83,99
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	309,35	345,12	421,83	406,86	349,01	341,79
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	103,81	138,21	199,67	192,83	173,43	158,56

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

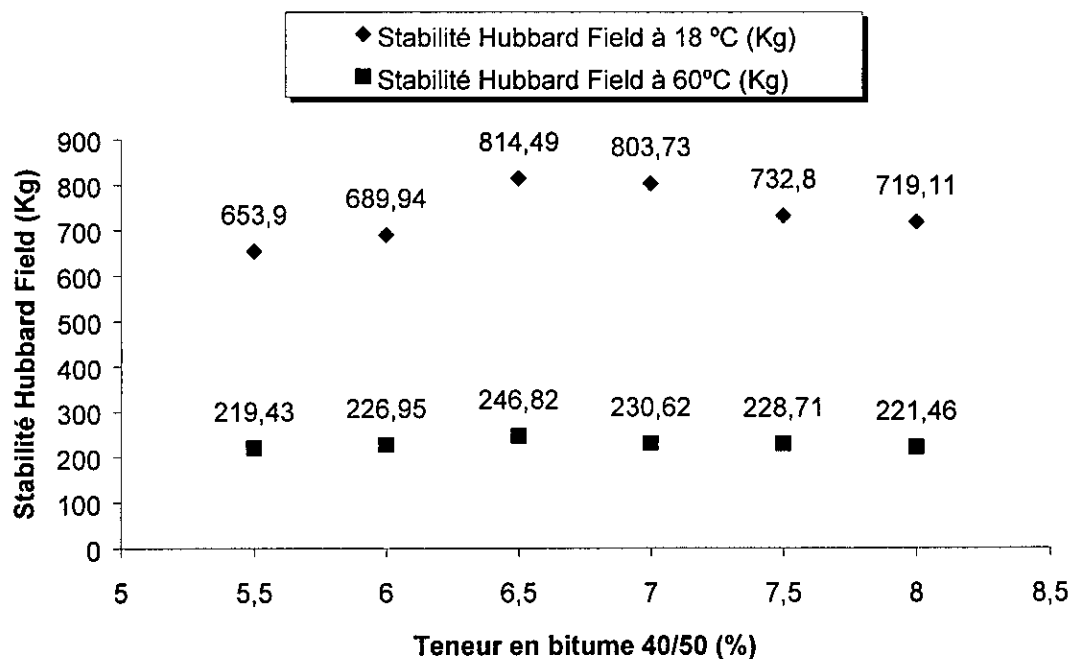


Figure VI.5- Influence de la teneur en bitume 40/50 sur la stabilité Hubbard Field (100% sable de dune)

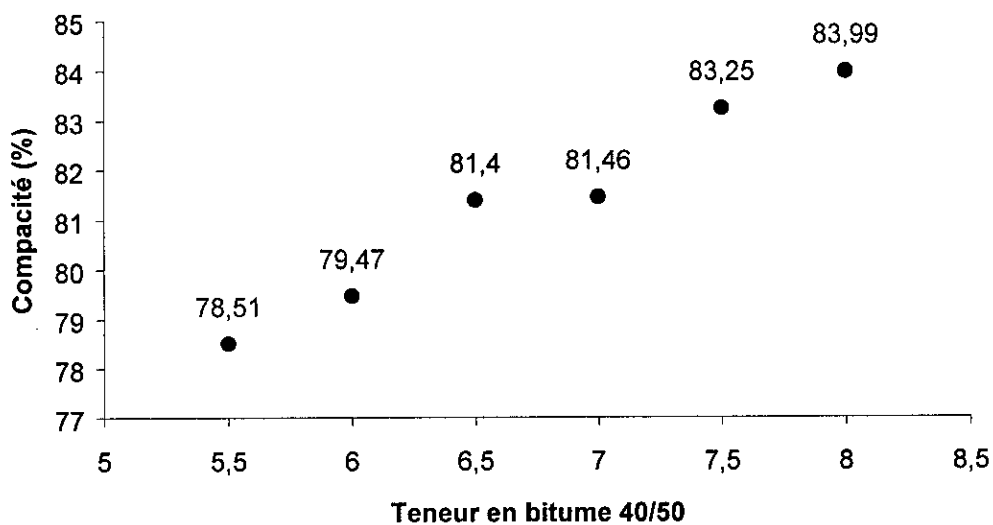


Figure VI.6- Influence de la teneur en bitume 40/50 sur la compacité (100% sable de dune)

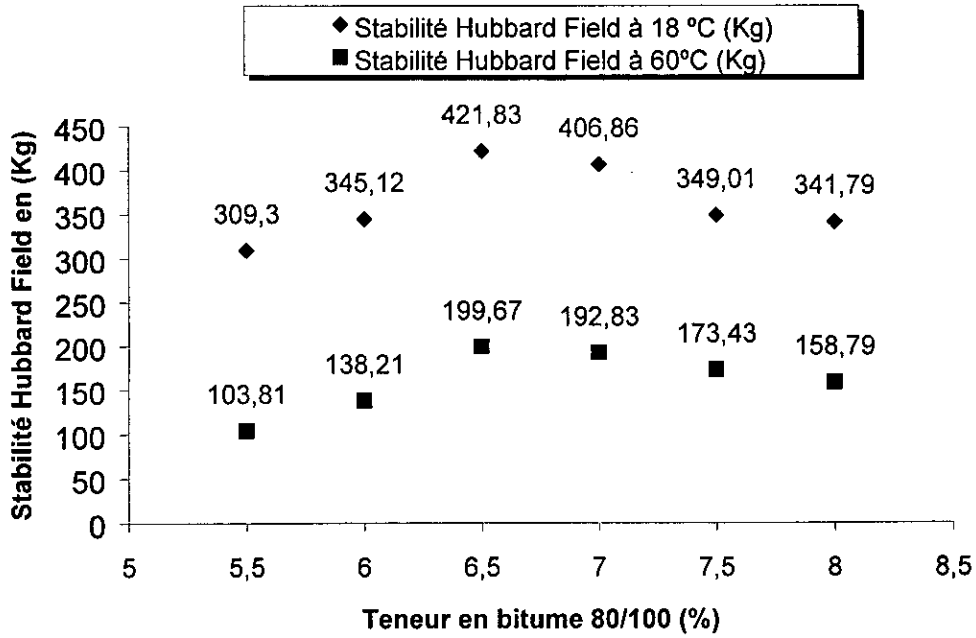


Figure VI.7- Influence de la teneur en bitume 80/100 sur la stabilité Hubbard Field (100% sable de dune)

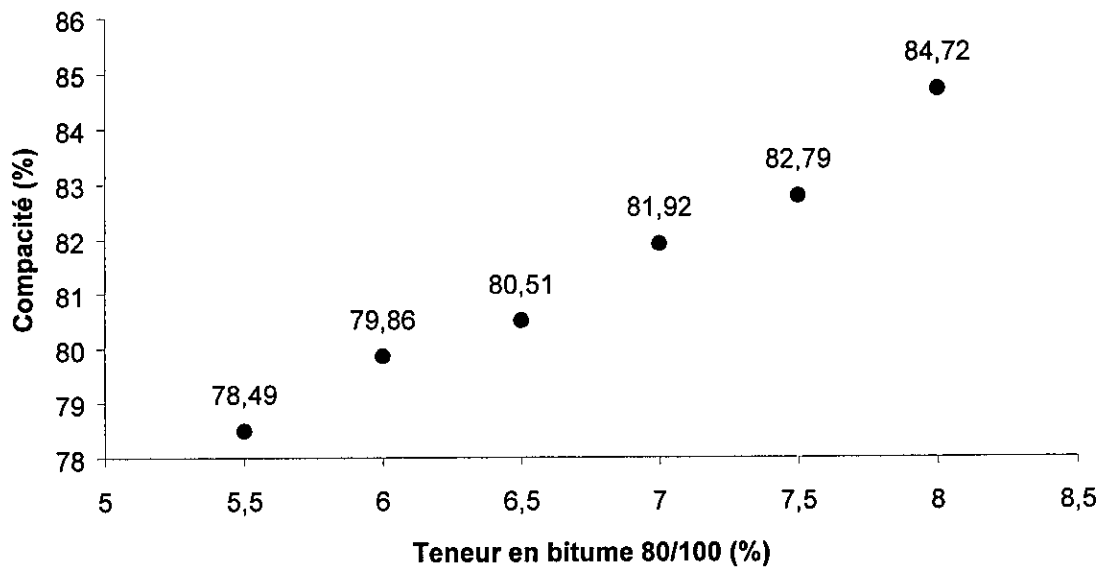


Figure VI.8- Influence de la teneur en bitume 80/100 sur la compacité (100% sable de dune)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

D'après les résultats obtenus à partir de l'essai Hubbard Field, on peut conclure que le sable de dune de Hassi Berkine seul enrobé avec le bitume pur 40/50 ou 80/100, donne des stabilités et des compacités insuffisantes par rapport aux caractéristiques recommandées (stabilité minimale à 60°C = 500 Kg et compacité entre 88% et 95%). Ceci peut s'expliquer par la granulométrie serrée qui empêche un bon arrangement des grains et par la forme arrondie de ces derniers qui n'offre pas suffisamment d'angularité pour mobiliser le frottement intergranulaire nécessaire. D'autre part, le faible pourcentage de fines de sable (1,36%), n'a pas permis, après malaxage, d'augmenter suffisamment la consistance du liant et par voie de conséquence obtenir un mastic assez dur capable de compenser l'absence de squelette minéral.

Un autre facteur que nous avons jugé préjudiciable à la bonne tenue de l'enrobé est la nature minéralogique du sable de dune utilisé (98,17% d'insolubles), car le silice est connu par sa faible adhérence au bitume entraînant une faible adhésivité. La solution adoptée généralement dans le cas de ce type de problème et l'adjonction au mélange sable de dune-bitume d'un certain pourcentage de pulvérulents industriels (généralement de la chaux) afin d'améliorer les performances mécaniques du sable enrobé.

L'utilisation d'un bitume (40/50) connu par sa dureté n'a pas conduit à l'obtention des résultats escomptés, cela ne veut pas dire que la solution réside dans l'utilisation d'un bitume plus dur (20/30) que le premier parce que dans le cas de l'utilisation de ce dernier et même si les performances mécaniques sont nettement meilleures, le risque de l'endommagement par fatigue sera de plus en plus important. La solution à ce problème et la correction de la granulométrie du sable de dune par un autre sable ayant une granulométrie étalée et un pourcentage de fines assez élevé capable de rigidifier le mastic et combler les vides intergranulaires.

À partir des résultats obtenus, on peut remarquer que la stabilité optimale est atteinte pour une teneur en bitume pur de 6,5%, elle est de l'ordre de :

- 814,49 Kg à 18°C dans le cas de l'utilisation du bitume 40/50 et de 421,83 Kg dans le cas de l'utilisation du 80/100 ;
- 246,82 Kg à 60 °C dans le cas de l'utilisation du bitume 40/50 et de 199,67 Kg dans le cas de l'utilisation du 80/100.

L'optimum de la stabilité est donc obtenu pour une teneur de 6,5%, une teneur en bitume inférieure à cette valeur entraîne un mélange moins stable, en raison de l'insuffisance de l'enrobage, alors que une teneur en bitume supérieure à cette valeur entraîne une chute de stabilité, en raison du mauvais contact entre les grains.

VI.6.2. Influence du pourcentage en sable concassé sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages de sable concassé (5% à 35%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.15 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable concassé (bitume 40/50)

Bitume 40/50					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Sable concassé (%)	0	5	15	25	35
(%) bitume	6,50	6,71	7,05	7,33	7,58
Poids à l'air (g)	106,32	106,50	107,00	107,25	107,50
Densité apparente	1,81	1,80	1,81	1,82	1,82
Densité théorique	2,23	2,22	2,20	2,18	2,16
Compacité (%)	81,04	81,08	82,38	83,38	84,27
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	814,49	1163,12	1731,78	2753,32	3319,23
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	246,82	389,00	528,96	868,83	1006,73

Tableau VI.16 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable concassé (bitume 80/100)

Bitume 80/100					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Sable concassé (%)	0	5	15	25	35
(%) bitume	6,50	6,71	7,05	7,33	7,58
Poids à l'air (g)	106,47	106,68	107,02	107,28	107,53
Densité apparente	1,796	1,80	1,80	1,82	1,82
Densité théorique	2,23	2,22	2,19	2,17	2,17
Compacité (%)	80,51	81,08	82,28	83,71	84,40
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	421,83	768,98	998,36	1429,28	1693,68
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	199,67	250,48	303,69	541,08	522,74

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

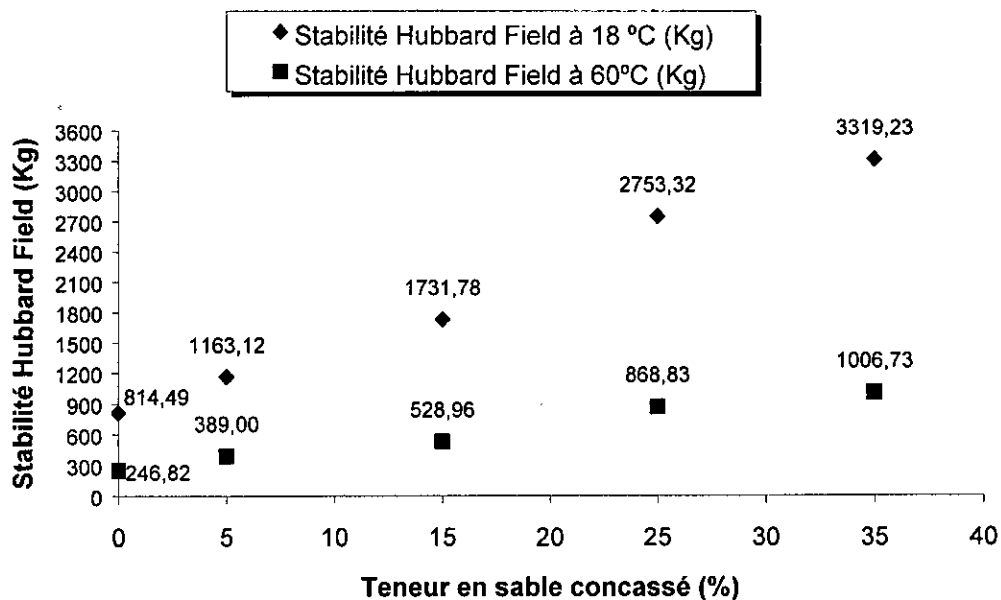


Figure VI.9- Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50)

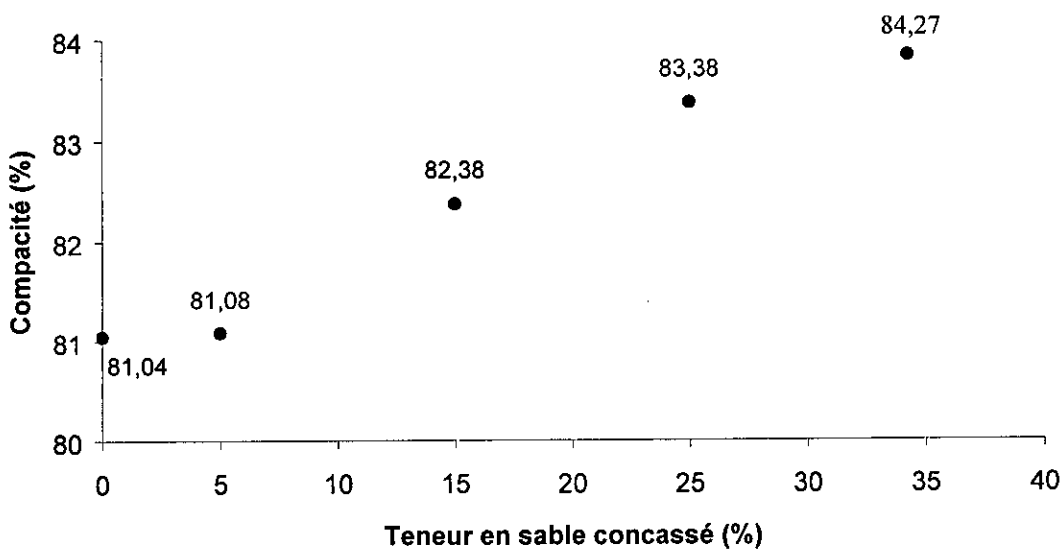


Figure VI.10- Influence de la teneur en sable concassé sur la compacité (bitume 40/50)

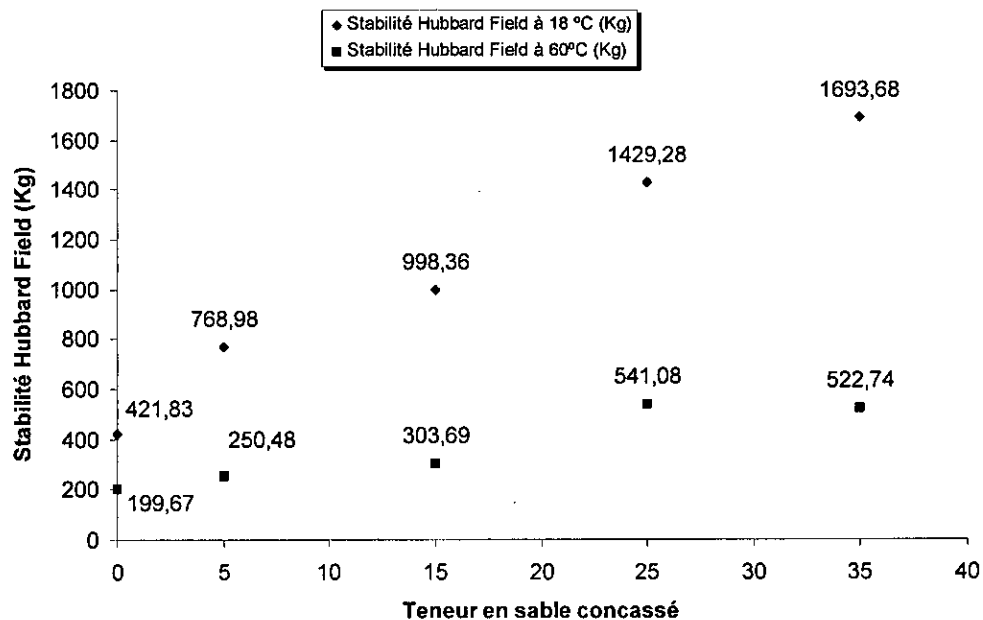


Figure VI.11- Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100)

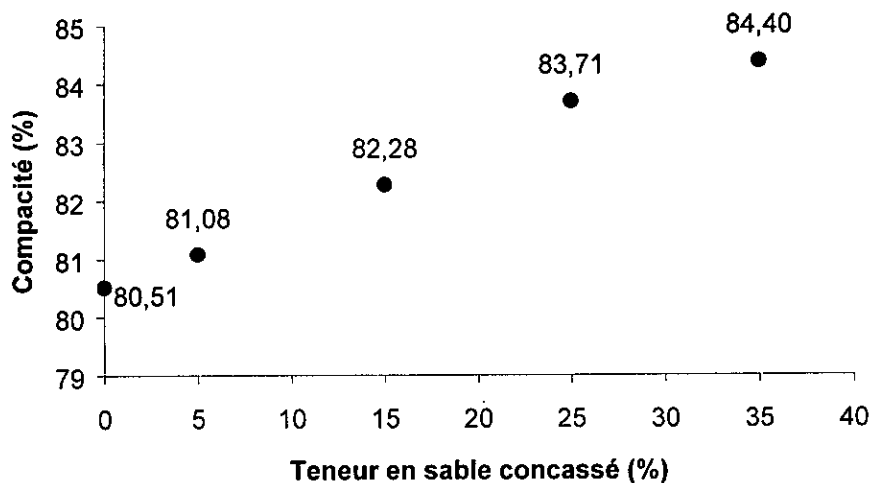


Figure VI.12- Influence de la teneur en sable concassé sur la compacité (bitume 80/100)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

Les teneurs en bitume ont été fixées en tenant compte de la granulométrie, notamment du pourcentage de fines et plus exactement de la surface spécifique. La formule utilisée pour le calcul des teneurs en bitume pour différents pourcentages de sable concassé est celle dite de Duriez.

Les résultats Hubbard Field obtenus avec le sable de dune de Hassi Berkine corrigé avec un sable concassé, enrobé soit avec le bitume 40/50 ou bien 80/100 montrent que la stabilité et la compacité augmentent avec le pourcentage de sable de concassage, ainsi la stabilité passe de 814,49 Kg à 3319,23 Kg pour un ajout de sable de concassage allant de 0 à 35% et en utilisant un bitume 40/50. L'enrobé à base du bitume 80/100 se comporte de la même manière et la stabilité passe de 421,83 Kg sans ajout de sable concassé à 1693,68 Kg avec l'ajout de 35% de se dernier.

La variation de la compacité est prévisible dans la mesure ou l'ajout du sable concassé rend la granulométrie du mélange plus étalée ; cela occasionne un arrangement des grains de plus en plus favorable, ainsi la compacité passe de 81% à 84% pour un ajout de sable concassé allant de 0 à 35%.

Le sable concassé utilisé a permis une nette amélioration de la stabilité, cela revient à trois facteurs essentiels :

- La granularité de ce dernier (plus de 20% d'éléments ont un diamètre supérieur à 2 mm) ; a pour effet d'approvisionner le sable de dune en éléments grossiers absents dans son squelette ;
- L'angularité de ses grains menant à un meilleur frottement intergranulaire ; ce qui à pour effet l'augmentation de la stabilité de l'enrobé ;
- Sa richesse en éléments fins (plus de 16,58% d'éléments ont un diamètre supérieur à 0,08 mm) a pour effet d'améliorer le comportement du mastic bitume/filler en le rigidifiant d'avantage.
- Sa nature minéralogique (58,82% de carbonates) est favorable à une bonne adhésivité liant granulats vu l'affinité de se type d'élément aux liants hydrocarbonés.

VI.6.3. Influence du pourcentage en sable gypseux sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages de sable gypseux (5% à 35%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.17 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable gypseux (bitume 40/50)

Bitume 40/50					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Sable gypseux (%)	0	5	15	25	35
(%) bitume	6,50	6,86	7,41	7,83	8,17
Poids à l'air (g)	106,32	106,80	107,30	107,75	108,10
Densité apparente	1,81	1,81	1,82	1,82	1,83
Densité théorique	2,23	2,20	2,15	2,10	2,07
Compacité (%)	81,04	82,17	84,82	86,66	88,41
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	814,49	1141,13	1619,84	2493,85	3259,67
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	246,82	359,52	499,18	723,26	1092,30

Tableau VI.18 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable gypseux (bitume 80/100)

Bitume 80/100					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Sable gypseux (%)	0	5	15	25	35
(%) bitume	6,50	6,86	7,41	7,83	8,17
Poids à l'air (g)	106,47	106,85	107,35	107,80	108,09
Densité apparente	1,79	1,81	1,81	1,82	1,82
Densité théorique	2,23	2,19	2,146	2,10	2,06
Compacité (%)	80,51	82,31	84,34	86,60	88,40
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	421,83	750,98	1185,44	1867,86	2321,73
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	199,67	264,43	369,31	536,49	689,15

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

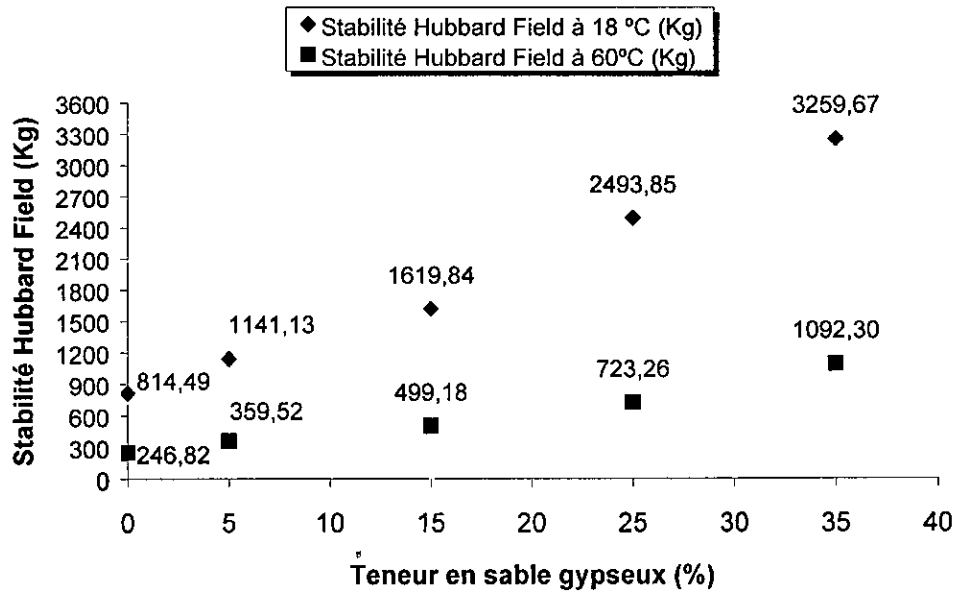


Figure VI.13- Influence de la teneur en sable gypseux sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50)

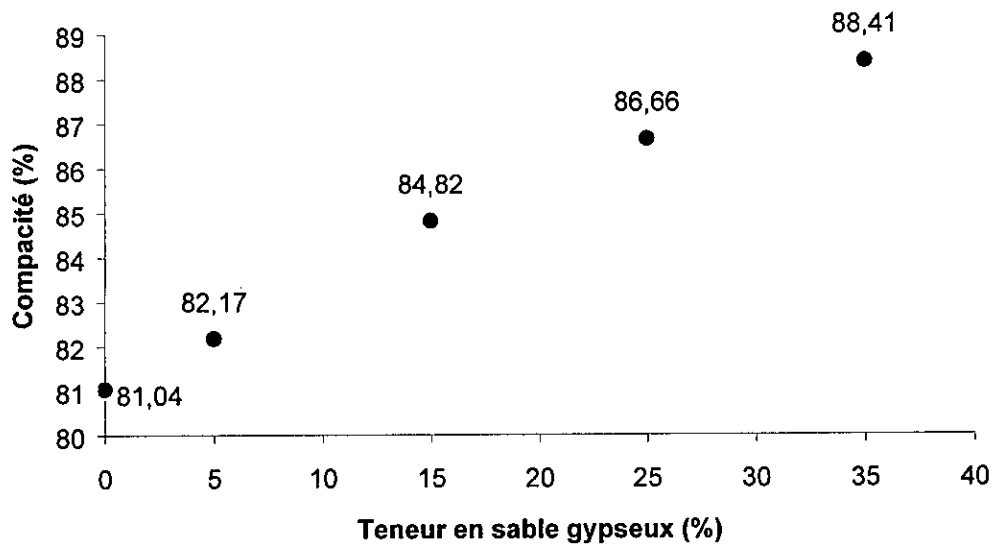


Figure VI.14- Influence de la teneur en sable gypseux sur la compacité (bitume 40/50)

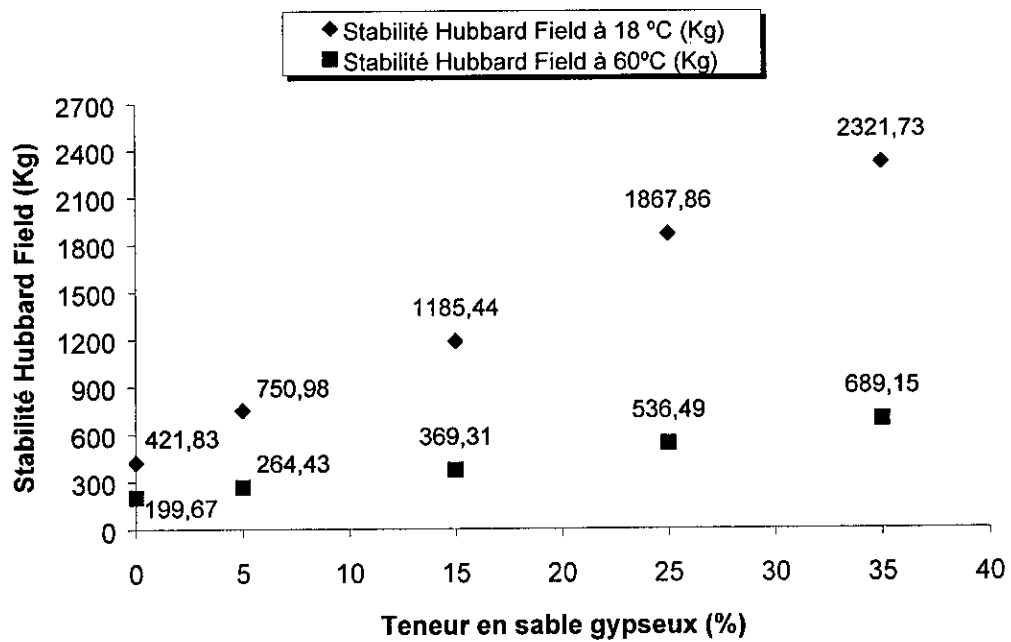


Figure VI.15- Influence de la teneur en sable gypseux sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100)

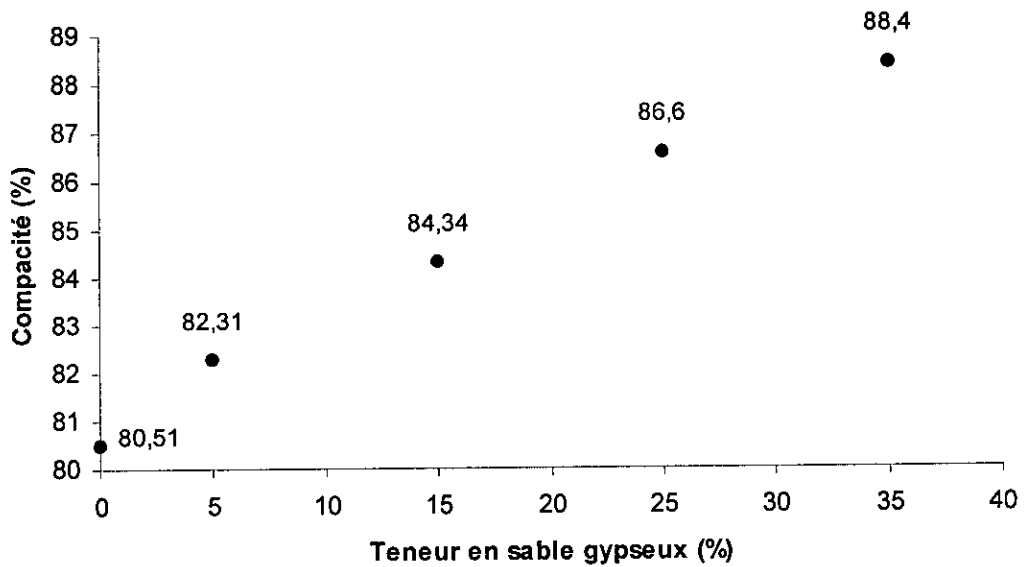


Figure VI.16- Influence de la teneur en sable gypseux sur la compacité (bitume 80/100)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

La première remarque qu'on peut tirer à partir de l'analyse des résultats obtenus avec la correction du sable de dune par le sable gypseux est la forte teneur en bitume nécessaire pour l'enrobage des différentes formulations.

Cette forte teneur en bitume, mais qui reste dans les normes relatives à ce type d'enrobé (7 à 9%) se justifie par le fait que le sable gypseux présente une teneur en fines trop élevée (30,79 % des éléments ont un diamètre inférieur à 0,08 mm). Ceci ne fait qu'accroître la surface spécifique, qui est un facteur prépondérant pour la détermination de la teneur en liant.

Le sable gypseux est un matériau qu'on obtient par l'hydratation et cristallisation dans le système monocyclique du sulfate de calcium. L'une des propriétés les plus caractéristiques de ce minéral est sa plus faible dureté ; son emploi dans la technique routière est très bénéfique pour deux raisons principales :

- Sa friabilité et sa forte teneur en fines favorisant la correction de la granulométrie de plusieurs types de matériaux et surtout ceux ayant une granulométrie serrée (c'est le cas de notre sable de dune) ;
- Sa nature minéralogique favorable à une bonne cohésion, il se compose essentiellement de gypse CaSO_4 (49,64% dans le cas de notre sable gypseux) et de calcaire CO_3Ca (27,19%) ainsi que de pourcentages variables d'insolubles (10,95%).

Les résultats Hubbard Field obtenus avec le sable de dune corrigé avec le sable gypseux montrent que la stabilité et la compacité augmentent avec le pourcentage de sable gypseux, ainsi la stabilité passe de :

- À 18°C et pour un bitume 40/50 de 814,49 Kg pour 0% de sable gypseux à 3259,67 Kg pour 35% de sable gypseux et pour un bitume 80/100 de 421,83 à 2321,73 Kg ;
- À 60°C et pour un bitume 40/50 de 246,82 Kg pour 0% de sable gypseux à 1092,30 Kg pour 35% et pour un bitume 80/100 de 199,67 gypseux à 689,15 Kg ;

À cet égard et vu les résultats obtenus pour différents pourcentages de sable gypseux, nous pouvons conclure que le pourcentage à partir duquel les performances mécaniques recommandées pour l'utilisation de sable enrobé en couche de roulement est le suivant :

- 75% de sable de dune + 25% de sable gypseux pour les deux classes de bitume 40/50 et 80/100.

