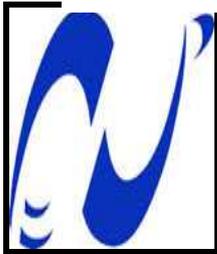


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Département Génie Civil
Laboratoire Construction et Environnement

THESE DE DOCTORAT D'ETAT EN GENIE CIVIL

Présentée par :
Mme KETTAB Ratiba née MITICHE
Magister en Génie Civil

Contribution à la valorisation du sable de dunes

Soutenue publiquement le 10/02/2007 devant le jury :

<u>Président :</u>	Pr. MT. ABADLIA	Professeur Université de Boumerdés
<u>Directeurs de la thèse :</u>	Pr. A. BALI	Professeur ENP d'Alger
	Pr. J.M. FLEUREAU	Professeur ECParis
<u>Examineurs :</u>	Pr. A. ALLICHE	Professeur université de Paris VI
	Pr. L. AZZOUZ	Professeur Université de Laghouat
	Pr. A. BENAÏSSA	Maître de Conférence à L'USTOran
<u>Invité:</u>	Mr. M. SOUILEM	Directeur LCTP Alger

Année Universitaire 2006/2007

REMERCIEMENTS

Les travaux qui font l'objet de cette étude ont été réalisés aux laboratoires :

- Construction et Environnement de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger (LCE ENP);
- Mécanique des Sols, Structures et Matériaux de l'Ecole Centrale Paris (MSSMat ECP).
- Central des Travaux Publics (LCTP)
- Contrôle Technique des Travaux Publics (CTTP) et au laboratoire
- De la Société Nationale des Travaux Routiers (SONATRO)

Que toutes les équipes travaillant dans ces laboratoires trouvent l'expression de ma gratitude.

Aucun mot, aucune expression ne suffiront pour traduire mon immense gratitude à mon Directeur de thèse Professeur **A. BALI** pour son aide, ses conseils et sa disponibilité à la réalisation de ce travail et à mon Co-Directeur de thèse le Professeur **J.M. FLEUREAU**, pour l'accueil qu'il m'a réservé dans son équipe durant mes stages de courte durée, ses conseils. Qu'ils veuillent accepter mes remerciements les plus sincères.

Je tiens à remercier :

Monsieur **M.T. ABADLIA**, Professeur à l'université de Boumerdés, de m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du Jury.

Monsieur **A. ALLICHE**, Professeur à l'Université Paris VI pour son aide précieuse et d'avoir accepté d'examiner cette thèse et de faire partie du jury.

Monsieur **L. AZZOUZ**, Professeur à l'Université de Laghouat, qui a accepté d'examiner cette thèse et de faire partie du jury.

Monsieur **A. BENAÏSSA**, Maître de Conférence à l'Université des sciences et de la technologie d'Oran, qui a accepté d'examiner cette thèse et de faire partie du Jury.

Monsieur **M. SOULEM**, Directeur du LCTP, d'avoir accepté d'être membre invité du jury.

La réalisation de cette thèse de Doctorat d'Etat a été faite avec la collaboration de nombreuses personnes. Qu'il me soit également permis d'exprimer mes sincères remerciements à :

Madame **OUGHANEM** du CTTP, Monsieur **BOUKERROU** de l'ELIROA, Monsieur **BEDRICI** de la SONATRO, Monsieur **BENSAÏBI** du LCTP pour leur collaboration et leur aide.

Professeur **BIAREZ** (que Dieu ait son âme), Professeur **FAVRE**, Professeur **MODARESSI**, pour les séances de travail qu'ils m'ont accordées et leur aide précieuse du

laboratoire MSSMAT, Monsieur **S. PAGNAT** responsable des équipements à l'ECP, pour son accueil et son aide.

Mes ami(e)s et collègues : Mme M. Morsli, Melle S. Benmamar, Mme D. HARIK, Mme F. Debbiche, Mr R. Boutemeur.

Je profite aussi de cette occasion solennelle pour adresser mes chaleureux remerciements à mon mari Mr A. Kettab professeur à l'ENP chef du laboratoire LRSEAU qui m'a soutenu tout au long de ces 25 dernières années, mes chers enfants Nadia, Med Amine, Nassim et Fadéla et toute ma famille en particulier mes chers parents qui m'ont toujours encouragé et soutenu.

ملخص :

جعل نقصان الحصى الأصلية ذات النوعية الجيدة في بعض مناطق العالم، أصحاب القرار والباحثين يفكرون في تعويضها بمواد محلية، بهذا تظهر أهمية تامين رمال الكثبان في البناءات كما في إنشاء مختلف طبقات الطرق.

تعتبر رمال الكثبان كمادة ذات نوعية سيئة (غير قابلة للترسيب، قدرة حمل ضعيفة، نسبة الفراغات كبيرة، خاصية الحبيبية غير المستمرة)، استعمالها لوحدها مع روابط هيدروكربونية (الزفت الصفر، المميع، كوت باك) أو روابط هيدروليكية (الإسمنت)، يعطي خواص ميكانيكية ناقصة (إستقرارية، التريصيص، مقاومة الضغط ومقاومة الشد). تصبح إذن معالجتها ضرورية من أجل تحسين خواصها الميكانيكية وإعطائها إستقرارية مرضية.

تسمح لنا النتائج التجريبية باقتراح عدة صيغ نظرية. فيما يخص حبيبات الرمل المغلفة على الساخن أو على البارد بروابط هيدروكربونية، نوعان من الإضافات كانا محل دراستنا: حبيبية (رمل مطحون، رمل كلسي، رمل غرانيتي، دقائق كلسية وجبسية)، كيميائية (الجير، الإسمنت، الجبس، حث مطحون). يجب إعطاء انتباه خاص بالإضافة إلى نسبة الزفت، إلى رتبة الزفت (تجنب الزفت ذو إختراقية عالية جدا: ظهور آثار عميقة في الطريق، أو إختراقية ضعيفة: شيخوخة، صلابة، إعياء). يظهر لنا من المناسب التوجه إلى صيغ ثنائية (إضافة حبيبية وكيميائية)، من أجل تطبيقها العملي، يجب أن يحظى التريصيص بانتباه خاص.

الخواص الميكانيكية المتحصل عليها، كما في خرسانات الحشو (الإضافة: رمل المحجرات، حصيات) وفي خرسانات الطرقات (حث مطحون، filler calcaire) كافية لتأكيد المنافسة التقنية للحل المقترح «خرسانة رمل الكثبان». يحتمل استعمال غبرة المطاط في الخرسانة في أدوار عدا تحسين الخاصية الميكانيكية (مقاومة الصدم، مقاومة المواد ذات النشاط الإشعاعي، عدم النفاذية). كما أنه يمكن استعمال خرسانة الرمل في الطرقات في الطبقة القاعدية.

Résumé

La pénurie en granulats nobles autochtones dans certaines régions du monde a incité les décideurs et chercheurs à réfléchir à des matériaux de substitution locaux, d'où l'intérêt de la valorisation du sable de dunes aussi bien en structures que pour la réalisation des différentes couches de chaussées. Les sables de dunes sont considérés comme des matériaux de qualité médiocre (non compactables, de faible portance, de pourcentage de vides élevé, de granulométrie homométrique...). Utilisés seuls avec des liants hydrocarbonés (bitumes purs, fluidifiés, Cut back) ou hydrauliques (ciment), ils donnent des performances mécaniques (stabilités, compacité, résistances à la compression et à la traction) insuffisantes. Leur traitement devient par conséquent indispensable afin de les améliorer en leur conférant des caractéristiques mécaniques et de stabilité satisfaisantes.

Les résultats expérimentaux nous permettent de proposer différentes formulations.

Concernant le sable enrobé à chaud et à froid aux liants hydrocarbonés, deux types d'ajout ont fait l'objet de notre travail : granulaire (sable concassé, sable gypseux, arène granitique, fines calcaires et gypseuses), chimique (chaux, ciment, plâtre, et laitier broyé). Une attention particulière doit être prêtée, en plus de la teneur en bitume, au choix de la classe du bitume (éviter les bitumes de pénétration très importante: risques d'orniérage, ou faible pénétration : vieillissement, rigidité et fatigue). Il nous paraît souhaitable de s'orienter vers des formules binaires (ajout granulaire et chimique). Pour sa mise en œuvre, une attention particulière doit être apportée au compactage.

Les performances mécaniques obtenues aussi bien pour les bétons de remplissage (ajout : sable de carrière, gravillons) que pour les bétons routiers (filler calcaire, laitier broyé) sont largement suffisantes pour confirmer la compétitivité technique de la solution « béton de sable de dunes ».

Une éventuelle utilisation de la poudre de caoutchouc dans un béton devant remplir autre rôle que la performance mécanique aurait un sens (résistance au choc, aux actions chimiques, aux produits radioactifs, imperméabilité...).

Le béton de sable routier quant à lui pourrait être utilisé en couche de fondation.

Abstract

The aggregate shortage in certain areas of the world encouraged the decision makers and researchers to think of local materials of substitution, Thus a great interest for the valorization of dune sand has arisen for structures as well as for the realization of the various layers of roadways.

Dune sands are regarded as materials of poor quality (non compactable, of weak bearing capacity, high percentage of voids, gap grading...). Used alone with bitumen binders (pure bitumens, fluidified, *Cut back*) or hydraulic (cement), they give insufficient mechanical performances (stabilities, compactness, compressive and tensile strengths). Their treatment becomes consequently essential in order to be improved and have adequate mechanical characteristics and satisfactory stability.

The experimental results enable us to propose various formulations.

Concerning the hot or cold asphalt coated sand with bitumen binders, two types of additions have been the subject of our investigation: -granular type (crushed sand, gypseous sand, granitic arena, limestone and gypseous fines), - chemical type (lime, cement, plaster, and ground slag). In addition to the bitumen content, a particular attention should be given to the choice of the class of the bitumen, it is recommended to avoid bitumens either of very significant penetration because of :risks of rutting, or of weak penetration which may cause ageing, rigidity and fatigue). It is thus interesting to use binary formulas (granular and chemical addition). For its placing, it is important to take into account particularly the compaction.

Mechanical performances obtained as well for filling concretes made of pit sand and fine gravels, as for road concretes containing (calcareous filler and ground slag) are largely sufficient to confirm the technical competitiveness of the solution based on dune sand concrete.

A possible use of the rubber fine powder in a concrete having to fill another role than the mechanical performance would be interesting in a sense that other properties would be improved such as resistances to impact, to the chemical actions, to the radioactive products, and impermeability....

On the other hand sand concrete could be used in sub-base in road construction.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique sur l'utilisation du sable de dunes	
I.1. Utilisation du sable de dunes en géotechnique routière.	5
I.2. Technique routière saharienne	5
1.2.1. Genèse de la technique routière saharienne.	5
1.2.2. Rappel des réalisations	7
1.2.3. Données de base et particularité saharienne	9
1.2.4. Principes de la technique	11
I.3. Béton de sable	13
Chapitre II : Les sables	
II.1. Définition	15
II.2. Origine des sables	15
II.3. Différents types de sable	16
II.3.1. Les sables issus d'une chaîne d'élaboration: sables artificiels	16
II.3.2. Les sables naturels	16
II.3.3. Sables du Sahara.	17
II.4. Classification des sables	18
II.4.1. Classification selon la granulométrie	18
II.4.2. Classification selon la propreté	20
II.5. Propriétés mécaniques des sables	20
II.6. Foisonnement des sables	20
II.7. Critères d'acceptabilité des sables pour leur emploi en construction	21
II.7.1. La granulométrie	21
II.7.2. Le module de finesse	21
II.7.3. La propreté	21
II.7.4. La dureté	21
II.7.5. L'angularité	22
II.7.6. La forme	22
II.7.7. L'aspect de surface	22
II.7.8. L'analyse chimique	22

II.8. Propriétés des sables de dune	23
II.8.1. Composition granulométrique	23
II.8.2. Composition minéralogique	23
II.8.3. Caractéristiques physiques	24
II.8.4. Composition chimique	24
II.8.5. Conclusion	24
II.9. Approvisionnement et stockage du sable	25
Chapitre III : Traitement des sables	
III.1. Introduction	26
III.2. Traitement des sables	26
III.3. Traitement des sables aux liants hydrocarbonés	27
III.3.1. Sable bitume en technique routière	27
III.3.2. Les sables traités à chaud au bitume pour couches de roulement	29
III.3.3. Les sables traités au bitume : enrobage à froid	37
III.3.4. Résultats obtenus sur certaines routes sahariennes de chaussées réalisées en sables bitume	39
III.4. Traitement des sables aux liants hydrauliques	44
III.4.1. Introduction	44
III.4.2. Historique du béton de sable	45
III.4.3. Caractéristiques générales des bétons de sable	46
III.4.4. Propriétés spécifiques des bétons de sable	47
Chapitre IV : Liants hydrocarbonés	
IV.1. Introduction	52
IV.2. Les bitumes	52
IV.2.1. Définition	52
IV.2.2. Emploi des bitumes	52
IV.2.3. Caractéristiques du bitume	53
IV.2.4. Principaux essais de laboratoire pour le contrôle des bitumes	54
IV.2.5. Les spécifications des BITUMES	58
IV.2.6. Critères de choix des classes de bitume en Algérie	58
IV.2.7. Marché du bitume en Algérie	59
IV. 3. Les cut backs	59
IV.3.1. Définition	59
IV.3.2. Domaine d'application des cut backs	60
IV.3.3. Avantages et inconvénients de l'utilisation des cut backs	60
IV.4. Les émulsions de bitume	61

IV.4.1. Définition	61
IV.4.2. Les essais sur émulsions	61
IV.4.3. Spécifications des émulsions de bitume	62
IV.4.4. Domaine d'application et principaux emplois des émulsions	62
IV.4.5. choix de la formulation	66
IV.4.6. Conditions d'émulsification	66
IV.4.7. Signification de la stabilité	66
IV.4.8. Adhésivité	66
IV.4.9. Viscosité	67
IV.4.10. Caractéristiques physico-chimiques	68
IV.4.11. Avantage économique	68
Chapitre V : Méthodes de formulation du sable enrobé	
V.1. Formulation d'un béton bitumineux.	69
V.1.1. Définition.	69
V.1.2. Classification générale des enrobés hydrocarbonés.	69
V.1.3. Utilisation des enrobés bitumineux en technique routière.	70
V.1.4. La formulation	71
V.2. Formulation du sable bitume	80
V.2.1. Définition	80
V.2.2. Détermination de la teneur en liant	80
V.2.3. Calcul de la compacité des éprouvettes	81
V.2.4. Notion de stabilité	82
V.2.5. Conclusion	82
V.3. Formulation d'un béton de sable	82
V.3.1. Description de quelques approches de la formulation du béton de sable	82
V.3.2. Méthode théorique pour la formulation des bétons de sable	85
V.3.3. Méthode expérimentale de formulation	88
Chapitre VI : Caractérisation des matériaux pour la formulation du sable enrobé	
VI.A. : Aux liants hydrocarbonés	93
VI.A.1. Définition	93
VI.A.2. Essais de laboratoire	93
VI.A.2.1. Identification des sables	93
VI.A.2.2. Identification des liants	93
VI.A.2.3. Essais mécaniques	93
VI.A.3. Présentation des matériaux utilisés	94

VI.A.3. 1. Les sables	94
VI.A.3. 2. Arène granitique	96
VI.A.3. 3. Les fines naturelles d'ajout	97
VI.A.3. 4. Les pulvérulents industriels	97
VI.A.3.5. Les liants	98
VI.B. : aux liants hydrauliques	100
VI.B. 1. Introduction	100
VI.B. 2. Caractéristiques des sables et gravillon	100
VI.B. 2. 1. Caractéristiques mécaniques et analyse chimique	100
VI.B. 2. 2. Conclusion	105
VI.B. 3. Les fines d'ajout	106
VI.B. 3.1. Définition	106
VI.B. 3.2. Les fines d'ajout utilisées	106
VI.B.4. L'eau	109
VI.B.5. L'adjuvant	109
VI.B.6. Le ciment	109
Chapitre VII : Caractérisations des bétons de sables de dunes	
VII.1. Introduction	111
VII.1.1. Formulation d'un béton de sable	111
VII.1.2. Formulation de base: 100% sable de dune	111
VII.2. Correcteur granulaire: Le sable de carrière	113
VII.2.1. Caractéristiques mécaniques	113
VII.2.2. Interprétation des résultats	114
VII.3. Matériaux correcteurs : le sable concassé et le gravillon	114
VII.3.1. Caractéristiques mécaniques	114
VII.3.2. Interprétation des résultats	115
VII.3.3 Choix de la composition optimale	116
VII.4 Béton de sable modifié à la poudrette de caoutchouc	116
VII.4.1. Introduction	116
VII.4.2. Étude des compositions témoins modifiées à la poudrette de caoutchouc	117
VII.4.3. lois de comportement	121
VII.5. Béton de sable pour chaussées aéronautiques	123
VII.5.1. Formulation du béton de sable	123
VII.5.2. Comportement du béton de sable de dunes modifié pour chaussées aéronautiques	126

VII.5.3. Conclusion	130
Chapitre VIII: Caractérisation des Sables bitumes	
VIII.1. Introduction	131
VIII.2. Programme expérimental	131
VIII.2.1. Etude de l'influence du liant et de sa teneur sur les performances mécaniques	131
VIII.2.2. Etude de l'influence d'un ajout granulaire sur les performances mécaniques	132
VIII.2.3. Etude de l'influence d'un ajout chimique sur les performances mécaniques	132
VIII.2.4. Etude de l'influence de la température sur les performances mécaniques	132
VIII.2.5. Etude de l'influence de l'énergie de compactage sur les performances mécaniques	132
VIII.2.6. Etude de l'influence de la température sur la résistance au fluage dynamique	132
VIII.2.7. Etude du comportement et de sa modélisation	133
VIII.3. Traitement des sables	133
VIII.3.1. Ajout granulaire	133
VIII.3.2. Ajout chimique	134
VIII.4. Bitumes purs : enrobage à chaud	136
VIII.4.1. 100% sable de dunes	136
VIII.4.2. Ajout granulaire	138
VIII.4.3. Ajout chimique	143
VIII.4.4. Conclusion de la première série d'essais	147
VIII.5. Traitement à froid : Cut back et émulsion de bitume	147
VIII.5.1. Ajout granulaire	148
VIII.5.2. Ajout chimique	153
VIII.5.3. Conclusion de la deuxième série d'essais	157
VIII.6. Essais complémentaires sur les formulations optimales	157
VIII.6.1. Choix des formulations optimales	157
VIII.6.2. Etude Duriez	162
VIII.6.3. Etude Marshall	166
VIII.6.4. Conclusion de la troisième série d'essais	167
VIII.7. Conclusion générale	167
VIII.8. Analyse de variance sur les matériaux routiers	170
VIII.9. Etude du comportement au fluage dynamique : hydro pulsateur	172
VIII.10. Essais de résistance à la traction indirecte et à la compression axiale	174

VIII.11. Modélisation du comportement de l'enrobé	176
VIII.11.1. Introduction	176
VIII.11.2. Essais de comportement effectués	177
VIII.11.3. Modélisation du comportement	178
Conclusion générale	182
Perspectives	185
Références bibliographiques	186
Annexes	192

LISTE DES FIGURES

Chapitre II

Figure II.1: Exemple de courbes granulométriques [Chauvin J.J, 1987] 19

Chapitre III

Figure III.1 : Fuseau granulométrique utilisé pour les micro enrobés 31

Figure III.2 : Fuseau granulométrique conseillé pour les micro-bétons 35

Figure III.3 : Fluage de dessiccation (BS-BO) 50

Chapitre IV

Figure IV.1 : Composition schématique d'un pétrole brut 52

Figure IV.2 : Les caractéristiques du bitume (adhésivité et cohésion) 53

Figure IV.3 : Contact granulat liant (à sec) 56

Figure IV.4 : Contact granulat liant (en présence d'eau) 56

Figure IV.5.a : Mouillage préférentiel par l'eau. 67

Figure IV.5.b : Mouillage préférentiel par le bitume 67

Chapitre V

Figure V.1 : Essai de compression simple du type LCPC 74

Figure V.2 : Essai Marshall. 76

Figure V.3 : Essai de fluage statique uniaxial 77

Figure V.4 : Contrainte appliquée et composantes de la déformation lors de l'essai de fluage statique (chargement et déchargement) 77

Figure V.5 : Variation de la résistance à la rupture en fonction du nombre de cycles 78

Figure V.6 : Essai et Courbe de fluage dynamique 79

Figure V.7 : Courbe contrainte déformation moyenne (Traction directe) 80

Figure V.8 : Courbe représentative de la variation du temps d'écoulement en fonction du rapport volumétrique F/S. 83

Figure V.9 : Effet de la nature et du dosage en fillers sur la résistance mécanique. Filler 2 plus fin que filler 1 84

Figure V.10 : Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines. [SABLOCRETE, 1994] 86

Figure V.11 : Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles de sable [SABLOCRETE, 1994] 87

Figure V.12 : Évolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition. [Sablocrète, 1994] 91

Figure V.13. Masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition. [Sablocrète, 1994] 91

Figure V.14. : Organigramme de la méthode théorique 92

Chapitre VI

Figure VI.1 : Analyse Infra Rouge du sable de dunes.	94
Figure VI.2 : Fuseau granulaire pour le mélange de sables de Biskra	95
Figure VI.3 : Fuseau granulaire pour le mélange de sables de Ouergla	95
Figure VI.4 : Composition granulométrique de l'arène granitique	97
Figure VI.5 : Analyse granulométrique du sable concassé	101
Figure VI.6 : Analyse granulométrique du gravillon	102
Figure VI.7 : Courbe granulométrique du sable de dunes de Hassi Berkine	103
Figure VI.8 : Courbe granulométrique du sable de dunes de Bechar	103
Figure VI.9 : Courbe sédimentométrique du filler calcaire	106
Figure VI.10 : Courbe sédimentométrique du laitier broyé	107
Figure VI.11 : Résultats Infra Rouge de la poudrette de caoutchouc	109

Chapitre VII

Figure VII.1 : Influence du dosage en sable concassé sur les résistances	113
Figure VII. 2 : Influence du dosage en sable concassé sur la compacité.	114
Figure VII. 3 : Influence du dosage en gravillon sur la compacité.	115
Figure VII.4 : Influence du dosage en gravillon sur les résistances.	115
Figure VII.5 : Influence du dosage en poudrette de caoutchouc sur la compacité (Béton de Sable de Dunes avec Poudrette de Caoutchouc BSD PC)	117
Figure VII.6 : Influence du dosage en poudrette de caoutchouc sur les résistances (BSD PC)	118
Figure VII.7 : Courbe de compacité en fonction de dosage en poudrette de caoutchouc (Béton de Sable de Dunes Chargé avec Poudrette de Caoutchouc BSDC PC)	119
Figure VII.8 : Courbe de maniabilité en fonction de dosage en poudrette de caoutchouc (BSDCPC)	119
Figure VII.9 : Courbe de résistances en fonction de dosage en poudrette de caoutchouc (BSDCPC)	120
Figure VII.10 : Relation Contraintes Déformations longitudinales pour les bétons de sables modifiés	121
Figure VII.11 : Relation Contraintes Déformations transversales pour les bétons de sables modifiés	122
Figure VII.12 : Relation résistance en compression rapport Filler/ciment béton de sable pour chaussées aéronautiques (Sable dunes 1 avec filler calcaire SD1, FC)	124
Figure VII.13 : Relation résistance en compression rapport Filler/ciment (SD2, FC)	125
Figure VII.14 : Relation résistance en compression rapport Filler/ciment (SD1, Laitier)	125
Figure VII.15 : Relation résistance en compression rapport Filler/ciment (SD2, L)	125
Figure.VII.16 : Relation contraintes déformations longitudinales	127

Figure VII.17: Courbe contraintes Déformations transversales.	127
Figure VII.18: Courbe déformations en volume contrainte appliquée.	128
Figure VII.19: Charge cyclique appliquée	128
Figure VII.20: Module de Young apparent en fonction du nombre de cycles	129
Figure VII.21: Coefficient de Poisson apparent en fonction du nombre de cycles.	129
Figure VII.22: Déformation en volume maximal en fonction du nombre de cycles	130
<u>Chapitre VIII</u>	
Figure VIII.1: Influence du bitume 40/50 sur les performances Hubbard Field.	137
Figure VIII.2: Influence du bitume 80/100 sur les performances Hubbard Field.	137
Figure VIII.3: Influence de l'ajout granulaire sur les stabilités Hubbard Field (bitume 40/50).	140
Figure VIII.4: Influence de l'ajout granulaire sur les stabilités Hubbard Field (bitume 80/100).	140
Figure VIII.5: Influence de l'ajout granulaire sur les compacités (bitume 40/50).	141
Figure VIII.6: Influence de l'ajout granulaire sur les compacités (bitume 80/100)	141
Figure VIII.7: Influence de l'ajout chimique sur les compacités (bitume 40/50).	143
Figure VIII.8: Influence de l'ajout chimique sur les compacités (bitume 80/100).	144
Figure VIII.9: Influence de l'ajout chimique sur les stabilités Hubbard Field (bitume 40/50).	144
Figure VIII.10: Influence de l'ajout chimique sur les stabilités Hubbard Field (bitume 80/100).	145
Figure VIII.11: Influence de l'ajout granulaire sur les compacités Hubbard Field (émulsion)	149
Figure VIII.12: Influence de l'ajout granulaire sur les stabilités H Field 60°C (émulsion)	149
Figure VIII.13: Influence de l'ajout granulaire sur les stabilités H Field (émulsion).	150
Figure VIII.14: Influence de l'ajout granulaire sur les stabilités H Field 18°C (Cut Back)	150
Figure VIII.15: Influence de l'ajout granulaire sur les stabilités H Field 60°C (Cut Back)	151
Figure VIII.16: Influence de l'ajout granulaire sur les compacités H Field (Cut Back)	151
Figure VIII.17: Influence de l'ajout chimique sur les stabilités H Field 18°C (émulsion)	154
Figure VIII.18: Influence de l'ajout chimique sur les stabilités H Field 60°C (émulsion)	154
Figure VIII.19: Influence de l'ajout chimique sur les compacités H Field (émulsion)	155
Figure VIII.20: Influence de l'ajout chimique sur les stabilités H Field 18°C (Cut Back)	155
Figure VIII.21: Influence de l'ajout chimique sur les stabilités H Field 60°C (Cut Back)	156

Liste des figures

Figure VIII.22: Influence du sable de concassage sur les stabilités H Field	158
Figure VIII.23: Influence du sable gypseux sur les stabilités H Field	159
Figure VIII.24: Influence de l'arène granitique sur les stabilités H Field	159
Figure VIII.25: Influence des fines calcaires sur les stabilités H Field	160
Figure VIII.26: Influence des fines gypseuses sur les stabilités H Field	160
Figure VIII.27: Influence de la chaux sur les stabilités H Field	161
Figure VIII.28: Influence du ciment sur les stabilités H Field	161
Figure VIII.29: Influence du laitier sur les stabilités H Field	162
Figure VIII.30: Influence du plâtre sur les stabilités H Field	1562
Figure VIII.31: Influence de la teneur en chaux sur les caractéristiques de fluage dynamique	172
Figure VIII.32: Influence de la teneur en sable concassé sur les caractéristiques de fluage	173
Figure VIII.33: Influence de la température sur les caractéristiques de fluage dynamique	173
Figure VIII.34 : Influence du sable de concassage sur les caractéristiques rhéologiques en traction.	174
Figure VIII.35 : Influence de la teneur en chaux sur les caractéristiques rhéologiques en traction.	174
Figure VIII.36 : Influence de la teneur en chaux sur le comportement en traction.	175
Figure VIII.37: Influence de la teneur en chaux sur le comportement en compression.	175
Figure VIII.38: Influence de la teneur en chaux sur les caractéristiques rhéologiques en compression.	176
Figure VIII.39: Courbes de calcul du module de déformation E_1	177
Figure VIII.40: Matériel utilisé dans l'essai de fluage statique	178
Figure VIII.41: Courbe du fluage statique (65% SD + 35% SC + bitume 40/50)	178
Figure VIII.42: Approximation de la branche linéaire de la courbe de fluage	179
Figure VIII.43: Modèle de Kelvin Voigt appliqué à notre sable bitume	179
Figure VIII.44: Détermination du coefficient E_e^0	180

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II

Tableau II.1 : classification des sables selon la granulométrie [Chauvin J.J, 1987]	19
Tableau II.2 : Catégories des sables	19
Tableau II. 3 : Compositions granulométriques des sables de dune	23
Tableau II.4 : Propriétés physiques des sables du Sud	24
Tableau II.5 : Compositions chimiques des sables du sud	24

Chapitre III

Tableau III.1 : Performances des micro enrobés	33
Tableau III. 2 : Performances des micro enrobés	35
Tableau III. 3 : Récapitulation des résultats obtenus sur la RN 3 Stil-Touggourt	41
Tableau III.4 : Récapitulation des résultats obtenus sur la RN 3 Stil- El Oued	43

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Pénétrabilités des différentes classes de bitume [Arrambide J., Duriez M., 1954,]	53
Tableau IV.2 : Spécifications des différentes classes de bitume [Arrambide J., Duriez M., 1962]	58
Tableau IV. 3 : Choix des classes de bitume selon le guide des renforcements	59
Tableau IV.4 : Constitution des cut backs selon le viscosimètre STV	59
Tableau IV.5 : Caractéristiques des cut backs courants à séchage moyen (MC)	60
Tableau IV.6 : Spécifications des émulsions anioniques	64
Tableau IV.7 : Spécifications des émulsions cationiques	65

Chapitre V

Tableau V.1 : Classification des enrobés hydrocarbonés [Arrambide et al, 1959].	70
Tableau V.2 : Fuseaux de spécification	72
Tableau V.3 : Courbes modèles retenues	72

Chapitre VI

Tableau VI.1 : Caractéristiques physico chimiques des sables.	94
Tableau VI.2 : Analyse chimique sommaire de l'arène granitique	96
Tableau VI.3 : Composition chimique du laitier broyé	98
Tableau VI.4 : Caractéristiques des bitumes 40/50 et 80/100	98
Tableau VI.5 : Caractéristiques du cut back 400/600	99
Tableau VI.6 : Caractéristiques de l'émulsion 60	99
Tableau VI.7 : Caractéristiques mécaniques et analyse chimique des différents constituants.	100
Tableau VI.8 : Comparaison entre les caractéristiques du sable de dune et celles du	102

sable de carrière

Tableau VI.9 : Compacité et porosité des sables utilisés.	104
Tableau.VI.10 : Les valeurs de ES et de Bleu des sables utilisés.	104
Tableau.VI.11 : Composition chimique du filler calcaire utilisé.	107
Tableau VI.12 : Composition chimique du laitier broyé.	108
Tableau VI.13 : analyse chimique du ciment	109
Tableau V.14 : analyse physico-mécanique du ciment	110

Chapitre VII

Tableau VII. 1 : Maniabilité en fonction du dosage en eau	112
Tableau VII. 2 : Composition et caractéristiques de la formulation de base	113
Tableau VII. 3 : Caractéristiques des compositions BSD PC	117
Tableau VII. 4 : Caractéristiques des compositions BSDC PC	119
Tableau VII. 5 : Modules d'élasticité des compositions BSDC PC et BSD PC :	123
Tableau VII. 6 : Coefficient de poisson des compositions BSDC PC et BSD PC :	123
Tableau VII. 7 : Compositions de base avec le sable de dunes.	124
Tableau VII. 8 : Performances obtenues avec les formulations de base.	124
Tableau VII.9 : Résistances à la compression et à la traction pour la formulation optimale.	126

Chapitre VIII

Tableau VIII.1 : Résultats de l'essai Duriez (bitume 40/50)	164
Tableau VIII.2 : Résultats de l'essai Duriez (cut back 400/600)	165
Tableau VIII.3 : Résultats de l'essai Marshall (bitume 40/50)	163
Tableau VIII.4 : Résultats de l'essai Marshall (cut back 400/600)	166
Tableau VIII.5 : Tableau de valeurs des données pour un bitume 40/50 (A):	170
Tableau VIII.6 : Valeurs des contributions	171
Tableau VIII.7 : Valeurs des coefficients	172
Tableau VIII.8 : Résultats de l'essai au NAT	177

INTRODUCTION GENERALE

Le Sahara représente plus de trois quarts de la superficie du territoire algérien.

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

Jusqu'à nos jours, les matériaux constituant les corps de chaussées et ceux utilisés pour la confection de bétons ont été limités à certains matériaux dits nobles (graves, roches concassées ...), tandis que les sables de dunes étaient toujours considérés comme des matériaux secondaires et de caractéristiques médiocres.

Il y a plusieurs raisons qui font que l'utilisation des sables est indispensable dont :

- Les immenses gisements qui se trouvent en de nombreuses régions où les autres matériaux dits nobles sont rares et s'épuisent de plus en plus ;
- Plusieurs régions sont pauvres en matériaux doués de caractéristiques qui répondent aux exigences de la technique actuelle, ce qui nécessite le transport des matériaux satisfaisants. En effet le transport des granulats pose un double problème : le coût de transport de grandes quantités et la dégradation du réseau routier ;
- L'insensibilité à l'eau pour les sables propres, et l'imperméabilité qui en fait un matériau drainant.

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'infrastructures 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 d'y développer le réseau routier particulièrement. 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 constructions.

La construction de routes au Sahara est caractérisée par :

- Les travaux de terrassement sont en général peu importants étant donnée la monotonie du relief ; 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 courant des vastes contrées du Nord du reg oriental ou dans la mesure du possible des sables alluvionnaires qui se trouvent sur les anciens lits d'oued.

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 de modernisation du réseau principal compte tenu des restrictions financières dues à la conjoncture économique actuelle.

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

Le Laboratoire Construction et Environnement de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger n'est pas resté en marge de cette préoccupation. Notre étude a pour objectifs la valorisation des matériaux locaux et leur traitement en vue de leur utilisation en constructions dans les régions riches en matériaux sableux et pauvres en matériaux nobles.

Les sables n'ont pas de caractéristiques mécaniques satisfaisantes aussi bien pour les structures que pour la réalisation des différentes couches de chaussées permettant ainsi de reprendre les différentes sollicitations. Ils sont pratiquement non compactables et leurs portances sont très faibles.

Même après compactage, les résistances mécaniques des sables restent faibles, ceci est du:

- Au pourcentage élevé des vides,
- A la finesse des grains de sable et
- Au manque de stabilité suite au manque de cohésion.

Le traitement des sables devient indispensable dans la plupart des structures, il a pour but d'améliorer leurs performances mécaniques en leur conférant des caractéristiques mécaniques et de stabilité suffisantes leur permettant de résister aux sollicitations imposées. Ils acquièrent par suite une certaine viscosité, rigidité, et imperméabilité.

La solution qui nous intéresse est le traitement des sables de dunes aux liants hydrocarbonés ou hydrauliques. Ces liants sont soit les bitumes et leurs dérivés soit le ciment.

Notre objectif, est de trouver une formule de béton de sable de dunes. Pour atteindre ce but, nous avons adopté une méthodologie pour la recherche de la formulation optimale, basée sur le critère de la résistance, de la maniabilité et de la compacité. Nous avons utilisé des sables de dunes de provenance différente que nous avons corrigés par du sable de carrière, des gravillons, de la poudrette de caoutchouc dans un premier temps et par deux fines d'addition distinguées par leur nature, le filler calcaire et le laitier broyé.

Le travail consiste en plus, dans le cadre du traitement aux liants hydrocarbonés, à étudier l'influence de plusieurs paramètres (pourcentage et type de liant, pourcentage et type d'ajout granulaire et chimique) sur les performances mécaniques du sable enrobé obtenu après malaxage des différents constituants du mélange.

Notre travail comprend deux parties principales, la partie théorique et la partie expérimentale qui s'articulent autour sept chapitres.

La première partie se compose de quatre chapitres:

Après une introduction générale

Le chapitre I est consacré à la synthèse sur l'état actuel de connaissance sur les sables (définition, origine, classifications, caractéristiques, utilisations...etc.).

Le chapitre II s'intéresse aux traitements des sables (aux liants hydrauliques et hydrocarbonés (synthèse sur l'état actuel de connaissance sur les bétons de sable, utilisations spécificités et principes de la technique routière saharienne, et résultats obtenus sur quelques éprouvettes carottées dans certains tronçons routiers réalisés dans le sud algérien).

Le Chapitre III définit les principaux liants hydrocarbonés (définition, emploi, essais de caractérisation, spécifications...).

Le Chapitre IV, présente les différentes approches et méthodes de formulation d'un sable enrobé (béton de sable, définitions relatives aux différents types d'enrobés à chaud et à froid et à leur formulation ainsi qu'à leurs avantages et leurs inconvénients d'utilisation).

La seconde partie (expérimentale) comporte trois chapitres:

Le Chapitre V s'intéresse à la caractérisation des matériaux entrant dans la formulation des sables enrobés (Identification des sables, des liants et des ajouts).

Le Chapitre VI intitulé Bétons de sables de dunes : Caractérisation et interprétations expose une méthodologie pour la recherche de compositions optimales qui comprend deux étapes : formulation sans ajouts (béton de sable témoin) et formulation avec ajouts. Pour Les formulations optimales donnant les meilleures performances des essais de comportement ont été faits et des caractéristiques rhéologiques déterminées.

Le Chapitre VII intitulé : Sables de dunes enrobés aux liants hydrocarbonés: Caractérisation et interprétations. Après présentation du programme expérimental, on donne les résultats de stabilité et de compacité Hubbard Field pour différents ajouts et différents modes d'enrobage ; pour les formulations optimales des essais complémentaires Marshall et Duriez ont été réalisés, une tentative de modélisation a été faite par des essais spécifiques.

Une conclusion générale a été faite et des recommandations sont données et qui nous semblent très utiles pour d'éventuelles futures recherches.

Le problème, qui se pose dans le cas de ces bétons est la grande porosité des sables et pour résoudre ce problème on doit soit :

- ❑ Comblent cette porosité par l'adjonction d'un filler dont la granulométrie se situe dans l'intervalle (0 – 80 μ m).
- ❑ Créer une granulométrie aussi étalée par l'apport d'autres matériaux en faible dosage

- Utiliser des compositions binaires (ajout de sable concassé et de gravillons pour le béton de sable, ajout de sable concassé et de chaux par exemple pour le sable bitume).

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur l'utilisation du sable de dunes

I.1. Utilisation du sable de dunes en géotechnique routière.

I.1.1. Introduction.

L'évolution du trafic routier et le grand développement qu'a connu l'industrie des véhicules, ont contribué à une grande innovation dans la construction des chaussées, soit en terme de résistance soit en terme d'esthétique.

Ceci a donné naissance à plusieurs recherches dans le but de :

- Supporter le trafic croissant des véhicules par la réalisation des chaussées ;
- Renforcer les chaussées déjà conçues et en assurer un entretien permanent ;
- Améliorer les conditions de réalisation ;
- Améliorer l'aspect des revêtements ;
- Optimiser le coût de réalisation.
- Et d'employer des matériaux locaux dans le cas de pénurie.

Ces recherches contribuent aussi à spécifier une technique routière pour chaque milieu et spécialement le Sahara suivant la nature du sous-sol, du climat et des matériaux disponibles.

La construction routière en milieu désertique est devenue un besoin actuel, urgent et de plus en plus important. Les activités qui sont nées au Sahara, du fait de l'exploitation de l'homme et l'industrie pétrolière, sont accompagnées par une forte volonté de sédentarisation des populations. Il est nécessaire par conséquent de développer le réseau routier dans les régions sahariennes.

Cependant, le milieu saharien présente non seulement les conditions les plus défavorables au développement économique et humain, mais aussi des particularités techniques pour la conception et la réalisation des routes, d'où le besoin d'opter pour une technique routière saharienne plus développée.

I.2. Technique routière saharienne

1.2.5. Genèse de la technique routière saharienne.

La technique routière européenne avait été utilisée en ALGERIE jusqu'en 1950 environ. 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 commencées 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'argile.

Les différentes parties de chaussées étant à l'image d'Europe de bas en haut [FENZY E. (1966)]:

- Une couche de fondation dont l'épaisseur était fonction du sol sou-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. Les matériaux disponibles dans ces vastes zones sont de types restreints. 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 la 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 en paraissait donnée que par des matériaux insensibles à l'eau ne contenant pas d'argile et très peu d'éléments fins. Ce ne pouvait pas être des matériaux cohérents, il fallait en contrepartie exiger un angle de frottement très grand.

Les périodes humides étant courtes, il semblait bien que l'imbibition totale ne soit pas à craindre car trop improbable. La teneur en eau maximale qu'il paraissait raisonnable de considérer 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.

La technique des chaussées en gypse débuta par la mise en oeuvre artisanale d'un matériau local, utilisé déjà pour la construction.

1.2.6. Rappel des réalisations

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.

L'utilisation obligatoire des matériaux locaux dans les solutions de mise en oeuvre 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 [DOMEC M. (1980)].

Depuis les années 60, avec les conditions modernes de trafic élevé, lourds et rapide, on assiste à une généralisation des matériaux liés, tant dans le corps de la chaussée, qu'en surface. Il convient de noter que la technique routière devient de plus en plus complexe mettant en oeuvre des matériaux et des matériels de plus en plus performants.

La construction routière nécessite des quantités énormes de granulats. Le caractère assez restrictif des spécifications routières fait que seules certaines catégories de matériaux sont couramment utilisées : Ce sont essentiellement des alluvions et des matériaux provenant des roches massives. Les sables naturels, formations superficielles extrêmement répandues dans certaines régions, et les sables de concassage ont été trop longtemps considérés comme des matériaux de caractéristiques médiocres et d'importance secondaire en technique routière.

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 TOUGOURT à OUARGLA (160 km).
- Dans le cadre de la politique générale de développement de l'ALGÉRIE et en vue de prospection pétrolière, la transformation, de pénétration, en routes des trois axes nord-sud traditionnels a été engagée à cette 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 de SKIKDA à TOUGOURT (155 Km au Sahara) et son antenne EL-OUED (145 km) achevées 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).

La construction des routes au Sahara a commencé, industriellement, dans le courant 1955 - 1956, c'est à dire à l'époque de la découverte des premiers gisements pétroliers. Jusqu'à cette époque, il n'existait que deux antennes très sommaires, inadaptées au trafic lourd ou rapide, se terminant l'une à Noumérat, à proximité de Ghardaïa, et l'autre à Ouargla. (Elles durent être entièrement reconstruites ultérieurement).

Cette construction démarra sur une très grande échelle, dans le Nord du Sahara, afin de desservir au plus vite les centres pétroliers et les grandes villes du Nord. En trois ans, de fin 1956 à fin 1959, furent construits : Noumerate-El Goléa, Ghardaïa-Ouargla, Ouargla-Fort Lallemand, Ghardaïa-Tilrempt, Stile-Touggourt, Square Bresson, Fort-Lallemand-Hassi Tartrat et, dans la Wilaya de la Saoura, Ain Sefra-Bechar, soit au total environ 1000 km dans la Wilaya des Oasis et 270Km dans celle de la Saoura.

De 1960 à 1962, fut achevée la desserte du centre pétrolier d'In-Amenas depuis Hassi Tartrat, soit 530 km, la modernisation de Tilrempt Laghouat et Ouargla-Square Bresson, soit 800 km environ, et en Saoura, la liaison de Bechar à Beni Abbès, de 270 km. Parallèlement, démarrait la construction de routes secondaires, financées sur les budgets départementaux.

Les années 1963 et 1964 furent un peu plus calmes avec dans les Oasis l'achèvement de Touggourt-El Oued, le revêtement de Square Bresson-Hassi Rhenani, la construction de In-Amenas-Ghadamès et Hassi Messaoud-Rhourde El Baguel (au total 430 km) et en Saoura la continuation de la route en direction d'Adrar, de Beni-Abbès à Sba, sur environ 100 km.

L'année 1965 vit le démarrage de la construction de la route Abadla Tindouf, longue de 700 km, qui fut terminée en 1967, et suivie en 1968 de Sba-Timimoun El Goléa, longue de 450 km. La desserte d'Adrar fut terminée en 1966, de même que dans les Oasis, la route de 100 km reliant In Amenas à El Adeb-Larache.

Il faut ajouter aux chiffres précédents les routes départementales, revêtues en général sur une largeur de 4 m, dont la longueur totale atteint actuellement 450 km dans les Oasis et 100 km dans la Saoura.

On remarque donc que l'activité routière fut prépondérante dans les Oasis jusqu'en 1963, et qu'ensuite, après la période 1964-65, que nous pourrions qualifier de transitoire, cette activité se transféra presque entièrement en Saoura.

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.

La raréfaction des ressources en granulats dans certaines régions, le renchérissement des transports et la prise en compte des problèmes d'environnement ont incité maîtres d'ouvrages, maîtres d'ouvres, organismes techniques de l'Administration et entreprises à rechercher des remèdes, notamment en faisant appel aux techniques permettant de valoriser les matériaux disponibles localement. Dans ce contexte, il était alors aisé d'entrevoir l'intérêt tant

économique qu'écologique que pourrait présenter la valorisation des sables pour la réalisation des chaussées en sables bitumes dont le sable serait le matériau principal.

La technique de sable bitume en couche de roulement s'est imposée au cours des années 50. La pauvreté de certaines régions en granulats routiers a conduit depuis plusieurs années les ingénieurs à étudier la possibilité d'utilisation de matériaux locaux tels que le sable en technique routière, sans peine d'aller chercher très loin des granulats convenables, ce qui aurait une incidence non négligeable sur le coût de transport. Cette technique s'avère très intéressante pour des routes à faible ou moyen trafic.

Les sables bitumes ont regroupé des formules utilisant des sables d'origine diverse, de granularité variée et de performances sans doute très inégales. Leur emploi doit donc être limité actuellement aux couches de fondation, sauf pour les chaussées à faible trafic. Le domaine d'emploi des sables bitume est actuellement très restreint.

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, compte tenu du manque d'expérience, de spécifications précises sur ce produit. Il se caractérise par :

- Un pourcentage de vides après compactage assez élevé, qui laisse peser une incertitude sur sa stabilité à long terme ;
- La nécessité d'incorporer des fines d'apport lorsque les fines naturelles du sable n'atteignent pas un pourcentage de l'ordre de 5 % du mélange. La meilleure solution pour atteindre cet objectif consiste à incorporer au sable naturel un sable concassé ou broyé en raison de 10 à 15 % du mélange, qui apporte, outre les fines nécessaires, une certaine angularité et une correction granulométrique favorable à la stabilité ;
- Le choix d'un bitume dur (20/30) en raison de 3 % à 4 % qui reste essentiel pour l'obtention d'une rigidité et d'une stabilité mécanique convenable.

1.2.7. Données de base et particularité saharienne

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.

1.2.7.1. Données géographiques et économiques

Ce qui frappe en premier lieu au Sahara, c'est l'énormité des distances : In Amenas, centre de gravité des gisements pétrolifères, du Sud-est saharien, est à 1600 km d'Alger et à 1200 km de la limite Nord du Sahara. A ces distances, il faut ajouter 600 km pour Djanet. L'oasis de Tamanrasset, capitale du Hoggar et haut lieu touristique, est à 2000 km d'Alger et à 1600 km de la limite Nord du Sahara.

Le deuxième point à signaler, favorable pour la tenue des chaussées mais défavorable pour la rentabilité des investissements est la faible intensité du trafic, qui ne dépasse guère 300 véhicules / jour, dont la moitié de poids lourds, sur les tronçons les plus circulés. Ces chiffres font sourire lorsqu'on pense à ceux du Nord de l'Algérie ou d'Europe. Il faut dire que les

ponds lourds sont réellement très lourds, beaucoup atteignant la limite de 13 T/ essieu, et qu'ils vont à très grande vitesse.

Les liaisons routières représentent donc des investissements très importants, en raison de leur longueur et il est encore plus nécessaire qu'ailleurs de trouver des solutions économiques. On est donc amené à prendre des marges de sécurité plus faibles et à construire des routes au moindre coût.

1.2.7.2. Données techniques

La première caractéristique du Sahara est la sécheresse, mis à part une bande de 100 Km de large environ le long de l'Atlas saharien, la moyenne des précipitations annuelles est inférieure à 50 mm. Elle diminue du Nord vers le sud.

Cette sécheresse est favorable pour la construction des routes car, sauf en quelques rares points tels que chotts ou oasis, les sols ne sont jamais imbibés.

La plupart des sols conservent donc une portance suffisante, ce qui permet de faire jouer aux terrassements le rôle de fondation et est possible d'employer pour les couches de base des matériaux absolument inutilisables en pays tempérés. (En dehors des bas fonds, la teneur en eau des sols est de l'ordre de 1 à 2 %, elle peut atteindre 4 à 10 %, suivant les cas, après une pluie), mais il pleut quelque fois et violemment : Les pentes transversales restent donc nécessaires, car certains revêtements ne sont pas absolument étanches et certaines couches de base ne résisteraient pas à une imbibition, même de courte durée. Les fossés, dans les sections en délais ou en profil mixte, restent nécessaires et utiles, bien qu'ils soient rapidement comblés par le sable éolien et les passages d'oueds, s'ils ne sont pas traités correctement, réservent parfois des surprises désagréables.

La deuxième caractéristique qui vient à l'esprit et qui frappe le visiteur est **l'extrême monotonie des paysages**, monotonie qui se retrouve en dessous du point de vue géologique. On trouve certes, de l'Atlas au socle cristallin du Hoggar, toute la série des roches sédimentaires habituelles, mais à l'échelle de la dizaine, voire même de la centaine de km, le terrain, sauf exception, varie peu. Il en résulte que d'immenses régions sont dépourvues de matériaux routiers classiques et qu'étant donné l'impossibilité pour des raisons économiques évidentes, d'en faire venir de très loin, on est bien obligé de se contenter de ce que l'on trouve sur place, en essayant de choisir le moins mauvais et de l'utiliser au mieux.

De cette monotonie résulte la forme et le tracé des routes. Le Sahara est constitué de vastes pénélaines où les caractéristiques géométriques peuvent être, sans augmentation de dépenses, très confortables et la circulation très rapide, séparées par des marches parfois très hautes(jusqu'à 150 m de dénivellation) qui nécessitent des terrassements importants, et souvent une réduction des caractéristiques géométriques, d'où création de points singuliers, de part et d'autre des quels il faut aménager des zones de transition à caractéristiques progressivement croissantes.

1.2.3.3. Le trafic

Le trafic saharien est essentiellement composé de camions gros porteurs souvent en surcharge. 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 désordre, des déformations élastiques très élevées. Les déflexions sous les pneus peuvent être grandes mais

doivent être entièrement réversibles et ne doivent pas laisser de trace de déformation permanente. 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.

1.2.3.4. 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.

En effet, l'imbibition n'est pas à craindre, à la seule condition que la forme de la surface permette 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. raines.

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

1.2.3.5. La température

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 un effet sur l'Etat et le comportement des chaussées, qui sont :

- 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 provoquant surtout des ressurgences 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 ; cela soumet la couche de surface d'une chaussée à une agression thermique contraignante influençant sur le comportement des couches de roulement bitumineuses.

1.2.4. Principes de la technique.

Les conséquences pratiques des idées générales ci-dessous sont :

- La couche de roulement cohérente qui est 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 l'enduit superficiel ;

- En effet, ces revêtements doivent avoir l'épaisseur minimale suffisante pour résister aux efforts tangentiels importants appliqués par des essieux lourdement chargés ;
- Le matériau de la couche de base doit pouvoir supporter des déformations élastiques sans dommage, qui peuvent être relativement importantes à la seule condition qu'elles soient entièrement réversibles (comme dans toutes les 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 ;
- La sécheresse ouvre beaucoup l'éventail des matériaux utilisables notamment en couche de base.
- 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 déformation permanente. Le sol de fondation étant généralement sec, sa portance est en général bonne ;

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.

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.

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 :

- Le trafic même, essentiellement lourd et assez faible par rapport aux routes du nord ;
- 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

1.3. Béton de sable

Le matériau dénommé récemment béton de sable était connu bien avant le 19^e siècle. Il trouve ces origines depuis les ciments et bétons de Rome.

Il y a plus de deux mille ans, les romains utilisaient comme liant la chaux vive obtenue par le chauffage du calcaire. Ils employèrent cette chaux mélangée à du sable après avoir constaté que lorsque ce sable était d'origine volcanique, ils obtenaient un produit très résistant, durable et capable de faire prise avec l'eau. De grands monuments tels le « Panthéon », le « Colisée » et le « ponts du gard » témoignent de la durabilité du premier matériau composite de l'histoire des techniques industrielles.

le professeur académicien REHBINDER, comme base de ses propres recherches sur le béton de sable, conclut que le broyage du mélange sable-clinker libérait des surfaces physico chimiquement actives tant qu'elles sont fraîches, sur lesquelles se fixe le liant.

En union soviétique, le béton de sable est une technique connue depuis très longtemps. A l'origine, son développement tient à l'absence de granulats dans de nombreuses régions de ce pays, mais à l'heure actuelle, il est même préféré au béton traditionnel dans certains emplois; en particulier, les travaux de réhabilitation par projection (ponts, bâtiments, silos, égouts, etc.).

En 1918, le comte de NICOLAS de ROCHEFORT publie (en russe) un ouvrage de génie civil où il décrit la technique du béton de sable. Il signale dans son ouvrage que, si l'on broyait en même temps clinker et sable dans un rapport de un pour un, on obtient un produit qui, mélangé au sable naturel dans un rapport de un pour trois, conduit aux mêmes résistances qu'un mélange 1/3 de clinker broyé seul et de sable. C'est-à-dire que l'on double les performances du ciment.

La technique du béton de sable fut connue en URSS, comme en Europe occidentale vers les années vingt, elle va devenir d'actualité au cours de la deuxième guerre mondiale. A la fin de la guerre, les Soviétiques construisent des pistes aéronautiques en béton de sable, en particulier, l'aérodrome militaire de PEVEC en Sibérie [CIM Béton, (1995)], Il semble que

cette technique soit tombée en sommeil en URSS, comme en Europe occidentale, vers les années 1920; elle va redevenir d'actualité au cours de la deuxième guerre mondiale.

Dans les années 1970, on constatait que les sables provenant du concassage des roches massives sont excédentaires, alors les extractions de granulats dans les lits des fleuves et des rivières compromettent les équilibres écologiques avec des conséquences irréversibles.

En France, ce n'est qu'à partir des années soixante-dix qu'un réel regain d'intérêt s'est manifesté en faveur du béton de sable, notamment dans le sud-ouest. Les premières applications ont été réalisées avec succès à partir des années quatre-vingt (**GUINEZ R., GLUAIS G. et DELUDE P.**, 1984), à l'initiative du laboratoire régional des ponts et chaussées de Bordeaux. Devant les succès de ces expériences, le projet Sablocrête a vu le jour en 1988.

En Algérie, avec l'intérêt que pourrait apporter ce matériau au pays, des initiatives du CNERIB et de l'école nationale polytechnique datent de 1988; elles n'ont pas été élaborées en un solide programme de travail comme c'est le cas du projet national SABLOCRETE en France. Mais promouvoir le développement de l'usage courant des bétons de sable nécessite de regrouper les initiatives et d'élaborer un solide programme de travail permettant d'enrichir les connaissances sur le matériau, son comportement et ses modes de mise en œuvre.

En Algérie, malgré l'abondance de sable de dunes dans le sud du pays, ce matériau reste inconnu. Une tentative du CNERIB en 1988 a été vite abandonnée, et elle reste sans suite. Le même sable (sable de dunes) a été utilisé au Golf d'Arabie pour la construction de murs de soutènement et pour la préfabrication des dalles et plancher.

Chapitre II : Les sables

II.1. Définition

On définit les sables comme étant la fraction des granulats pierreux dont les grains ont des dimensions comprises entre 80 µm et 05 mm; il s'agit d'une définition globale, dont les bornes varient d'une classification à une autre. Ce sont aussi les matériaux dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3mm et dont le passant à 80 microns n'excède pas 30% [**Chauvin**, 1987].

Dans le sens le plus courant, on entend par "sable" les éléments de dimensions 0 à 5 mm, non compris les fillers. A cette définition se rattachent les sables de concassage ; mais lorsqu'on dit sable, on pense essentiellement aux sables naturels abondants dans de nombreux pays et dont les réserves sont quasi inépuisables.

En fait, la définition granulométrique du sable est plus compliquée, elle varie suivant les époques et diffère suivant les pays et selon la destination.

II.2. Origine des sables

Les sables rencontrés sont le résultat d'une décomposition chimique ou d'une désintégration mécanique des roches [**Chauvin**, 1987] suivies par un processus de transport qui est à l'origine de leurs caractéristiques physico-chimiques;

Les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation. Il comporte, à des degrés divers, une décomposition sur place des différentes roches suivie d'un transport fluvial et parfois éolien. Les différents processus qui conduisent de la roche massive aux sables sont suffisamment agressifs vis-à-vis des minéraux pour que seul subsistent les plus résistants; c'est ainsi que 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. La fraction comprise entre 0,2mm et 0,5mm est le plus souvent constituée de quartz à plus de 75%.

Selon l'importance et la nature de leur transport, ces grains de sable peuvent présenter un aspect différent [**Chauvin**, 1987]:

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

A côté du quartz, on trouvera dans la fraction la plus grossière des débris de roche et de feldspath ; ce dernier est présent, en faible quantité, sous forme d'argile obtenue par destruction du réseau minéral par hydrolyse. En climat tropical, il est particulièrement caractérisé par une attaque chimique intense.

A cette composition classique des sables, peuvent s'ajouter des sulfates et des carbonates provenant de la cristallisation sous l'action de l'évaporation de sels en solution (en particulier dans les zones arides à faible pluviosité et forte évaporation).

Selon leur histoire géologique, les sables se distinguent les uns des autres par une multitude d'aspects: granulométrie, teneur, nature et caractéristiques des fines, composition chimique, pétrologique et minéralogique, forme des grains, dureté, présence de matières humiques...etc.

Tous ces aspects sont d'inégale importance dans l'optique d'un usage routier et les classifications fonctionnelles reprendront les aspects les plus utiles.

II.3. Différents types de sable

Les sables se différencient par un grand nombre de paramètres et on distingue deux types de sables : les sables naturels et ceux issus d'une chaîne d'élaboration.

II.3.1. Les sables issus d'une chaîne d'élaboration: sables artificiels

Ce sont des matériaux produits dans une chaîne d'élaboration de granulats, et qui peuvent se trouver en excédent pour la production recherchée (gravier ou gravillon), ils peuvent être soit:

- Des sables roulés de dessablage qui résultent du criblage primaire d'un tout-venant ou bien.
- Des sables de concassage qui sont très souvent l'excédent de la production d'une carrière ou d'une ballastière. .

Les sables concassés sont de plus en plus utilisés en technique routière.

NB : D'autres produits industriels ne répondant pas exactement à ces définitions ont des caractéristiques permettant de les assimiler à ces sables (cendres volantes silico-alumineuses); leurs méthodologies d'étude et d'utilisation sont comparables.

II.3.2. Les sables naturels

Ce sont des matériaux qui existent, dans certaines régions, en abondance dans la nature. Ils sont le résultat d'un processus complexe d'érosion et de sédimentation. Leur formation s'effectue en trois étapes successives : la décomposition sur place des différentes roches suivie d'un transport qui les amène à un dépôt où ils demeurent sous différentes formes. Les plus rencontrés et les plus connus sont :

II.3.2.1. Les sables marins

Les éléments de petite taille, peu affectés par l'action fluviatile, parviennent à la mer et s'y trouvent au fond. Ils sont mélangés à d'autres éléments provenant de l'action d'arrachement de la mer aux côtes et finissent par se déposer après avoir subi un long frottement. Les sables marins se caractérisent par leur petite taille de forme anguleuse.

II.3.2.2. Les sables marins littoraux

On trouve ces sables dans les régions littorales. Ils se caractérisent par une granulométrie uniforme, des grains fins qui peuvent contenir de grandes quantités de minéraux rares; ils peuvent aussi avoir de fortes teneurs en calcaire ou en être complètement privés.

II.3.2.3. Les sables fluviatiles

On les trouve dans les fleuves et les rivières et éventuellement sur leurs côtes; ce sont des restes d'altération transportés par ces cours d'eau et déposés avant d'atteindre la mer.

En raison de la courte distance de transport, les grains de ces sables sont plus grossiers, mal concassés et présentent une forme anguleuse et un aspect très rugueux.

II.3.2.4. Les sables éoliens

Ils sont constitués de grain de sable d'origine quelconque et se trouvent dans plusieurs régions du désert sous forme de dunes, qui occupent des vastes surfaces (exemple de sud algérien). Leur origine est très différente, ils sont pris et déposés par le vent. Ils se caractérisent par une granulométrie uniforme de taille moyenne (autour de 5mm), de grains arrondis et dépolis à cause de nombreux chocs entre eux. La vitesse du vent, son pouvoir portant ainsi que les distances de transport sont les seuls facteurs qui déterminent la taille des grains.

II.3.3. Sables du Sahara

Le sable est l'un des matériaux les plus abondants au Sahara et parfois le seul dans de vastes zones. Les différents types de sables sahariens sont [Ben Dhia, 1998 et Domec, 1980]:

II.3.3.1. Dépôt alluvionnaire

Les sables de rivière rencontrés se trouvent soit dans des 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 %). On l'utilise pour la couche de fondation et la 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 grossiers ou sable enrobé à chaud).

II.3.3.2. Sables éoliens

Les dunes sont constituées de sable plus ou moins fin, à granulométrie serrée ou très serrée.

II.3.3.3. Sables de regs

Le reg est une formation de surface qui recouvre de vastes zones plates ou à relief très mou. 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.

II.3.3.4. Sables géologiques en place

On peut ranger sous cette dénomination des formations continentales de sols fins, tels 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).

II.3.3.5. Sables gypseux

Nous rangeons dans une catégorie spéciale et en raison de leur large utilisation routière, des sables contenant des proportions variables de gypse et étant soit des sables géologiques en

place, soit des dépôts alluvionnaires.

II.3.3.6. Sables gypso-calcaires

Dans les plateaux entre Ouargla et Hassi Messaoud, 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 n'ont pas été utilisés seuls jusqu'ici.

II.4 Classification des sables

L'intérêt de la classification est de regrouper en familles les matériaux qui présentent des points communs soit dès leur genèse, soit dans leur comportement lié à un usage précis.

Il est utile de classer les sables, afin de pouvoir préciser à priori et pour un sable donné, les divers procédés de traitement qui conviennent mieux à son utilisation dans un domaine et selon ses spécifications. 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 et 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 en couche de forme est basée sur la sensibilité à l'eau des matériaux, sur leur état naturel et sur la taille des gros éléments qui les constituent.

Les sables peuvent être classés à partir de plusieurs paramètres; une classification simplifiée a été retenue pour les sables traités, elle est essentiellement basée sur deux critères: granulométrie et propreté.

II.4.1. Classification selon la granulométrie

On distingue trois catégories de sable (Figure I.1 et Tableaux I-1 et I-2).

II.4.1.1. Sable grossier

Plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m sont compris entre 0,5 et 5mm. Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves.

II.4.1.2. Sable moyen

Moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m sont compris entre 0,2 et 2mm.

II.4.1.3. Sable fin

Plus de 75% des éléments supérieurs à 80 μ m, sont inférieurs à 0,5mm. Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.

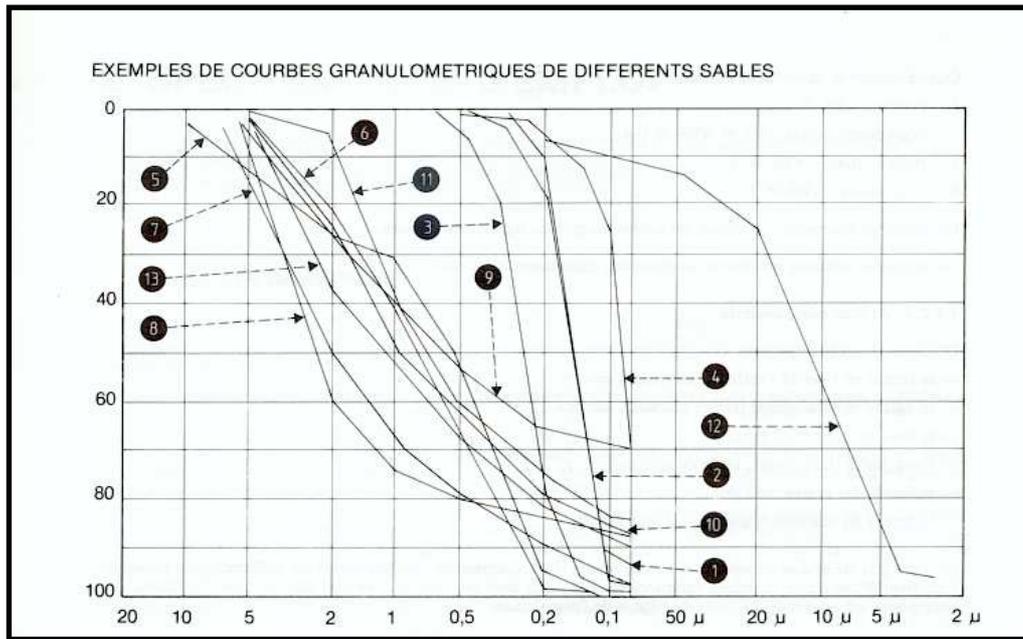


Figure II.1. Exemple de courbes granulométriques [Chauvin, 1987]

Tableau II-1 : Classification des sables selon la granulométrie [Chauvin, 1987]

		Nature et dimensions en mm	% Fines
Matériaux de base	1	Sable fin	0/0,3
	2	Sable fin	0/0,2
	3	Sable moyen	0/0,4
	4	Sable fin	0/0,2
	5	Sable de dessablage (grossier)	0/6
	6	Sable de dessablage (moyen)	0/4
	7	Sable de carrière (grossier)	0/5
Matériaux d'apport (correcteurs)	8	Sable riche en fines de carrière	0/5
	9	Sable riche en fines de carrière	0/5
	10	Sable riche en fines de carrière	0/4
	11	Sable riche en fines alluvionnaires	0/2
	12	Fines	0/0,3
	13	Sable riche en fines	0/4

Tableau II-2: Catégories des sables

Granulométrie	<2 mm	0,5 ÷ 5 mm	0,2 ÷ 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)	-

II.4.2. Classification selon la propreté

La propreté d'un sable est une caractéristique déterminante, elle est appréciée soit par l'essai d'équivalent de sable, soit par la valeur au bleu de méthylène. Afin de donner des limites pour chaque type de sable, le deuxième essai est plus précis, car il est réalisé sur la totalité du sable en écrétant toutefois le matériau à 6,3mm [**Chauvin**, 1987]. Le résultat obtenu doit être exprimé en gramme de bleu. Pour 100 grammes de sable, la valeur de bleu de méthylène est notée VBS.

Dans cette classification on distingue quatre catégories définies comme suit :

- $VBS \leq 0,2$: Sable propre.
- $0,2 \leq VBS \leq 0,5$: Sable légèrement pollué.
- $0,5 \leq VBS \leq 1$: Sable pollué.
- $VBS > 1$: Sable très pollué.

On peut également classer les sables selon d'autres critères; ces derniers font intervenir des paramètres ayant prouvé leur influence sur le comportement des mélanges à base de sable notamment les bétons de sable, on site alors :

- La teneur en fines.
- La nature minéralogique (sable calcaire, siliceux...).
- La teneur en matière organique et sa nature.

II.5. Propriétés mécaniques des sables

- Les sables constituent un matériau pulvérulent, c'est-à-dire sans cohésion propre du moins à l'état sec.
- Lorsqu'il est humidifié, il y apparaît trois phases : sable, air et eau.
- Les forces capillaires par mouillage des éléments solides au contact de l'élément liquide, et formation de ménisques à l'intérieur des capillaires, donnent un système cohérent, capable de supporter les efforts de cisaillement et de traction.
- Si le sable est gorgé d'eau, il n'y a plus que deux phases : sable et eau. On retrouve les propriétés des systèmes pulvérulents, résultant de la viscosité de l'eau qui d'ailleurs est relativement faible.

II.6. Foisonnement des sables

Dans le cas des mélanges nécessitant l'eau pour le malaxage ou l'hydratation, on doit tenir compte de la présence d'humidité dans les granulats. Pour une correction des proportions dans la composition finale, on doit soustraire de la masse d'eau ajoutée au mélange, la masse d'eau libre contenue dans les granulats ; la masse des granulats humides doit être augmentée de cette même quantité. Dans le cas des sables, on assiste à un second effet de présence d'humidité : le foisonnement; il s'agit de l'augmentation de volume d'une masse donnée de sable due à des films d'eau repoussant les particules des sables les unes des autres. Alors que le foisonnement en soi n'affecte pas les proportions massiques des matériaux dans le cas où ces proportions sont déterminées en volume, le foisonnement a pour effet qu'une plus petite masse de sable occupe le volume prévu.

II.7. Critères d'acceptabilité des sables pour leur emploi en construction

Le choix des matériaux de construction de base, tels que les sables qui rentrent dans la confection des mélanges composés, doit être dicté par un certain nombre de considérations afin d'atteindre les objectifs recherchés (résistance, durabilité,...). Selon le rôle du sable, ces considérations sont plus ou moins sévères.

II.7.1. La granulométrie

C'est la caractéristique la plus importante. Sa détermination est primordiale dans toute étude et quel que soit le domaine de la construction; c'est la caractéristique physique essentielle, puisque la notion de sable est basée sur le critère de taille des éléments. Toute étude de formulation cherche en premier lieu à augmenter la compacité.

NB : Les spécifications routières s'intéressent principalement à déterminer le fuseau granulométrique pour chaque emploi.

II.7.2. Le module de finesse

Le module de finesse est déduit de l'étude granulométrique du sable; il représente le centième de la somme des refus sur les différents tamis de la série exprimé en pourcentage pondéral. C'est un nombre, sensiblement égal à l'aire de la courbe de granulométrie en coordonnées semi-logarithmiques (les dimensions des tamis sont en progression géométrique).

II.7.3. La propreté

La propreté est définie comme étant l'absence d'éléments fins ayant un diamètre inférieur à 80 μ m (limons et argiles). Ces éléments se trouvent dans les sables naturels, soit de la présence originelle des matériaux argileux, soit suite à une contamination par les matériaux organiques d'origine végétale ou biologique.

Dans le cas d'un sable artificiel, les fines sont le résultat du concassage; le mode de concassage détermine le pourcentage de ces fines, alors que la nature des roches constitutives détermine leur caractère plus ou moins nocif. Cependant, la présence des éléments fins peut jouer un rôle positif ; les éléments fins remplissent les vides entre les granulats et augmentent de ce fait la compacité et par conséquent conduisent à un meilleur comportement du matériau; leur excès provoque une réduction de la perméabilité et une augmentation de la capillarité, c'est pourquoi les sables pollués présentent une sensibilité à l'eau, une difficulté de mise en place, une stabilité médiocre et une résistance mécanique faible.

Afin de donner une indication sur la présence des fines et leur pourcentage on se réfère à l'essai normalisé équivalent de sable.

II.7.4. La dureté

La résistance des matériaux de construction aux différents efforts destructifs est directement liée à la dureté.

La dureté du matériau lui procure une bonne résistance à la fragmentation, à l'attrition, à l'usure et au polissage sous des efforts statiques ou dynamiques.

Il est constaté que cette dureté est liée à la nature minéralogique du matériau; un sable d'origine calcaire est plus friable qu'un sable siliceux, les sables calcaires évoluent pendant le compactage ce qui entraîne la création d'éléments fins.

Notons aussi que les sables durs sont peu sensibles à l'eau, moins sensibles au gel ce qui est favorable à la résistance et à la durabilité du matériau. Afin d'apprécier cette dureté, on utilise l'essai de friabilité des sables.

II.7.5. L'angularité

Caractéristique importante pour la stabilité du matériau, elle confère au sable un angle de frottement interne plus élevé, capable de résister aux différents déplacements. Les sables artificiels de concassage présentent des formes plus anguleuses, et par suite leur stabilité est améliorée, mais leur inconvénient majeur est que leur compactage est difficile, la raison pour laquelle ces sables présentent des densités nettement plus faibles que celles des sables roulés d'une même granulométrie ; Ils sont par conséquent plus maniables.

Le pourcentage d'éléments concassés est un critère d'importance pour les couches de roulement où le problème de glissance se pose.

II.7.6. La forme

La longueur, la largeur et l'épaisseur du grain définissent sa bonne ou sa mauvaise forme. La forme des grains de sable est essentielle pour des propriétés telles que la compacité du mélange, l'angle de frottement interne, la maniabilité des mortiers, la résistance au broyage, à l'attrition ou à la fragmentation par écrasement. Cette forme bien que moins visible à l'œil nu, a autant d'importance pour les sables de béton soit hydraulique soit hydrocarboné. Ce sont les grains de sable naturel ayant subi une attrition leur donnant une forme arrondie, qui présentent la meilleure forme au point de vue de la régularité du volume occupé par un poids donné, de résistance à la fragmentation, de la meilleure maniabilité dans les mortiers de ciment et la moindre tendance de ces derniers à la fissuration.

La nature de la roche d'origine influe beaucoup sur la forme des grains pour un mode de concassage donné dans le cas des sables artificiels.

II.7.7. L'aspect de surface

Les grains à surface plus émoussée avec des arêtes vives sont plus favorables pour la stabilité du matériau, leur angle de frottement interne est élevé et l'adhésion du liant à de telles surfaces est meilleure.

Le mode de transport et la nature minéralogique des sables ont une influence sur l'aspect de surface des grains.

II.7.8. L'analyse chimique

Elle concerne la détermination des proportions de matières organiques (sulfates, sulfures, chlorures et d'autres éléments chimiques) contenues dans les sables étudiés. Ces éléments présentent au-delà d'un certain seuil un caractère nuisible pour les propriétés des bétons ainsi réalisés.

En plus de ces études effectuées sur les sables, d'autres paramètres physiques ne manquent pas d'importance et doivent être définis, car ils vont servir comme données de base à la formulation, en particulier la masse volumique et le poids spécifique.

II.8. Propriétés des sables de dune

Le sable dunaire est en abondance dans près de 60% de la superficie du territoire algérien. L'épaisseur moyenne de la couche sableuse est de 6m. Cette énorme quantité a amené les ingénieurs à s'interroger sur les propriétés physico-chimiques de ces sables afin de les valoriser et de les utiliser dans le domaine de la construction. Des études, de composition granulométrique, minéralogiques, chimiques et autres sur différents gisements ont été effectuées par des organismes tel que l'Unité de Recherche et d'Etude Géologique [U.R.E.G. Boumerdes ; **Domec**, 1980, et **Chemroukh**, 2000], dont les résultats ont permis de tirer les constatations suivantes :

II.8.1. Composition granulométrique

Les gisements sont constitués par la formation de sable éolien, sous forme de dunes, de couleur variable et finement grenu. Ces sables ont une granulométrie fine, avec quelques nuances non significatives (les plus gros grains n'atteignent pas 1mm de taille) [**Domec**, 1980].

Les compositions granulométriques représentées par le pourcentage des tamisats sont reportées dans le tableau I-3.

Tableau II-3: Compositions granulométriques des sables de dune

<i>tamis (mm)</i> %	5,0	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,125	0,08
El Golea	100	100	100	99,76	27,13	18,27	9,57	1,46
El Oued	100	100	100	99,46	91,42	65,59	9,12	0,65
Biskra	100	100	100	99,37	83,84	—	6,89	1,58
Hassi Bahbah	100	99,98	99,91	99,30	92,71	68,67	4,34	0,57
Ain Safra	100	99,99	99,97	99,95	95,86	54,23	2,72	0,01

II.8.2. Composition minéralogique

Des tests effectués sur la composition minéralogique des sables provenant des différentes régions ont permis de constater que:

- Le quartz forme plus de 85% du sable; les grains sont généralement arrondis et parfois anguleux.
- La calcite se manifeste par des grains de couleurs différentes variant autour de 5% ; ils ne dépassent en aucun cas les 10%.
- Le gypse se trouve sous forme de grains fins, de couleur blanchâtre avec des pourcentages ne dépassant pas les 2 à 3%.
- On peut également trouver dans certains gisements du feldspath, son pourcentage ne dépasse pas les 4%.

II.8.3. Caractéristiques physiques

On peut regrouper les propriétés moyennes des différents sables étudiés dans le tableau I-4 :

Tableau II-4: Propriétés physiques des sables du Sud

Région	Humidité naturelle en %	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)
El Golea	0,34	1590	2500
El Oued	2,60	1420	-
Biskra	1,40	1510	-
Hassi Bahbah	2,62	1550	-
Ain Safra	0,50	1485	2660

II.8.4. Composition chimique

Les sables de dune sont caractérisés par une teneur relativement importante de silice (SiO₂).

Les résultats des analyses chimiques sont regroupés dans le tableau I-5 :

Tableau II-5 : Compositions chimiques des sables du sud

Région	El Golea	El Oued	Biskra	Hassi Bahbah	Ain Safra
SiO ₂	94-88	86,85	67,90	94,50	96,86
Al ₂ O ₃	1,28	1,15	0,65	1,67	0,89
Fe ₂ O ₃	0,54	0,40	0,50	0,25	0,39
CaO	0,97	5,81	15,88	1,43	0,66
MgO	0,63	0,30	0,60	0,10	0,09
SO ₃	0,52	0,24	0,79	0,65	0,29
K ₂ O	0,25	0,37	0,16	0,22	0,32
Na ₂ O	0,14	0,08	0,09	0,23	0,02
TiO ₂	0,12	-	-	-	0,08
MnO	0,04	-	-	-	0,05
Cl	0,04	0,004	-	-	-
P-F	1,00	4,60	13,33	1,43	-

II.8.5. Conclusion

L'étude des caractéristiques des sables de dune du Sud Algérien a montré qu'ils possèdent, presque en totalité, les mêmes caractéristiques, à l'exception de ceux de la région de Biskra ; cette conclusion permet de généraliser toute étude à d'autres régions.

Les sables présentent des caractéristiques chimiques et physiques très favorables à l'utilisation en construction, telles que leur propreté (l'absence quasi-totale d'éléments argileux), et leur composition chimique siliceuse (présentant les meilleures performances mécaniques).

Cependant ils présentent un inconvénient majeur qui est le pourcentage de vides élevé engendrant une faible compacité du béton, et réduisant de ce fait les résistances.

II.9. Approvisionnement et stockage du sable

Les risques de ségrégation sont beaucoup plus limités pour les sables que pour les graves. En revanche, le problème de la teneur en eau est souvent important. Lorsque le sable est extrait dans l'eau, il nécessite un essorage avant emploi, il est donc indispensable de réaliser un drainage particulièrement efficace de l'aire de stockage. Ce drainage est tout aussi important pour les matériaux d'apport riches en fines qui peuvent présenter des écarts importants de teneur en eau.

Une protection efficace des stocks de sable contre les intempéries est souvent utile (bâchage ou voile d'émulsion) pour éviter les départs sous l'effet du vent des fines ainsi que l'apport d'eau.

- Les sables naturels sont souvent hétérogènes. Une étude préalable ou reconnaissance géologique et géotechnique devra être faite pour définir les risques d'hétérogénéité ; cette étude sera entreprise avant le démarrage de l'exploitation du gisement et avant l'étude de formulation en laboratoire. Elle permettra d'envisager selon les cas les différentes méthodes pour obtenir un matériau régulier ou des formulations différentes selon les qualités.
- Des techniques de pré homogénéisation pourront être définies: stockage préalable stratifié, gerbage, passage du sable sur sauterelle vibrante... ; des recompositions en centrale entre sables des différentes qualités seront éventuellement envisagées si une séparation nette entre les différentes qualités de sables est possible à l'extraction. Il est aussi important de vérifier l'absence de matières organiques qui sont souvent présentes en surface ainsi que la valeur de l'acidité naturelle.
- Les sables de carrières ou ballastières sont stockés d'une manière permettant leur protection contre l'humidité et la ségrégation exactement comme pour les graves.

Chapitre III : Traitement des sables

III.1 Introduction

Certaines régions du monde, les zones désertiques par exemple, manquent de granulats autochtones. Cette pénurie a incité les décideurs et chercheurs à réfléchir à des matériaux de substitution locaux, tel que le sable du désert, sans peine d'aller chercher très loin les matériaux convenables. Son utilisation en technique routière telle la technique du sable bitume en couche de roulement s'est imposée au cours des années 50 [Fenzy, 1966]; Elle a des incidences non négligeables du point de vue économique tels que les coûts du transport. Le recours à cette technique s'avère très intéressant pour les routes à faible ou moyen trafic.

III.2 Traitement des sables

Les sables n'ont pas de caractéristiques mécaniques satisfaisantes aussi bien pour les structures que pour la réalisation des différentes couches de chaussées permettant ainsi de reprendre les sollicitations dues à la circulation. Ils sont pratiquement non compactables et leurs portances sont très faibles [Chauvin, 1987].

Même après compactage, les résistances mécaniques des sables restent faibles, ceci est dû [Fenzy, 1966]:

- Au pourcentage élevé des vides (sable propre ou à granulométrie serrée) qui entraîne une grande déformabilité et laisse peser une incertitude sur sa stabilité à long terme.
- A la finesse des grains de sable qui forment un corps moins rigide, nécessitant l'ajout de grains à angularité en vue d'augmenter la cohésion entre ses grains. Il est nécessaire d'incorporer des fines d'apport lorsque les fines naturelles du sable n'atteignent pas un pourcentage de l'ordre de 5% du mélange. La meilleure solution pour atteindre cet objectif consiste à incorporer au sable naturel un sable concassé ou broyé en raison de 10 à 15% du mélange, qui apporte, outre les fines nécessaires, une certaine angularité et une correction granulométrique favorable à la stabilité.
- Au manque de stabilité suite au manque de cohésion.

Le traitement des sables devient indispensable dans la plupart des structures; il a pour but d'améliorer leurs performances mécaniques en leur conférant des caractéristiques mécaniques et de stabilité suffisantes leur permettant de résister aux sollicitations imposées.

La solution qui nous intéresse est le traitement des sables aux liants hydrocarbonés ou hydrauliques où les grains de sable seront enrobés par ces liants. Ils acquièrent par suite une certaine viscosité, rigidité, et imperméabilité. Ces liants sont soit les bitumes et leurs dérivés soit le ciment:

- Les bitumes purs,

- Les émulsions de bitume,
- Les bitumes fluidifiés (cut-back),
- Le bitume souffre,
- Eventuellement des bitumes modifiés (soit par polymère ou par injection d'un déchet pétrolier) et
- Le ciment (CPJ ou CPA).

III.3 Traitement des sables aux liants hydrocarbonés

Le traitement aux liants hydrocarbonés a pour objectif d'améliorer les performances mécaniques des sables enrobés, et d'augmenter leur compacité afin de les rendre aptes à l'utilisation routière.

Les gros granulats en raison de leur rigidité, stabilité et durabilité, satisfont mieux aux exigences routières [Arrambide et Duriez, 1954] ; ils sont par contre la partie la moins abondante dans la nature, au bord de l'épuisement et par conséquent la plus coûteuse.

Si on voit l'histoire de l'évolution des routes, on remarque le passage de l'usage des gros granulats aux plus fins. Les exigences du trafic dont la sévérité croît rapidement en poids et en densité, impliquent des traitements convenables ; les sables sont considérés comme des matériaux de qualité médiocre (manque de cohésion et de rigidité).

Le traitement des sables est fonction de plusieurs facteurs dont :

- La sévérité des conditions de service (un climat chaud exige un bitume dur),
- La fonction d'une couche traitée dans le corps de chaussée (la résistance aux efforts tangentiels pour les couches supérieures, la perméabilité pour la partie inférieure).

La stabilité du mélange sable - liant dépend du sable d'une part et du liant d'autre part ; plus forte est la contribution de l'un, moins on est exigeant sur l'autre.

La technique de traitement de sable aux liants hydrocarbonés se divise, comme pour les enrobés bitumineux, en deux [Arrambide et Duriez, 1954] :

- L'enrobage à chaud (cas de sable -bitume «sand -asphalt»);
- L'enrobage à froid (cas de sable -émulsion, sable -bitume fluidifié).

III.3.1. Sable bitume en technique routière

Dans les revêtements aux mélanges sables-bitume, le sable peut être un sable éolien, de dune ou de rivière, de même qu'un sable de mine ou de mer. Ce sable est agglutiné au moyen d'un liant hydrocarboné.

L'emploi de sable bitume en revêtement est utilisé actuellement dans plusieurs pays sous différentes appellations : sable-bitume ou sand-asphalt. Leurs caractéristiques géotechniques sont généralement un peu plus faibles par rapport aux matériaux conventionnels, mais leur comportement sur chaussée est souvent meilleur [Fenzy, 1966].

La stabilité d'un sable bitume ne dépend pas uniquement de la gradation du sable, mais d'autres facteurs qui sont des facteurs de surface de l'agrégat

III.3.1.1. Définition

Le sable bitume est un mélange d'un ou de plusieurs sables avec du bitume pur et destiné à être utilisé en couche d'assise ou couche de roulement.

- Pour des questions de coûts de revient, les sables généralement utilisés sont des sables naturels.
- Le bitume utilisé doit être assez dur, de classe 40/50 ou 20/30 afin d'assurer une rigidité et une stabilité convenables et gagner en cohésion. [Domec, 1980].

Généralement, le mélange nécessite l'ajout de fines provenant soit des matériaux de concassage-broyage (sable fillérisé, fines calcaires...), soit des pulvérulents industriels (chaux, ciment...).

Les sables artificiels sont employés en apport à un sable naturel pour améliorer son angularité, sa granulométrie et introduire des fines.

Les sables naturels utilisés en construction routière sont prélevés soit:

- Dans des gisements appartenant à des couches géologiques classiques;
- Dans des alluvions des rivières ou fleuves;
- Ou, plus rarement, sur des plages ou dunes.

L'utilisation des sables dépend essentiellement de leur granularité dans la mesure où celle-ci a une influence directe sur l'aptitude au compactage, sur la perméabilité et sur la capillarité.

Les essais mécaniques qui permettent de juger les sables bitumes sont ceux que subissent tous les mélanges bitumeux posés en assise de chaussée.

III.3.1.2. Spécifications

Nombreuses formules ont été développées pour la technique du sable bitume en utilisant différents paramètres: diverses origines de sable, granulométrie variée, performances inégales. Ces multitudes de paramètres limitent l'application du sable bitume aux couches de fondations, à l'exception des chaussées à faible trafic. Le domaine d'application du sable bitume est actuellement restreint. Il n'existe pas actuellement de spécifications précises sur ce produit, compte tenu du manque d'expériences. Il est cependant caractérisé par [Domec, 1980] :

- Un pourcentage de vides après compactage assez élevé.
- La nécessité d'incorporer des fines d'apport lorsque les fines naturelles du sable n'atteignent pas un pourcentage de l'ordre de 5% du mélange.

III.3.1.3. Domaine d'emploi

Il n'y a pas 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 à son niveau de 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.

III.3.1.4. 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 à 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 : 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 un bitume pur de pénétration la plus faible possible.

III.3.2. Les sables traités à chaud au bitume pour couches de roulement.

L'emploi des sables en couche de roulement est une éventualité intéressante dans les régions dépourvues de roches dures et disposant de ce matériau. Cet emploi peut prendre des aspects très divers. Il peut s'agir [Arrambide et Duriez , 1954 et 1959]:

- Soit du simple sablage d'une couche de cure;
- Soit d'un emploi en tant que constituant d'un enrobé à chaud 0/D ($10\text{mm} \leq D \leq 16\text{ mm}$);
- Soit enfin comme matériau principal de la couche de roulement.

III.3.2.1. Le Sablage

Cette opération est destinée à permettre la circulation (par véhicules légers) sur une couche de cure ou d'imprégnation en évitant ainsi le collage du liant aux pneus des véhicules. On utilise généralement des gravillons de petit diamètre (2/4, 4/6 ou 2/6); un sable peut convenir dans la mesure où il est relativement grossier (0/4 à 0/6), propre, sans fines et de granulométrie assez creuse.

Remarque: Les sables fins mono granulaires (type sable de dune) sont à éviter.

III.3.2.2. Constituants d'un enrobé 0/D

Les enrobés 0/D de couche de roulement sont employés selon leur formulation dans une gamme d'épaisseur 4 à 8cm ; le pourcentage de sable employé est compris entre 30 et 60 % selon la granulométrie du sable et la valeur (D) de l'enrobé.

Le sable, dans les formules les plus performantes, est concassé, toutefois, un certain pourcentage de sable roulé peut être employé. Son ajout a les conséquences suivantes:

- Il diminue la résistance à l'orniérage;
- Il affecte la rugosité de surface et ;
- Il améliore la maniabilité (élément souvent utile pour des mises en œuvre en faible épaisseur).

Pour des emplois supérieurs à 20 %, les sables roulés seront toujours des sables à granulométrie étalée (sables moyens ou grossiers); l'emploi de sable fin monogranulaire dégrade rapidement les performances. Les sables utilisés seront propres (IP= 0, E.S.> 40).

III.3.2.3. Matériau Principal

Différentes techniques sont envisageables, une caractéristique commune est qu'elles sont toutes employées pour des épaisseurs inférieures à 4cm. On peut vouloir réaliser:

III.3.2.3.1. Un sable enrobé à chaud : Sand Asphalt

C'est une technique réalisée à chaud. Il s'agit d'un enrobé 0/D ($2 \leq D \leq 4\text{mm}$) constitué en majorité de sable roulé mais pouvant contenir un certain pourcentage de sable concassé destiné à améliorer ses performances.

Il se distingue des sables bitumes utilisés en assise:

- Par une teneur en liant plus élevée (6,5% au lieu de 4 à 4,5%) ;
- Par des exigences de qualité plus restrictives concernant les sables utilisables et en particulier du point de vue granulométrique: les sables fins mono granulaires ne sont pas employés à teneurs élevées. La compacité en place de ce type d'enrobés est de l'ordre de 90%. On peut l'améliorer, mais aux dépens de la rugosité, en faisant évoluer la formulation de ce type d'enrobés vers celle des mastics bitumineux (sheet asphalt). Ces enrobés peuvent contenir en quantité variable du sable roulé moyen ou grossier, du sable concassé et du sable fin roulé (maximum 30%).
- La particularité d'un sable bitume par rapport aux sables enrobés est que celui-ci est plus fin et plus riche en fines et en bitume. La rigidité du mélange fines-bitume vient compenser l'instabilité liée à l'emploi de sable fin. Ces enrobés sont compacts (95%) et étanches ; ils sont malheureusement très glissants. Autrefois très utilisés en milieu urbain, leur coût élevé (compte tenu du fort dosage en bitume nécessaire pouvant parfois atteindre jusqu'à 9%) tend de plus en plus à les faire disparaître des applications.

III.3.2.3.2. Un enrobé fin

C'est une technique réalisée à chaud. Il s'agit d'un enrobé 0/D ($4 \leq D \leq 6\text{ mm}$), constitué entièrement de sable concassé « micro béton ». Les enrobés fins peuvent cependant contenir un certain pourcentage d'éléments roulés selon le niveau de performance souhaité lié à l'intensité du trafic. Ils se distinguent des sables enrobés par une granularité plus étalée et un niveau de performances plus élevé ; ils sont également plus compacts.

Lorsqu'ils sont coulés, ils sont comparables à tous points de vue à des enrobés classiques 0/10 ou 0/14 pour une mise en œuvre en 4cm (enrobés d'entretien).

III.3.2.3.3. Des coulis bitumineux

Il s'agit de mélanges à froid ; ces coulis sont constitués de sable, de fines, d'émulsion de bitume et d'eau de façon à produire un mélange de consistance fluide. Après le répandage, le coulis, en perdant son eau, se transforme en un revêtement bitumineux analogue à un mortier. Lorsque le sable est entièrement concassé, on obtient des micros bétons coulés.

III.3.2.4. les sables enrobés à chaud : micro enrobés

Les sables enrobés à chaud sont utilisables pour des chaussées à trafic faible ou moyen (inférieur à 1000 véhicules/jour). L'épaisseur employée est généralement de l'ordre de 3 cm avec une certaine tolérance. Pour une chaussée parfaitement profilée, le répandage peut descendre à 20 à 30 kg/m² ; le minimum courant est de 40 kg/m² et de façon habituelle le choix se fixe à 60 kg/m².

La limitation d'emploi, du point de vue du trafic, tient essentiellement à deux causes :

- Le niveau de performances est limité.
- L'emploi de sable naturel (roulé) non recomposé en quantité importante entraîne une certaine hétérogénéité de composition donc aussi de performances. Les micros enrobés n'ont pas une étanchéité parfaite ; ils sont donc à déconseiller sur couche de base en grave non traitée.

Ces enrobés ont généralement une bonne microrugosité, mais ne procurent pas, à une grande vitesse, la même sécurité vis-à-vis de la glissance que les enrobés réalisés avec des granulats plus gros et concassés.

III.3.2.4.1. Qualités des constituants

Les matériaux

On utilise généralement des sables naturels moyens ou grossiers. Le fuseau granulométrique (figure III.1) est limité par [Chauvin, 1987].

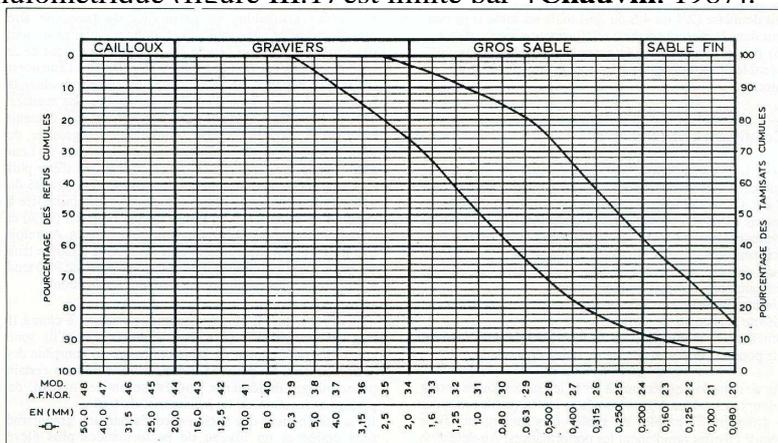


Figure III.1. : Fuseau granulométrique utilisé pour les micro enrobés

a. Une courbe basse

Par la notion même de sable (pour la valeur du diamètre maximum D) et la nécessité d'un minimum de compacité (ce qui exclut les courbes trop creuses).

b. Une courbe haute

Pour des problèmes d'aspect de surface de la couche de roulement, également de dosage en bitume et aussi de compacité (la teneur en vide des sables fins est très importante).

Les sables utilisés doivent être propres : IP non mesurable et $ES > 40$

Lorsque la propreté du sable se situe à un niveau légèrement inférieur à cette limite, on pourra réaliser l'essai sur matériau après passage dans le tambour sécheur de la centrale (l'élimination ou le séchage d'ultrafines peut en effet conduire à l'amélioration de l'équivalent de sable).

La teneur en fines naturelles des sables est généralement insuffisante; le complément sera assuré soit par des fines d'apport, soit par un sable de concassage ou de broyage.

- Les fines d'apport seront toujours d'origine artificielle: résidus industriels de dépeussierage ou pulvérulent fabriqué (fines calcaires, chaux grasse, ciment).
- Le sable de concassage ou de broyage devra être riche en fines pour contribuer efficacement à l'amélioration de la teneur en fines du mélange : généralement cette teneur en fines se situe dans une gamme de 15 à 35 % et l'ajout de sable concassé dans le mélange de 10 à 30 %.

Les Liants

Compte tenu du manque d'angularité du matériau, il conviendra d'éviter les bitumes de pénétration trop importante (pénétration à 25°C supérieure à 100 dixièmes de mm), ceci afin d'éviter les risques d'orniérage.

A l'inverse, des liants de trop faibles pénétrations 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 est comprise entre 50 et 100 soit le bitume 60/70 ou 80/100 ; la teneur en liant utilisé est fréquemment de l'ordre de 7 à 9%. Il est à noter que certains liants spéciaux permettent d'augmenter les performances (bitume élastomère en particulier). Leur coût élevé est peu compatible avec la rusticité de ce type d'enrobés.

III.3.2.4.2. Performances Recommandées

Trois essais sont généralement faits pour apprécier le niveau de performances des micro enrobés: Stabilité Hubbard Field, stabilité Marshall et immersion – compression LCPC (Duriez).

Pour des niveaux de trafic limités à ceux prescrits pour ce type de matériau (inférieurs à 1000 véhicules/jour), les caractéristiques recommandées sont données dans le tableau III-1:

Tableau III-1 : Performances des micro enrobés

Essai	Caractéristiques	Spécifications
Marshall	Stabilité à 60°C (DaN)	= 300
	Compacité (%)	87 ÷ 94
Hubbard-field	Stabilité minimale à 60°C (Kg)	=500
	Compacité (%)	88 ÷ 95
Duriez	Résistance à la compression à sec à 18°C	$R_C \leq 3,5 \text{MPa}$
	Tenue à l'immersion	$I/C > 0,75$
	Compacité (%)	85 ÷ 92

Un niveau de compacité minimum est souhaitable pour garantir une certaine imperméabilisation; cette compacité est par ailleurs limitée pour éviter le ressuage du bitume et l'instabilité de l'enrobé.

Une formule ne répondant pas à l'un ou l'autre de ces critères est améliorable de différentes manières selon le critère:

La Mauvaise tenue à l'immersion peut être due à :

- Une mauvaise adhésivité entre le sable et le bitume: utiliser un dope d'adhésivité pour enrobage à chaud ou de la chaux en fines d'apport.
- Une imbibition trop importante: pour la diminuer, il convient d'augmenter la compacité en augmentant la teneur en fines ou en liant ou les deux.

Dans le cas d'une stabilité ou résistance trop faibles, il faut :

- Ajouter ou augmenter le dosage en sable de concassage.
- Augmenter la dureté du bitume et faire varier le dosage.
- Modifier la courbe granulométrique par ajout d'un petit gravillon (cas des sables trop fins).
- Faire varier le rapport fines/bitume: la stabilité du mélange varie en fonction de ce rapport ; elle passe généralement par un optimum pour un rapport dont la valeur dépend de la nature des fines. Cette valeur se situe entre 1,5 et 2% (selon le pouvoir rigidificateur des fines employées).

III.3.2.4.3. Fabrication

Elle s'effectue dans une centrale d'enrobage classique. Compte tenu des faibles épaisseurs mises en œuvre et de la vitesse habituelle des finisseurs, le débit de la centrale devra être limité pour éviter l'attente des camions chargés d'enrobés et les arrêts trop fréquents de la centrale.

III.3.2.4.4. Compactage

Les sables bitumes ont une stabilité faible avant refroidissement du bitume, ils portent difficilement le compactage et ont tendance à se fissurer, surtout par temps froid. On aura intérêt à pré compacter avec un finisseur à table vibrante lourde. Le compactage se poursuivra :

- Soit au compacteur à pneu léger (de l'ordre de 2 tonnes par roue et une pression des pneus faible (< 2 bars), en attendant que le matériau se soit refroidi jusqu'à 100°C et même quelques fois 80°C.
- Soit immédiatement, avec un compacteur à plaques vibrantes suivi, si nécessaire, d'un compacteur à pneu.

III.3.2.5. Les enrobés fins « micros-bétons »

III.3.2.5.1. Domaine d'emploi

Les micro-bétons sont utilisables sur chaussées de tous trafics mais leur niveau de qualité et de performances les désignent plutôt pour des trafics importants (supérieur à 1000 véhicules/jour). Tous les emplois envisageables avec les micro-enrobés le sont également avec les micro-bétons sans restriction sur la stabilité. L'influence des caractéristiques de surface vis-à-vis de la glissance peut être résolue par cloutage. Les gammes d'épaisseur d'emploi sont également similaires (épaisseur normale d'utilisation 3cm). Les limites d'emploi tiennent compte de la faible épaisseur résultant du niveau de trafic et de la déflexion. [Do & Lucas, 1995]

III.3.2.5.2. Qualités des constituants

Les Matériaux

On utilise généralement des sables de concassage ; une très bonne homogénéité de constitution peut être assurée par reconstitution en centrale en 2 ou 3 composants par exemple 0/2 et 2/6 ou 0/2, 2/4 et 4/6.

La granulométrie du mélange est en règle générale plus étalée (figure III.2) et le diamètre maximum D plus élevé que pour les micro-enrobés; ce qui confère aux micro-bétons un niveau de performances et une compacité plus élevés.

Un certain pourcentage de sable roulé moyen ou grossier peut-être utilisé. Généralement, un tel emploi diminue les performances. Cette diminution peut-être compensée si l'emploi l'exige par l'utilisation de liants spéciaux (bitume-souffre, bitume élastomère, etc....). La teneur en fines nécessaire augmente lorsque le diamètre maximum diminue.

Les sables de concassage employés ne devront pas être friables, on aura les mêmes exigences de propreté que pour les micro-enrobés.

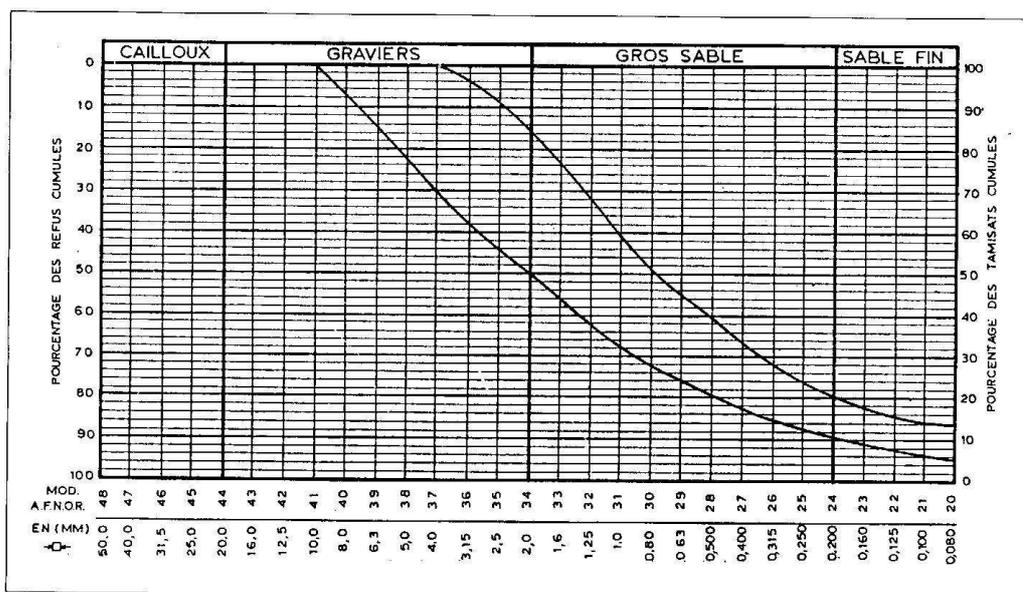


Figure III.2. : Fuseau granulométrique conseillé pour les micro-bétons

Le bitume

Le choix du liant sera fonction du niveau de trafic et de la déflexion du support : moins sensibles que les micro-enrobés au problème d’orniérage, il s’agira surtout de se prémunir des phénomènes de fatigue.

III.3.2.5.3. Performances recommandées

Les performances des micro-bétons peuvent être appréciées à l’aide de différents essais: compression et tenue à l’immersion, LCPC, Marshall, orniérage, compactage avec une presse à cisaillement giratoire (PCG)...

Les niveaux de performances recommandés sont donnés dans le tableau III-2.

Tableau III-2 : Performances des micro enrobés

Essai	Caractéristiques	Spécifications
Marshall	Stabilité à 60°C (daN) Compacité (%)	> 600 89 ÷ 96
<i>Essai LCPC</i>	Résistance à la compression à sec à 18°C avec un bitume 40/50 Résistance à la compression à sec à 18°C avec un bitume 60/70 Compacité (%) Tenue à l’immersion	Rc > 6 Mpa Rc > 5 Mpa 88 ≤ C ≤ 95% I/C > 0,75
<i>Essai d’orniérage LPC</i>	Ornière < 20mm Ornière < 10mm	3000 cycles 1000 cycles
<i>Essai PCG</i>	Compacité à 10 girations Compacité à 40 girations	<91% 92% ÷ 96%

Les facteurs ayant une influence sur le niveau des performances et les moyens de les améliorer sont identiques à ceux déjà mentionnés pour les micro-enrobés.

III.3.2.5.4. Les améliorations envisageables lorsque le niveau de performances visé n'est pas atteint

Fines d'apport

Les sables utilisés doivent nécessairement être propres : cette exigence entraîne souvent un manque de fines. L'apport de fines se situera généralement entre 2 et 5 %. Ces fines amélioreront la cohésion et la résistance du matériau. Ce résultat est dû à la fois à l'amélioration de la granulométrie et au pouvoir rigidifiant de ces fines.

Lorsqu'un choix se posera entre plusieurs produits fins, on pourra choisir celui qui aura le plus grand pouvoir rigidificateur (pour un produit fin, il se mesure à l'aide de l'essai bille et anneau. On détermine la température de ramollissement d'un bitume pur 80/100 puis celle d'un mélange de 40 % de ce bitume et 60 % du produit fin, la différence entre ces deux températures correspond au pouvoir rigidificateur du produit fin). On vérifiera, cependant, que ce gain n'entraîne pas une chute de tenue à l'immersion. On évitera des produits fins dont le pouvoir rigidificateur est supérieur à 20°C et dans la mesure du possible, on retiendra des produits pour lesquels une certaine expérience locale existe déjà.

Cependant, dans certains cas (sable fin propre en particulier), l'emploi de fines d'apport peut s'avérer insuffisant pour amener le niveau de performances au seuil voulu et la correction devra être plus importante.

Sable de concassage ou de broyage

- Un sable riche en fines (plus de 15% passant à 80 microns) améliorera à la fois la cohésion et le frottement interne de la formule.
- Un sable ayant peu de fines améliorera uniquement le frottement interne. Il pourra éventuellement être accompagné par l'ajout en centrale d'un produit fin.

Le dosage en sable correcteur se situe généralement entre 20 et 40 %.

Le soufre

Le soufre est liquide à 120°C, ajouté au bitume, il permet la mise en place du matériau. Au refroidissement, il cristallise et peut rigidifier le mélange.

Produits rigidifiants

Il existe dans l'industrie chimique et en particulier dans la pétrochimie, un certain nombre de produits compatibles avec le bitume et ayant des propriétés rigidifiantes (résines aromatiques, asphaltènes...); associés à un bitume de pénétration normale de tels produits peuvent compenser l'absence de bitume dur tel que le 20/30. Avant emploi, une étude de laboratoire assez développée ainsi que des sections d'essais de petite importance sont nécessaires pour juger du comportement. Il est à noter qu'un excès de rigidité serait aussi néfaste qu'une résistance trop faible.

Dopes d'adhésivité

Utilisés mélangés au bitume, de tels produits peuvent éventuellement résoudre un problème de tenue à l'immersion insuffisante.

Pré-enrobage au ciment

Le manque d'angularité et de frottement interne du matériau peut être compensé en faisant adhérer à la surface des grains de sables des cristaux de ciment hydraté.

On réalise pour cela un mélange de sable et de ciment Portland avec une quantité d'eau suffisante pour assurer l'hydratation du ciment (le dosage en ciment est de l'ordre de 4 %). Le mélange ainsi traité est conservé un minimum de 48 heures avant d'être employé en centrale d'enrobage classique.

Un tel traitement améliore de façon sensible la tenue à l'orniérage du sable-bitume. Des améliorations de la stabilité de l'ordre de 25 % peuvent être ainsi atteintes.

III.3.3. Les sables traités au bitume : enrobage à froid

Les différences essentielles entre les sables bitume et les sables enrobés à froid tiennent à 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.

III.3.3.1. 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/jour) 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 alors que 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.

III.3.3.2. Qualité des constituants

III.3.3.2.1. Les sables

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

- Teneur en fines inférieure à 80 μm : 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 $L_L < 35$.

Lorsqu'un sable (en particulier fin) ne répond pas aux critères de traitement, on pourrait 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 la 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 ; il 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).

III.3.3.2.2. Les liants

Les liants employés doivent pouvoir bien se disperser dans le matériau à température ambiante [Arrambide et Duriez, 1959].

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 ; l'émulsion doit rester parfaitement stable au moment du malaxage pour éviter la formation de nodules de bitume rendant le traitement beaucoup moins efficace. 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. Ce dernier assurera 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, peut également se poser un problème de choix entre émulsion cationique ou anionique. En climat chaud, on utilise les émulsions anioniques; 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.

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.

III.3.3.3. 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).

III.3.4. Résultats obtenus sur certaines routes sahariennes de chaussées réalisées en sables bitume

La rareté en matériaux pierreux dans certaines régions du sud, a poussé à l'époque les ingénieurs routiers à utiliser à la place des graves les sables enrobés en revêtement, c'est ainsi que furent réalisés vers la fin des années cinquante, les premiers tronçons situés au Nord-Est du Sahara, avant d'être généralisés à l'ensemble du réseau routier d'El-Oued, Ouargla et Touggourt.

Les principaux tronçons sur lequel fût utilisée cette technique sont:

- RN.3: sur une longueur de 140 km entre Still et Touggourt et sur une longueur de 350 km entre Hassi Messaoud et Belguebour;
- RN.16: sur un tronçon de 60 km entre El-oued et Tébessa;
- RN.48: sur une longueur de 140 km entre Still et El-Oued;
- RN 49: sur une longueur de 12 km entre Ouargla et Hassi Messaoud;
- RN.56: sur une longueur de 68 km de Touggourt vers Ouargla.

Ces tronçons ont été construits avec des sables prélevés le plus souvent des lieux avoisinant le tracé avec ajout de 1 à 2% de chaux en vue d'améliorer l'adhésivité. Le liant utilisé est un bitume semi-dur 80/100 avec un dosage de 5 à 6%. L'état de surface est amélioré par un cloutage.

Cette expérience était concluante dans la mesure où le comportement mécanique sur les chaussées ainsi réalisées est demeuré satisfaisant même avec un état de dégradation plus ou moins avancé jusqu'aux années quatre-vingt.

III.3.4.1. 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 et 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) a facilité la fissuration dans tous les sens ;
- La couche de base, du 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.

III.3.4.2. 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 est 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.

III.3.4.3. RN 3 STIL-TOUGGOURT

Elle a été réalisée au cours de l'année 1956/1957, le corps de chaussée était constitué de matériaux gypseux sur environ 20 à 30 cm d'épaisseur ; quant à la couche de roulement, elle était 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 (<80µm) (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 recompactés 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).

Dans le tableau III-3, sont regroupés les résultats obtenus sur carottes prélevées une année après l'exécution du tapis en sand asphalt :

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

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

- 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.

Tableau III-3 : 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

III.3.4.4. 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 de 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 bénéficié 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 III-4 :

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

Tableau III-4 : 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

III.3.4.5. 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.

III.4 Traitement des sables aux liants hydrauliques

On appelle sable traité aux liants hydrauliques, le mélange d'un sable, le cas échéant d'un correcteur granulométrique, d'un liant hydraulique et d'eau dans des proportions définies [Chauvin, 1987]. L'objectif de cette opération est de conférer aux sables des caractéristiques mécaniques satisfaisantes, afin de les utiliser dans certains domaines de la construction, notamment le renforcement vu l'aspect économique que présentent ces sables.

Ce mélange est élaboré suivant les critères arrêtés dans les normes appropriées. Il est étudié pour pouvoir être fabriqué et mis en œuvre aisément et pour avoir à moyen et long terme des caractéristiques mécaniques fixes.

On ne peut pas, à priori, définir des spécifications fixées, mais à posteriori on peut définir les conditions et les limites d'utilisation de chaque sable, car la stabilité du mélange sable-liant dépend en grande partie du sable.

Le traitement des sables est fonction de plusieurs facteurs telles que la sévérité des conditions de service et la fonction de l'élément traité : pour un climat chaud, il faut s'opposer au départ brutal de l'eau, alors que pour un élément de fondation, on est très sévère sur la perméabilité et la résistance.

Les études préalables portant sur les bétons de sable ont montré leur avantage économique et leur spécificité technique.

Les performances mécaniques obtenues aussi bien pour les bétons de remplissage que pour les bétons routiers sont largement suffisantes pour confirmer la compétitivité technique de la solution « béton de sable ».

III.4.1. Introduction

Les bétons de sable ont déjà fait l'objet de quelques études, essentiellement en France et en ex URSS. Si les matériaux utilisés sont différents aussi bien par la nature que par la granulométrie de ceux envisagés dans le cadre de notre travail, les principes de base restent cependant les mêmes. Il s'agit de trouver le mélange optimal d'un sable de base et d'un ou plusieurs ajouts avec du ciment et de l'eau afin d'obtenir les meilleures performances possibles en optimisant l'exploitation des gisements de sable et par conséquent en rationalisant l'utilisation du sable et des granulats [Chauvin, 1990].

Compte tenu du caractère nouveau du thème qui est « les bétons de sable de dunes », la documentation n'est pas très abondante par rapport aux autres matériaux de construction. N'eusse été l'ouvrage publié dans le cadre du projet français Sablocrète (association pour la promotion et le développement du béton de sable) [bétons de sable, caractéristiques et pratiques d'utilisation Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées ; 237pages] en novembre 1994 et qui rapporte ce qui a été publié en ex Union soviétique.

III.4.2. Historique du béton de sable

La technique des bétons de sable était tombée en sommeil vers les années 1920 aussi bien en Europe Occidentale qu'en ex URSS pour redevenir d'actualité pendant la deuxième guerre mondiale grâce au comportement de certaines pistes réalisées par l'Allemagne. A travers les différents secteurs (routes, autoroutes, aérodromes, bâtiments et composants du génie civil, ouvrages d'art), les Soviétiques ont développé une méthodologie de formulation et surtout de mise en œuvre dans la préfabrication et la projection.

Pour le béton de sable appliqué aux chaussées routières, des recherches françaises ont permis de développer une variante prometteuse des constructions traditionnelles : les chaussées en béton de sable.

Cette technique, qui a vu le jour en Aquitaine (sud-ouest de la France) dans la première moitié des années 90, a été développée dans un souci de préservation des ressources et de l'environnement dans les régions riches en sable. Elle permet de réaliser une chaussée en utilisant presque entièrement des matériaux locaux lorsque les sables sont abondants et les granulats rares.

En France, les applications pour ce type de chaussée sont restées, jusqu'à présent, très modestes et les quelques projets réalisés sont toujours sous étude. Étant donné leur climat tempéré, le comportement des chaussées de béton de sable soumises aux cycles gels-dégels n'a pas été étudié. Au Québec, il semble qu'aucun projet n'ait été réalisé jusqu'à maintenant [Fauteux et Fortin, 2002].

Le principal inconvénient du béton de sable est la faible durabilité du transfert de charges aux joints, ce qui restreint ces chaussées en dalle non-armées à un domaine d'emploi limité aux liens où le trafic lourd est faible.

À cause de la récente apparition de ce matériau, le dimensionnement d'une chaussée en béton de sable à partir des méthodes actuelles de conception des chaussées mixtes (semi-flexibles), doit être effectué au moyen d'un facteur de sécurité plus fort que celui utilisé pour le dimensionnement d'une chaussée en béton traditionnel. De plus, afin de préserver l'état de la surface et pour obtenir une bonne adhérence, on suggère de recouvrir le tout d'un revêtement bitumineux. Il est cependant possible d'utiliser ce matériau pour des chaussées non-revêtues.

Lors de la fabrication et de la mise en place, une attention particulière doit être portée au temps de malaxage du béton de sable. De plus, la mise en œuvre nécessite une adaptation du dispositif de vibration du béton, puisqu'il y a des risques de formation de bulles en surface et de fissuration sur les bords à l'extérieur des courbes.

Il apparaît donc que cette technique constitue un support de démonstration intéressant pour le développement des chaussées en béton de sable. Les recherches effectuées dans ce domaine ont été réalisées sous l'égide du Projet national Sablocrete (en France).

III.4.3. Caractéristiques générales des bétons de sable

III.4.3.1. Définition

Le béton de sable a les particularités suivantes :

- Il se distingue des mortiers par son dosage en liant moindre, sa résistance plus élevée et sa destination (essentiellement destiné aux usages traditionnels du béton) ;
- Il se distingue d'un béton ordinaire par son dosage en sable(s) élevé, par l'absence ou le faible dosage en gros granulats (une rigidification par des gravillons tels que le rapport G/S soit inférieur à l'unité peut être nécessaire), et l'incorporation d'ajout(s) ;
- Il ressemble au béton ordinaire par son dosage en liant et sa résistance similaire et parce qu'il peut être utilisé pour la réalisation des éléments de résistance pour bâtiments et chaussées.

C'est donc un matériau répondant aux critères d'un béton traditionnel en termes de performances, de durabilité et de comportement.

Les composants rentrant dans la composition d'un béton de sable sont ceux du béton traditionnel, matériau normalisé et par conséquent eux-mêmes normalisés et répondant à des avis techniques pour une utilisation dans le béton [**Cim béton** 1995].