VI.6.4. Influence du pourcentage en arène granitique sur la stabilité et la compacité Hubbard Field. [20] [1] [13]

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages d'arène granitique (5% à 35%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.19 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de l'arène granitique (bitume 40/50)

Bitume 40/50					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Arène granitique (%)	0	5	15	25	35
(%) bitume	6,50	6,65	6,91	7,14	7,34
Poids à l'air (g)	106,32	106,60	106,90	107,10	107,30
Densité apparente	1,81	1,82	1,82	1,82	1,82
Densité théorique	2,23	2,22	2,20	2,16	2,14
Compacité (%)	81,04	81,97	83,09	84,18	85,09
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	814,49	881,44	1378,57	2169,82	2588,66
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	246,82	276,57	396,14	628,98	792,74

Tableau VI.20 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de l'arène granitique (bitume 80/100)

Bitume 80/100					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Arène granitique (%)	0	5	15	25	35
(%) bitume	6,50	6,65	6,91	7,14	7,34
Poids à l'air (g)	106,47	106,65	106,90	107,10	107,25
Densité apparente	1,80	1,80	1,82	1,82	1,82
Densité théorique	2,23	2,21	2,19	2,16	2,13
Compacité (%)	80,51	81,26	83,11	84,31	85,35
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	421,83	593,98	849,66	1243,39	1345,03
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	199,67	200,67	268,39	395,73	421,93

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

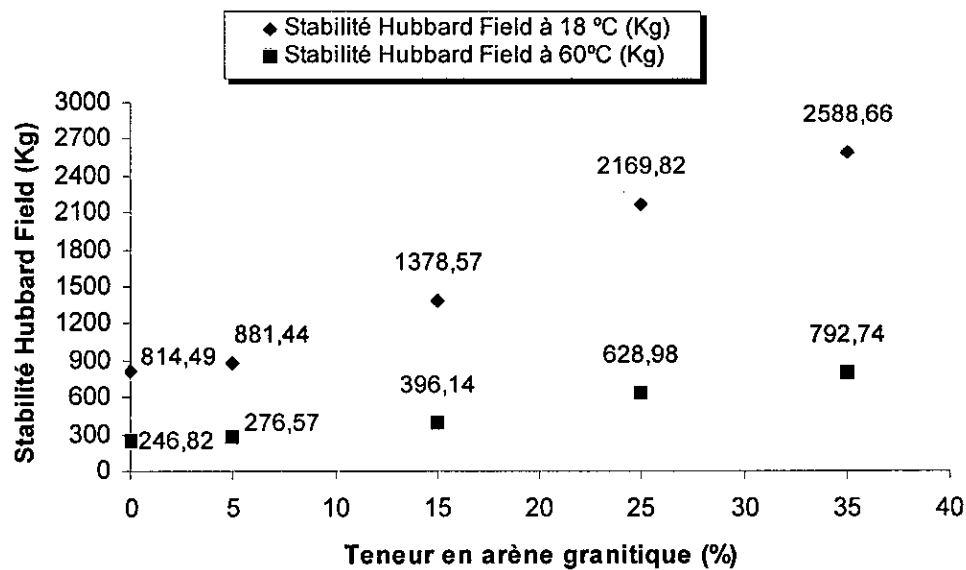


Figure VI.17- Influence de la teneur en arène granitique sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50)

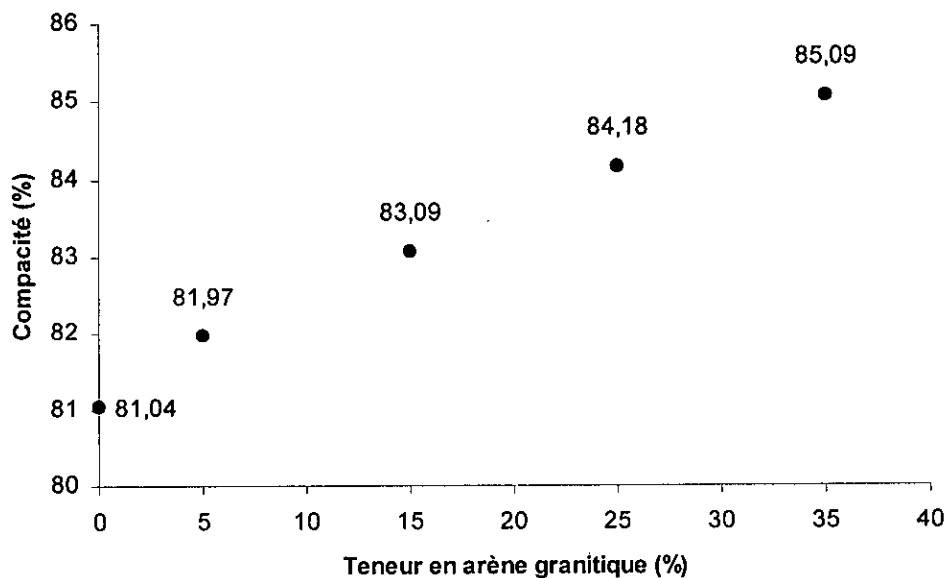


Figure VI.18- Influence de la teneur en arène granitique sur la compacité (bitume 40/50)

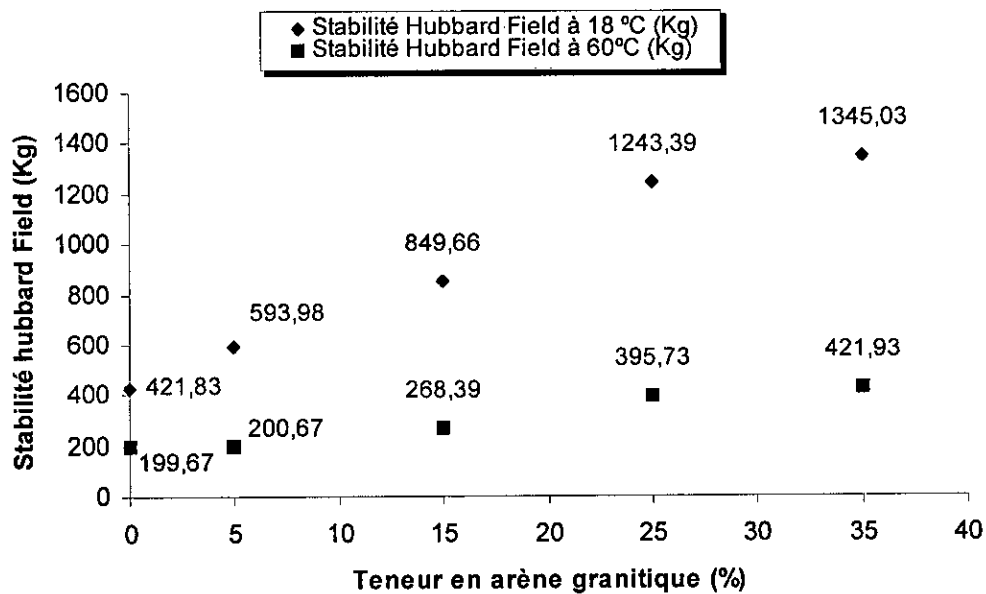


Figure VI.19- Influence de la teneur en arène granitique sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100)

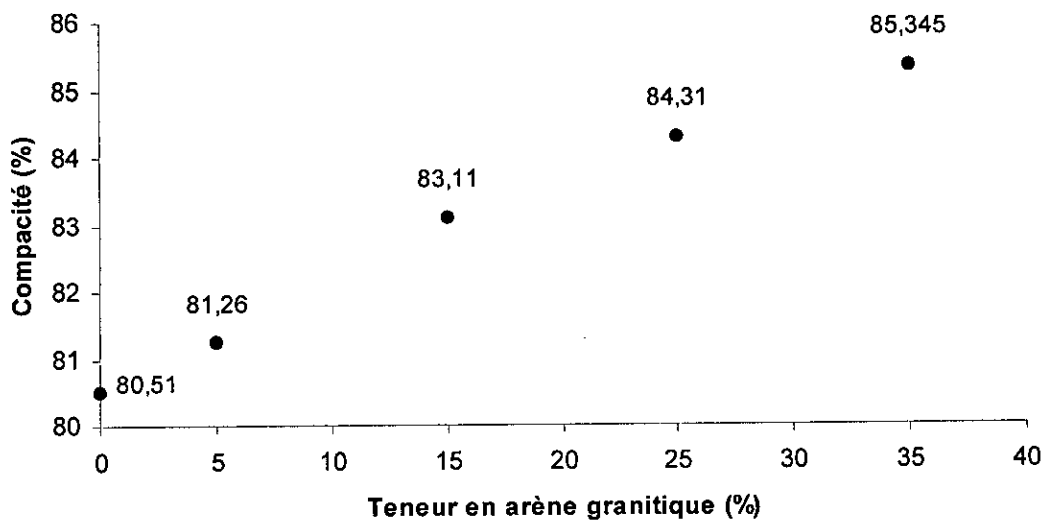


Figure VI.20- Influence de la teneur en arène granitique sur la compacité (bitume 80/100)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

Les arènes granitiques sont le produit de l'altération des roches de la famille « Granite » et gneiss aux conditions de surface.

L'analyse chimique de l'arène granitique utilisée montre clairement que les éléments prédominants dans sa composition sont les insolubles (85,14%), ce qui revient à dire que l'arène utilisée est un matériau siliceux.

Les résultats obtenus en incorporant l'arène à différents pourcentages dans le mélange sable de dune-bitume pur sont inférieurs à ceux obtenus avec l'utilisation du sable concassé ou bien du sable gypseux, cela est dû à plusieurs facteurs :

- La nature minéralogique de l'arène, qui se compose essentiellement de grains siliceux nanties par leur mauvaise affinité au bitume ;
- L'angularité des grains de l'arène ; connue généralement par ses grains plus ou moins arrondis mais cela n'empêche de trouver parfois des arènes possédant un angle de frottement interne très élevé ;
- Son pourcentage en fines relativement faible par rapport à celui des sables concassés et gypseux (dans le cas de l'arène utilisé le pourcentage en fines est de 12% alors qu'il été de 16,58% pour le sable concassé et 30,79% pour le sable gypseux).

Les résultats Hubbard Field obtenus avec le sable de dune corrigé avec de l'arène granitique montrent que la stabilité et la compacité augmentent avec le pourcentage de l'arène granitique, ainsi la stabilité passe de :

- À 18°C et pour un bitume 40/50 de 814,49 Kg pour 0% d'arène granitique à 2588,66 Kg pour 35% d'arène granitique et pour un bitume 80/100 de 421,83 Kg à 1345,03 Kg ;
- À 60°C et pour un bitume 40/50 de 246,82 Kg pour 0% d'arène granitique à 792,74 Kg pour 35% d'arène granitique et pour un bitume 80/100 de 199,67 à 421,93 Kg ;

De même que la stabilité, la compacité augmente et passe de 81,04% et 80,51% à 85,09% et 85,35% pour les deux classes de bitume 40/50 et 80/100.

Le minimum de stabilité exigé par les recommandations a été atteint pour un pourcentage d'ajout de l'arène de 25% et pour un bitume 40/50, alors qu'avec 35% d'arène et en utilisant le bitume 80/100 la stabilité n'est que de l'ordre de 421,93Kg. La solution à laquelle on fait souvent appel dans ce cas de problèmes est l'incorporation d'un pourcentage de chaux assez raisonnable (généralement entre 2 et 4%).

VI.6.5. Influence du pourcentage en fines gypseuses sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en fines gypseuses (5% à 35%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.21 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines gypseuses (bitume 40/50)

Bitume 40/50					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Fines gypseuses (%)	0	5	15	25	35
(%) bitume	6,50	7,46	8,56	9,29	9,83
Poids à l'air (g)	106,32	107,40	108,25	109,25	109,60
Densité apparente	1,81	1,81	1,83	1,84	1,86
Densité théorique	2,23	2,17	2,10	2,04	9,00
Compacité (%)	81,04	83,30	87,29	90,12	93,18
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	814,49	1617,68	2388,89	2984,91	3622,26
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	246,82	492,39	752,43	904,49	1126,69

Tableau VI.22 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines gypseuses (bitume 80/100)

Bitume 80/100					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Fines gypseuses (%)	0	5	15	25	35
(%) bitume	6,5	7,46	8,56	9,29	9,83
Poids à l'air (g)	106,47	107,35	108,40	109,20	109,80
Densité apparente	1,80	1,82	1,84	1,86	1,85
Densité théorique	2,23	2,17	2,09	2,04	2,00
Compacité (%)	80,51	84,02	87,88	90,92	92,86
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	421,83	1587,68	1998,63	2534,91	3122,96
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	199,67	507,48	611,75	768,29	927,03

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

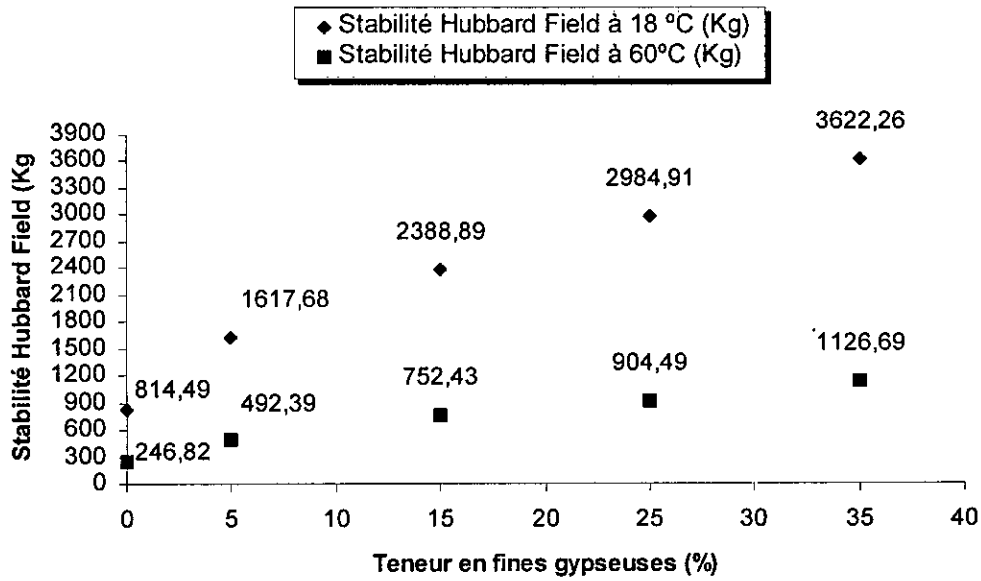


Figure VI.21- Influence de la teneur en fines gypseuses sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50)

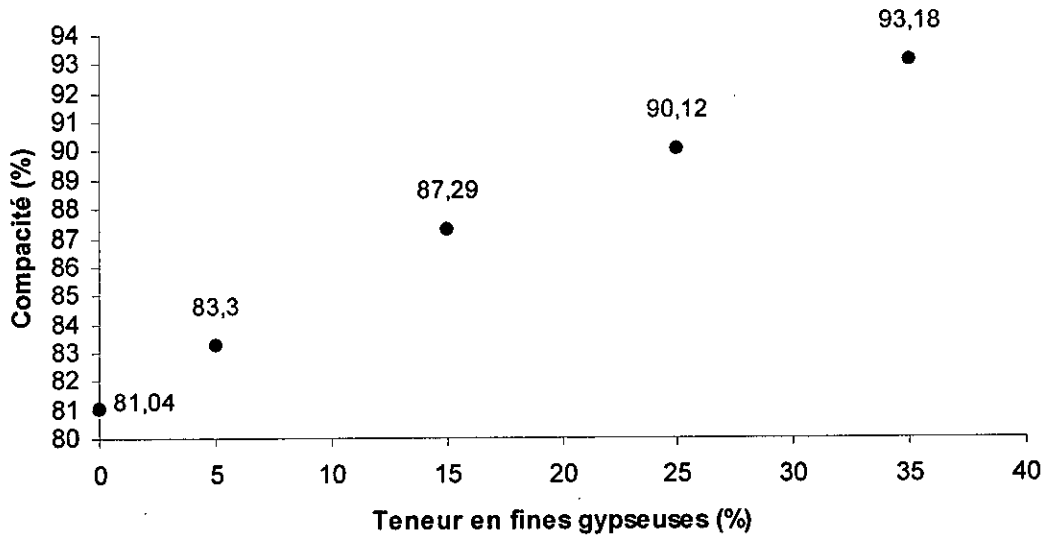


Figure VI.22- Influence de la teneur en fines gypseuses sur la compacité (bitume 40/50)

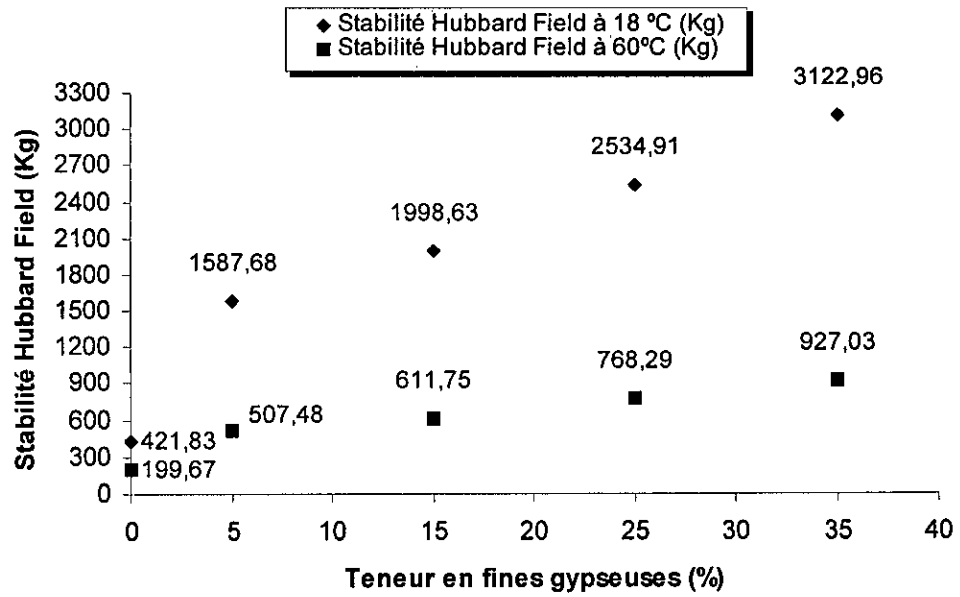


Figure VI.23- Influence de la teneur en fines gypseuses sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100)

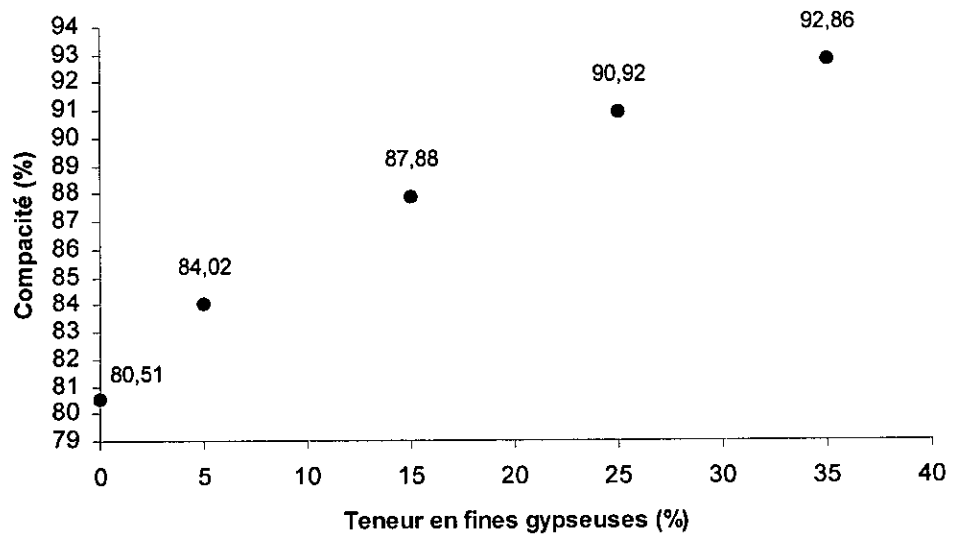


Figure VI.24- Influence de la teneur en fines gypseuses sur la compacité (bitume 80/100)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

En partant du principe de la dépendance du niveau de performances des mélanges à la fois de la granularité du matériau et de la dureté du liant, la solution consistant à améliorer la rigidité de liant par ajout de fines d'apport est possible.

L'idée de départ consistait à faire varier les teneurs en fines et étudier leur incidence sur les performances mécaniques des mélanges.

Le choix des deux types de fines d'apport naturelles (gypseuses et calcaires) est basé sur un critère très important et qui a une incidence importante sur les résultats finals, il s'agit de l'affinité liant-granulat ou en d'autre terme de l'adhésivité de l'un à l'autre.

Le mélange sans apport de fines gypseuses présentait un pourcentage de vides de l'ordre de 18,96% et 19,48% pour les deux classes de bitume, il est passé à 6,82% et 7,14% respectivement, les fines d'apport introduites dans le mélange viennent occuper, avec le bitume, ce volume des vides, d'où une nette amélioration de la compacité passant de 81,04% et 80,51% à 93,18% et 92,86% pour les deux types de bitumes 40/50 et 80/100.

La stabilité du mélange à base de sable de dune augmente avec l'ajout de fines, ainsi on passe de :

- À 18°C et pour un bitume 40/50 de 814,49 Kg pour 0% de fines gypseuses à 3622,26 Kg pour 35% de fines gypseuses et pour un bitume 80/100 de 421,83 Kg à 3122,96 Kg ;
- À 60°C et pour un bitume 40/50 de 246,82 Kg pour 0% de fines gypseuses à 1126,69 Kg pour 35% de fines gypseuses et pour un bitume 80/100 de 199,67 Kg à 927,03 Kg ;

En analysant les résultats obtenus pour différents pourcentages d'ajout, nous pouvons constater que les performances mécaniques exigées par la réglementation sont atteintes à partir de l'ajout de 15% de fines gypseuses. Ce pourcentage paraît raisonnable puisqu'il satisfait les exigences mécaniques et permet une bonne maniabilité de l'enrobé qui devient de plus en plus difficile à partir d'un ajout de 25% de fines gypseuses.

En conclusion, on note que l'apport de fines gypseuses a permis :

- D'augmenter la rigidité du mastic bitume/filler, d'où une nette augmentation de la stabilité ;
- De diminuer le pourcentage de vides ce qui entraîne une meilleure compacité.

VI.6.6. Influence du pourcentage en fines calcaires sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en fines calcaires (5% à 35%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.23 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines calcaires (bitume 40/50)

Bitume 40/50					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Fines calcaires (%)	0	5	15	25	35
(%) bitume	6,50	7,46	8,56	9,29	9,83
Poids à l'air (g)	106,32	107,30	108,35	109,23	109,75
Densité apparente	1,81	1,82	1,83	1,84	1,86
Densité théorique	2,23	2,18	2,11	2,08	2,02
Compacité (%)	80,04	83,67	87,20	89,18	91,58
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	814,49	1563,86	2299,81	2923,32	3501,88
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	246,82	500,36	721,31	897,94	1099,17

Tableau VI.24 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines calcaires (bitume 80/100)

Bitume 80/100					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Fines calcaires (%)	0	5	15	25	35
(%) bitume	6,50	7,46	8,56	9,29	9,83
Poids à l'air (g)	106,47	107,35	108,53	109,17	109,82
Densité apparente	1,80	1,83	1,86	1,86	1,87
Densité théorique	2,23	2,18	2,10	2,08	2,02
Compacité (%)	80,51	83,94	88,57	89,42	92,57
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	421,83	1424,19	1780,36	2483,38	2976,23
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	199,67	423,73	515,76	699,47	876,17

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

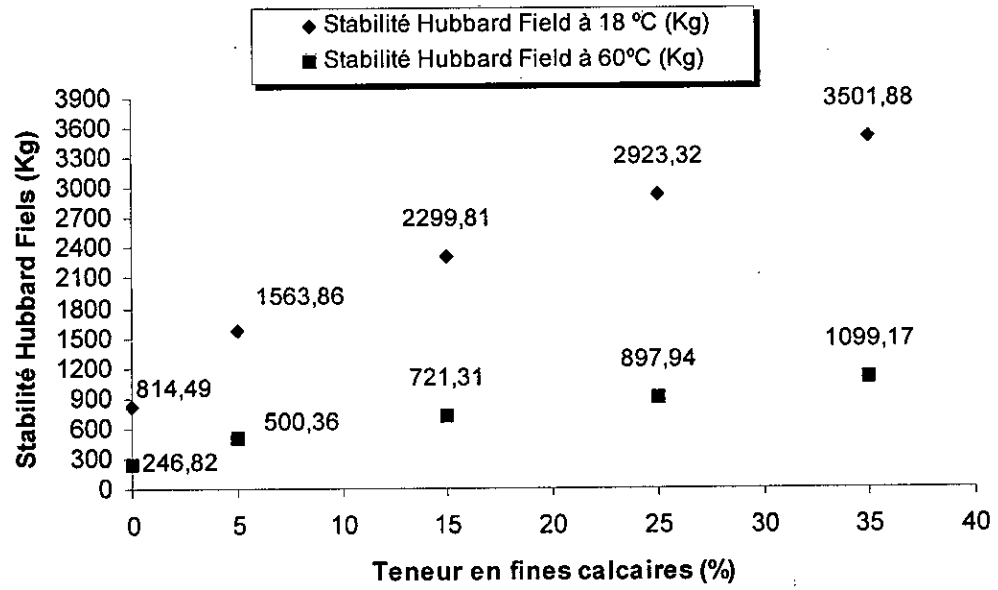


Figure VI.25- Influence de la teneur en fines calcaires sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50)

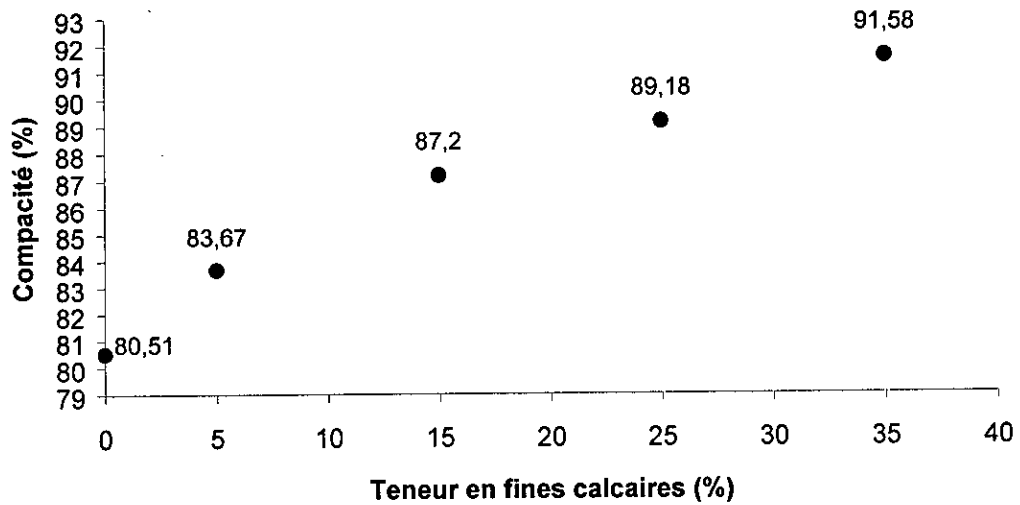


Figure VI.26- Influence de la teneur en fines calcaires sur la compacité (bitume 40/50)

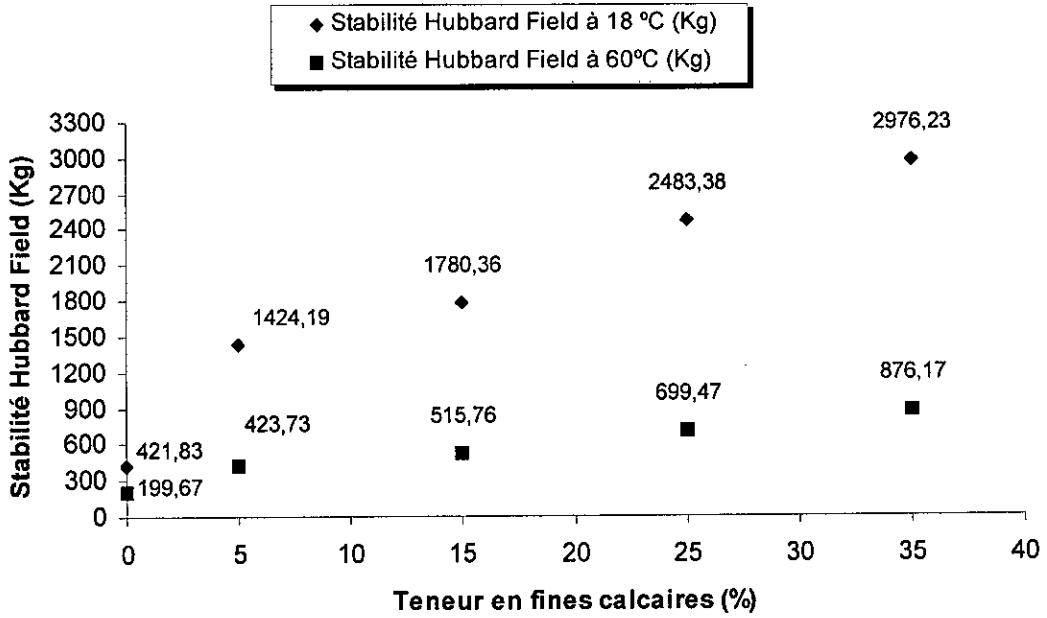


Figure VI.27- Influence de la teneur en fines calcaires sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100)

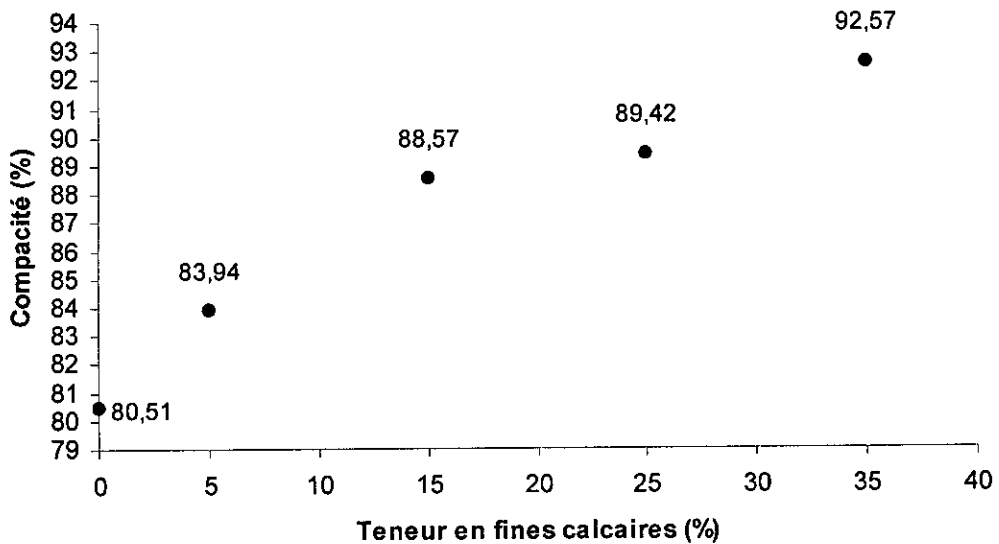


Figure VI.28- Influence de la teneur en fines calcaires sur la compacité (bitume 80/100)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

Les fines calcaires ont été depuis longtemps utilisées autant qu'ajout pour la correction de la granulométrie de certains matériaux utilisés dans la technique routière saharienne. Elles sont connues par leur pouvoir agglutinant au liant routier et spécialement les bitume purs. Elles permettent d'obtenir un mastic bitume-filler plus ou moins rigide et par conséquent une cohésion du mélange plus ou moins importante.

L'utilisation de ces fines pour la correction de sable de dune a permis de réduire le volume occupé par les vides en s'intercalant entre les grains de sable plus ou moins grossiers.

La teneur en bitume nécessaire à l'obtention de meilleur enrobage du mélange passe de 6,5% pour un ajout de 0% de fines calcaires à 9,834% pour l'ajout de 35% de ces mêmes fines, cette dernière teneur est considérée comme assez élevée mais le gain en résistance obtenu et aussi considérable :

- Il est de l'ordre à 18°C et en passant de 0 à 35% de fines calcaires de 330% (utilisation de bitume 40/50) ;
- Il est de l'ordre à 60°C et en passant de 0% à 35% de fines calcaires de 345% (utilisation de bitume 40/50) ;
- Il est de l'ordre à 18°C et en passant de 0 à 35% de fines calcaires de 605,5% (utilisation de bitume 80/100) ;
- Il est de l'ordre à 60°C et en passant de 0% à 35% de fines calcaires de 339% (utilisation de bitume 80/100) ;

La compacité a subi le même sort que la stabilité hubbard Field et elle est passée de 80,04% à 91,58% dans le cas de l'utilisation de bitume 40/50 et de 80,51% à 92,57% dans le cas de l'utilisation du bitume 80/100.

Les prescriptions techniques pour ce type d'enrobé sont atteintes à partir d'un mélange composé de 85% de sable de dune et 15% de fines calcaires. Cette formulation semble être assez pratique alliant l'aspect économique (dosage en bitume acceptable, facilité de compactage) et l'aspect technique (satisfaction des recommandations techniques).

VI.6.6. Influence du pourcentage en chaux sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en chaux (1% à 6%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.25 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de la chaux (bitume 40/50)

Bitume 40/50						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
Chaux (%)	1	2	3	4	5	6
% bitume	6,74	6,95	7,14	7,31	7,46	7,60
Poids à l'air (g)	106,70	106,90	107,10	107,30	107,40	107,50
Densité apparente	1,82	1,82	1,81	1,82	1,82	1,82
Densité théorique	2,22	2,21	2,20	2,19	2,18	2,17
Compacité	82,01	82,56	82,50	83,26	83,63	83,94
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	1283,29	1442,33	1530,65	1735,38	1627,29	1573,98
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	379,38	422,99	452,89	519,73	492,38	529,14

Tableau VI.26 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de la chaux (bitume 80/100)

Bitume 80/100						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
Chaux (%)	1	2	3	4	5	6
% bitume	6,74	6,95	7,14	7,31	7,46	7,60
Poids à l'air (g)	106,69	106,93	107,11	107,30	107,45	107,50
Densité apparente	1,81	1,81	1,81	1,82	1,82	1,81
Densité théorique	2,22	2,20	2,20	2,18	2,17	2,17
Compacité	81,49	82,08	82,33	83,16	83,71	83,80
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	887,53	951,44	1221,67	1429,54	1023,27	989,83
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	282,20	307,04	376,43	451,60	320,82	316,65

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

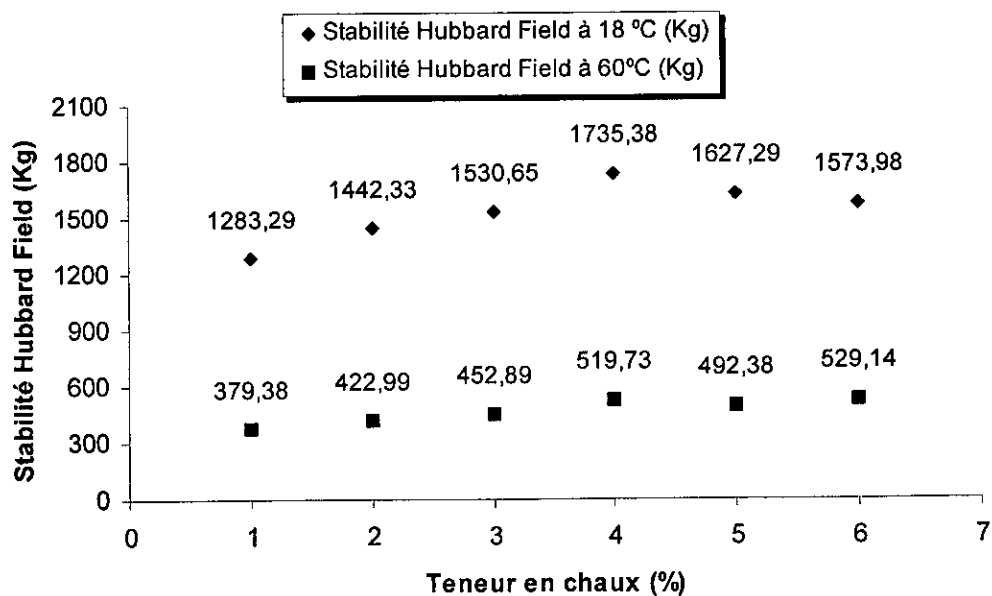


Figure VI.29- Influence de la teneur en chaux sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50)

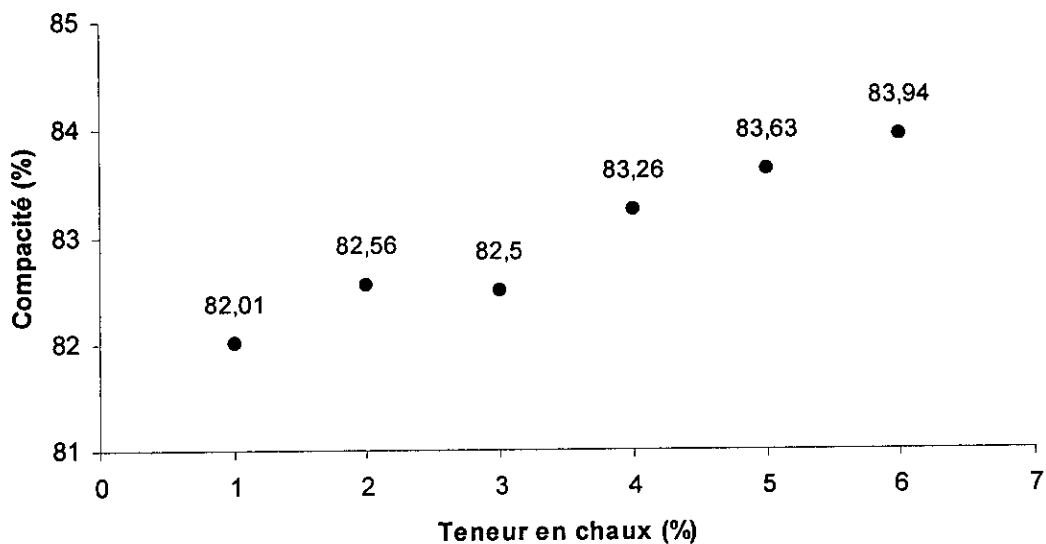


Figure VI.30- Influence de la teneur en chaux sur la compacité (bitume 40/50)

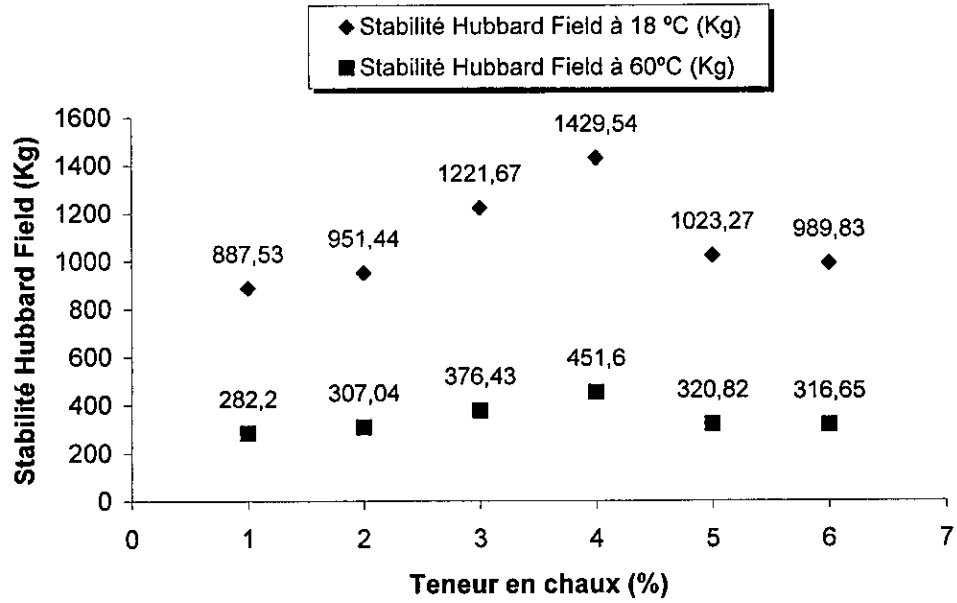


Figure VI.31- Influence de la teneur en chaux sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100)

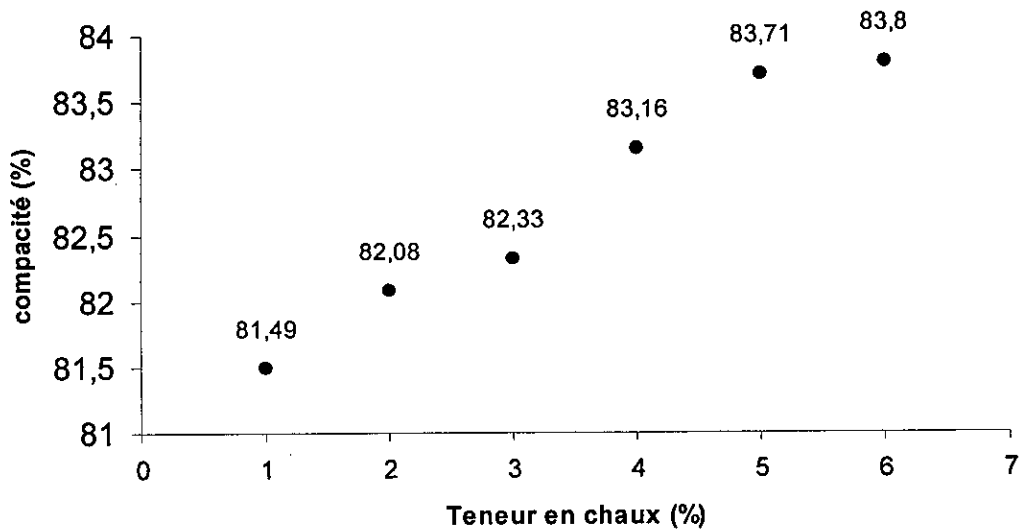


Figure VI.32- Influence de la teneur en chaux sur la compacité (bitume 80/100)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

Le sable de dune traité aux bitumes purs (40/50 et 80/100), donne des mélanges ayant des stabilités insuffisantes. Pour améliorer les performances mécaniques de ces mélanges, nous avons pensé à l'incorporation de la chaux à différents teneurs (allant de 1% à 6%). La chaux hydraulique a été souvent introduite dans les enrobés hydrocarbonés afin d'améliorer l'adhésivité passive du mélange. En présence de chaux, les stabilités ne sont pas très influencées par l'action de l'eau (des travaux sur l'influence de l'action de l'eau sur les stabilités Hubbard field obtenues ont montré que la différence entre les résultats des stabilités des éprouvettes immergées pendant 1 heure et celles immergées pendant une demi-heure n'est pas très importante, ce qui n'est pas le cas pour les sables enrobés non traités à la chaux.

Dans la technique routière saharienne et du fait que la chaux n'étant pas fabriquée sur place, son prix de revient est élevé, ainsi il est raisonnable de limiter sa teneur à moins de 4% dans le mélange.

La chaux que nous avons utilisée est une chaux hydraulique (éteinte), ces principales caractéristiques sont :

- Caractéristiques physiques :
 - Masse volumique absolue, $M_{vab} = 2,32 \text{ g/cm}^3$.
 - Masse volumique apparente, $M_{vapp} = 0,82 \text{ g/cm}^3$.
- Caractéristiques granulométriques :
 - % de fines (éléments ayant un diamètre inférieur à 0,08 mm) = 91%.

L'analyse des résultats Hubbard Field obtenus montre que :

- La stabilité Hubbard Field augmente avec l'ajout de la chaux jusqu'à une valeur optimale correspondante à 4% de chaux, elle passe de 814,49 Kg et 421,83 Kg pour les deux types de bitume et à 18°C (sans ajout de chaux) à 1735,38 Kg et 1429,54 Kg (avec l'ajout de 4% de chaux), puis elle décroît et se stabilise à 1573,98 Kg et 989,83 Kg à une teneur de 6% de chaux. Les stabilités à 60°C suivent la même tendance que celles obtenues à 18°C, le pic est atteint pour une valeur de 4% de chaux.

- La compacité Hubbard Field n'a pas subi le même sort que la stabilité, au contraire elle augmente avec l'ajout de la chaux et elle passe de 81,04 et 80,51% pour les deux types de bitume et sans ajout de chaux à 83,93% et 83,80% avec l'ajout de 6% de chaux.

La stabilité recommandée pour ce type d'enrobé a été atteinte dans le cas de l'utilisation de bitume 40/50 et pour un mélange se composant de 96% de sable de dune + 4% de chaux, alors que pour le cas de l'utilisation de bitume 80/100 la stabilité reste insuffisante.

VI.6.8. Influence du pourcentage en ciment CPJ 45 sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en ciment (1% à 6%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.27 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du ciment CPJ 45 (bitume 40/50)

Bitume 40/50						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
Ciment (%)	1	2	3	4	5	6
% bitume	6,74	6,95	7,14	7,31	7,46	7,60
Poids à l'air (g)	106,95	107,10	107,12	107,30	107,40	107,50
Densité apparente	1,82	1,83	1,83	1,83	1,82	1,82
Densité théorique	2,22	2,22	2,21	2,20	2,20	2,20
Compacité	81,81	82,33	85,60	82,96	82,66	82,90
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	1263,47	1435,08	1701,94	1633,79	1556,66	1476,65
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	252,69	405,33	522,56	447,03	463,29	461,63

Tableau VI.28 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du ciment CPJ 45 (bitume 80/100)

Bitume 80/100						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
ciment (%)	1	2	3	4	5	6
% bitume	6,74	6,95	7,14	7,31	7,46	7,60
Poids à l'air (g)	106,65	106,90	107,11	107,30	107,45	107,60
Densité apparente	1,81	1,80	1,81	1,82	1,82	1,82
Densité théorique	2,22	2,21	2,21	2,20	2,20	2,20
Compacité	81,33	81,46	82,19	82,55	82,83	83,13
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	846,39	1083,73	1123,12	1106,53	1099,60	1006,56
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	273,14	348,49	349,17	343,86	327,97	319,76

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

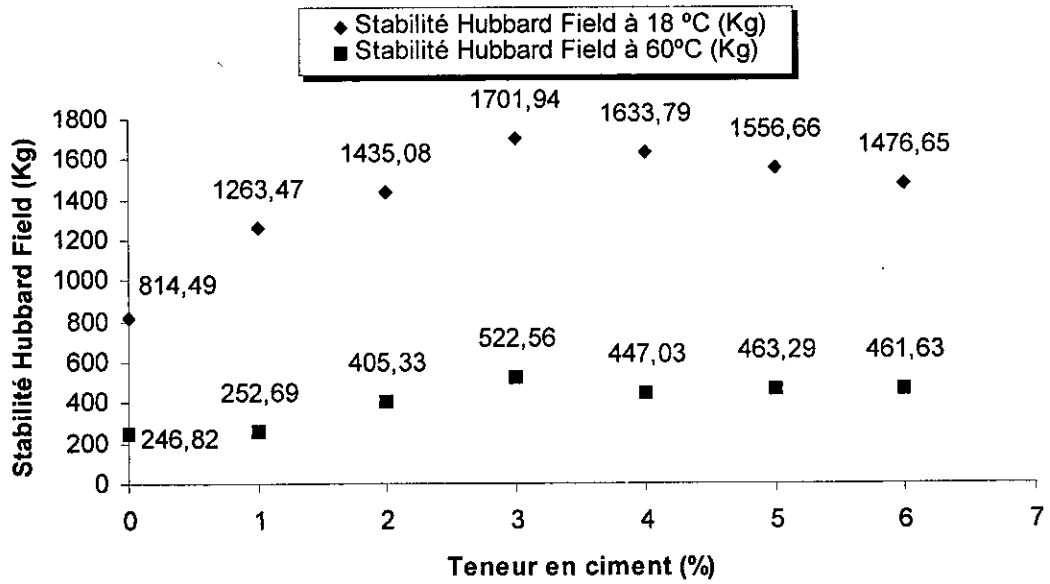


Figure VI.33- Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50)

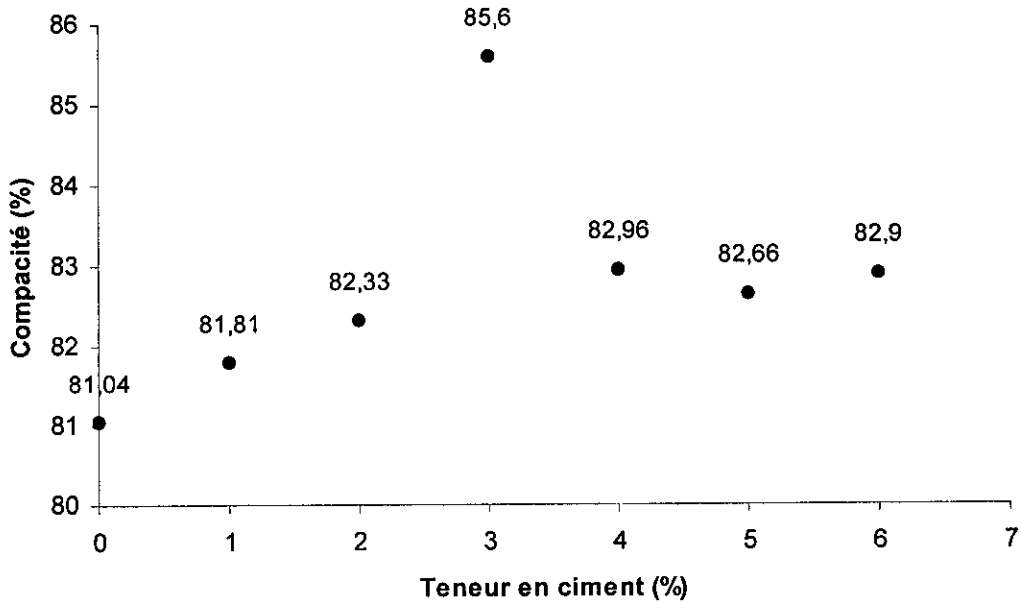


Figure VI.34- Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la compacité (bitume 40/50)

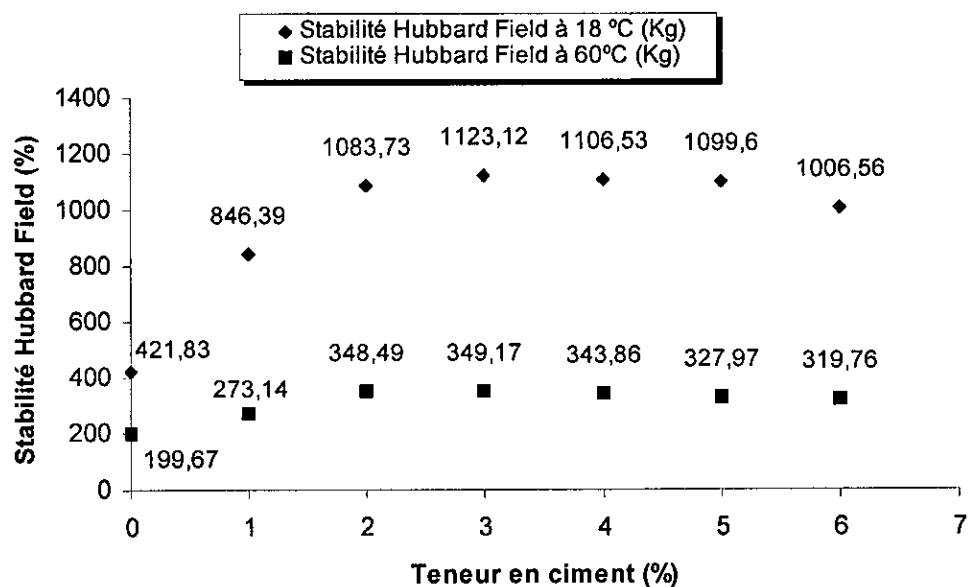


Figure VI.35- Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100)

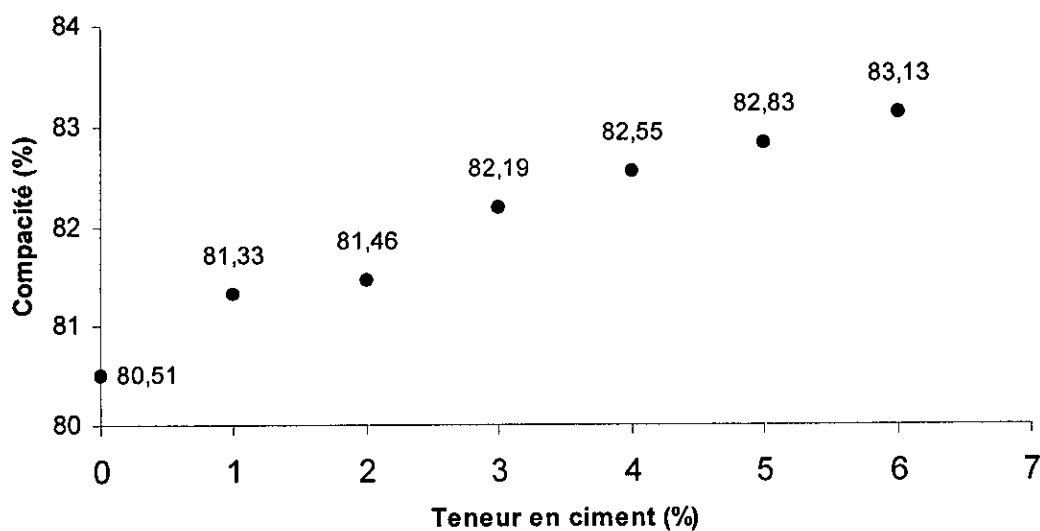


Figure VI.36- Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la compacité (bitume 80/100)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

La correction du sable de dune de Hassi Berkine avec différents pourcentages de ciment CPJ 45 a permis de tirer les constatations suivantes :

- L'existence d'un pic de résistance autour de 3% d'ajout de ciment, la valeur de la stabilité passe de :
 - À 18°C et en utilisant le bitume 40/50, de 814,49 Kg (sans ajout de ciment) à 1701,94 Kg (avec l'ajout de 3% de ciment), elle décroît ensuite pour se stabiliser à 1476,65 Kg (avec l'ajout de 6% de ciment) ;
 - À 60°C et en utilisant le bitume 40/50, de 246,82 Kg (sans ajout de ciment) à 522,56 Kg (avec l'ajout de 3% de ciment), elle décroît ensuite pour se stabiliser à 461,63 Kg (avec l'ajout de 6% de ciment) ;
 - À 18°C et en utilisant le bitume 80/100, de 814,49 Kg (sans ajout de ciment) à 1123,12 Kg (avec l'ajout de 3% de ciment), elle décroît ensuite pour se stabiliser à 1006,56 Kg (avec l'ajout de 6% de ciment) ;
 - À 60°C et en utilisant le bitume 80/100, de 199,67 Kg (sans ajout de ciment) à 349,17 Kg (avec l'ajout de 3% de ciment), elle décroît ensuite pour se stabiliser à 319,76 Kg (avec l'ajout de 6% de ciment) ;
- L'existence d'un pic de compacité autour de la valeur de 3% de ciment dans le cas de l'utilisation du bitume 40/50 et ayant une variation croissante dans le cas de l'utilisation du bitume 80/100, la valeur de la compacité passe :
 - De 81,04% (sans ajout de ciment) à 85,50% (avec l'ajout de 3% de ciment) et descendant à 82,9% (avec l'ajout de 6% de ciment) et cela en utilisant un bitume de classe 40/50 ;
 - De 80,51% (sans ajout de ciment) à 83,13% (avec l'ajout de 6% de ciment).

La stabilité recommandée pour ce type d'enrobé a été atteinte dans le cas de l'utilisation de bitume 40/50, elle est de l'ordre de 522,56 Kg (stabilité minimale recommandée à 60°C > 500 Kg) pour un mélange se composant de 96% de sable de dune + 3% de ciment, alors que pour le cas de l'utilisation de bitume 80/100 la stabilité reste insuffisante.

VI.6.9. Influence du pourcentage en laitier broyé sur la stabilité et la compacité Hubbard Field. [36] [10]

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en laitier broyé (1% à 6%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.29 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du laitier broyé (bitume 40/50)

Bitume 40/50						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
laitier (%)	1	2	3	4	5	6
% bitume	6,74	6,95	7,14	7,31	7,46	7,60
Poids à l'air (g)	106,45	106,83	107,09	107,28	107,42	107,53
Densité apparente	1,81	1,73	1,79	1,80	1,81	1,80
Densité théorique	2,22	2,21	2,18	2,20	2,19	2,18
Compacité	81,29	78,28	82,11	81,96	82,56	82,46
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	1217,12	1322,54	1407,52	1628,83	1502,42	1375,86
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	334,98	397,74	459,15	511,02	467,61	413,49

Tableau VI.30 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du laitier broyé (bitume 80/100)

Bitume 80/100						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
laitier (%)	1	2	3	4	5	6
% bitume	6,74	6,95	7,14	7,31	7,46	7,60
Poids à l'air (g)	106,66	106,83	107,70	107,23	107,44	107,49
Densité apparente	1,78	1,79	1,80	1,7	1,79	1,80
Densité théorique	2,22	2,21	2,20	2,193	2,185	2,179
Compacité	80,24	81,04	81,79	81,18	81,90	82,59
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	845,16	863,47	1098,36	1103,78	1013,08	979,63
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	276,65	285,56	333,49	342,7	318,37	308,78

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

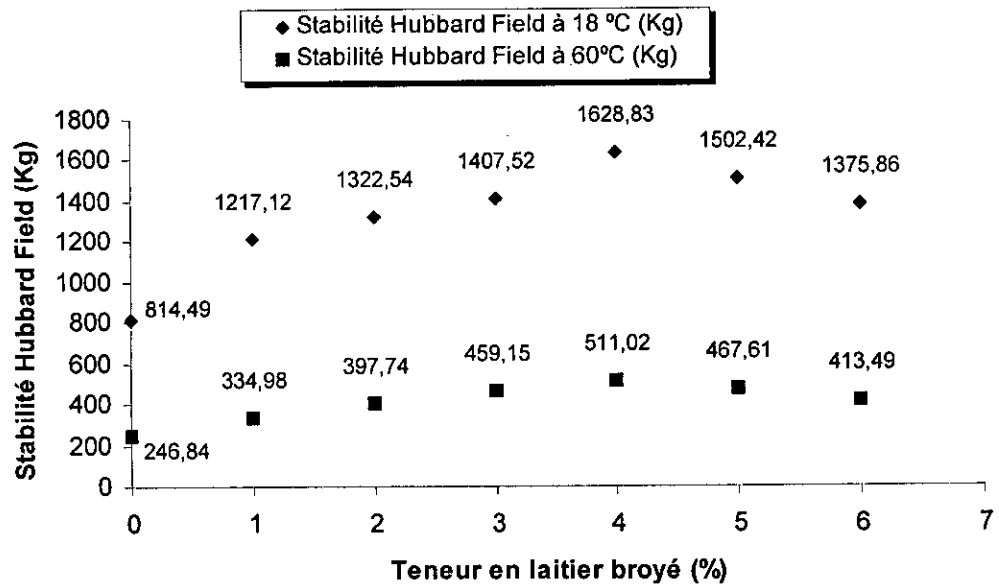


Figure VI.37- Influence de la teneur en laitier broyé sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50)

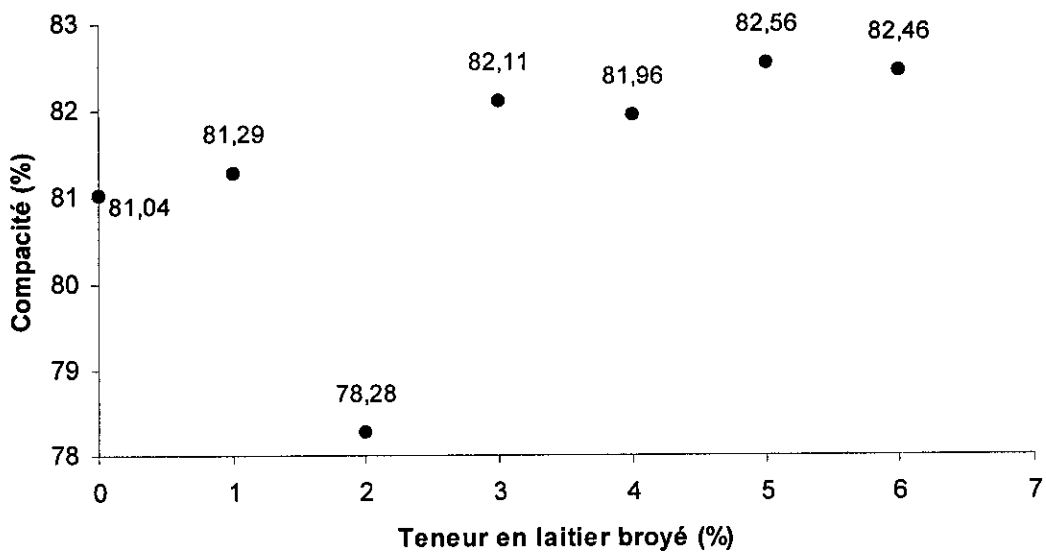


Figure VI.38- Influence de la teneur en laitier broyé sur la compacité (bitume 40/50)

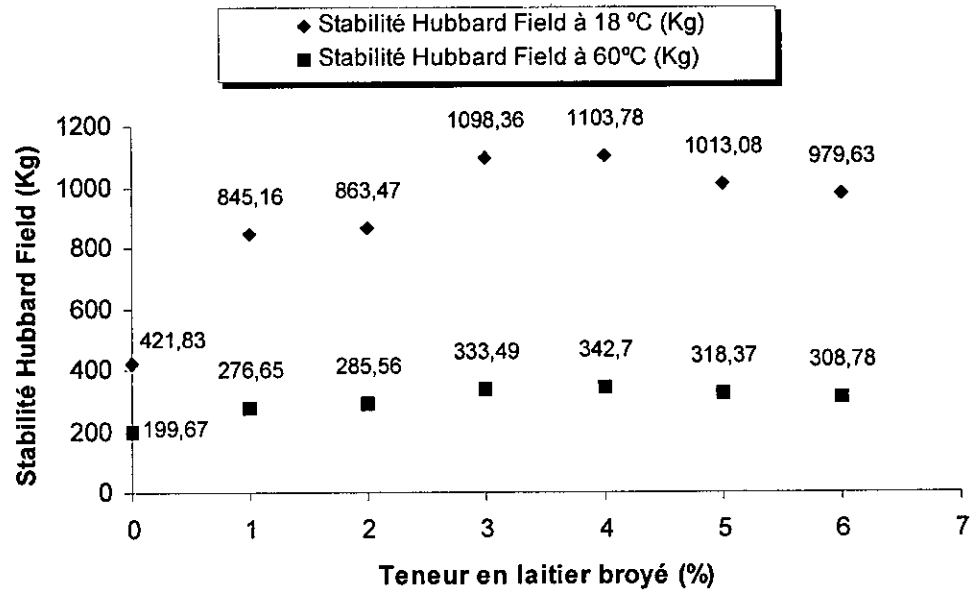


Figure VI.39- Influence de la teneur en laitier broyé sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100)

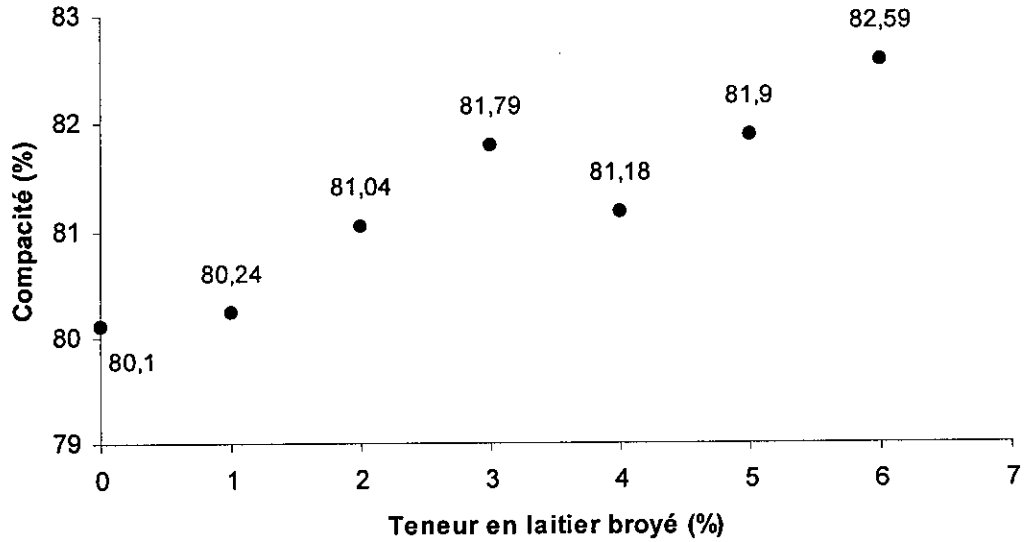


Figure VI.40- Influence de la teneur en laitier broyé sur la compacité (bitume 80/100)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

Les sables fins ne sont en général pas utilisables dans la construction s'ils ne sont pas corrigés par un autre matériau, car ils présentent plusieurs inconvénients. Contrairement aux graves, les sables sont pratiquement incompactables, leur portance est très faible et leur traficabilité très réduite. Lorsque le compactage est possible, les résistances mécaniques sont très faibles pour les raisons suivantes :

- Un pourcentage de vides élevé qui entraîne une forte déformabilité ;
- Un engrènement plus faible que celui rencontré avec des gravillons ;
- Un manque presque total de cohésion.

Le sable de dune ne contient pas assez de fines, il présente par conséquent une mauvaise stabilité. De ce fait sa correction est nécessaire. L'ajout d'un liant hydraulique, dans notre cas le laitier de haut fourneau appartenant à la famille des laitiers granulés et broyé en fines, est indispensable du fait que le sable de dune présente une cohésion nulle.

Il ne faut pas s'attendre à ce que l'utilisation d'un liant hydraulique en pourcentage réduit tel que le laitier broyé ou la chaux éteinte engendre une nette amélioration des performances mécaniques. Il est vrai que l'emploi de l'un des deux liants donne une meilleure cohésion à l'enrobé mais la carence en éléments grossiers et la forme arrondie des grains de sable de dune ne permettent pas d'atteindre des performances mécaniques comparables à celles obtenues par exemple avec l'ajout de sable concassé riche en fines ou celles obtenues avec l'ajout de fines naturelles en grandes quantités (fines gypseuses ou fines calcaires).

Les résultats obtenus avec l'emploi des deux bitumes purs montrent clairement que la stabilité Hubbard Field augmente avec l'ajout de laitier broyé, elle atteint son maximum avec l'emploi de 4% de ce liant hydraulique et ensuite elle chute avec l'augmentation de l'ajout.

La compacité quant à elle ne suit pas une allure bien définie mais elle se situe globalement dans l'intervalle [80,51% à 82,59%].

La stabilité recommandée a été atteinte en utilisant le bitume 40/50 et cela pour la formulation : 96% de sable de dune + 4% de laitier broyé, alors que dans le cas de l'utilisation de bitume 80/100 les performances restent insuffisantes.

Finalement, Il est à noter que le laitier de haut fourneau n'est pas un matériau produit localement dans le Sahara, son utilisation en teneurs raisonnables permet d'allier l'intérêt économique et les exigences des recommandations.

VI.6.10. Influence du pourcentage en plâtre sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en plâtre (1% à 6%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.31 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du plâtre (bitume 40/50)

Bitume 40/50						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
Plâtre (%)	1	2	3	4	5	6
% bitume	6,74	6,95	7,14	7,31	7,46	7,60
Poids à Pair (g)	106,70	106,90	107,10	107,30	107,40	107,60
Densité apparente	1,82	1,81	1,81	1,82	1,82	1,82
Densité théorique	2,22	2,21	2,21	2,20	2,19	2,19
Compacité	81,91	81,75	82,14	82,58	83,03	83,31
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	826,29	873,32	879,44	1051,76	1463,65	1329,87
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	255,37	259,45	281,38	334,35	463,14	391,28

Tableau VI.32 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du plâtre (bitume 80/100)

Bitume 80/100						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
Plâtre (%)	1	2	3	4	5	6
% bitume	6,74	6,95	7,14	7,31	7,46	7,60
Poids à Pair (g)	106,60	106,50	107,05	107,25	107,45	107,60
Densité apparente	1,82	1,82	1,81	1,81	1,83	1,83
Densité théorique	2,22	2,21	2,20	2,20	2,19	2,18
Compacité	81,88	82,11	81,92	82,39	83,40	83,72
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	476,69	542,38	597,29	631,36	774,98	768,34
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	223,78	237,88	248,16	259,31	269,25	259,78

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

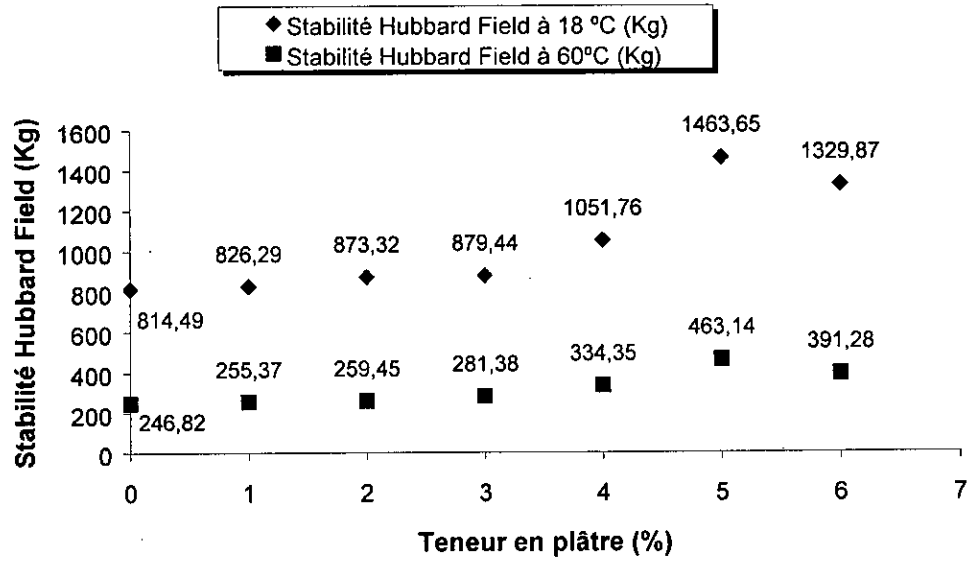


Figure VI.41- Influence de la teneur en plâtre sur la stabilité Hubbard Field (bitume 40/50)

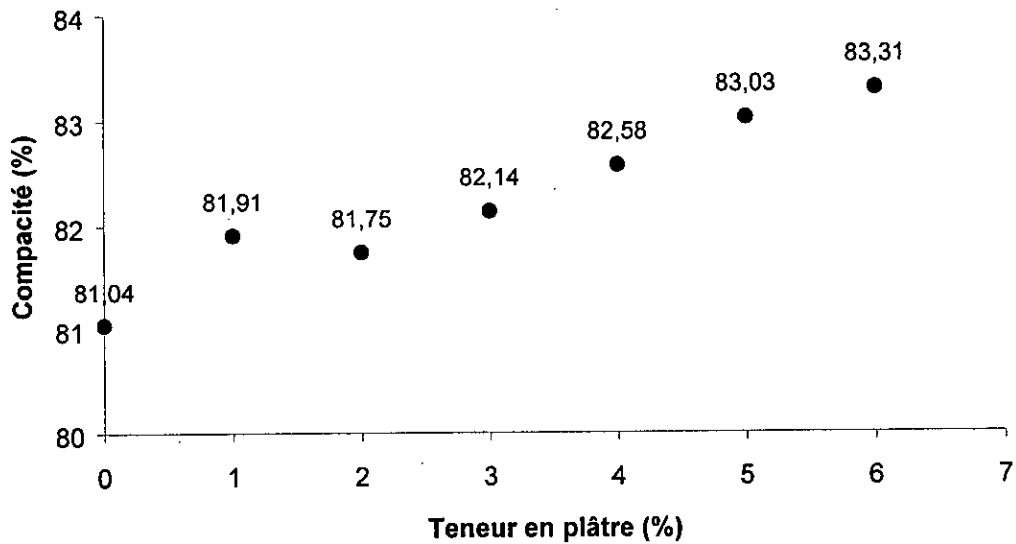


Figure VI.42- Influence de la teneur en plâtre sur la compacité (bitume 40/50)

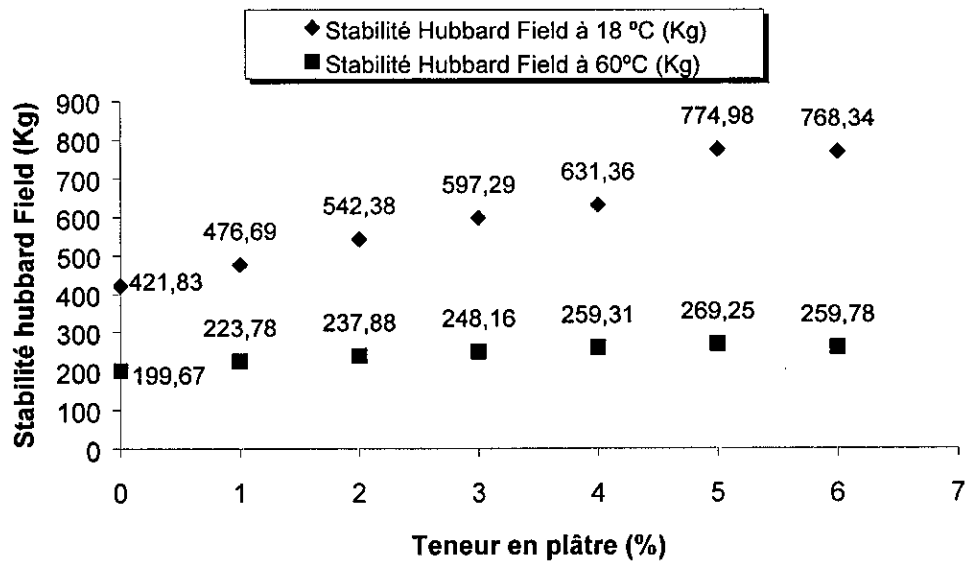


Figure VI.43- Influence de la teneur en plâtre sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100)

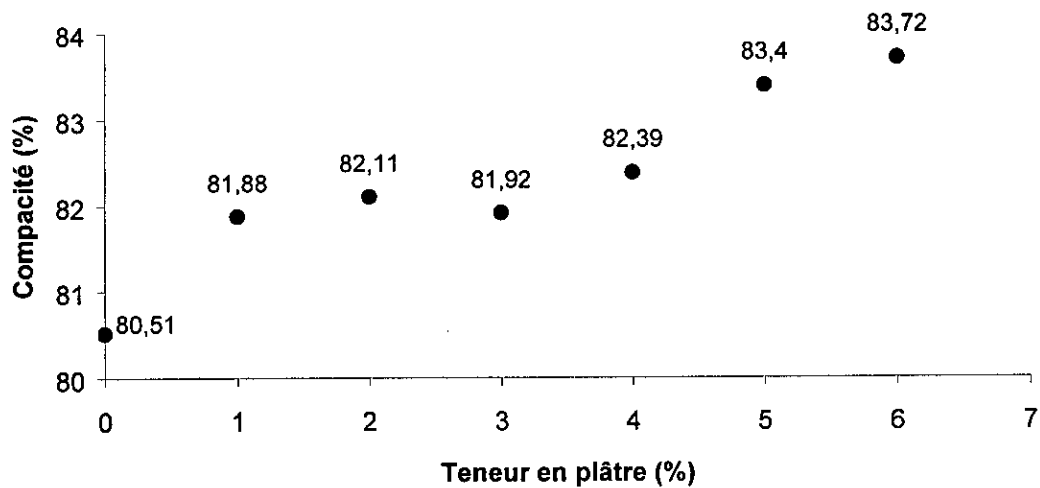


Figure VI.44- Influence de la teneur en plâtre sur la compacité (bitume 80/100)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

La correction du sable de dune de Hassi Berkine par l'adjonction de différents pourcentages de plâtre (allant de 1% à 6%) n'a pas permis d'atteindre les objectifs escomptés, les résultats obtenus sont inférieurs à ceux que l'on a eu avec l'adjonction des trois liants hydrauliques précédents (ciment, laitier broyé, chaux), cela est dû peut être à la mauvaise adhésivité du plâtre.

La stabilité a comme même connu une certaine amélioration mais sans atteindre la valeur minimale des prescriptions techniques, elle passe de :

- À 18°C et en utilisant un bitume 40/50 : de 814,49 Kg sans ajout à une valeur maximale de l'ordre de 1463,65 Kg dans le cas de l'ajout de 5% de plâtre et puis elle passe à une valeur de 1329,87 Kg correspondante à l'ajout de 6% ;
- À 60°C et en utilisant un bitume 40/50 : de 246,82 Kg sans ajout à une valeur maximale de l'ordre de 463,14 Kg dans le cas de l'ajout de 5% de plâtre et puis elle passe à une valeur de 391,28 Kg correspondante à l'ajout de 6% ;
- À 18°C et en utilisant un bitume 80/100: de 421,83 Kg sans ajout à une valeur maximale de l'ordre de 774,98 Kg dans le cas de l'ajout de 5% de plâtre et puis elle passe à une valeur de 76,34 Kg correspondante à l'ajout de 6% ;
- À 60°C et en utilisant un bitume 80/100 : de 199,67 Kg sans ajout à une valeur maximale de l'ordre de 269,25 Kg dans le cas de l'ajout de 5% de plâtre et puis elle passe à une valeur de 259,78 Kg correspondante à l'ajout de 6% ;

La compacité a aussi connu une amélioration et elle passe de :

- 81,04% sans ajout de plâtre à 83,31% dans le cas de l'ajout de 6% de plâtre (utilisation du bitume 40/50) ;
- 80,51% sans ajout de plâtre à 83,72% dans le cas de l'ajout de 6% de plâtre (utilisation du bitume 80/100) ;

Une analyse de ces résultats permet de dire que l'incorporation du plâtre dans le mélange sable de dune-bitume a permis d'améliorer la cohésion de l'enrobé mais la pauvreté du sable de dune en fines (responsables de la rigidification du mastic est de la réduction du volume des vides) ainsi que l'absence des éléments grossiers et anguleux n'ont pas permis d'atteindre un niveau de performances assez élevé.

Le plâtre ne présente pas une bonne affinité aux bitumes routiers et c'est pour cette raison qu'il est rarement utilisé dans la technique routière.

Conclusion de la première série d'essais :

Le traitement à chaud du sable de dunes de Hassi Berkine avec différents types de stabilisants a montré son efficacité sur l'amélioration de la stabilité et la compacité Hubbard Field. La formulation optimale a été atteinte en utilisant 35% de fines gypseuses.

Dans la pratique, la formulation choisie pour la réalisation des tapis en sables enrobés dépend de la nature et la qualité du sable ainsi que des propriétés et de la disponibilité des liants et des différents types d'ajouts.