III.4.3.2. Les sables

Les sables utilisables sont ceux conformes aux définitions des normes **NFP18-541** (ES • 75 si le sable est roulé et $ES \geq 65$ s'il est broyé) [**Cim béton**, 1995]. Il peut s'agir d'un sable alluvionnaire, de ballastière ou de concassage 0/D.

Aucun critère granulométrique n'est exigible à priori, la seule restriction d'emploi réside dans la propreté ; les sables riches en fines naturelles nécessitent généralement beaucoup plus d'eau, ce qui entraîne une chute de résistance. Les sables de plage ou des dunes pourraient donc être utilisés.

III.4.3.3. Les ciments

Ils doivent être conformes à la norme **NFP15-301**, ils sont utilisés comme liants hydrauliques, servent à combler les vides entre les grains de sable et jouent le rôle de fillers.

III.4.3.4. L'eau

Celle utilisée est conforme à la norme **NFP18-303**. La proportion élevée d'éléments fins nécessite un volume de mouillage plus important, élevant le rapport E/C au dessus de celui des bétons ordinaires ; l'incorporation de plastifiant réducteur d'eau et la sélection de fillers adéquats peuvent réduire la quantité d'eau dans des proportions non négligeables.

III.4.3.5. Les ajouts

III.4.3.5.1. Les fillers et les sables fillérisés

Les fillers ou fines d'ajout sont utilisés pour améliorer la compacité en complétant l'ossature minérale et en réduisant le dosage en ciment coûteux et cause de retrait. Ils améliorent la cohésion du mélange qui dépend de leur nature minéralogique, de leur finesse et de leur caractère actif ou inerte.

Dans le cas des bétons de sable, on comble d'abord une partie des vides du sable par un filler, et on assure ensuite la rigidité du mélange par un complément en ciment correspondant aux dosages habituellement employés pour les bétons traditionnels.

En matière de maniabilité et de résistance, la morphologie et la texture sont des paramètres très importants. Les fines sphériques peuvent conduire à une réduction d'eau alors que celles anguleuses en nécessitent beaucoup plus. L'agglomération des éléments les plus fins sur les plus grossiers ou l'existence d'éléments alvéolés avides d'eau conduisent à une mauvaise correction granulométrique et à une surconsommation d'eau. La surface spécifique d'un filler n'augmente pas avec sa finesse ; il a été prouvé qu'à diamètre moyen identique, la surface spécifique pouvait varier dans un rapport de 1 à 9 entre une cendre et un méta kaolin. Il a même été constaté qu'un filler ayant une surface spécifique 1,4 fois plus importante pouvait exiger 25% moins d'eau et cela signifierait que la porosité accessible à l'eau a un rôle à jouer également.[Ambroise et Pera, 1992].

III.4.3.5.2. Les gravillons

Ils permettent de raidir la structure du béton et d'augmenter la résistance aux déformations différées. Cependant, ils augmentent également le module d'élasticité et diminuent la déformabilité, ce qui favorise la formation de fissuration.

Le rapport massique G/S doit rester inférieur à 0,70, S étant la fraction inférieure à 4mm.

Si on définit le sable et les gravillons par d_1/D_1 et d_2/D_2 respectivement, la discontinuité entre le diamètre maximum du sable et le diamètre minimum du gravillon doit être telle $d_2 \gg D_1$. Dans ces conditions, les gravillons restent dispersés dans le sable et ne constituent pas le squelette de la masse et on parlera de « béton de sable chargé ».

III.4.4. Propriétés spécifiques des bétons de sable

Du fait de la présence des fines, les bétons de sable nécessitent plus d'eau de mouillage que les bétons classiques, ce qui se traduit par des valeurs E/C plus élevées ($>0,5$) si on ne considère que le ciment, mais ce rapport devient similaire à celui des bétons classiques si on considère (C+F), F étant les fillers.

Pour un rapport E/C constant, plus le sable sera grossier, plus la maniabilité sera bonne puisque la surface à mouiller est moins importante. De même, l'augmentation de la teneur en fines entraîne une perte de maniabilité sauf dans le cas des fines sphériques non absorbantes qui améliorent la maniabilité tout en réduisant la quantité de vides.

Le dosage en ciment constant et pour un type de filler donné, le gain de compacité augmente avec la finesse des fillers. Si l'on prend en considération l'activité hydraulique et l'avidité d'eau, les résistances peuvent varier dans un sens ou dans un autre puisque certains fillers hydrauliquement actifs peuvent exiger plus d'eau alors que d'autres sont réducteurs d'eau de par leur état de surface ou leur forme.

III.4.4.1. Caractéristiques physiques et mécaniques

Les performances mécaniques ne sont pas les seuls critères de jugement de la qualité d'un béton, même si la classification des bétons selon des performances mécaniques reste un repère dans l'esprit des utilisateurs. Aussi, même s'il est vrai que les résistances des bétons de sable sont en général inférieures à celles des bétons classiques d'une part, et que la cinétique de montée en résistance est plus lente –ce qui peut en limiter l'usage pour des ouvrages mis en charge précocement- d'autre part, il est aisé d'obtenir des bétons de sable à hautes performances mécaniques, même à court terme. La vocation de ces derniers n'est pas de se substituer mécaniquement aux bétons ordinaires, mais d'être une nouvelle source de bétons de qualité, au sens large. C'est dans cet esprit que plusieurs comparaisons ont été faites avec le béton classique dans l'objectif de voir dans quelles mesures les bétons de sable pourraient les remplacer.

L'analyse du comportement du béton de sable à l'état frais et l'observation de fragments durcis au microscope électronique à balayage permettent de décrire la microstructure du matériau comme homogène, d'aspect amorphe avec un bon enchevêtrement des inclusions de sable dans la matrice. Le caractère peu ou pas fissurant mis en évidence par le MEB s'explique par l'uniformité de séchage entre le cœur et la périphérie d'une éprouvette cylindrique. Cette uniformité de séchage entraîne de faibles gradients hydriques et donc de faibles contraintes de traction en surface d'où une faible densité de fissuration. [**Benaïssa, Morlier et Viguier, 1993**]

L'étude de la porosimétrie au mercure montre une différence entre les porométries du béton de sable et celles du béton ordinaire. En effet, l'histogramme des pores du béton de sable présente un pic unique décalé vers les gros micropores (au voisinage de 250Å autour duquel se trouvent 80 à 90% des pores du complexe) alors que dans les bétons classiques, on trouve deux pics, l'un correspondant aux micropores (entre 50 et 100 Å) et l'autre aux macro pores (600 à 1300 Å). La porométrie du béton de sable est donc de type monomodale alors qu'elle est bimodale dans les autres bétons. [**Benaïssa, Morlier et Viguier, 1993**].

III.4.4.1.1. Comportement à la fatigue

La tenue à la fatigue est importante à connaître pour dimensionner une chaussée. Il s'agit pour un niveau de contrainte répétée, de voir à partir de quel moment il y a rupture.

Les études réalisées [**sablocrète, 1994**] ont permis de constater que le béton de sable avait un comportement analogue à celui des matériaux traités aux liants hydrauliques pour assises de chaussées.

III.4.4.1.2. Retrait et fluage

En ce qui concerne ces deux phénomènes, une étude assez poussée a été menée [Benaïssa, 1993]

On distingue deux retraits (Figure III.3) :

- Retrait d'auto dessiccation : se fait sans contact avec le milieu extérieur et est voisin de celui des bétons ordinaires.
- Retrait de séchage : a lieu en milieu ambiant et peut atteindre des valeurs deux fois plus importantes que celles des bétons classiques du moins pendant les deux premiers mois, ensuite il y'a une tendance à la stabilisation. Ce phénomène semble être lié à la taille et à la distribution des pores dans les bétons.

En matière de fluage, un phénomène analogue a été observé, lié à la structure du béton de sable et confirmé par les valeurs des modules d'élasticité très différentes entre les bétons de sable et les bétons ordinaires. Le niveau de résistance en compression (inférieure à 25MPa) y est pour beaucoup. C'est ainsi qu'à un niveau de contrainte en compression de 25MPa, on note à peu près la même chose, à savoir que la cinétique de fluage propre n'est pas très différente des bétons ordinaires aux bétons de sable, alors que le fluage de dessiccation du béton de sable a une cinétique extrêmement rapide, deux fois plus importante même.

Des essais ont montré que, en passant de 25 à 50MPa, le fluage du béton de sable était divisé par 5 et n'était supérieur à celui du béton ordinaire que de 20%. [Sablocrète, 1994].

De même, sous contrainte élevée, les déformations de fluage ne présentent plus de caractère linéaire. [Lvoviche, 1991]

III.4.4.1.3. Durabilité des bétons de sable

La tenue d'un béton vis-à-vis des phénomènes d'échange dépend évidemment de l'environnement de celui-ci. L'estimation de la durabilité se fera par conséquent à l'aide d'essais de perméabilité à l'eau et à l'air, de mesure de la carbonatation et de la pénétration des ions chlorures. Les conclusions suivantes ont été faites vis-à-vis des attaques physico chimiques. [Sablocrète, 1994]

- La perméabilité à l'eau est plus faible qu'un béton ordinaire ($2,5 \cdot 10^{-12}$ contre $1 \cdot 10^{-10}$ m/s) ; quant à la perméabilité à l'air, elle conduit à des résultats inférieurs ou comparables pour des bétons de sable optimisés.
- La profondeur de carbonatation en ambiance naturelle pourrait être importante du fait de la faible dimension des pores ($<10\mu\text{m}$) et de l'absorption initiale. Des résultats expérimentaux montrent une quasi proportionnalité entre profondeur carbonatée et absorption initiale. [Balayssac, Detriche et Grandet, 1993].
- Le comportement à la pénétration des ions chlorures est comparable à celui des bétons traditionnels

III.4.4.1.4. Fissuration

Le module d'élasticité relativement faible du béton de sable implique une plus grande déformabilité que dans les bétons ordinaires et donc un moindre risque de fissuration. L'absence de gros granulats est aussi un facteur atténuateur de fissuration qui confirme le caractère peu fissurant du matériau. Le séchage du béton de sable est uniforme, en effet les gradients hygrométriques entre la périphérie et le cœur d'une éprouvette sont faibles ce qui entraîne de faibles gradients de contraintes et par conséquent une faible fissuration

La microstructure du béton de sable est une structure continue, la pâte de ciment est d'apparence amorphe et présente un aspect compact sans fissures notables. La porosité totale du béton de sable est de l'ordre de 11 à 13% ; elle est proche de celle d'un béton classique. La cinétique de séchage très rapide et uniforme explique l'absence de fissuration.

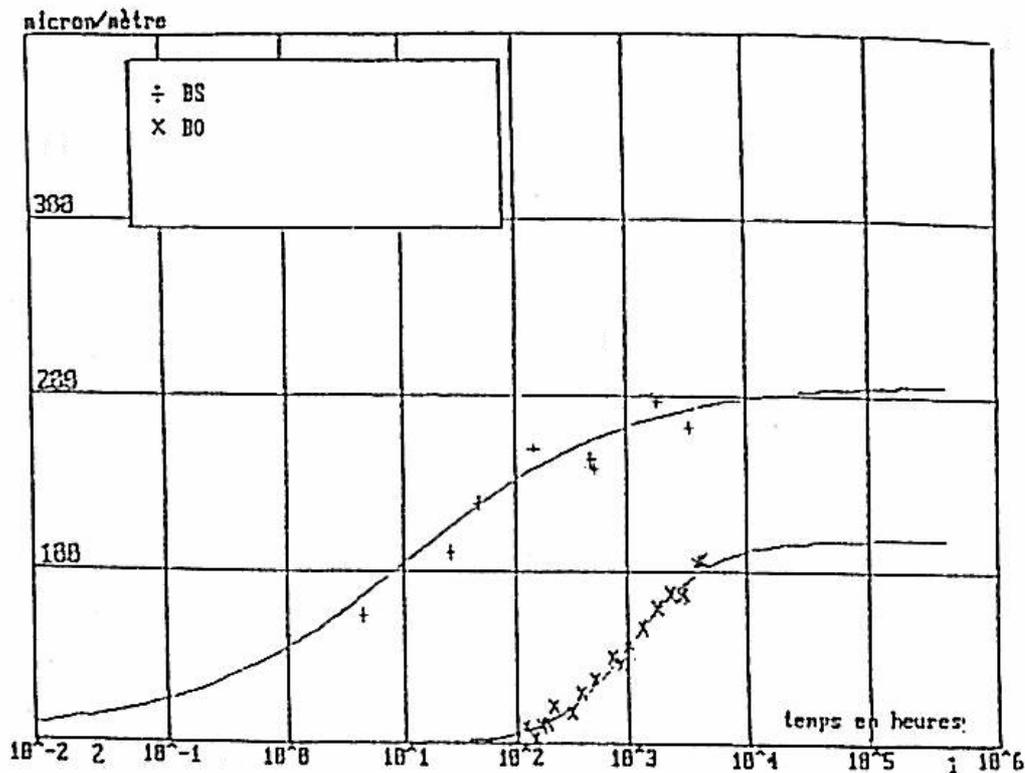


Figure III .3. Fluage de dessiccation (BS-BO)

III.4.4.2. Influence de l'ajout de gravillons

Incorporer des gravillons dans une composition de béton de sable ne modifie en rien les propriétés spécifiques de ce dernier pour peu que le dosage soit faible.

L'ajout de gravillons améliore la résistance à l'attrition dans la limite d'un rapport $G/S < 0,5$.

Lorsque $0,25 < G/S < 0,50$, toutes les propriétés sauf la résistance au gel sont améliorées, notamment la résistance à la compression et le module élastique.

Lorsque le rapport varie de 0 à 0,25, le module de Young croit de 50% quelque soit le granulat mais au delà, il n'y a pas d'amélioration significative.

La résistance aux chocs a montré un bon comportement attribué à la structure plus fine et plus homogène permettant de mieux répartir les impacts et d'éviter les éclatements que l'on observe sur les bétons ordinaires et facilités par le déchaussement des gros granulats sous l'effet des chocs.

III.4.4.3. Comportement mécanique et propriétés physico chimiques des fillers

De nombreux essais réalisés au laboratoire ont montré que la granulométrie des fillers ne jouait pas un rôle prépondérant et que ce sont plutôt la nature minéralogique, la composition chimique (activité pouzzolanique), la morphologie (forme, angularité, état de surface) qui sont déterminants. En effet certains fillers dits actifs contribuent au phénomène de prise hydraulique du ciment par association avec la chaux libérée par ce dernier et de ce fait améliorent la résistance.

Chapitre IV : Liants hydrocarbonés

IV.1. Introduction

Les liants hydrocarbonés qui diffèrent des liants hydrauliques, sont des liquides fortement visqueux qui peuvent se présenter aussi sous forme de solides demi-mous.

Ce sont des matériaux contenant des hydrocarbures et leurs dérivés non métalliques, accompagnés de minéraux plus au moins inertes.

IV.2. Les bitumes

IV.2.1. Définition

Le bitume est un liquide visqueux ou bien un solide. Il est essentiellement constitué d'hydrocarbures et de leurs dérivés solubles dans le sulfure de carbone.

La composition schématique d'un pétrole brut peut être représentée comme suit (Figure IV.1):

Le pourcentage de bitume peut varier dans 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

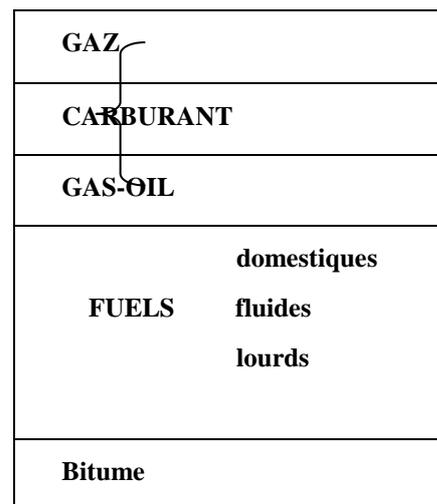


Figure IV.1 : Composition schématique d'un pétrole brut

IV.2.2. Emploi des bitumes

Les bitumes routiers sont répartis en cinq qualités (classes) en fonction de leur pénétration (Tableau IV-1):

- Le bitume 180/220 est utilisé pour la confection des émulsions et des enrobés fins, en plus de son emploi en répandage superficiel.
- Le bitume 80/100 est destiné à la confection des enrobés denses et des bétons.
- Le bitume 60/70 est aussi destiné à la confection des enrobés denses et des bétons.

- Bitume 40/50 est un bitume dur qui peut avoir les mêmes emplois que les précédents, mais sous les climats chauds; la tendance actuelle est son utilisation pour la confection d'enrobés soignés destinés aux renforcements des chaussées.
- Le bitume 20/30 est destiné aux mêmes emplois que le 40/50.

Tableau IV-1: Pénétrabilités des différentes classes de bitume [Arrambide, Duriez, 1954]

Caractéristiques	Normes	20/30	40/50	60/70	80/100	180/220
Pénétrabilité à 25°C, 100g, 5s	NFT 66-004	20 à 30	40 à 50	60 à 70	80 à 100	180 à 220
Pénétrabilité résiduelle après RTFOT %	-	-	≥60	≥60	-	-

Remarque :

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.

IV.2.3. Caractéristiques du bitume

IV.2.3.1. Propriétés physiques

Les bitumes de pétrole sont de véritables matières thermoplastiques. Sous l'influence de la chaleur, ils se ramollissent, se liquéfient et deviennent suffisamment fluides pour être mis en œuvre. Ils reprennent leurs caractéristiques originales dès qu'ils se refroidissent [Arrambide, Duriez, 1959].

Les bitumes sont des liants dont le pouvoir collant est grand et leur adhésivité à la plupart des matériaux (pierres, bois, métal, verre...) est excellente. Ils sont insolubles dans l'eau et ne sont pas toxiques. Leur perméabilité à l'eau et à la vapeur d'eau est pratiquement nulle.

L'étanchéité est donc l'une des qualités principales des bitumes, ils sont de bons isolants thermiques et leur résistance au vieillissement est très bonne.

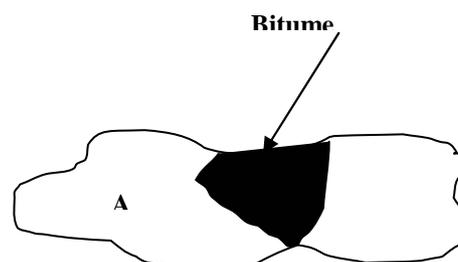
IV.2.3.2. Résistance à l'attaque chimique

L'expérience a montré que les structures bitumineuses ne sont pas affectées par les solutions chimiques ; à température ordinaire, ils n'attaquent pas les corps avec les quels ils sont mis en contact et ils sont solubles dans de nombreux solvants organiques.

Le bitume est utilisé comme liant, pour fixer et retenir entre eux des grains minéraux de diverses formes. Le maintien de la liaison ainsi née entre le grain A et le grain B exige :

- Qu'il n'y ait pas rupture entre le film de bitume et le gravillon A ou B: C'est le rôle de l'adhésion qui nécessite de la part du bitume des propriétés d'adhésivité.
- Qu'il n'y ait pas rupture au sein du film du bitume: C'est le rôle de la cohésion.

Figure IV.2. : Les caractéristiques du bitume (adhésivité et cohésion)



En cas d'importants rejets lors de l'exécution d'un enduit superficiel.

- Si les gravillons rejetés ne sont pas tachés de bitume ; il faut mettre en cause l'adhésivité couple liant-gravillon (remède : dopage).
- Si les gravillons rejetés, sont tachés de bitume, il faut mettre en cause la cohésion insuffisante du liant (émulsion non rompue, bitume fluxé trop fluide).

Cette liaison doit exister aussi bien pour les températures basses qu'élevées, et aussi bien pour des sollicitations lentes que rapides (chocs). Il faudra donc examiner la consistance du bitume et ses variations.

IV.2.4. Principaux essais de laboratoire pour le contrôle des bitumes

Le bitume chaud est un fluide qui adhère aux autres matériaux et qui peut être ainsi appliqué sur d'autres substances, ou leur être mélangé. Après refroidissement à la température ambiante, il devient presque solide mais flexible. Aux très basses températures, il devient dur et fragile, ce qui limite son emploi.

IV.2.4.1. Mesure de la consistance du bitume

Le bitume est :

- Un solide dur, fragile et cassant à basses températures et à faible temps de charge. On est alors dans la zone dite élastique où le bitume est, pour la plupart de ses applications, trop fragile pour résister sans se casser aux sollicitations mécaniques.
- Un liquide fluide à haute température et à temps de chargement important; on est dans la zone fluide. Elle correspond aux températures de mise en œuvre, c'est à dire à la fabrication, à la mise en place et au compactage des enrobés.
- Ni franchement liquide ni franchement solide, pour des températures et des temps de charge moyens. On est alors dans la zone viscoélastique qui correspond aux températures de service des enrobés sur la chaussée

A température ambiante, la consistance d'un bitume est celle d'un solide ou d'un semi-solide.

IV.2.4.2. Essai de point d'éclair (point d'inflammabilité) : domaine fragile NFM 07-019

Le point d'éclair minimum donné par cet essai est la température de travail en toute sécurité, avec les précautions habituelles.

VI.2.4.3. Température de ramollissement : NFT 66-008

Les bitumes n'étant pas des corps purs, ils n'ont pas de point de fusion franc ; leurs consistances décroissent progressivement lorsque leur température s'élève. Pour cette raison, la détermination de la température de ramollissement doit être faite suivant une méthode bien définie si on veut avoir des résultats comparables.

VI.2.4.4. Pénétration des bitumes : domaine quasi solide NFT 66-004

La mesure de la pénétration est exprimée en 1/10 de mm. Cette mesure doit être faite à une température bien déterminée (la plus couramment utilisée est 25 °C).

Tous les bitumes ont tendance à fluer (i.e. sous une charge constante leur déformation n'est jamais limitée). On peut étudier ce phénomène en mesurant leur pénétration en fonction du temps de charge t.

VI.2.4.5. Viscosité des bitumes

La viscosité d'un liquide est la mesure de son frottement interne. Elle est définie comme la résistance offerte par un fluide à la mobilité relative de ces molécules.

IV.2.4.6. Essai de poids spécifique : NFT 66-007

Les résultats sont généralement donnés à 20 - 25°C. Cette détermination est nécessaire pour les conversions volume/ poids.

VI.2.4.7. Essai de perte de masse au chauffage : NFT 66-011

Dans l'essai de chauffage, un échantillon de 50 gr est placé dans un récipient normalisé, et maintenu pendant 5 heures à 163°C dans une étuve, le pourcentage perdu, en poids est alors mesuré.

On détermine ensuite la pénétration du bitume résiduel ; la chute de pénétration est exprimée en pourcentage de pénétration de l'échantillon.

VI.2.4.8. Essai de ductilité : NFT 66-006

Cet essai détermine la distance en cm dont peuvent être éloignées l'une de l'autre à une vitesse spécifiée, les deux extrémités d'une éprouvette de bitume confectionnée dans un moule de dimensions normalisées et plongée dans un bain d'eau, avant rupture du filament ainsi formé.

IV.2.4.9. Les essais de vieillissement :

Le bitume incorporé dans un revêtement hydrocarboné subit deux types de vieillissement [**Franken**, 1973 et **Choquet**, 1993]:

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

IV.2.4.10. Adhésion et cohésion

L'existence ou le maintien de la liaison bitume-granulat doit être examiné [**Dron Bestougeff** et **Boinavitch**, 1978]:

- A l'entrée, quand on met les deux produits en présence. C'est le mouillage, qui met en jeu l'adhésivité active du bitume ;

- A la sortie, quand le mouillage ayant été effectué, on met l'ensemble en présence d'un autre agent (en l'occurrence l'eau) qui tend à se substituer au liant à la surface du granulat. C'est le désenrobage qui met en jeu l'adhésivité passive du bitume.

IV.2.4.11. Le mouillage

A sec

Si l'on considère une goutte de liant à la surface du granulat, les forces en présence sont (Figure IV.3):

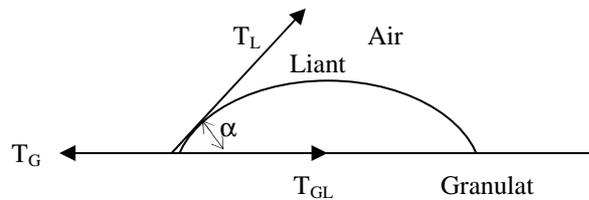


Figure IV.3. Contact granulat liant (à sec).

T_G : Tension superficielle du granulat.

T_L : Tension superficielle du liant.

T_{GL} : Tension interfaciale liant-granulat.

α : Etant l'angle de mouillage.

A l'équilibre : $T_G = T_L \cos\alpha + T_{GL}$

Si $T_L \cos\alpha + T_{GL}$ est faible, il y a étalement de la goutte, c'est le mouillage.

L'eau mouille le granulat, bien que sa tension superficielle soit élevée, parce qu'en général, la tension interfaciale eau-granulat est très faible ; l'eau étant peu visqueuse, le mouillage est rapide.

De même, le bitume mouille les granulats secs, à condition que la température soit suffisamment élevée pour que la viscosité soit suffisamment faible (provoque un figeage qui rend pratiquement impossible le mouillage).

En présence d'eau

C'est le même graphique que précédemment mais avec (Figure IV.4):

T_{LE} : Tension interfaciale liant-eau et T_{GE} : Tension interfaciale granulat-eau.

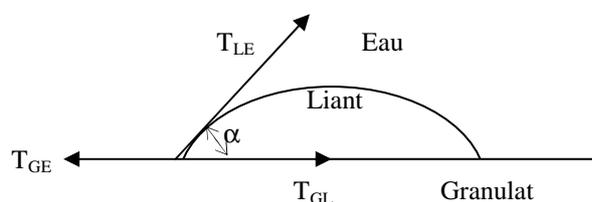


Figure IV.4. : Contact granulat liant (en présence d'eau).

A l'équilibre : $T_{GE} = T_{LE} \cos\alpha + T_{GL}$

Pour qu'il y ait mouillage, il faudrait que $T_{LE} \cos\alpha + T_{GL}$ soit très faible, puisque T_{GE} , tension interfaciale granulat-eau est faible.

Cette condition n'est en général pas vérifiée, et le mouillage d'un granulat par un liant hydrocarboné est en général impossible, en présence d'eau.

Pour que le mouillage devienne possible, il faut abaisser notablement T_{GL} tension interfaciale granulat-liant, c'est le rôle des « dopes d'adhésivité » composés polaires apolaires, à propriétés tensioactives très marquées.

VI.2.4.12. Le désenrobage

Si l'on a réalisé le mouillage à sec (par enrobage à chaud), sans utilisation de dopes d'adhésivité, on va se retrouver, lorsque l'ensemble sera mis en présence d'eau, dans les conditions du cas b de mouillage. Normalement, le désenrobage doit se produire, mais la viscosité du bitume refroidi s'oppose à ce désenrobage.

On a donc un état d'équilibre métastable qui ne peut être rompu :

- Que par l'action permanente et de longue durée de l'eau ;
- Que par l'apport d'énergie (en particulier énergie apportée par le trafic).

Tout enrobé bitumineux est en état de « désenrobage potentiel ».

Dans la majorité des cas, les deux conditions précédemment énoncées ne sont pas remplies et le désenrobage ne se produit pas.

Remarques :

Dans ce qui précède, nous avons tenu compte uniquement de la température, ce n'est pas le seul paramètre qui intervient. Le bitume est un corps viscoélastique et ses propriétés mécaniques sont sensibles à la vitesse d'application des charges.

La température et la vitesse d'application produisent des effets semblables : une augmentation de la température étant équivalente à une diminution de la vitesse d'application de la charge « c'est le principe d'équivalence temps-température ».

De plus, ce n'est que pour des charges très faibles que le comportement du bitume est linéaire.

C'est pourquoi, tous les essais standardisés applicables au bitume et aux matériaux précisent les conditions de charge et de vitesse d'application.

Dans la pratique, il y a conjonction de ces deux paramètres (température et vitesse d'application de la charge), les conditions les plus propices aux dégradations étant :

- Températures basses + vitesses élevées :
 - Fragilité aux chocs ;
 - Fissuration par manque de déformabilité.
- Températures élevées et vitesses basses (voire vitesses nulles) :
 - Ressuage ;
 - Susceptibilité aux déformations plastiques (fluage, orniérage).

IV.2.5. Les spécifications des BITUMES

Les spécifications des bitumes les plus utilisés sont consignées dans le tableau IV-2 :

Tableau IV.2: Spécifications des différentes classes de bitume [Arrambide, Duriez, 1962]

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

IV.2.6. Critères de choix des classes de bitume en Algérie

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 (Tableau III-3). Ce dernier donne le meilleur choix en se basant sur deux critères déterminants et qui sont ; le trafic et les conditions climatiques [Ministère des Travaux Publics, direction des routes, 2000].

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 :

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

Tableau IV-3 : Choix des classes de bitume selon le guide des renforcements [Ministère de l'équipement et de l'aménagement du territoire, 1995]

Zone climatique	TRAFIC					
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
estivale						
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

T_i : classe de trafic, retenue en fonction du trafic moyen journalier annuel (TJMA).

III.2.7. Marché du bitume en Algérie

Le marché du bitume en Algérie 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.

IV.3. Les cut backs

IV.3.1. Définition

Ils sont 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 tel le kérosène (Tableau IV-4), soit avec des huiles légères, ou plus souvent moyennes, provenant de la distillation des houilles (solvant pétrolier ou du pétrole lampant).

Ils se distinguent par leur rapidité de prise, leur couleur franchement noire, leur pouvoir agglutinant élevé et leur siccativité.

Tableau IIV-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 ÷ 61	35 ÷ 39
10/15 orifice 10 mm	78 ÷ 76	22 ÷ 24
50/100 orifice 10 mm	85 ÷ 83	15 ÷ 17
150/250 orifice 10 mm	86,3 ÷ 85,5	13,7 ÷ 14,5
10/15 orifice 10 mm	88,7 ÷ 88,3	11,3 ÷ 11,7

Les principales caractéristiques des Cut Back sont données dans le tableau III-5.

Tableau IV-5 : Caractéristiques des cut backs courants à séchage moyen (MC)

Caractéristiques	Méthode normalisée de référence	Bitumes fluidifiés				
		0-1	10-15	150-250	400-600	800-1400
Pseudo-viscosité mesurée au viscosimètre D'orifice 4 mm, à 25° C (s) D'orifice 10 mm, à 25°C (s) D'orifice 10 mm, à 40° C (s)	NF T 66-003	< 30 – –	– 10 ÷ 15 –	– 150÷250 –	– 400÷600 –	– – 80 à 200
Densité relative à 25° C	NF T 66-007	0,90 ÷ 1,02	0,90 ÷ 1,02	0,92 ÷ 1,04	0,92 ÷ 1,04	0,92 ÷ 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÷27	< 11	< 3	< 2	< 2
315 ° C %		30 ÷ 45	16 ÷ 28	6 ÷ 15	5 ÷ 12	3 ÷ 11
360 ° C %		< 47	< 32	< 20	< 15	13
Pénétrabilité à 25°C, 100g, 5 s du résidu à 360° C de la distillation en 1/10 de mm	NF T 66-004	80÷250	80÷250	80 ÷ 200	80 ÷ 200	80 ÷ 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

IV.3.2. Domaine d'application des cut backs

Les cut backs sont utilisés dans le secteur routier. Selon leurs propriétés rhéologiques, ils sont utilisés dans les domaines suivants :

- Très fluides : imprégnation de sols relativement compacts,
- Fluides : 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.

IV.3.3. Avantages et inconvénients de l'utilisation des cut backs

IV.3.3.1. 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 évalué à 17 637 DA HT comparé au bitume routier 40/50 qui est estimé à 10 690 DA HT la tonne.

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).

Une étude détaillée a montré que 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

IV.3.3.2. Inconvénients

IV.3.3.2.1. Sécurité

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 en observant les règles élémentaires de sécurité.

IV.3.3.2.2. Adhésivité

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

IV.4. Les émulsions de bitume

IV.4.1. Définition

L'émulsion de bitume est une dispersion de bitume dans l'eau, à laquelle est ajouté un agent tensioactif appelé émulsifiant ou émulsif; elle est composée de deux phases : dispersée et dispersante.

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.

IV.4.2. Les essais sur émulsions

IV.4.2.1. Détermination de la teneur en eau : NFT 66- 023

La teneur en eau de l'échantillon en pourcentage, en masse, est exprimée au moyen de la formule suivante :
$$\frac{\text{Volume d' eau en mm dans le tube de recette} \times 100}{\text{Masse en gramme de la prise d' essai}}$$

IV.4.2.2. Détermination de la pseudo-viscosité : NFT 66- 020

IV.4.2.3. Détermination de l'indice de rupture d'une émulsion cationique : NFT 66- 017

IV.4.2.4. Détermination du signe de la charge des particules de l'émulsion : NFT 66- 021

VI.4.2.5. Stabilité au stockage par décantation : NFT 66- 022

IV.4.2.6. Adhésivité d'une émulsion cationique : NFT 66- 018

VI.4.2.7. Homogénéité par tamisage : NFT 66- 016

IV.4.3. Spécifications des émulsions 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 tableaux IV-6 et IIV-7 dont le premier est réservé aux exigences pour chaque classe d'émulsion anionique et le deuxième pour celles d'émulsion cationique.

Remarque :

Une émulsion cationique suffisamment stable réaliserait une véritable stabilisation, à la fois chimique et mécanique. Si le pH est acide, l'émulsion est cationique et l'adhérence est excellente pour les agrégats de toutes natures, et particulièrement les agrégats siliceux qui sont anioniques en phase aqueuse.

IV.4.4. Domaine d'application et principaux emplois des émulsions

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 leur affinité électrostatique pour les agrégats à caractère acide et les propriétés adhésiphores de la molécule du savon cationique, les émulsions cationiques 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 ;

Elles sont utilisées dans la technique routière et doivent avoir des caractéristiques bien définies :

- *Réparation « par point à temps » :*

L'émulsion doit être adhésive, relativement visqueuse et présenter une rupture rapide.

- *Coulis Enduits superficiels :*

Les critères de choix sont les mêmes que pour les réparations.

Enrobage: La viscosité et la rupture doivent être particulièrement étudiées afin de permettre la répartition homogène du liant sans provoquer de pertes par écoulement.

Imprégnation: L'émulsion doit être fluide et très adhésive.

Enrobés denses pour réparations et graves émulsion: La vitesse de rupture doit être parfaitement contrôlée.

- *Pour usage superficiel :* enduits gravillonnés ; enduits de cure et enduits de scellement ;
- *Pour usage dans la masse :* graves émulsions ; enrobés ouverts ; enrobés denses et bitumineux.

Tableau IV-6: Spécifications des émulsions anioniques

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÷51	44÷46	39÷41	34 ÷36	44÷46	39 ÷41	34 ÷36	44 ÷46	39÷41
Pseudo-viscosité Engler 25°C	NF T66-020	< 6	< 15	> 2	> 6	< 15	> 2	> 6	< 15	> 2
Pseudo- viscosité STV à 25°C (D=4mm)	NFT 66-016	–	–	< 18	–	–	< 18	–	–	< 18
Homogénéité	NFT 66-019									
Particules supérieures à 0,63 mm		< 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		> 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	NFT 66-021	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)

Tableau IV.7. Spécifications des émulsions cationiques

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 ÷ 41	34 ÷ 36	30 ÷ 32	39 ÷ 41	34 ÷ 36	30 ÷ 32	44 ÷ 46	39 ÷ 41	34 ÷ 36	44 ÷ 46	39 ÷ 41
Pseudo viscosité Engler à 25°C	NF T 66-020	2 ÷ 15	>6	–	>2	>6	–	<15	2 ÷ 15	>6	<15	>2
Pseudo viscosité STV à 25°C, diamètre de l'orifice d'écoulement(4mm)	NF T 66-016	–	–	>9	<18	–	>9	–	–	–	–	<18
Homogénéité	NFT 66-022											
Particules supérieures à 0,63 mm %		<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		<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5	<5
Adhésivité												
- Emulsion à stockage limité (1)												
1 ^{ère} partie de l'essai		≥90	≥90	≥90	≥90	≥90	≥90	–				
2 ^{ème} partie de l'essai		≥75	≥75	≥75	≥75	≥75	≥75	–	–	–	–	–
- Emulsion stockable (1)	NF T 66-018				≥75	≥75	≥75	≥75	≥75	–	–	–
Indice de rupture	NF T 66-017	<100	<100	<100	80 ÷ 140	80 ÷ 140	80 ÷ 140	>120	>120	≥75	–	–
Stabilité au ciment	NF T 66-024	–	–	–	–	–	–	–	–	>120	–	–
Charge des particules	NF T 66-021	positive	positive	positive	positive	positive	Positive	positive	positive	–	≤2	≤2
										positive	positive	positive

IV.4.5. choix de la formulation

Il n'y a guère de formulation type ; la formule doit être mise au point pour chaque bitume et chaque technique d'emploi. Toutefois, il faut tenir compte d'un certain nombre de règles générales :

- La quantité d'acide ou de base ajoutée dans la phase aqueuse doit être calculée afin que l'émulsifiant présent sous forme ionisée soit en quantité suffisante ;
- La concentration en liant ne doit pas dépasser le seuil au-dessus duquel la viscosité atteint des valeurs peu compatibles avec les conditions d'emploi des émulsions.

Ce seuil est de l'ordre de :

- 65% de bitume pour les émulsions anioniques.
- 70% de bitume pour les émulsions cationiques

La différence de comportement des émulsions anioniques et cationiques tient à l'étendue granulométrique plus importante dans le cas des cationiques.

Il est préférable, dans l'absolu, qu'une partie de l'émulsifiant soit, à l'origine, dans la phase hydrocarbonée. Aussi utilise-t-on, pour les émulsions anioniques, des bitumes cationiques acides ou acidifiés.

IV.4.6. Conditions d'émulsification

L'émulsion se forme en faisant arriver simultanément dans la turbine, le bitume et la phase aqueuse. La température du bitume est choisie pour obtenir une viscosité d'environ 200 centipoises, ce qui donne généralement :

- 140°C pour les bitumes 180/220.
- 150°C pour les bitumes 80/100 et
- 160°C pour les bitumes 40/ 50

Pour limiter le moussage, la température de la phase aqueuse est calculée, grâce à un bilan thermique, de telle sorte que celle du mélange ne dépasse pas 95°C.

IV.4.7. Signification de la stabilité

L'émulsion de bitume est par définition un système instable, une émulsion absolument stable vis-à-vis des granulats ne serait d'aucun intérêt routier. Il est nécessaire de considérer deux sortes de stabilité :

- La stabilité au stockage, que l'on désire aussi grande que possible ;
- La stabilité vis-à-vis des granulats, dont les limites supérieures et inférieures sont imposées par les techniques d'emploi, il est ici préférable de parler de vitesse de rupture

IV.4.8. Adhésivité

IV.4.8.1. Adhésivité du liant et angles de contact

L'adhésivité d'un bitume est une de ses propriétés principales du point de vue technologique. Lorsque les trois phases (bitume, eau et pierre) sont en contact, deux phénomènes différents se passent:

- Mouillage préférentiel par l'eau, c'est-à-dire angle de contact favorable à l'eau (Figure III.5. a) ;
- Mouillage préférentiel par le bitume, c'est-à-dire angle de contact favorable au bitume (Figure III.5. b).

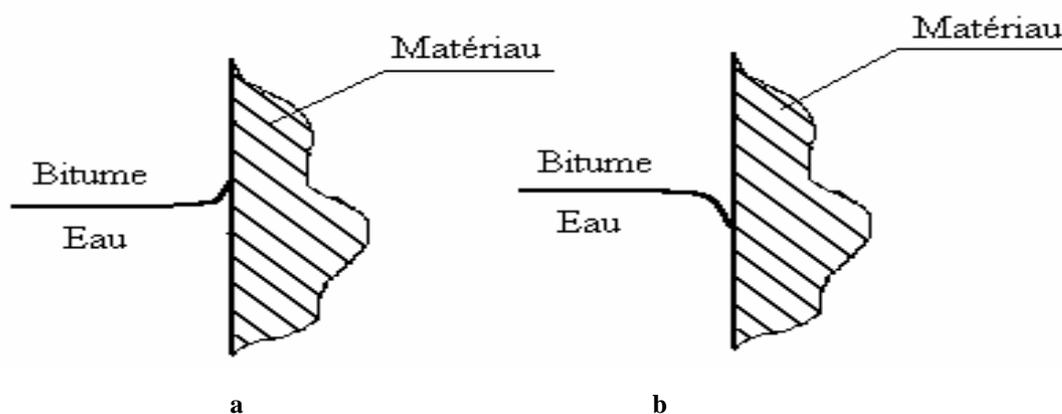


Figure IV.5. a : Mouillage préférentiel par l'eau.

b : Mouillage préférentiel par le bitume

Dans les applications routières du bitume, nous avons besoin de l'adhésivité passive ; par contre, l'adhésivité active n'est pas toujours nécessaire (cas des enrobés à chaud).

IV.4.8.2. Adhésivité des émulsions

L'adhésivité d'une émulsion dépend :

- De la nature du bitume employé et des additifs éventuels ;
- De la nature et de la quantité d'émulsifiant employé : l'adhésivité est améliorée par augmentation de la quantité d'émulsifiant ; mais une quantité trop grande d'émulsifiant risque de rendre l'émulsion trop stable ;
- Du pH de l'émulsion : chaque émulsifiant a un intervalle de pH où l'adhésivité est la plus grande ;
- De la granulométrie de l'émulsion : pour les émulsions cationiques, l'adhésivité est d'autant plus grande que l'émulsion a tendance à la monodispersion ;
- De la nature minéralogique du granulat, de sa propreté, de son humidité et de ses conditions de stockage.

IV.4.9. La viscosité

La viscosité est une caractéristique importante qui intervient :

1. Pour le transfert à travers les canalisations, le pompage et le répandage ;
2. Pour l'utilisation sur le chantier :
 - Un enduit superficiel exige une émulsion relativement visqueuse afin d'éviter les pertes de liant ;
 - Une imprégnation, au contraire, exige une émulsion fluide pouvant pénétrer dans le corps de chaussée.

Facteurs influençant la viscosité

En plus de la température,

a. La teneur en liant

La viscosité d'une émulsion croît avec la teneur en liant..

b. La granulométrie de l'émulsion

Elle est d'autant plus importante que la courbe granulométrique est plus resserrée et que l'émulsion est plus fine.

c. La nature de l'émulsifiant

Celle-ci intervient de façon complexe puisqu'elle influe sur la granulométrie, la viscosité de la phase dispersante et sur les qualités du film interfacial.

IV.4.10. Caractéristiques physico-chimiques

IV.4.10.1. Le pH des émulsions

L'adhésivité des émulsions cationiques est plus grande pour des pH compris entre 3 et 5 que pour des pH inférieurs à 3 ; à l'inverse, la stabilité est meilleure pour des pH plus bas.

IV.4.10.2. Conductivité des émulsions

Elle permet, par comparaison des valeurs de pH, de détecter la présence de sels minéraux dissous et peut expliquer certaines instabilités.

IV.4.10.3. La granulométrie

C'est une des caractéristiques les plus importantes des émulsions, car elle détermine nombre de propriétés technologiques : viscosité, stabilité et même adhésivité.

- La viscosité d'une émulsion est d'autant plus grande (toutes choses restant égales par ailleurs) que l'émulsion est plus fine et son écart type plus petit ;
- La stabilité varie en fonction directe de la finesse.

On peut mesurer les tailles des particules par deux sortes de méthodes :

- Les méthodes globales : opacité et hématimétrie ;
- Les méthodes par dénombrement : tel le comptage avec l'appareil "Coulter".

IV.4.11. Avantage économique

Le prix de revient à la tonne d'une émulsion de bitume se situe entre 14 849,06 à 17 070,00 DA TTC selon la nature de l'émulsion ; elle est très coûteuse par rapport au bitume pur (enrobé à chaud). Il faut savoir faire la différence sur l'emploi de ces liants à travers les chantiers. Le dispositif en centrale d'enrobés à chaud consomme pour la fabrication d'une tonne de grave-bitume 3 fois plus qu'une grave-émulsion, en calories de chauffage, en équipement, et en moyens humains. Afin de promouvoir l'emploi de cette technique, il est souhaitable que les entreprises de réalisation mettent en œuvre un recueil général sur le coût des prix de revient d'un enrobé à froid par rapport à un enrobé à chaud.

Chapitre V : Méthodes de formulation du sable enrobé

V.1. Formulation d'un béton bitumineux.

V.1.1. Définition.

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

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

V.1.2. Classification générale des enrobés hydrocarbonés.

V.1.2.1. D'après le mode de fabrication.

On distingue [Arrambide et al, 1959] :

- **Les enrobés à chaud** : caractérisés par le passage des granulats dans un tambour sécheur aux fins de chauffage et de séchage. Le liant utilisé peut être un bitume pur fluxé ou fluidifié, un goudron ou un liant composé, mais le plus souvent ce sera un bitume pur ;
- **Les enrobés à froid** : préparés 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 de bitume.

V.1.2.2. D'après la compacité.

On Distingue :

- Dans le cas des enrobés dans lesquels le calibre des plus gros éléments du squelette minéral est compris entre 6,3 et 20 mm :
 - **Les enrobés denses** : dans lesquels le pourcentage de vides est inférieur à 10 %. A l'intérieur de cette catégorie se placent les bétons bitumineux (ou hydrocarbonés), 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 aboutit à une classification résumée par le tableau V-1.

Tableau V-1 : Classification des enrobés hydrocarbonés [Arrambide et al, 1959].

	A chaud	A froid
Compacité > 90 %	Enrobés denses à chaud (D.C) Bétons bitumineux (B.B)	(¹)
Compacité 85 % + 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 supprime la classification basée sur la compacité. On leur attribue le nom général d'enrobé fin. S'il s'agit d'enrobés fins présentant des caractéristiques de recherche de qualité analogues à celles des bétons bitumineux vis-à-vis des enrobés denses, on leur attribue le nom de «micro -béton bitumineux » (ou hydrocarbonés).

- Dans le cas des enrobés dans lesquels le calibre des plus gros éléments du squelette minéral est supérieur à 20 mm :

On se trouvera également en présence de graves -bitume ou de graves -émulsion.

V.1.3. Utilisation des enrobés bitumineux en technique routière.

Les enrobés bitumineux sont utilisés dans les couches de surface des chaussées ou aires de stationnement (construction neuve, renforcements, rechargements et entretien par « emplois partiels ») ou dans les assises de chaussées (couche de base et couche de fondation).

Pour les enrobés bitumineux utilisés en couche de surface ou tout spécialement en couche de roulement, la conception des enrobés bitumineux doit s'efforcer de répondre le mieux possible au triple problème posé [Arrambide et al, 1954]:

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

(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 ultérieurement que cette considération est actuellement mise en défaut.

➤ Résister aux sollicitations engendrées par les agents externes, autres que le trafic : soleil, eau, gel, fondants chimiques (sels de déverglaçage) et produits pétroliers.

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

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

V.1.4. La formulation

V.1.4.1. Principe de formulation

La formulation d'un enrobé 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, du comportement de l'enrobé mis en œuvre, et d'autre part sa durabilité sur la chaussée.

Dans la phase malaxage/répançage, 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 telle que l'imperméabilité, le collage sur le support, une bonne rugosité, une bonne résistance à l'abrasion et à l'orniérage. Ces dernières caractéristiques 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.

V.1.4.2. Critères de formulation

Pour choisir une formulation pour un béton bitumineux destiné pour la couche de roulement, il faut prendre en compte les principaux facteurs:

Type de la structure : Chaussée souple, semi-rigide ou rigide

Épaisseur de la couche : Pour le choix d'une formule d'un enrobé bitumineux, l'épaisseur est un critère important qui est dépendant de la compacité ; plus l'épaisseur est grande plus le compactage est inefficace et la compacité insuffisante.

Les conditions climatiques : conditions d'exploitation hivernale, cycles gel-dégel ainsi que les effets de la température pendant les périodes d'été.

Le site : routes de montagne, de Sahara ou des régions boisées sont très différentes ce qui conduit à bien choisir le type et combinaison des matériaux à utiliser pour chacune d'elles.

V.1.4.3. Méthodologie pour l'étude d'une formulation

Pour étudier une formulation d'un béton bitumineux pur une couche de roulement, trois étapes s'avèrent essentielles :

- La composition granulométrique
- La teneur en liant
- Les caractéristiques de l'enrobé

V.1.4.3.1. La composition granulométrique

Dans l'étude de la formulation d'un enrobé, (squelette minéral lié par un liant hydrocarboné), le premier problème qui se pose est celui de la détermination du meilleur squelette minéral, donc de la composition granulométrique des constituants qui sont le sable, les gravillons et éventuellement des fines d'apport la mieux adaptée à l'application considérée. Pour chaque type de béton bitumineux, la composition granulométrique est définie par le pourcentage de passant aux différents tamis. Des fuseaux de spécification (Tableau V-2) sont mis en place pour délimiter les points de la courbe granulométrique.

Tableau V-2 : Fuseaux de spécification

Tamisât (mm)	BB 0/10		BB 0/14	
	Inférieur	Supérieur	Inférieur	Supérieur
14	-	-	94	100
10	94	100	72	84
6.3	65	75	50	66
4	45	60	40	54
2	30	45	28	40
0.08: couche de roulement	7	10	7	10
0.08 : couche de liaison	6	9	6	9

La méthode la plus couramment utilisée consiste, en partant des données granulométriques des matériaux, à faire passer la courbe du mélange par quelques points obligés, c'est à dire à viser certaines valeurs de refus ou de tamisât à deux ou trois tamis bien choisis, et en général à ajuster cette courbe dans un fuseau de spécifications (Tableau V-3), ou essayer de la placer dans une certaine partie de ce fuseau.

Tableau V-3 : Courbes modèles retenues

Courbe modèle	Forme mathématique
1. Courbe 5/8	$Y=100(x/D)^{5/8}$
2. Fuller	$Y=100(x/D)^{0.5}$
3. Nijboer	$Y=100(x/D)^{0.45}$
4. Talbot	$Y=100(x/D)^n$
5. Furnas	$Y=100(b^n-1)/(b^l-1)$
6. Bolomey	$Y=a+(100-a)(x/D)^{0.5}$
7. Médiane fuseau	Y=PCP moyen

Y : le pourcentage du passant

X : le tamisât

V.1.4.3.2. La teneur en liant (Pl) :

La teneur en liant d'un enrobé bitumineux est définie par une étude de laboratoire; elle est calculée à partir du module de richesse (k) et de la surface spécifique conventionnelle (Σ), et d'un coefficient correcteur (α) de la masse volumique réelle des granulats MVr à l'aide de la formule suivante :

$$Pl = k \cdot \alpha \cdot (\Sigma)^{1/5} \quad \text{avec,}$$

- Coefficient correcteur (α) :

C'est un coefficient correcteur de la masse volumique réelle des granulats :

$$\alpha = 2,65 / MVr$$

Mvr : Masse volumique réelle des granulats

- Surface spécifique conventionnelle (Σ)

Elle est exprimée en m^2/kg et dans laquelle on a les pourcentages pondéraux des éléments :

$$100 \Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f$$

avec, G : éléments supérieurs à 6,3 mm ;

S : éléments compris entre 6,3 mm et 0,315 mm ;

s : éléments compris entre 0,315 mm et 0,08 mm ;

f : éléments inférieurs à 0,08mm ;

Le module de richesse (k) représente l'épaisseur relative du film du liant déposé sur la surface des granulats. La valeur du module de richesse à prendre en compte est fonction du type d'enrobé retenu ; il doit être supérieur ou égal à une valeur minimale de 3,3 pour le BB 0/14 par exemple.

N.B : pour déterminer la teneur optimale du liant pour une nouvelle formulation de l'enrobé, il est nécessaire de faire des tâtonnements expérimentalement afin de déduire la valeur du module de richesse vérifiant les valeurs minimales exigées.

En conclusion

Une formulation d'un enrobé bitumineux passe par les étapes suivantes:

- Choisir la granulométrie de l'ossature plus ou moins serrée (continue) conduisant à un minimum de vides.
- Rechercher la quantité du liant nécessaire pour enrober les granulats (ie capable à la fois d'enrober totalement les grains du mélange et d'en permettre l'agglutination totale suivant le meilleur arrangement) sans qu'il y'ait excès de liant qui pourra conduire à un enrobé trop visqueux.

V.1.4.3.3. Les caractéristiques de l'enrobé

Pour adopter une formulation pour un enrobé bitumineux avec des constituants nouveaux, des seuils minimaux des performances aussi bien pour les constituants que pour l'enrobé sont exigés. Il est donc nécessaire d'effectuer une étude à caractère général qui fait appel aux essais suivants :

V.1.4.4. Les essais sur enrobés bitumineux.

L'enrobé bitumineux est un matériau hétérogène ; le bitume lui confère un caractère visqueux, alors que sa partie minérale (squelette) est responsable de sa résistance. Pour cerner donc les propriétés des enrobés et l'aptitude qu'ils auront à répondre à une fonction donnée, de nombreux laboratoires de recherche ont mis au point des méthodes d'essais dans le souci d'une meilleure connaissance de certaines propriétés, soit pour chercher l'explication des 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.

On peut distinguer à cet effet deux types d'essais pour caractériser un enrobé en laboratoire :

- Des essais qui simulent le comportement d'un enrobé lors de la mise en œuvre et le compactage : L'essai Marshall, l'essai Duriez, l'essai Hubbard Field et la presse à cisaillement giratoire.
- Des essais qui simulent l'enrobé en service: Les essais Duriez et Marshall empiriques, l'essai d'ornièrreur LCPC, les essais de module et les essais de fatigue.

Les informations délivrées par ces essais sont différentes et le choix de l'essai à faire dépend des caractéristiques recherchées, tout en prenant en compte les raisons de coût et de durée.

V.1.4.4.1. Essais classiques

Sont les essais les plus connus et répandus pour les études de formulation des enrobés bitumineux.

- ***Essai Duriez***

L'essai Duriez consiste à confectionner des éprouvettes cylindriques dans des conditions déterminées, et les soumettre après conservation à l'air libre ou en immersion, à l'écrasement à une vitesse de 1mm/sec, et à la température de 18°C pour déterminer la résistance à la compression simple qui sera dite «stabilité Duriez». (LCPC 1981) (figure V.1).

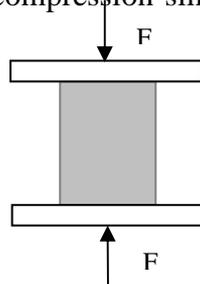


Figure V.1: Essai de compression simple du type LCPC

La charge à la rupture donne la résistance à la compression de l'enrobé confectionné à chaud, elle est déterminée après 8 jours de conservation à sec pour la moitié des éprouvettes et avec immersion pour l'autre moitié.

Le rapport: résistance après immersion, résistance à sec exprime la tenue à l'eau du mélange hydrocarboné testé. Plus ce rapport est élevé, meilleure est la tenue à l'eau du mélange.

Le but de cet essai est de caractériser les qualités de résistance 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 (essai Hubbard Field pour les matériaux fins, et essai Marshall pour les matériaux à base de granulats ronds ou très anguleux).

- **Essai Marshall**

L'essai Marshall est un essai destructif qui permet de comparer des formules diverses de mélange hydrocarboné, et d'évaluer leurs performances à des niveaux de compactage différents. Il permet aussi, dans une certaine mesure, de prévoir si, sous le trafic routier, un mélange hydrocarboné sera stable ou aura tendance à fluer.

L'essai Marshall consiste à écraser à 60°C, entre deux mâchoires, une éprouvette cylindrique de 10cm de diamètre et de 6,3cm de hauteur (Figure V.2). Les mâchoires s'appuient sur deux génératrices opposées et la vitesse d'avancement est constante et égale à 50mm 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'effort de la presse.

Il permet de déterminer les valeurs suivantes :

La stabilité Marshall est la valeur de la charge maximale obtenue pour un essai de compression exercée suivant une génératrice de l'éprouvette cylindrique préalablement compactée.

Le fluage Marshall est l'affaissement de cette même éprouvette au moment de la rupture par compression.

La compacité est le rapport des densités apparente et vraie.

L'essai Marshall diffère de l'essai Duriez dans la température de l'essai qui est de 60°C pour l'essai Marshall et de 18°C pour Duriez, et dans le mode d'application de la charge qui y est radiale alors qu'elle est axiale pour l'essai Duriez.

De plus, le compactage des éprouvettes Marshall, plus énergique que celui Duriez est analogue par ses effets à celui que subissent les matériaux enrobés sur la route.

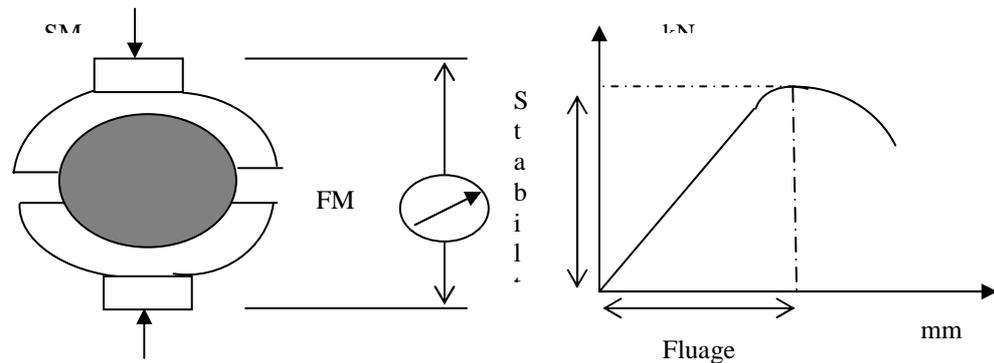


Figure V.2 : Essai Marshall.

Nous signalons que la compacité de l'essai Duriez a été choisie pour donner la compacité exacte du revêtement routier correctement cylindré ou compacté dans les travaux de chantier, juste au moment où le revêtement est livré à la circulation. La compacité Marshall est celle qui correspond à la compacité sur chaussée après un an ou dix-huit mois de circulation.

- **Essai Hubbard Field**

Cet essai consiste à mesurer sous quelle pression une éprouvette de mortier ou enrobé bitumeux, dont les dimensions et la confection sont normalisées, peut fluer à travers un orifice calibré (Norme **ASTM –D-1138**).

La mesure de la stabilité Hubbard Field dans le cas d'un mortier hydrocarboné consiste à mesurer la pression qui provoque l'extrusion ou fluage, d'une briquette de 100g et de 50,8mm de diamètre à travers un anneau de diamètre inférieur de 44,5mm. Cette pression est appliquée à la vitesse de 1 mm/sec sur une briquette, conservée à sec à 18°C pendant 24 heures après sa confection et amenée au moment de l'essai soit à la température de 18°C, soit de 60°C, l'éprouvette est émergée dans l'eau une heure.