VI.7. DEUXIEME SERIE D'ESSAIS (TRAITEMENT A FROID).

Cette deuxième série d'essai est réservée à l'étude de l'enrobage à froid et son incidence sur les performances mécaniques du sable enrobé corrigé avec différents types d'ajout, les deux liants employés sont après identifications faites au niveau du Laboratoire Des Travaux Publics Du Centre pour le cut back et à l'organisme du Contrôle Technique des Travaux Publics CTTP pour l'émulsion de bitume, de classe 400/600 et 60 respectivement. Ces deux valeurs représentent respectivement la pseudo-viscosité du cut back mesurée au viscosimètre d'orifice 10 mm à 25°C et la teneur en bitume dans l'émulsion calculée après détermination de la teneur en eau dans l'émulsion.

Les éprouvettes Hubbard Field ont été confectionnées au niveau du Laboratoire Central de La Société Nationale Des Grands Travaux Routiers de Reghaïa à raison de 6 éprouvettes par formulation et par teneur ; trois éprouvettes pour l'écrasement à 18°C et les trois autres pour l'écrasement après une demie heure d'immersion dans l'eau à 60 °C.

Dans le cas de l'utilisation du cut back 400/600, et vu sa grande viscosité qui ne permet pas un bon enrobage à froid, il est souvent conseillé de le chauffer à une température modérée (40 à 50°C) nécessaire pour avoir une bonne adhésivité du liant au granulat sans parfois atteindre la température d'évaporation de son solvant ou bien la température d'inflammabilité de son kérosène.

La distillation fractionnée du cut back et l'essai de la détermination de la teneur en eau dans l'émulsion ont permis de déterminer le pourcentage du kérosène dans le cut back (11,44%) et celui de l'eau dans l'émulsion (39,5%), ces valeurs ont servi aux calculs des pourcentages nécessaires au meilleur enrobage du mélange.

L'émulsion de bitume n'est jamais utilisée à son état naturel, un certain pourcentage d'eau d'apport est nécessaire pour avoir un bon enrobage. Cette quantité d'eau d'apport dépend de plusieurs paramètres dont la nature minéralogique des granulats et leur pourcentage en fines. Elle se situe généralement dans l'intervalle 2% à 6%.

Les éprouvettes Hubbard Field confectionnées à base du cut back ou de l'émulsion de bitume ne sont pas écrasées après 24 heures comme c'était le cas pour les bitumes purs et l'enrobage à chaud d'une manière générale. L'écrasement se fait après une stabilisation finale du poids de l'éprouvette, c'est à dire après l'évacuation du kérosène inclus dans le cut back et de l'eau de l'émulsion de bitume. Cela dépend essentiellement du pourcentage de vides du squelette granulaire (dans le cas d'un faible pourcentage de vides, le kérosène est empêché de quitter le mélange après enrobage) et de l'indice de rupture de l'émulsion de bitume (s'il est grand la rupture se fait rapidement et s'il est faible la rupture se fait lentement). Dans la pratique, les émulsions les plus utilisées sont celles à indice de rupture faible (afin que la rupture se fasse après compactage et séchage de l'enrobé répandu).

VI.7.1. Influence de la teneur en cut back et en émulsion sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en cut back 400/600 et en émulsion 60 sur le sable de dune pris séparément, les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants

Tableau VI.33 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le sable de dune de Hassi Berkine (cut back 400/600)

Cut back 400/600						
% cut back	6,21	6,78	7,34	7,91	8,48	9,04
Module de richesse	3,77	4,11	4,46	4,80	5,15	5,48
Poids à Pair (g)	106,10	106,60	107,20	108,00	108,40	108,90
Densité apparente	1,80	1,81	1,82	1,84	1,84	1,84
Densité théorique	2,28	2,26	2,23	2,21	2,19	2,16
Compacité	78,95	80,10	81,61	83,26	84,02	85,18
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	129,31	156,61	168,97	202,48	192,13	178,54
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	49,98	65,73	79,26	98,33	89,73	82,34

Tableau VI.34 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le sable de dune de Hassi Berkine (émulsion 60)

Emulsion 60						
% émulsion	9,09	9,91	10,74	11,57	12,40	13,22
Module de richesse	3,77	4,11	4,46	4,80	5,15	5,48
Poids à Pair (g)	106,85	107,10	107,38	108,22	108,49	108,92
Densité apparente	1,81	1,81	1,81	1,83	1,83	1,84
Densité théorique	2,28	2,26	2,23	2,21	2,19	2,16
Compacité	79,61	80,19	81,20	82,58	83,54	85,04
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	141,63	152,29	161,36	196,21	195,75	182,93
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	52,06	70,03	73,14	100,34	93,56	89,84

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

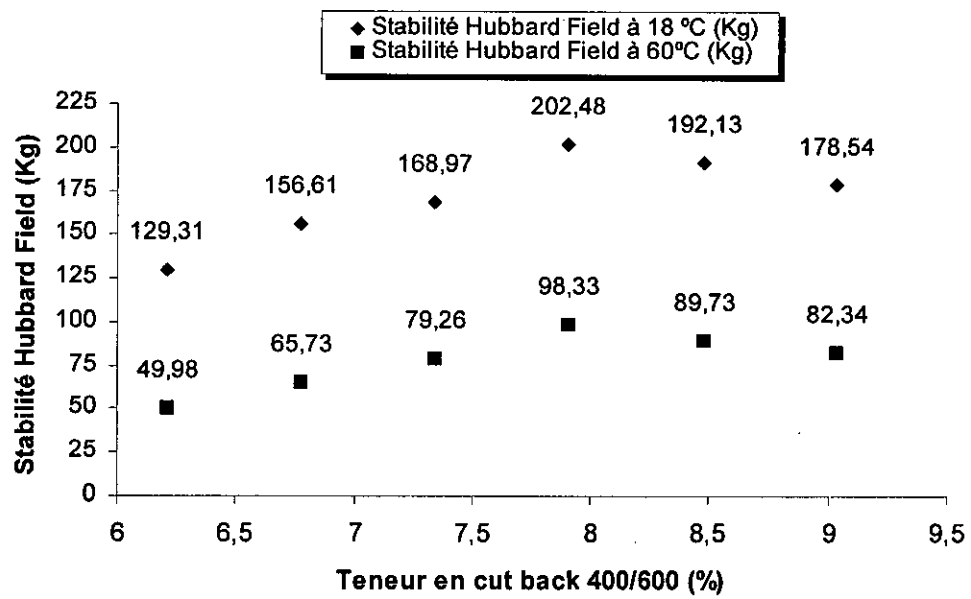


Figure VI.45- Influence de la teneur en cut back 400/600 sur la stabilité Hubbard Field (100% sable de dune)

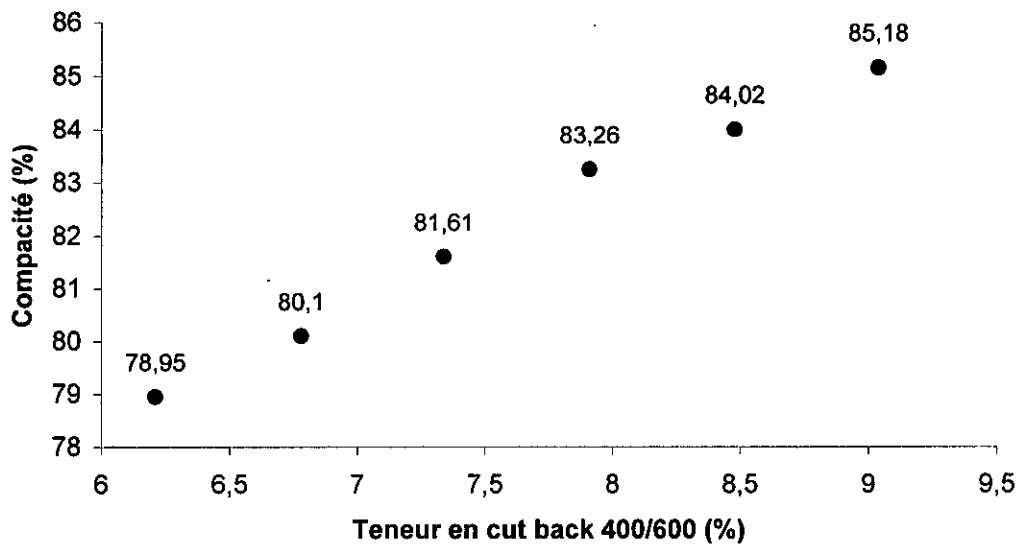


Figure VI.46- Influence de la teneur en cut back 400/600 sur la compacité (100% sable de dune)

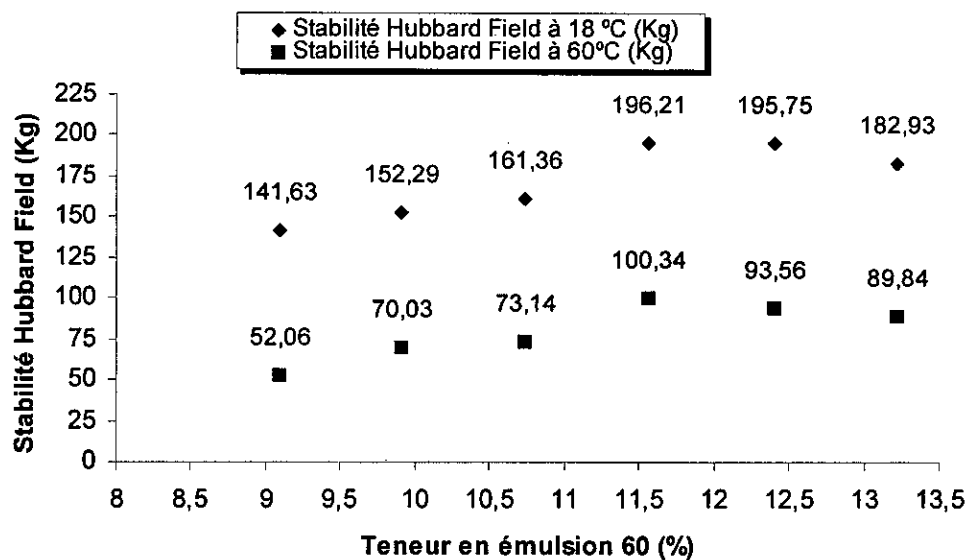


Figure VI.47- Influence de la teneur en émulsion 60 sur la stabilité Hubbard Field (100% sable de dune)

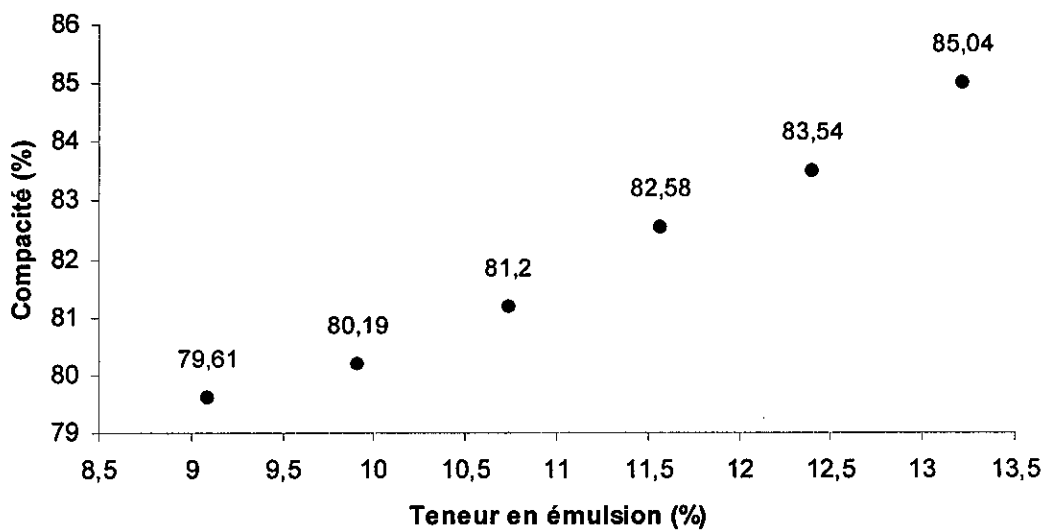


Figure VI.48- Influence de la teneur en émulsion 60 sur la compacité (100% sable de dune)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

L'utilisation des cut back et des émulsions de bitume dans la construction routière est très ancienne, plusieurs réseaux sahariens ont été revêtus avec des revêtements ouverts. Ce sont certains aspects d'ordre climatique, géotechnique et de mise en œuvre différée qui ont favorisé ce type de revêtement.

Au sud on a constaté que selon les régions « caractéristiques du sol support », la durabilité de ces revêtements est estimée dans une fourchette de 3 à 10 ans. L'eau pénétrant dans ces enrobés s'infiltré aussi dans la structure perméable de la chaussée causant ainsi des dégradations par déstabilisation de la fondation.

Les enrobés ouverts doivent leur ouverture à l'absence d'une fraction granulaire et non pas à un sous compactage. Ce dernier doit être bien mené pour que l'évolution ultérieure inéluctable des compacités soit la plus bonne.

Les liants hydrocarbonés utilisés pour l'enrobage à froid (cut back 400/600 et l'émulsion de bitume 60) sont fabriqués à partir d'un liant pur (bitume 80/100). Le cut back et l'émulsion de bitume utilisés dans cette deuxième série d'essai proviennent de l'Entreprise Des Liants Routiers Algériens- direction production sise à la cinquième entrée du port d'Alger (ELIROA).

L'analyse des résultats Hubbard Field obtenus en employant les deux types de liants pour enrober le sable de dune de Hassi Berkine montre clairement que les stabilités Hubbard Field sont nettement inférieures à celles obtenues avec l'emploi des deux bitumes durs 40/50 et 800/100 ; cela est justifié par les conditions d'enrobage et par la dureté des liants ; il ne faut pas s'attendre à ce que des enrobés à froid obtenus en mélangeant des granulats non chauffés avec des liants chauffés à une température modérée d'utilisation (cut back 400/600) ou ne pas chauffés du tout (émulsion de bitume) donnent des résultats meilleurs que ceux obtenus en chauffant les granulats et le liant à une température de 140° C dans le cas de l'utilisation de bitume 80/100 et à 160° C dans le cas de l'utilisation du bitume 40/50 et que des enrobés obtenus avec l'emploi de cut back 400/600 et d'émulsion 60 produits à partir de bitume 80/100 donnent des résultats meilleurs que ceux obtenus avec le bitume 40/50.

Les stabilités maximales Hubbard Field sont obtenues pour une valeur de 7,19 % dans le cas de l'utilisation du cut back et pour 11,57% dans le cas de l'utilisation de l'émulsion, ces deux valeurs correspondent à un ajout de 7% de bitume pur. Une valeur plus grande que celle correspondante à la valeur du pic provoque une intercalation du liant entre les grains du sable alors que une valeur au-dessous de celle de pic donne une mauvaise cohésion au mélange.

La compacité a connu une amélioration due à l'occupation d'un certain pourcentage des vides par chacun des deux types de liants, elle est passée de 78,95% dans le cas de l'ajout de 6,21% de cut back à 85,18% dans le cas de l'ajout de 9,04% de cut back et de 79,61% dans le cas de l'ajout de 10,74 % d'émulsion à 8,04% dans le cas de l'ajout de 13,22% d'émulsion.

VI.7.2. Influence du pourcentage en sable concassé sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages de sable concassé (5% à 35%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.35 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable concassé (cut back 400/600)

Cut back 400/600					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Sable concassé (%)	0	5	15	25	35
(%) cut back	7,34	7,58	7,97	8,28	8,57
Poids à l'air (g)	107,30	107,50	107,90	108,30	108,50
Densité apparente	1,82	1,79	1,82	1,83	1,83
Densité théorique	2,23	2,22	2,19	2,17	2,16
Compacité (%)	81,61	80,63	82,95	84,18	84,84
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	168,97	238,76	292,84	353,93	499,28
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	79,26	80,33	95,70	116,42	165,46

Tableau VI.36 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable concassé (émulsion 60)

Emulsion 60					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Sable concassé (%)	0	5	15	25	35
(%) émulsion	10,74	11,09	11,65	12,12	12,53
Poids à l'air (g)	107,38	107,73	108,31	108,47	108,68
Densité apparente	1,81	1,83	1,84	1,85	1,85
Densité théorique	2,23	2,22	2,19	2,17	2,16
Compacité (%)	81,20	82,38	83,86	85,04	85,59
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	161,36	253,23	321,16	372,44	537,87
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	73,14	86,14	102,49	126,76	182,92

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

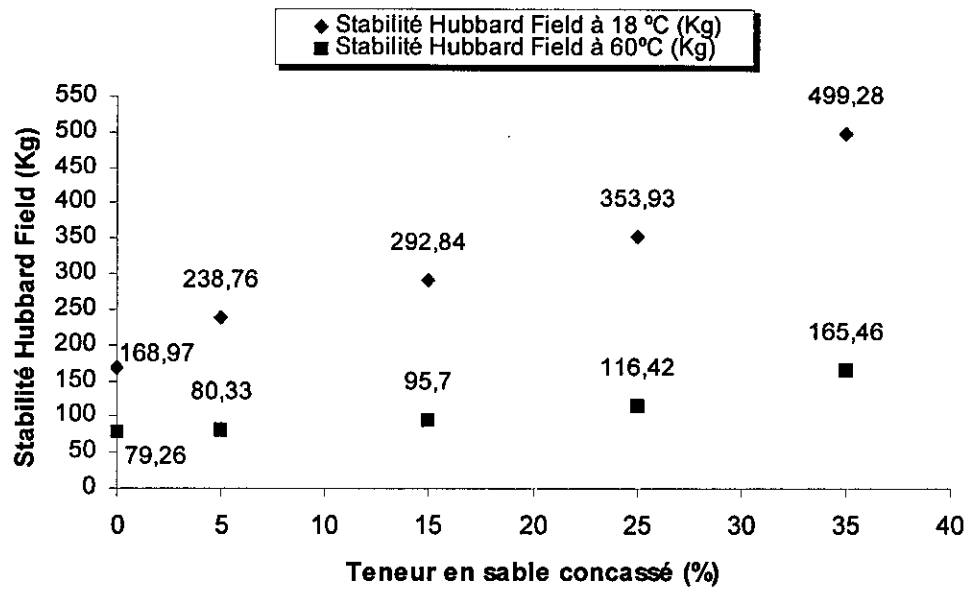


Figure VI.49- Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600)

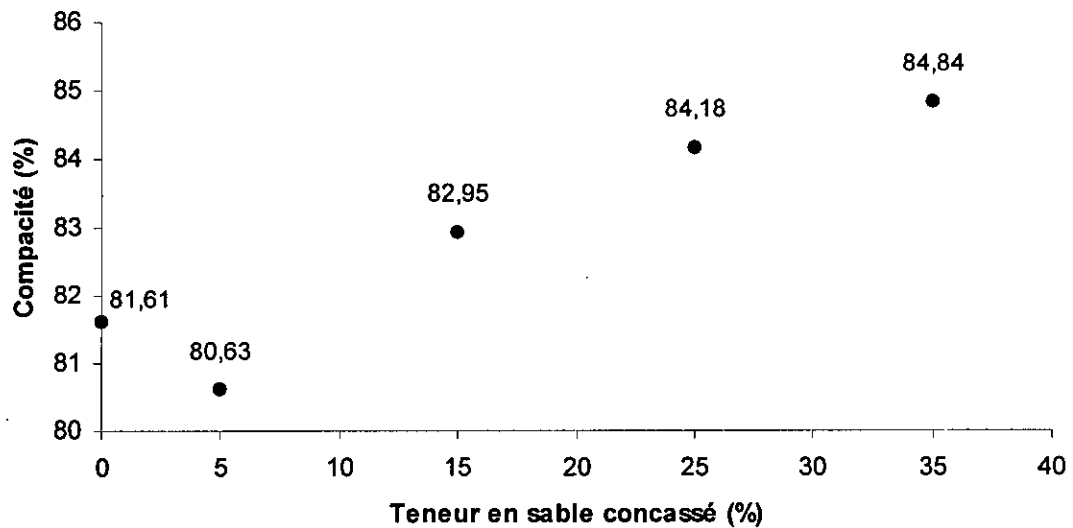


Figure VI.50- Influence de la teneur en sable concassé sur la compacité (cut back 400/600)

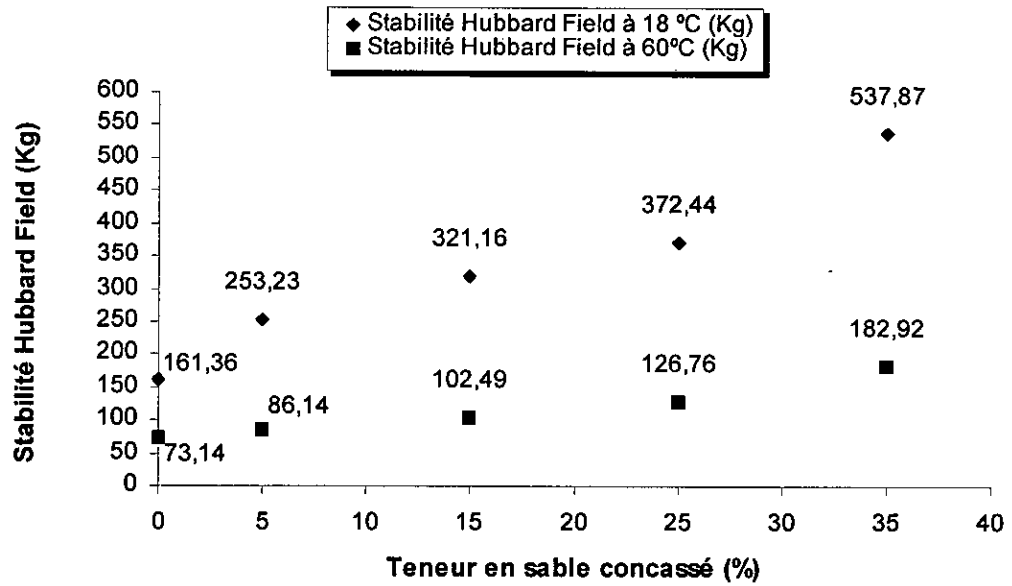


Figure VI.51- Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60)

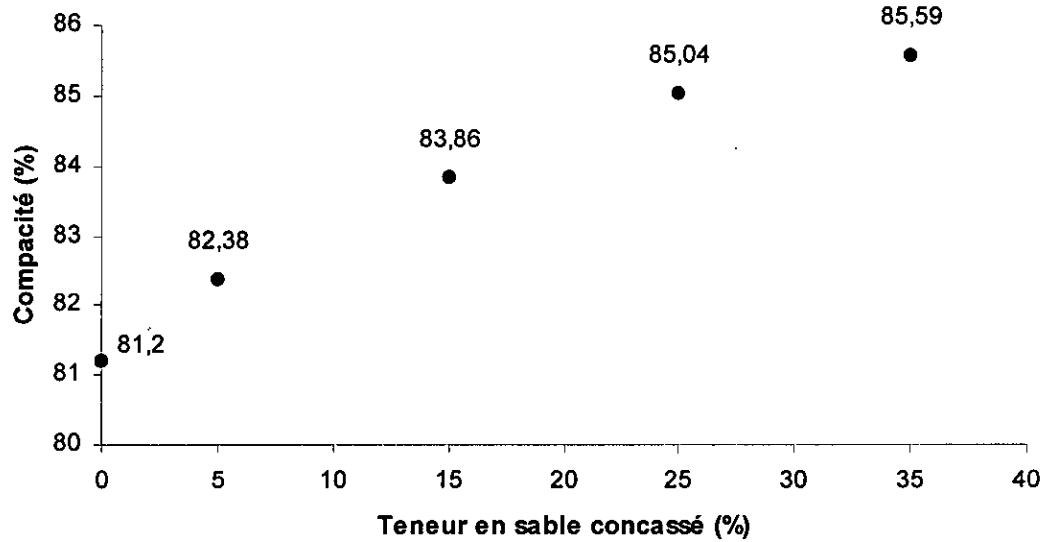


Figure VI.52- Influence de la teneur en sable concassé sur la compacité (émulsion 60)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

L'utilisation du sable concassé de Haoud El Hamra a permis comme c'était le cas pour l'enrobage à chaud (utilisation des deux types de bitumes 40/50 et 80/100) d'améliorer les performances mécaniques du mélange final.

Le sable concassé utilisé possède des caractéristiques chimiques et granulométriques favorisant l'obtention de bons résultats, il s'agit de sa composition chimique (le pourcentage des carbonates égal à 58,82%) et de son pourcentage en fines ainsi que celui des éléments grossiers :

- Les carbonates sont connues par leur bonne affinité aux liants noirs et surtout au bitume ;
- Le sable de dune de Hassi Berkine est dépourvu d'éléments grossiers, sa granulométrie est serrée (100% des éléments ont un diamètre compris entre 0,5 mm et 0,08 mm), sa correction par le sable concassé (19,40 % d'éléments ont un diamètre supérieur à 2 mm) a permis de l'approvisionner en éléments grossiers responsables de la bonne tenue du mélange ;
- Le sable concassé utilisé est assez riche en fines (16,58% d'éléments ont un diamètre inférieur à 0,08 mm) responsables de la rigidification du mastic filler/bitume et de l'amélioration de la densité de l'enrobé, le pourcentage de ces fines dans le mélange passe de 1,36% dans le cas de l'utilisation de 0% de sable concassé à 6,69% dans le cas de l'utilisation de 35% de sable concassé.

Un autre paramètre essentiel et déterminant dans le comportement des enrobés est l'angle de frottement interne des granulats, le sable concassé utilisé est un matériau composé essentiellement de grains de concassage plus au moins anguleux et vu que le sable de dune est connu pour sa cohésion nulle, la stabilité finale du mélange est due aux forces de cohésion mobilisées par le liant hydrocarboné et aux forces de frottement intergranulaires mobilisées par les éléments anguleux.

Une analyse des résultats obtenus montre que la stabilité Hubbard Field ainsi que la compacité augmentent avec l'ajout de sable concassé ; le gain en résistance n'est pas comparable à celui de l'enrobé à chaud et les prescriptions techniques ne sont pas atteintes. L'évolution des différentes caractéristiques est comme suit :

- Dans le cas de l'utilisation du cut back 400/600 et à 18 °C, la stabilité passe de 168,97 Kg pour un ajout de 0% de sable concassé à 499,28 Kg pour un ajout de 35% de sable concassé ;
- Dans le cas de l'utilisation du même liant et à 60 °C, la stabilité passe de 79,26 Kg pour un ajout de 0% de sable concassé à 165,46 Kg pour un ajout de 35% de sable concassé ;
- Dans le cas de l'utilisation de l'émulsion 60 et à 18 °C, la stabilité passe de 161,36 Kg pour un ajout de 0% de sable concassé à 537,87 Kg pour un ajout de 35% de sable concassé ;
- Dans le cas de l'utilisation du même liant et à 60 °C, la stabilité passe de 73,14 Kg pour un ajout de 0% de sable concassé à 182,92 Kg pour un ajout de 35% de sable concassé.

VI.7.3. Influence du pourcentage en sable gypseux sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages de sable gypseux (5% à 35%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.37 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable gypseux (cut back 400/600)

Cut back 400/600					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Sable gypseux (%)	0	5	15	25	35
(%) cut back	7,34	7,75	8,37	8,84	9,23
Poids à l'air (g)	107,30	107,80	108,30	108,90	109,15
Densité apparente	1,82	1,83	1,84	1,84	1,85
Densité théorique	2,23	2,20	2,15	2,10	2,06
Compacité (%)	81,61	82,97	85,74	87,80	89,80
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	168,97	229,38	313,32	496,48	762,74
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	79,26	80,06	97,17	162,43	258,25

Tableau VI.38 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du sable gypseux (émulsion 60)

Emulsion 60					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Sable gypseux (%)	0	5	15	25	35
(%) émulsion	10,74	11,34	12,25	12,94	13,51
Poids à l'air (g)	107,38	107,93	108,42	109,15	109,18
Densité apparente	1,81	1,82	1,84	1,85	1,85
Densité théorique	2,23	2,20	2,15	2,10	2,06
Compacité (%)	81,20	82,73	85,74	88,30	90,03
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	161,36	236,35	385,82	663,40	1059,67
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	73,14	108,75	179,06	308,21	509,26

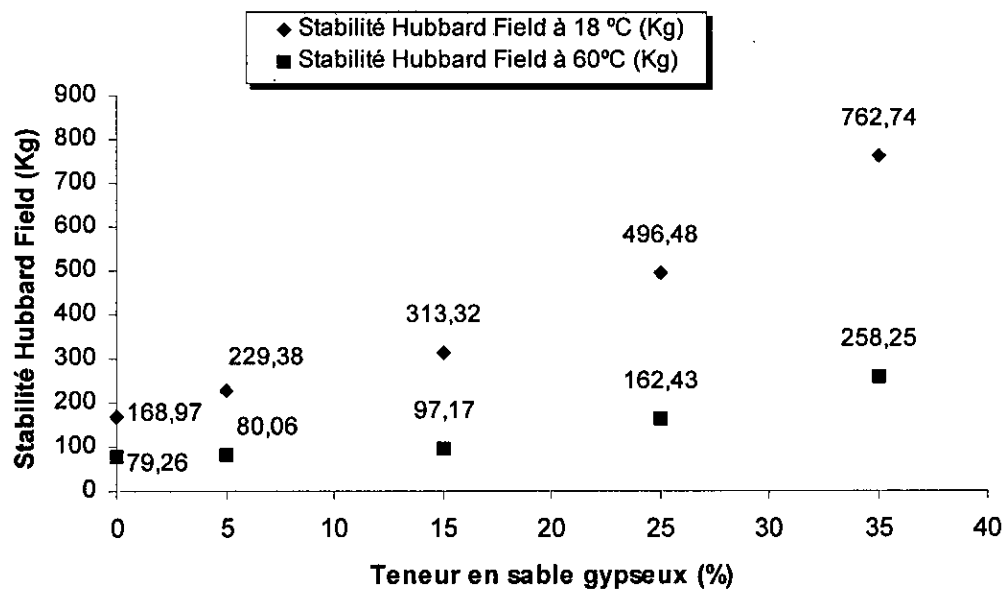


Figure VI.53- Influence de la teneur en sable gypseux sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600)

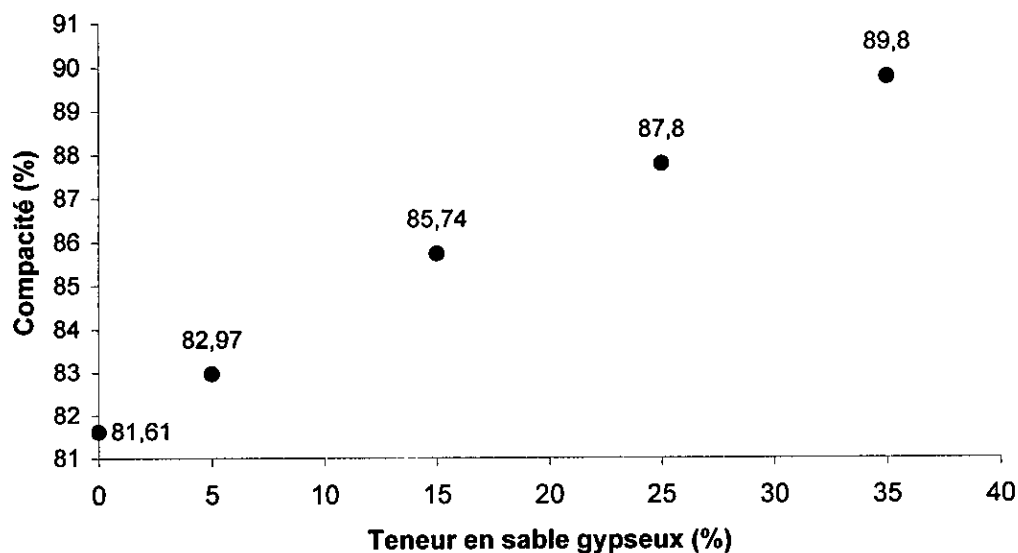


Figure VI.54- Influence de la teneur en sable gypseux sur la compacité (cut back 400/600)

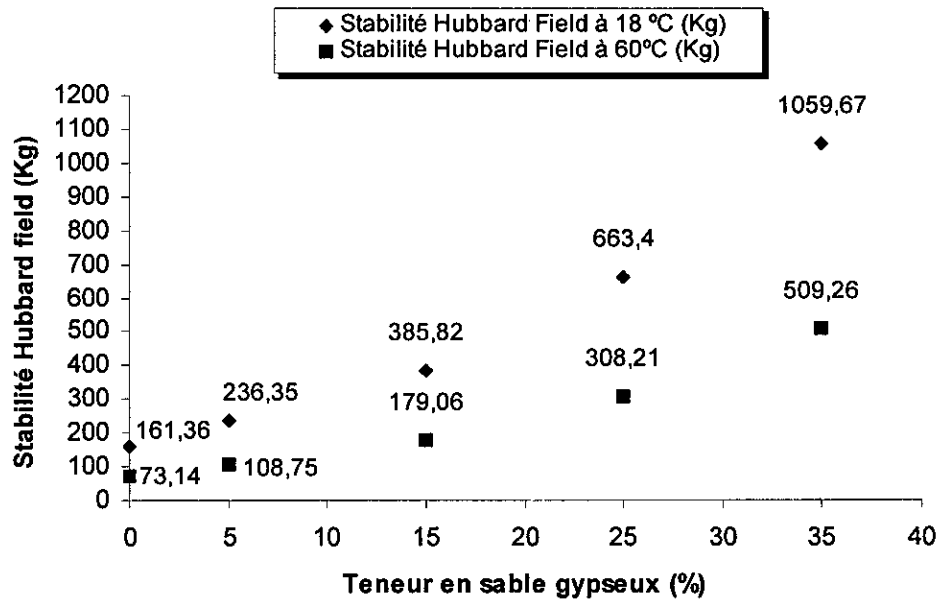


Figure VI.55- Influence de la teneur en sable gypseux sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60)

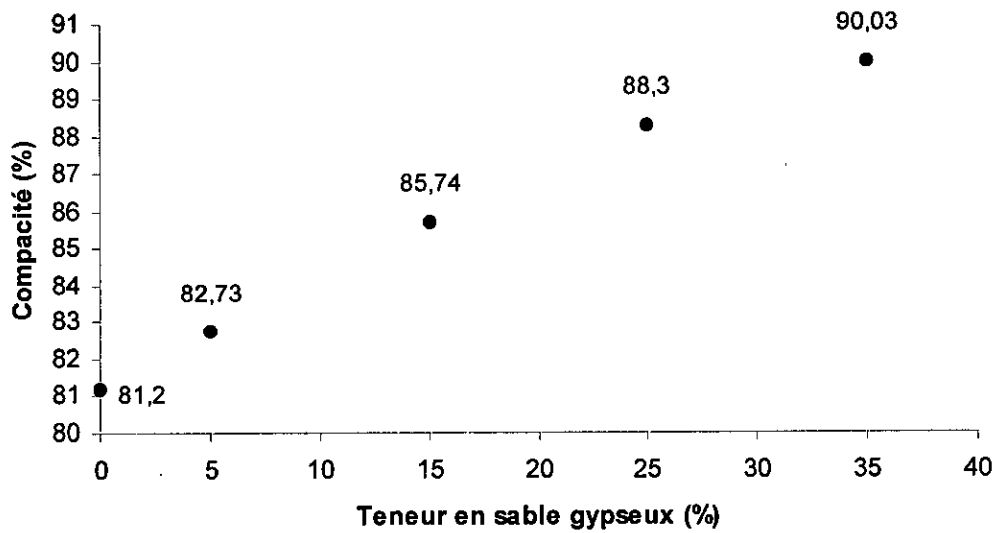


Figure VI.56- Influence de la teneur en sable gypseux sur la compacité (émulsion 60)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

L'emploi des matériaux non traditionnels dans les corps des chaussées ne cesse de progresser un peut partout dans le monde. Les études et les recherches en laboratoires et en vraie grandeur ont permis d'aboutir à des résultats souvent encourageants.

Les critères sur lesquels se fonde l'emploi de ces matériaux, sont souvent des critères économiques ou écologiques. Le sable gypseux est l'un des matériaux présents en abondance dans de vastes contrées de notre immense pays, de ce fait son emploi dans la technique routière est bénéfique du point de vue économique mais les performances mécaniques obtenues sont relatives à l'aspect chimique et physique de ces sables connus par leur diversité.

Le sable gypseux qu'on a utilisé pour corriger le sable de dune de Hassi Berkine est un sable friable de couleur blanchâtre et ayant un pourcentage en fines assez acceptable de l'ordre de 30,79%. Nous pensons et vu la friabilité de ce sable que le pourcentage de fines dans le mélange final (sable de dune-sable gypseux-liant) et après application de 60 coups avec la dame Hubbard field n'est pas de l'ordre de 11,66% pour le cas de l'ajout de 35% de sable gypseux par exemple mais beaucoup plus important.

Ce sable gypseux est composé essentiellement, comme son nom l'indique de 49,64% de gypse (CaSO_4) et de 27,19% de carbonates (CaCO_3), ces deux éléments chimiques sont réputés par leur affinité aux bitumes routiers. Ce sable gypseux est un liant hydraulique naturel, il ne permet pas d'approvisionner le sable de dune en éléments grossiers mais en gypse responsable d'accroître la cohésion du mélange final.

Une analyse des résultats obtenus en ajoutant différents pourcentages de sable gypseux permet de dire que l'ajout de ce sable ne fait qu'améliorer la stabilité et la compacité Hubbard Field, l'évolution de ces deux caractéristiques mécaniques est comme suit :

- Dans le cas de l'utilisation du cut back 400/600 et à 18 °C, la stabilité passe de 168,97 Kg pour un ajout de 0% de sable gypseux à 762,74 Kg pour un ajout de 35% de sable gypseux ;
- Dans le cas de l'utilisation du même liant et à 60 °C, la stabilité passe de 79,26 Kg pour un ajout de 0% de sable gypseux à 258,25 Kg pour un ajout de 35% de sable gypseux ;
- Dans le cas de l'utilisation de l'émulsion 60 et à 18 °C, la stabilité passe de 161,36 Kg pour un ajout de 0% de sable gypseux à 1059,67 Kg pour un ajout de 35% de sable gypseux ;
- Dans le cas de l'utilisation du même liant et à 60 °C, la stabilité passe de 73,14 Kg pour un ajout de 0% de sable gypseux à 509,26 Kg pour un ajout de 35% de sable gypseux.
- Dans le cas de l'utilisation du cut back 400/600 , la compacité passe de 81,61% pour un ajout de 0% de sable gypseux à 89 ,80% pour un ajout de 35% de sable gypseux ;
- Dans le cas de l'utilisation de l'émulsion 60, la compacité passe de 81,20% pour un ajout de 0% de sable gypseux à 90,03% pour un ajout de 35% de sable gypseux ;

Nous pouvons remarquer que la stabilité exigée par les recommandations est atteinte dans le cas de l'utilisation de l'émulsion 60 et pour un ajout de 35% de sable gypseux.

VI.7.4. Influence du pourcentage en arène granitique sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en arène granitique (5% à 35%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.39 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de l'arène granitique (cut back 400/600)

Cut back 400/600					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Arène granitique (%)	0	5	15	25	35
(%) cut back	7,34	7,52	7,81	8,07	8,29
Poids à l'air (g)	107,30	107,50	107,70	108,03	108,30
Densité apparente	1,82	1,81	1,83	1,84	1,84
Densité théorique	2,23	2,21	2,19	2,158	2,13
Compacité (%)	81,61	81,90	83,75	85,03	86,39
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	168,97	223,86	243,52	316,28	412,56
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	79,26	80,61	85,08	109,43	143,52

Tableau VI.40 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de l'arène granitique (émulsion 60)

Emulsion 60					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Arène granitique (%)	0	5	15	25	35
(%) émulsion 60	10,74	11,00	11,43	11,80	12,13
Poids à l'air (g)	107,38	107,62	107,83	108,19	108,33
Densité apparente	1,81	1,82	1,83	1,83	1,83
Densité théorique	2,23	2,21	2,18	2,16	2,13
Compacité (%)	81,20	82,45	83,84	84,89	86,11
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	161,36	216,58	239,63	321,14	456,52
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	73,14	78,39	84,95	114,26	152,55

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

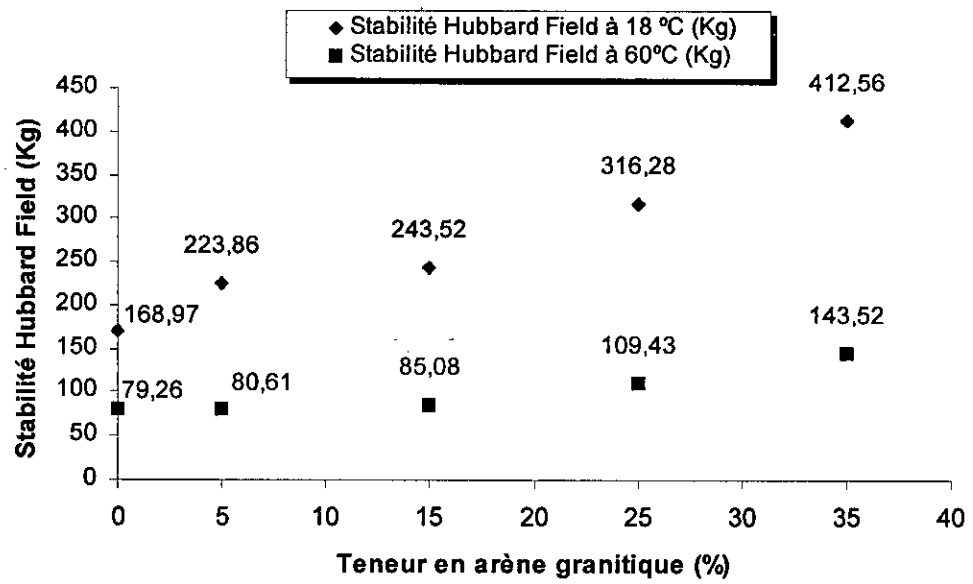


Figure VI.57-. Influence de la teneur en arène granitique sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600)

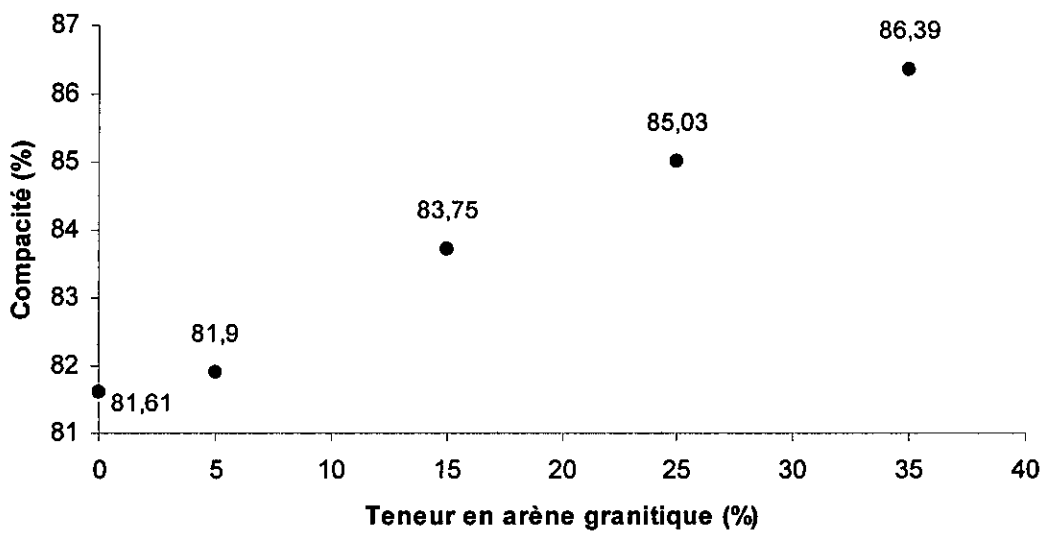


Figure VI.58- Influence de la teneur en arène granitique sur la compacité (cut back 400/600)

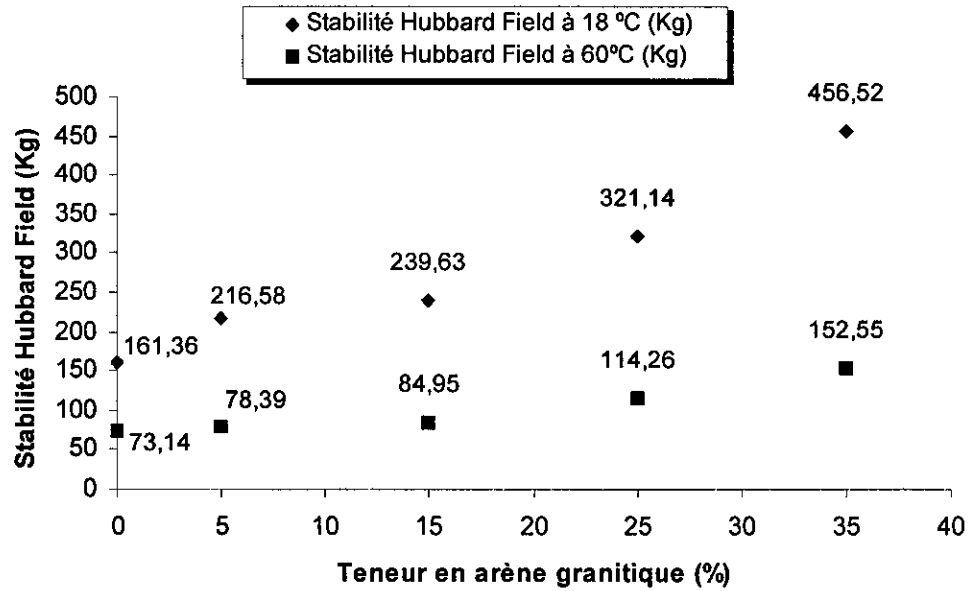


Figure VI.59- Influence de la teneur en arène granitique sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60)

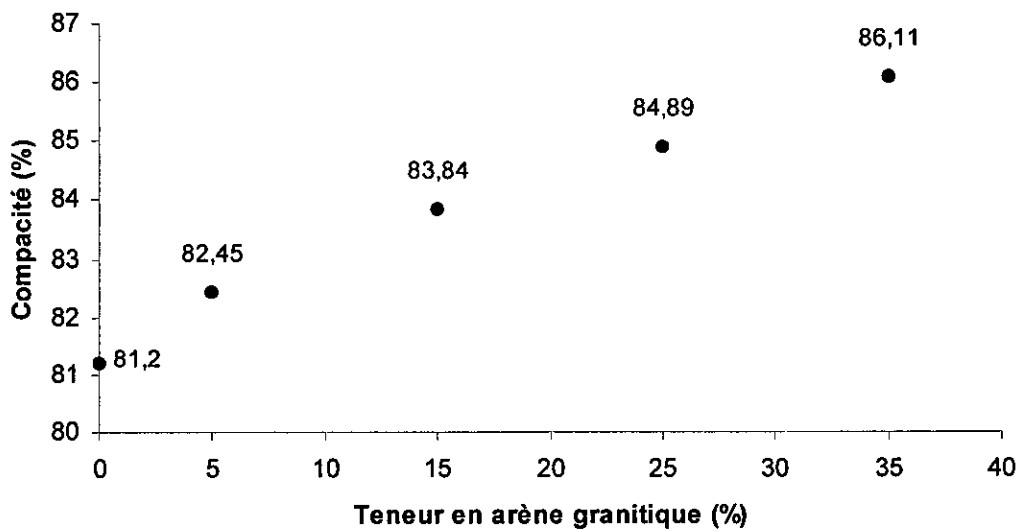


Figure VI.60- Influence de la teneur en arène granitique sur la compacité (émulsion 60)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

Les arènes granitiques proviennent de l'altération des granites aux conditions de surfaces. Les feldspaths s'altèrent surtout en Kaolin, les micas s'altèrent partiellement alors que les grains de quartz ne subissent aucune altération. Les roches restent en place en gardant une faible cohésion. Les arènes granitiques sont très répandues dans la région du Hoggar (Zone climatique IV) ; elles constituent la seule ressource en granulats routiers disponibles dans les conditions technico-économiques.

Les arènes granitiques s'extraient facilement et fournissent un sable plus ou moins grossier suivant la texture des roches mères.

L'arène granitique qu'on a utilisée est une arène fine possédant 21,27% d'éléments de diamètre supérieur à 4 mm et 12% de fines (diamètre inférieur à 0,08 mm), elle a permis de corriger la granulométrie du sable de dune dépourvu d'éléments grossiers et de fines. Son grand inconvénient est sa composition chimique (85,14% d'insolubles) ; Les grains silicieux composant l'arène (même nature chimique que les grains de sable de dune) sont notaires par leur faible adhésivité aux liants routiers ; pour cette raison on a souvent recours à l'ajout de la chaux en pourcentage modéré (2% à 4%) pour améliorer la cohésion du mélange.

Les résultats obtenus en ajoutant différents pourcentages d'arène granitique permettent de dire que l'ajout de l'arène ne fait qu'améliorer la stabilité et la compacité Hubbard Field, l'évolution de ces deux caractéristiques mécaniques est comme suit :

- Dans le cas de l'utilisation du cut back 400/600 et à 18 °C, la stabilité passe de 168,97 Kg pour un ajout de 0% d'arène granitique à 412,56 Kg pour un ajout de 35% d'arène granitique ;
- Dans le cas de l'utilisation du même liant et à 60 °C, la stabilité passe de 79,26 Kg pour un ajout de 0% d'arène granitique à 143,52 Kg pour un ajout de 35% d'arène granitique;
- Dans le cas de l'utilisation de l'émulsion 60 et à 18 °C, la stabilité passe de 161,36 Kg pour un ajout de 0% d'arène granitique à 456,52 Kg pour un ajout de 35% d'arène granitique;
- Dans le cas de l'utilisation du même liant et à 60 °C, la stabilité passe de 73,14 Kg pour un ajout de 0% de sable gypseux à 152,55 Kg pour un ajout de 35% d'arène granitique.
- Dans le cas de l'utilisation du cut back 400/600, la compacité passe de 81,61% pour un ajout de 0% d'arène granitique à 86,39% pour un ajout de 35% d'arène granitique;
- Dans le cas de l'utilisation de l'émulsion 60, la compacité passe de 81,20% pour un ajout de 0% d'arène granitique à 86,11% pour un ajout de 35% d'arène granitique;

Nous pouvons remarquer que la stabilité exigée par les recommandations n'est pas atteinte dans le cas de l'utilisation des deux liants hydrocarbonés.

VI.7.5. Influence du pourcentage en fines gypseuses sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en fines gypseuses (5% à 35%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.41 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines gypseuses (cut back 400/600)

Cut back 400/600					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Fines gypseuses (%)	0	5	15	25	35
(%) cut back 400/600	7,34	8,43	9,68	10,49	11,11
Poids à l'air (g)	107,30	108,30	109,60	110,40	111,00
Densité apparente	1,82	1,83	1,86	1,88	1,86
Densité théorique	2,23	2,17	2,09	2,04	2,00
Compacité (%)	81,61	84,16	89,09	91,93	92,75
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	168,97	418,83	643,24	973,63	1556,68
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	79,26	142,62	218,41	329,54	519,89

Tableau VI.42 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines gypseuses (émulsion 60)

Emulsion 60					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Fines gypseuses (%)	0	5	15	25	35
(%) émulsion 60	10,74	12,33	14,16	15,35	16,26
Poids à l'air (g)	107,38	108,45	109,78	110,87	111,09
Densité apparente	1,81	1,83	1,86	1,88	1,87
Densité théorique	2,23	2,17	2,09	2,04	2,00
Compacité (%)	81,20	84,28	89,23	92,33	93,67
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	161,36	522,44	767,86	1113,58	1849,73
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	73,14	183,44	326,08	399,92	614,54

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

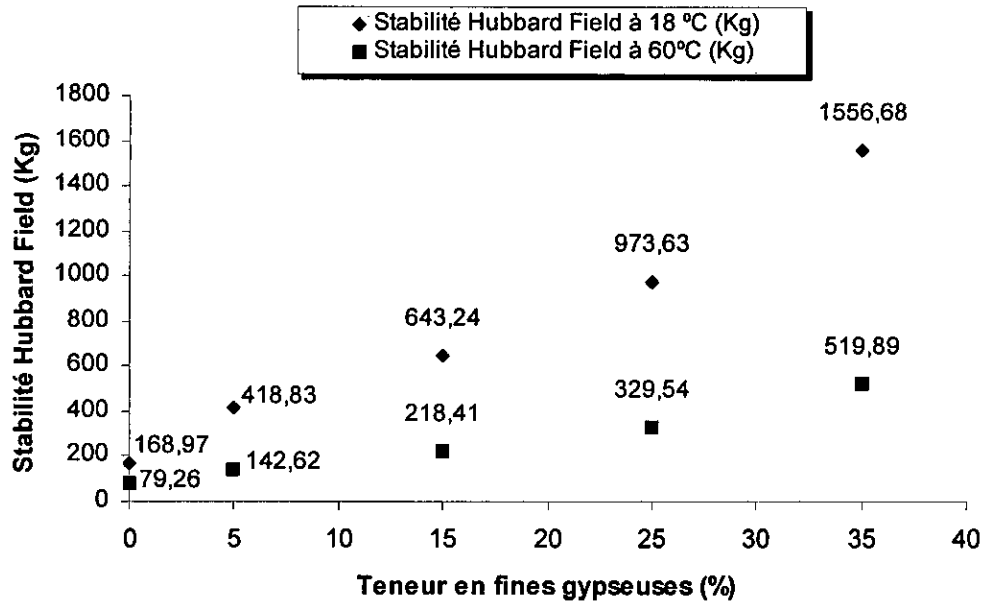


Figure VI.61- Influence de la teneur en fines gypseuses sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600)

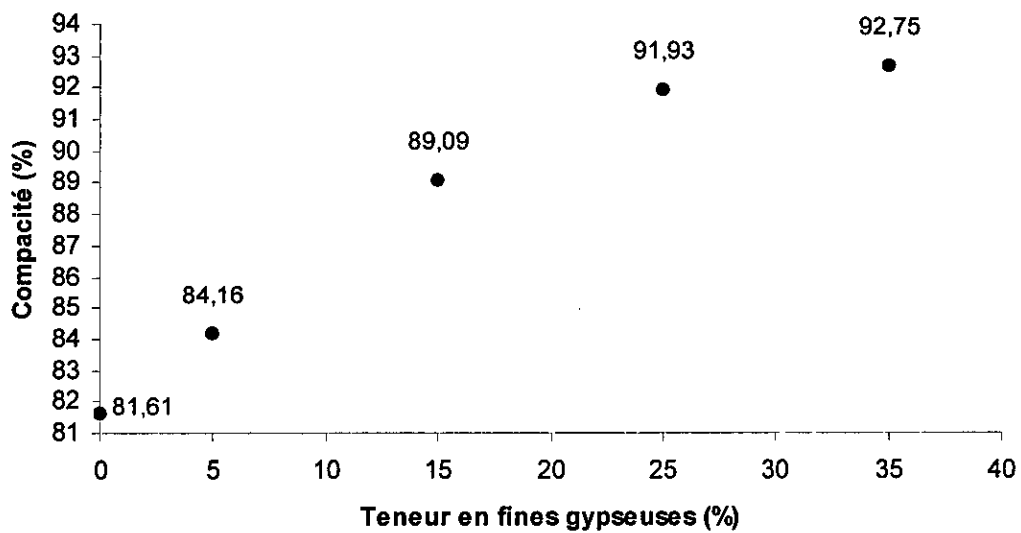


Figure VI.62- Influence de la teneur en fines gypseuses sur la compacité (cut back 400/600)

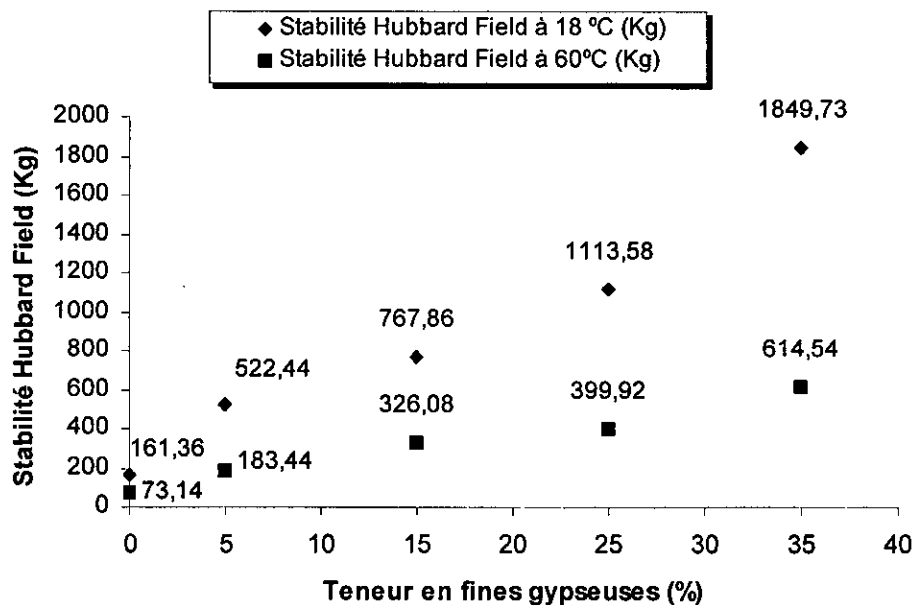


Figure VI.63- Influence de la teneur en fines gypseuses sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60)

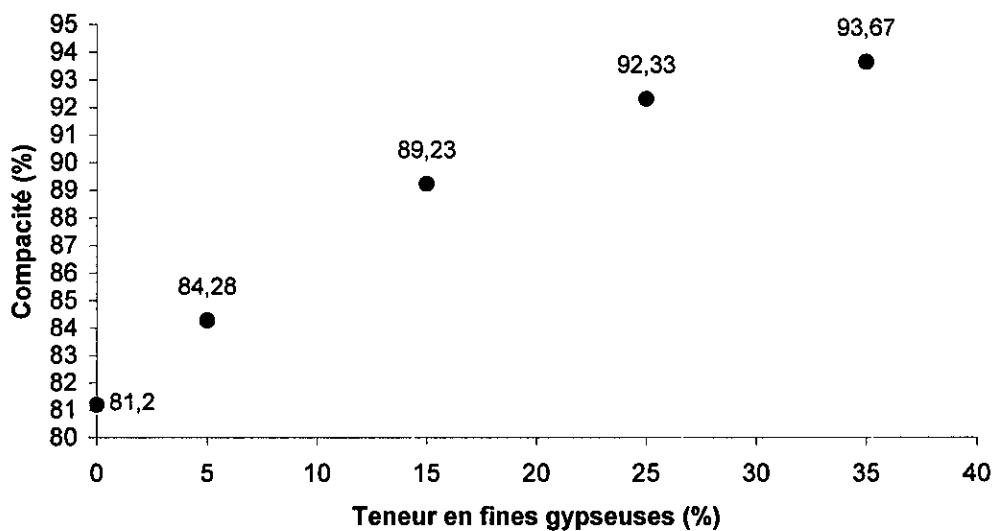


Figure VI.64- Influence de la teneur en fines gypseuses sur la compacité (émulsion 60)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

Les fines gypseuses ont une capillarité importante très défavorable, elles s'imbibent vite notamment. Toutes les chaussées exécutées en sable gypseux ont présenté des fissurations, elles apparaissent après la construction de la route, indépendamment du trafic sous formes de deux familles, l'une longitudinale et l'autre transversale. Il semble toutefois que la fissuration des chaussées en sable gypseux ne met pas en cause leurs qualités mécaniques.

Certains types de matériaux gypseux en corps des chaussées présentent un phénomène de gonflement qui provoque des déformations de la chaussée, on attribue généralement ce phénomène à la finesse des matériaux gypseux ou à la présence d'une fraction d'argile active. L'auteur HORTA explique ce phénomène par le mouvement d'eau qui dissout les fines gypseuses à certains défauts lorsqu'elles s'évaporent. Si le revêtement permet l'infiltration des eaux de pluie, la partie supérieure de la couche de base sera lessivée et le gypse dissout se déposera plus bas lors de l'évaporation des eaux ; la recristallisation de gypse sera accompagnée de la création d'une force capable de déformer le revêtement.

Les mêmes problèmes rencontrés dans la première série d'essais ont fait surface avec l'utilisation du cut back 400/600, la maniabilité du mélange devient de plus en plus difficile à partir de l'ajout de 25% de fines gypseuses ce qui a nécessité un temps de malaxage supplémentaire pour permettre un bon enrobage du mélange final. Dans le cas de l'utilisation de l'émulsion 60 le malaxage nécessite un apport d'eau de plus en plus important en fonction de la quantité de fines introduite.

Nous avons remarqué après l'écrasement des éprouvettes et lors du démoulage que la partie fluante de l'éprouvette se détache de cette dernière et que l'éprouvette est trop rigide et sa rupture est fragile, nous pensons que cela est dû à la rigidité du mastic filler/bitume de plus en plus croissante rendant le mélange moins souple.

Les résultats obtenus en ajoutant différents pourcentages de fines gypseuses permettent de dire que l'ajout des fines ne fait qu'améliorer la stabilité et la compacité Hubbard Field, l'évolution de ces deux caractéristiques mécaniques est comme suit :

- Dans le cas de l'utilisation du cut back 400/600 et à 18 °C, la stabilité passe de 168,97 Kg pour un ajout de 0% de fines gypseuses à 1556,68 Kg pour un ajout de 35% de fines gypseuses;
- Dans le cas de l'utilisation du même liant et à 60 °C, la stabilité passe de 79,26 Kg pour un ajout de 0% de fines gypseuses à 519,89 Kg pour un ajout de 35% de fines gypseuses;
- Dans le cas de l'utilisation de l'émulsion 60 et à 18 °C, la stabilité passe de 161,36 Kg pour un ajout de 0% de fines gypseuses à 149,73 Kg pour un ajout de 35% de fines gypseuses;
- Dans le cas de l'utilisation du même liant et à 60 °C, la stabilité passe de 73,14 Kg pour un ajout de 0% de fines gypseuses à 614,54 Kg pour un ajout de 35% de fines gypseuses.
- Dans le cas de l'utilisation du cut back 400/600, la compacité passe de 81,61% pour un ajout de 0% de fines gypseuses à 92,7% pour un ajout de 35% de fines gypseuses;
- Dans le cas de l'utilisation de l'émulsion 60, la compacité passe de 81,20% pour un ajout de 0% de fines gypseuses à 93,67% pour un ajout de 35% de fines gypseuses;

Nous pouvons remarquer que la stabilité exigée par les recommandations est atteinte dans le cas de l'utilisation de 35% de fines gypseuses.

VI.7.6. Influence du pourcentage en fines calcaires sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en fines calcaires (5% à 35%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.43 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines calcaires (cut back 400/600)

Cut back 400/600					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Fines calcaires (%)	0	5	15	25	35
(%) cut back 400/600	7,34	8,43	9,68	10,49	11,11
Poids à l'air (g)	107,30	108,40	109,70	110,30	111,10
Densité apparente	1,82	1,84	1,85	1,86	1,88
Densité théorique	2,23	2,18	2,10	2,08	2,02
Compacité (%)	81,61	84,42	88,09	89,42	93,06
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	168,93	416,54	639,17	968,48	1550,93
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	79,26	139,87	211,07	324,83	517,98

Tableau VI.44 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de fines calcaires (émulsion 60)

Emulsion 60					
Module de richesse K	4,46				
Sable de dune (%)	100	95	85	75	65
Fines calcaires (%)	0	5	15	25	35
(%) émulsion 60	10,74	12,33	14,16	15,35	16,26
Poids à l'air (g)	107,38	108,51	109,92	110,47	111,18
Densité apparente	1,81	1,84	1,85	1,86	1,88
Densité théorique	2,23	2,18	2,10	2,08	2,02
Compacité (%)	81,20	84,51	88,27	89,56	93,13
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	161,36	410,50	629,22	980,35	1338,97
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	73,14	161,07	229,89	356,69	504,34

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

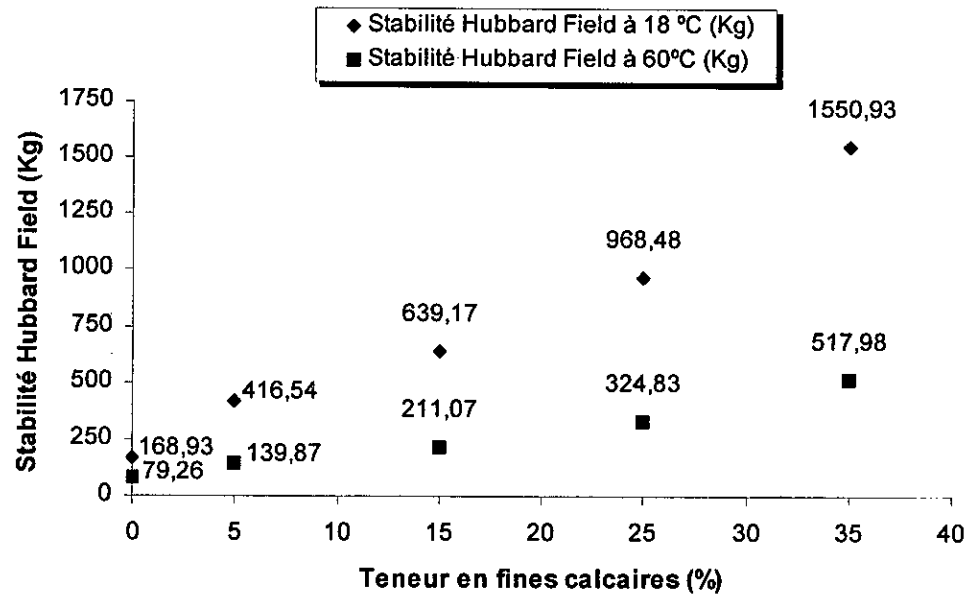


Figure VI.65- Influence de la teneur en fines calcaires sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600)

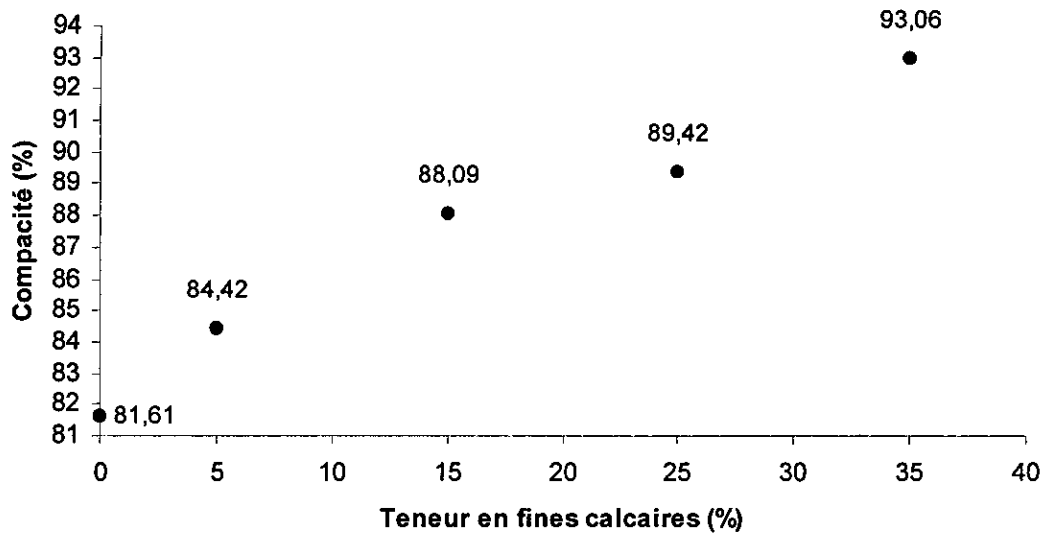


Figure VI.66- Influence de la teneur en fines calcaires sur la compacité (cut back 400/600)

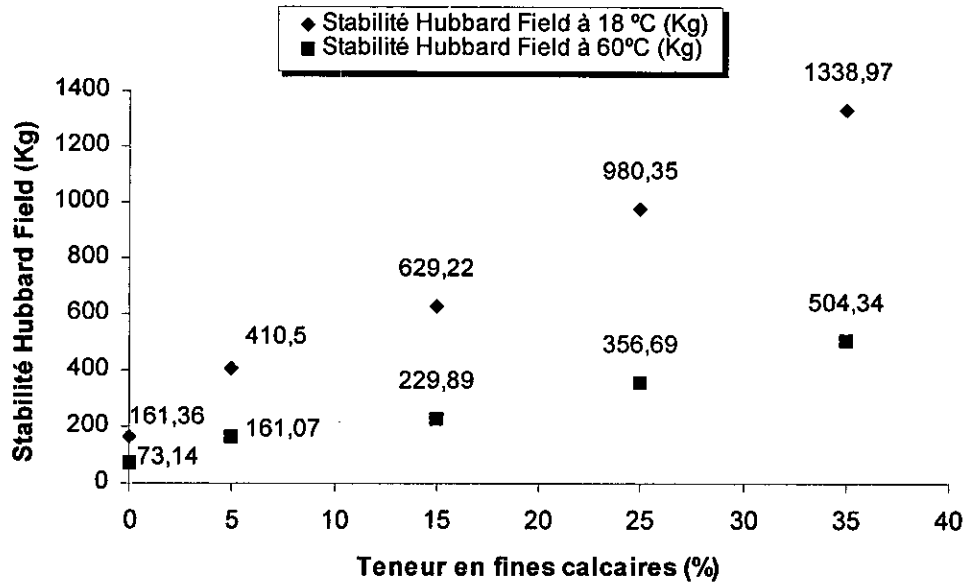


Figure VI.67- Influence de la teneur en fines calcaires sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60)

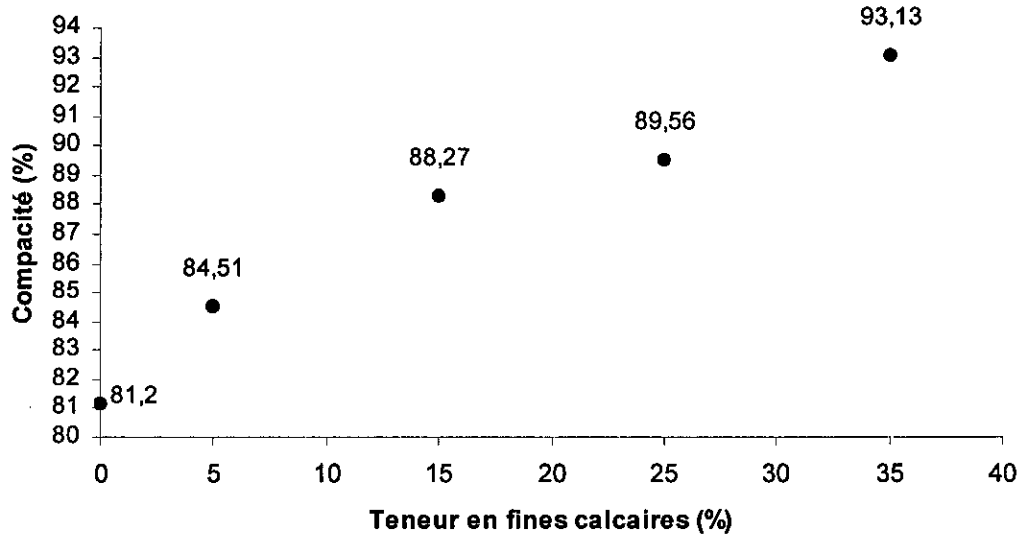


Figure VI.68- Influence de la teneur en fines calcaires sur la compacité (émulsion 60)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

La solution consistant à augmenter la consistance du liant par l'adjonction de fines d'apport pourrait donner un plus à la technique des sables enrobés. L'introduction de pourcentages en fines calcaires de plus en plus important permet d'avoir un mastic de plus en plus dur, cela se manifeste par l'accroissement du point de ramollissement du mastic et la chute de sa pénétrabilité.

La densité apparente du mélange sable-bitume croît rapidement lorsqu'on augmente le pourcentage de fines calcaires, cela s'explique facilement par le fait que le sable de dune est caractérisé par une granulométrie serrée et dépourvue de fines.

Le mélange sans apport de fines présente un pourcentage de vides de l'ordre de 18,39% (utilisation de cut back 400/600) et de 18,80% (utilisation d'émulsion 60) ; dans le cas de l'ajout de 0% de fines calcaires, il passe respectivement à 93,06% et 93,13% dans le cas de l'ajout de 35% de fines calcaires, les fines d'apport introduites dans les différents mélanges viennent occuper, avec le bitume, ce volume de vides d'où une amélioration de la densité.

Le même problème rencontré lors de l'introduction des fines gypseuses et survenu dans le cas de l'utilisation des fines calcaires, le malaxage devient de plus en plus difficile en augmentant le pourcentage des fines calcaires dans le mélange, nous pensons que le facteur responsable de la baisse de la maniabilité est la surface spécifique de plus en plus importante. Plus la surface spécifique est grande plus le malaxage et le compactage deviennent difficiles à effectuer.

L'introduction des fines calcaires dans le mélange sable de dune-bitume a un double effets. D'une part, elle rigidifie le mastic filler/bitume, d'où une nette augmentation de la stabilité et d'autre part elle diminue le pourcentage des vides ce qui entraîne une meilleure compacité.

Les résultats obtenus en ajoutant différents pourcentages de fines calcaires permettent de dire que l'ajout des fines ne fait qu'améliorer la stabilité Hubbard Field, l'évolution de la stabilité est comme suit :

- Dans le cas de l'utilisation du cut back 400/600 et à 18 °C, la stabilité passe de 168,97 Kg pour un ajout de 0% de fines calcaires à 1550,93 Kg pour un ajout de 35% de fines calcaires;
- Dans le cas de l'utilisation du même liant et à 60 °C, la stabilité passe de 79,26Kg pour un ajout de 0% de fines calcaires à 517,98 Kg pour un ajout de 35% de fines calcaires;
- Dans le cas de l'utilisation de l'émulsion 60 et à 18 °C, la stabilité passe de 161,36 Kg pour un ajout de 0% de fines calcaires à 133,97 Kg pour un ajout de 35% de fines calcaires;
- Dans le cas de l'utilisation du même liant et à 60 °C, la stabilité passe de 73,14Kg pour un ajout de 0% de calcaires à 504,34 Kg pour un ajout de 35% de fines calcaires.

Nous remarquons que la stabilité exigée par les recommandations est atteinte dans le cas de l'utilisation de 35% de fines calcaires.