On appelle stabilité H.F., la charge exprimée en Kg qu'il faut exercer pour provoquer ce fluage.

Ces trois essais sont réalisés pour l'étude expérimentale des enrobés bitumineux, et le choix de la meilleure formulation à adopter.

V.1.4.4.2. Essais spécifiques

Ce sont des essais mécaniques modernes qui tentent de palier les insuffisances de solution des problèmes et combler les vides relevés par les essais classiques. Ils permettent également de déterminer les caractéristiques intrinsèques du comportement du matériau.

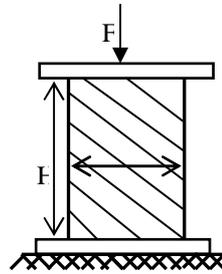
- **Essai de fluage statique uniaxial**

Au cours de l'essai de fluage statique uniaxial (Figure IV.3), l'éprouvette est soumise à une contrainte axiale statique pendant une période de temps (Figure IV.4), au cours de laquelle

la contrainte est contrôlée et enregistrée. L'éprouvette est soumise à une charge constante pendant une heure de chargement et une heure de déchargement, et on enregistre les déformations de l'éprouvette par rapport à sa hauteur initiale.

La déformation relative égale au rapport $\Delta H/H$ peut être représentée en fonction du temps.

Figure V.3: Essai de fluage



σ_0 : Contrainte

$\varepsilon_{\text{Totale}}$: Déformation totale enregistrée après 1 heure de chargement

$\varepsilon_{\text{init}}$: Déformation initiale enregistrée après 15 secondes de chargement

$\varepsilon_{\text{finale}}$: Déformation finale complémentaire

ε_{irr} : Déformation irréversible ou permanente

ε_{rev} : Déformation réversible.

Les déformations pendant l'essai sont calculées par : $E(t,T) = \frac{\Delta h}{h_0} * 1000$

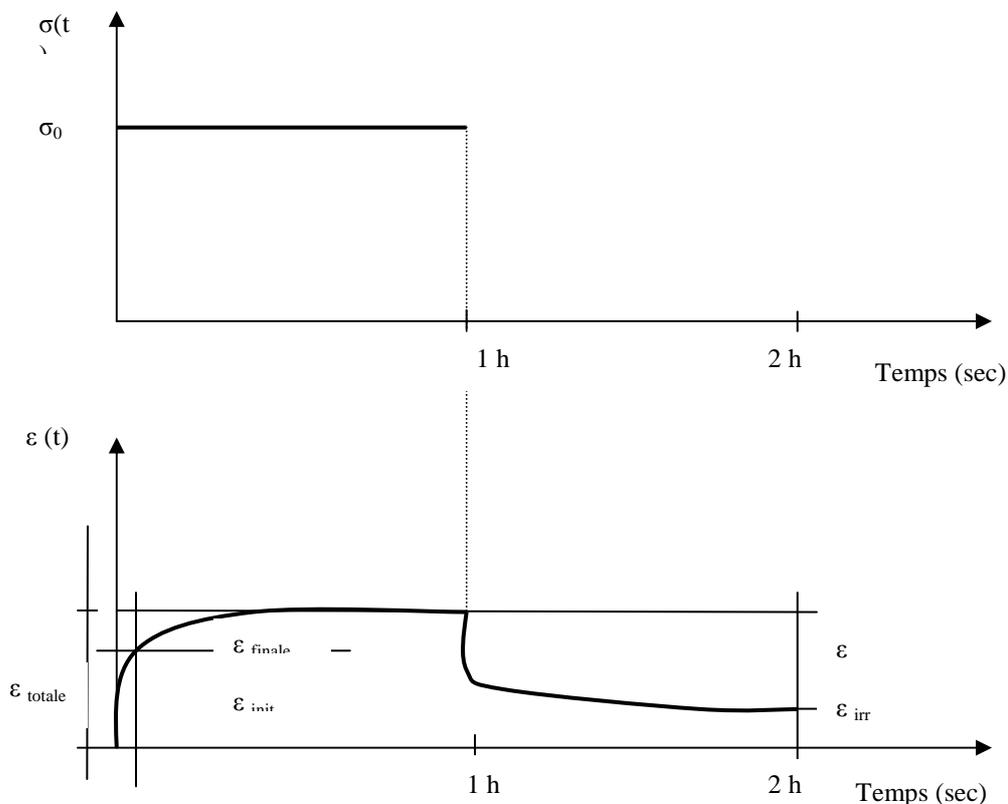


Figure V.4: Contrainte appliquée et composantes de la déformation lors de l'essai de fluage statique (chargement et déchargement)

Avec : $\varepsilon(t,T)$: déformation axiale de l'éprouvette durant le temps de chargement (t) en secondes à la température (T) en °C.

h_0 : hauteur initiale de l'éprouvette.

$\Delta h/h_0$: déformation axiale (changement de distance entre les surfaces chargées).

• Essai de fatigue

Le passage répété de charges de poids lourds sur les chaussées entraîne des dégradations progressives des structures et/ou des matériaux. Le dimensionnement des chaussées est déterminé, en partie, en fonction des caractéristiques évaluées en laboratoire par un essai normalisé [Farcas F., 1998]. On appelle résistance à la fatigue, à N cycles d'un enrobé bitumineux, la valeur de la sollicitation contrainte ou déformation pour laquelle le matériau peut supporter N cycles puis se rompre (Figure V.5). Ce nombre de cycles de chargement N entraînant la rupture est souvent appelé durée de vie; la fatigue est donc un endommagement engendré par la répétition des sollicitations.

Les essais de fatigue sur enrobés sont réalisés par flexion sur des éprouvettes trapézoïdales encastrées à leur base en répétant un niveau de contrainte ou de déformation jusqu'à rupture de l'éprouvette. La température de l'essai est souvent 10°C et la fréquence de 25Hz.

- L'essai peut être effectué en exerçant un effort F_0 en tête de l'éprouvette que l'on maintient constant durant la totalité de l'essai. Dans ce cas, et compte tenu de l'endommagement de l'éprouvette, « le déplacement » de l'éprouvette croît constamment pendant l'essai. On dit que l'essai est effectué à contrainte constante.
- L'essai peut aussi être effectué en imposant en tête de l'éprouvette un déplacement que l'on maintient tout au long de l'essai. l'effort exercé F décroît alors constamment pendant l'essai. On dit alors que l'essai est effectué à déformation constante.

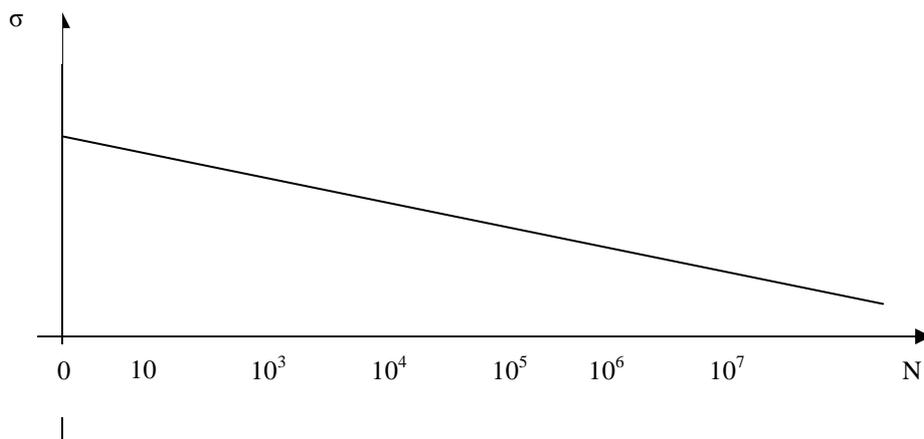


Figure V.5 : Variation de la résistance à la rupture en fonction du nombre de cycles

• Fluage dynamique

L'essai de fluage dynamique (Figure V.6) permet de :

- Établir une loi complète du fluage dynamique d'un enrobé et de prévoir son comportement au sein de la chaussée.
- Faire un essai type pour choisir une formulation optimale du point de vue de l'orniérage.

L'essai de fluage dynamique permet d'étudier, à différentes températures, la vitesse de déformation permanente d'un enrobé bitumineux.

Il s'effectue sur des éprouvettes cylindriques de 10 cm de hauteur et 13,7 mm de diamètre placées dans une enceinte isotherme, et soumises à une contrainte verticale sinusoïdale de compression σ_v d'amplitude et fréquence constantes.

Sous l'effet du chargement, une contrainte statique et isotrope σ_h est appliquée et l'échantillon subit une déformation axiale.

La courbe de fluage est donnée par $\varepsilon = \Delta H_0/H_0$ en fonction du nombre de cycles de chargement, où,

ε : déformation permanente, H_0 : hauteur initiale de l'éprouvette et ΔH_0 : variation de la hauteur associées à la partie permanente de la déformation.

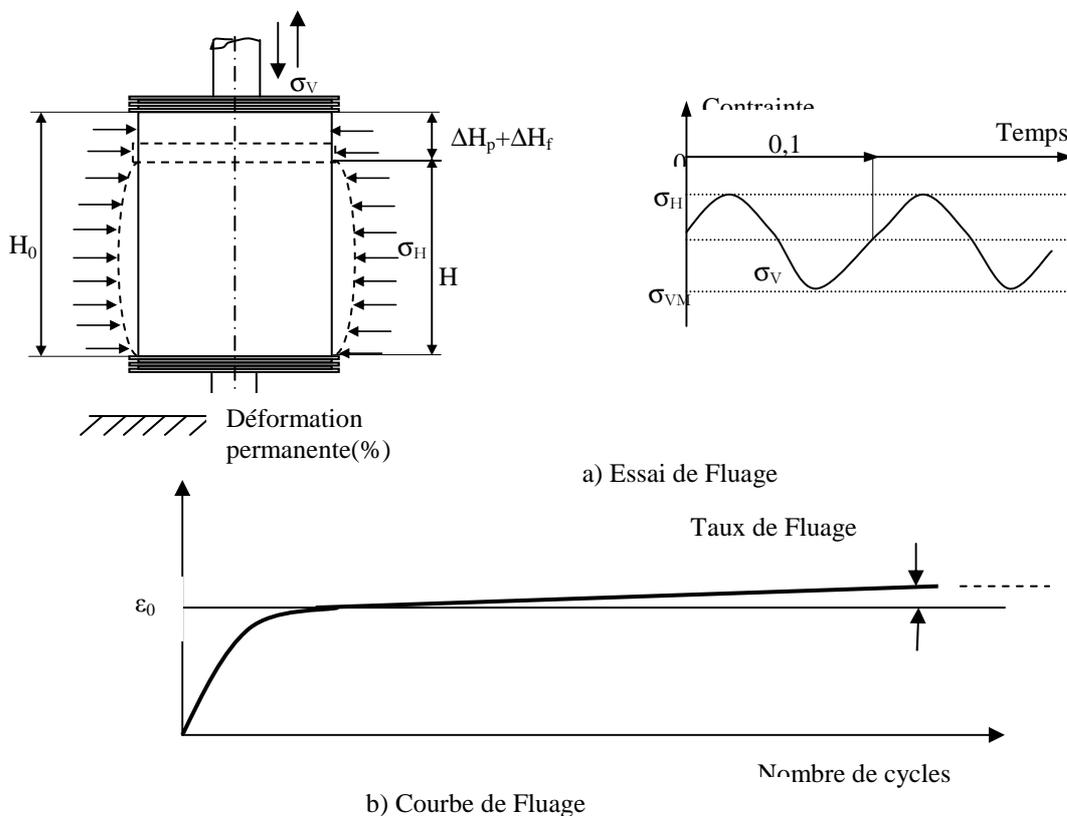


Figure IV.6 : Essai et courbe de fluage dynamique

- **L'essai de traction directe**

L'objectif principal de l'essai de traction directe est de permettre de comparer des enrobés du point de vue dimensionnement et résistance à la 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 (**Linder**, 1977).

La machine est mue par un moteur asynchrone, muni d'une boîte de vitesse, qui délivre à l'éprouvette un signal de type $\epsilon(t) = a t^n$

Cet essai permet d'atteindre une valeur de la résistance à la rupture en traction directe (Figure IV.7). Il permet en outre de déterminer le module dans le domaine linéaire, en fonction du temps de chargement et à plusieurs températures.

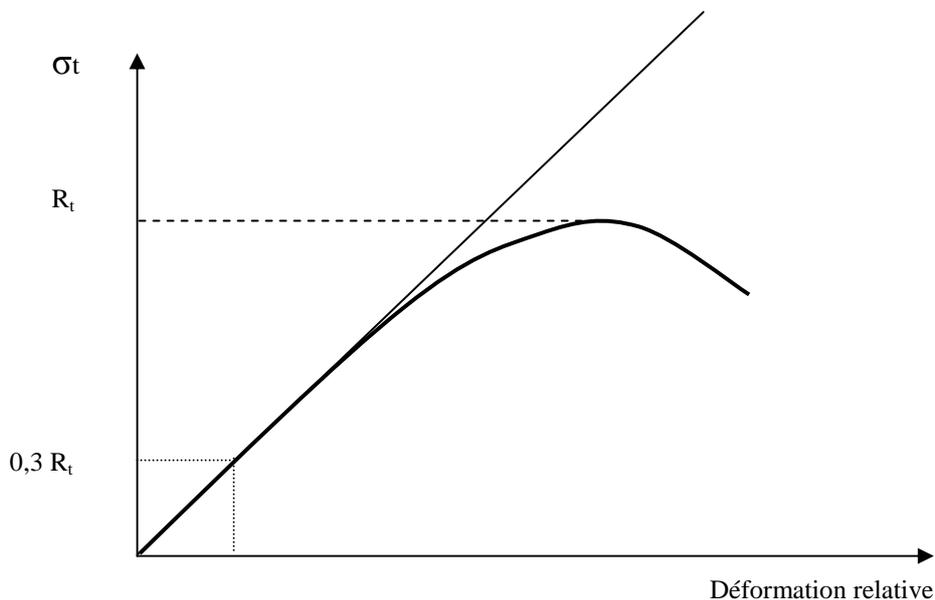


Figure V.7 : Courbe contrainte - déformation moyenne

V.2. Formulation du sable bitume

V.2.1. Définition

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

V.2.2. Détermination de la teneur en liant

La teneur en liant 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 le filler proprement dit et dans une certaine mesure par le sable fin. Le procédé de formulation adopté est celui de Duriez ; la teneur en liant sera définie lors de l'étude en laboratoire en utilisant la formule suivante et dépendra de la granulométrie du matériau minéral, plus précisément de sa surface spécifique qui est en rapport direct avec la teneur en filler :

$$P = \alpha \cdot k \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$$

avec,

α : coefficient de correction destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats $\alpha = \frac{2,65}{\gamma_G}$, où γ_G : masse volumique réelle des granulats

K : module de richesse.

Σ : surface spécifique conventionnelle: $\Sigma = 4,75 + 1,3 f$ (formule de Duriez) où, f : pourcentage de fines ($d < 80 \mu\text{m}$)

- **Module de richesse K**

Dans l'expression précédente la valeur de $k = \frac{P}{\alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma}}$ est appelée «module de richesse

en liant» ou en abréviation module de richesse. Il est caractéristique de l'épaisseur du film de liant enrobant les grains d'agrégats (le matériau minéral). Son choix est sous la dépendance de la déformabilité, du climat, de la nature et de l'intensité du trafic.

A titre indicatif, les valeurs de K généralement adoptées sont les suivantes : [Arrambide et al, 1959]

$K = 3,75$ route très circulée ;

$K = 3,85$ piste d'envol;

$K = 4,00$ route peu circulée ;

$K = 4,25$ revêtements minces sur sous couche déformable.

V.2.3. Calcul de la compacité des éprouvettes

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 donnée par la formule :

$$D_m = \frac{100}{\frac{p_b}{d_b} + \frac{p_a}{d_a}}$$

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

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

où, d_m/D_m : est le volume vrai de l'agrégat dans l'éprouvette de volume unité.

La compacité C ou pourcentage volumétrique des pleins est : $C = 100 - V_m$

V.2.4. Notion de stabilité

La stabilité des matériaux enrobés est la résistance aux déformations par compression, flexion, traction, cisaillement ou poinçonnement. En pratique, elle est évaluée au moyen des essais au laboratoire.

V.2.5. Conclusion

Connaissant les définitions et les techniques concernant le sable bitume, après avoir identifié et classé les matériaux utilisés et après avoir étudié la méthode de formulation, il nous est possible de passer à l'étape suivante qui consiste à confectionner un enrobé en tenant compte des paramètres déjà cités concernant les matériaux et l'enrobé.

V.3. Formulation d'un béton de sable

Formuler un béton consiste à choisir des constituants et à les proportionner en vue d'obtenir des propriétés spécifiques répondant à des critères techniques et économiques. [Chanvillard & Basuyaux, 1996].

Les approches de formulation des bétons de sable sont complétées par, la méthode de formulation théorique basée sur l'optimisation de la compacité de squelette granulaire, et la méthode expérimentale basée sur la réalisation de gâchées successives.

V.3.1. Description de quelques approches de la formulation du béton de sable

V.3.1.1. Approche de B.COURET en 1982: [Couret, 1982]

Son objectif, est de formuler un béton de sable à usage routier. B. COURET a adopté comme formulation de base la composition d'un mortier ISO (0,5 part (en poids) d'eau, une part de ciment et trois parts de sable normal) dosé à 450 Kg/m³.

V.3.1.2. Approche de P.DELUDE en 1984 : [Delude, 1984].

L'objectif, que s'est fixé P.DELUDE pour la formulation de son béton était la recherche d'un squelette granulaire optimal. Comme procédure de formulation, il déterminait par approximations successives l'ensemble des proportions relatives des constituants solides inertes, pour lesquelles le dosage en ciment et en eau est fixé.

La courbe de la figure V.8 présente la variation du temps d'écoulement au maniabilimètre à mortier LCL en fonction du rapport $x = F/S$, où :

F : Représente la teneur volumique en filler.

S : Représente la teneur volumique en sable.

La courbe présente dans la zone de son minimum une partie plus ou moins aplatie. C'est dans cette zone où DELUDE a choisi les formules retenues pour des essais complémentaires de détermination des caractéristiques physiques et mécaniques.

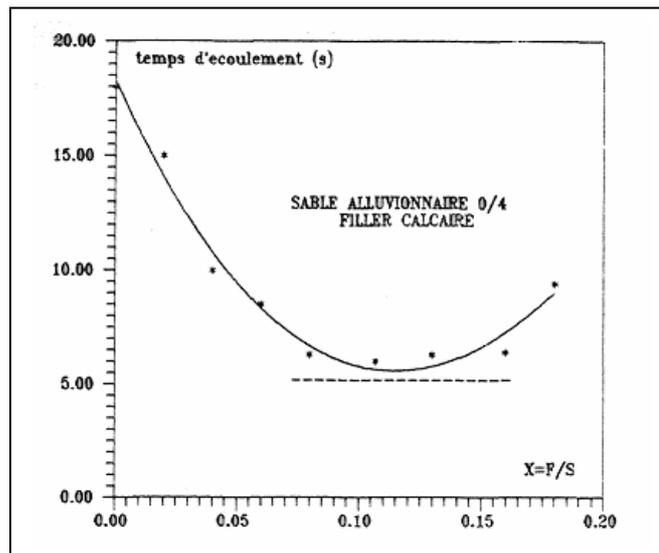


Figure V.8. Courbe représentative de la variation du temps d'écoulement en fonction du rapport volumétrique F/S

V.3.1.3. Approche de GUINEZ, GLUAIS et DELUDE en 1984 [Guinez, Gluais et Delude, 1984].

Cette approche est basée sur l'augmentation de la compacité du béton par l'adjonction d'un filler.

L'étude a été menée sur un sable alluvionnaire 0/3 mm pour être ensuite étendue à d'autres types de sable. L'objectif recherché était l'obtention d'une compacité maximale, pour que les caractéristiques physiques et mécaniques soient meilleures.

- La première étape consistait à rechercher par tâtonnements un mélange de sable, ciment et eau (formulation de base) possédant une bonne maniabilité et une résistance à la compression voisine de celle des briques et des parpaings (autour de 8 MPa). Cinq formules dosées respectivement de 450, 350, 300, 250 et 200Kg de ciment au m^3 ont été soumises à des essais mécaniques.

- La deuxième étape consistait à améliorer les performances de la formulation de base par la recherche de la meilleure correction granulaire possible, avec l'introduction du type de filler qui convient.

Pour cela, trois types de fillers (calcaires), différents par leurs granulométries ont été utilisés à divers dosages.

Les dosages en ciment et en eau ont été fixés à 300Kg/m^3 et 240litres/m^3 respectivement. Les quantités de sable et de filler sont variables.

Les fillers employés avaient les caractéristiques granulométriques suivantes :

- Filler V : le plus fin, 75% des grains inférieurs à 20 microns.
- Filler R : 62 % des grains inférieurs à 40 microns.
- Filler F₃ : 20 % des grains inférieurs à 40 microns et 75 % inférieurs à 200 microns.

C'est la correction par le filler le plus fin (filler V) qui a donné les meilleurs résultats mécaniques et rhéologiques :

- Dans la troisième étape, la quantité de ciment a été réduite à 250 Kg/m^3 et divers adjuvants (plastifiants) ont été utilisés.

V.3.1.4. Approche de J.J.CHAUVIN en 1987 : [Chauvin, 1987].

Pour formuler ses bétons de sable, J.J.CHAUVIN s'était fixé au préalable le dosage en ciment à 350 kg/m^3 et 250 litres /m^3 respectivement ; Le dosage en eau a été choisi arbitrairement.

Il a ensuite étudié les relations existant entre la nature et le dosage en fillers d'un coté, et les principales caractéristiques du béton de l'autre coté (résistance, compacité et maniabilité).

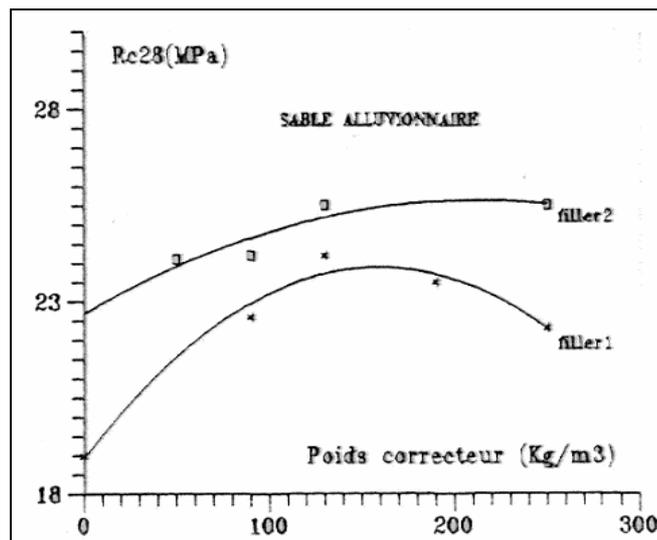


Figure V.9. Effet de la nature et du dosage en fillers sur la résistance mécanique. Filler 2 plus fin que filler 1

V.3.2. Méthode théorique pour la formulation des bétons de sable [Sablocrete, 1994]

V.3.2.1. La compacité et la formulation

Dans le béton, les granulats jouent le rôle d'ossature dans laquelle la pâte assure dans un premier temps un rôle rhéologique (cohésion et fluidité) qui donne au béton frais les propriétés d'agglomération et de maniabilité, puis un rôle de colle permettant de développer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton durci.

La formulation d'un béton consiste à optimiser le squelette granulaire selon un choix judicieux des proportions de sable et de gravier ensuite à combler la porosité de cet empilement avec la pâte de ciment. Cette pâte elle-même étant caractérisée par le rapport $\frac{E}{C}$ pour viser une maniabilité à court terme et une résistance et durabilité à long terme.

Le problème de la formulation d'un béton se pose principalement en terme d'optimisation de la compacité du squelette granulaire. Cette compacité définie comme le rapport du volume solide sur le volume total, correspond au complément à l'unité de la porosité.

Au début du 20^{ème} siècle, CAQUOT a pu établir, à partir de résultats expérimentaux, une relation mathématique entre le volume des vides (v) d'un mélange granulaire et son étendue granulaire (d/D) tel que :

$$v = v_0 \left(\frac{d}{D} \right)^{1/5}$$

où, d : correspond à la dimension du tamis retenant 90 % des granulats.

v_0 : constante empirique égale à 0,5.

D : correspond à la dimension du tamis retenant 10 % des granulats.

Cette formule sous-entend que le mélange défini par son étendue granulaire est optimisé (sans voir la répartition des grains à l'intérieur de cette étendue granulaire).

Cette formule est à la base de nombreuses méthodes de formulation des bétons qui consistent généralement à définir des courbes granulaires de référence. Nous citerons pour exemple les méthodes de BOLOMEY, FAURY, DREUX....etc.

Dans le cas des bétons de sable, les constituants solides sont le sable, les fines d'addition et le ciment ; les fines d'addition étant de dimensions voisines de celles du ciment. L'application directe des méthodes de formulation adaptées aux bétons ordinaires conduit généralement à des estimations du dosage des constituants déraisonnables. Il faut donc adapter la démarche de formulation pour ces bétons en repartant de la base et principalement à partir de la formule de CAQUOT.

V.3.2.2. Estimation du dosage en fines d'un béton de sable

Dans cette étape, on va optimiser la compacité des constituants solides du béton de sable. Pour ce faire, ces constituants sont séparés en deux fractions, les fines regroupant

l'ensemble des grains de tailles inférieures à 80 µm et le sable couvrant l'étendue granulaire 80 µm/D (D étant défini ici comme le diamètre maximal du sable).

Remarque : Les fines sont constituées de ciment, de la fine d'addition et de la fraction du sable inférieure à 80 µm, si la fine d'addition comporte des grains de taille supérieure à 80 µm, cette fraction se retrouve intégrée au sable.

Considérant l'étendue granulaire du sable, il est alors évident qu'il présente une porosité (ps) définie par la formule de CAQUOT, soit : $p_s = 0,75 \left(\frac{0,08}{D} \right)^{1/5}$ (En pourcentage volumique)

0,75 : Est la valeur de la constante expérimentale qui donne la bonne estimation en terme de porosité.

Le dosage volumique optimal en fines cherchera à combler cette porosité afin d'optimiser la compacité de l'ensemble. A ce niveau, les fines complètent l'étendue granulaire du squelette solide.

Moyennant quelques hypothèses simplificatrices, en désignant par $[fines]$ le volume de l'ensemble des particules inférieures à 80 µm et $[v]$ le volume de vides associé à l'empilement de ces fines, CAQUOT a obtenu le résultat suivant : $[fines] = [v]$

La porosité des fines est généralement proche de la valeur 50 %.

Le dosage optimal en fines est : $[fines] = 0,38 \left(\frac{0,08}{D} \right)^{1/5}$

La constante « 0,38 » a une précision de $\pm 0,10$.

Cette formule montre que le dosage en fines dépend surtout de la limite supérieure de l'étendue granulaire, on voit clairement que plus le diamètre D diminue (Figure V.10), plus le dosage en fines augmente et devient rapidement excessif en terme de ciment seul.

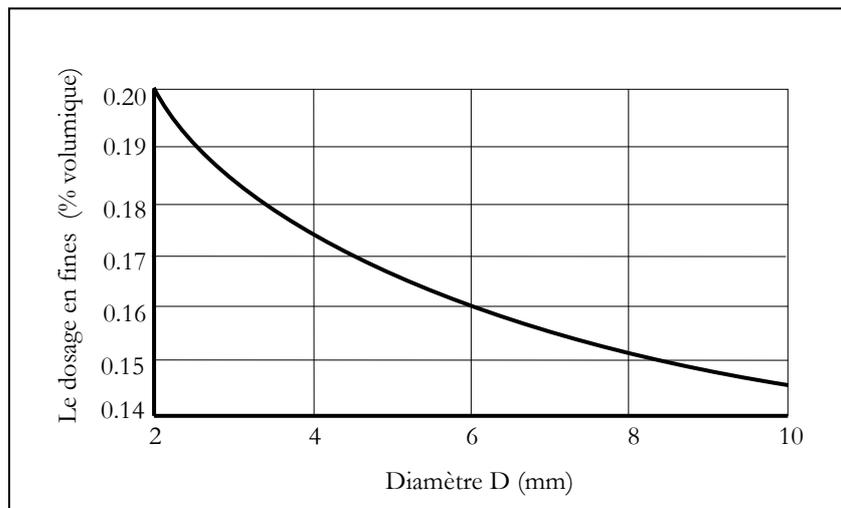


Figure V.10. Influence du diamètre D du sable sur le dosage en fines. [Sablocrete, 1994]

V.3.2.3. Porosité et dosage en eau d'un béton de sable

Dans le béton, le squelette granulaire y compris les fines étant optimisé présente toujours une certaine porosité.

En admettant que les vides intergranulaires se décomposent en la somme d'un volume d'eau (e) et d'un volume de vides piégés (v), la porosité minimale théorique du béton est donnée par la relation suivante, issue une nouvelle fois des travaux sur la compacité de CAQUOT:

$$(e + v)_{\min} = 0,8(d/D)^{\frac{1}{5}}$$

d/D : l'étendue granulaire y compris les fines.

Le calcul de la porosité minimale nécessite la valeur de d, borne inférieure de l'étendue granulaire (Figure IV.11). L'estimation de cette valeur est délicate, compte tenu des effets de floculation dans l'eau qui peuvent se produire à l'échelle des fines particules. Ainsi, dans le cas de mélange totalement défloculé, d peut être défini comme la moyenne harmonique de la dimension des grains du constituant le plus fin.

La valeur de d est donnée comme suit :

- ✓ Si le mélange est défloculé par l'utilisation d'un adjuvant :

$$d = \frac{60}{f \cdot \rho} \text{ (mm)}$$

avec, f : La finesse de Blaine des fines (cm^2/g)
 ρ : La masse volumique des fines (g/cm^3).

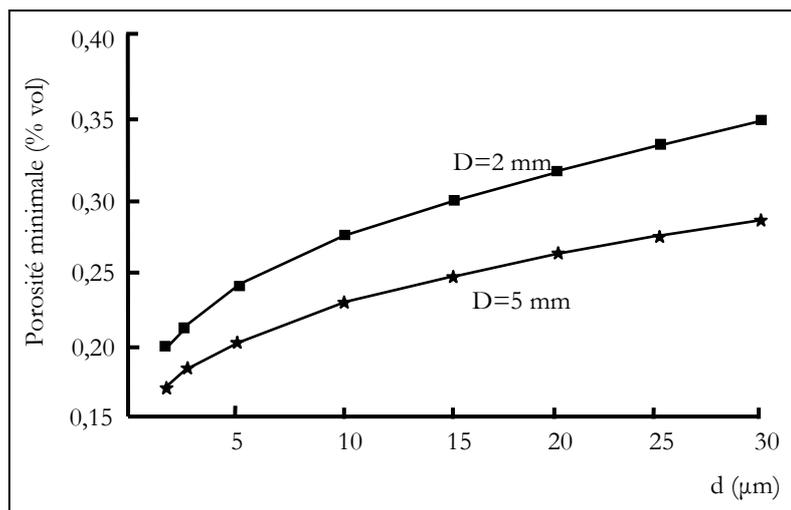


Figure V. 11: Influence de la dimension d sur la porosité minimale du béton pour deux tailles de sable [Sablocrete, 1994]

- ✓ Si le mélange n'est pas défloculé, alors il faut prendre pour d une estimation de la dimension des floccs entre 0,020 et 0,025 mm.

Finalement, pour estimer le dosage en eau, il faut préalablement évaluer la quantité d'air piégé. Dans le cas des bétons de sable, cette quantité est légèrement supérieure à ce qu'elle est dans les bétons ordinaires. Un ordre de grandeur peut être obtenu par la formule suivante, qui conduit à des teneurs en air de l'ordre de 3 à 5%.

$$[\text{vides}] = k [\text{eau}] \quad (\text{l/m}^3).$$

avec, k compris entre 0,2 et 0,25.

En ce qui concerne l'estimation du dosage en sable, il suffit de compléter au mètre cube la somme des dosages des constituants fines, eau et vides. Nous avons alors:

$$[\text{sable}] = 1000 - [\text{fines}] - [\text{eau}] - [\text{vides}] \quad (\text{l/m}^3)$$

V.3.3. Méthode expérimentale de formulation [Sablocrete, 1994].

La méthode expérimentale, doit permettre de formuler un béton de sable mais son but n'est pas d'expliquer ou de formaliser les phénomènes qui entrent en jeu dans la formulation des bétons.

D'autres méthodes expérimentales existent, elles peuvent différer en fonction des approches théoriques et des habitudes de travail, toutefois, l'objectif reste le même : formuler un béton qui soit le plus compact possible, et par conséquent possédant de bonnes performances.

Dans cette méthode, on travaille à dosage en ciment fixé, de manière à mieux répondre aux prescriptions contractuelles ou normatives qui imposent bien souvent un dosage minimum.

Cette méthode est une adaptation de la méthode dite BARON-LESAGE, elle est itérative et est basée sur la réalisation de gâchées légères. Les gâchées sont caractérisées par des mesures de la maniabilité, au maniabilimètre à mortier LCL, et de la masse volumique apparente.

Diverses formulations de bétons de sable ont déjà été réalisées par cette méthode, on cite à titre d'exemple : le béton de pieux, le béton routier, le béton de projection... etc. et ont donné pleine satisfaction.

Les différentes étapes de la formulation sont:

V.3.3.1. Détermination d'une formule de base sans fines d'addition

Dans cette partie de la méthode, nous chercherons à déterminer une formule de un mètre cube, constitué de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvants, ayant une maniabilité adéquate.

V.3.3.1.1. Dosage en ciment

Les prescriptions contractuelles ou normatives imposent très souvent un dosage minimum en ciment par mètre cube de béton, en fonction du type d'ouvrage ou bien de l'agressivité

du milieu. On choisit donc de travailler avec un dosage en ciment fixé qui ne variera pas tout au long de l'étude, on le note : C (Kg/m³).

V.3.3.1.2. Dosage en eau

A ce stade de la méthode, une valeur approximative du dosage en eau, E (l/m³), suffit. Pour estimer ce dosage, les praticiens s'appuient sur l'expérience. Par exemple, on peut prendre 220 litres d'eau pour 350 Kg de ciment, et 250 litres pour 400 Kg de ciment.

V.3.3.1.3. Détermination du dosage en sable

Dans cette formule, il faut introduire un fluidifiant réducteur d'eau, au dosage préconisé par le fabricant (N% du poids des éléments inférieurs à 80 µm en extrait sec), qui permettra de défloculer les fines. D'autre part, un béton contient toujours un volume d'air, V_{air}, la teneur en air des bétons de sable est toujours supérieure à celle des bétons ordinaires et se situe entre 5 et 7 % de volume du béton.

Les quantités de ciment, d'eau, d'adjuvant et d'air sont connues, nous devons donc compléter la formule par du sable de manière à obtenir un mètre cube de béton ce qui donne la relation suivante :

$$V_{\text{air}} + V_C + V_E + V_{\text{adj}} + V_{\text{sable}} = 1000 \quad (\text{En litres}).$$

Les masses volumiques des constituants du béton sont connues, alors, on peut connaître la masse de sable pour une formule de un mètre cube du béton S (Kg/m³).

V.3.3.1.4. Réglage de la maniabilité et du rendement de la formule

Lorsqu'on fait la confection de la formule initiale du béton, et la détermination de :

- ✓ La valeur du temps d'écoulement t au maniabilimètre à mortier LCL.
- ✓ La masse volumique apparente réelle du béton (MVAR).

Cette formule doit être corrigée à l'aide de l'équation itérative suivante :

$$s_i = s_{i-1} - \left(MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1} \right) \pm V \times MV_{\text{sable}}$$

Tel que : MVAT et MVAR représentent respectivement la masse volumique apparente théorique et la masse volumique apparente réelle du béton.

Si le temps d'écoulement au maniabilimètre est inférieur à la valeur visée, il faut retrancher un volume V d'eau (+V dans l'équation) ; si le temps d'écoulement est supérieur, il faudra rajouter un volume V d'eau de manière à rendre le béton plus maniable (-V dans l'équation).

Après chaque correction, la masse volumique apparente théorique devra être comparée à la masse volumique apparente réelle.

V.3.3.2. Détermination du dosage en fines d'addition

Il faut maintenant introduire dans le béton les fines d'addition et en définir le dosage optimal à rapport E/C constant ; pour cela, il est nécessaire de réaliser des gâchées de béton de sable avec 5 à 6 dosages en fines dans la plage d'emploi usuelle de ces fines.

L'incorporation des fines doit permettre d'augmenter la compacité du béton, en remplissant les vides.

Notre objectif, est d'obtenir une formule de un mètre cube dans laquelle la masse volumique apparente théorique tend vers la masse volumique apparente réelle, et un temps d'écoulement adéquat.

Pour chaque gâchée, on détermine la maniabilité ainsi que la masse volumique apparente réelle (MVAR) (Figures IV.12 et IV.13) que l'on compare à la masse volumique apparente théorique (MVAT) de la formule. Si besoin, la correction sur le sable s'effectue à l'aide de la formule suivante : $S_i = S_{i-1} - (MVAT_{i-1} - MVAR_{i-1})$

Comme exemple pratique sur cette méthode de formulation, une étude de formulation de béton de sable effectuée au LRPC de Bordeaux.

Dans cette étude, trois différentes fines d'addition ont été utilisées:

- *Fine d'addition N° 1* : Son utilisation conduit à une maniabilité optimale entre 150 et 180 Kg/m³ de fines.
- *Fine d'addition N° 2* : Dans sa plage de dosage (0 à 240 Kg/m³) il n'y pas d'optimum de maniabilité et masse volumique, l'optimum doit exister pour des dosages supérieurs.
- *Fine d'addition N° 3* : Son optimum de maniabilité et de masse volumique est compris entre 60 et 90 Kg/m³ de fines.

On peut résumer toutes les étapes de la formulation théorique sous forme d'organigramme de la figure V.14.

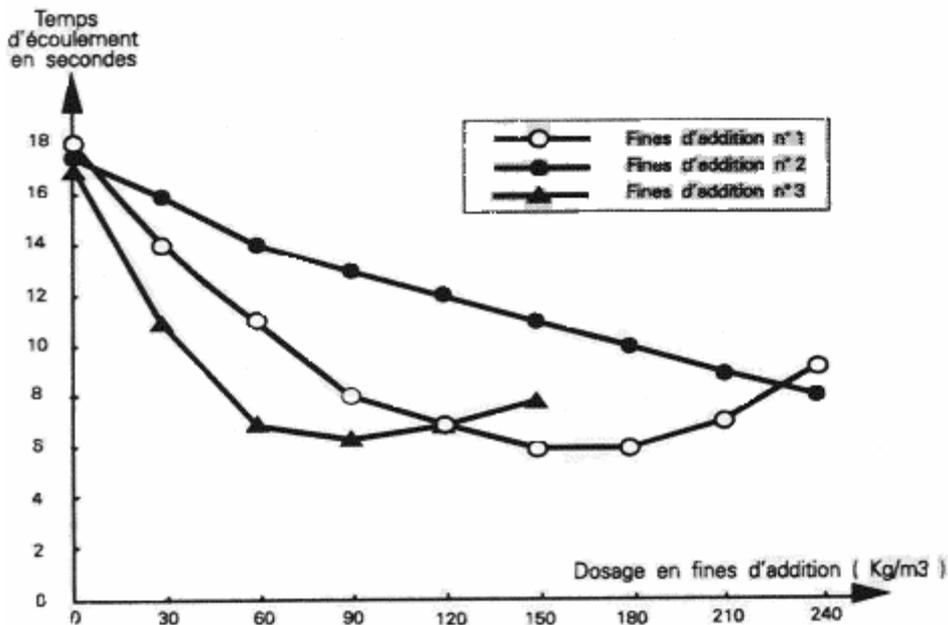


Figure V.12. Evolution de la maniabilité en fonction du dosage en fines d'addition. [Sablocrète, 1994]

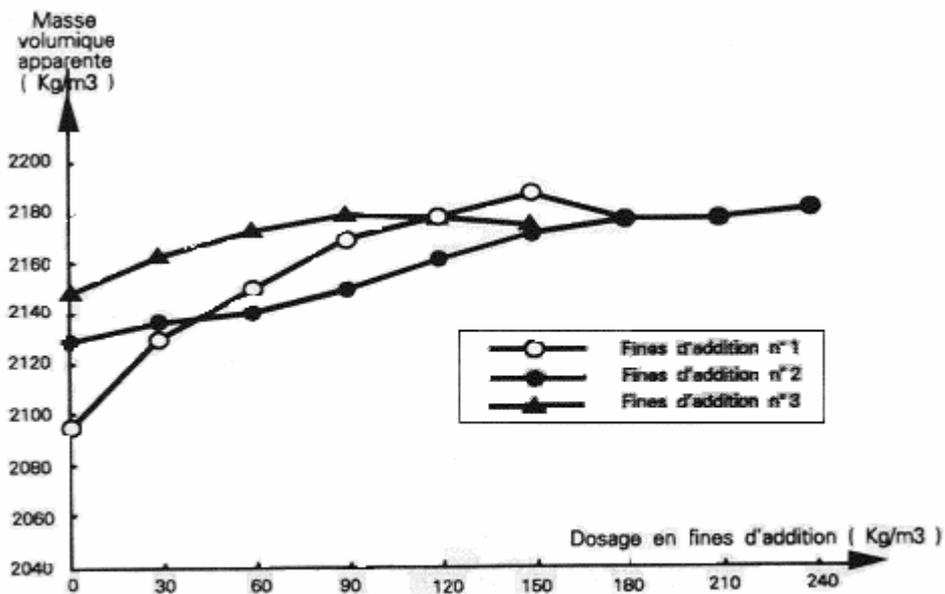


Figure IV.13. Masse volumique apparente en fonction du dosage en fines d'addition. [Sablocrète, 1994]

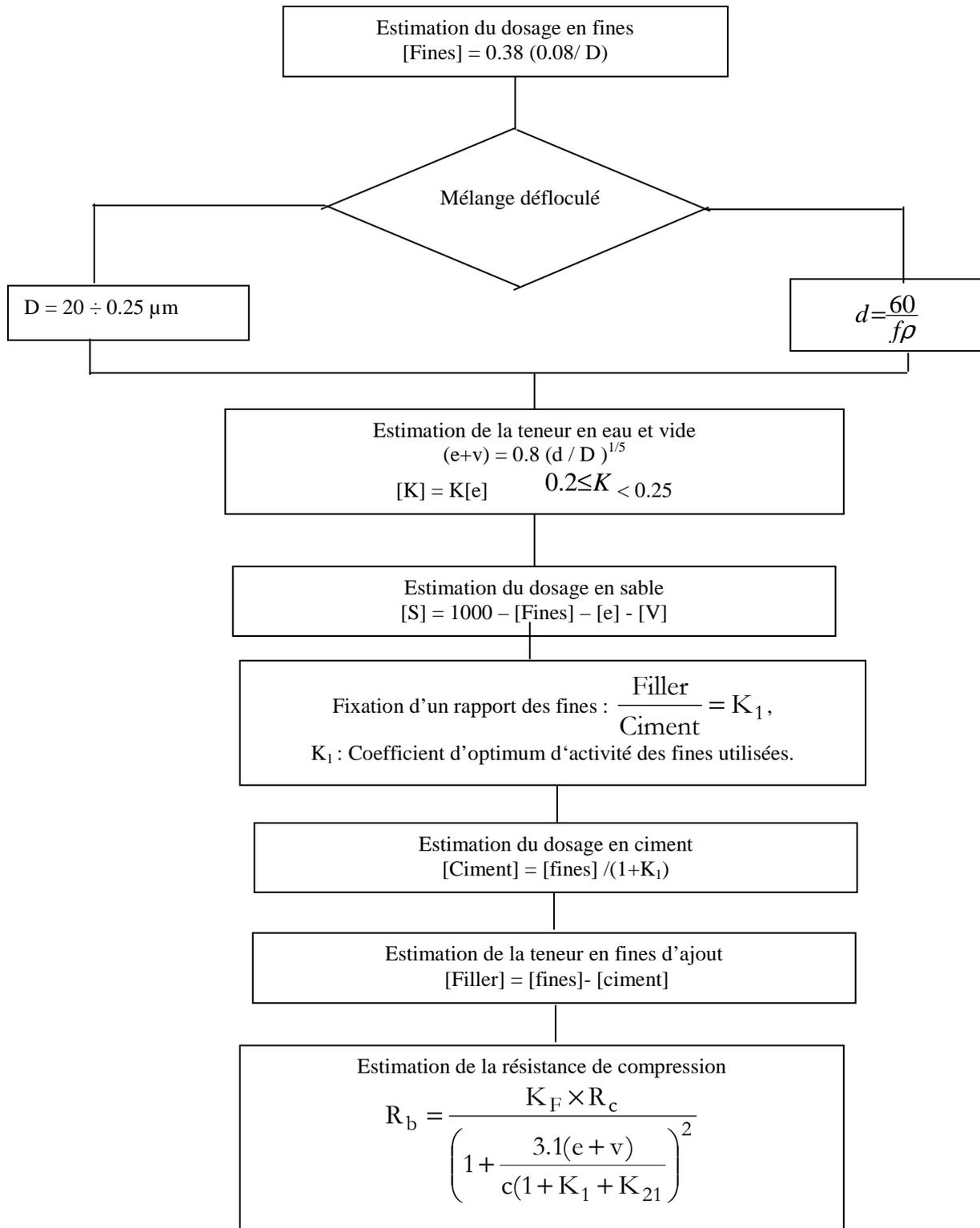


Figure V.14. Organigramme de la méthode théorique

Chapitre VI : Caractérisation des matériaux pour la formulation du sable enrobé

VI.A : AUX LIANTS HYDROCARBONES

VI.A.1. Définition

Les sables enrobés sont des matériaux qui permettent d'effectuer des revêtements minces (2,5 à 3,5 cm). 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 [Fenzy, 1966].

La formulation de l'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.A.2. Essais de laboratoire

Les essais effectués au laboratoire sont les suivants :

VI.A.2.1. Identification des sables

Afin d'identifier les différents types de sables utilisés et pour s'assurer qu'ils répondent aux exigences et recommandations pour une utilisation en technique routière, les essais suivants ont été effectués : granulométrie, équivalent de sable, essai de bleu de méthylène, friabilité, poids spécifique et analyse chimique sommaire.

VI.A.2.2. Identification des liants

Les 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 et 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 et pH de l'émulsion.

VI.A.2.3. Essais mécaniques

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. Une fois la formulation optimale pour chaque stabilisant déterminée, nous avons complété les résultats par des essais mécaniques complémentaires (essai Duriez,

essai Marshall, fluage...) jugés indispensables pour classer un enrobé et voir s'il est apte ou non à être utilisé dans la construction routière.

VI.A.3. Présentation des matériaux utilisés

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 et les différents types de liants.

VI.A.3.1. Les sables

VI.A.3.1.1. Caractéristiques physiques et analyse chimique

Les résultats des essais sur différents sables de dunes, concassé et de carrière pour différentes régions sont regroupés dans le tableau V-1. Une analyse à l'Infra Rouge a été faite pour le sable de dunes de Ouargla et confirme sa nature siliceuse (Figure VI.1).

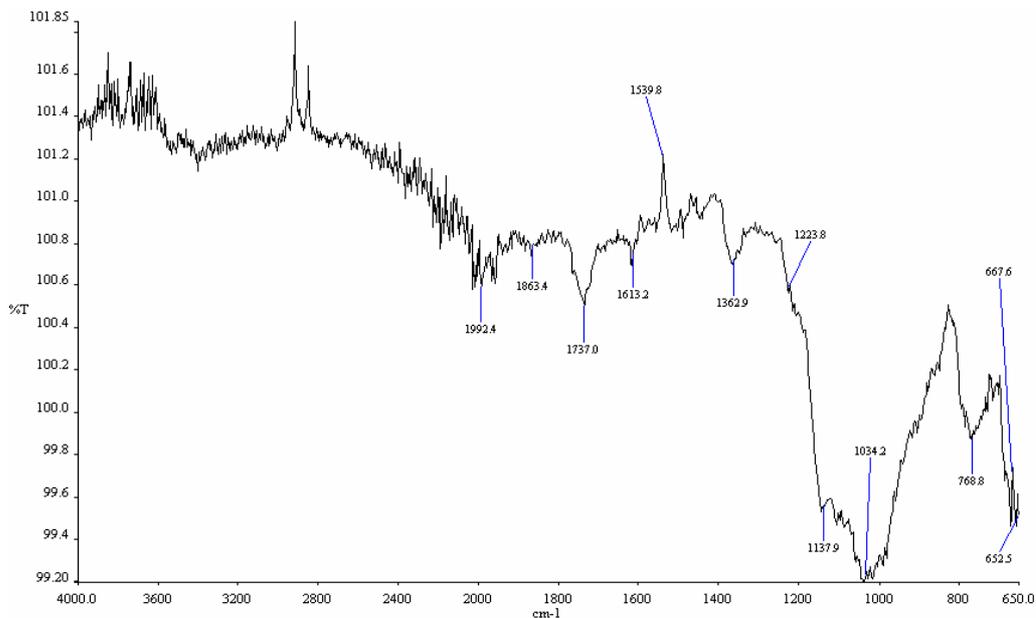


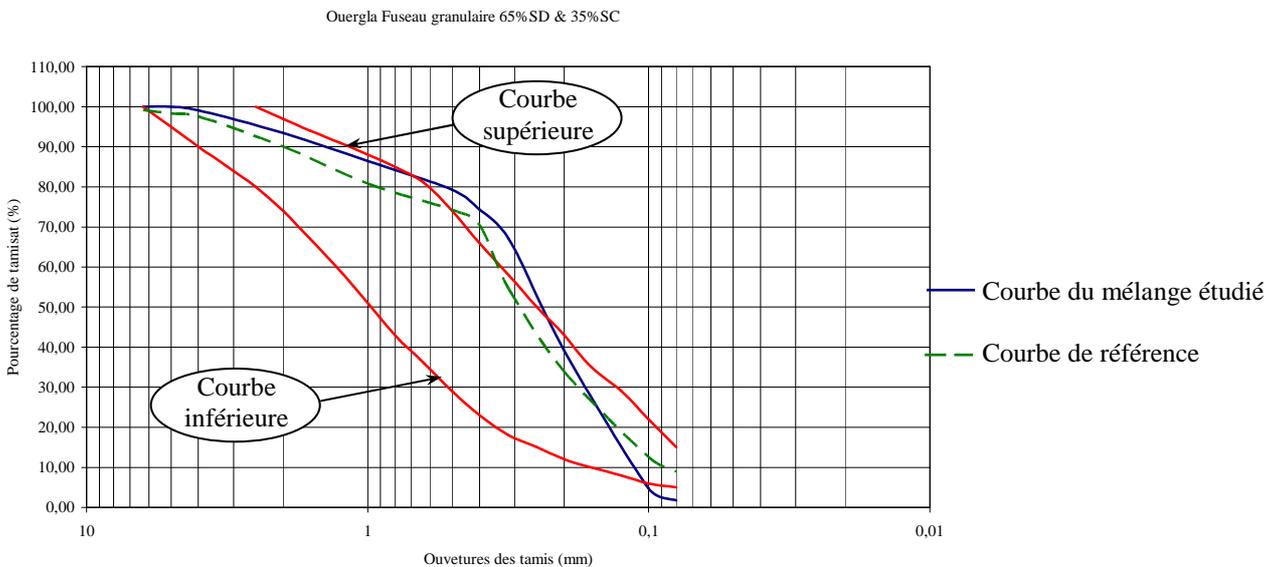
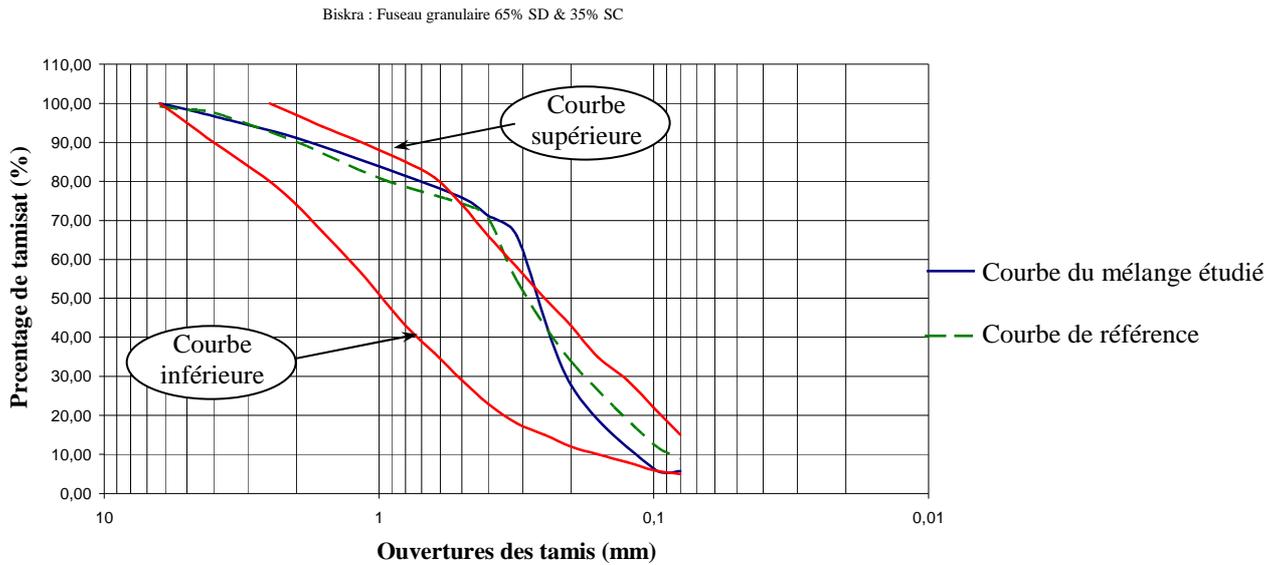
Figure VI.1 : Analyse Infra Rouge du sable de dunes.

Tableau VI-1: Caractéristiques physico chimiques des sables.

Origine du sable	Nature	Analyse chimique (% des constituants)	% de fines (< 0.08 mm)	ρ (Kg/cm ³)	Equivalent de sable (%)	Valeur au bleu de méthylène (VBS)
Ain-Beida	Dune	95.36 insolubles, 0.25 Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ , 2.05 SO ₄ Ca-2H ₂ O, 1.16 perte au feu, trace de NaCl.	5	2640	94	
Béchar	Dune	90.46 insolubles, 1.25 Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ , traces SO ₄ Ca-2H ₂ O, perte au feu 4, NaCl 0.23, CO ₃ Ca 4.23.	0.60	2640	90.62	0.10
Biskra	Dune	SiO ₂ 67.9, Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O ₃ 0.65+0.05, CaCO ₃ 15.88, perte au feu 13.33	1.98	2570	72	0.20
Biskra	Carrière	31.6 insolubles, 0.35 Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ , traces SO ₄ Ca-2H ₂ O, 30.07 perte au feu, 0.29 NaCl et 65.22 CaCO ₃ .	10.10	2575	19.6	0.9
Ghardaïa	Dune	SiO ₂ 94.5, Al ₂ O ₃ -Fe ₂ O 1.67+0.25, CaCO ₃ 1.43, perte au feu 1.43	4.10	2610	92	0.05
Hassi Messaoud	Alluvionnaire	95.98 insolubles, 0.67 Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ , 1.03 SO ₄ Ca-2H ₂ O, perte au feu 0.67	3	2640	67	
Hassi Berkine	Dune	98.17 insolubles, 1.35 Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ , traces SO ₄ Ca-2H ₂ O, perte au feu 0.79, NaCl 0.11, CO ₃ Ca 1.75	1.30	2640	93.9	0.05
Haoud El Hamra	Concassé	33.10 insolubles, 2.50 Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ , 5.14 SO ₄ Ca-2H ₂ O, perte au feu 26.00, NaCl 0.12, CO ₃ Ca 58.82	16.58	2490	37.0	0.10
Hassi Berkine	Carrière (gypseux)	10.95 insolubles, 1.32 Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ , 8.68 SO ₄ Ca-2H ₂ O, perte au feu 26.12, NaCl 49.64, CO ₃ Ca 0.70	30.75	2240	37.2	0.30
Ouergla	Concassé	90.98 insolubles, 2.15 Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ , traces SO ₄ Ca-2H ₂ O, 4.05 perte au feu, 0.41 NaCl et 8.85 CaCO ₃ .	2.08	2543	42.2	0.53
Ouergla	Dune	95.08 insolubles, 0.60 Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ , 3.61 SO ₄ Ca-2H ₂ O, 1.16 d'eau de constitution, 1.11 perte au feu, 0.35 NaCl et 1.77CaCO ₃ .	1.60	2595	81.3	0.13

VI.A.3.1.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des sables de dunes est caractérisée par des grains ayant en presque totalité un diamètre compris entre 0,08 et 0,5 mm. Il s'agit de sable propre de granulométrie serrée. Leur pourcentage des fines assez faible dénote de leur pauvreté en éléments fins <0,08 mm ce qui nécessite leur correction. Nous donnons quelques exemples de courbes granulométriques avec fuseau granulaire des mélanges.



VI.A.3.2. Arène granitique

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

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.

Elles s'extraient facilement et fournissent un sable plus ou moins grossier suivant la texture des roches mères.

VI.A.3.2.1. Caractéristiques physiques

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

VI.A.3.2.2. Analyse chimique

Tableau VI-2. : 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
Chlorures (NaCl)	0,1
Carbonates (CO ₃ Ca)	0,9
Anhydride Carbonique (CO ₂)	1,40

On peut facilement remarquer (Tableau VI-2) 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.

VI.A.3.2.3. Analyse granulométrique

La courbe granulométrique de l'arène granitique est donnée dans la figure VI.4.

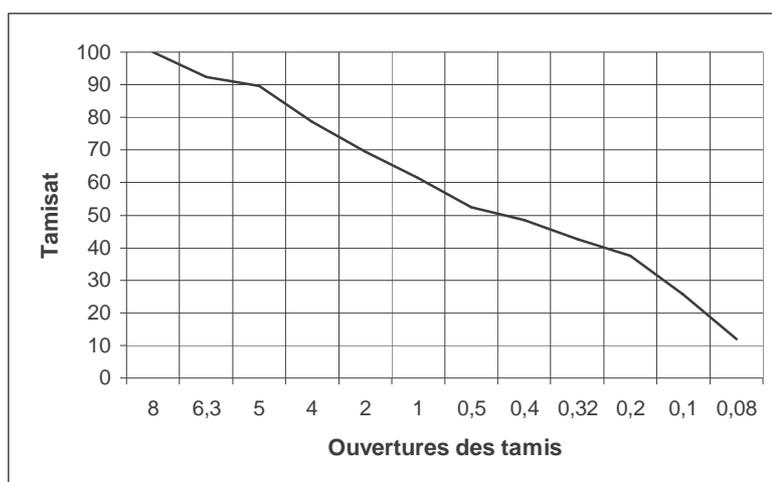


Figure VI.4. Composition granulométrique de l'arène granitique

VI.A.3.3. 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.A.3.4. Les pulvérulents industriels

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

VI.A.3.4.1. Le ciment

Le poids spécifique du ciment CPJ 45 utilisé est de $2,97 \text{ g/cm}^3$.