VI.7.7. Influence du pourcentage en chaux sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en chaux (1% à 6%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.45 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de la chaux (cut back 400/600)

Cut back 400/600						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
Chaux (%)	1	2	3	4	5	6
% cut back	7,62	7,85	8,07	8,26	8,43	8,59
Poids à l'air (g)	107,50	107,80	108,03	108,20	108,40	108,50
Densité apparente	1,83	1,83	1,83	1,83	1,84	1,84
Densité théorique	2,22	2,20	2,19	2,18	2,17	2,17
Compacité	82,43	82,95	83,45	83,95	84,56	84,80
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	264,38	283,65	329,15	356,29	297,91	286,33
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	85,18	96,58	111,76	120,63	106,30	98,43

Tableau VI.46 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout de la chaux (émulsion 60)

Emulsion 60						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
Chaux (%)	1	2	3	4	5	6
% émulsion	11,15	11,50	11,80	12,08	12,34	12,57
Poids à l'air (g)	107,61	107,86	108,16	108,22	108,73	108,67
Densité apparente	1,82	1,82	1,83	1,83	1,84	1,84
Densité théorique	2,22	2,20	2,19	2,18	2,17	2,17
Compacité	82,07	82,68	83,51	84,05	84,84	84,99
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	270,68	300,41	360,78	385,15	377,26	372,65
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	92,76	101,61	122,67	132,39	128,52	127,16

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

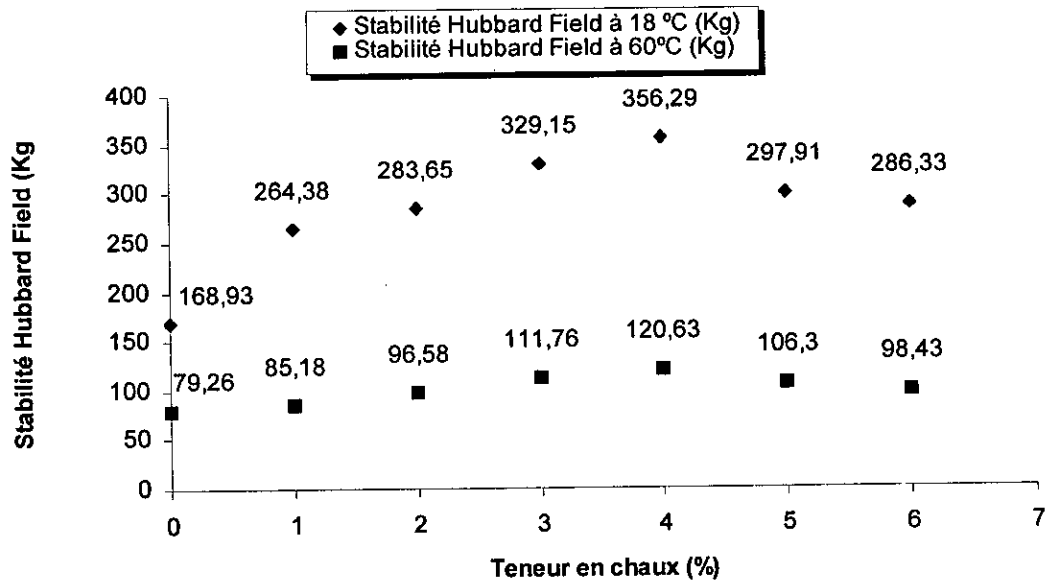


Figure VI.69- Influence de la teneur en chaux sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600)

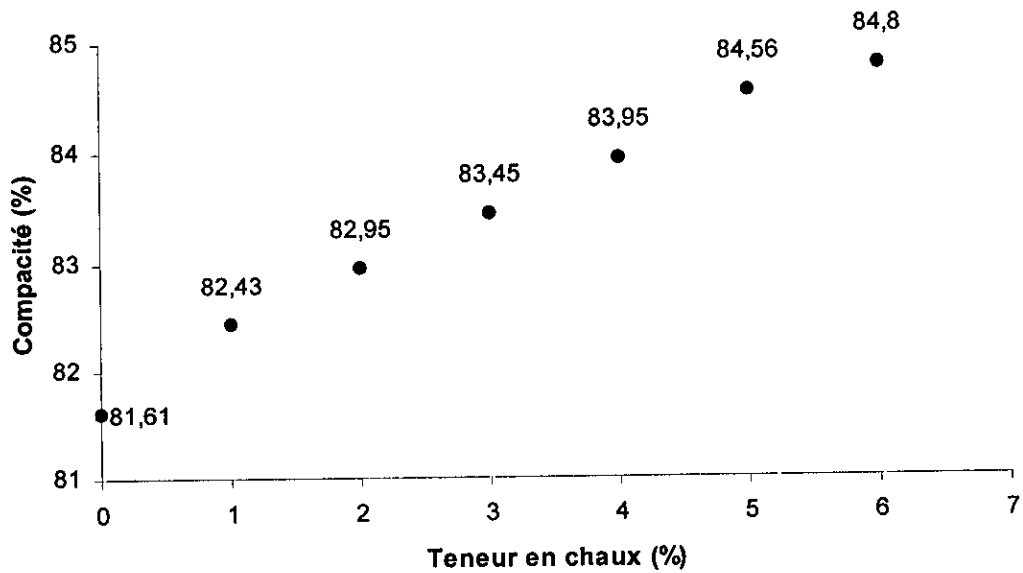


Figure VI.70- Influence de la teneur en chaux sur la compacité (cut back 400/600)

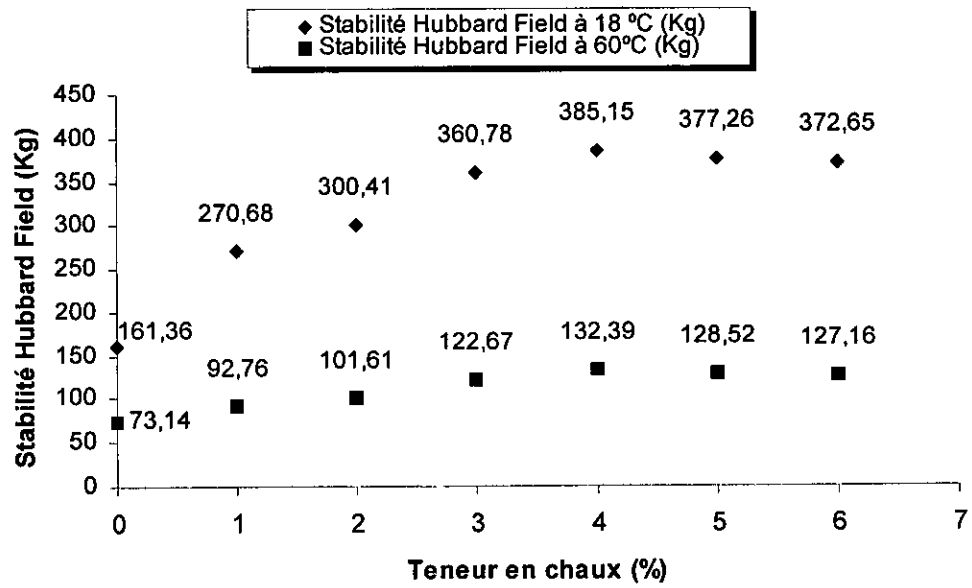


Figure VI.71- Influence de la teneur en chaux sur la stabilité Hubbard Field (bitume émulsion 60)

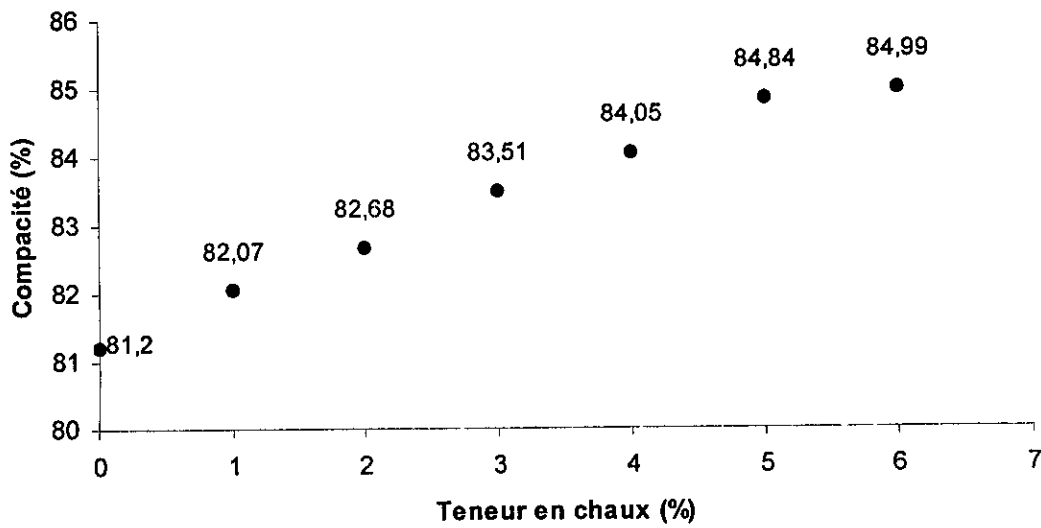


Figure VI.72- Influence de la teneur en chaux sur la compacité (émulsion 60)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

La chaux est un liant hydraulique connu par ses nombreux avantages lui permettant d'être apte à être utilisée en techniques routières Sahariennes, parmi ces avantages on peut citer :

- La cohésion qu'elle confère au mélange dans lequel elle est introduite permettant l'amélioration de l'adhésivité passive de certains granulats connus par leur faible affinité aux liants hydrocarbonés ;
- Sa granulométrie se composant essentiellement de fines (pourcentage des éléments ayant un diamètre inférieur à 0,08 mm est généralement supérieur à 85%) lui permettant de combler un certain pourcentage de vides (il est en fonction du pourcentage de la chaux dans le mélange) ;
- Sa capacité à rendre les sols non plastiques et son aptitude à réduire au maximum le gonflement. Elle a été introduite, avec succès, au-dessous des couches de chaussées pour résoudre le problème du gonflement des plates-formes ;
- Sa capacité d'activer la prise de certains liants hydrauliques utilisés dans la construction routière tels que le laitier granulé, elle joue un rôle de catalyseur et permet l'hydratation du laitier ;
- Elle permet aux enrobés hydrocarbonés d'avoir une meilleure résistance à l'action de l'eau, entraînant une augmentation de la stabilité.

L'incorporation de la chaux dans le mélange à froid a permis d'améliorer les performances mécaniques du sable enrobé mais sans atteindre les prescriptions techniques pour ce type d'enrobé ; l'évolution des différentes performances mécaniques est illustrée ci-après :

- À 18°C et en utilisant le cut back 400/600, la stabilité passe de 168,97 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de chaux à une valeur maximale de 356,29 Kg correspondante à l'emploi de 4% de chaux et chute ensuite pour atteindre une valeur de 286,33 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- À 60°C et en utilisant le cut back 400/600, la stabilité passe de 79,26 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de chaux à une valeur maximale de 120,63 Kg correspondante à l'emploi de 4% de chaux et chute ensuite pour atteindre une valeur de 98,43 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- À 18°C et en utilisant l'émulsion 60, la stabilité passe de 161,36 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de chaux à une valeur maximale de 385,15Kg correspondante à l'emploi de 4% de chaux et chute ensuite pour atteindre une valeur de 372,65 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- À 60°C et en utilisant l'émulsion 60, la stabilité passe de 73,14 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de chaux à une valeur maximale de 132,39 Kg correspondante à l'emploi de 4% de chaux et chute ensuite pour atteindre une valeur de 127,16 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;

Il faut noter que même avec l'ajout d'un élément améliorant la cohésion du mélange, l'enrobé final est toujours pauvre en éléments grossiers indispensables pour l'obtention de bonnes performances mécaniques.

VI.7.8. Influence du pourcentage en ciment CPJ 45 sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en ciment CPJ 45 (1% à 6%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.47 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du ciment CPJ 45 (cut back 400/600)

Cut back 400/600						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
Ciment (%)	1	2	3	4	5	6
% cut back	7,62	7,85	8,07	7,26	8,43	8,59
Poids à l'air (g)	107,60	107,82	108,05	108,23	108,41	108,53
Densité apparente	1,82	1,82	1,83	1,83	1,836	1,838
Densité théorique	2,22	2,21	2,21	2,20	2,20	2,19
Compacité	81,98	82,24	82,92	83,14	83,61	83,85
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	273,88	369,26	426,67	484,45	389,23	346,19
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	91,29	126,09	146,23	161,83	133,37	118,69

Tableau VI.48 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du ciment CPJ 45 (émulsion 60)

Emulsion 60						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
Ciment (%)	1	2	3	4	5	6
% émulsion	11,15	11,50	11,80	12,08	12,34	12,57
Poids à l'air (g)	107,82	107,98	108,36	108,41	108,53	108,68
Densité apparente	1,84	1,84	1,84	1,83	1,84	1,84
Densité théorique	2,22	2,21	2,21	2,20	2,20	2,19
Compacité	82,78	83,17	83,13	83,34	83,68	83,89
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	290,05	380,21	440,68	511,13	492,28	488,48
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	98,72	119,74	137,89	168,37	162,09	159,82

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

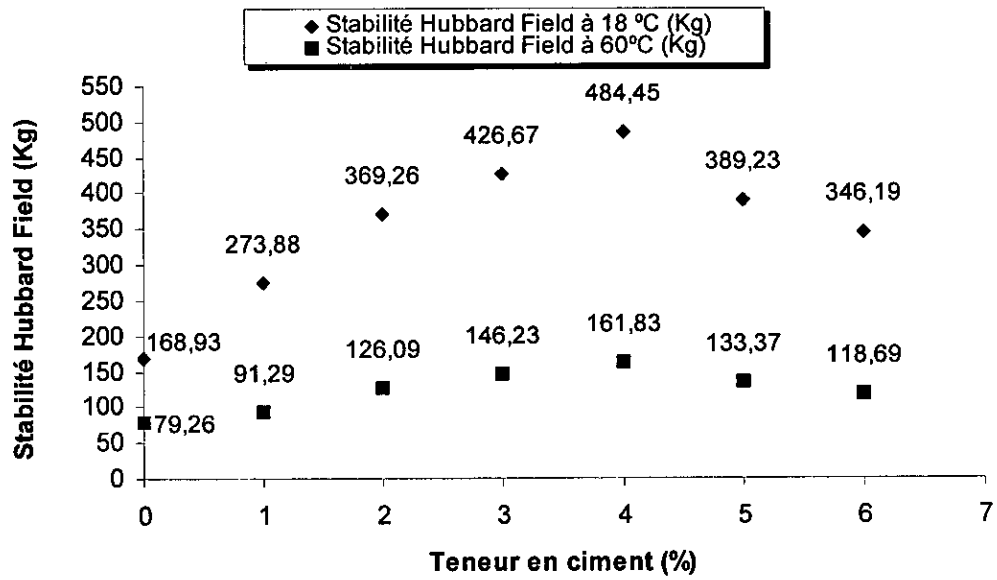


Figure VI.73- Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600)

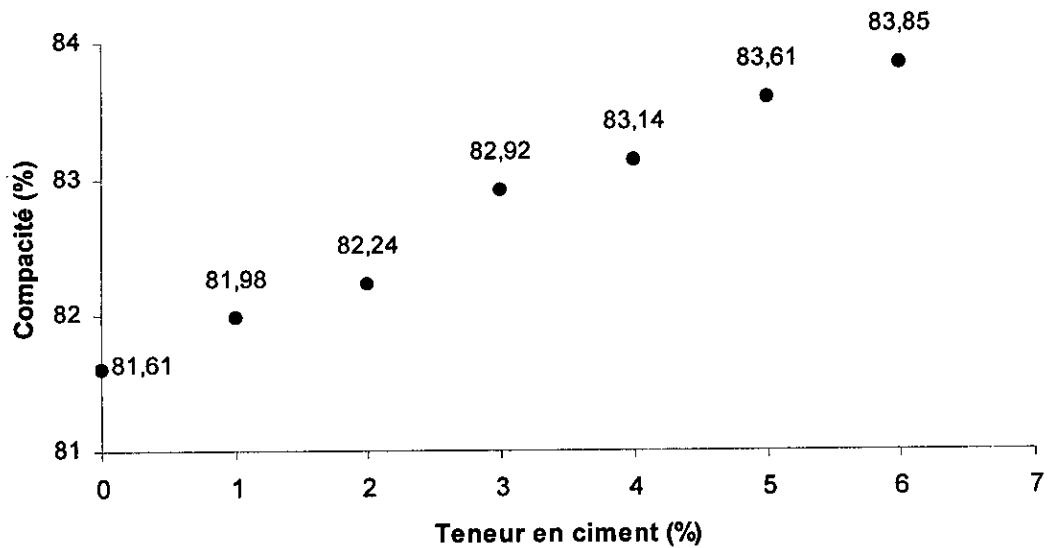


Figure VI.74- Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la compacité (cut back 400/600)

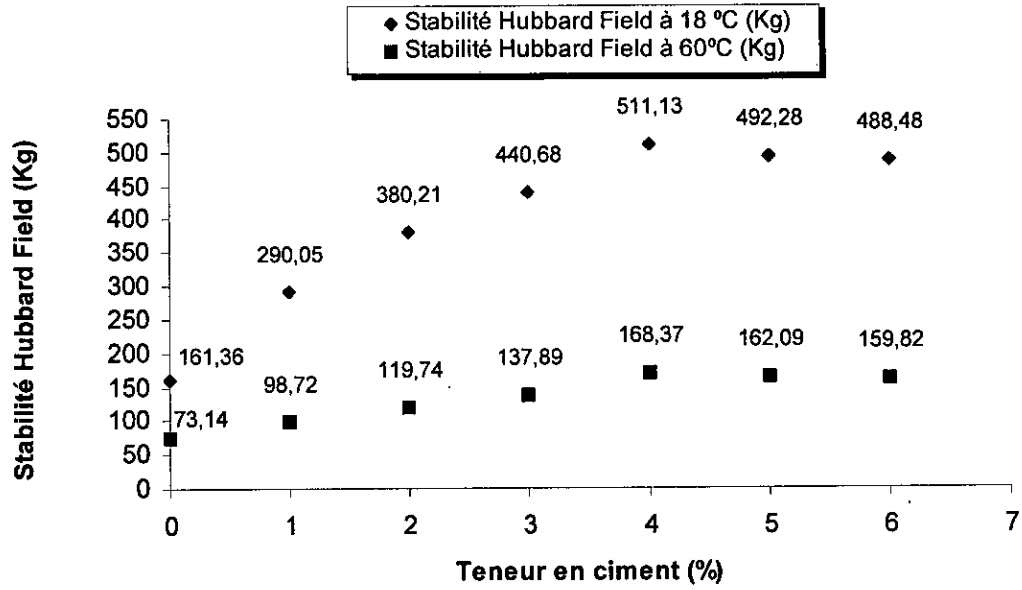


Figure VI.75- Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60)

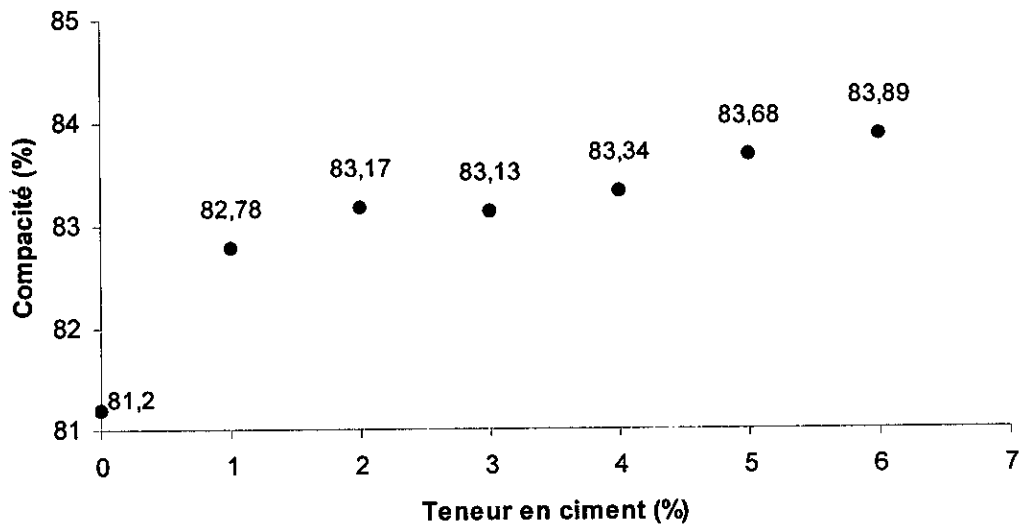


Figure VI.76- Influence de la teneur en ciment CPJ 45 sur la compacité (émulsion 60)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

L'utilisation de quelques liants hydrauliques n'est pas récente, mais ils ont fait place aux liants hydrocarbonés grâce au développement très poussé de ces derniers et en raison des problèmes posés par la technique des liants hydrauliques (prise, fissuration, sensibilité à l'eau et aux variations de la composition). Après la crise de l'énergie, et devant la production croissante des sous produits industriels valables comme liants hydrauliques, ces liants reprennent, de nouveau, leur rôle important dans l'industrie routière.

Le traitement des sables de dune au ciment a pour objet d'élaborer des matériaux plus cohérents que les mélanges de base (sable de dune-liants hydrocarbonés).

Le traitement au ciment des sables pollués est très efficace car le ciment réduit l'indice de plasticité et le gonflement. La présence des matériaux organiques dans le sable est très gênante, et quand ils dépassent une certaine limite, ils empêchent la prise du ciment et réduisent les résistances finales, et puisque ces matériaux organiques se trouvent dans la fraction fine de la granulométrie, les spécifications ne se contentent pas de préciser une limite pour les fines mais elles tiennent aussi compte de leur nocivité.

L'incorporation du ciment CPJ 45 dans le mélange à froid a permis d'améliorer les performances mécaniques du sable enrobé mais sans atteindre les prescriptions techniques pour ce type d'enrobé, l'évolution des différentes performances mécaniques est illustrée ci-après :

- À 18°C et en utilisant le cut back 400/600, la stabilité passe de 168,97 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de ciment à une valeur maximale de 484,45 Kg correspondant à l'emploi de 4% de ciment et chute ensuite pour atteindre une valeur de 346,19 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- À 60°C et en utilisant le cut back 400/600, la stabilité passe de 79,26 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de ciment à une valeur maximale de 161,83 Kg correspondant à l'emploi de 4% de ciment et chute ensuite pour atteindre une valeur de 118,69 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- A 18°C et en utilisant l'émulsion 60, la stabilité passe de 161,36 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de ciment à une valeur maximale de 511,13 Kg correspondant à l'emploi de 4% de ciment et chute ensuite pour atteindre une valeur de 488,48 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- A 60°C et en utilisant l'émulsion 60, la stabilité passe de 73,14 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de ciment à une valeur maximale de 168,37 Kg correspondant à l'emploi de 4% de ciment et chute ensuite pour atteindre une valeur de 159,82 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- Dans le cas de l'utilisation du cut back 400/600, la compacité passe de 81,61% (sans utilisation de ciment) à 83,85% (dans le cas de l'adjonction de 6% de ciment) ;
- Dans le cas de l'utilisation de l'émulsion 60, la compacité passe de 81,20% (sans ajout de ciment) à 83,89% (dans le cas de l'adjonction de 6% de ciment) ;

Les résultats obtenus avec l'utilisation de l'émulsion 60 sont relativement meilleurs que ceux obtenus avec l'emploi du cut back 400/600, nous pensons que cela est dû à l'activité du ciment qui après rupture de l'émulsion a récupéré un certain pourcentage de l'eau de cette dernière afin de faire prise.

VI.7.9. Influence du pourcentage en laitier broyé sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en laitier broyé (1% à 6%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.49 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du laitier broyé (cut back 400/600)

Cut back 400/600						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
Laitier broyé (%)	1	2	3	4	5	6
% cut back	7,62	7,85	8,07	8,26	8,43	8,59
Poids à l'air (g)	107,59	107,82	108,06	108,21	108,42	10,54
Densité apparente	1,83	1,82	1,83	1,83	1,84	1,84
Densité théorique	2,22	2,21	2,20	2,19	2,19	2,18
Compacité	82,60	82,55	83,11	83,49	84,02	84,34
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	254,49	278,61	321,26	431,22	376,67	318,19
Stabilité Hubbard Field à 60 °C (Kg)	88,83	96,78	109,86	142,74	123,65	108,39

Tableau VI.50 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du laitier broyé (émulsion 60)

Emulsion 60						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
Laitier broyé (%)	1	2	3	4	5	6
% émulsion	11,15	11,50	11,80	12,08	12,34	12,57
Poids à l'air (g)	107,62	107,87	108,13	108,22	108,46	108,63
Densité apparente	1,83	1,83	1,83	1,83	1,84	1,84
Densité théorique	2,22	2,21	2,20	2,19	2,19	2,18
Compacité	82,63	82,59	83,16	83,50	84,05	84,41
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	263,14	292,63	332,10	435,42	415,83	369,46
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	88,41	100,45	109,67	145,21	139,58	122,62

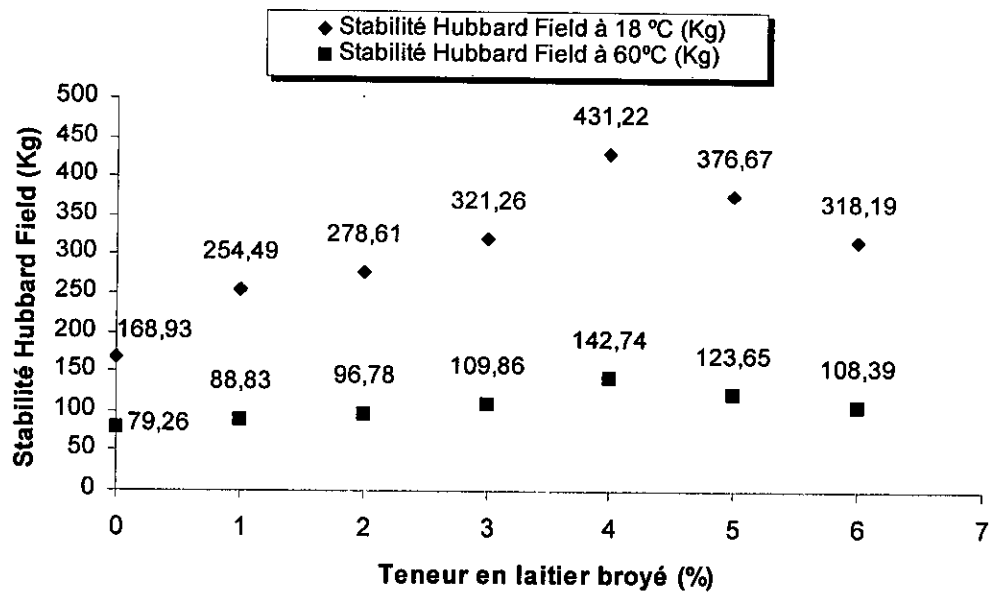


Figure VI.77- Influence de la teneur en laitier broyé sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600)

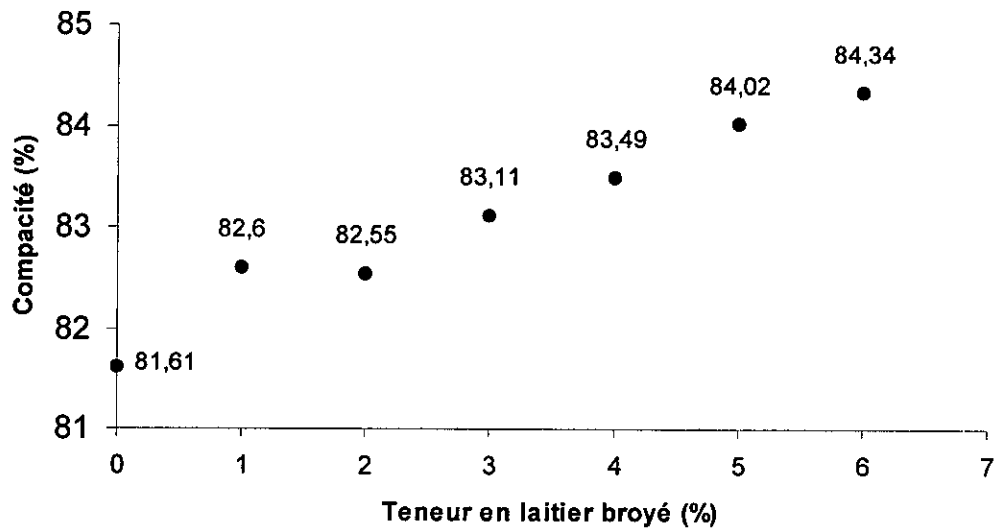


Figure VI.78- Influence de la teneur en laitier broyé sur la compacité (cut back 400/600)

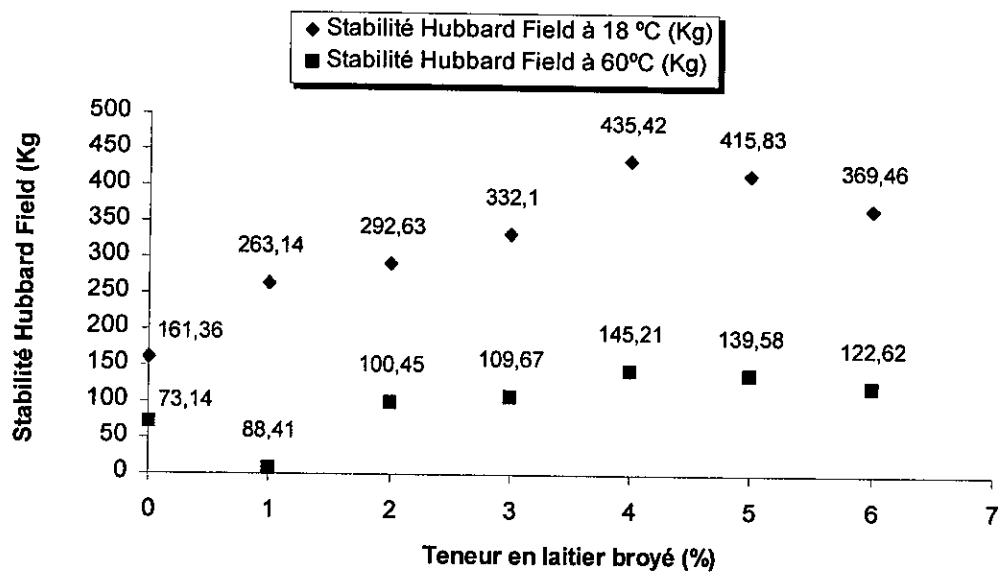


Figure VI.79- Influence de la teneur en laitier broyé sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60)

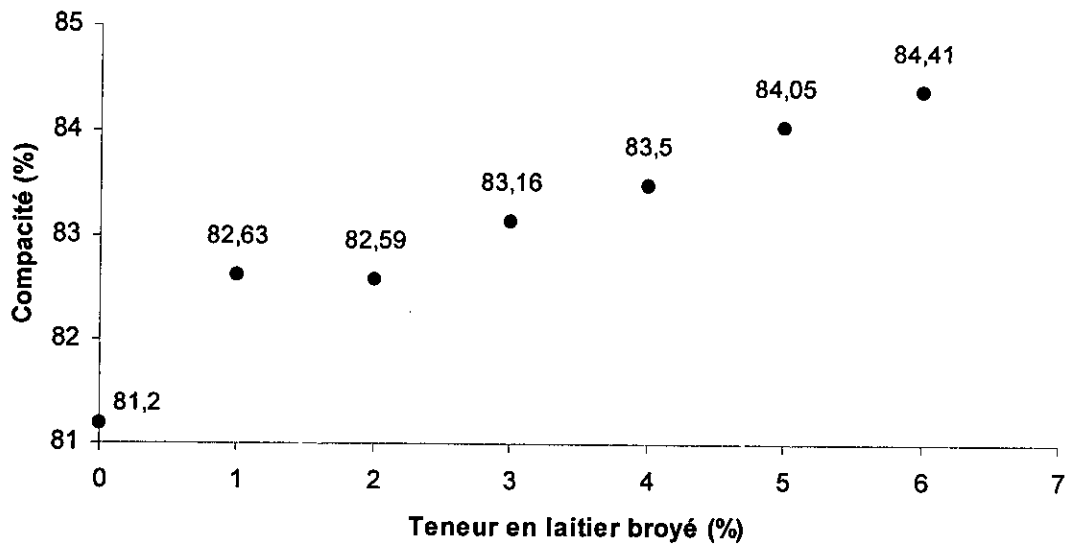


Figure VI.80- Influence de la teneur en laitier broyé sur la compacité (émulsion 60)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

Le laitier broyé en fines n'est, en effet, que du laitier granulé transformé en éléments fins de diamètre inférieur à 0,08 mm. La réactivité du laitier est appréciée par le coefficient « α » qui est une mesure de la friabilité et de la finesse du laitier. L'importance de ce coefficient réside dans le fait qu'il est basé sur le mécanisme de prise. Etant donné que la prise du laitier est un phénomène superficiel. Il est donc en relation avec la finesse (surface spécifique) de grains. Le coefficient « α » n'est que le produit de la surface spécifique par le pourcentage des fines < 0,08 mm résultant d'un broyage normalisé.

Le pouvoir hydraulique du laitier est lié à la structure vitreuse non-cristallisée due aux conditions de granulation. Cette partie qui est susceptible d'engendrer une réaction pouzzolanique en présence d'un catalyseur (la chaux par exemple), provoque alors la recristallisation du laitier, entraînant ainsi la prise hydraulique.

Le caractère original du traitement au laitier réside dans sa prise lente et progressive qui permet d'obtenir une souplesse d'emploi à jeune âge.

L'utilisation du laitier autant que fines, nous a permis d'approvisionner le sable de dune en fines qui lui manquaient et d'améliorer la cohésion de l'enrobé final ; mais l'absence d'élément grossiers dans le mélange empêche l'obtention de performances comparables à celles des prescriptions techniques, l'évolution des différentes performances est comme suit :

- À 18°C et en utilisant le cut back 400/600, la stabilité passe de 168,97 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de laitier à une valeur maximale de 413,22 Kg correspondante à l'emploi de 4% de laitier et chute ensuite pour atteindre une valeur de 318,19 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- À 60°C et en utilisant le cut back 400/600, la stabilité passe de 79,26 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de laitier à une valeur maximale de 142,74 Kg correspondante à l'emploi de 4% de laitier et chute ensuite pour atteindre une valeur de 108,39 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- À 18°C et en utilisant l'émulsion 60, la stabilité passe de 161,36 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de laitier à une valeur maximale de 435,42 Kg correspondante à l'emploi de 4% de laitier et chute ensuite pour atteindre une valeur de 369,46 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- À 60°C et en utilisant l'émulsion 60, la stabilité passe de 73,14 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de laitier à une valeur maximale de 145,21 Kg correspondante à l'emploi de 4% de laitier et chute ensuite pour atteindre une valeur de 122,62 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- Dans le cas de l'utilisation du cut back 400/600, la compacité passe de 81,61% (sans ajout de laitier) à 84,34% (dans le cas de l'adjonction de 6% de laitier) ;
- Dans le cas de l'utilisation de l'émulsion 60, la compacité passe de 81,20% (sans ajout de laitier) à 84,41% (dans le cas de l'utilisation de 6% de laitier).

VI.7.10. Influence du pourcentage en plâtre sur la stabilité et la compacité Hubbard Field.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en plâtre (1% à 6%), les résultats obtenus sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau VI.51 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du plâtre (cut back 400/600)

Cut back 400/600						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
Plâtre (%)	1	2	3	4	5	6
% cut back	7,62	7,85	8,07	8,26	8,43	8,59
Poids à l'air (g)	107,32	107,79	108,05	108,19	108,39	108,57
Densité apparente	1,83	1,82	1,82	1,824	1,84	1,84
Densité théorique	2,22	2,21	2,20	2,20	2,19	2,18
Compacité	82,43	82,35	82,83	83,12	84,08	84,91
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	209,25	246,29	267,53	285,29	319,77	292,35
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	82,96	88,32	94,18	100,59	109,93	103,44

Tableau VI.52 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec l'ajout du plâtre (émulsion 60)

Emulsion 60						
Sable de dune (%)	99	98	97	96	95	94
Plâtre (%)	1	2	3	4	5	6
% émulsion	11,15	11,50	11,80	12,08	12,34	12,57
Poids à l'air (g)	107,40	107,80	108,11	108,26	108,47	108,59
Densité apparente	1,83	1,83	1,82	1,83	1,84	1,84
Densité théorique	2,22	2,21	2,20	2,20	2,19	2,18
Compacité	82,46	82,86	82,87	83,37	84,14	84,47
Stabilité Hubbard Field à 18 °C (Kg)	196,73	232,23	251,52	291,52	343,38	328,48
Stabilité Hubbard Field à 60°C (Kg)	100,09	102,21	105,38	105,98	108,44	106,25

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

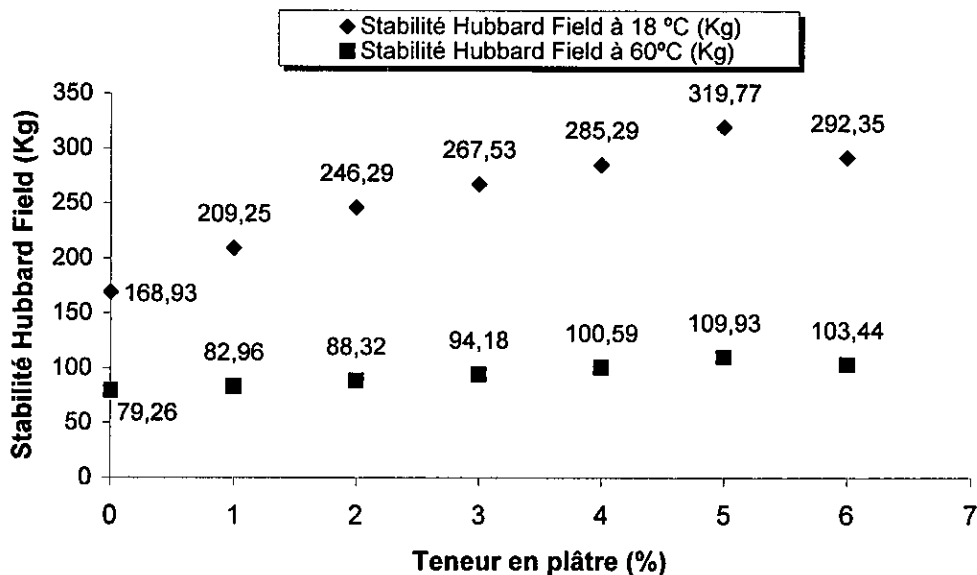


Figure VI.81- Influence de la teneur en plâtre sur la stabilité Hubbard Field (cut back 400/600)

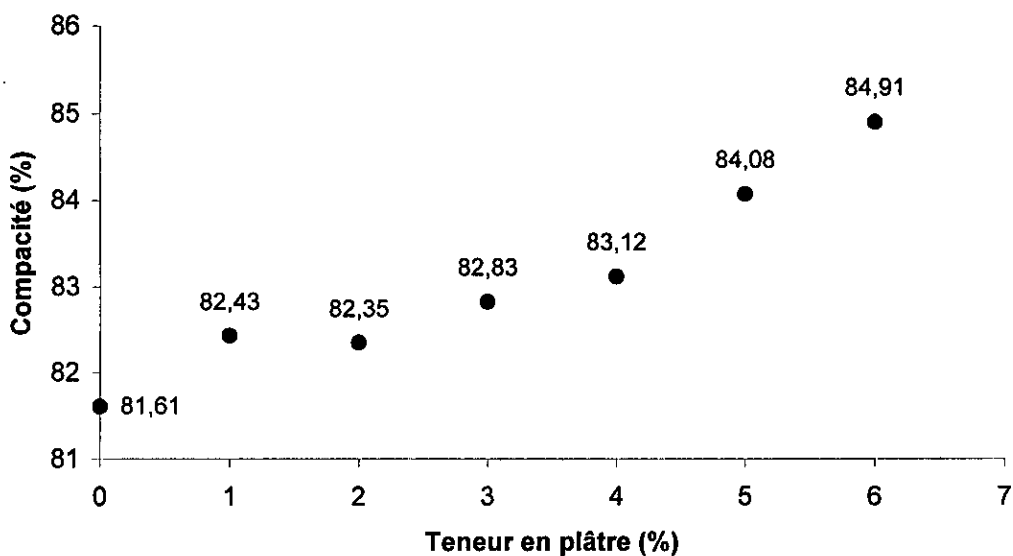


Figure VI.82- Influence de la teneur en plâtre sur la compacité (cut back 400/600)

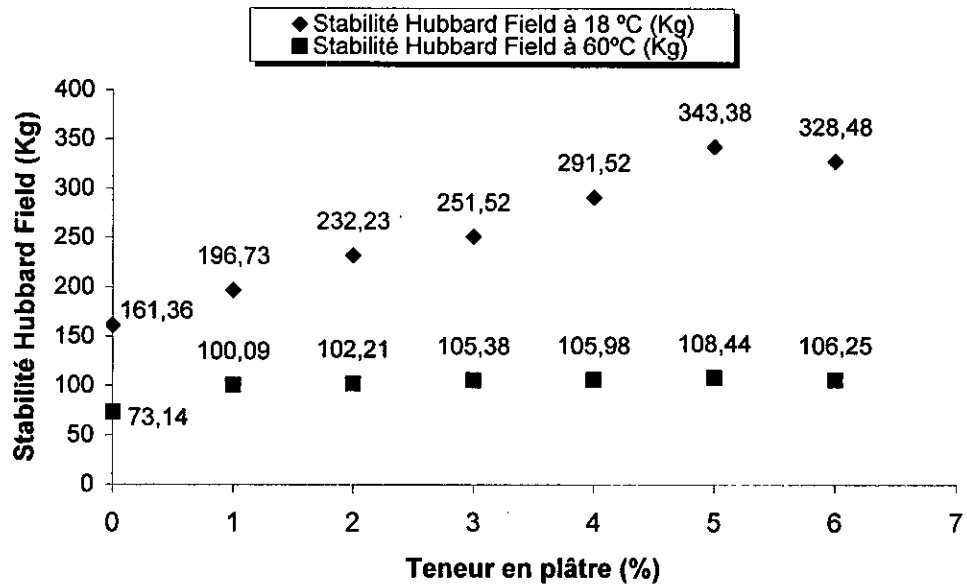


Figure VI.83- Influence de la teneur en plâtre sur la stabilité Hubbard Field (émulsion 60)

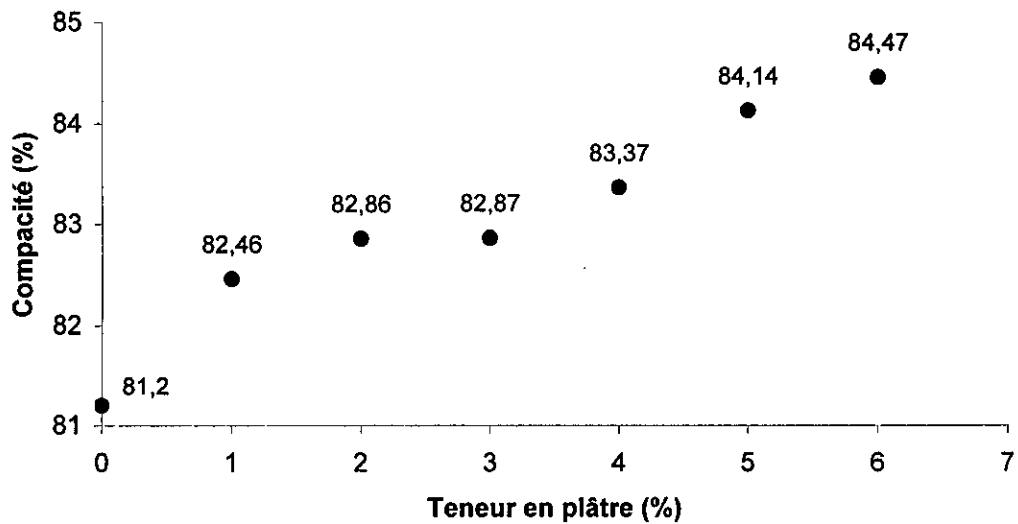


Figure VI.84- Influence de la teneur en plâtre sur la compacité (émulsion 60)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

L'utilisation du plâtre autant qu'élément correcteur des caractéristiques du sable de dune enrobé n'a pas permis d'atteindre les performances escomptées, les résultats sont les plus faibles parmi ceux obtenus avec l'incorporation des différents types de liants hydrauliques.

Il ne faut pas seulement imputer la médiocrité des résultats au plâtre utilisé ; les deux liants employés ainsi que le sable de dune de Hassi Berkine ont leurs parts respectives de responsabilité. Le sable de dune utilisé est de granulométrie serrée dépourvue respectivement d'éléments grossiers anguleux responsables de la bonne tenue de l'enrobé et de fines naturelles en pourcentage acceptable nécessaires pour la rigidification du mastic. L'enrobage à froid est lui aussi responsable de la baisse de la stabilité, vu que ni les granulats et les moules ne sont chauffés ni les liants possèdent la dureté de ceux utilisés pour l'enrobage à chaud.

L'incorporation du plâtre dans le mélange a permis de réduire le pourcentage des vides puisqu'il est composé essentiellement de fines qui viennent s'intercaler entre les grains de sable de dune ayant un diamètre plus grand, ce pourcentage passe de 18,39% et 18,80% dans le cas de l'utilisation de 0% de plâtre (respectivement pour les deux liants cut back 400/600 et émulsion 60) à 15,09% et 15,53% dans le cas de l'utilisation de 6% de plâtre. La stabilité et la compacité ont connu le même sort et l'évolution de ces deux caractéristiques est comme suit :

- À 18°C et en utilisant le cut back 400/600, la stabilité passe de 168,97 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de plâtre à une valeur maximale de 319,77 Kg correspondante à l'emploi de 5% de plâtre et chute ensuite pour atteindre une valeur de 292,35 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- À 60°C et en utilisant le cut back 400/600, la stabilité passe de 79,26 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de plâtre à une valeur maximale de 109,93 Kg correspondante à l'emploi de 5% de plâtre et chute ensuite pour atteindre une valeur de 103,44 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- À 18°C et en utilisant l'émulsion 60, la stabilité passe de 161,36 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de plâtre à une valeur maximale de 343,38 Kg correspondante à l'emploi de 5% de plâtre et chute ensuite pour atteindre une valeur de 328,48 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- À 60°C et en utilisant l'émulsion 60, la stabilité passe de 73,14 Kg dans le cas de l'utilisation de 0% de plâtre à une valeur maximale de 108,44 Kg correspondante à l'emploi de 5% de plâtre et chute ensuite pour atteindre une valeur de 106,25 Kg dans le cas de l'utilisation de 6% du même liant ;
- Dans le cas de l'utilisation du cut back 400/600, la compacité passe de 81,61% (sans utilisation de plâtre) à 84,91% (dans le cas de l'utilisation de 6% de plâtre) ;
- Dans le cas de l'utilisation de l'émulsion 60, la compacité passe de 81,20% (sans utilisation de plâtre) à 84,47% (dans le cas de l'utilisation de 6% de plâtre).

Conclusion de la deuxième série d'essais :

Les résultats obtenus dans le cas de l'enrobage à froid sont nettement inférieurs à ceux de l'enrobé à chaud. La formulation optimale correspond à l'ajout de 35% de fines gypseuses.

Dans le cas de l'utilisation de ce type d'enrobé, le problème de la maniabilité ne se pose pas, suite à la souplesse du mélange et à sa compactabilité.

VI.8. TROISIEME SERIE D'ESSAIS.

Après l'étude des performances mécaniques Hubbard Field d'un sable de dune de Hassi Berkine enrobé avec différents types de liants routiers et corrigé avec plusieurs types de stabilisants et en utilisant différents pourcentages d'ajout, nous avons jugé utile de compléter notre travail par une troisième série d'essai dont laquelle on a étudié l'influence sur les performances mécaniques Duriez et Marshall des différentes formulations optimales obtenues précédemment. Ces formulations optimales sont celles qui ont donné le maximum de stabilité pour chaque type d'ajout, il s'agit essentiellement des combinaisons suivantes :

- 65% de sable de dune + 35% de sable d'ajout (sable concassé, sable gypseux, arène granitique) ;
- 65% de sable de dune + 35% de fines naturelles (fines gypseuses, fines calcaires) ;
- 97% de sable de dune + 3% de ciment CPJ 45 ;
- 96% de sable de dune + 4% de chaux ou de laitier ;
- 95% de sable de dune + 5% de plâtre.

Les deux liants utilisés sont : le bitume 40/50 pour l'enrobage à chaud et le cut back 400/600 pour l'enrobage à froid.

Le nombre d'éprouvettes Duriez confectionnées est fixé à sept, trois parmi elles sont écrasées à sec et les trois autres après immersion. La septième éprouvette est destinée à la mesure de la densité apparente par pesée hydrostatique.

Dans le cas de l'utilisation du bitume 40/50, les trois éprouvettes destinées à l'écrasement à sec sont conservées pendant 7 jours à une température de 18°C. Les trois autres éprouvettes destinées à l'écrasement après immersion sont conservées dans un bain d'eau pendant la même durée de temps et la même température que celle des trois éprouvettes à sec. L'utilisation du cut back 400/600 nécessite beaucoup plus de temps avant que les éprouvettes puissent être écrasées. La norme française exige que les éprouvettes doivent être écrasées après 15 jours de la date de leur confectionnement, pendant les 8 premiers jours l'enrobé à froid est en phase de maturation et une fois le poids de l'éprouvette est stabilisé, elle est soit conservée à sec ou dans un bain pendant 7 jours et à une température de 18°C. Les éprouvettes sont ensuite écrasées et la stabilité Duriez est la moyenne de trois valeurs.

Le nombre d'éprouvettes Marshall confectionnées pour chaque formulation est de quatre. Les éprouvettes confectionnées avec l'utilisation du bitume 40/50 sont écrasées après 5 heures de leur démoulage alors que celles confectionnées avec le cut back 400/600 sont écrasées après la stabilisation finale du poids de chaque éprouvette. Le nombre de coups de la dame Marshall est de 50 coups par face d'éprouvette.

Les éprouvettes Marshall sont écrasées avec une vitesse de 0,836 mm/s après une demie heure de conservation dans un bain Marie chauffé à une température de 60°C.

VI.8.1. ETUDE DURIEZ :

Les résultats Duriez obtenus avec l'utilisation de bitume 40/50 sont portés sur le tableau suivant :

Tableau VI.53 : Résultats de l'essai Duriez (bitume 40/50)

Formulation		100% sable de dune	65% S.D + 35% SG	65% S.D + 35% SC	65% S.D + 35% AG	65% S.D + 35% FG	65% S.D + 35% FC	65% S.D + 4% Chaux	65% S.D + 4% Laitier	65% S.D + 3% Ciment	65% S.D + 5% Plâtre
% bitume		6,50	8,17	7,58	7,34	9,83	9,83	7,31	7,31	7,14	7,46
Densité apparente par balance hydrostatique		1,73	1,85	1,84	1,85	1,90	1,92	1,75	1,75	1,80	1,77
Résistance à la compression à 18°C (Kg/cm ²)	Après 7 jours à sec (R)	44,10	49,98	51,24	48,30	82,60	80,71	51,59	52,08	49,91	48,23
	Après 7 jours en immersion (R')	27,86	32,21	36,82	30,66	47,67	49,35	29,82	30,8	31,08	28,70
Imbibition (%)	Après 2 heures	0,6	0,9	0,56	0,72	0,81	0,64	0,51	0,55	0,59	0,65
	Après 2 jours	0,82	2,57	0,73	0,93	3,46	2,80	0,87	0,87	0,86	1,08
	Après 7 jours	0,93	4,07	1,06	1,36	8,69	4,24	1,17	1,14	1,22	1,83
Gonflement (%)	Après 2 heures	0,51	0,80	0,73	0,55	0,95	0,92	0,71	0,66	0,60	0,92
	Après 2 jours	1,00	2,10	1,72	1,50	2,43	2,32	1,69	1,75	1,80	1,75
	Après 7 jours	1,52	2,86	2,22	1,98	4,33	4,13	2,39	2,45	2,40	2,23
Affaissement (%)		4,69	3,98	5,28	4,61	3,32	4,49	5,03	4,44	4,67	2,28
Compacité (%)		77,58	89,37	85,19	86,65	95,00	95,05	81,75	79,69	81,44	80,82
Rapport de compression R'/R		0,63	0,64	0,72	0,63	0,58	0,61	0,58	0,59	0,62	0,59

Les résultats Duriez obtenus avec l'utilisation du cut back 400/600 sont portés sur le tableau suivant :

Tableau VI.54 : Résultats de l'essai Duriez (cut back 400/600)

Formulation		100% sable de dune	65% S.D + 35% SG	65% S.D + 35% SC	65% S.D + 35% AG	65% S.D + 35% FG	65% S.D + 35% FC	65% S.D + 4% Chaux	65% S.D + 4% Laitier	65% S.D + 3% Ciment	65% S.D + 5% Plâtre
% cut back 400/600		7,34	9,23	8,56	8,29	11,11	11,11	8,26	8,26	8,07	8,43
Densité apparente par balance hydrostatique		1,70	1,77	1,85	1,79	1,82	1,91	1,77	1,77	1,78	1,76
Résistance à la compression à 18°C (Kg/cm ²)	Après 7 jours à sec (R)	6,79	17,50	10,12	8,98	21,14	18,36	9,66	8,12	11,48	7,14
	Après 7 jours en immersion (R')	2,24	7,74	3,22	2,98	11,56	10,30	4,57	3,71	3,42	3,22
Imbibition (%)	Après 2 heures	0,61	1,22	0,77	0,57	0,92	0,86	0,94	0,62	0,67	0,71
	Après 2 jours	0,74	2,01	0,87	0,76	2,14	2,18	1,19	0,76	0,86	0,94
	Après 7 jours	0,83	3,67	3,28	2,46	3,83	3,36	2,71	1,01	2,87	3,76
Gonflement (%)	Après 2 heures	0,48	0,66	0,52	0,50	0,92	0,88	0,51	0,47	0,39	0,46
	Après 2 jours	0,92	2,32	0,68	0,61	2,19	1,96	0,72	0,70	0,75	0,75
	Après 7 jours	1,44	3,44	1,38	1,27	4,08	3,62	1,48	1,69	2,01	2,34
Affaissement (%)		4,51	3,64	4,20	4,07	2,85	4,62	5,32	5,05	4,20	4,46
Compacité (%)		76,23	85,51	85,65	83,84	91,00	94,55	80,82	80,60	80,54	80,37
Rapport de compression R'/R		0,33	0,44	0,32	0,33	0,55	0,56	0,47	0,46	0,30	0,45

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-dessous :

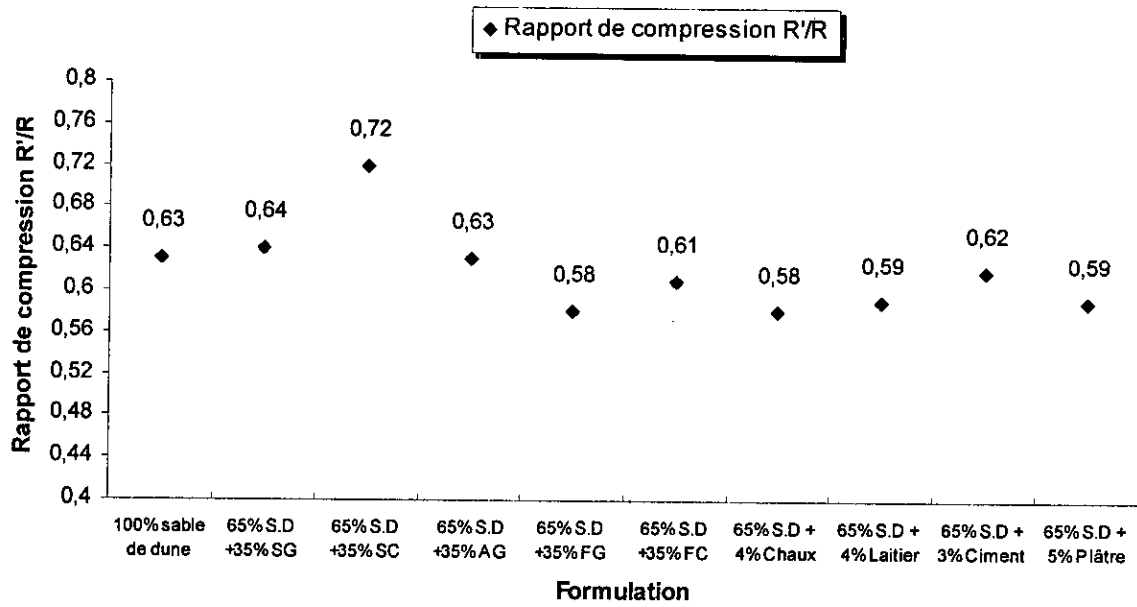


Figure VI.85- Variation du rapport immersion / compression en fonction de la formulation (bitume 40/50)

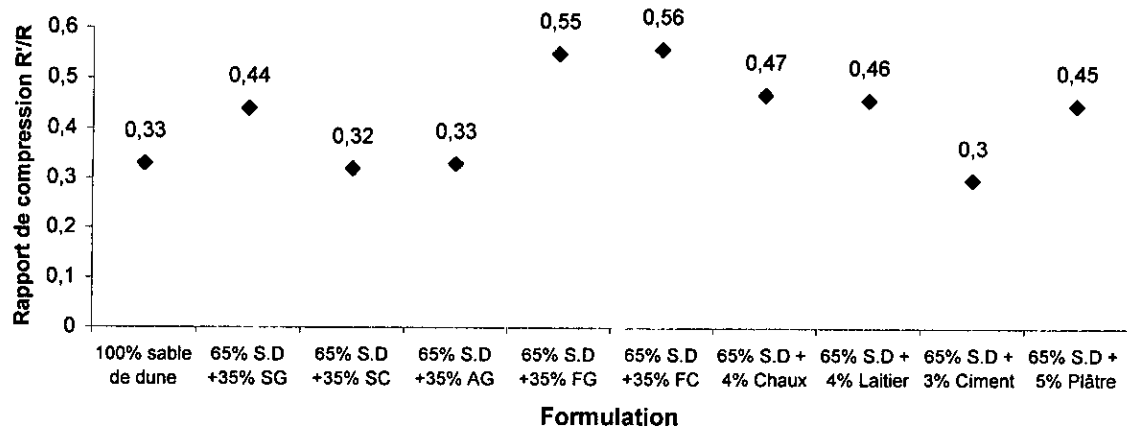


Figure VI.86- Variation du rapport immersion / compression en fonction de la formulation (cut back 400/600)

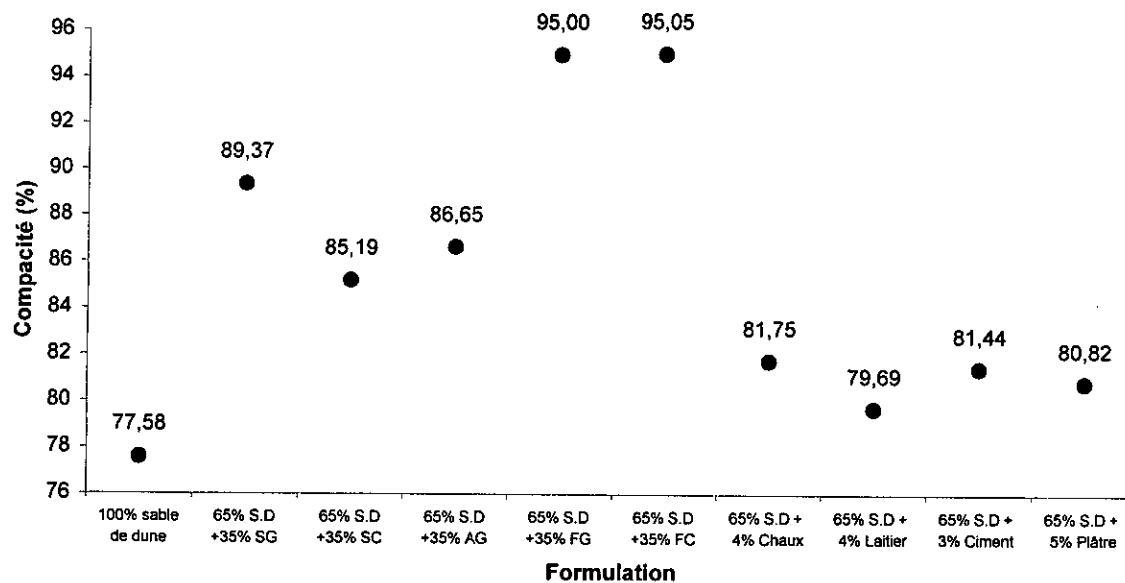


Figure VI.87- Variation de la compacité en fonction de la formulation (bitume 40/50)

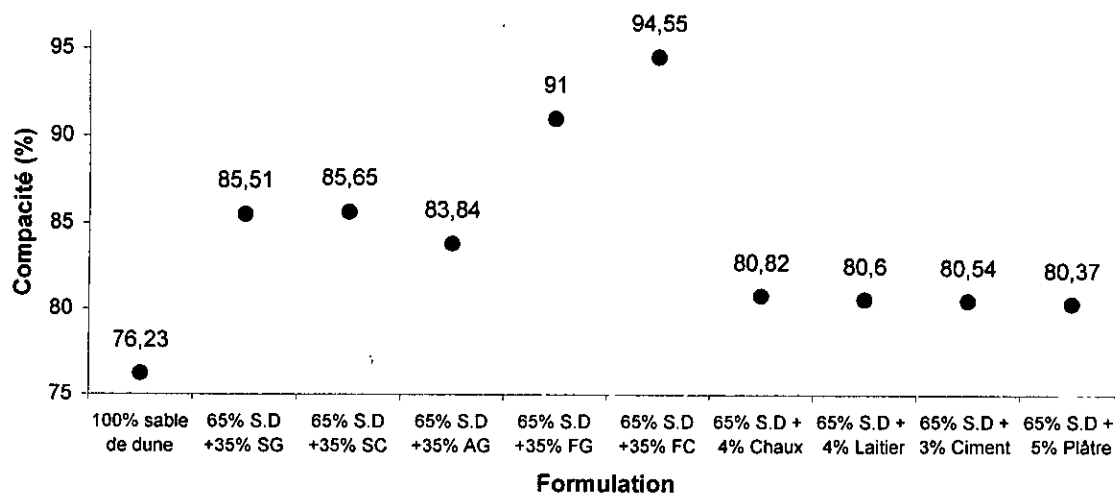


Figure VI.88- Variation de la compacité en fonction de la formulation (cut back 400/600)

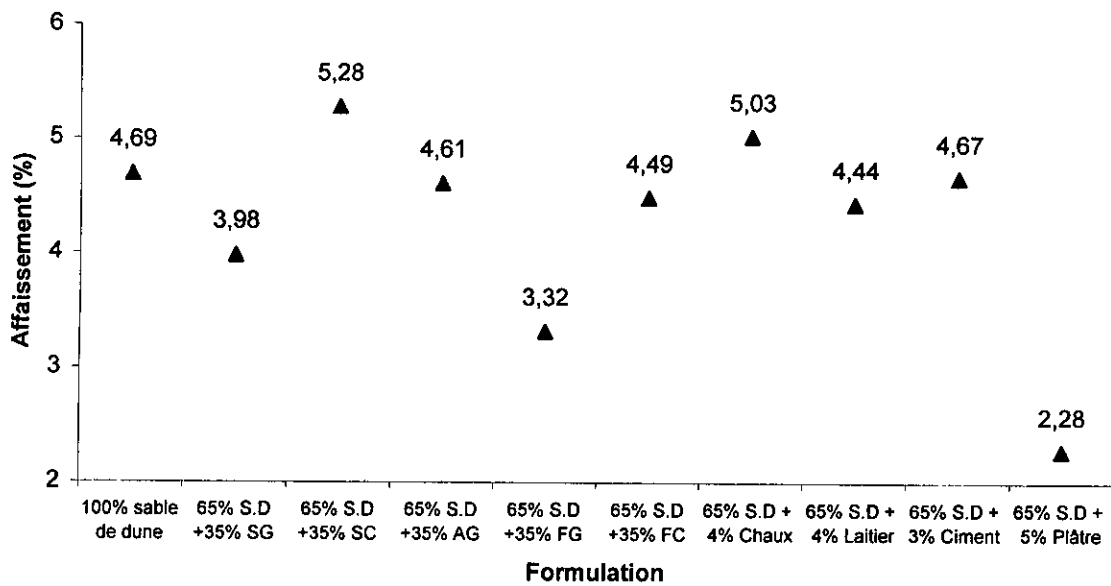


Figure VI.89- Variation de l'affaissement en fonction de la formulation (bitume 40/50)

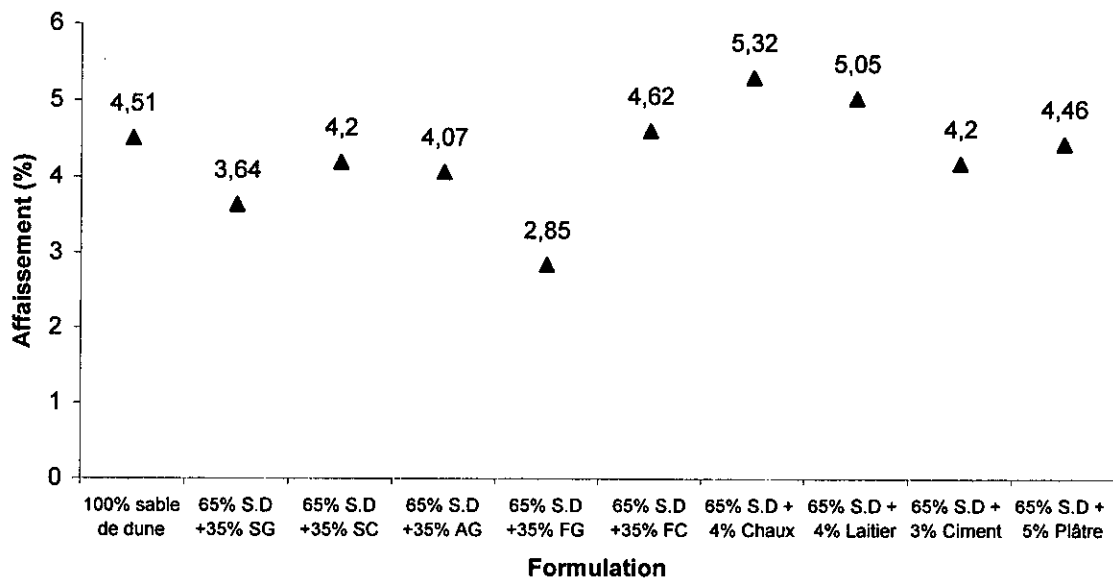


Figure VI.90- Variation de l'affaissement en fonction de la formulation (cut back 400/600)

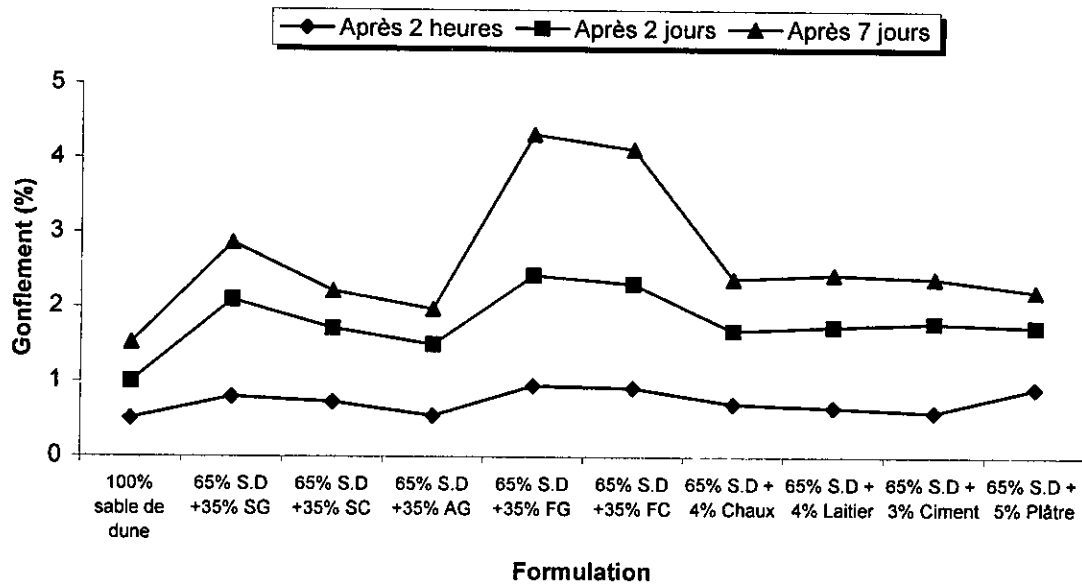


Figure VI.91- Variation du gonflement en fonction de la formulation (bitume 40/50)

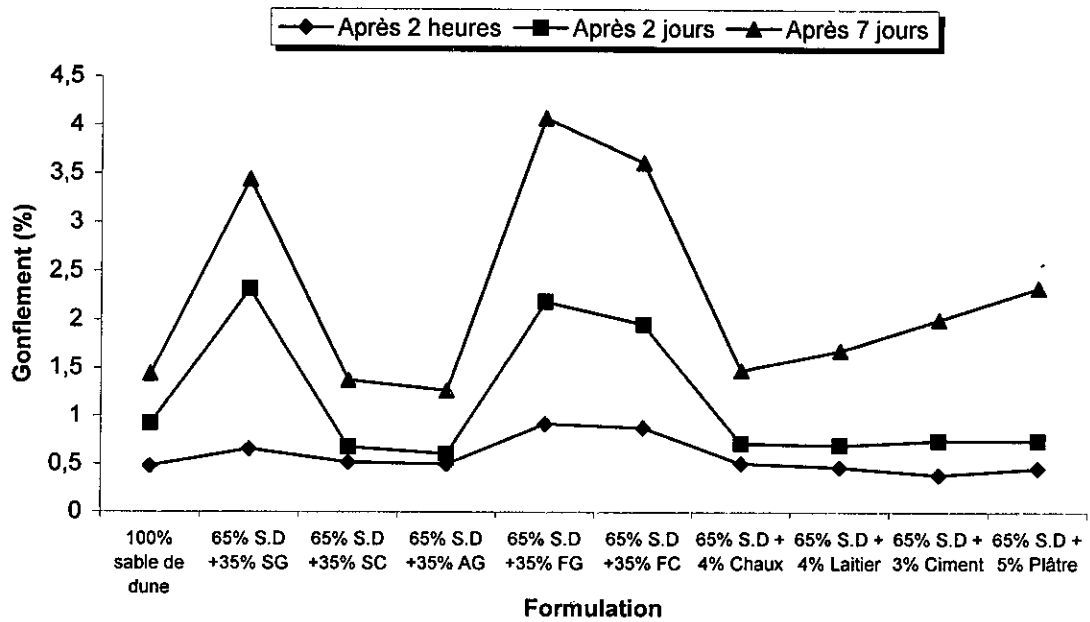


Figure VI.92- Variation du gonflement en fonction de la formulation (cut back 400/600)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

Les résultats obtenus montrent que le paramètre qui influence les résistances, mis à part la teneur en liant, et surtout la granularité. Les résistances à la compression à sec et après immersion augmentent avec l'ajout des différents stabilisants. Les résistances à la compression après immersion des éprouvettes sont affaiblies, cela est dû à l'effet d'eau qui provoque un phénomène de désenrobage entre les grains et le liant. Ces résistances sont diminuées par un facteur qui varie d'une formulation à une autre selon la nature minéralogique et l'état de surface des grains.

La résistance à la compression à sec passe de 44,1 Kg/cm² dans le cas de sable de dune enrobé seul à une valeur maximale de 82,6 Kg/cm² correspondante à l'ajout de 35% de fines gypseuses (utilisation de bitume 40/50), elle passe en utilisant le cut back 400/600 de 6,79 Kg/cm² sans ajout à une valeur maximale de l'ordre de 21,14 Kg/cm² correspondante à l'ajout de 35% de fines gypseuses.

Les valeurs obtenues des rapports immersion / compression pour les différentes formulations et en utilisant le bitume 40/50 et le cut back 400/600 n'ont pas pu atteindre le minimum de 0,75 préconisé par les recommandations françaises mais connaissant la faible pluviométrie de notre vaste Sahara, nous pensons qu'ils sont acceptables dans le cas de l'utilisation du bitume 40/50. La valeur de ce rapport immersion / compression varie pour l'ensemble de nos formules de 0,58 à 0,72 dans le cas de l'utilisation du bitume 40/50 et de 0,32 à 0,56 dans le cas de l'utilisation de cut back 400/600.

La compacité ne fait qu'augmenter avec les différents types d'ajout, elle passe de 77,58% et 76,23% dans le cas de l'utilisation des deux liants (respectivement le bitume 40/50 et le cut back 400/600) et sans ajout de stabilisants à des valeurs maximales de l'ordre de 95,05% et 94,55% correspondantes à l'ajout de 35% de fines calcaires. Les compacités recommandées pour ce type d'enrobé sont comprises entre 85% et 92%, elles sont atteintes par l'ensemble des sables utilisés et restent en deçà du seuil minimal dans le cas de l'ajout des différents liants hydrauliques.

Une analyse des résultats d'imbibition obtenus avec les différents types d'ajout montre que le seuil toléré par les recommandations (4%) est dépassé dans le cas de l'utilisation de bitume 40/50 avec l'ajout de : 35% de sable gypseux, 35% de fines gypseuses et 35% de fines calcaires, cela est dû à l'affinité du gypse à l'eau.

Le gonflement maximal est obtenu dans le cas de l'utilisation de 35% de fines gypseuses, il est de l'ordre de 4,33% dans le cas de l'utilisation du bitume 40/50 et de 4,08% dans le cas de l'utilisation de cut back 400/600 (la valeur maximale tolérée par les recommandation est de 2%). La présence d'argile dans les fines gypseuses favorise le gonflement de l'enrobé.

Le pourcentage d'affaissement des éprouvettes après écrasement est compris entre 2,28% et 5,28% dans le cas de l'utilisation de bitume 40/50, il est entre 2,85% et 5,32% dans le cas de l'utilisation du cut back 400/600.