VI.A.3.4.2. La chaux

C'est une carbonate de chaux (CO_3Ca) obtenue par calcination d'un calcaire naturel (marne) plus ou moins pur ; la présence de silicates d'alumine modifie les caractéristiques du produit après cuisson et la composition de la marne influence la température de calcination.

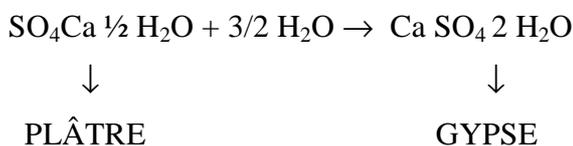
La valeur du poids spécifique de la chaux éteinte utilisée est de $2,32 \text{ g/cm}^3$.

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.

VI.A.3.4.3. Le plâtre

Le plâtre est un hémidrate $\text{SO}_4\text{Ca} + \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ 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 $2,73 \text{ g/cm}^3$.

VI.A.3.4.4. Le laitier

C'est un sous produit total de la fabrication de la fonte.

Il existe deux types de laitiers :

- ✓ *Le laitier granulé* : sable friable de couleur claire utilisé souvent comme liant hydraulique ;
- ✓ *Le laitier solidifié à l'air libre* : se présente sous forme de roches prêtes au concassage à la granulométrie voulue. Ce laitier est employé comme granulats dans les chaussées.

La valeur du poids spécifique du laitier utilisé est de $2,63 \text{ g/cm}^3$.

Tableau VI-3 : 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 %	traces	0,17 %	33,89 %	14,91 %

VI.A.3.5. Les liants

Les caractéristiques des différents liants utilisés sont consignées dans les tableaux VI-4, VI-5 et VI-6 :

VI.A.3.5.1. Les Bitumes

Tableau VI-4 : Caractéristiques des bitumes 40/50 et 80/100

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
-------------------------	------	------

VI.A.3.5.2. Cut back 400/600

Tableau VI-5 : Caractéristiques du cut back 400/600

	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%.

VI.A.3.5.3. Emulsion 60

Tableau VI-6: Caractéristiques de l'émulsion 60

Teneur en eau %	39,5
Pseudo-viscosité Engler à 25°C	9
Indice de rupture	96,4
PH de l'émulsion	3,88

VI.B : AUX LIANTS HYDRAULIQUES

VI.B.1. Introduction

L'étude comporte trois phases :

- Identification des matériaux de base entrant dans la confection du béton de sable, ceci par une étude de leurs caractéristiques physico-chimiques. En fait, la connaissance de certains paramètres est nécessaire et constitue une base sur laquelle on établit la formulation du mélange.
- Détermination de caractéristiques mécaniques :

La première série d'essais consiste à confectionner différentes formules de béton de sable fin corrigées par l'apport des deux matériaux correcteurs (sable concassé et/ou gravillons) à différents pourcentages pour le béton structural et par apport de fines calcaires et de laitier pour le béton de sable destiné aux chaussées aéronautiques. Des essais en compression et en traction, à différents âges, ainsi que des mesures de la masse volumique et du temps d'écoulement ont été effectués.

Dans la seconde série d'essais, on a introduit dans le squelette granulaire des formulations ci-dessus ayant donné les meilleures performances de la poudrette de caoutchouc à différentes teneurs (1 à 4%) ; des essais similaires ont été faits.

- Détermination de caractéristiques rhéologiques :

Des essais de comportement (contraintes déformations) ont été faits, des approches mécaniques de lois de comportement classiques sont élaborées et des paramètres rhéologiques déterminés.

VI.B.2. Caractéristiques des sables et gravillons

VI.B.2.1. Caractéristiques mécaniques et analyse chimique

La connaissance des propriétés physicochimiques des matériaux permet la bonne formulation du béton, et facilite ainsi l'interprétation des résultats obtenus.

Les essais ont été effectués suivant les normes en vigueur.

VI.B.2.1.1. Pour la confection de béton de sable de dunes

Les résultats des caractéristiques mécaniques, de l'analyse chimique sont donnés dans le tableau VI-7 et de l'étude granulométrique dans les figures VI.3 et VI.4.

Tableau VI-7. Caractéristiques mécaniques et analyse chimique des différents constituants.

Nature	Analyse chimique (% des constituants)	M _f	ρ (g/cm ³)	Equiva- lent de sable (%)	Valeur au bleu de méthylène (VBS)	Friabilit é (%), Los Angeles	Compacité (%)
Sables de Dune	98,24 insolubles, 1,04 Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , 1,71 CaCO ₃ , 0,75 CO ₂ , 0,93 d'eau	0,78	2,56 1,5	87,25	0,03	7,2	58,2

	de constitution, 0,82 perte au feu, trace de Sulfates, 0,18 NaCl.						
Sable concassé	9,8 insolubles, 1,75 Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ , 82,5 CaCO ₃ , 36,1 CO ₂ , 4,4 d'eau de constitution, 4,05 perte au feu, trace de Sulfates et chlorures.	2,83	2,685 1,527	52,3	0,15	55,6	56,87
Gravillons	72,41 insolubles, 18,08 Fe ₂ O ₃ Al ₂ O ₃ , 5,12 CaCO ₃ , 2,25 CO ₂ , 2,14 d'eau de constitution, 4,39 perte au feu, trace de Sulfates et chlorures.		2,64 1,00			22,16	37,88

Le sable de concassage provient d'une roche tendre; le gravillon provient d'une roche basaltique dure.

Granulométrie des sables

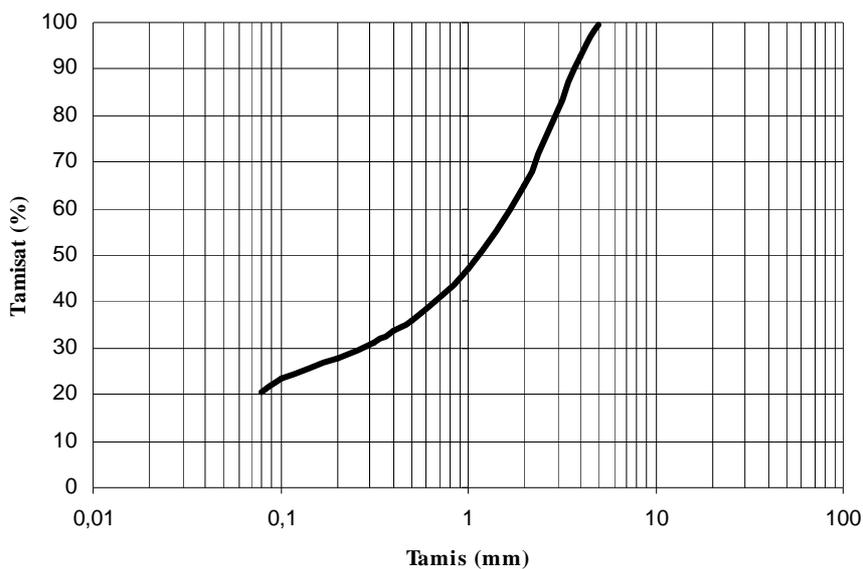


Figure VI.5: Analyse granulométrique du sable concassé

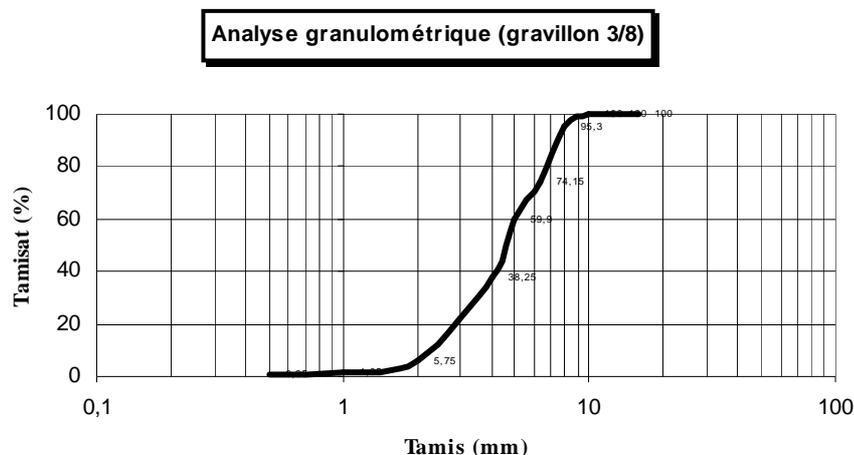


Figure VI.6. Analyse granulométrique du gravillon

Une synthèse des résultats d'identification permet de tirer les conclusions données dans le tableau VI.8.

Tableau VI-8 : Comparaison entre les caractéristiques du sable de dune et celles du sable de carrière

Caractéristiques	Sable de dune	Sable de carrière
Granulométrie	Serrée	Étalée
Module de finesse	Inférieur aux normes	Dans les normes
Propreté	Très bonne	Hors normes
Dureté	Bonne	Faible
Analyse chimique	Bonne	–

D'après ce tableau, le sable de dune et le sable concassé ne peuvent être utilisés chacun seul pour la confection du béton à cause de certaines caractéristiques hors normes. Leur mélange pourrait conduire à un bon résultat suite à la correction mutuelle de leurs caractéristiques.

Si on fait une comparaison entre les deux sables, on remarque bien que les inconvénients de l'un sont comblés par les avantages de l'autre.

VI.B.2.1.2. Confection de béton de sable pour chaussées aéronautiques

VI.B.2.1.2.1. Granulométrie

Les courbes granulométriques des deux sables de dunes utilisés sont données dans les figures VI.5 et VI.6. On peut en tirer les conclusions suivantes :

- Le sable Hassi berkine est de classe 0/0,63 mm ; alors que le sable de Béchar est de classe 0/0,4 mm.
- Ce sont des sables très fins, en raison du pourcentage élevé des éléments fins (supérieur à 75%).
- G.DREUX (1985) propose des fuseaux dans lesquels doit se situer la courbe granulométrique du sable. Nos courbes se situent au dessus de ces fuseaux limites ; nos sables présentent une majorité d'éléments fins.

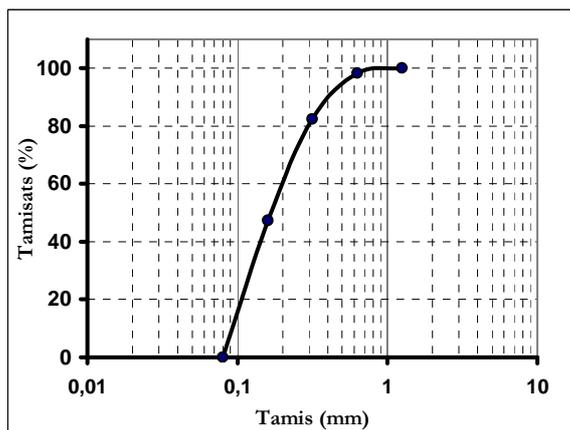


Figure VI.7 : Courbe granulométrique du sable de dunes de Hassi Berkine

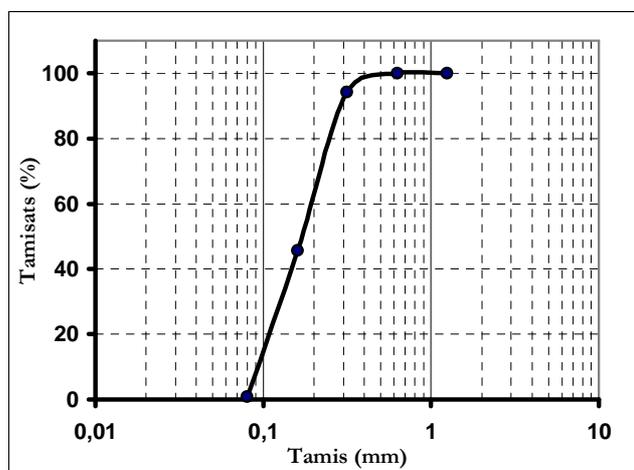


Figure V I.8 : Courbe granulométrique du sable de dunes de Bechar

Un bon sable pour béton doit avoir un module de finesse d'environ 2,2 à 2,8. Les sables utilisés nécessitent beaucoup d'eau, et par conséquent une chute automatique de résistance

VI.B.2.1.2.2. Compacité et porosité

Les valeurs de ces deux caractéristiques sont présentées dans le tableau V-9.

Tableau VI-9: Compacité et porosité des sables utilisés.

	Compacité (%)	Porosité (%)
Sable De Hassi Berkine	58	42
Sable de Béchar	53	47

Remarque

D'après DREUX (1985), on peut admettre pour les sables une compacité variant de 60 à 70 % pour la confection d'un béton. Pour les sables utilisés, les compacités sont inférieures à 60 %, alors, ils se situent hors des limites imposées.

VI.B.2.1.2.3. Propreté (Equivalent de sable et bleu de méthylène)

Tous les granulats contiennent plus ou moins d'impuretés. Le caractère commun à ces impuretés est leur effet néfaste sur les qualités essentielles du béton (résistance, imperméabilité et durabilité). Il est donc indispensable que les sables n'en contiennent que dans la mesure où ces qualités ne sont affectées au-delà de limite tolérable.

- Certaines impuretés perturbent les résultats au-delà des limites admissibles, même si elles ne sont qu'à l'état de traces : *elles sont prohibées*.
- D'autres ont un effet moins puissant : elles peuvent être *tolérées* dans des limites qui seront à définir [Lanchon, 1977].

Les essais pour les déterminer sont :

Équivalent de sable (NFP 18-598) : Le but de cet essai est de mettre en évidence l'activité des traces d'argile, du limon ou des matières colloïdale présents dans le sable.

Bleu de méthylène (NFP 18-595) : Cet essai a le même but que l'essai précédent, mais son avantage est d'être à la fois quantitatif et qualitatif.

Quantitatif: à nature de fines donnée, plus la teneur en fines sera importante, plus la valeur de Bleu sera forte.

Qualitatif: à teneur de fines donnée, plus les fines seront « actives » plus la valeur de Bleu sera également forte.

Les valeurs des deux essais sont présentées dans le tableau V-10.

Tableau.VI-10: Les valeurs de ES et de Bleu des sables utilisés.

	ES à vue	ES à piston	Valeur de Bleu
Sable De Hassi Berkine	93,85	75,65	0,05
Sable De Bechar	90,62	72,43	0,10

Remarque : D'après le tableau proposé par DREUX (1985), les sables utilisés sont des sables très propres à faible teneur en fines.

VI.B.2.1.2.4. Friabilité (NFP 18-576)

Cet essai est aux sables ce qu'est l'essai micro-Deval pour les gravillons. Son but est de déterminer la résistance à l'attrition du sable en présence d'eau.

- Pour le sable de Hassi berkine la friabilité est égale à 13 %.
- Pour le sable de Béchar elle est égale à 14,4 %.

Selon la norme, les sables de dunes utilisés sont de bonne qualité.

VI.B.2.1.2.5. Analyse chimique

Cette analyse a été faite dans le but de déterminer les teneurs de matières organiques, les sulfates, les sulfures et chlorures, contenus dans le matériau. Ces éléments peuvent perturber les résultats, au-delà des limites admissibles.

Les sables utilisés sont des sables siliceux, car, ils sont constitués principalement de silice (SiO_2).

VI.B.2.1.2.6. Eléments nocifs

Sulfates et sulfures (NFP 18-582)

Les sulfates généralement rencontrés dans les sols sont les sulfates de magnésium (MgSO_4), les sulfates de sodium (Na_2SO_4) et les sulfates de calcium (CaSO_4). Ils proviennent de la cristallisation sous l'action de l'évaporation des sels en solution.

Les sulfates, s'ils sont existants en pourcentage supérieur de la limite, peuvent attaquer le béton par l'intermédiaire de la réaction chimique avec les aluminates contenus dans le ciment. D'autre côté, ces sulfates en contact avec les armatures, si le béton est armé, conduisent à la corrosion de ces dernières et donc à une chute progressive de résistance mécanique de l'ensemble béton-acier.

Les sables de Hassi berkine et de Béchar sont pratiquement vacants de sulfates. Alors, on peut adopter pour la confection de notre béton de sable des ciments normaux types : CPA ou CPJ.

Chlorures (NFP 18-583) :

Les chlorures sont présents dans le sol sous forme de sel (NaCl). Ceux-ci attaquent surtout les armatures du béton. Les taux de chlorures (Cl^-) dans les sables utilisés sont faibles.

VI.B.2.2. Conclusion

L'étude des caractéristiques des sables utilisés a montré que ceux-ci pourraient donner des résistances acceptables grâce à leur propreté et à leur composition chimique siliceuse ; la nature siliceuse donne souvent les meilleures performances. L'inconvénient majeur de ces sables, et de presque tous les sables de dunes du sud algérien, est qu'ils présentent un

pourcentage de vides assez élevé engendrant une faible compacité ; celle-ci fait chuter la résistance.

VI.B.3. Les fines d'ajout

VI.B.3.1. Définition

C'est l'ensemble des grains dont la taille maximale n'excède pas 80 μm . Leur présence dans certains bétons est indispensable pour corriger l'indice des vides du sable, améliorer la cohésion et limiter le dosage en ciment.

VI.B.3.2. Les fines d'ajout utilisées

Dans notre étude on a utilisé deux types de fines d'ajout, le filler calcaire (fine passive) et le laitier broyé (fine active).

VI.B.3.2.1. Filler calcaire

Il est obtenu par concassage de gravier (plusieurs étapes de concassage), et tamisage manuel des restes de concassage (tamis de 200 μm de maille).

VI.B.3.2.1.1. Granulométrie

La granulométrie du filler a été déterminée par l'analyse sédimentométrique basée sur la loi de STOCKES. La courbe sédimentométrique est présentée sur la figure.VI.7.

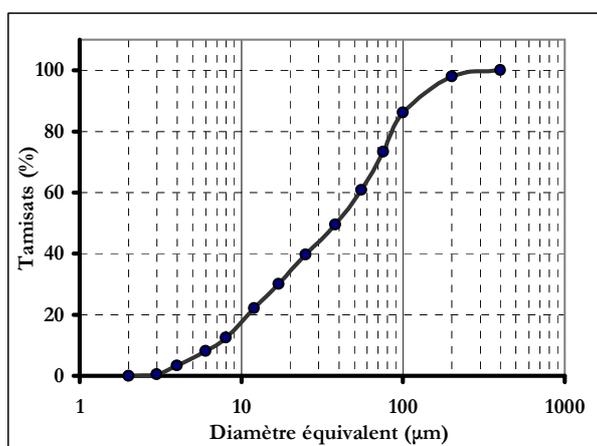


Figure VI.9 : Courbe sédimentométrique du filler calcaire

Le filler calcaire obtenu, est le plus fin possible que le matériel disponible a permis d'obtenir ; sa masse volumique absolue égale à 2700 Kg/m^3 .

VI.B.3.2.1.2. Analyse chimique

La composition chimique du filler calcaire utilisé est présentée dans le tableau VI-11:

Tableau VI-11 : Composition chimique du filler calcaire utilisé.

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)
2,33 %	1,35 %	Trace	0,29%	93,22 %	41,01 %

D'après le tableau VI-11, on peut constater que notre filler est constitué essentiellement de carbonates (CaCO₃), les éléments nocifs (les sulfates et les chlorures) sont pratiquement inexistant.

VI.B.3.2.2. Laitier broyé

Il a été obtenu par concassage de laitier grenu et tamisage manuel du reste de concassage. (Tamis de 200 µm de maille).

VI.B.3.2.2.1. *Granulométrie*

La courbe sédimentométrique du laitier est présentée dans la figure VI.10.

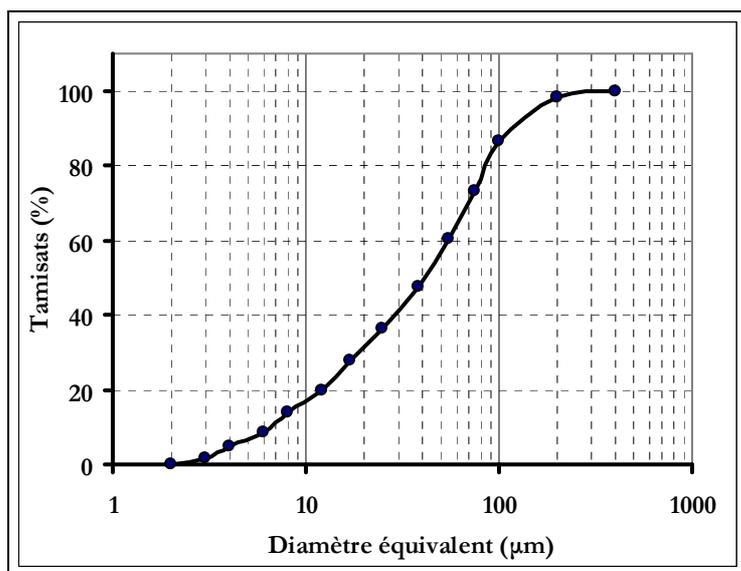


Figure VI.10 : Courbe sédimentométrique du laitier broyé

VI.B.3.2.2.2. *Masse volumique absolue*

La masse volumique du laitier broyé utilisé est égale à 2700 Kg/m³.

VI.B.3.2.2.3. *Analyse chimique*

Elle est présentée dans le tableau VI-12.

Tableau VI-12: 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 %	traces	0,17 %	33,89 %	14,91 %

Le tableau VI-12 montre, que le laitier utilisé est constitué principalement de carbonates (CaCO₃), d'oxydes (Fe₂O₃, Al₂O₃), et de silice (Si O₂) ; les taux des éléments nocifs essentiels (les sulfates et les chlorures) sont pratiquement nuls.

VI.B.3.2.3. Poudrette de caoutchouc

Le caoutchouc, composé naturel ou synthétique, est caractérisé par :

- Son élasticité,
- Son imperméabilité et sa résistance électrique : la résistance du caoutchouc à l'eau et à la plupart des produits chimiques liquides en fait un produit adapté aux revêtements.
- Sa résistance à l'abrasion : Le coefficient de frottement du caoutchouc est élevé sur des surfaces sèches, et faible sur des surfaces mouillées et,
- Sa flexibilité

Les déchets de caoutchouc représentent un gisement valorisable important tant en volume qu'en poids (pneumatiques usagés, fabrication de chaussures, revêtements de sols, déchets de fabrication de pneus, déchets de rechapage des pneus).

Le caoutchouc vulcanisé a en plus du caoutchouc pur une solidité et une élasticité accrues, ainsi qu'une plus grande résistance aux changements de températures.

Elle provient du broyage de chutes de caoutchouc et présente une granularité assez fine (taille de 1.25 mm maximum et 31% < 0.08 mm). Sa densité est égale à 0.5 à température ambiante et sa pureté de l'ordre de 45 %. C'est un copolymère d'éthylène et d'acétate de vinyle (EVA) répondant à la formule générale (CH₂)_n (Figure VI.11).

L'EVA est compatible avec le ciment et les granulats ; c'est un matériau élastique à température ambiante et présentant une faible viscosité aux températures supérieures. Sa température de fusion est de 200 à 220°C

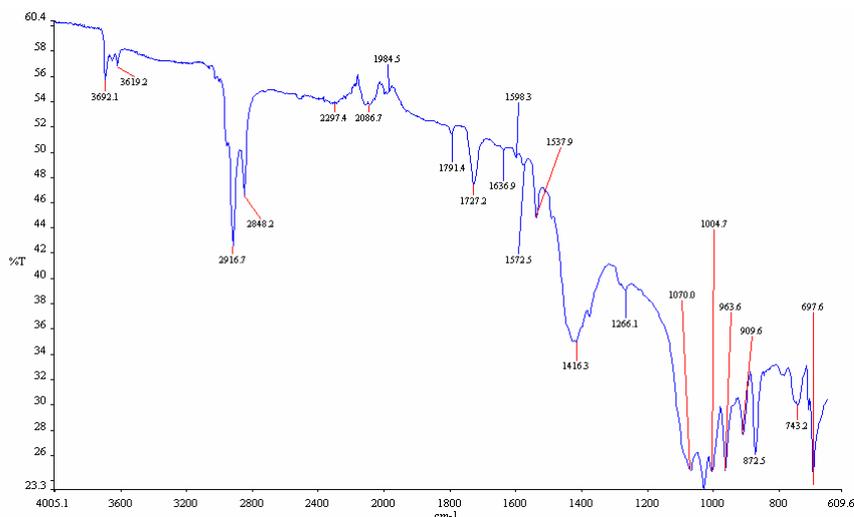


Figure VI.11 : Résultats Infra Rouge de la poudre de caoutchouc

VI.B.4. L'eau

L'eau de gâchage utilisée pour la totalité de nos essais de formulation de béton de sable, est une eau courante de robinet, dépourvue des excès de sels, de sulfates et d'acides.

VI.B.5. L'adjuvant (Superplastifiant)

Le plastifiant est un produit qui améliore la plasticité d'un béton frais, sa stabilité (diminution du risque de ségrégation), et donc son ouvrabilité. Il peut être réducteur d'eau sans diminution du dosage en ciment.

Les performances mécaniques du béton augmentent avec sa compacité et diminuent lorsque le rapport E/C croît. Le plastifiant utilisé pour nos essais est du type MEDAPLAST SP de la société GRANITEX-NP (NP : Nouveaux produits) de Oued Smar (Alger).

VI.B.6. Le ciment

Le ciment utilisé au cours de cette expérimentation est soit un ciment portland composé CPJ-CEM II A 32.5 (similaire au CPJ 45) soit un CPJ45. Les caractéristiques du CPJ-CEMA32.5 sont données dans les tableaux VI-13 et VI-14:

VI.B.6.1. Analyse chimique

Tableau VI-13 : Analyse chimique du ciment

Eléments	Teneur (%)	Exigences (NA 2185) éq à la norme NF P15 301
SiO ₂	21,01	*
CaO	63,89	*
MgO	1,10	< 5,0
Fe ₂ O ₃	3,07	*
Al ₂ O ₃	5,40	*

SO₃	2,42	< 4,0
P.F	1,46	*
CaO libre	0,23	*
R.lns	1,15	*
Cl⁻	0,013	< 0,05
Na₂O	0,25	*
K₂O	0,765	*

* Non normalisé.

VI.B.6.2. Essais physico-mécaniques :

Tableau VI-14 : Analyse physico-mécanique du ciment

Eléments		Résultats	Exigences (N.A 442/2000) éq à la norme NF P15 301
Densité	g/l	913	*
S.S.B.	cm ² /g	3043	*
C.N	%	28.06	*
Prise h, mn	Début	1h49	> 1h30
	Fin	3h37	< 10h00
EXP	mm	0.69	< 10mm
Résistance à la flexion (Mpa)	02 jours	5.10	*
	07 jours	7.33	*
	28 jours	8.25	*
Résistance à la compression (Mpa)	02 jours	22.42	> 10
	07 jours	43.62	*
	28 jours	58.10	CPJ-CEM II/A 32.5

- Non normalisé.

Chapitre VII : Caractérisations des bétons de sables de dunes

VII.1. Introduction

VII.1.1 Formulation d'un béton de sable

Formuler un béton consiste à choisir des constituants et à les proportionner en vue d'obtenir des propriétés spécifiques répondant à des critères techniques et économiques [**Chanvillard et Basuyaux**, 1996].

Les démarches consistent à rechercher une composition de béton de sable ayant comme principales caractéristiques : une résistance mécanique maximale à 28 jours et une maniabilité adéquate pour la mise en place du béton [**Jeuffroy et Sauterey**, 1987].

Pour atteindre ce but, nous avons procédé en deux étapes de formulation :

- Formulation sans fines d'addition (formulation de base) : Dans cette étape de formulation, nous cherchons à déterminer une formule de un mètre cube, constituée de ciment, d'eau, de sable et d'adjuvant, ayant une maniabilité appropriée.
- Formulation avec ajout : Dans cette deuxième étape, nous avons introduit dans la formule du sable de concassage, des gravillons, de la poudre de caoutchouc et des fines d'addition, avec des dosages différents et dans leur plage d'emploi usuelle.

VII.1.2. Formulation de base: 100% sable de dune

La composition de base sert comme témoin. Elle comporte le ciment, l'eau de gâchage, un adjuvant plastifiant et le sable de dune.

VII.1.2.1. Dosage en ciment

Dans le cas des bétons de sable, nous avons vu que le ciment qui convient le mieux est le ciment artificiel CPA, mais ceci n'exclut pas l'utilisation d'un ciment composé CPJ avec une indication particulière.

Le ciment CPJ est divisé en deux fractions pondérales; 85% du poids de CPJ est considéré comme un CPA et 15% comme de fillers calcaires.

Pour un béton de sable dosé à 320 kg/m^3 en ciment CPA, on doit prendre 375 Kg/m^3 correspondant en CPJ soit 376.4 Kg/m^3 .

La masse volumique absolue de ciment est égale à 3145 kg/m^3 , son dosage volumique est de 119.3 l/m^3 .

Les 15% de ciment restant sont considérés comme des fines calcaires, leur dosage est de 56.25 kg/m^3 .

VII.1.2.2. Dosage en adjuvant

Le dosage en adjuvant est pris égal à 0,4% du poids du ciment pour permettre une réduction de l'eau de gâchage de 10% soit 1.5 kg/m^3 ($MV_{\text{adj}} = 1180 \text{ kg/m}^3$); le dosage volumique en adjuvant est donc égal à 1.3 l/m^3 .

VII.1.2.3. Dosage en eau

Le dosage en eau est fonction du dosage en ciment; l'expérience des praticiens, nous donne les valeurs suivantes :

- 220 l/m^3 pour un dosage en ciment de 350 kg/m^3 et
- 250 l/m^3 pour un dosage en ciment de 400 kg/m^3

L'estimation approximative du dosage en eau pour un dosage en ciment de 375 kg/m^3 est de 235 l/m^3 . Cette quantité doit être révisée lors de la réalisation des gâchées surtout avec l'utilisation des adjuvants réducteurs d'eau. Le dosage en adjuvant utilisé permet de réduire l'eau de 10% soit $211,5 \text{ l/m}^3$.

Cette quantité doit être versée par étapes jusqu'à obtention de la maniabilité recherchée.

VII.1.2.4. Dosage en air

Un béton contient toujours un volume d'air. Dans le cas des bétons de sable, la teneur en air est de l'ordre 5 à 7%, on prend une valeur moyenne de 6% soit 60 l/m^3 .

VII.1.2.5. Dosage en sable

Après avoir déterminé les dosages en ciment, eau, adjuvant et air, le volume du sable s'obtient en complétant la formule d'un mètre cube.

$$[\text{Ciment}] + [\text{eau}] + [\text{adjuvant}] + [\text{air}] + [\text{sable}] = 1000 \text{ l d'où } [\text{Sable}] = 607,9 \text{ l/m}^3$$

La masse volumique absolue du sable étant de 2560 kg/m^3 , le dosage massique en sable est égal à $1556,24 \text{ kg/m}^3$

Les résultats sur le maniabilimètre LCPC de cette composition en fonction de la quantité d'eau de gâchage sont donnés dans le tableau VII-1 :

Tableau VII-1 : Maniabilité en fonction du dosage en eau

Quantité d'eau en (l)	Maniabilité (s)
200	53
210	36
211,5	34,5

On remarque que la quantité d'eau de gâchage calculée théoriquement n'est pas suffisante pour l'obtention de la maniabilité recherchée ; ceci est dû à la finesse des grains du sable. Une

quantité supplémentaire d'eau est nécessaire pour mouiller toute l'interface entre grains et faciliter ainsi l'écoulement du béton. Pour cela on doit corriger la formulation.

Au bout de la troisième itération, on trouve : $S3 = 1333\text{kg/m}^3$ pour une maniabilité de 9 s. On aboutit à une formulation de base du tableau VII-2.

Tableau VII-2 : Composition et caractéristiques de la formulation de base

Dosage des éléments en kg/m^3				Maniabilité (s)	ρ_{th} (kg/m^3)	ρ_a (kg/m^3)	R_c (MPa)		R_t (MPa)
Ciment	Adjuvant	Eau	Sable				7j	28j	
375	1,5	232,5	1333	9	2222	2084,19	8,03	16,73	1,24

VII.2. Correcteur granulaire: Le sable de carrière

VII.2.1. Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques du tableau VI-2 restent insuffisantes. Pour corriger cette insuffisance en performances, on s'efforcera à avoir une granulométrie plus étalée et plus continue.

Le sable de carrière est employé comme correcteur granulaire à différents pourcentages. La démarche consiste à déterminer le pourcentage nécessaire en correcteur afin d'atteindre les résistances souhaitées. La maniabilité est toujours la base de l'acceptation des compositions.

Le pourcentage en correcteur varie entre 10% et 50% par pas de 10%.

Les graphes représentant l'évolution des compacités et les résistances mécaniques en fonction du dosage en sable correcteur sont donnés dans les figures VII.1 et VII.2.

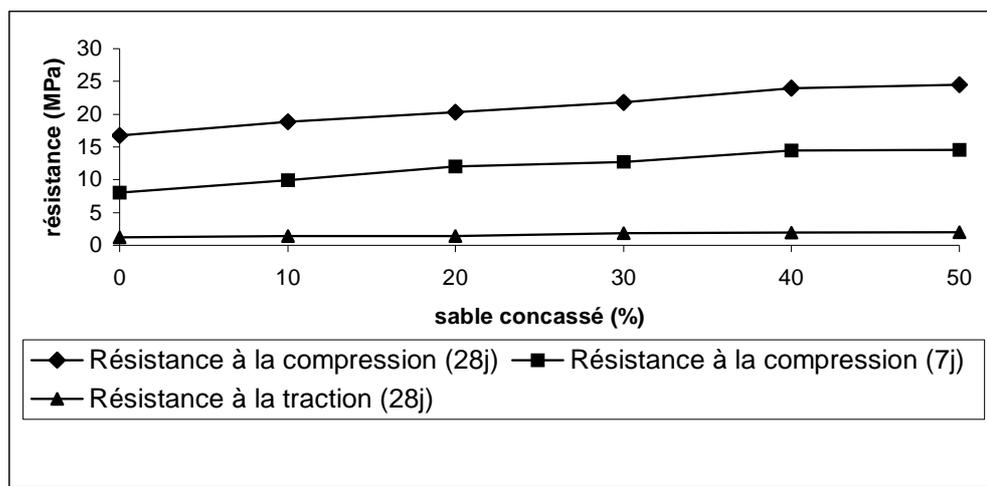


Figure VII. 1. Influence du dosage en sable concassé sur les résistances.

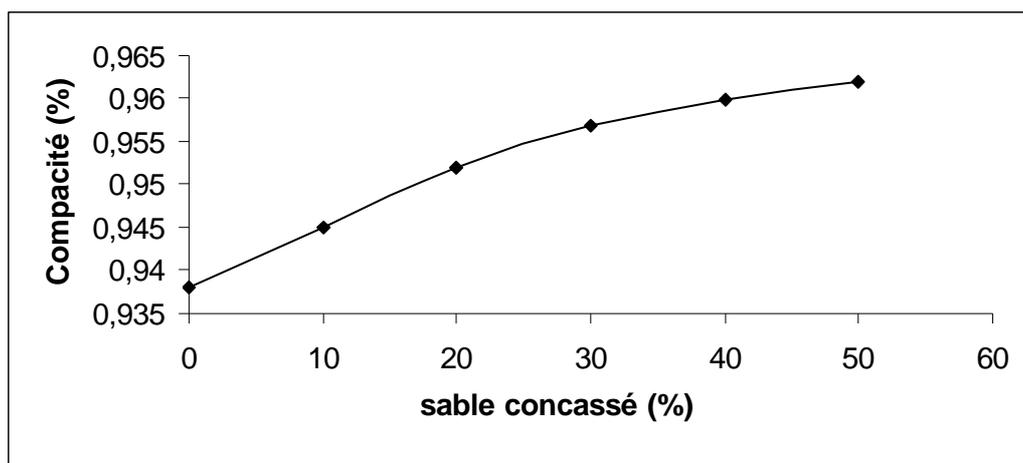


Figure VII.2. Influence du dosage en sable concassé sur la compacité

VII.2.2. Interprétation des résultats

- La compacité du béton augmente avec l'augmentation du pourcentage du sable concassé. Ceci s'explique par la granulométrie étalée du sable correcteur et sa teneur en fines qui favorisent le réarrangement des grains ; les fines vont occuper les vides intergranulaires du sable de dune et augmenter la compacité du mélange. Cette augmentation est importante entre 0 et 30%, ceci est dû au pourcentage élevé de vides à remplir qui devient de plus en plus limité au-delà de 30% ; la masse volumique a augmenté.
- Les résistances s'améliorent avec l'augmentation des pourcentages de sable concassé ; l'existence de fines favorise en plus de l'arrangement des grains le contact intergranulaire. De plus, l'aspect anguleux que présentent les grains de sable concassé favorise considérablement le frottement entre grains et améliore de ce fait la cohésion intergranulaire.

Cette amélioration est prévisible suite à l'augmentation de la compacité, facteur étroitement lié à la résistance.

VII.3. Matériaux correcteurs : le sable concassé et le gravillon

VII.3.1. Caractéristiques mécaniques

On procède ensuite à la correction par l'apport de deux matériaux : le sable concassé et le gravillon, en jouant sur leur pourcentage. Le dosage total en correcteurs est maintenu à 50%.

Les graphes représentant l'évolution des compacités et des résistances mécaniques en fonction du dosage en correcteurs sont donnés dans les figures VII.3 et VII.4.

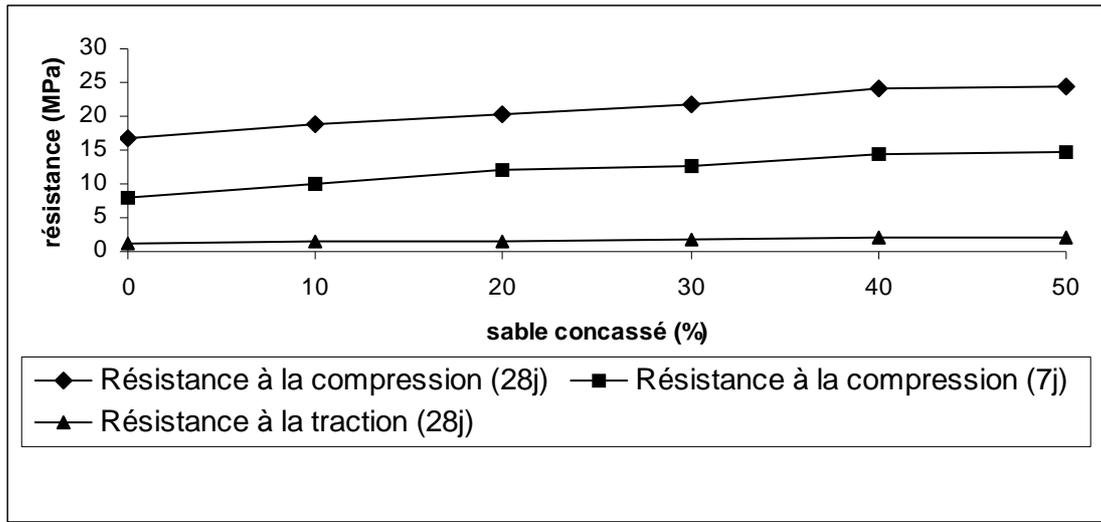


Figure VII. 3 : Influence du dosage en gravillon sur les résistances.

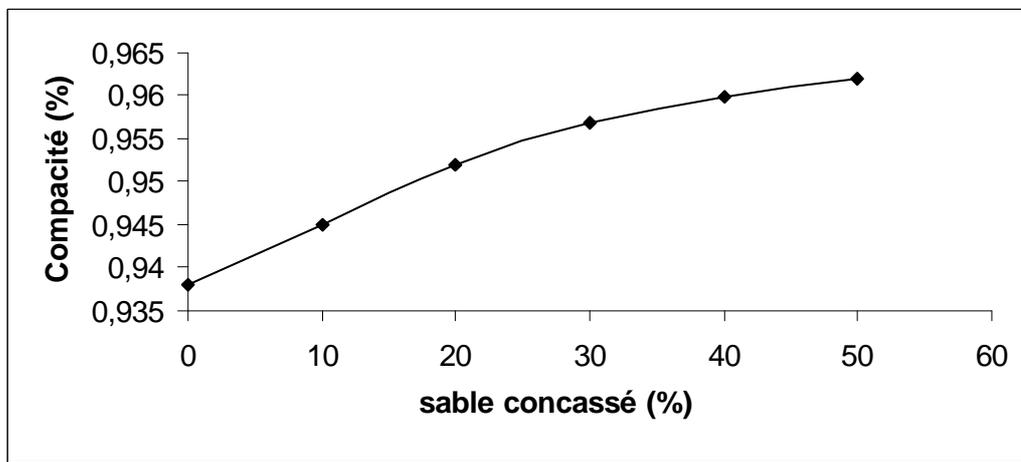


Figure VII. 4 : Influence du dosage en gravillon sur la compacité.

VII.3.2. Interprétation des résultats

- En faisant varier le pourcentage des deux matériaux correcteurs employés, on s'aperçoit que la relation compacité dosage en gravillons a une allure parabolique présentant un optimum correspondant à 30% de gravillon et 20% de sable concassé ; le mélange est optimisé dans son squelette, c'est-à-dire que les proportions des différents constituants sont en bon rapport.

Pour un dosage en gravillon inférieur à celui de l'optimum, la compacité augmente ; ceci est attribué au gravillon qui fait étaler la granulométrie et les grains des différents constituants trouvent ainsi une grande facilité à se réarranger. Les vides les plus gros créés par le gravillon sont occupés par les grains du sable de dune alors que les fines provenant du sable concassé sont suffisantes pour occuper les vides inter-granulaires des deux sables limitant de ce fait leur pourcentage au maximum.

Pour un dosage en gravillon supérieur à 30%, on remarque que la compacité diminue d'une manière significative ; ceci est dû au pourcentage retranché du sable concassé. En effet, la

diminution du sable concassé entraîne une diminution des pourcentages des fines et une partie des vides inter-granulaires des sables reste inoccupée ; ce volume des vides est à l'origine de la diminution de la compacité.

- La courbe résistances dosage en gravillon est parabolique et présente elle aussi un pic à 30% de gravillons.

Un dosage en gravillon inférieur à 30% fait étaler la granulométrie et met en évidence l'effet du diamètre maximal (D_{max}), dont le béton tire une part de sa résistance. Cependant, le pourcentage du sable concassé est considérable pour assurer le frottement entre les grains et améliorer la cohésion inter granulaire, et le mélange acquiert ainsi de plus en plus de résistance.

Au-delà de 30% de gravillon, on remarque une chute de résistance, de même que la compacité. Ceci est dû au manque des éléments anguleux qui deviennent de plus en plus insuffisants pour assurer le frottement entre grains et diminue dès lors la cohésion inter-granulaire.

Pour le point 30% en gravillon, on obtient l'optimum de résistance. Ceci est dû à la contribution de toutes les performances des éléments constituant le béton suite à leurs proportions convenables ainsi que leur affinité. Le pourcentage du sable concassé est voisin de celui du gravillon. Le sable concassé assure pour sa part le frottement inter-granulaire, alors que le gravillon facilite l'arrangement des grains. Ces deux facteurs favorisant la résistance sont disponibles dans cette composition d'où l'obtention d'une bonne résistance.

VII.3.3 Choix de la composition optimale

Sur la base des résultats des essais effectués, on constate clairement que la composition optimale est le béton de sable chargé en Gravillons à 30% et 20% de sable concassé qui présente les meilleures résistances.

Si on se réfère aux objectifs fixés, on remarque que plusieurs compositions sont satisfaisantes.

Pour un intérêt économique et écologique, nous avons jugé que la formule du béton de sables (50% sable de dunes et 50% sable de concassage) est aussi intéressante du fait qu'elle présente une résistance acceptable.

VII.4. Béton de sable modifié à la poudrette de caoutchouc

VII.4.1. Introduction

Dans l'étude précédente, la moitié de la quantité de sable dunaire de la formulation de base, est remplacée par du gravillon 3/8 et/ou du sable concassé 0/3 à des proportions complémentaires à 50% et variant par pas de 10%.

C'est soit un béton de sable de résistance caractéristique 22.5MPa, et de fluidité plastique désigné conformément aux normes **BS 22.5 FP** soit un béton de sable de résistance caractéristique 30MPa, et de fluidité plastique avec gravillons 3/8 **BS 30 FP 3/8**.

Les deux compositions présentent des résistances importantes, et de bonnes compacités ; les grains sont bien arrangés suite à la correction granulaire.

VII.4.2. Étude des compositions témoins modifiées à la poudrette de caoutchouc

Les compositions retenues ci dessus sont modifiées par ajout de poudrette de caoutchouc à différents pourcentages (1, 2, 3 et 4 %). Les caractéristiques des compositions réalisées sont données dans les tableaux VI-3 et VI-4.

VII.4.2.1. BSD PC 1%

Béton de sables modifié à 1% de poudrette de caoutchouc.

VII.4.2.1.1. Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques avec ajout de poudrette sont données dans le tableau VII-3.

Tableau VII-3 : Caractéristiques des compositions BSD PC

Caractéristiques	ρ_{th} (Kg/m ³)	ρ_a (Kg/m ³)	Compacité (%)	Maniabilité (s)	R_c (MPa)		R_t (MPa)
					7j	28j	28j
BSD PC 1%	2109,4	2028,6	96,17	11	12,5	20	2,16
BSD PC 2%	2110,9	2035,0	96,4	10,5	10,5	15	1,62
BSD PC 3%	2113,5	2041,5	96,59	9,5	16,5	25	2,86
BSD PC 4%	2119,1	2051,6	96,86	8	11,25	17,5	1,86

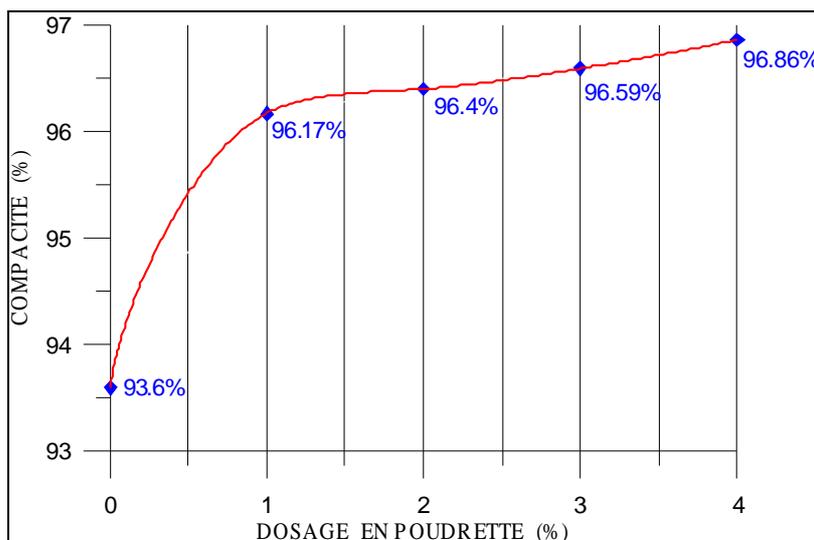


Figure VII.5 : Influence du dosage en poudrette de caoutchouc sur la compacité (BSD PC)

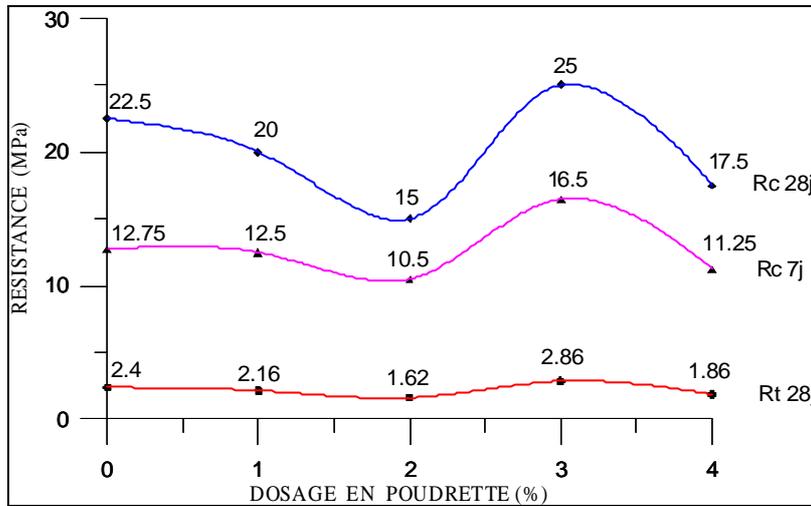


Figure VII.6. : Influence du dosage en poudre de caoutchouc sur les résistances (BSD PC)

VII.4.2.1.2. *Interprétation des résultats BSDPC*

Les figures VII.5, VII.6 et le tableau VII-3 permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La compacité du béton augmente entre 0 et 1% d'ajout suite au réarrangement des grains favorisé par la correction de la granulométrie par le sable de concassage, qui a une granulométrie étalée en plus, les vides inter-granulaires de sable de dune ont été occupés par les fillers de caoutchouc diminuant ainsi le volume des vides et augmentant par conséquent la compacité.

La compacité se stabilise au delà de 1%, ceci est dû à la diminution du pourcentage des vides à remplir.

- La maniabilité s'améliore lorsque le dosage en poudre de caoutchouc augmente, ceci est justifié par la faible absorption d'eau des particules de caoutchouc, ce qui conduit à un gain d'une quantité d'eau pour les autres constituants de béton (E/C constant).
- Des petites variations de résistance sont observées entre 0 et 3% ; au delà de 3% de poudre de caoutchouc, on remarque une chute de résistance qui s'explique par la mauvaise cohésion inter-granulaire due aux particules de caoutchouc.

VII.4.2.2. BSDC PC 1%

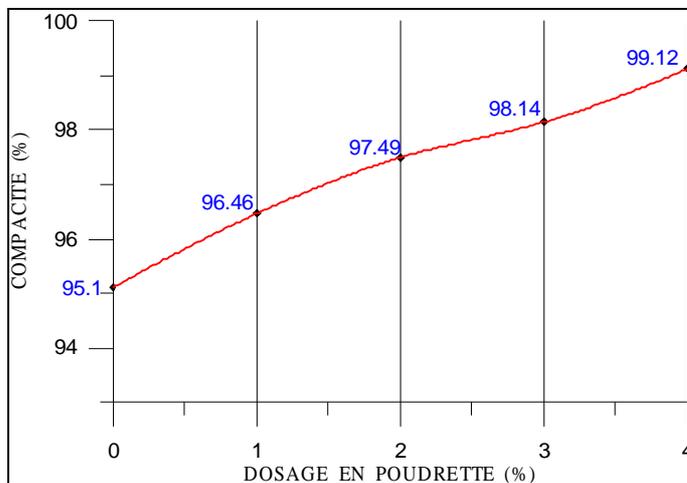
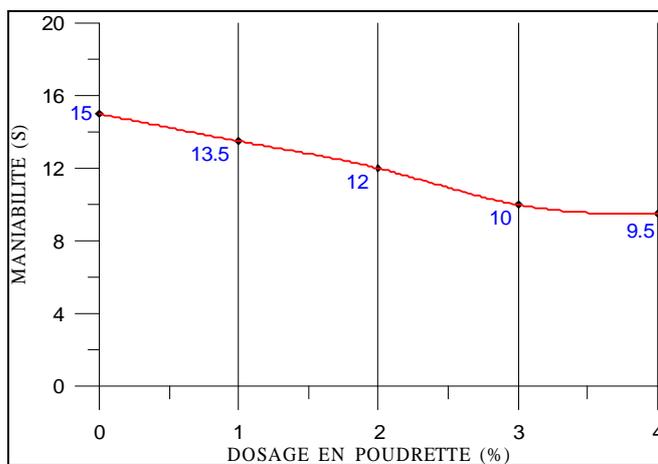
VII.4.2.2.1. *Caractéristiques mécaniques*

Les caractéristiques du béton de sable chargé (50% sable de dunes, 20% sable concassé et 30% gravillon) modifié à 1% de poudre de caoutchouc sont données dans le tableau VII-4.

Les graphes représentant l'évolution des différentes caractéristiques en fonction de dosage en poudre de caoutchouc sont donnés dans les figures VII.4 à VII.9 :

Tableau VII-4 : Caractéristiques des compositions BSDC PC

Caractéristiques	ρ_{th} (Kg/m ³)	ρ_a (Kg/m ³)	Compacité (%)	Maniabilité (s)	R_c (MPa)		R_t (MPa)
					7j	28j	28j
BSDC PC 1%	2187.5	2110.18	96.46	13.5	21.15	31.25	3.25
BSDC PC 2%	2164.06	2109.87	97.49	12	19.65	30	3.08
BSDC PC 3%	2148.43	2108.43	98.14	10	16.75	25	2.86
BSDC PC 4%	2125	2106.36	99.12	9.5	15	23.5	2.48

**Figure VII.7 :** Courbe de compacité en fonction de dosage en poudre de caoutchouc (BSDCPC)**Figure VII.8. :** Courbe de maniabilité en fonction de dosage en poudre de caoutchouc (BSDCPC)

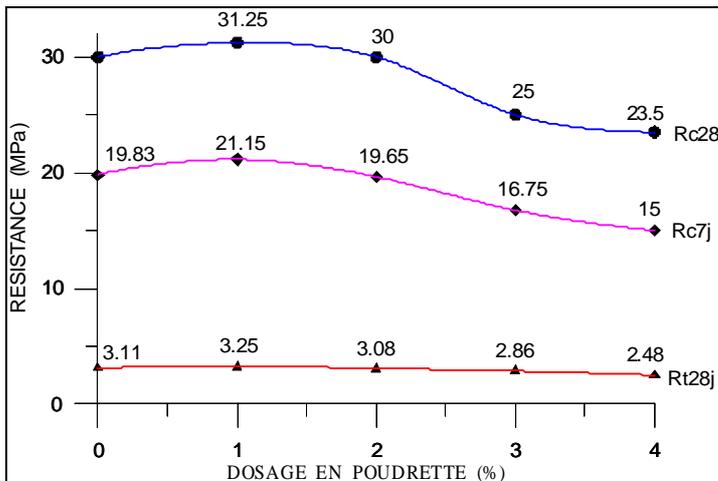


Figure VII.9. : Courbe de résistance en fonction de dosage en poudre de caoutchouc (BSDCPC)

VII.4.2.2.2. *Interprétation des résultats*

- La compacité augmente d'une manière presque linéaire avec l'augmentation de la teneur en poudre ; les mélanges sont optimisés dans leur squelette solide. Les grains des deux sables trouvent une grande facilité de se réarranger grâce aux vides créés entre les grains du gravillon. Les fillers de caoutchouc interviennent pour remplir les vides inter-granulaires des deux sables, et former un mélange compact.
- La maniabilité, de même que pour les mélanges BSD PC, est améliorée avec l'augmentation du dosage en poudre, grâce au caractère imperméable des particules de caoutchouc.
- La résistance est presque stable entre 0% et 2%. Au delà de 2% une chute de résistance est observée, ceci est dû au manque de cohésion inter-granulaire provoquée par les particules de caoutchouc.

VII.4.2.3 Conclusion

Cette étude a montré que l'ajout de la poudre de caoutchouc même avec des faibles pourcentages au béton de sable n'est pas très intéressant quand la mécanique de résistance est le but principal.

Cependant une éventuelle utilisation de la poudre de caoutchouc dans un béton devant remplir autre rôle que la performance mécanique aurait un sens (résistance au choc, aux actions chimiques, aux produits radioactifs, imperméabilité...).

VII.4.3. Lois de comportement

VII.3.1. Analyse des déformations

VII.4.3.1.1. Contraintes déformations longitudinales :

En traçant les courbes contraintes déformations longitudinales, on remarque qu'elles comportent chacune trois phases :

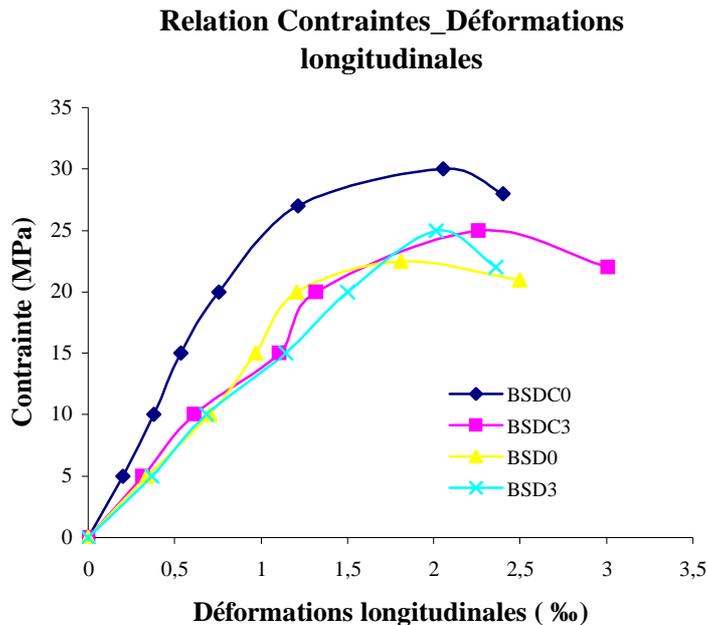


Figure VII.10. : Relation Contraintes Déformations longitudinales

1^{ère} phase : Comportement élastique quasi-linéaire du béton.

Dans cette phase le comportement des bétons est quasi-linéaire ou bilinéaire, jusqu'à un taux de déformation (0.535 ‰ qui correspond à une contrainte $\sigma = 15$ MPa pour la composition BSDC0. La pente à l'origine est le module de déformation longitudinale à l'origine (loi de HOOKE).

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad E_{b0} = \text{tg} \alpha_0 = \text{cst}$$

2^{ème} phase: une allure parabolique jusqu'à un seuil correspondant à la contrainte maximale. Le béton a un comportement plastique où on observe le développement de la microfissuration jusqu'à la rupture ; dans ce cas on définit le module d'élasticité sécant, pente des droites joignant l'origine à un point donné de l'allure parabolique.