VI.8.2. ETUDE MARSHALL :

Les résultats Marshall obtenus avec l'utilisation de bitume 40/50 et le cut back 400/600 sont portés sur le tableaux suivants :

Tableau VI.55 : Résultats de l'essai Marshall (bitume 40/50)

Formulation	100% sable de dune	65% S.D + 35% SG	65% S.D + 35% SC	65% S.D + 35% AG	65% S.D + 35% FG	65% S.D + 35% FC	65% S.D + 4% Chaux	65% S.D + 4% Laitier	65% S.D + 3% Ciment	65% S.D + 5% Plâtre
% bitume	6,5	8,17	7,58	7,34	9,83	9,83	7,31	7,31	7,14	7,46
Densité apparente par balance hydrostatique	1,76	1,71	1,90	1,91	1,79	1,92	1,79	1,78	1,78	1,79
Compacité (%)	78,56	82,61	87,96	89,46	92,50	95,05	81,74	81,51	80,32	81,74
Stabilité Marshall (Kg)	227,40	643,60	608,50	598,40	873,80	867,70	639,20	632,70	658,30	629,40
Fluage (1/10 mm)	30,48	17,78	16,51	20,32	10,16	10,16	17,78	20,32	20,32	22,86

Tableau VI.56 : Résultats de l'essai Marshall (cut back 400/600)

Formulation	100% sable de dune	65% S.D + 35% SG	65% S.D + 35% SC	65% S.D + 35% AG	65% S.D + 35% FG	65% S.D + 35% FC	65% S.D + 4% Chaux	65% S.D + 4% Laitier	65% S.D + 3% Ciment	65% S.D + 5% Plâtre
% cut back 400/600	7,34	9,23	8,56	8,29	11,11	11,11	8,26	8,26	8,07	8,43
Densité apparente par balance hydrostatique	1,76	1,78	1,90	1,93	1,83	1,93	1,79	1,78	1,77	1,81
Compacité (%)	78,70	85,99	87,94	89,70	91,25	95,54	81,50	80,83	80,09	82,65
Stabilité Marshall (Kg)	196,10	506,60	542,50	500,40	780,10	769,90	493,40	482,80	518,30	461,40
Fluage (1/10 mm)	33,02	20,32	19,05	22,86	12,70	13,97	20,32	22,86	17,78	25,40

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures ci-après :

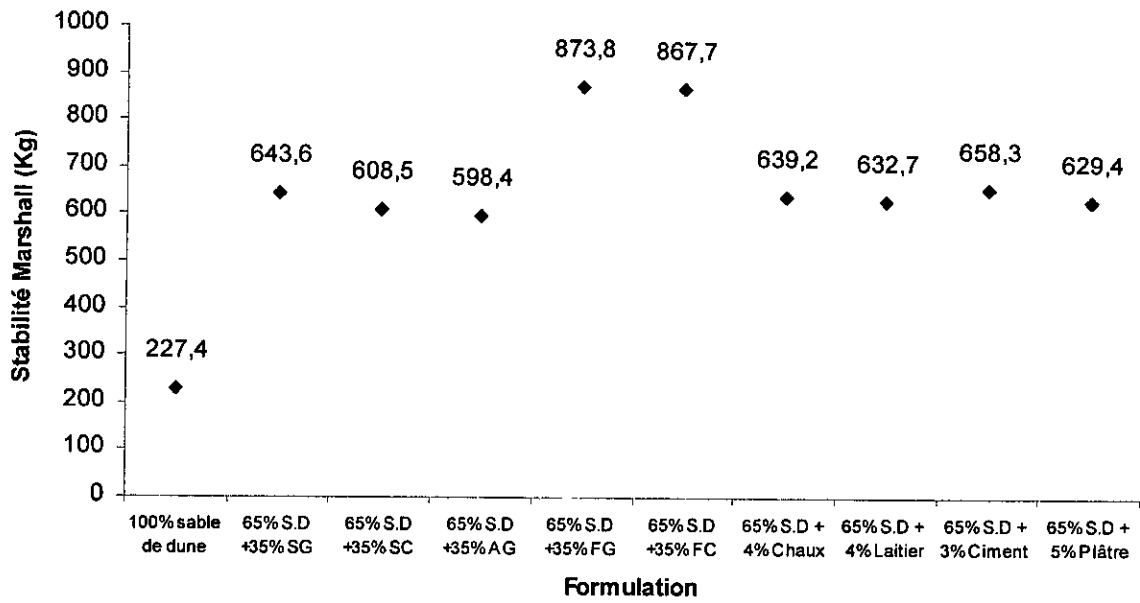


Figure VI.93- Variation de la stabilité en fonction de la formulation (bitume 40/50)

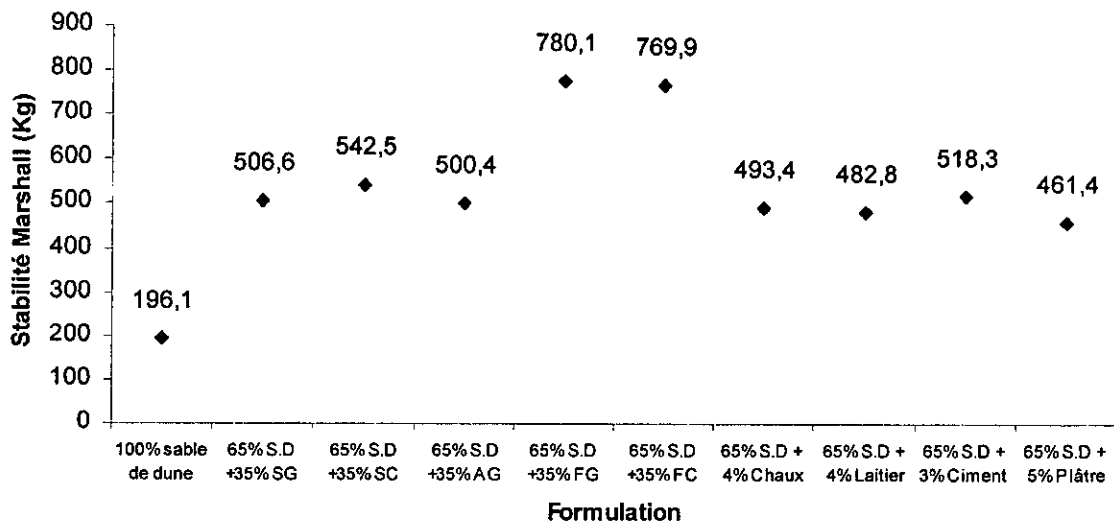


Figure VI.94- Variation de la stabilité en fonction de la formulation (cut back 400/600)

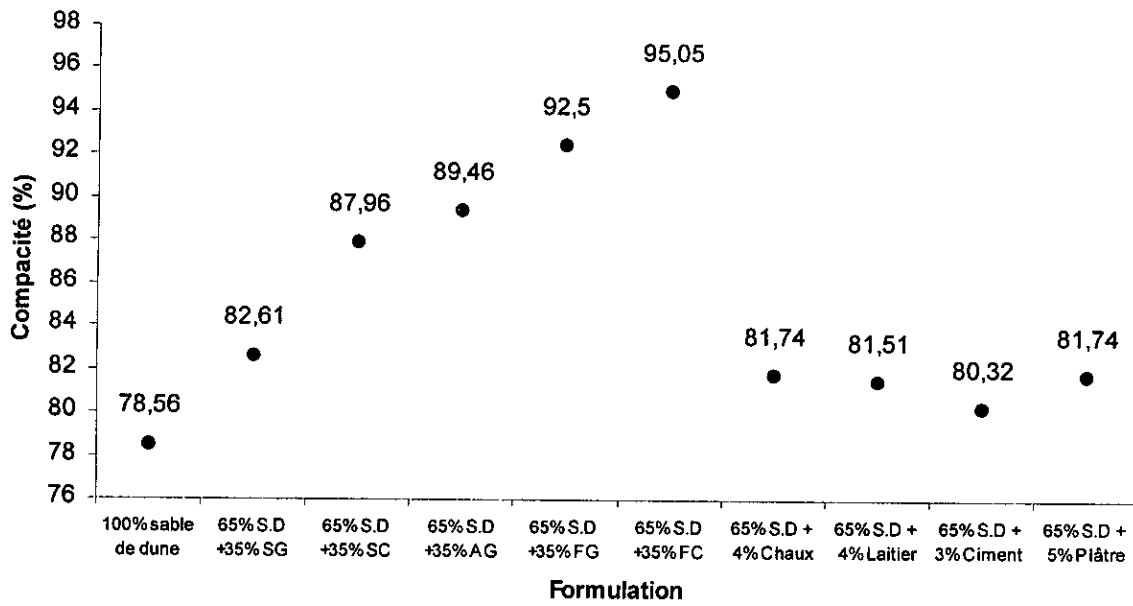


Figure VI.95- Variation de la compacité en fonction de la formulation (bitume 40/50)

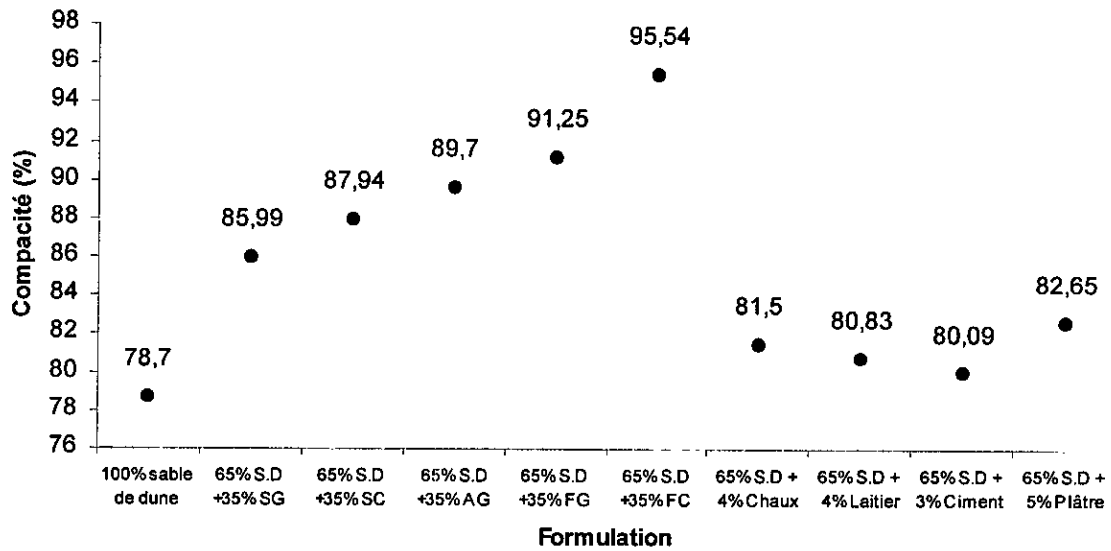


Figure VI.96- Variation de la compacité en fonction de la formulation (cut back 400/600)

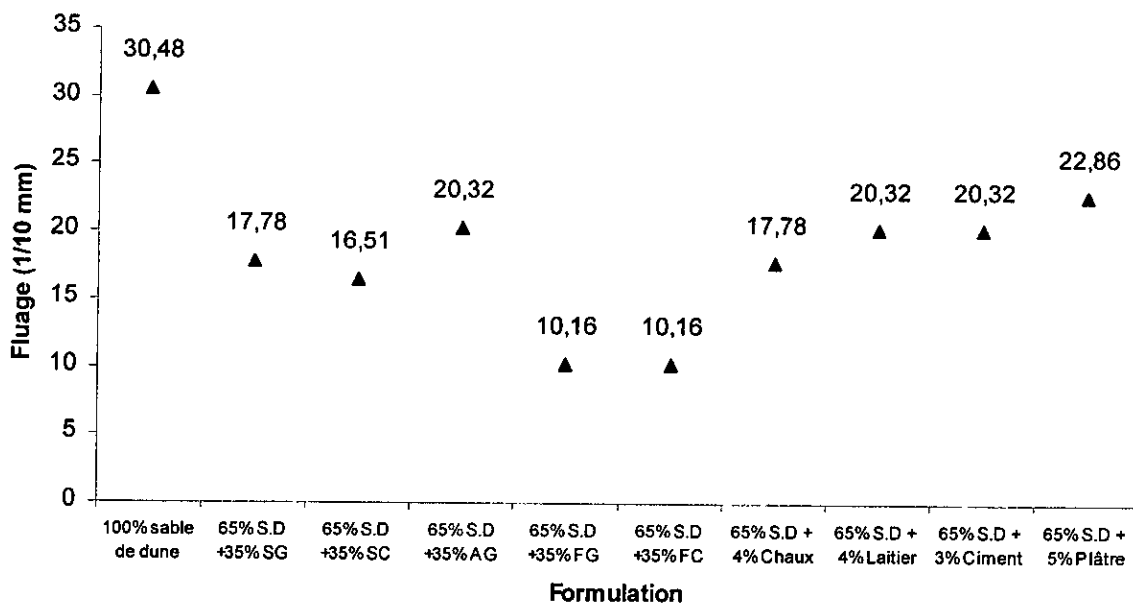


Figure VI.97- Variation du fluage en fonction de la formulation (bitume 40/50)

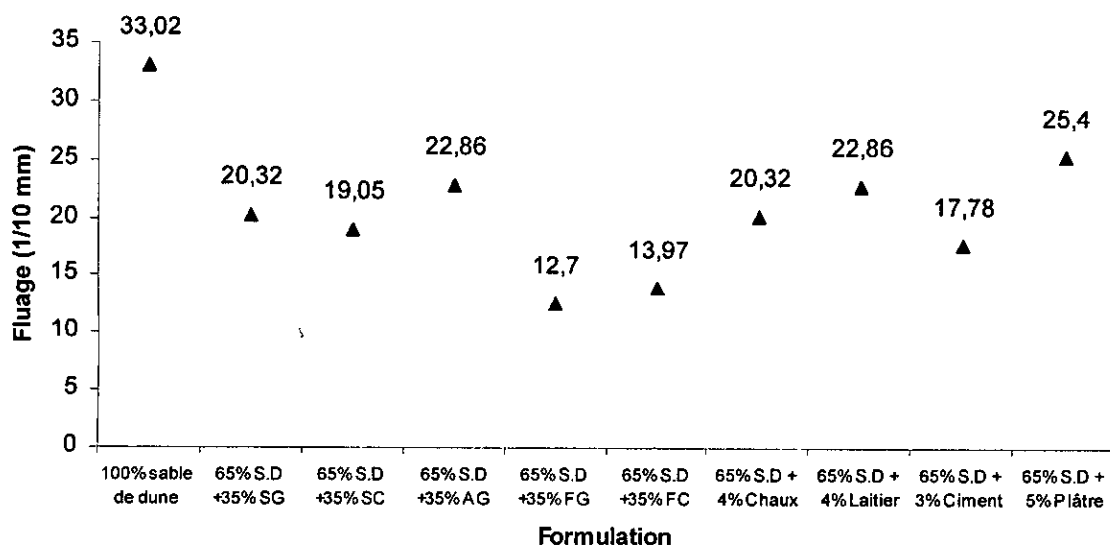


Figure VI.98- Variation du fluage en fonction de la formulation (cut back 400/600)

INTERPRETATION DES RESULTATS.

L'étude du compactage en laboratoire pourrait être envisagée en effectuant des essais Marshall à différentes énergies de compactage (50 coups, 75 coups, 100 coups...) mais le choc de la dame sur les granulats n'a malheureusement pas grand chose de commun avec le passage d'un rouleau à pneus avec un vitesse plus ou moins rapide, les gros granulats se cassent surtout lorsqu'il s'agit d'un matériau friable. Nous nous sommes limités donc à l'étude des effets d'un compactage de 50 coups par face d'éprouvette. Le compactage à 75 et 100 coups par face est généralement réservé à l'étude des formulations des enrobés destinés à l'exécution des couches de roulements de pistes aéronautiques.

Une analyse globale des résultats des essais Marshall effectués au laboratoire nous a permis de mieux cerner les paramètres jouant un rôle prépondérant dans l'amélioration de la qualité et les performances du sable de dune de Hassi Berkine enrobé soit à chaud avec le bitume 40/50 ou bien à froid en utilisant le cut back 400/600. Vu l'insuffisance des stabilités obtenues avec le sable de dune mélangé seul au liant en raison de la forme arrondie des grains qui n'offrent pas suffisamment d'angularité et la nature minéralogique du sable qui est composé essentiellement d'insolubles, nous avons jugé utile de procéder au traitement de ce sable pour améliorer ces performances mécaniques.

La densité apparente des éprouvettes a connu une nette amélioration passant de 1,75 et 1,77 dans le cas de l'utilisation des deux liants bitume 40/50 et cut back 400/600 et sans ajout de stabilisants à des valeurs maximales de l'ordre de 1,92 et 1,93 correspondantes à l'ajout de 35% de fines calcaires, cela a pour effet d'améliorer considérablement les compacités des mélanges hydrocarbonés utilisés, cette compacité passe à son tour de 78,56% et 78,70% sans ajout de stabilisants à des valeurs maximales de l'ordre de 95,05% et 95,54% correspondantes à l'ajout de 35% de fines calcaires. Cette nette amélioration des compacités est imputée aux pourcentages importants de fines qui viennent occuper les vides occasionnés par un mauvais arrangement entre les grains de sable de dune.

La stabilité Marshall exigée par les recommandations (300Kg après une demie heure d'immersion à 60°C dans un bain Marie) a été largement dépassée pour l'ensemble des formulations avec les différents types d'ajout, elle passe de 227,40 Kg et 196,10 Kg sans ajout de stabilisants à des valeurs maximales de l'ordre de 873,80 Kg et 780,10 Kg correspondantes à l'ajout de 35% de fines gypseuses.

Le fluage Marshall a diminué et il est passé de 3,05 mm et 3,30 mm dans le cas de l'utilisation des deux liants bitume 40/50 et cut back 400/600 et sans ajout de stabilisants à des valeurs minimales de l'ordre de 10,16 mm et 12,70 mm correspondantes à l'ajout de 35% de fines gypseuses. Nous rappelons que l'insuffisance de la stabilité se traduit souvent par un fluage avec formation de dépressions ou d'ornières.

Conclusion de la troisième série d'essais :

L'incorporation de différents types d'ajout a permis d'améliorer l'ensemble des performances mécaniques Duriez et Marshall du sable enrobé. Les meilleurs résultats sont ceux obtenus avec l'ajout de 35 % de fines naturelles mais le gonflement maximal est celui correspondant à l'ajout de 35% de fines gypseuses à cause de leur pollution (présence d'argile). Dans la pratique et lorsque on choisit les fines naturelles pour corriger la granulométrie d'un sable quelconque, il faut s'assurer de leur propreté.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le sable de dune est un matériau qui a été pendant bien longtemps injustement décrié. Il ne faut pas s'attendre à l'emploi de ce matériau dans la construction des chaussées à un bouleversement de la technique routière saharienne. Cet emploi n'est en fait qu'un petit aspect de cette technique et il est nullement question de chercher à substituer les sables de dune aux graves, ces dernières ayant de bien meilleures caractéristiques pour la confection des mélanges hydrocarbonés. Cependant, dans les régions dépourvues de graves, alors que les sables convenables sont abondants, il y aurait généralement un intérêt économique à les employer.

Dans un domaine aussi compliqué que celui des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux, nous n'avons pas eu la chance, malheureusement, d'étudier l'ensemble des sollicitations, ni de considérer en détail l'influence des différents paramètres qui régissent ces propriétés, ce qui aurait nécessité un travail considérablement plus long et des moyens dont on ne dispose pas.

Toutefois, il semble que nous avons réussi à mettre en évidence l'importance de certains facteurs dont l'influence semble prépondérante sur la résistance aux sollicitations que les enrobés bitumineux sont appelés à subir.

La technique du sable enrobé a fait ses preuves dans la mesure où les revêtements exécutés ont conservé leurs performances en dépit du vieillissement qui est inévitable. Le seul inconvénient de cette technique semble être son aptitude excessive à la fissuration qui serait due probablement à son rigidité, mais il y a lieu de rappeler que même pour les revêtements en enrobé ouvert, on constate souvent cette fissuration prématurée surtout lorsque le corps de chaussée est réalisé en matériaux gypseux caractérisés par leur retrait hygroscopique.

Dans la majorité des cas où cette technique a été utilisée, l'enrobage s'est fait à chaud avec l'emploi du bitume 80/100 en incorporant 1 à 2% de chaux pour améliorer l'adhésivité et la stabilité, on a utilisé dans le souci d'éviter les grandes distances de transport, les sables disponibles près du lieu de projet et qui peuvent aller d'un sable de dune très serré dépourvu de fines à un sable alluvionnaire grossier riche en fines.

Une analyse globale des résultats des essais effectués au laboratoire permet de tirer les conclusions suivantes :

- Le sable de dune utilisé (celui de Hassi Berkine) est caractérisé par une granulométrie serrée dépourvue d'éléments grossiers et de fines jouant un rôle prépondérant dans l'amélioration de la qualité et les performances des sables enrobés. La forme arrondie des grains et leur nature minéralogique se composant essentiellement d'insolubles ont aussi leur part de responsabilité de la médiocrité des performances du sable mélangé seul aux différents types de liants employés.
- L'utilisation de quatre types de liants, deux pour l'enrobage à chaud (bitume 40/50 et bitume 80/100) et les deux autres pour l'enrobage à froid (cut back 400/600 et émulsion 60) a permis de trancher dans la question du choix du liants à utiliser pour

l'exécution des revêtements en sable enrobé ; même si l'enrobé à froid dispose de nombreux avantages (éviter des distances de transport importantes à partir d'installations fixes, diminution du coût de chantier, éviter le séchage des granulats et le chauffage du liant, protection de l'environnement contre la pollution), ses performances mécaniques restent plus ou moins faibles par rapport à celles de l'enrobé à chaud. Cette différence de performances est imputée généralement à la viscosité du liant et à la manière de préparer l'enrobé. Dans le cas de l'enrobage à chaud, tous les constituants de l'enrobés sont chauffés à une température relative à la classe du bitume employé, ce qui confère au mélange une fois malaxé une homogénéité et une cohésion importantes, alors que dans le cas de l'enrobage à froid, les granulats et le liant sont mélangés sans chauffage ce qui ne permet pas d'obtenir une bonne adhérence des agrégats au liant. Cette faible adhérence rend l'enrobé à froid moins stable et susceptible au désenrobage en présence d'eau ;

- Les deux types de liant utilisés pour l'enrobage à froid (cut back 400/600 et l'émulsion 60) ont été produits à partir d'un bitume de base 80/100, l'utilisation de cut back et d'émulsion de mêmes classes que précédemment et produits à partir d'un bitume de bas 40/50 aurait pu donner de meilleurs résultats.
- La teneur et la classe du bitume sont deux facteurs ayant une incidence importante sur les valeurs des résultats escomptés. L'optimum de bitume pour le cas du sable enrobé seul est dans la plus part des cas compris entre 6% et 7% (dans notre cas il est de l'ordre de 6,5% pour l'enrobé à chaud et 7% pour l'enrobé à froid), une teneur en bitume inférieure à 6% entraîne un mélange moins stable, en raison de l'insuffisance de l'enrobage, alors que une teneur en bitume supérieure à 7% conduit à une chute de stabilité, en raison du mauvais contact entre grains. De même que pour la teneur en bitume, une attention particulière doit être prêtée au choix de la classe du bitume à utiliser, il conviendra d'éviter les bitumes de pénétration très importante. Ceci afin d'éviter les risques d'orniérage, à l'inverse, des liants de trop faible pénétration peuvent conduire très rapidement par vieillissement à une rigidité élevée ; ce qui peut avoir comme conséquence de rendre le matériau très sensible aux phénomènes de fatigue. Dans la pratique il est conseillé de choisir un bitume dont la pénétration soit comprise entre 50 et 100 ;
- La correction de la granulométrie du sable de dune avec différents types de sables correcteurs (sable concassé de Haoud El Hamra, sable gypseux de Hassi Messaoud, arène granitique de Tamanrasset) peut être envisageable dans la mesure où elle peut se faire dans des limites raisonnables et en choisissant le liant adéquat. Le sable concassé utilisé est un matériau riche en grains anguleux responsables de la mobilisation des forces de frottement intergranulaires permettant d'atteindre un niveau de performance assez acceptable, il contient aussi un pourcentage de fines (16,85%) nécessaire pour la rigidification du mastic filler/bitume. Le sable gypseux utilisé est un matériau friable, possédant un pourcentage élevé de fines (30,79%) connues par leur affinité aux liants hydrocarbonés. Son incorporation a permis de réduire le pourcentage des vides de l'enrobé et en même temps de rigidifier le mastic filler/bitume. L'arène granitique quant à elle a permis l'approvisionnement de sable de dune en éléments grossiers (plus de 20% d'éléments ont un diamètre supérieur à 4 mm) qui lui manquaient sans parfois atteindre les résultats obtenus dans le cas de l'utilisation de chacun des deux premiers sables correcteurs. Cela est du à la fois à sa nature chimique se composant essentiellement de grains de silice notaires par leur mauvaise affinité aux liants noirs et à son faible pourcentage de fines (12%) relativement aux deux premiers sables correcteurs. En

- pratique et dans le cas où l'arène est utilisée, un apport de 2% à 4% de chaux est nécessaire pour améliorer l'adhésivité des grains de l'arène au liant employé.
- L'ajout de fines gypseuses ou de fines calcaires en quantités importantes a permis de dépasser largement les recommandations techniques pour les enrobés fins mais le seul problème qui apparaît dans le cas de ce type de formulation est la maniabilité de l'enrobé qui devient de plus en plus difficile en fonction de la quantité de fines introduite. Dans le cas de l'utilisation de l'enrobé à chaud, une valeur moyenne de 15% nous semble raisonnable du fait qu'elle permet de satisfaire les exigences techniques et mécaniques. La nature des fines a aussi une influence sur les résultats obtenus, avec l'ajout de même pourcentage de fines gypseuses ou calcaires, une différence en faveur des fines gypseuses est nettement appréciée, cela est dû peut-être à l'activité des fines gypseuses qui développent une certaine forme de prise responsable de l'amélioration de la cohésion intergranulaire ;
 - L'incorporation de différents pourcentages de liants hydrauliques et en utilisant les différents types de liants noirs a conduit pour l'ensemble des formulations étudiées à une nette amélioration du comportement du mélange, il semble y avoir un optimum de la teneur en liant hydraulique. Cet optimum est de l'ordre de 4% pour la chaux et le laitier d'El Hadjar, il est de 3% dans le cas de l'utilisation du ciment CPJ 45 et de 5% dans le cas de l'utilisation du plâtre. Les plus faibles performances ont été celles avec l'ajout du plâtre, cela est justifié par la mauvaise affinité de ce dernier aux liants noirs. En effet, il nous paraît souhaitable de s'orienter vers les formules binaires, contenant un sable correcteur dans les limites raisonnables (20% à 30%) et 2 à 4% de liant hydraulique, pour assurer une bonne fillérisation du mélange et pour obtenir les meilleures caractéristiques ;
 - Concernant la mise en œuvre du sable enrobé, une attention particulière doit être apportée au compactage qui est difficile à réaliser en raison de la lente déperdition de la chaleur du mélange et de la faible angularité des grains ;
 - Afin d'assurer une bonne adhérence et accroître le frottement entre les roues des véhicules et le tapis en sable bitumineux, un cloutage avec un granulat 6/12 ou 8/15 s'impose et cela à raison de 5 litres au mètre carré et au 2/3 de leur épaisseur.

Enfin et dans le cadre d'une éventuelle réhabilitation de la technique du sable enrobé, nous recommandons que l'on tienne compte des points suivants :

- La réalisation de plusieurs planches d'essais en variant plusieurs paramètres (formulations, mode de compactage, température de mise en œuvre...) pour pouvoir maîtriser la possibilité de l'emploi de cette technique ;
- L'utilisation des essais non classiques (fatigue, fluage statique, fluage dynamique, orniérage, module complexe...) à fin de mieux connaître le comportement en service et à la rupture des sables enrobés ;
- Approfondir les connaissances déjà acquises sur le comportement des arènes granitiques et l'étude de la possibilité de son emploi en tant que matériau de base pour la réalisation des revêtements de chaussées à faible trafic ;
- L'étude de l'influence de l'incorporation de différents types de dopés sur le comportement et l'adhésivité des mélanges obtenus.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] AIMEUR A. (2001), « Réflexion sur l'utilisation des arènes granitiques en structures de chaussées », ARAL, 3^{ème} congrès algérien de la route, Alger, P.23-25
- [2] ARRAMBIDE J. et DURIEZ M. (1954), « Liants hydrocarbonés, mortiers et bétons bitumineux », Edition Dunod.
- [3] ARRAMBIDE J. et DURIEZ M. (1959), « Liants routiers et enrobés, matériaux de construction, plâtre-agglomérés-bois », Edition Dunod.
- [4] ARRAMBIDE J. et DURIEZ M. (1962), « Nouveau traité de matériaux de constructions », Tomes 2 et 3, Edition Dunod.
- [5] BASLIMANE N. (1996), « Les enrobés ouverts sahariens. Bilan de dix années de service », ARAL, 2^{ème} congrès algérien de la route, Annaba, Tome 1, P.174 – 180
- [6] BEDRICI M. et SMAI A. (1994), « Etude de sable bitume en couche de roulement », Rapport B10/94, SONATRO, Algérie
- [7] BEDRICI M. (1992), « Note technique sur les enrobés à froid. Utilisation en technique routière au Sahara », SONATRO, Algérie
- [8] BEN DHIA M.H. (1998), « Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière », Bull. de laboratoires des ponts et chaussées, 213, Jan-Fev., pp.33-42
- [9] BENOUALI Y. et CHOUAKI K. (1996), « Etude du sable bitume en couche de roulement », P.F.E, U.S.T.H.B, Algérie, P.91
- [10] BOUDJELLALI A. (1996), « Traitement du sable de dune d'El -Tarf par le laitier granulé d'El-Hadjar », ARAL, 2^{ème} congrès algérien de la route, Annaba, Tome 2, P.206-220
- [11] BOUKEMIDJA A. et BABA-ALI A. (2002), « Sable émulsion. Etude et formulation », Projet de fin d'étude, E.N.P, Algérie
- [12] BOUKHALKHAL A. S. et BOUKHALFA K. (2001), « Sable bitume. Etude comparative à chaud et à froid », Projet de fin d'étude, E.N.P, Algérie
- [13] BOURAIOU M. C. (1996), « Réflexion sur l'utilisation des arènes granitiques en structure de chaussées sahariennes », ARAL, 2^{ème} congrès algérien de la route, Annaba, Tome 1, P.249–256
- [14] BRULE B. (1978), « Contribution à la chromatographie sur gel perméable (G.P.C) à la caractérisation qualitative et quantitative des bitumes structure colloïdale », Rapport de recherche L.C.P.C n° 76, France, P.70
- [15] CHAUVIN J.J. (1987), « Les sables, guide pratique d'utilisation routière », I.S.T.E.D, Paris, France, P.74

- [16] **CHIHEB D.** (2001), « Contribution à l'étude du comportement mécanique et rhéologique d'un tuf-sable-bitume », Thèse de Magister, U.S.T.H.B, Algérie
- [17] **CHOQUET F.** (1993), « Le vieillissement du bitume », Centre de Recherche Routière, Bruxelles, P.24
- [18] **DOMEC M.** (1980), « Construction des chaussées au Sahara », Rapport technique du Laboratoire Central des Travaux Publics, Alger, Sep. 1980.
- [19] **DRON BESTOUGEFF M.R. et BOINAVITCH A.** (1978), « Contribution à l'étude des états structuraux des bitumes », Rapport de recherche L.C.P.C n° 75, France, P.49
- [20] **FAHIM A.** (2001), « Les enrobés en arènes granitiques. Etude de laboratoire », ARAL, 3^{ème} congrès algérien de la route, Alger, P.19-22
- [21] **FARCAS F.** (1998), « Etude d'une méthode de simulation du vieillissement des bitumes sur routes », Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, France, P.221
- [22] **FENZY E.** (1966), « Particularité de la technique routière au Sahara », Revue générale des routes et aérodromes, 411, pp. 57-71.
- [23] **FRANCKEN L.** (1973), « Module complexe de mélange bitumineux », CRR, Bruxelles, RR N° 164/FL/1973, P.95
- [24] **HADDADI S. et LARADI N.** (1996), « Etude de sables-bitume en couche de roulement », ARAL, 2^{ème} congrès algérien de la route, Annaba, P.188 –199
- [25] **HAMZE M.** (1977), « Contribution à l'étude des propriétés de matériaux, le traitement des sables », Rapport de recherche L.C.P N°67
- [26] **HANK E. et SENHADJI F.** (1996), « Utilisation du sable bitume en couche de roulement », ARAL, 2^{ème} congrès algérien de la route, Annaba, P.219 –235
- [27] **KACI H.** (1997), « Sable bitume en couche de roulement Etude et Formulation », Projet de fin d'étude, E.N.P, Algérie
- [28] **KERROUM T. et FARHI M.L.** (1991), « Sable bitume en couche de roulement Etude et Formulation », Mémoire de fin d'étude, E.N.T.P, Algérie
- [29] **L.C.P.C.** (1973), « Essai Marshall, projet de mode opératoire », Paris, France, P.12.13
- [30] **L.C.P.C.** (1981), « Essai Duriez LCPC : essai de compression simple sur enrobés hydrocarbonés, projet de mode opératoire », Paris, France, P.19
- [31] **L.C.P.C.** (1981), « Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire, projet de mode opératoire », Paris, France, P.19
- [32] **L.C.P.C.** (1981), « Essai à l'ornièreur, projet de mode opératoire », Paris, France, P.21

- [33] LINDER R. (1977), « Application de l'essai de traction directe aux enrobés bitumineux, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Spécial N° V, P.225-273
- [34] MINISTERE DES TRAVAUX PUBLICS, DIRECTION DES ROUTES (2000), « Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves », C.T.T.P, Algérie, P.116-118
- [35] MINISTERE DES TRANSPORTS, DIRECTION DES ROUTES. (1984), « Mémento des spécifications françaises chaussées », France, P 27-29
- [36] NASRI A. (1996), « Le laitier des hauts fourneaux Présentation et utilisation dans la construction des chaussées », ARAL, 2^{ème} congrès algérien de la route, Annaba, Tome 2, P.48-53
- [37] NEDJARI R. (2001), « Résultats de planches expérimentales en sable enrobé et recommandations relatives à son utilisation », ARAL, 3^{ème} congrès algérien de la route, Alger, P.7-13
- [38] OUGHANEM S. (2001), « Utilisation des sables-bitumes en techniques routières », ARAL, 3^{ème} congrès algérien de la route, Alger, P.14 -18
- [39] OUZROUROU B. (1991), « Liants hydrocarbonés situation actuelle et perspective » Algérie Equipement, Revue Technique de l'Ecole Nationale des Travaux Publics, N° 2, Alger, ALGERIE, P-P 6-9
- [40] RAPPORTS DE RECHERCHE 3-8 (1995), « Etude et expérimentation sur Sand Asphalt », C.T.T.P, Algérie
- [41] RAPPORT PRELEMINAIRE. (1995), « Etude de recherche sur les sables bitumes », Dossier 63.95.0001, L.T.P.C, Algérie
- [42] RAPPORT PREALABLE. (1957/58), « L'utilisation des sables dans le corps de chaussées en Algérie et au Sahara », Cycles d'études routières 1957/1958 L.C.P.C, Division d'Algérie.
- [43] SAUNIER J. (1968), « Contribution à l'étude des propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux, Thèse de Doctorat Es Sciences, Faculté des Sciences de l'Université de Paris
- [44] VERSTRAETEN J. (1974), « Les déformations permanentes des enrobés bitumineux », Centre de Recherche de Grand Couronnes, France, P.4

ملخص

إن محاولة تقييم أهلية المواد المحلية للإستعمال في إنجاز الطرق نظرا للأزمة الإقتصادية اللتي تمر بها بلادنا يعتبر بمثابة الحل الأنجع لتجنب الإستعمال المفرط للمواد الأكرشيوعا. إن دراستنا هته تدخل في نفس الإطار، فهني ترمي إلي تحسين التركيبة البنيوية لرمال الكثبان الأتي من منطقة حاسي بركين وكذا بزفيتته بمختلف أنواع المواد الزفتية المستعملة في التقنية لطرقية الجزائرية وذلك من اجل قبول صلاحيته كغطاء للطرق الصحراوية ذات الحركية المرورية المحدودة. من اجل ذلك جربت عدة صيغ للرمال المزفت وهذا بإستعمال عدة أنواع من المعدلات وقد أدت النتائج المشجعة لبعض الصيغ إلي تأكيد إمكانية إستعمال الرمال المزفت كمادة أساسية لإنجاز غطاءات بعض الطرق الصحراوية اللتي تتميز بحركية مرورية محدودة.

Résumé

Devant la conjoncture économique difficile que traverse l'Algérie et afin de répondre aux besoins des régions pauvres en matériaux nobles, la valorisation des matériaux locaux semble être la solution la plus adéquate pour parer aux consommations abusives des matériaux les plus recommandés.

Notre contribution rentre dans ce cadre, elle vise à corriger la granulométrie serrée d'un sable de dune de la région de Hassi Berkine et de le traiter à chaud et à froid avec différents types de liants hydrocarbonés afin de valider son emploi en tant que revêtement de chaussées sahariennes ayant un trafic ne dépassant pas les 1000 véhicules par jour. Pour cela plusieurs formulations du sable enrobé ont été élaborées en incorporant différents pourcentages de sables correcteurs ou de pulvérulents industriels.

Les résultats encourageants obtenus pour certaines formulations permettent de confirmer la possibilité d'utiliser le sable enrobé en tant que matériau de base pour l'exécution des couches de roulement des chaussées à faible trafic.

Mots clés : sable bitume, chaussée à faible trafic, compacité, stabilité, gonflement, imbibition, fluage, affaissement, Sahara, bitume.

Abstract

Due to the difficult economical conjuncture that our country meets and in order to solve needs of regions poor in noble materials, the valorization of local materials seems to be the most adequate solution to deal with the abusive consumptions of the most used materials.

Our study aims to correct the composition of the dune sand of Hassi Berkine and to treat it with different types of black binders in order to validate its use as a layer of the Sahara roadways having a traffic less than 1000 vehicles per day. Thus, several formulations of the sand asphalt have been elaborated with the incorporation of different percentages of corrective sands or hydraulic binders.

The encouraging results obtained with certain formulations allow to confirm the possibility, when the traffic is weak, to use the sand asphalt as a basis material for the execution of layers of pavement rolling.