3^{ème} phase: caractérisée par une fissuration généralisée, propagation de la rupture et développement des surfaces de fractures, on remarque une augmentation de la déformation en même temps que la contrainte de rupture diminue.

Ces compositions présentent un comportement analogue à celui des bétons classiques vis-à-vis des déformations sous charges monotones.

Cette allure s'explique par l'interface entre la pâte de ciment et les granulats à cause de la différence de ces propriétés mécaniques. Le développement de micro fissures à ces interfaces réduit la surface effective résistante à la charge appliquée de sorte que la contrainte locale est plus importante que la contrainte moyenne calculée sur la totalité de la section droite de l'éprouvette. Ces changements signifient que la déformation augmente plus vite que la contrainte nominale appliquée, en sorte que la courbe contrainte-déformation présente une courbure de plus en plus prononcée, avec un comportement pseudo élastique apparent, et lorsque la contrainte dépasse une certaine limite (20 MPa pour BSDC0), la courbe s'incurve à une vitesse de plus en plus grande, ce qui est presque analogue à la fissuration de mortier, les fissures à l'interface continuent jusqu'à la charge maximale. Le nombre élevé de ces fissures engendre une diminution importante de la surface effective qui ne peut résister même à des charges inférieures à la charge maximale, on remarque une continuité de la déformation même avec une réduction de la charge.

Cette allure est aussi observée dans la courbe contrainte-déformation transversale sauf que les seuils sont beaucoup plus restreints.

Lors de l'écrasement des éprouvettes, on a remarqué un mode de rupture tronconique (formation de cône à la rupture) pour le béton BSDC PC.

VII.4.3.1.2. Contraintes déformations transversales

On remarque que les courbes de la figure VII.11 présentent chacune deux phases :

1^{ère} phase : les courbes ont une forme presque droite, montrant une proportionnalité entre la déformation longitudinale et la déformation transversale et correspondant à la partie quasi linéaire élastique.

2^{ème} phase : En suite, la courbe devient de plus en plus parabolique et converge jusqu'à la rupture.

Pour déterminer le coefficient de Poisson, on se limite à la phase élastique.

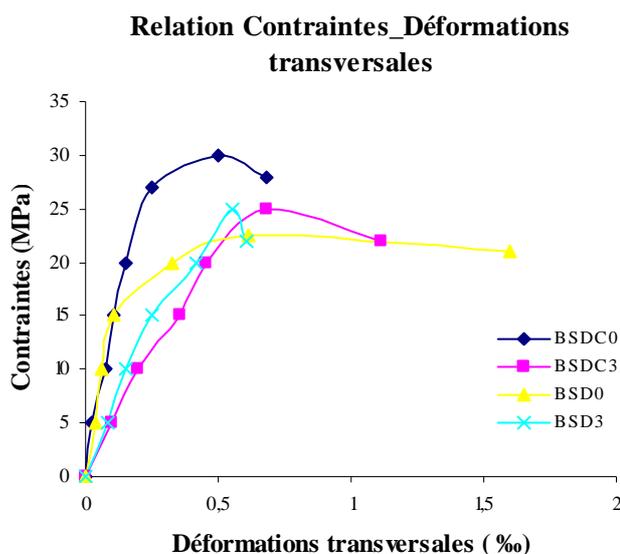


Figure VII.11. : Relation Contraintes Déformations transversales

VII.4.3.2. Détermination des caractéristiques rhéologiques :

Les valeurs des modules d'élasticité tangents à l'origine et les coefficients de Poisson sont données dans les tableaux VII-5 et VII-6:

Tableau VII-5 : Modules d'élasticités des compositions BSDC PC et BSD PC :

Compositions	Module d'élasticité (MPa)
BSDC0	26385
BSDC PC 2%	20492
BSDC PC 3%	16722
BSD0	14793
BSD PC 3%	15823

Le coefficient de Poisson est défini comme le rapport entre les deux déformations (transversale et longitudinale), il sera déterminé à titre complémentaire en traçant les courbes déformations transversales en fonction des déformations longitudinales.

Tableau VII-6 : Coefficient de poisson des compositions BSDC PC et BSD PC :

Compositions	Coefficient de poisson
BSDC0	0,205
BSDC PC 2%	0,160
BSDC PC 3%	0,365
BSD0	0,110
BSD PC 3%	0,220

VII.4.3.3. Conclusion

Les modules d'élasticité du béton de sable de dune corrigé uniquement avec le sable de concassage sont plus petits que ceux du béton de sable chargé, qui eux sont comparables à ceux d'un béton ordinaire, car le module est fonction du diamètre du plus gros granulat.

Le module du béton chargé témoin est plus important que ceux du béton chargé modifié par la poudre de caoutchouc.

VII.5. Béton de sable pour chaussées aéronautiques

VII.5.1. Formulation du béton de sable

Les démarches consistent à rechercher une composition de béton de sable ayant comme principales caractéristiques : une résistance mécanique maximale à 28 jours et une maniabilité supérieure à 15 secondes au maniabilimètre à mortier LCPC, c'est la consistance adéquate pour la mise en place du béton pour chaussées aéronautiques [Jeuffroy et Sauterey, 1987].

VII.5.1.1. Formulation du béton de sable de base

Les différentes compositions de base obtenues sont présentées dans le tableau suivant:

Tableau VII-7. : Compositions de base avec le sable de dunes.

E/C	0,80	0,85	0,90
Ciment (Kg/m ³)	350	350	350
Sable (Kg/m ³)	1470,73	1424,53	1378,33
Eau (Litres/m ³)	280	297,5	315
Adjuvant (Kg/m ³)	4,13	4,13	4,13

Elles ont donné les résultats regroupés dans le tableau VII-8.

Tableau VII-8. : Performances obtenues avec les formulations de base.

Rapport E/C	Temps d'écoulement au maniabilimètre LCPC en secondes	Résistance à la compression à 7 jours en MPa	Résistance à la compression à 28 jours en MPa
0.80	>120	5.86	8.84
0.85	23	6.73	10.25
0.90	13	5.93	8.85

VII.5.1.2. Formulation du béton de sable de dunes avec deux ajouts

A la formulation de base, nous ajoutons deux fines (calcaires et laitier) à raison de 200, 250 et 300 Kilogrammes par mètre cube de béton. Les résultats des résistances à la compression à 28 jours des différentes formulations (voir Annexe BSchaussée) sont donnés dans les figures VII.12 à VII.15.

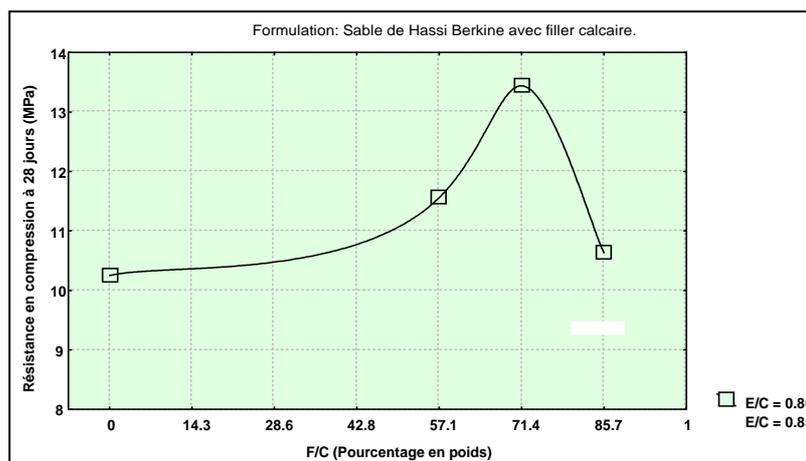


Figure VI.12. : Relation résistance en compression rapport Filler/ciment (SD1, FC)

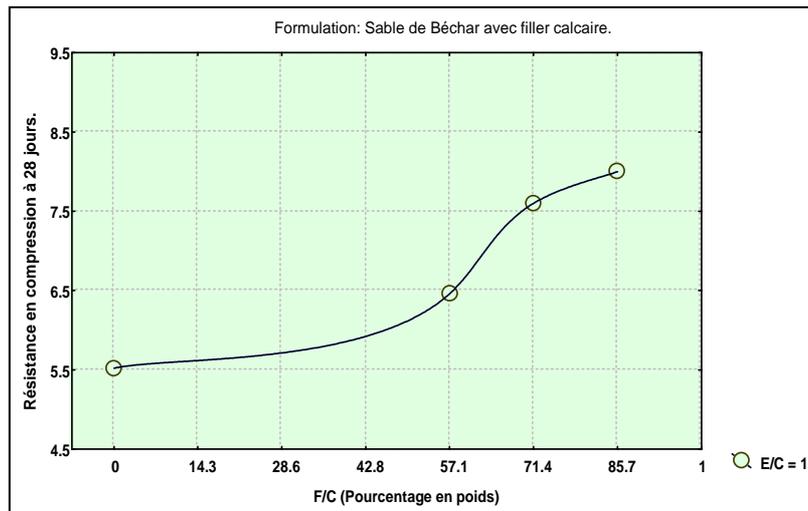


Figure VII.13. : Relation résistance en compression rapport Filler/ciment (SD2, FC)

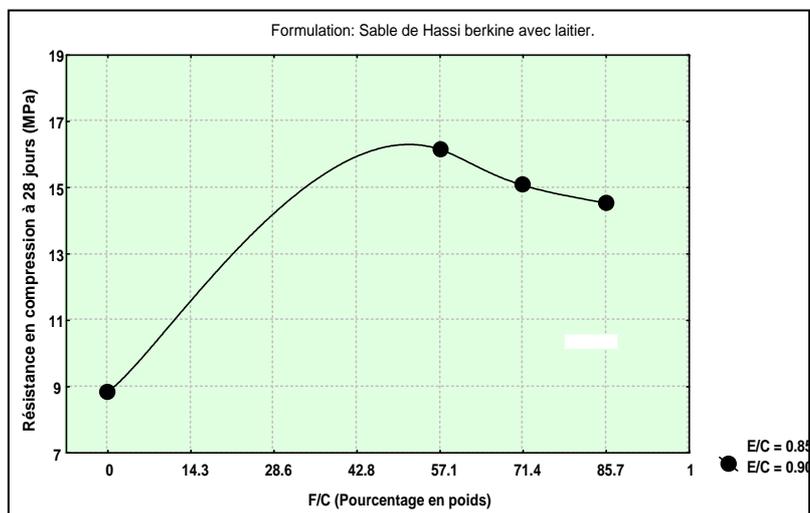


Figure VII.14. : Relation résistance en compression rapport Filler/ciment (SD1, Laitier)

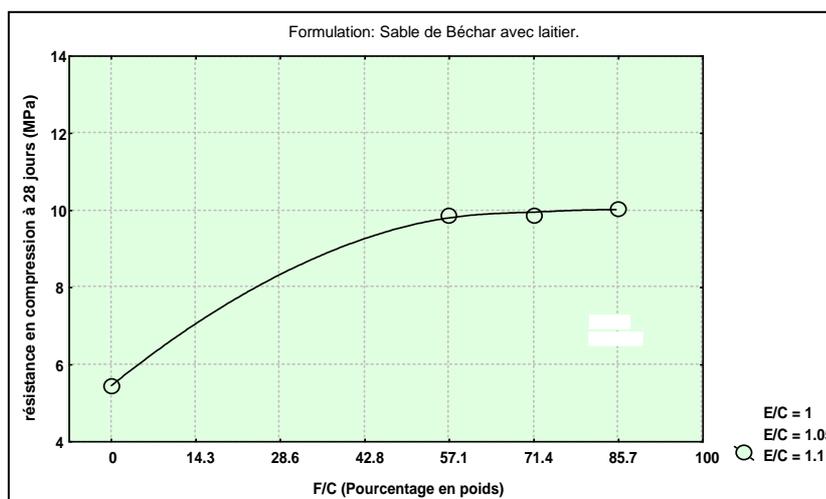


Figure VII.15. : Relation résistance en compression rapport Filler/ciment (SD2, Laitier)

L'analyse des résultats montre que :

- A rapport E/C constant la résistance dépend du dosage en fines d'addition.
- A rapport E/C constant le temps d'écoulement dépend également du dosage en fines et de la nature de d'addition : le béton devient plus maniable avec l'addition de filler calcaire qu'avec le laitier, élément à grains anguleux actifs ; il nécessite une quantité d'eau plus grande que le filler calcaire.

VII.5.2. Comportement du béton de sable de dunes modifié pour chaussées aéronautiques.

Des essais complémentaires ont été réalisés sur la formulation optimale choisie :

- ✓ Déformations relatives sous charge monotone : afin d'apprécier la loi de comportement, module de Young, le module de Poisson et la variation du volume en fonction de la contrainte.
- ✓ Comportement sous charge cyclique permet de déterminer le module de Young apparent, le module de poisson apparent, et la déformation en volume maximal.

VII.5.2.1. Résistances mécaniques

La résistance en compression simple est la caractéristique essentielle du comportement mécanique du béton durci.

Les résistances en compression et traction obtenues sur éprouvettes normalisées sont données dans le tableau VII-9.

Tableau VII-9 : Résistances à la compression et à la traction pour la formulation optimale.

<i>Echéance</i>	7 jours	à 28 jours
<i>Résistances mécaniques</i>		
Résistance à la compression (MPa)	10	17
Résistance à la traction (MPa)	1,83	3,1

VII.5.2.2. Déformations relatives sous charge monotone

VII.5.2.2.1. *Loi de comportement*

Cet essai à été effectué sur des éprouvettes de dimensions (4*4*8) cm obtenues par découpage à la tronçonneuse des prismes (4*4*16) cm.

L'essai a été réalisé sous une presse hydraulique (MTS 60KN) du laboratoire de mécanique ; Sols, structures et matériaux de l'école centrale de Paris.

Les figures VII.16 et VII.17 présentent l'évolution des déformations longitudinales et transversales en fonction de la contrainte appliquée dans un essai de compression à charge monotone.

On remarque que globalement la courbe contraintes déformations de notre béton de sable de dunes a une allure similaire à celui d'un béton ordinaire de sorte que:

- ✓ Le comportement de notre béton de sable est quasi linéaire ou bilinéaire jusqu'à un taux de déformation de l'ordre de 0,3 %, et qui correspond à une contrainte maximale égale à 24 MPa.
- ✓ Dès que cet ordre de déformation est atteint, la relation entre les déformations et les contraintes devient descendante jusqu'à une valeur de déformation de l'ordre de 1 % (rupture), cette phase est celle où les fissures se propagent dans la matrice parallèlement à la direction de sollicitations.
- ✓ Du début de chargement jusqu'au pic la vitesse de déformation transversale est faible, au-delà de cette limite cette vitesse augmente. Cette variation de vitesse est liée principalement à la propagation des fissures dans la matrice.

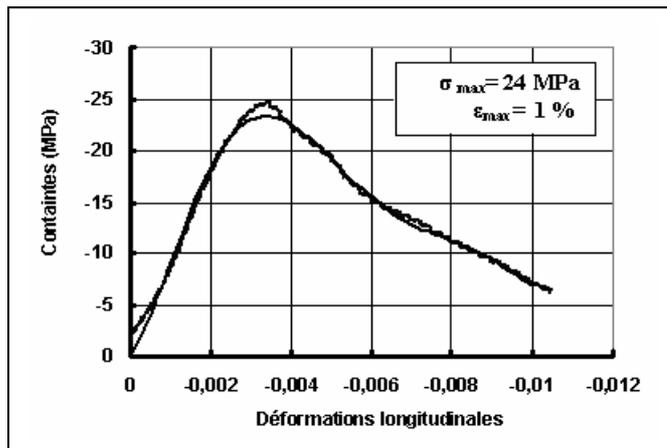


Figure.VII.16. : Relation contraintes déformations longitudinales

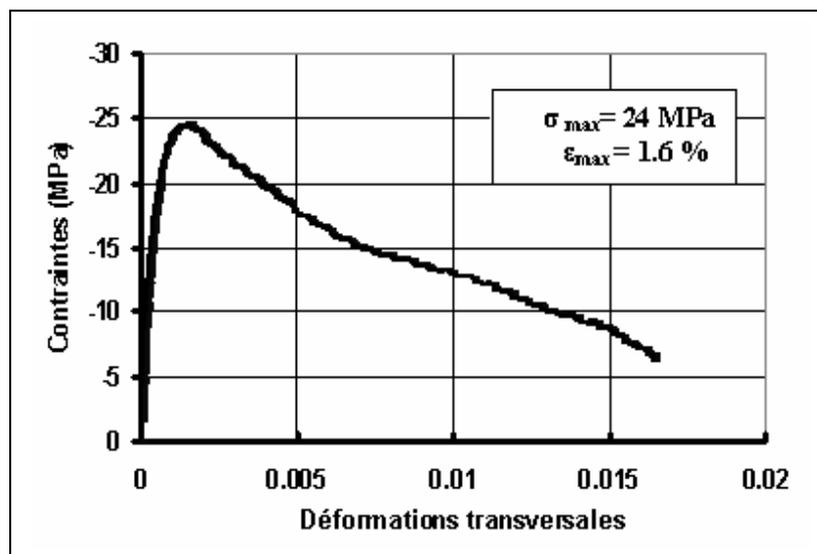


Figure VII.17. : Courbe contraintes Déformations transversales.

VII.5.2.2.2. Déformations en volume

La figure VII.18 présente l'évolution des déformations en volume en fonction de la contrainte appliquée.

- ✓ Il y a une diminution de volume jusqu'à la valeur maximale des contraintes appliquées (24 MPa), où l'éprouvette revient à son volume initial, ceci est lié aux pores du matériau ou aux microfissures préexistantes qui se referment.
- ✓ Au-delà de pic, il y a une augmentation de volume dû à la propagation des fissures dans la matrice cimentaire.

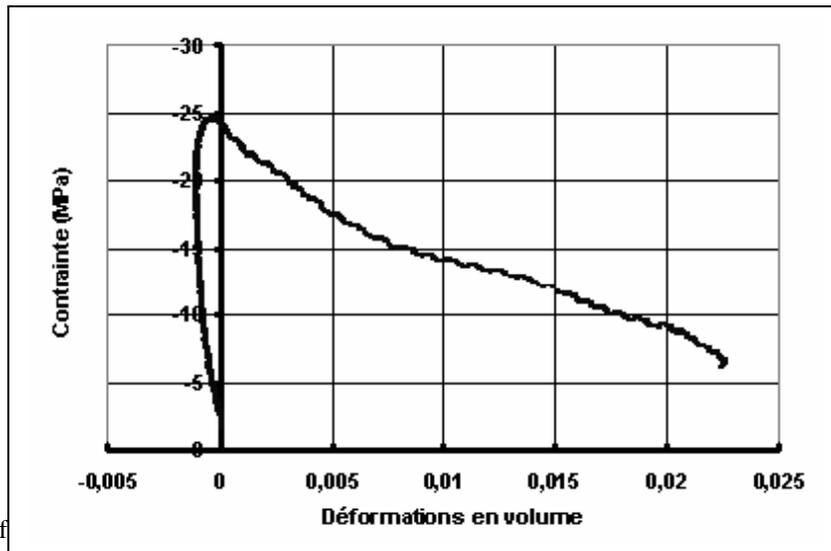


Figure VI.19. Déf

Figure VII.18. : Courbe déformations en volume contrainte appliquée.

VII.5.2.3. Comportement sous charge cyclique

Dans cet essai, on applique sur les éprouvettes (4*4*8) cm une charge de compression monoaxiale et cyclique. (Figure VII.19)

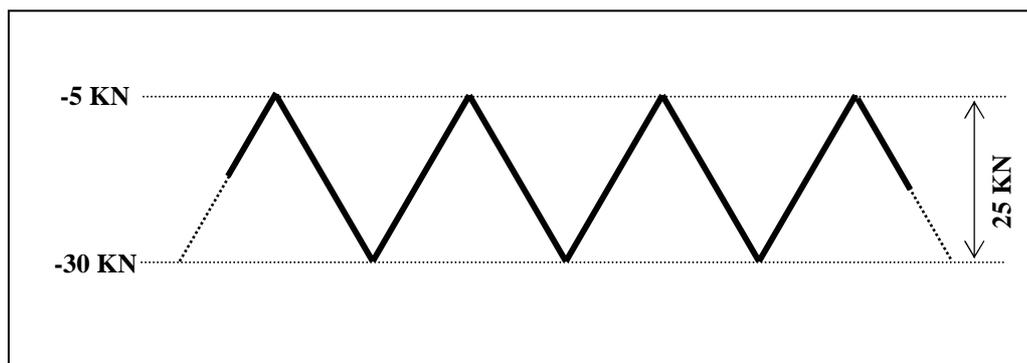


Figure VII.19. : Charge cyclique appliquée

VII.5.2.3.1. *Module de Young*

La figure VII.20 présente l'évolution du module de Young en fonction du nombre de cycles.

Le module de Young obtenu avec l'essai de compression à chargement cyclique est de l'ordre de 21000 MPa ; il est comparable à celui obtenu avec F.GORISSE [Gorisse F.,1972], pour son micro-béton:

$$\text{Micro béton de F .GORISSE} \quad \left\{ \begin{array}{l} D_{\max} = 1,6 \text{ mm} \\ R_{c28} = 20 \text{ MPa} \\ E = 22000 \text{ MPa} \end{array} \right.$$

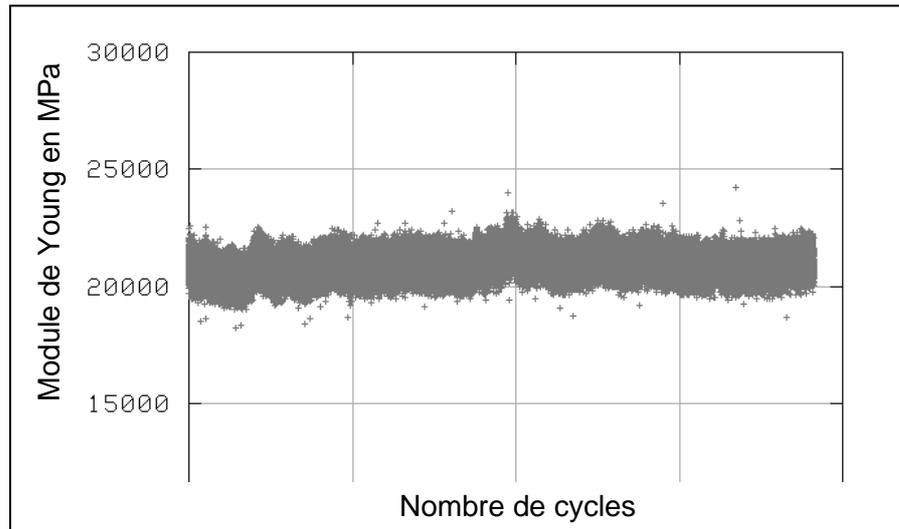


Figure VII.20. : Module de Young apparent en fonction du nombre de cycles

VII.5.2.3.2. Coefficient de Poisson

La figure VII.21 présente l'évolution du coefficient de poisson en fonction du nombre de cycles. Le coefficient de poisson de notre béton de sable de dunes est de l'ordre de 0,4 proche de celui trouvé avec l'essai précédent.

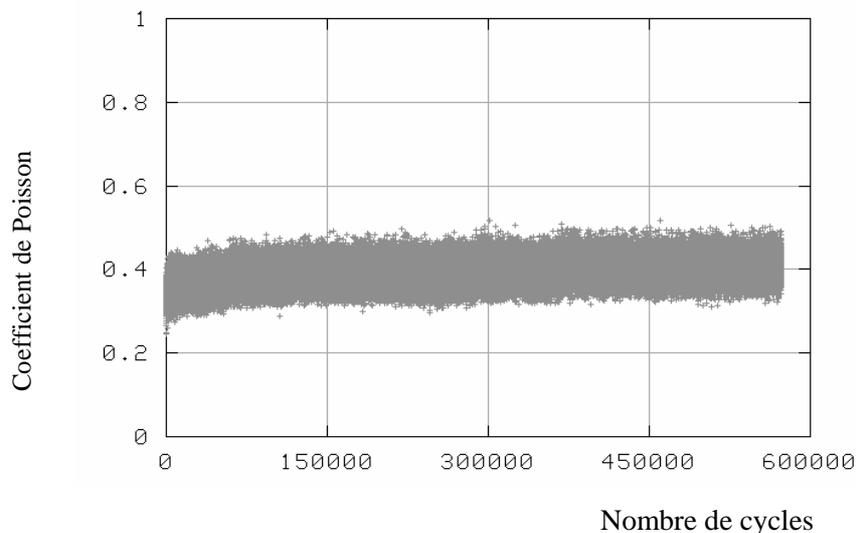


Figure VII.21. : Coefficient de Poisson apparent en fonction du nombre de cycles.

VII.5.2.3.3. Déformation en volume maximal

La courbe VII.22 montre l'évolution des déformations en volume maximal en fonction du nombre de cycles.

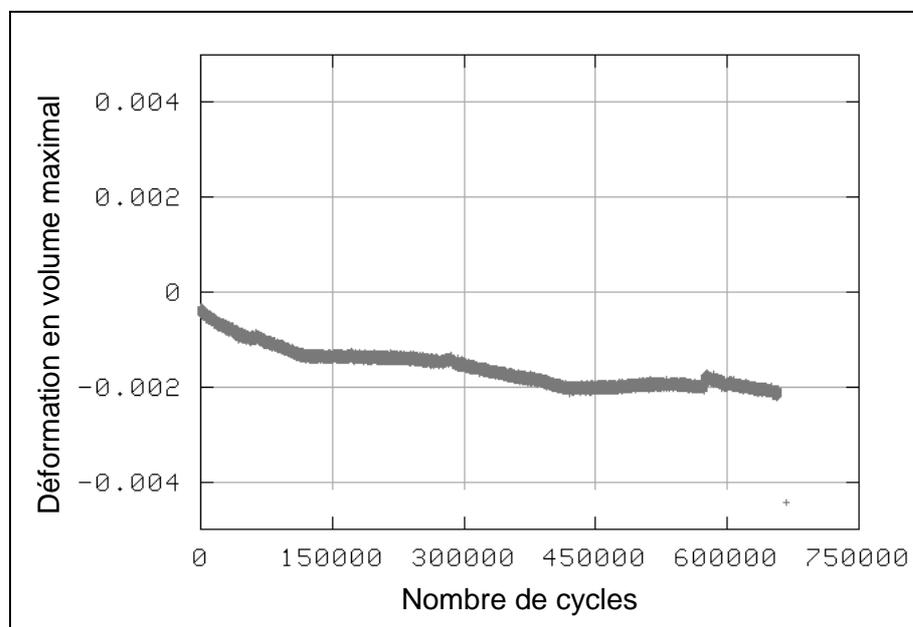


Figure VII.22. : Déformation en volume maximal en fonction du nombre de cycles

On remarque que le volume de l'éprouvette du béton de sable de dunes diminue lorsque le nombre de cycles s'accroît. (Diminution du volume de vides de la matrice du béton de sable).

VII.5.3. Conclusion

Malgré la mauvaise granulométrie du sable utilisé; sable homométrique, très fin ($M_f = 0,72$), le dosage en ciment habituel (350 Kg/m^3), et le rapport E/C élevé (supérieur à 0,75), les résistances obtenues sont satisfaisantes (la résistance à la compression à 28 jours est supérieure à 15 MPa; la résistance à la traction par flexion de l'ordre de 3), et les caractéristiques testées sont acceptables.

Chapitre VIII : Caractérisation des Sables bitumes

VIII.1. Introduction

L'utilisation d'un matériau dans le corps de chaussée nécessite la connaissance de son comportement mécanique. L'étude au laboratoire des caractéristiques mécaniques de ces matériaux constitue une phase indispensable pour leur adaptation en technique routière. L'emploi de sables bitumes en corps de chaussées est une éventualité intéressante dans les régions dépourvues de roches dures. Cette solution devrait faire face au déficit en granulats, en favorisant des techniques utilisant et valorisant des matériaux disponibles localement. Leurs possibilités d'emploi sont liées à leurs performances.

L'emploi des matériaux non traditionnels dans les corps des chaussées ne cesse de progresser un peu 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 ; 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 [Horta, 1979].

Les sables fins ne sont 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.

VIII.2. Programme expérimental

La complexité du comportement mécanique des sables bitumes dépend de la nature du sable, sa granulométrie, sa forme, son pourcentage de fines ainsi que du liant et du type d'enrobage.

Cette expérimentation va s'intéresser aux études suivantes :

VIII.2.1. Etude de l'influence du liant et de sa teneur sur les performances mécaniques

Cette étude permettra dans un premier temps de déterminer les teneurs en liant (bitume, Cut Back, émulsion) pour chaque type d'enrobage (à chaud ou à froid) permettant d'obtenir les meilleures performances mécaniques (Hubbard Field, Marshall, Duriez).

VIII.2.2. Etude de l'influence d'un ajout granulaire sur les performances mécaniques

VIII.2.2.1. Influence de la teneur en fines

Cette étude consistera à faire varier la teneur en fines du mélange (différents sables, ajout de filler d'apport : fines calcaires, gypseuses...). Son incidence sur les performances nous renseignera sur leurs seuils d'utilisation.

VIII.2.2.2. Influence de la grosseur du sable

On a fait varier le pourcentage de gros éléments par adjonction de sables correcteurs (sable concassé, alluvionnaire, gypseux, arène granitique) à différentes teneurs.

Cette étude a permis de montrer outre l'influence de l'ajout granulaire, celle de l'hétérogénéité du prélèvement ainsi que la ségrégation au cours du transport et du stockage sur la qualité du mélange.

VIII.2.3. Etude de l'influence d'un ajout chimique sur les performances mécaniques

Différents pulvérulents industriels (chaux, ciment, laitier broyé, plâtre) ont été mélangés aux sables à différentes teneurs et dans leur plage admissible d'utilisation ; des performances pour chaque ajout ont été déterminées et des recommandations faites.

VIII.2.4. Etude de l'influence de la température sur les performances mécaniques

L'absence de squelette minéral donne un caractère particulier au mélange sable bitume. L'énergie ainsi que la température de compactage sont importantes pour la mise en œuvre de l'enrobé et dépendent de l'épaisseur désirée de la couche. Le bitume a un rôle à jouer de par sa viscosité et par conséquent de la température d'enrobage et de mise en œuvre.

Ce phénomène est étudié sur des éprouvettes Marshall ou Hubbard Field à différentes températures de conservation pour un compactage donné.

VIII.2.5. Etude de l'influence de l'énergie de compactage sur les performances mécaniques

La température étant fixée, nous faisons varier l'énergie de compactage (Marshall, Duriez) et nous observons son incidence sur les stabilités et les compacités.

VIII.2.6. Etude de l'influence de la température sur la résistance au fluage dynamique

Les éprouvettes sont testées à l'essai de fluage dynamique à différentes températures ; les résultats nous renseignent sur le comportement du sable bitume aux conditions climatiques et sa susceptibilité aux gradients thermiques ; des seuils admissibles de tolérance ont été déterminés.

VIII.2.7. Etude du comportement et modélisation.

Des essais de comportement en traction indirecte et en compression simple ont été effectués ; des caractéristiques rhéologiques tirées et un modèle rhéologique proposé suite à un essai de fluage statique.

On a recherché une relation ou précisément un modèle additif reliant les paramètres de la route tels que la compacité, la densité et la résistance en compression à ses facteurs d'influence tels que le type de sable, le pourcentage de sable mis en jeu et la caractéristique du liant. Une recherche de corrélation entre variable (Y), dite variable expliquée (la résistance à la compression) et d'autres variables (X_i), dites variables explicatives (compacité, % liant et % de fines) a été faite par le logiciel SPAD et procédé VAREG.

VIII.3. Traitement des sables

La Teneur et la classe du bitume sont deux facteurs ayant une incidence importante sur les valeurs des résultats escomptés.

Nous nous sommes intéressés à l'étude de l'influence de la nature du liant, bitume pur (40/50 et 80/100) émulsion 60 et Cut back 400/600, et des différents ajouts (sables concassé, gypseux, arène granitique, fines gypseuses, fines calcaires, ciment CPJ45, chaux éteinte, laitier de haut fourneau, plâtre) sur les performances de l'enrobé à chaud ou à froid obtenu après mélange des sables de dune avec les différents stabilisants.

La première étape consiste à déterminer la teneur du bitume pur donnant le maximum de compacité et de stabilité Hubbard Field du sable seul enrobé. Pour cela, différents pourcentages de bitumes purs variant de 5,5 à 8 ont été utilisés en adoptant un pas de 0,5%. Cette étape terminée, les stabilisants ont été incorporés dans le mélange sable de dune-bitume pur pour apporter les corrections escomptées.

VIII.3.1. Ajout granulaire

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.

VIII.3.1.1. Sable de concassage

Le sable concassé utilisé possède des caractéristiques chimiques et granulométriques favorisant l'obtention de bons résultats. Sa composition chimique est constituée principalement de carbonates (58,82%) connus pour leur bonne affinité aux liants noirs et surtout au bitume. Son pourcentage en fines et en éléments grossiers est favorable à une bonne correction.

VIII.3.1.2. Sable gypseux

Le sable gypseux est obtenu par hydratation et cristallisation dans le système monocyclique du sulfate de calcium.

VIII.3.1.3. Arène granitique

L'analyse chimique de l'arène granitique montre qu'elle est siliceuse, les éléments prédominants dans sa composition sont les insolubles (85,14%).

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; Les grains siliceux 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.

VIII.3.1.4. Fines gypseuses

Le niveau de performances des mélanges dépend 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.

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 (adhésivité) liant-granulat.

Les fines gypseuses ont une capillarité importante très défavorable ; elles s'imbibent vite. Toutes les chaussées exécutées en sable gypseux ont présenté des fissurations, elles apparaissent après la construction de la route, indépendamment du trafic sous forme 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 [Horta, 1979] 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.

VIII.3.1.5. Fines calcaires

Les fines calcaires ont été depuis longtemps utilisées en tant qu'ajout pour la correction de la granulométrie de certains matériaux utilisés dans la technique routière. 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.

VIII.3.2. Ajout chimique

Le pourcentage des pulvérulents industriels varie de 1 à 6% avec un pas de 1%. La valeur de 6% est considérée comme le seuil économique inscrit dans les recommandations.

VIII.3.2.1. Chaux

La chaux hydraulique a été souvent introduite dans les enrobés hydrocarbonés afin d'améliorer l'adhésivité passive du mélange.

Dans la technique routière saharienne et du fait que la chaux ne soit pas fabriquée sur place, son prix de revient est élevé; une teneur à moins de 4% dans le mélange est recommandée.

La chaux utilisée est une chaux hydraulique (éteinte) de masse volumique absolue égale à $2,32 \text{ g/cm}^3$, apparente égale à $0,82 \text{ g/cm}^3$ avec un pourcentage de fines de 91%.

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 (essentiellement des fines : le pourcentage des éléments ayant un diamètre inférieur à 0,08 mm est généralement supérieur à 85%) lui permet de combler un certain pourcentage de vides (il est 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.

VIII.3.2.2. Ciment

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 leur rôle important dans l'industrie routière.

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 ; 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.

VIII.3.2.3. Laitier broyé

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).

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 la recristallisation du laitier, entraînant ainsi la prise hydraulique.

VIII.3.2.4. Plâtre

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

VIII.4. Bitumes purs : enrobage à chaud

VIII.4.1. 100% sable de dunes

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

- Eviter les risques d'orniérage qui peuvent avoir lieu avec des liants moins durs exposés à l'ensoleillement prolongé du Sahara.
- Eviter 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.

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.
- 160 °C pour l'enrobé à base de bitume 40/50.

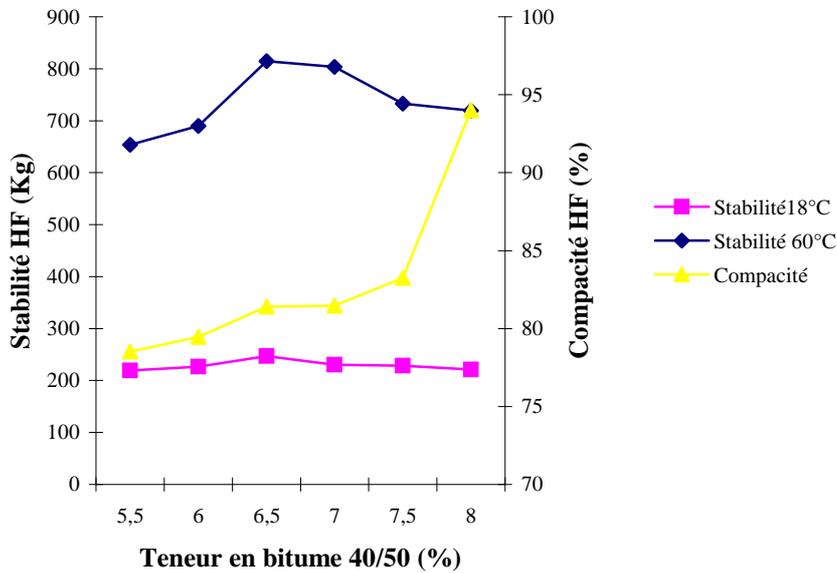


Figure VIII.1. : Influence du bitume 40/50 sur les performances Hubbard Field.

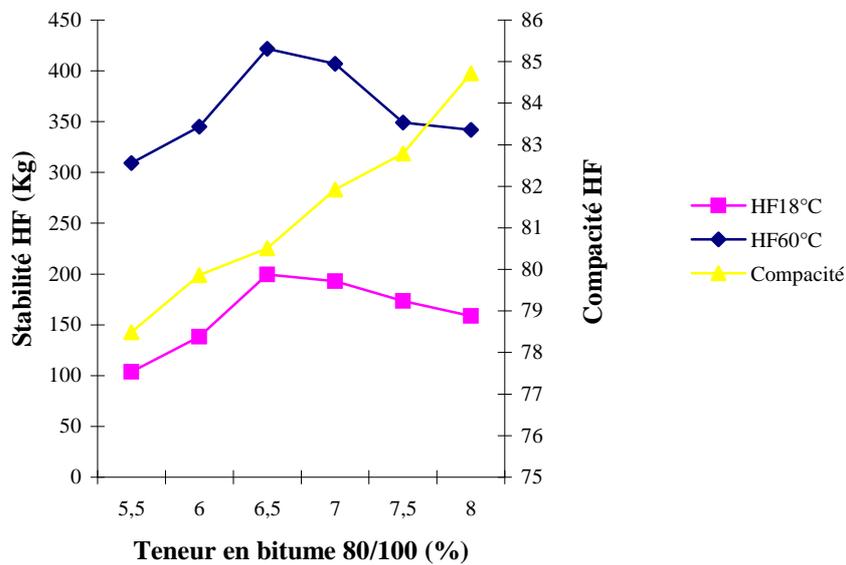


Figure VIII.2. : Influence du bitume 80/100 sur les performances Hubbard Field.

Les performances mécaniques des sables bitumes réalisés avec sable de dunes seul (Figures VIII.1 et VIII.2) demeurent faibles malgré des teneurs en liants importantes et quelle que soit la classe du liant.

Les stabilités et compacités sont insuffisantes par rapport aux caractéristiques recommandées (stabilité minimale à 60°C = 500 Kg et compacité entre 88% et 95%). Ceci est dû à :

- L'absence de squelette minéral (le liant doit compenser cette défaillance par sa dureté),
- Leur granulométrie serrée (sable homo métrique) empêche un bon arrangement des grains et leur forme arrondie n'offre pas suffisamment d'angularité pour mobiliser le frottement intergranulaire nécessaire.
- Leur faible pourcentage en fines ne permet pas, 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.
- Leur nature minéralogique constituée particulièrement d'insolubles ; la silice est connue par sa faible adhérence au bitume entraînant une faible adhésivité. La solution est l'adjonction au mélange sable de dune-bitume de pulvérulents industriels (généralement de la chaux).

On pourrait remédier à cette insuffisance de performances par l'utilisation d'un bitume plus dur (20/30) ; les performances mécaniques seraient meilleures mais l'inconvénient serait le risque de l'endommagement par fatigue de plus en plus important.

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

Il conviendra d'éviter les bitumes de pénétration très importante (risques d'orniérage). A l'inverse, les liants de trop faible pénétration peuvent conduire, très rapidement par vieillissement à une rigidité élevée. Dans la pratique, il est conseillé de choisir un bitume dont la pénétration soit comprise entre 50 et 100.

VIII.4.2. Ajout granulaire

Les performances Hubbard Field pour différents ajouts et les deux classes de bitume sont données dans les figures VII.3 à VII.6.

VII.4.2.1. Sable de concassage

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 est une solution envisageable.

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 figures ci dessous montrent que les performances Hubbard Field augmentent avec le pourcentage de sable de concassage quelque soit le bitume utilisé.

- La variation de la compacité est prévisible dans la mesure où l'ajout du sable concassé rend la granulométrie du mélange plus étalée ; cela occasionne un arrangement des grains de plus en plus favorable.
- Le sable concassé utilisé a permis une nette amélioration de la stabilité, cela revient à quatre facteurs essentiels :
 1. 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 ;
 2. L'angularité de ses grains mène à un meilleur frottement intergranulaire ; ce qui a pour effet d'augmenter la stabilité de l'enrobé ;
 3. Sa richesse en éléments fins (plus de 16,58% d'éléments ont un diamètre supérieur à 0,08 mm) améliore le comportement du mastic bitume/filler en le rigidifiant d'avantage.
 4. Sa nature minéralogique (58,82% de carbonates) est favorable à une bonne adhésivité liant granulats vue son affinité aux liants hydrocarbonés.

La stabilité finale du mélange est due aux forces de cohésion mobilisées par le liant hydrocarboné et aux forces de frottement intergranulaire mobilisées par les éléments anguleux.

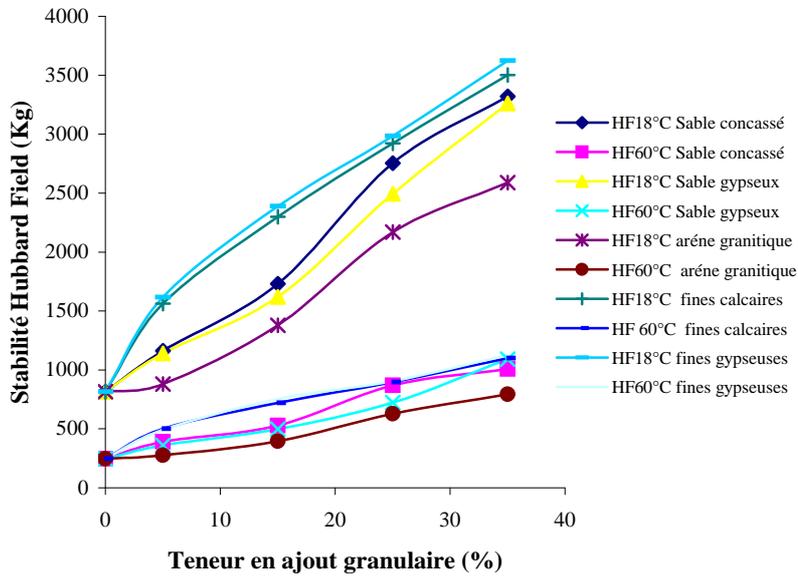


Figure VIII.3. : Influence de l'ajout granulaire sur les stabilités Hubbard Field (bitume 40/50)

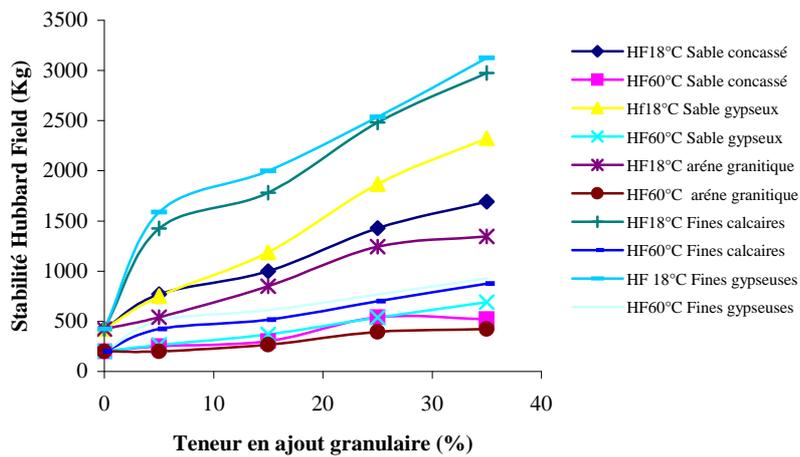


Figure VIII.4. : Influence de l'ajout granulaire sur les stabilités Hubbard Field (bitume 80/100)

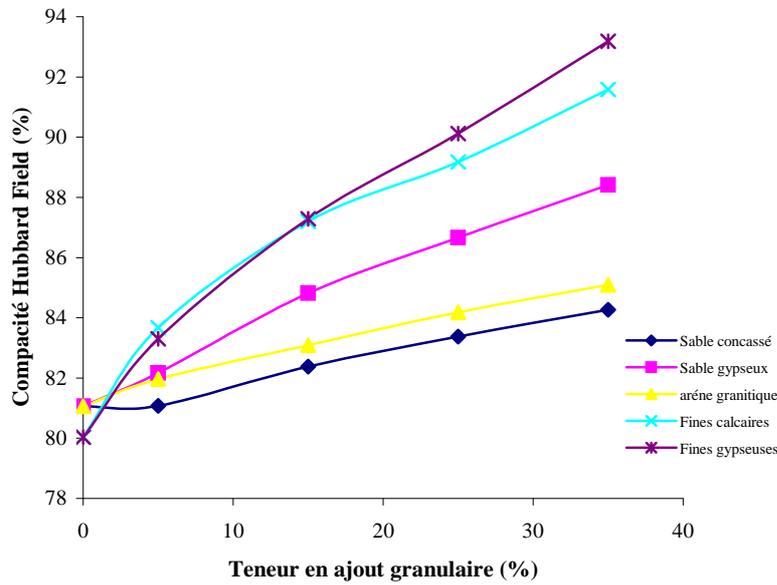


Figure VIII.5. : Influence de l'ajout granulaire sur les compacités (bitume 40/50).

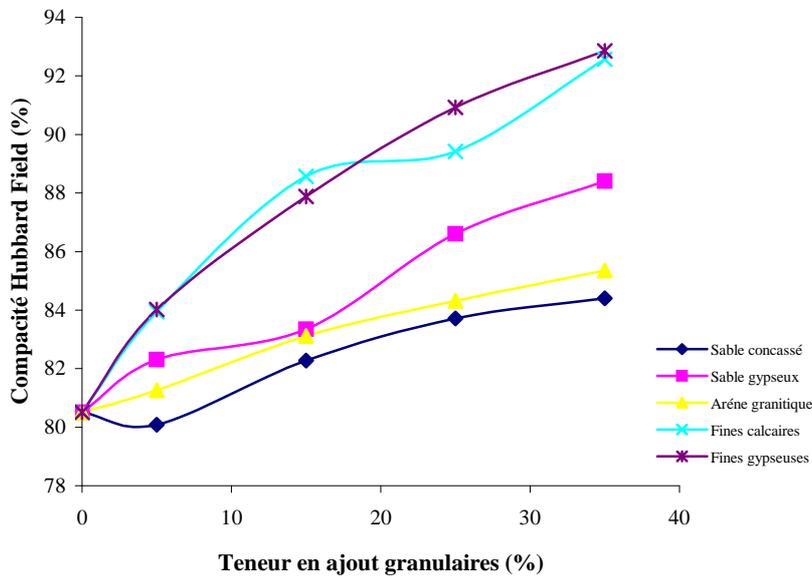


Figure VIII.6. : Influence de l'ajout granulaire sur les compacités (bitume 80/100)

VIII.4.2.2. Sable gypseux

L'une des propriétés caractéristiques de ce minéral est sa friabilité.

Après analyse des résultats, on remarque la forte teneur en bitume nécessaire pour l'enrobage (7 à 9%) des différentes formulations; elle reste cependant dans les normes et se justifie par sa teneur en fines trop élevée.

L'emploi du sable gypseux dans la technique routière est très bénéfique :

- Sa friabilité et sa forte teneur en fines favorisent la correction de la granulométrie de matériaux ayant une granulométrie serrée;
- Sa nature minéralogique est favorable à une bonne cohésion, il se compose essentiellement de gypse et de calcaire.

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.

Son incorporation a permis de rigidifier le mastic (liant hydraulique) et de réduire le pourcentage de fines (augmentation de la compacité).

Les meilleures performances sont données par les formulations : 75% de sable de dune + 25% de sable gypseux pour les deux classes de bitume.

VIII.4.2.3. Arène granitique

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'ajout de sable concassé ou de sable gypseux, ceci est dû à plusieurs facteurs :

- La nature minéralogique de l'arène, qui se compose essentiellement de grains siliceux connus par leur mauvaise affinité au bitume ;
- L'angularité des grains de l'arène, grains plus ou moins arrondis;
- Son pourcentage en fines relativement faible (le pourcentage en fines est de 12% pour l'arène, 16,58% pour le sable concassé et 30,79% pour le sable gypseux).

La solution à laquelle on fait souvent appel est l'incorporation d'un pourcentage de chaux assez raisonnable (généralement entre 2 à 4%).

VIII.4.2.4. Fines gypseuses

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.

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.

En analysant les résultats obtenus pour différents pourcentages de cet 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 ; 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.

VIII.4.2.5. Fines calcaires

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

La teneur en bitume, nécessaire à l'obtention d'un meilleur enrobage du mélange, passe de 6,5% à 9,84% avec 35% de fines calcaires. Cette teneur est assez élevée mais le gain obtenu en résistance et en compacité est considérable :

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).

VIII.4.3. Ajout chimique

Les résultats sont présentés dans les figures VIII.7 à VIII.10.

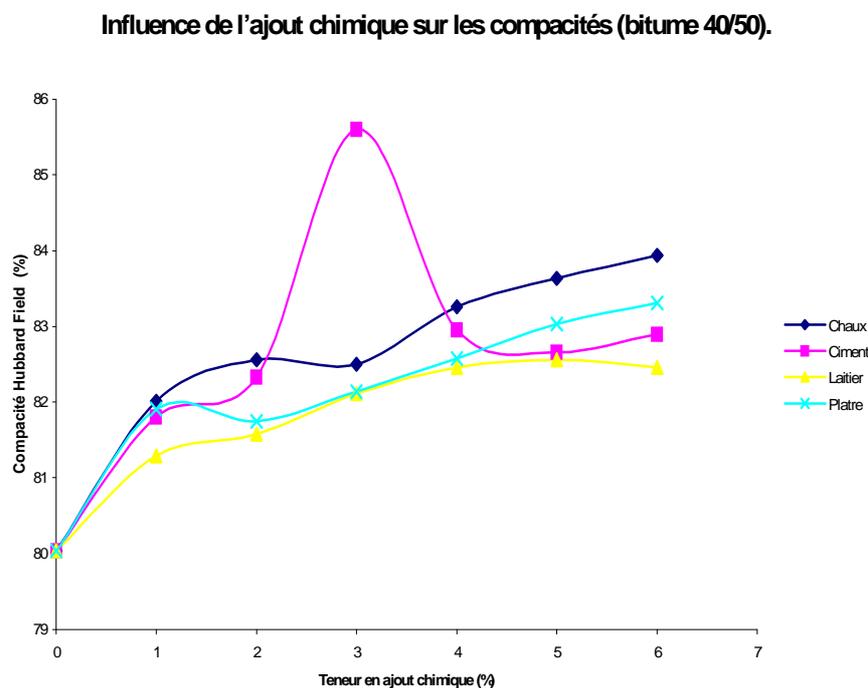


Figure VIII.7. : Influence de l'ajout chimique sur les compacités (bitume 40/50).

**Influence de l'ajout chimique sur les compacités
(bitume 80/100).**

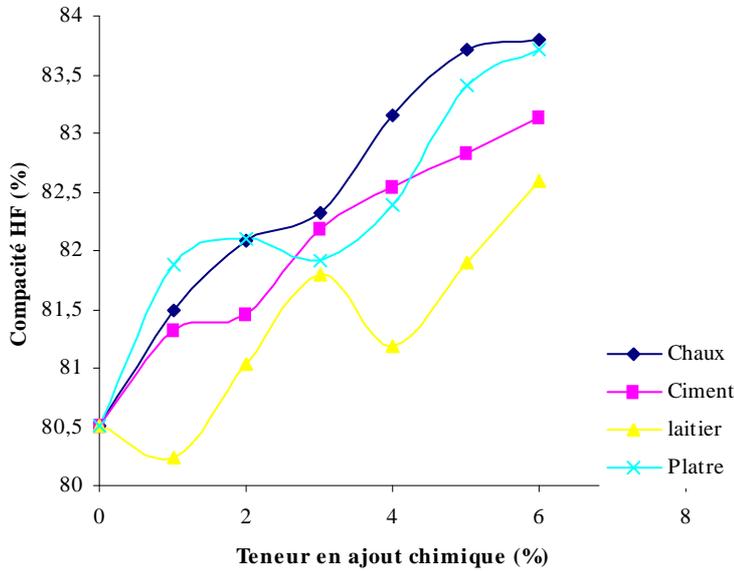


Figure VIII.8. : Influence de l'ajout chimique sur les compacités (bitume 80/100).

**Influence de l'ajout chimique sur les stabilités
Hubbard Field (bitume 40/50).**

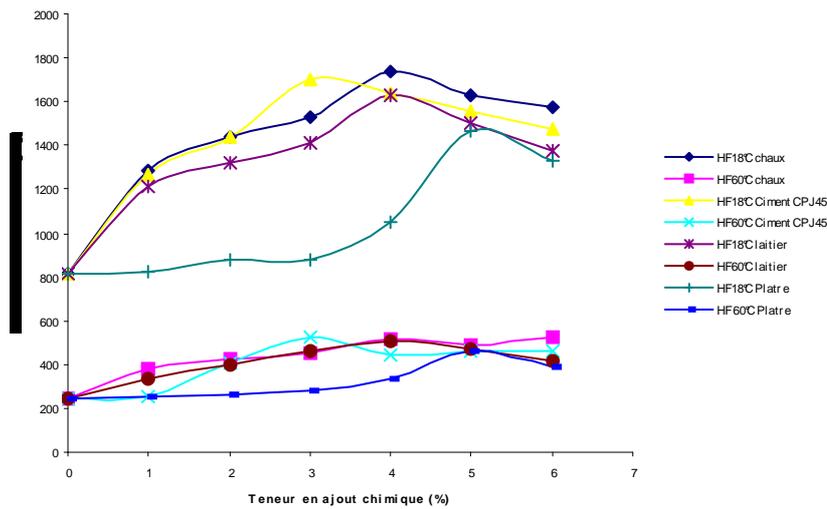


Figure VIII.9. : Influence de l'ajout chimique sur les stabilités Hubbard Field (bitume 40/50).

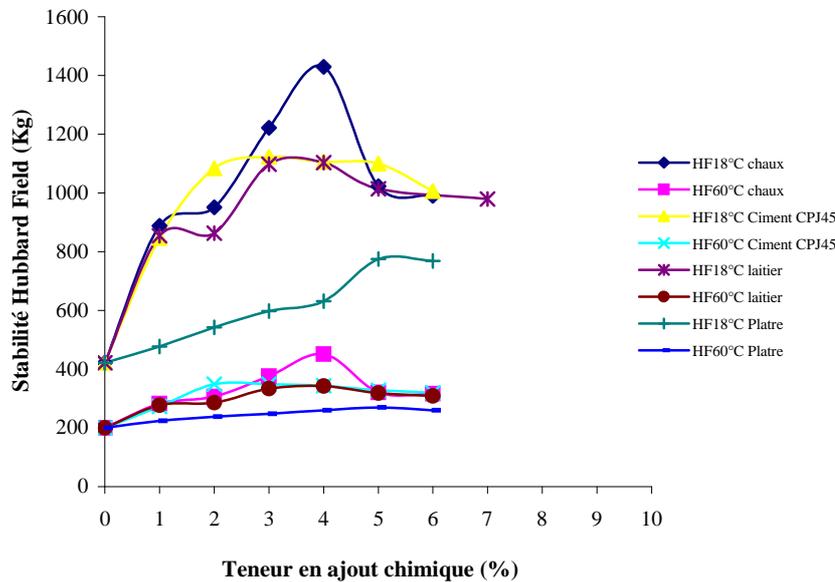


Figure VIII.10. : Influence de l'ajout chimique sur les stabilités Hubbard Field (bitume 80/100).

VIII.4.3.1. La chaux

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).

La stabilité Hubbard Field augmente avec l'ajout de la chaux jusqu'à une valeur optimale correspondante à 4% de chaux..

La compacité Hubbard Field augmente quant à elle continuellement avec ajout de chaux.

La stabilité recommandée pour ce type d'enrobé a été atteinte avec un bitume 40/50 dans un mélange se composant de 96% de sable de dune et 4% de chaux; elle reste cependant insuffisante avec le bitume 80/100.

La chaux a joué le rôle de filler d'apport ; le mélange sans apport de chaux présente un pourcentage de vides plus important (nette amélioration de la compacité).

Après écrasement, en présence de chaux, les stabilités ne sont pas très influencées par l'action de l'eau. L'incorporation de la chaux améliore l'adhésivité passive du mélange

VIII.4.3.2. Le ciment

La correction du sable de dune avec le ciment CPJ 45 a permis de constater :

- L'existence d'un pic de résistance et de compacité autour de 3% de ciment avec le bitume 40/50.
- L'existence d'un pic de compacité autour de 3% de ciment, et une variation croissante de la résistance avec le bitume 80/100.

La stabilité recommandée pour ce type d'enrobé a été atteinte dans le cas de l'utilisation de bitume 40/50 avec 3% de ciment (stabilité minimale recommandée à 60°C > 500 Kg). Elle reste insuffisante avec le bitume 80/100.

VIII.4.3.3. Le laitier broyé

Le sable de dune ne contient pas assez de fines, il présente par conséquent une mauvaise stabilité ; sa correction est nécessaire. L'ajout d'un liant hydraulique, le laitier de haut fourneau est une possibilité car le sable de dune présente une cohésion nulle.

Les résultats des figures ci dessus 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.

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.

Le laitier de haut fourneau n'étant pas un matériau produit localement au Sahara, son utilisation en teneurs raisonnables permet d'allier l'intérêt économique et les exigences des recommandations.

VIII.4.3.4. Le plâtre

La correction du sable de dune par le plâtre (teneur variant de 1% à 6%) n'a pas permis d'atteindre les objectifs escomptés, les résultats sont inférieurs à ceux obtenus avec l'adjonction des trois liants hydrauliques précédents (ciment, laitier broyé, chaux), ceci serait dû à la mauvaise adhésivité du plâtre.

La stabilité ainsi que la compacité ont connu une certaine amélioration mais sans atteindre la valeur minimale des prescriptions techniques.

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 et 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 d'où sa rare utilisation dans la technique routière.

VIII.4.4. Conclusion de la première série d'essais

Une teneur en fines élevée, suite à l'adjonction des différents ajouts, augmente la surface spécifique (facteur prépondérant pour la détermination de la teneur en liant) et par conséquent entraîne une teneur en bitume importante nécessaire au bon enrobage.

Le traitement à chaud du sable de dunes avec différents 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 de la qualité du sable ainsi que des propriétés et de la disponibilité des liants et des différents ajouts.

VIII.5. Traitement à froid : Cut back et émulsion de bitume

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 algérien, on a constaté que selon les régions (les caractéristiques du sol support), la durabilité de ces revêtements est estimée de 3 à 10 ans. L'eau pénétrant dans ces enrobés s'infiltré 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 des compacités soit la meilleure.

On a étudié dans cette partie l'enrobage à froid et son incidence sur les performances mécaniques du sable enrobé corrigé avec les mêmes ajouts qu'à chaud. Les liants employés sont le cut back 400/600 et l'émulsion 60 (400/600 représente la pseudo-viscosité du cut back mesurée au viscosimètre d'orifice 10 mm à 25°C et 60 la teneur en bitume dans l'émulsion calculée après détermination de la teneur en eau dans l'émulsion).

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). Cette dernière est nécessaire pour avoir une bonne adhésivité du liant aux granulats sans atteindre la température d'évaporation de son solvant ou 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 pour l'enrobage à chaud. L'écrasement se fait après une stabilisation finale du poids de l'éprouvette (maturation ou évacuation du kérosène inclus dans le cut back et de l'eau de l'émulsion de bitume). Cette stabilisation dépend 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).

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).

Les liants utilisés pour l'enrobage à froid sont fabriqués à partir d'un bitume pur 80/100.

L'analyse des résultats Hubbard Field obtenus en employant les deux types de liants pour enrober le sable de dune montre que les stabilités Hubbard Field sont nettement inférieures à celles obtenues avec l'emploi des deux bitumes durs. Ces résultats se justifient par les conditions d'enrobage et par la dureté des liants. Les enrobés à froid obtenus en mélangeant des granulats non chauffés avec des liants chauffés à une température modérée d'utilisation (cut back) ou ne rien chauffer du tout (émulsion) donnent des résultats moins importants que ceux obtenus en chauffant les granulats et le liant à 140° C (bitume 80/100) ou 160° C. De même, les enrobés obtenus avec l'emploi de cut back et d'émulsion produits à partir de bitume 40/50 donneraient des résultats plus importants que ceux obtenus avec le bitume 80/100.

Les stabilités maximales Hubbard Field sont obtenues pour une teneur de 7,19 % de cut back et 11,57% d'émulsion ; ces deux valeurs correspondent à un ajout de 7% de bitume pur. Une valeur plus grande que celle correspondant à la valeur du pic provoque une intercalation du liant entre les grains du sable ; une valeur inférieure donnerait une mauvaise cohésion au mélange.

La compacité a connu une amélioration due à l'occupation de certains vides par chacun des deux liants.

VIII.5.1. Ajout granulaire

Les résultats d'essais Hubbard Field en incorporant à froid aux sables de dunes divers correcteurs sont donnés dans les figures VIII.11 à VIII.16

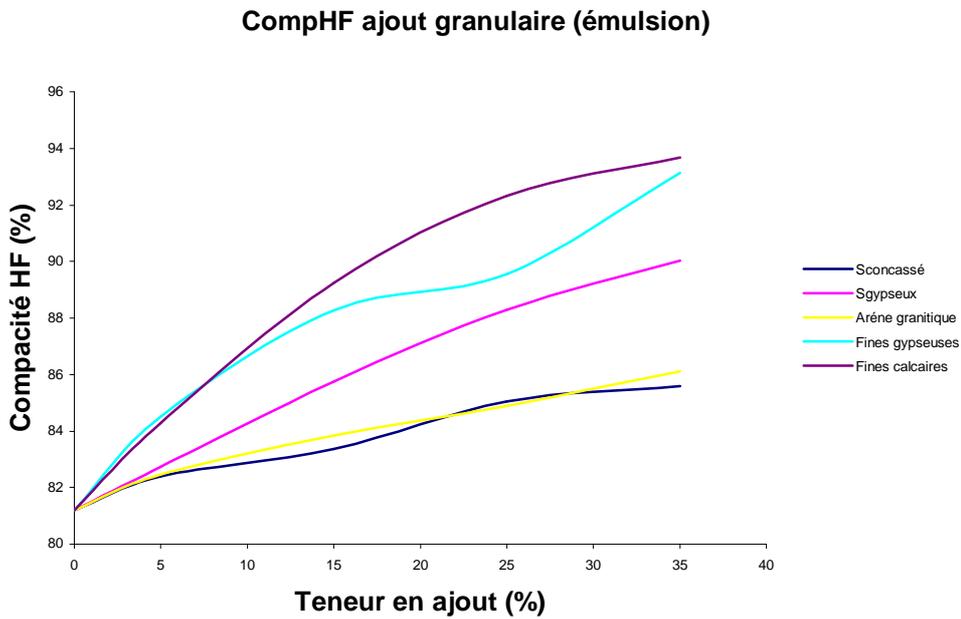


Figure VIII.11. : Influence de l’ajout granulaire sur les compacités Hubbard Field (émulsion)

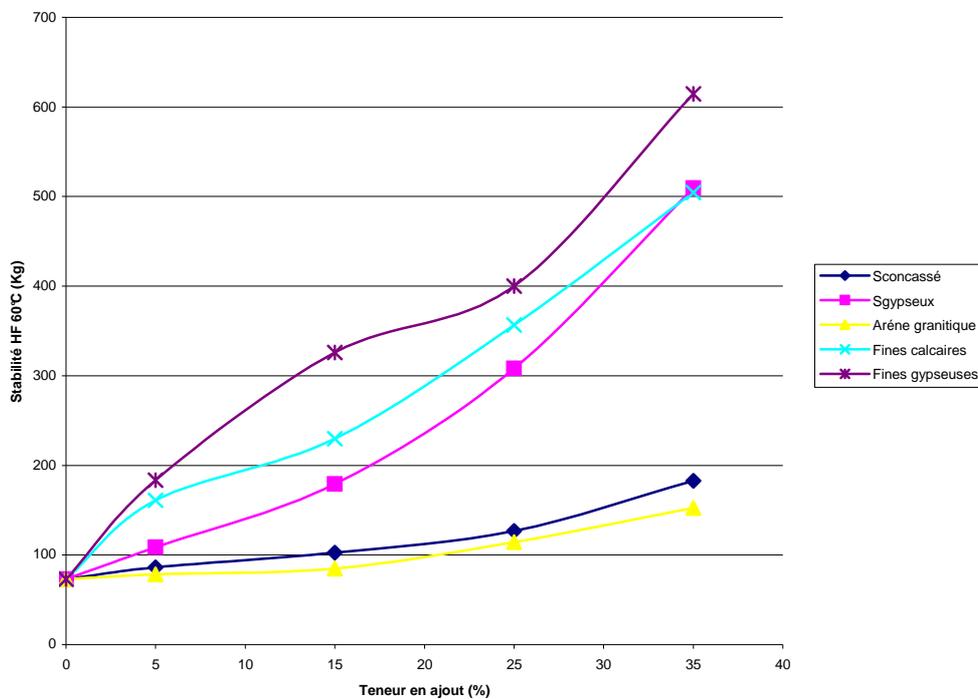


Figure VIII.12. : Influence de l’ajout granulaire sur les stabilités H Field 60°C (émulsion)

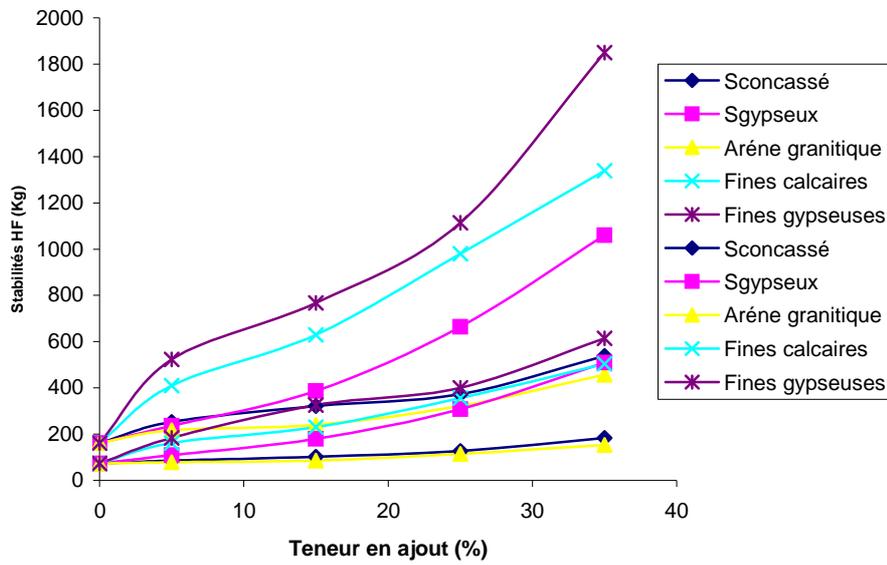


Figure VIII.13. : Influence de l'ajout granulaire sur les stabilités H Field (émulsion)

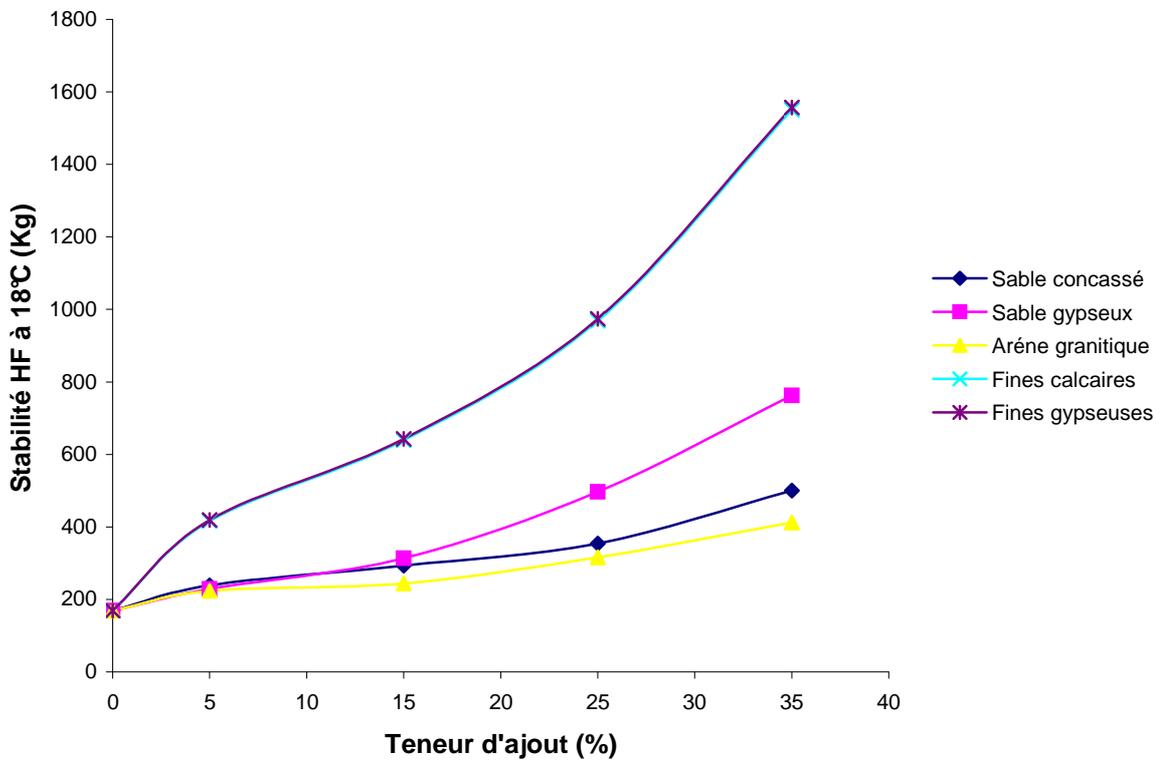


Figure VIII.14. : Influence de l'ajout granulaire sur les stabilités H Field 18°C (Cut Back)

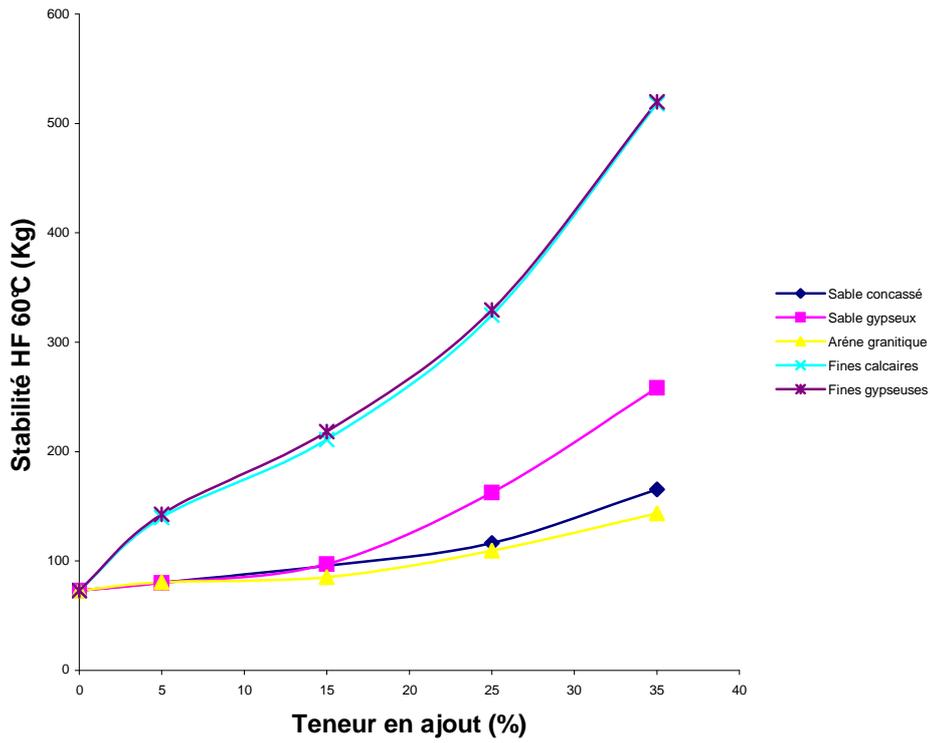


Figure VIII.15. : Influence de l'ajout granulaire sur les stabilités H Field 60°C (Cut Back)

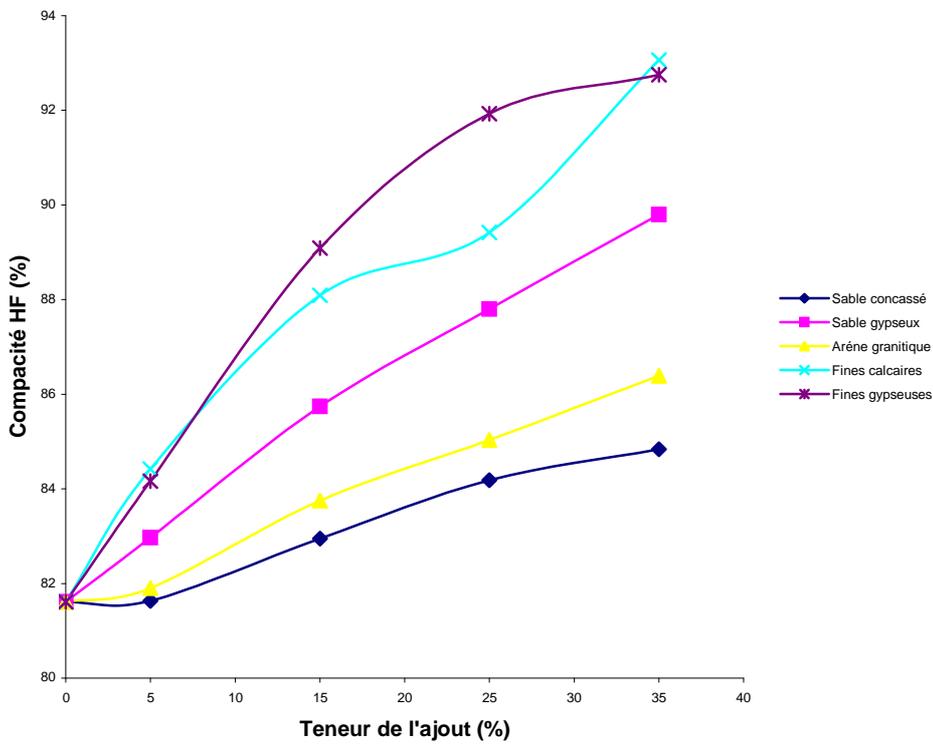


Figure VIII.16. : Influence de l'ajout granulaire sur les compacités H Field (Cut Back)

VIII.5.1.1. Le sable de concassage

L'utilisation du sable concassé a permis comme pour l'enrobage à chaud d'améliorer les performances mécaniques du mélange final.

Le sable de dune 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 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% à 6,69% avec 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 plus ou moins anguleux et 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.

Le gain en résistance qui augmente avec l'ajout n'est pas comparable à celui de l'enrobé à chaud et les prescriptions techniques ne sont pas atteintes.

VIII.5.1.2. Le sable gypseux

Le sable gypseux utilisé est friable de couleur blanchâtre avec un pourcentage en fines de l'ordre de 30,79%. Vu sa friabilité, 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 ne serait pas de 11,66% pour le cas de l'ajout de 35% de sable gypseux par exemple mais beaucoup plus important (matériau évolutif).

Le sable gypseux est composé 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. C'est un liant hydraulique naturel, il ne permet pas d'approvisionner le sable de dune en éléments grossiers uniquement 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 son ajout ne fait qu'améliorer la stabilité et la compacité Hubbard Field.

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.

VIII.5.1.3. L'arène granitique

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.

La stabilité exigée par les recommandations n'est pas atteinte dans le cas de l'utilisation des deux liants hydrocarbonés à froid.

VIII.5.1.4. Les fines gypseuses

La maniabilité du mélange avec les deux liants à froid, tout comme l'enrobé à chaud, devient de plus en plus difficile à partir de 25% de fines gypseuses ; ce qui a nécessité un temps de malaxage supplémentaire pour permettre un bon enrobage du mélange final. Avec 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 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 fragile; cela serait 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 de ces fines ne fait qu'améliorer la stabilité et la compacité Hubbard Field.

La stabilité exigée par les recommandations est atteinte dans le cas de l'utilisation de 35% de fines gypseuses.

VIII.5.1.5. Les fines calcaires

La solution consistant à augmenter la consistance du liant par des fines d'apport pourrait donner un plus à la technique des sables enrobés. L'introduction de fines calcaires en pourcentages de plus en plus importants 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 par la granulométrie serrée et dépourvue de fines du sable de dunes.

Le mélange sans apport de fines présente un pourcentage de vides de l'ordre de 18,39% (avec cut back) et de 18,80% (avec émulsion), 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 est survenu dans le cas de l'utilisation des fines calcaires ; le malaxage devient de plus en plus difficile en augmentant le pourcentage des fines dans le mélange. Le facteur responsable de la baisse de la maniabilité serait 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 effet :

- Rigidifier le mastic filler/bitume, d'où une nette augmentation de la stabilité et
- Diminuer le pourcentage des vides se traduisant par une meilleure compacité. La stabilité exigée par les recommandations est atteinte dans le cas de l'utilisation de 35% de fines calcaires.

VIII.5I.2. Ajout chimique

Les résultats d'essais Hubbard Field en incorporant à froid aux sables de dunes divers pulvérulents industriels sont donnés dans les figures VIII.17 à VIII.21.

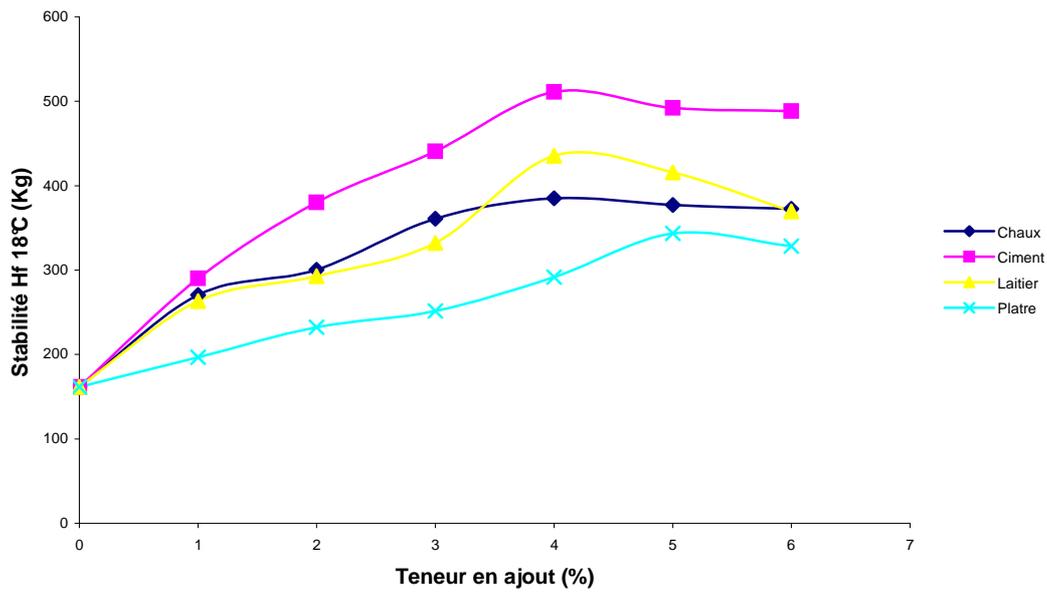


Figure VIII.17. : Influence de l'ajout chimique sur les stabilités H Field 18°C (émulsion)

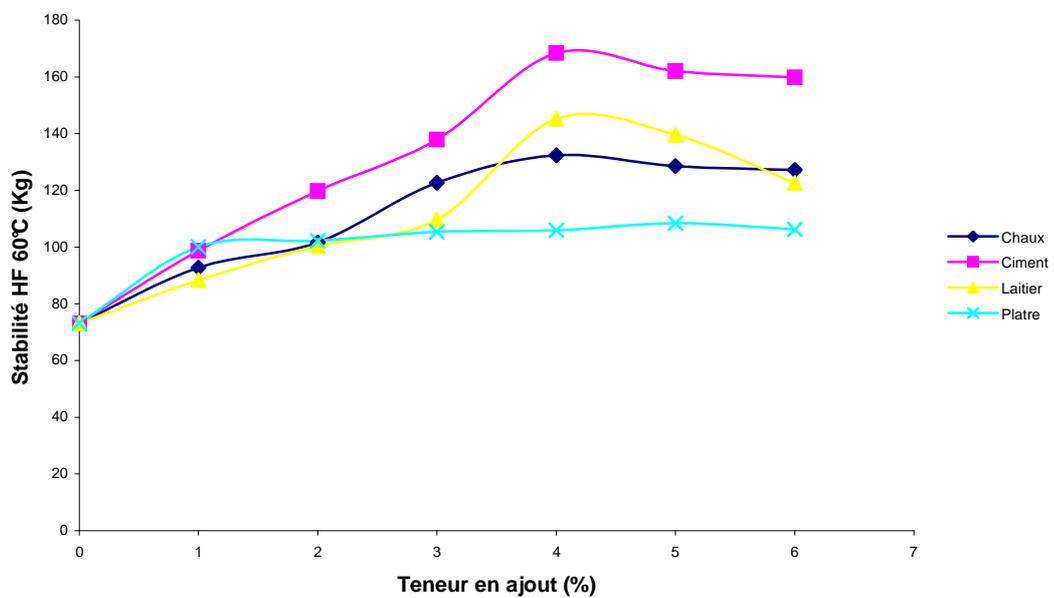


Figure VIII.18. : Influence de l'ajout chimique sur les stabilités H Field 60°C (émulsion)

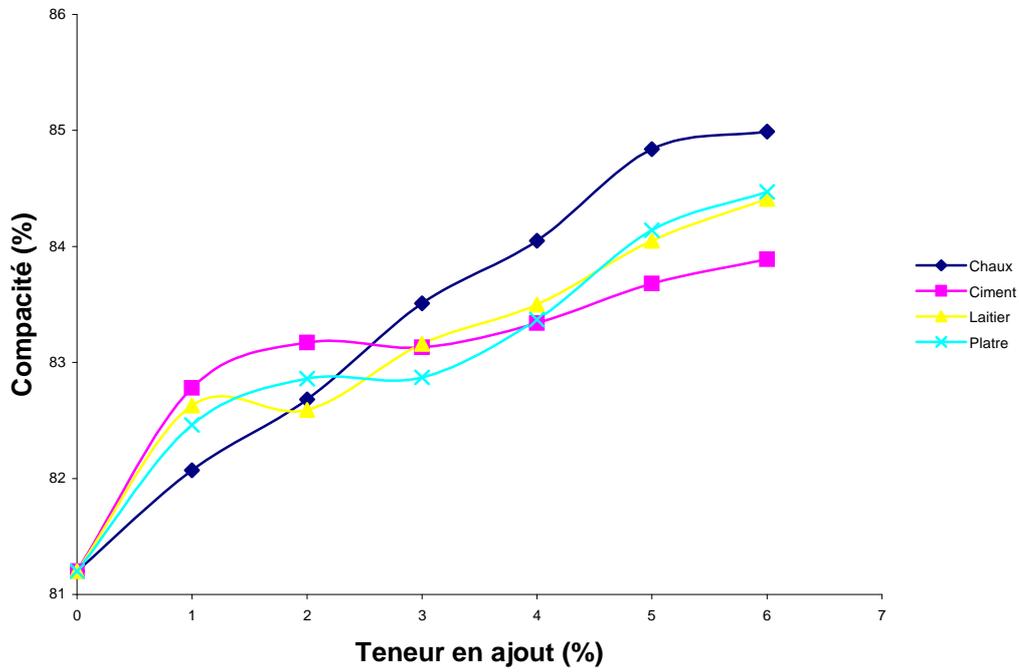


Figure VIII.19. : Influence de l'ajout chimique sur les compacités H Field (émulsion)

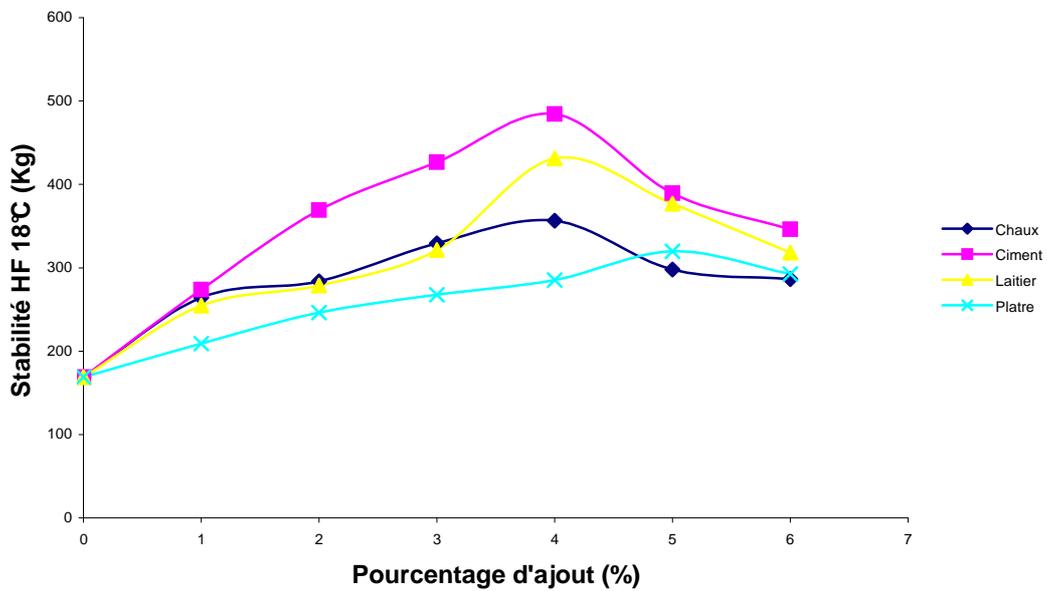


Figure VIII.20. : Influence de l'ajout chimique sur les stabilités H Field 18°C (Cut Back)

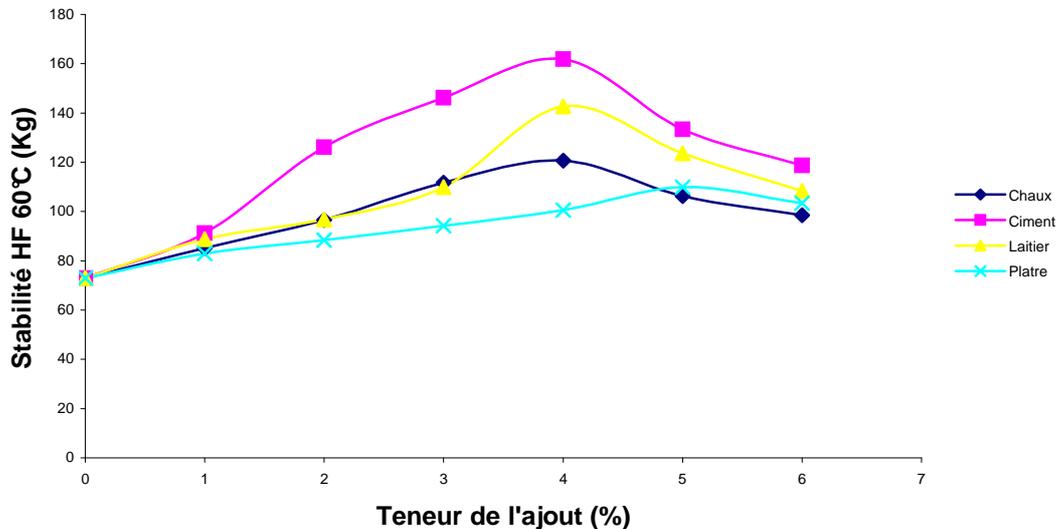


Figure VIII.21. : Influence de l'ajout chimique sur les stabilités H Field 60°C (Cut Back)

VIII.5.2.1. La chaux

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.

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.

VIII.5.2.2. Le ciment

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).

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.

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.

VIII.5.2.3. Le laitier broyé

Le laitier granulé a été broyé et transformé en matériau d'éléments fins de diamètre inférieur à 0,08 mm. La réactivité du laitier est appréciée par le coefficient « α » qui résulte de la mesure de sa friabilité et de sa finesse. L'importance de ce coefficient réside dans le fait qu'il est basé sur le mécanisme de prise. Étant 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 » est le

produit de la surface spécifique par le pourcentage des fines < 0,08 mm résultant d'un broyage normalisé.

Le caractère original du traitement au laitier réside dans sa prise lente et progressive qui permet d'obtenir une souplesse d'emploi aux jeunes âges.

L'utilisation du laitier, en tant 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'éléments grossiers dans le mélange empêche l'obtention de performances comparables à celles des prescriptions techniques.

VIII.5.2.4. Le plâtre

L'utilisation du plâtre en tant 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 ont leur part respective de responsabilité. Le sable de dune utilisé est de granulométrie serrée dépourvue 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 ni les moules ne sont chauffés et les liants ne possèdent pas 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% (cut back 400/600) et 18,80% (émulsion 60) à 15,09% et 15,53% dans le cas de l'adjonction de 6% de plâtre. La stabilité et la compacité ont évolué de la même manière.

VIII.5.3. 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

Le problème de la maniabilité ne se pose pas, suite à la souplesse du mélange et à sa compactabilité.

VIII.6. Essais complémentaires sur les formulations optimales

VIII.6.1. Choix des formulations optimales

Après l'étude des performances mécaniques Hubbard Field d'un sable de dune 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 en étudiant l'influence sur les performances mécaniques Duriez et Marshall des différentes formulations obtenues précédemment qui ont donné le maximum de stabilité pour chaque type d'ajout (figures VIII.22 à VIII.30), 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.

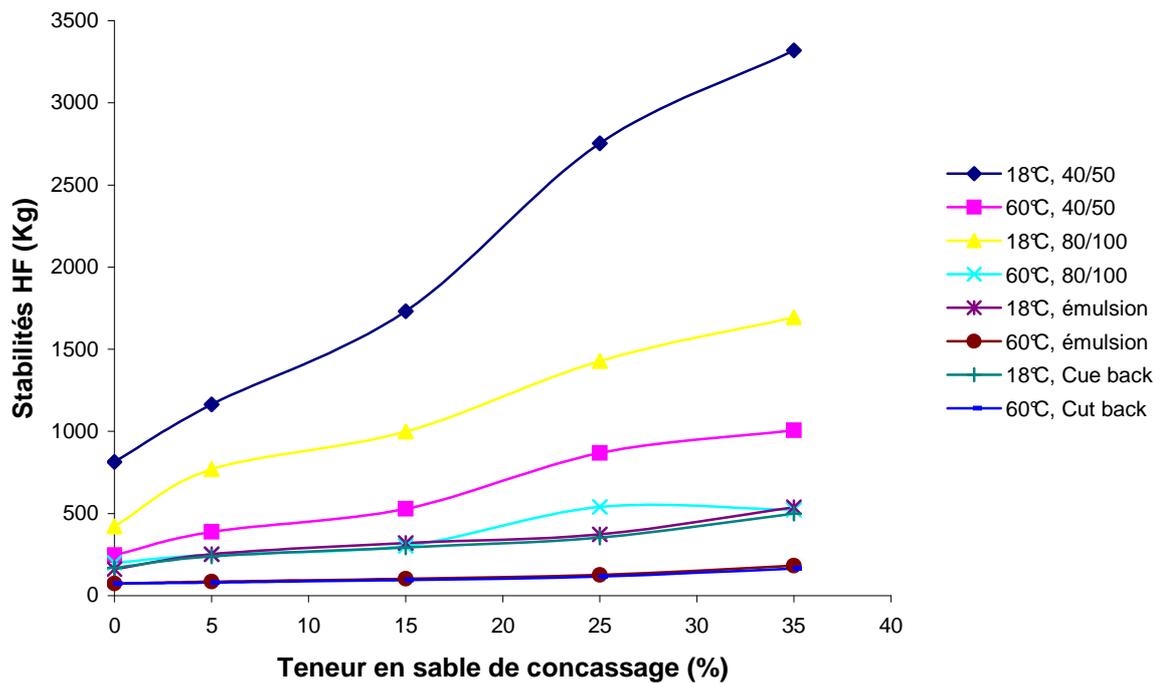


Figure VIII.22. : Influence du sable de concassage sur les stabilités H Field

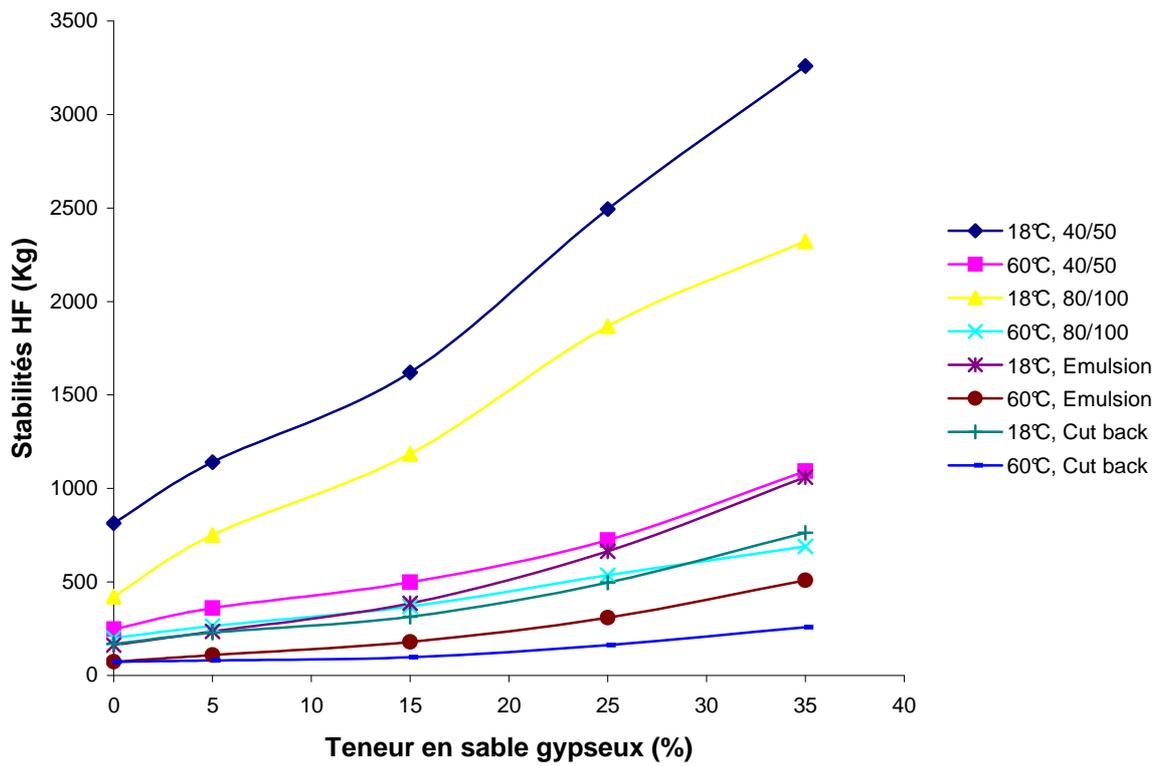


Figure VIII.23. : Influence du sable gypseux sur les stabilités H Field

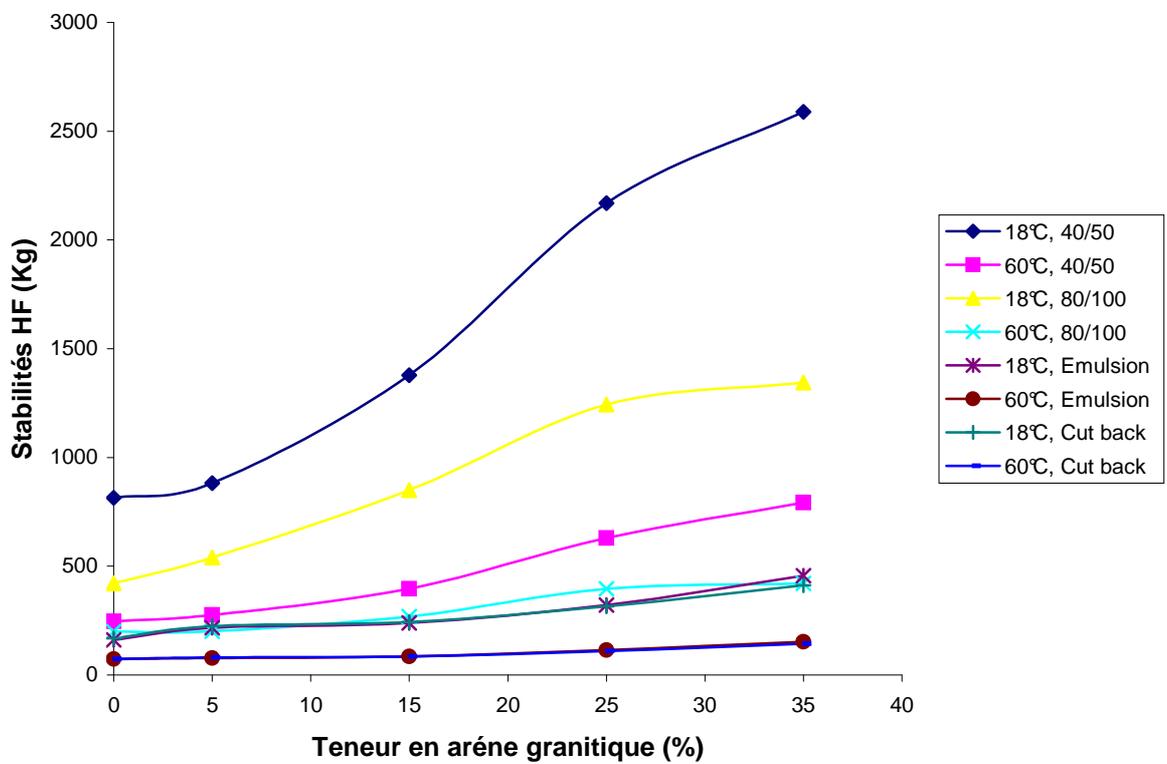


Figure VIII.24. : Influence de l'arène granitique sur les stabilités H Field

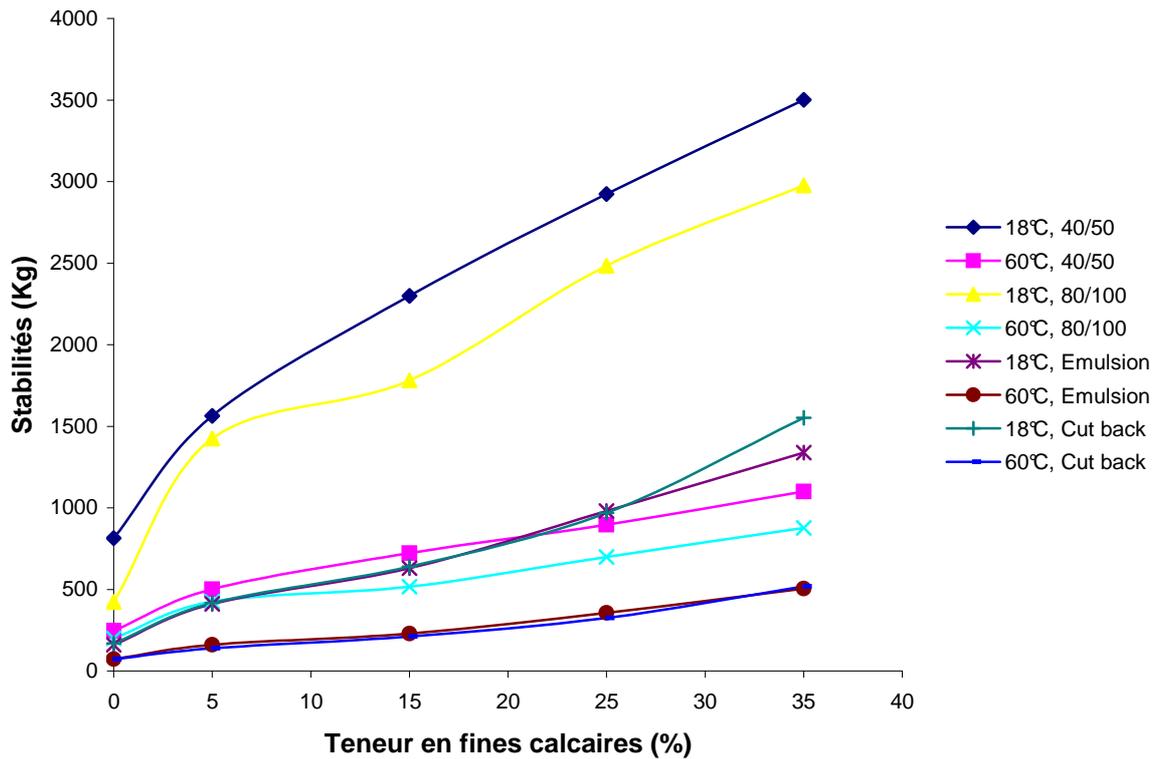


Figure VIII.25. : Influence des fines calcaires sur les stabilités H Field

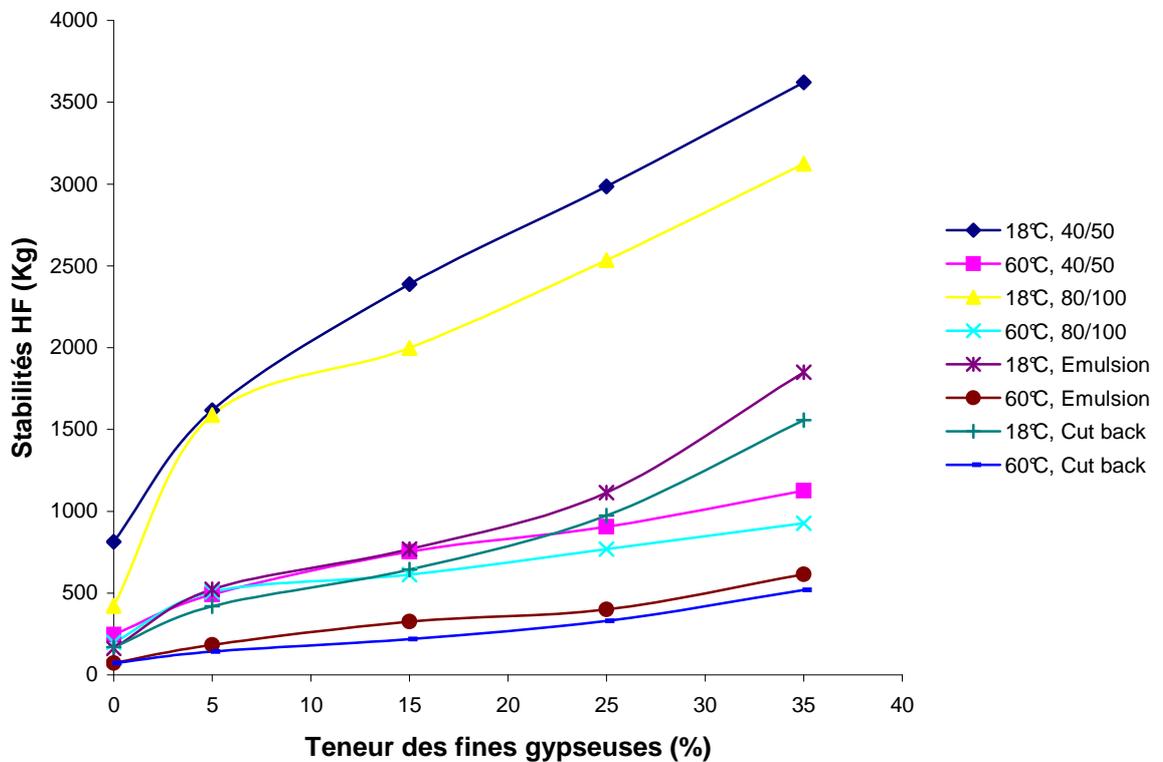


Figure VIII.26. : Influence des fines gypseuses sur les stabilités H Field

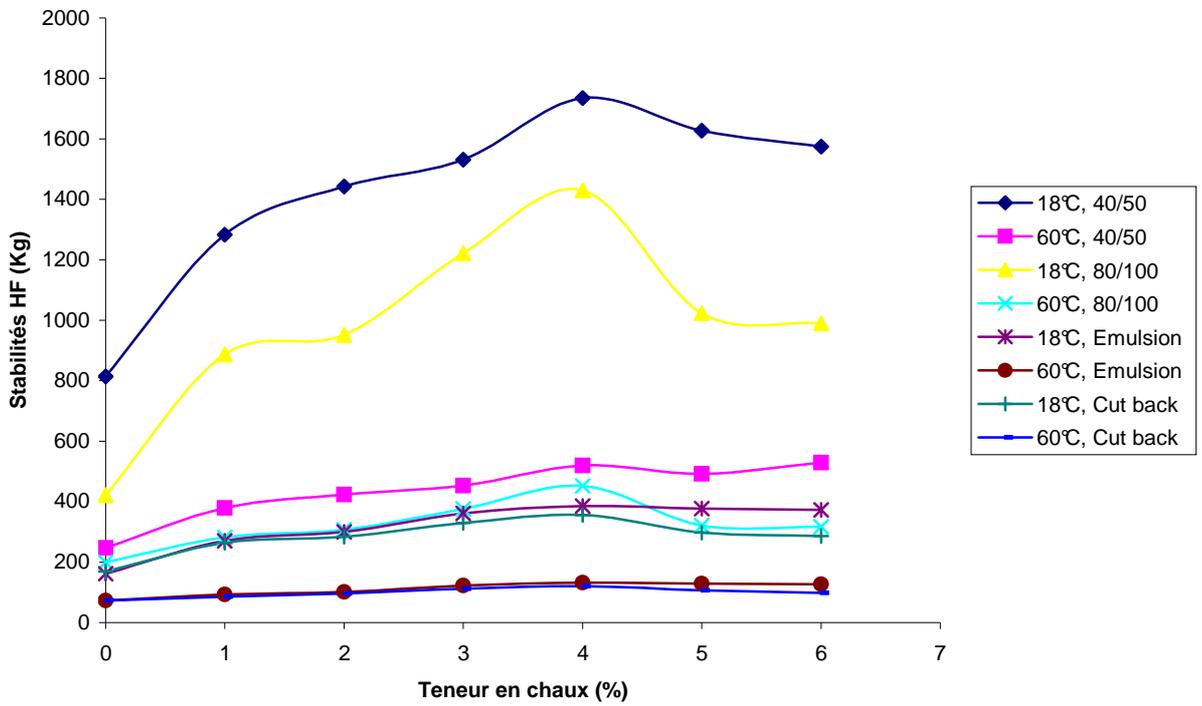


Figure VIII.27. : Influence de la chaux sur les stabilités H Field

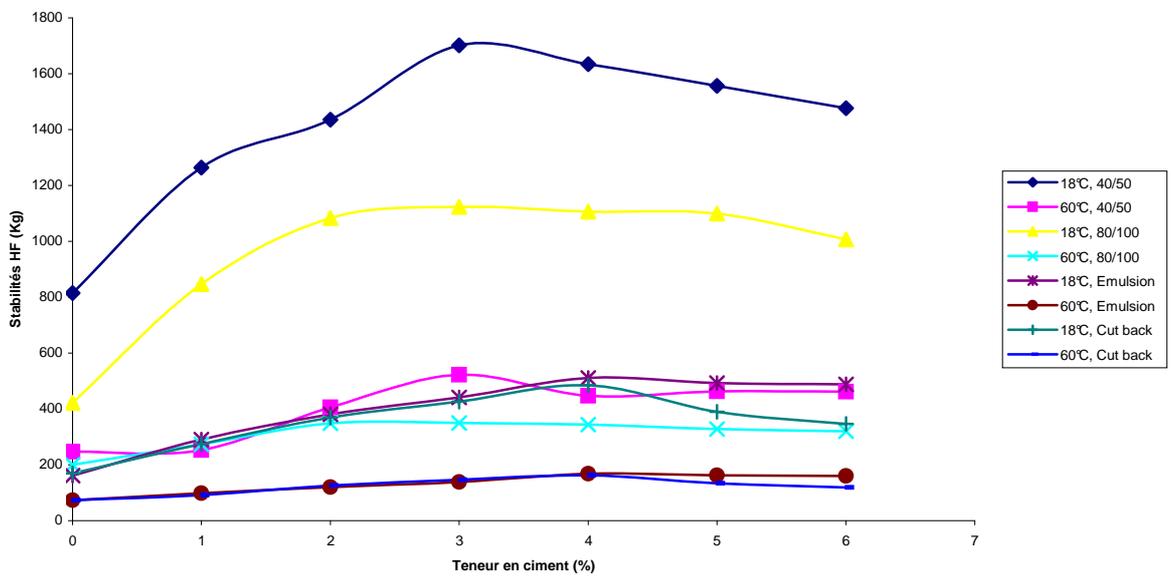


Figure VIII.28. : Influence du ciment sur les stabilités H Field

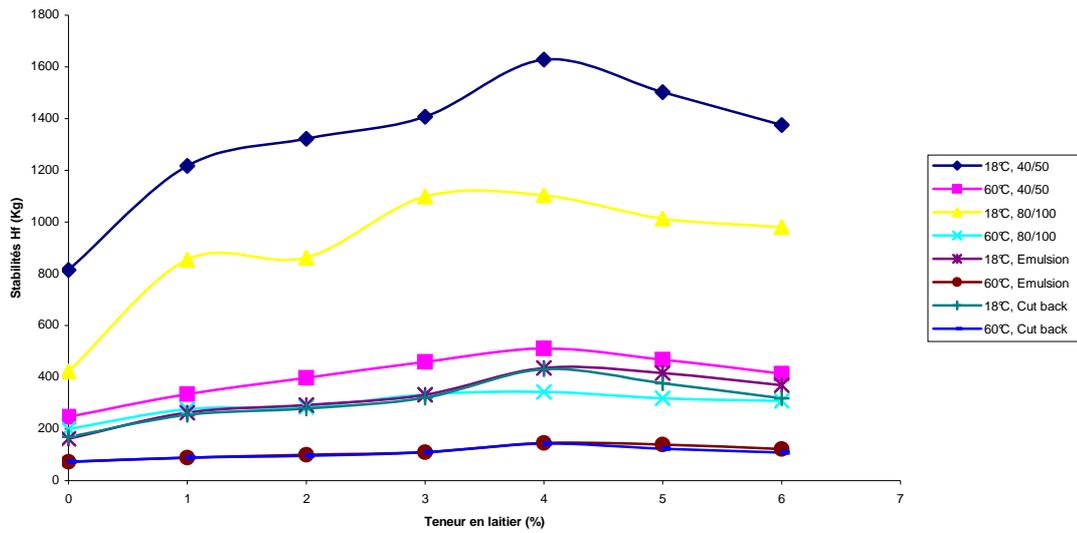


Figure VIII.29. : Influence du laitier sur les stabilités H Field

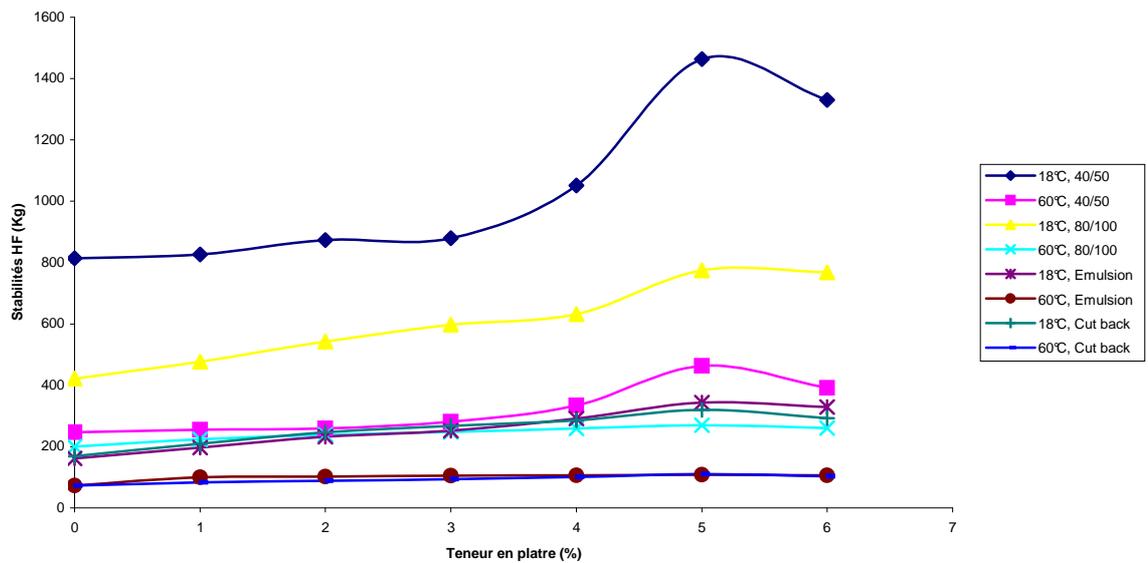


Figure VIII.30. : Influence du plâtre sur les stabilités H Field

VIII.6.2. Etude Duriez

Les liants utilisés sont : le bitume 40/50 pour l'enrobage à chaud et le cut back 400/600 pour l'enrobage à froid.

Les résultats Duriez obtenus avec l'utilisation des deux liants sont portés respectivement dans les tableaux VIII.1 et VIII.2.

Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent que le paramètre qui influence les résistances, mis à part la teneur en liant, est 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.

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. 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 ou 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.

Tableau VIII.1 : 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

Tableau VII.2: 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

VIII.6.3. Etude Marshall

Les résultats Marshall obtenus avec l'utilisation de bitume 40/50 et de cut back 400/600 sont portés sur les tableaux suivants.

Tableau VIII.3: 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 VIII.4: 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

Interprétation des résultats

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'est malheureusement pas comparable au passage d'un rouleau à pneus avec une 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 roulement 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 dans l'amélioration de la qualité et les performances du sable de dunes enrobé soit à chaud avec le bitume 40/50 soit 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 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.

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. L'insuffisance de la stabilité se traduit souvent par un fluage avec formation de dépressions ou d'ornières.

VIII.6.4. 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 lorsqu'on choisit les fines naturelles pour corriger la granulométrie d'un sable quelconque, il faut s'assurer de leur propreté.

VIII.7. Conclusion générale

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.

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 sa rigidité. 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 :

- Les sables de dune utilisés sont caractérisés 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 dans 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 liant 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 même classe que précédemment et produits à partir d'un bitume de base 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%, une teneur en bitume inférieure à 6% entraîne un mélange moins stable, en raison de l'insuffisance de l'enrobage, alors qu'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, sable gypseux, arène granitique) 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 dû 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 d'un même pourcentage de fines gypseuses ou calcaires, une différence en faveur des fines gypseuses est nettement appréciée, cela serait dû 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 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.

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.

VIII. 8. Analyse de variance sur les matériaux routiers :

Le but est de rechercher une relation ou précisément un modèle additif reliant les paramètres de la route tels que la compacité, la densité et la résistance en compression à ses facteurs d'influence tels que le type de sable, le pourcentage de sable mis en jeu et la caractéristique du liant.

La recherche consiste à trouver la contribution de chaque modalité possible de chaque facteur autour d'un terme constant. On parle dans ce cas de l'analyse de la variance. Les données sont dans le tableau et le modèle est de la forme :

$$Y_i = \alpha + \beta_j B + \gamma_k C + \varepsilon$$

Où

α est le terme constant

J= 1, 2, 3 car on a trois modalités du type de sable (B).

K= 1, 2, 3, 4 pour les pourcentages (C).

ε : le résidu

Le traitement sur **SPAD**, a permis de réaliser les études suivantes :

- Description statistique avec la méthode de tris à plat pour voir les histogrammes et les corrélations deux à deux (Annexes D figure D4, D8, D12 et D16).
- Analyse factorielle avec la méthode **COPRI** ou Analyse des Composantes PRIncipales qui est une technique de description statistique conduisant à des présentations graphiques approchées du contenu du tableau et aussi une description de liaisons entre variables (Annexe D figures D1 à D3 pour le bitume 40/50). Cette méthode permet de voir les variables les plus corrélées entre elles ;
- Régression multiple avec la procédure **VAREG** : un ajustement des moindres carrés sur un modèle linéaire comprenant un terme constant (Tableau D11 et D12 pour le bitume 40/50).

Tableau VIII.5. Tableau de valeurs des données pour un bitume 40/50 (A):

	Sable de concassage			
	B1 C1 : 5%	C2 : 15%	C3 : 25%	C4 : 35%
Y ₁ : résistance à la compression à 18°C	1163,12	1731,78	2753,32	3319,23
Y ₂ : résistance à la compression à 60°C	389,00	528,96	868,83	1006,73

Y ₃ : Compacité	81,08	82,38	83,38	84,27
Y ₄ : Densité	1,80	1,81	1,82	1,82

	B2 Sable gypseux			
	C1 : 5%	C2 : 15%	C3 : 25%	C4 : 35%
Y ₁ : résistance à la compression à 18°C	1141,13	1619,84	2493,85	3259,67
Y ₂ : résistance à la compression à 60°C	359,52	499,18	732,26	1092,3
Y ₃ : Compacité	82,17	84,82	86,66	88,41
Y ₄ : Densité	1,81	1,83	1,82	1,83

	B3 Aréne granitique			
	C1 : 5%	C2 : 15%	C3 : 25%	C4 : 35%
Y ₁ : résistance à la compression à 18°C	881,44	1378,57	2169,82	1599,66
Y ₂ : résistance à la compression à 60°C	276,57	196,14	628,98	792,74
Y ₃ : Compacité	81,97	83,09	84,14	85,09
Y ₄ : Densité	1,82	1,82	1,82	1,82

On a trouvé les résultats du tableau VIII.6.

Tableau VIII.6. Valeurs des contributions

Libellé du paramètre	Coefficient
V1 – B1	282,5770
V1 – B2	169,3370
V1 – B3	- 151,9130
V2 – C1	- 897,3890
V2 – C2	- 382, 5560
V2 – C3	513, 9440
V2 – C4	766,9010
CONSTANTE	1959,2900

Ce tableau nous présente les valeurs des contributions dans l'étude du paramètre Y_i (résistance à la compression à 18°C).

Ainsi pour une 1ère modalité du facteur B, une 2ème modalité du facteur C, on aura :

$$R_C = 282 (\text{Sable}) - 382 (\% \text{sable}) + 1959 = 1859,311$$

Nous avons fait de plus, sur de nouvelles données, une recherche de corrélation entre variable

(Y), dite variable expliquée (la résistance à la compression) et d'autres variables (X_i), dites variables explicatives (compacité, % liant et % de fines).

On est arrivé à modéliser la résistance à la compression pour un bitume 40/50. On peut alors écrire le modèle suivant :

Tableau VIII.7. Valeurs des coefficients

Libellé du paramètre	Coefficient
V2 – Compacité	- 203,6750
V3 - % liant	4390,2300
V4 - % fines	- 323,0540
Constante	6 11029,3000

$$R_C = - 203 * X_1 + 4390 * X_2 - 323 * X_3 - 11029 + \epsilon$$

La variance résiduelle est $\text{Var} [\epsilon] = 393,11$

La variance totale est $\text{Var} [R_C] = 840,10$

VIII.9. Etude du comportement au fluage dynamique : hydropulsateur

On a étudié par l'essai spécifique à l'hydropulsateur l'influence de la chaux, du sable de concassage et de la température sur le comportement de fluage dynamique ; nous avons pu déterminer quelques caractéristiques et tirer des conclusions.

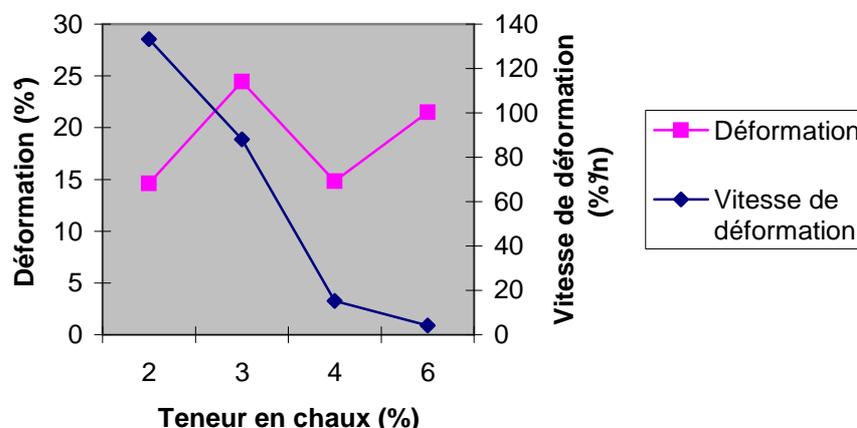


Figure VIII.31 : Influence de la teneur en chaux sur les caractéristiques de fluage dynamique

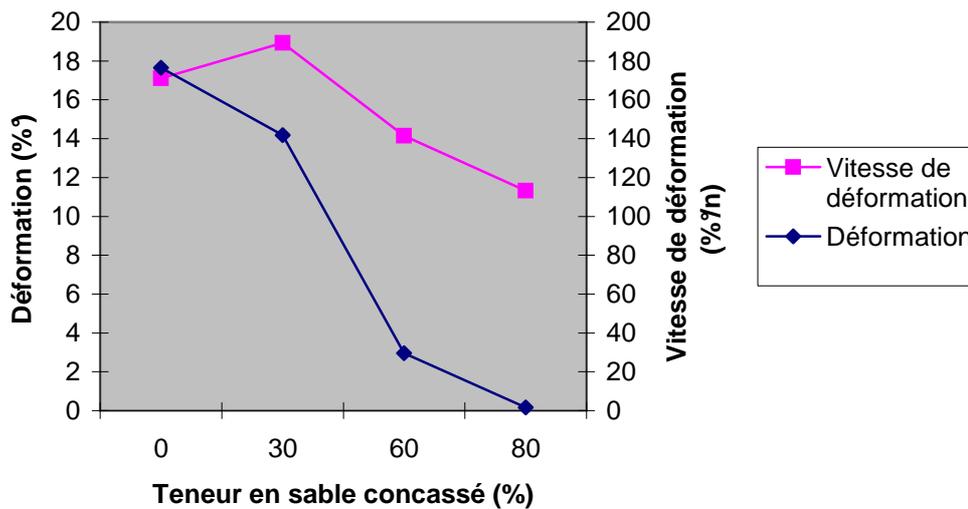


Figure VIII.32 : Influence de la teneur en sable concassé sur les caractéristiques de fluage dynamique

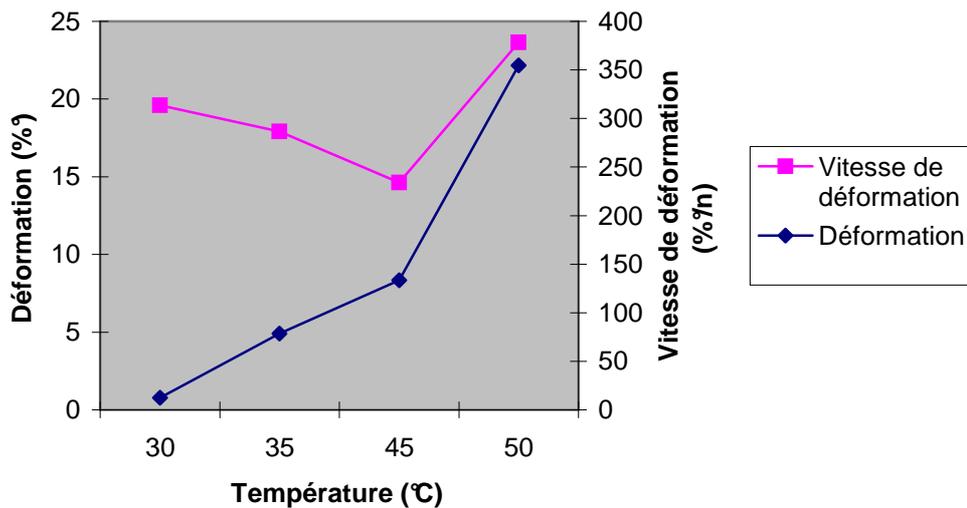


Figure VIII.33 : Influence de la température sur le comportement de fluage dynamique

Interprétation :

La vitesse de déformation diminue avec l'augmentation de la teneur en sable concassé alors que le nombre d'impulsions augmente.

Le sable concassé améliore le comportement au fluage dynamique : la phase de rupture est réduite lorsque le pourcentage de sable concassé augmente ; les courbes de fluage des mélanges ne comportent pas de phase de rupture même après 20000 cycles à chargements répétés. Cette correction peut se faire dans des limites raisonnables (30% maximum).

Plus la température de l'essai est élevée, plus le mélange est susceptible au fluage dynamique.

VIII.9. Essais de résistance à la traction indirecte et à la compression axiale

Ces essais, avec mesure des déformations axiales et radiales, ont permis de déterminer certaines caractéristiques rhéologiques dans le domaine élastique particulièrement à savoir les modules de déformation ainsi que le coefficient de Poisson.

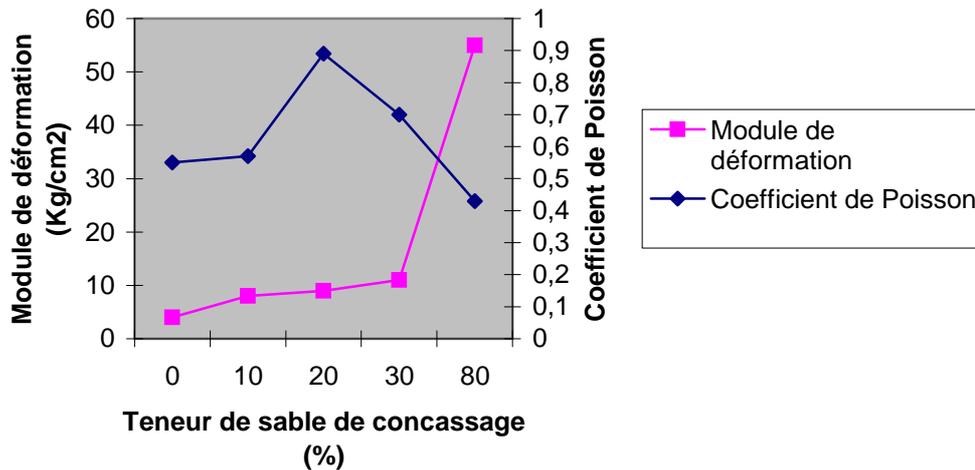


Figure VIII.34 : Influence du sable de concassage sur les caractéristiques rhéologiques en traction.

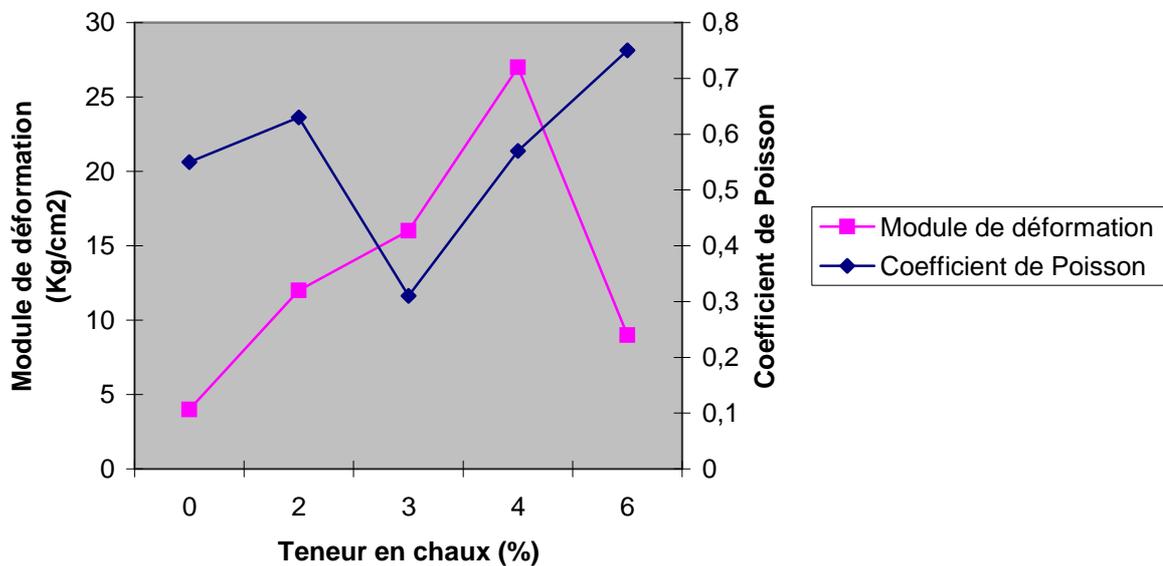


Figure VIII.35: Influence de la teneur en chaux sur les caractéristiques rhéologiques en traction.

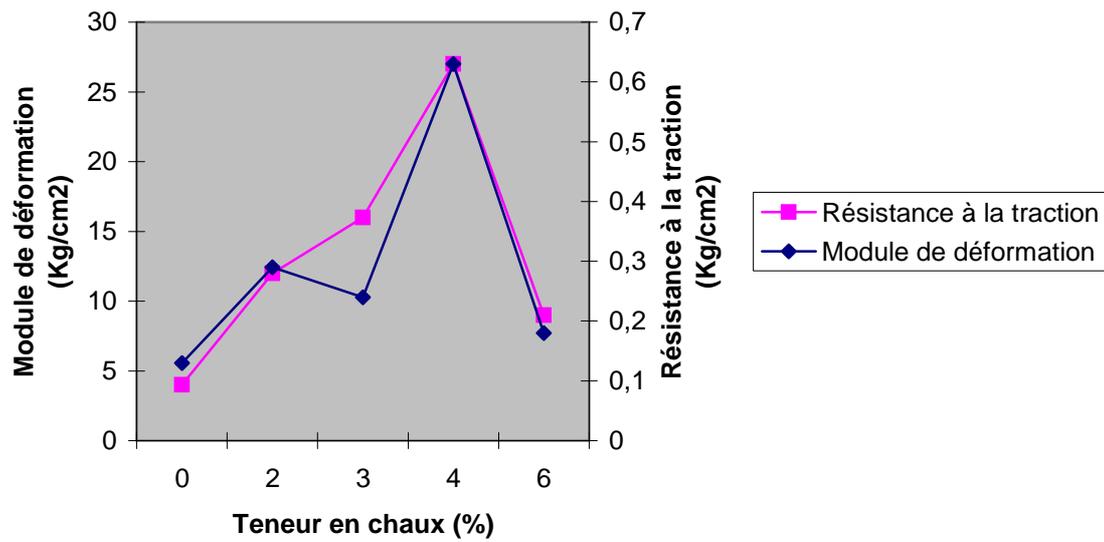


Figure VIII.36 : Influence de la teneur en chaux sur le comportement en traction.

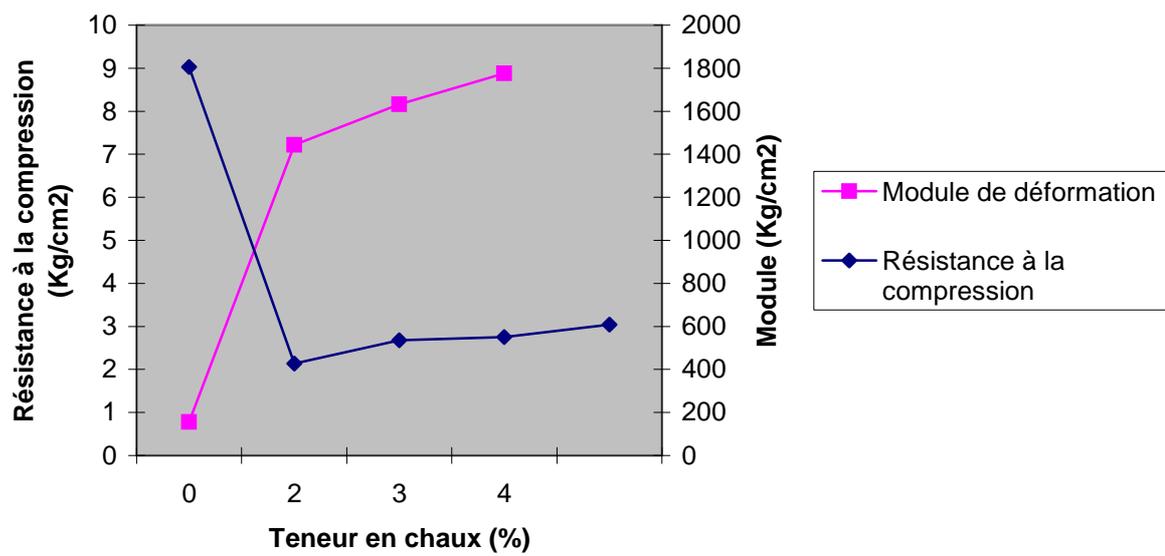


Figure VIII.37: Influence de la teneur en chaux sur le comportement en compression.

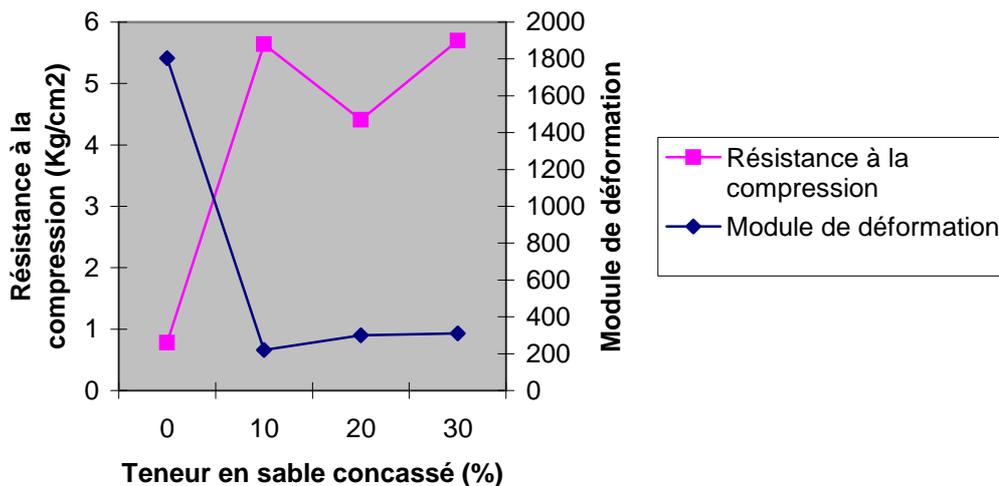


Figure VIII.38: Influence de la teneur en chaux sur les caractéristiques rhéologiques en compression.

Modules de déformation

- La relation module de déformation-teneur en bitume fait apparaître un optimum ; le module croît jusqu'à 6% de bitume (sous dosage et par conséquent manque d'enrobage) puis décroît (surdosage entraînant un mauvais contact entre les grains).
- La chaux améliore les caractéristiques mécaniques des mélanges, en effet la rigidité du matériau augmente entraînant une augmentation de la contrainte et une diminution de la déformation verticale d'où une amélioration du module. Par contre pour une teneur de 6% le module de traction indirecte diminue (excès de chaux conduisant à une fragilité du matériau et une rupture brutale)
- L'incorporation de sable de concassage améliore le frottement inter granulaire. ceci se traduit par une augmentation du module ; ce dernier est d'autant plus grand que le frottement interne du squelette est plus élevé.

Coefficient de Poisson

Ses valeurs ne présentent pas de tendance significative.

Ces essais confirment le fait que la chaux joue un rôle de filler.

Les modules de déformation par compression simple et traction indirecte (compression diamétrale) évoluent avec le frottement interne du squelette favorisé par ajout de sable concassé.

VIII.10. Modélisation du comportement de l'enrobé

VIII.10.1. Introduction

Ayant effectué les différents essais mécaniques, nous allons compléter par des essais de comportement, et déterminer les différents paramètres rhéologiques (le module de déformation « E », et le coefficient de viscosité « η »), à partir d'une courbe de fluage.

VIII.10.2. Essais de comportement effectués

Les essais de comportement ont été effectués sur un sable bitume composé de 65% sable de dune, 35% sable concassé et de bitume 40/50

Module de rigidité mesuré au NAT

L'essai a donné les courbes de la figure VIII.39 dont les résultats sont présentés dans le tableau (VIII.8) :

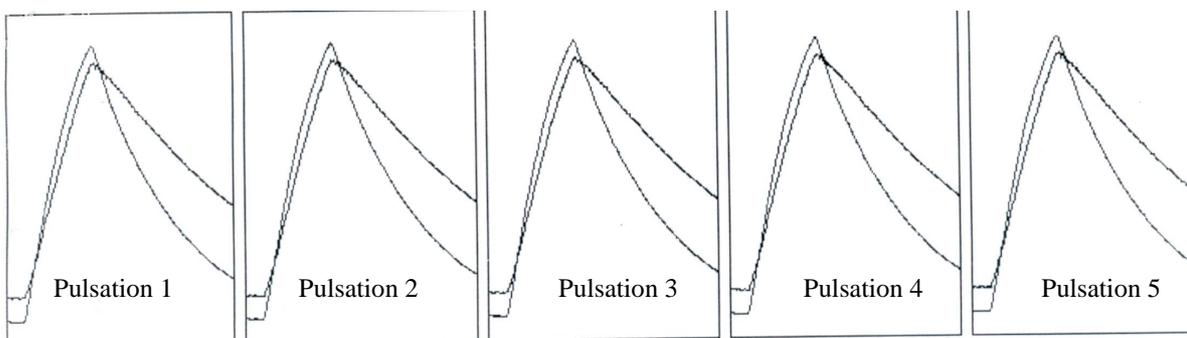


Figure VIII.39 : Courbes de calcul du module de déformation E_1

Tableau VIII-8: Résultats de l'essai au NAT

Pulsation N°	Charge verticale (kN)	Contrainte horizontale (kPa)	Déformation horizontale (microns)	Temps de chargement (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	2,86	290,0	4,9	120	2115
2	2,91	295,9	5,1	120	2058
3	2,91	295,8	5,1	120	2101
4	2,83	287,7	5,0	120	2002
5	2,78	282,6	4,9	120	2034
Moyenne	2,86	290,4	5,0	120	2062

Essai de fluage statique

Le matériel propre à l'essai est donné par la figure (VIII.39).

Les résultats de l'essai nous donnent une courbe de fluage illustrée par la figure (VIII.41)

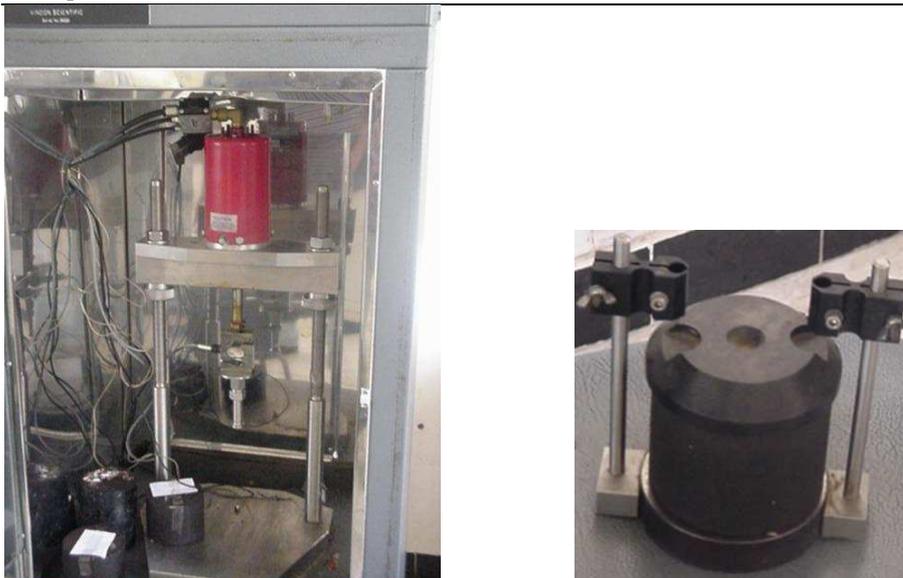


Figure VIII.40 : Matériel utilisé dans l'essai de fluage statique

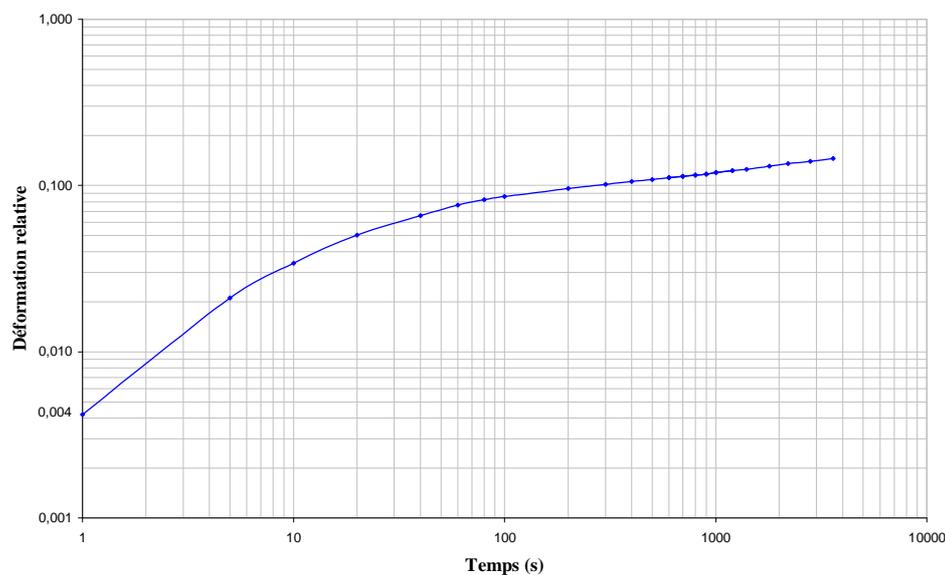


Figure VIII.41 : Courbe du fluage statique (65% SD + 35% SC + bitume 40/50)

VIII.10.3. Modélisation du comportement

Analyse des courbes

La courbe de fluage se compose en trois parties :

1. Une variation instantanée à l'instant $t = 0$, d'amplitude E_0 , pour des raisons pratiques cette variation à été reporté à l'instant ($t=1s$), pour faciliter le traçage de notre courbe avec une échelle logarithmique. Cette partie est dite élasticité instantanée ;

2. Une variation assez rapide au cours du temps correspondant théoriquement à une élasticité retardée, pratiquement cette partie correspond au réarrangement des grains de l'enrobé (partie courbe du graphe) ;
3. Une variation linéaire de pente $\frac{1}{\eta_0}$ pour une contrainte égale à l'unité. Dans notre cas la pente est égale à $\frac{\sigma_0}{\eta_0}$

Après analyse, nous pouvons dire que notre courbe de fluage et celle du fluage du modèle de Kelvin Voigt ont une allure similaire. Donc nous pouvons utiliser l'équation de ce modèle pour définir celle de notre enrobé.

Les caractéristiques rhéologiques qu'on peut tirer sont :

Le module d'élasticité instantanée est celui calculé au NAT : $E_0 = 2062 \text{ MPa}$

Le module de viscosité (η_0) : $\eta_0 = 14\,000 \text{ MPa}$

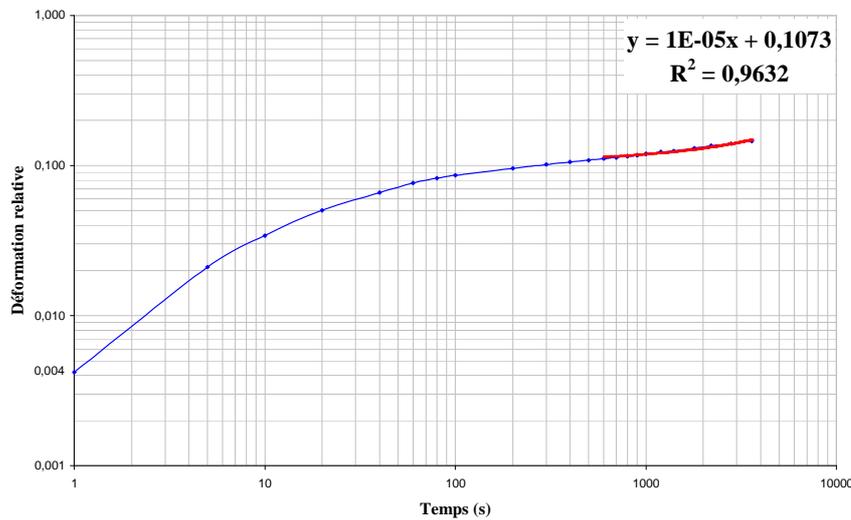


Figure VIII.42: Approximation de la branche linéaire de la courbe de fluage

On choisit un modèle de Kelvin Voigt généralisé avec un seul solide de Kelvin Voigt, ce modèle est donné par la figure VIII.43.

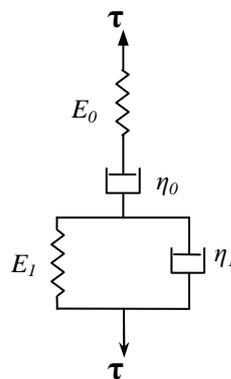


Figure VIII.43 : Modèle de Kelvin Voigt appliqué à notre sable bitume

La fonction fluage de ce modèle est donnée par la relation, en prenant $n=1$:

$$f(t) = E_e^0 + \frac{t}{\eta_0} - \sum_{i=1}^n E_i e^{-t/\theta_i}$$

$$\text{Avec : } E_e^0 = E_0 + \sum_{i=1}^n E_i$$

n : nombre de solide de kelvin voigt.

E_i : Modules de déformations des branches du solide de Kelvin Voigt.

η_0 : Module de viscosité qu'on vient de calculé à partir de la courbe de fluage.

E_e^0 : déduit à partir de la courbe de fluage propre à l'enrobé.

La déduction du coefficient E_e^0 est faite par prolongement de la partie linéaire de la courbe de fluage. Sa valeur est donc calculée pour la valeur de la déformation « d » correspondant à l'intersection de cette droite avec l'axe des déformations. (Figure VIII.44)

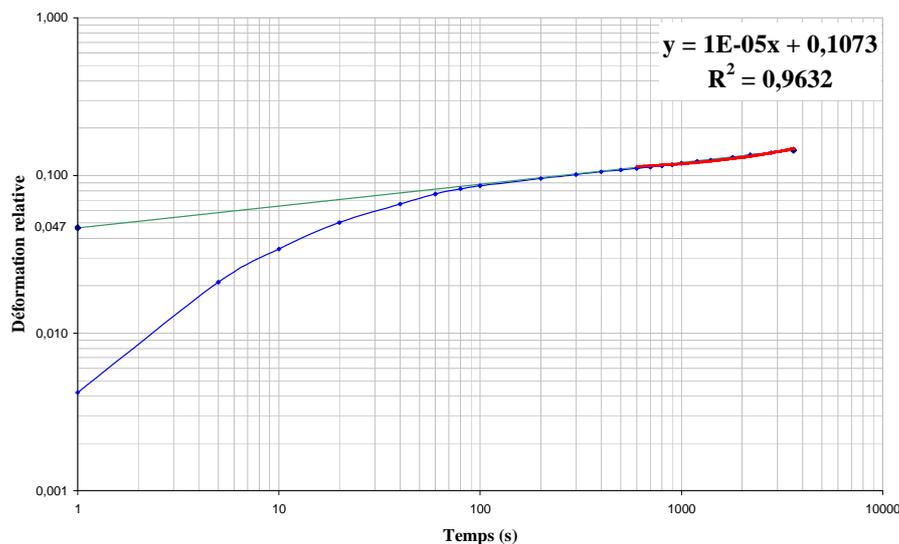


Figure VIII.44 : Détermination du coefficient E_e^0

Nous relevons la valeur : $d = 0,047$

$$\text{Le coefficient } E_e^0 = \frac{\sigma_0}{d} = \frac{0,14}{0,047 \cdot 10^{-3}} \Rightarrow E_e^0 = 2979 \text{ MPa}$$

* Calcul du coefficient η_1

Le coefficient η_1 est calculé à partir de la deuxième partie de la courbe de fluage (élasticité retardée). Pour cela il nous faut résoudre l'équation donnée par la fonction de fluage suivante :

$$f(t) = E_1 \times (1 - e^{-t/\theta_1})$$

Avec : $E_1 = E_e^0 - E_0$

$$\eta_{1m} \text{ (MPa.s)} = 0,002267$$

Pour la gâchée confectionnée avec le bitume 40/50, la fonction proposée est:

$$f(t) = 2797 + 7,1 \cdot 10^{-5} \times t - 917 \cdot e^{-0,481 \times t}$$

Dans le cas où le modèle de Kelvin Voigt généralisé contient plusieurs solides de Kelvin Voigt, Nous proposons la solution suivante :

Les coefficients E_i sont égaux et faciles à déduire ; nous pouvons avoir E_e^0 et E_0 à partir du graphe de fluage, les coefficients η_i s'obtiennent par la résolution du système d'équations ci dessous.

$$E_1 = E_2 = \dots = E_n = \frac{E_e^0 - E_0}{n}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n \times E - E \times \left[e^{-\frac{t_1}{E \cdot \eta_1}} + e^{-\frac{t_1}{E \cdot \eta_2}} + \dots + e^{-\frac{t_1}{E \cdot \eta_n}} \right] = f(t_1) \\ n \times E - E \times \left[e^{-\frac{t_2}{E \cdot \eta_1}} + e^{-\frac{t_2}{E \cdot \eta_2}} + \dots + e^{-\frac{t_2}{E \cdot \eta_n}} \right] = f(t_2) \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ n \times E - E \times \left[e^{-\frac{t_n}{E \cdot \eta_1}} + e^{-\frac{t_n}{E \cdot \eta_2}} + \dots + e^{-\frac{t_n}{E \cdot \eta_n}} \right] = f(t_n) \end{array} \right.$$

En remplaçant E et $f(t)$ par leurs valeurs, nous obtiendrons un système d'équations dont les seules inconnues sont les η_i .

Conclusion Générale

Le sable de dune est un matériau qui a été pendant bien longtemps injustement décrié. Il ne faut pas s'attendre de l'emploi de ce matériau dans la construction à un bouleversement de la technique routière saharienne particulièrement. 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 et hydrauliques. Cependant, dans les régions dépourvues de graves, alors que les sables convenables sont abondants, il y aurait généralement un intérêt économique à les employer.

Sable de dunes enrobé aux liants hydrocarbonés

Sur le plan climatique, le Sahara représente un environnement favorable à la bonne tenue des chaussées permettant ainsi l'utilisation des matériaux locaux de diverses natures.

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 à sa rigidité ; 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 d'un bitume de classe 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.

- Dans notre recherche, les sables de dune utilisés sont caractérisés 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 dans 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 deux pour l'enrobage à froid (cut back 400/600 et émulsion 60) a permis de trancher dans la question du choix du liant 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 préparation de l'enrobé. Dans le cas de l'enrobage à chaud, tous les constituants de l'enrobé 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. Pour 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.

- L'incorporation de différents pourcentages d'ajout 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. Cependant, il nous paraît souhaitable de s'orienter vers les formules binaires, contenant un sable correcteur dans les limites raisonnables (20% à 30%) et un liant hydraulique (2 à 4%), 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.

Sable de dunes enrobé aux liants hydrauliques

Le but de cette deuxième étude est de voir la possibilité de remplacer le béton classique de gros granulats par un béton confectionné à base de sable de dunes.

Le recours préalable aux nouvelles méthodes de formulation des bétons de sable, basées sur le critère de la compacité et de la maniabilité, constitue une bonne approche et nous a permis de trouver une composition de base, sans ajout, ayant des performances acceptables, mais toutefois insuffisantes pour les exigences des éléments de structure. Cette insuffisance de résistance est attribuée à la finesse et au pourcentage élevé des vides du sable de dune. Par ailleurs le béton de sable ne présente d'intérêt réel, du point de vue mécanique, que lorsque le sable utilisé appartient à une certaine classe granulométrique atteinte naturellement ou par composition artificielle.

Nous avons procédé à une correction granulométrique du sable de dunes (sable de concassage, gravillons, fillers calcaires et laitier broyé) pour améliorer les performances mécaniques du béton de sable en vue de son utilisation dans les éléments structurels ou pistes aéronautiques. Cette correction s'est faite soit par adjonction d'un matériau contenant un pourcentage de fines élevé, ou par l'apport d'un matériau d'une granulométrie étalée dans les limites raisonnables.

- L'étude expérimentale sur les compositions testées a permis de montrer que les performances du béton de sable de dune rentrent dans les spécifications du béton de structure après incorporation de 50% de sable concassé (0/3), alors que l'apport de gravillons à des pourcentages compris entre 10% et 50% en complément au sable de concassage à 50% a amélioré considérablement les résistances.
- Cette étude a de plus montré que l'ajout de la poudre de caoutchouc même avec des faibles pourcentages au béton de sable, est déconseillé quand la mécanique de résistance est le but principal. Cependant une éventuelle utilisation de la poudre de caoutchouc dans un béton devant remplir autre rôle que la performance

mécanique aurait un sens (résistance aux chocs, aux actions chimiques, aux produits radioactifs, imperméabilité...).

- Les courbes contraintes déformations du béton de sable présentent, comme pour tous les autres matériaux composites à base de ciment, un comportement analogue à celui des bétons classiques. Le défaut de ces bétons demeure dans leur module d'élasticité très faible en particulier avec l'utilisation des sables de dune ; une déformation peut avoir d'autres causes que l'application d'une contrainte, et le comportement du matériau dans ce cas est lié en grande partie à sa rigidité, ce qui a pour conséquence la limitation de l'utilisation des bétons de sable, surtout en structure,
- Dans un second temps, et Malgré la mauvaise granulométrie du sable utilisé et le rapport E/C élevé (supérieur à 0.75), les résistances obtenues pour une éventuelle utilisation en pistes aéronautiques sont satisfaisantes (la résistance à la compression à 28 jours est supérieure à 15 MPa ; la résistance à la traction par flexion est supérieure à 3 MPa), et les caractéristiques testées sont acceptables.
- Cependant, elles restent inférieures à celles exigées pour la réalisation de couche de roulement pour chaussées aéronautiques (résistance à la compression supérieure à 25 MPa, résistance à la traction par flexion supérieure à 5,5 MPa). les résistances obtenues donnent à notre béton l'aptitude d'être utilisé en couche de fondation (Résistance à la compression supérieure à 15 MPa, résistance à la traction par flexion supérieure à 2,5 MPa).

L'émergence de préoccupations nouvelles liées à l'exploitation des granulats et leur utilisation rationnelle au même temps qu'une prise en compte des problèmes d'environnements sont à l'origine de l'intérêt à nouveau porté au béton de sable et leur tendance actuelle d'être utilisée devient nécessaire, surtout pour les régions dépourvues de roches massives, et de ce fait de son aspect économique très intéressant

Le développement technique de la science des matériaux et l'industrie des adjuvants a permis des gains considérables en résistances, alors que la rigidité reste un grand handicap à leur utilisation générale, c'est dans ce contexte que doivent s'orienter les nouvelles réflexions sur la formulation des nouveaux bétons de sable.

L'emploi du béton de sable de dunes, en remplacement des béton classiques ou bétons maigres, peut constituer une variante intéressante sur le plan économique. Ce sera le cas dans une situation de pénurie en gravillons.

Notre contribution à l'étude des caractéristiques du béton de sable nous a permis de le juger utilisable en corps de chaussée de pistes aéronautiques en substitution au béton maigre souvent recommandé par la réglementation pour la construction de la couche de fondation.

D'autre part, cette étude met en évidence l'aspect économique et écologique, très intéressant de ce matériau ; elle rentre dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux et trouve une autre issue aux sables de dunes et aussi au sable de concassage qui commence à être en excès dans les carrières.

Perspectives

Sur le plan climatique, le Sahara représente un environnement favorable à la bonne tenue des chaussées permettant ainsi l'utilisation des matériaux locaux de diverses natures.

Dans la perspective, pour mieux connaître le comportement du béton de sable de dunes pour chaussées aéronautiques, nous formulons le souhait que d'autres caractéristiques telles que le comportement vis-à-vis du fluage, le retrait, l'orniérage et la résistance à l'érosion puissent être étudiées dans les travaux à venir.

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 planches d'essais en faisant varier plusieurs paramètres (formulations, mode de compactage, température de mise en œuvre...) pour pouvoir maîtriser la possibilité de l'emploi de cette technique ;
- L'étude de l'influence de l'incorporation de différents types de dopes sur le comportement et l'adhésivité des mélanges obtenus.
- L'effet de l'influence de la température.
- 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 ;
- Nous avons vu l'intérêt que présentent les qualités des enrobés à froid (avec cut back et émulsion à base de bitume 80/100) ; au vu des résultats obtenus, nous formulons le souhait d'utiliser des liants à base de bitume 40/50 et d'étudier le sable bitume à froid.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACKER P., GUERIN. G., (Mai-Juin 1994), Chaussées en béton armé continu, réflexions sur le fonctionnement mécanique et l'origine de la fissuration, Bulletin de liaison du LCPC, N° 191, Paris, France.

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

AMBROISE J, PERA J. (Février 1992), Étude des fillers, rapport de recherche-développement, projet national SABLOCRETE-INSA de Lyon.

ARRAMBIDE J. et DURIEZ M. (1954), Liants hydrocarbonés, mortiers et bétons bitumineux, Edition Dunod.

ARRAMBIDE J. et DURIEZ M. (1959), Liants routiers et enrobés, matériaux de construction, plâtre agglomérés bois, Edition Dunod.

ARRAMBIDE J. et DURIEZ M. (1962), Nouveau traité de matériaux de constructions, Tomes 2 et 3, Edition Dunod.

ATTAR A., BREYSSE D., et DENIS A., (1996), Analyse des facteurs prépondérants dans le comportement mécanique des bétons de sable chargés, rapport de contrat CDGA-LRPC, 7 France.

BALAYSSAC JP., DETRICHE CH., GRANDET J. (1993), intérêt de l'essai d'absorption d'eau pour la caractérisation du béton d'enrobage, materials and structures, vol.26.

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

BEDRICI M. (1992), Note technique sur les enrobés à froid. Utilisation en technique routière au Sahara, SONATRO, Algérie

BEN DHIA M.H. (1998), Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière, Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, 213, Jan-Fev.,pp.33-42

BENAISSA A., (1992), Déformations différées du béton de sable, thèse de doctorat, Université de Bordeaux, France.

BENAISSA A., MORLIER P., VIGUIER C., (1993), Microstructure du béton de sable, Cement and concrete research, volume 23

BENAISSA A., MORLIER P., VIGUIER C., (1993), Fluage et retrait du béton de sable, Materials and structures, volume 26.

BENAISSA A., MORLIER P., VIGUIER C., CHAUVIN J.J., (Juin 1992), Cinétique de dessiccation et retrait de béton de sable, Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, Paris, France.

- BENMALEK M.**, (1992), Contribution à l'étude des bétons de sable dunaire pour éléments de structures, thèse de magister, ENP, Alger, Algérie.
- BOMBLED J.P.**, (Mai 1982), Influence des fillers sur les propriétés des mortiers et des bétons, ciments, bétons, plâtres, chaux, N° 738, Paris, France..
- 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
- BOUKEMIDJA A. et BABA-ALI A.** (2002), Sable émulsion. Etude et formulation, Projet de fin d'étude, E.N.P, Algérie
- 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
- BOURAIYOU 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.
- CHANVILLARD G., et BASUYAUX O.**, (sep-oct.1996), Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées, Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées, N° 205, réf 4047, France.
- CHAUCHOT J., CHARONNAT Y.**, (Sept 1999), Les chaussées béton et la normalisation, Revue générale des routes et des aérodromes, N° 710, Paris, France.
- CHAUCHOT J., CHARONNAT Y., GOUX M.T.**, (Sept 1999), Les granulats et les chaussées en béton de ciment, Revue générale des routes et des aérodromes, N° 710, Paris, France.
- CHAUVIN J.J.** (1987), Les sables, guide pratique d'utilisation routière, I.S.T.E.D, Paris, France, P.74
- CHAUVIN J.J.**, (fév.1987) Bétons spéciaux : Les bétons de sable, LRPC, Bordeaux, France.
- CHAUVIN J.J., et GRIMALDI G.**, (sep-oct.1988), Les bétons de sable, Bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées, N° 57. Réf 3336.
- CHAUVIN J.J.**, (sept 1990), Le béton de sable en union soviétique, Compte rendu de mission. LRPC de Bordeaux, Bordeaux.
- CHAUVIN J.J.**, (1991), le béton de sable en union soviétique, bulletin de liaison du laboratoire des ponts et chaussées N°174 juillet août.
- CHEMROUKH M.**, (juin 2000), Béton de sable : Identification et utilisation du matériau, conférence internationale de géoengineering IGC/USTHB, Alger, Algérie.
- CHOQUET F.** (1993), « Le vieillissement du bitume », Centre de Recherche Routière, Bruxelles, P.24
- CIM Béton**, (1995), Les béton de sable en structure de chaussées, centre d'information sur le ciment et ses applications, Paris, France.

- CISSE I.K.**, (1996), Contribution à la valorisation des matériaux locaux au Sénégal, Thèse de doctorat, INSA RENNES, France.
- COURET B.**, (1982), utilisation du béton de sable en technique routière, Mémoire d'ingénieur en Génie Civil, IUT université Bordeaux, Bordeaux France.
- DE LARRARD F.**, (Avril 1990), Réflexion sur un nouvel essai de mesure de la consistance des bétons, Bulletin de liaison, laboratoire des ponts et chaussées N° 166, Paris, France.
- DE LARRARD F., A. DELLOC**, (Jan-fev 1999), L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons, bulletin de liaison du LCPC, N° 219, Paris, France.
- DELUDE P.**, (Déc. 1984), Etude de béton de sable, CETE de Bordeaux, France.
- 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
- DO M.T., LUCAS J.**, (Mars avril 1995), Contact pneu/chaussée apport de la micro texture du revêtement, Bulletin de liaison du LCPC, N° 196, Paris, France.
- DOMEC M.** (1980), Construction des chaussées au Sahara, Rapport technique du Laboratoire Central des Travaux Publics, Alger, Sep. 1980.
- DREUX G.**, (1985), Nouveau guide du béton, Edition EYROLLES, Paris, France
- FAUTEUX, Éric et Stéphane FORTIN.**, (juillet-août 2002), *Le béton de sable appliqué aux chaussées routières*, *INFRASTRUCTURES, Montréal, CERIU, Vol. 9, No 5.*
- FAHIM A.** (2001), Les enrobés en arènes granitiques. Etude de laboratoire, ARAL, 3^{ème} congrès algérien de la route, Alger, P.19-22
- 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
- FENZY E.** (1966), Particularité de la technique routière au Sahara, Revue générale des routes et aérodromes, 411, pp. 57-71.
- FRANCKEN L.** (1973), Module complexe de mélange bitumineux, CRR, Bruxelles, RR N° 164/FL/1973, P.95
- GHRIEB A.**, (2002), Etude d'un béton de sable de dunes pour pistes aéronautiques, thèse de Magister, ENP Alger.
- GORISSE F.**, (décembre. 1972), Etudes des micro-bétons pour modèle de structures, annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics N° 291, France,
- GUENNICHE A.**, (2003), Contribution à l'étude du traitement hydrocarboné d'un sable de dunes, thèse de Magister, ENP Alger.
- GUENNOUN R.** (2003), Etude et formulation d'un béton de sable de dunes, Projet de fin d'étude, E.N.P, Algérie
- GUETTALA A.A., MEZEGHICHE B., CHEBILI R.**, (2001), Characteristic improvement of concrete case of fine sand, university, department of civil engineering, researcher (CRSTRA) Biskra, Algeria.

- GUINEZ R., GLUAIS G. et DELUDE P.**, (1984), Les bétons de sable ministre de l'urbanisation et du logement, laboratoires régionaux de Blois et de Bordeaux, France.
- HAMADACHE K.**, (2005), Béton de sable modifié à la poudrette de caoutchouc, Projet de fin d'étude, E.N.P, Algérie
- HAMMAMI A.**, (2004), modélisation du comportement d'un sable bitume, Projet de fin d'étude, E.N.P, Algérie
- HAMZE M.** (1977), Contribution à l'étude des propriétés de matériaux, le traitement des sables, Rapport de recherche L.C.P N°67
- 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
- HORTA OS.** (1979), les encroûtements calcaires et les encroûtements gypseux en géotechnique routière, service des publications du laboratoire de mécanique des sols, base SONATRACH, Blida Algérie.
- JEUFFROY G. et SAUTEREY R.**, (1987), Chaussées en béton de ciment, presse de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris, France.
- KACI H.** (1997), Sable bitume en couche de roulement Etude et Formulation, Projet de fin d'étude, E.N.P, Algérie.
- KETTAB R., KACI H., Bali A.**, (2000), Sable bitume en couche de roulement : étude et formulation ; Actes des premières journées nationales sur le Génie des matériaux
9 au 10 Avril 2000 Université M'hamed Bougera Boumerdés Algérie.
- KETTAB R., MORSLI M., BALI A., FLEUREAU J.M.**; (2002) Prospection des matériaux sahariens » .Journées Nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur-JNGG 2002 –du 8 au 10 octobre 2002.Nancy, France.
- KETTAB R, BALI A, J M FLEUREAU**, (2002), Sable enrobé : Étude et formulation. Journées Nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur JNGG 2002 du 8 au 10 Octobre 2002.Nancy, France.
- KETTAB R.; GHRIEB A., BALI A., (2003), A STUDY OF DUNE SAND CONCRETE FOR AERONAUTICAL RUNWAYS »ADVANCES IN WASTE MANAGEMENT AND RECYCLING, INTERNATIONAL SYMPOSIA; 9-11 SEPTEMBER 2003 DUNDEE, SCOTLAND.**
- KETTAB R., BALI A., FLEUREAU J.M.**; (2003), UTILISATION DU SABLE DE DUNES DANS LES CHAUSSEES AU SAHARA; 13EME CONGRES REGIONAL D'AFRIQUE : L'IMPLICATION DE LA GEOTECHNIQUE DANS LE DEVELOPPEMENT DES INFRASTRUCTURES EN AFRIQUE. MARRAKECH MAROC 8-10 DECEMBRE 2003.
- KETTAB R. ; BALI A. ; GUENNICHE A.**; (2004), Traitement des sables de dunes.
Conférence internationale de Géotechnique Géo- Beyrouth 2004 Liban du 18 au 22 Mai 2004.

KETTAB R. ; BALI A.; GHRIEB A. ;(2004), Béton de sable de dunes ; 1^{er} Congrès international sur la technologie et la durabilité du béton USTHB 24 au 26 Mai 2004 Alger.

KETTAB R. ; BALI A; ALLICHE A.; (2005), Béton de sable de dunes; 2^{ème} séminaire sur les technologies du béton : le béton, matériau des grands défis ; 17 et 18 Septembre 2005 Alger.

KETTAB R.; BALI A; GHRIEB A; ALLICHE A.; (2005), Etude et formulation d'un béton de sable de dunes pour chaussées aéronautiques; 1^{er} Congrès africain de la route du 06 au 08 Décembre 2005 Alger.

KETTAB R.; BALI A; ALLICHE A.; (2007); rubber modified sand concrete for waste management; International Journal Nuclear Energy Science and Technology, Volume 3, N°1 Page 63 à 75.

LAN T. N., (Jan-fev 1981), Utilisation de l'essai au bleu de méthylène en terrassement routier, Bulletin de liaison du LCPC, N° 111, Paris, France.

LANCHON R., (1977), Cours de laboratoire : granulats – bétons – sols, DESFORGES, Paris, France.

LAQUERBE M., CISSE., AHOANSOU G., (1995), Pour une utilisation rationnelle des graveleux latéritiques et des sables de dunes comme granulats à béton : Application au Sénégal, Materials and structures, volume 28.

L.C.P.C. (1973), Essai Marshall, projet de mode opératoire, Paris, France, P.12.13

L.C.P.C. (1981), Essai Duriez LCPC : essai de compression simple sur enrobés hydrocarbonés, projet de mode opératoire, Paris, France, P.19

L.C.P.C. (1981), Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire, projet de mode opératoire, Paris, France, P.19

L.C.P.C. (1981), Essai à l'orniéreur, projet de mode opératoire, Paris, France, P.21

LCPC et SETRA, (1997), Chaussées en béton guide technique, Presse du laboratoire des ponts et chaussées, Paris, France.

LCPC et STBA, (2000), Chaussées en béton (guide technique, Presse du laboratoire des ponts et chaussées, Paris, France.

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

LVOVICHE M., (novembre 1991), utilisation des bétons de sable à Moscou, recueil des communications du séminaire Franco soviétique sur les bétons de sable, bordeaux

MAZA M., AYADAT T., (1995), Traitement des bétons et mortiers à base de sables concassés locaux par des adjuvants, Annales de l'institut technique du bâtiment et des travaux publics, Paris, France.

Ministere De L'équipement Et De L'aménagement Du Territoire, (1995), Direction de l'exploitation et de l'entretien routiers, guide de l'entretien routier.

Ministere Des Travaux Publics, Direction Des Routes (2000),

« Catalogue de dimensionnement des chaussées neuves », C.T.T.P, Algérie, P.116-118

- MORSLI M., KETTAB R.;** (2000), Valorisation des matériaux locaux; Actes conférence internationale de géo engineering du 10, 12 et 13 Juin 2000 USTHB Alger Algérie.
- 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
- OUGHANEM S.** (2001), Utilisation des sables-bitumes en techniques routières, ARAL, 3^{ème} congrès algérien de la route, Alger, P.14 –18
- 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
- RAPPORTS DE RECHERCHE 3-8** (1995), Etude et expérimentation sur Sand Asphalt, C.T.T.P, Algérie
- RAPPORT PRELEMINAIRE.** (1995), Etude de recherche sur les sables bitumes, Dossier 63.95.0001, L.T.P.C, Algérie
- 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.
- REGUOURD M.**, (Jan 1982), « Microstructure et propriétés des ciments, mortiers et bétons, ciments, bétons, plâtres, chaux, N° 734, Paris, France.
- SABLOCRETE,** (1994), « Bétons de sable », Presse de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.
- 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.

Annexe A

Tableau A-1. : Compositions de base avec le sable de dunes.

E/C	0,80	0,85	0,90
Ciment (Kg/m ³)	350	350	350
Sable (Kg/m ³)	1470,73	1424,53	1378,33
Eau (Litres/m ³)	280	297,5	315
Adjuvant (Kg/m ³)	4,13	4,13	4,13

Tableau A-2: Résultats des compositions sans fines d'addition avec le sable de Hassi Berkine:

Formulations	E/C	Résultats à 7 jours				Résultats à 28 jours			
		F (KN)	Rc (MPa)	Rc (MPa)		F (KN)	Rc (MPa)	Rc (MPa)	
BSH0I	0,8	10,5	6,56	Max	6,56	10,2	6,38	Max	9,06
		8,8	5,50	Moy	5,85	14,5	9,06	Moy	8,84
		8,8	5,50	Min	5,5	13,8	8,63	Min	8,63
BSH0II	0,85	10	6,25	Max	7,38	17	10,63	Max	10,75
		11,8	7,38	Moy	6,73	17,2	10,75	Moy	10,25
		10,5	6,56	Min	6,25	15	9,38	Min	9,38
BSH0III	0,9	9,7	6,06	Max	6,31	14,2	8,88	Max	9,25
		10,1	6,31	Moy	5,94	13,5	8,44	Moy	8,85
		8,7	5,44	Min	5,44	14,8	9,25	Min	8,44

Tableau A.3: Résultats des compositions sans fines d'addition avec le sable de Bechar:

Formulations	E/C	Résultats à 7 jours				Résultats à 28 jours			
		F (KN)	Rc (MPa)	Rc (MPa)		F (KN)	Rc (MPa)	Rc (MPa)	
BSB0I	1	5,2	3,25	Max	3,81	7,8	4,88	Max	6,06
		6,1	3,81	Moy	3,54	9	5,63	Moy	5,52
		5,7	3,56	Min	3,25	9,7	6,06	Min	4,88
BSB0II	1,05	7,7	4,81	Max	4,81	12	7,50	Max	8,75
		7	4,38	Moy	4,48	14	8,75	Moy	7,81
		6,8	4,25	Min	4,25	11,5	7,19	Min	7,19
BSB0III	1,1	6	3,75	Max	3,75	9	5,63	Max	6,06
		4,7	2,94	Moy	3,38	7,5	4,69	Moy	5,46
		5,5	3,44	Min	2,94	9,7	6,06	Min	4,69

Tableau A.4 : Compositions avec le sable de Hassi Berkine et le filler calcaire.

E/C	Filler (Kg/m ³)	Ciment (Kg/m ³)	Sable (Kg/m ³)	Eau (Litre/m ³)	Adjuvant (Kg/m ³)
0,70	200	350	1358,34	245	4,13
0,75			1312,14	262,5	4,13
0,80			1265,94	280	4,13
0,85			1219,74	297,5	4,13
0,70	250		1309,45	245	4,13
0,75			1263,25	262,5	4,13
0,80			1217,05	280	4,13
0,85			1170,85	297,5	4,13
0,70	300		1260,56	245	4,13
0,75			1214,36	262,5	4,13
0,80			1168,16	280	4,13
0,85			1121,96	297,5	4,13

Tableau A-5: Compositions avec le sable de Hassi berkine et le laitier.

E/C	Laitier (Kg/m ³)	Ciment (Kg/m ³)	Sable (Kg/m ³)	Eau (Litre/m ³)	Adjuvant (Kg/m ³)
0,85	200	350	1219,74	297,5	4,13
0,90			1173,54	315	4,13
0,95			1127,34	332,5	4,13
1			1081,14	350	4,13
0,85	250		1170,85	297,5	4,13
0,90			1124,65	315	4,13
0,95			1078,45	332,5	4,13
1			1032,25	350	4,13
0,85	300		1121,96	297,5	4,13
0,90			1075,76	315	4,13
0,95			1029,56	332,5	4,13
1			983,36	350	4,13

Tableau A-6: Résultats des compositions avec le sable de Hassi berkine et le filler calcaire

Formulations	E/C	Résultats à 7 jours				Résultats à 28 jours			
		F (KN)	Rc (MPa)	Rc (MPa)		F (KN)	Rc (MPa)	Rc (MPa)	
BSHF1I	0,7	11,5	7,19	Max	7,19	21,5	13,44	Max	14,02
		9,5	5,94	Moy	7,03	13	8,13	Moy	13,75
		11	6,88	Min	6,88	22,4	14,02	Min	13,44
BSHF1II	0,75	11,5	7,19	Max	7,5	22	13,75	Max	14,38
		12	7,50	Moy	7,29	23	14,38	Moy	14,06
		11,5	7,19	Min	7,19	12,5	7,81	Min	13,75
BSHF1III	0,8	12,5	7,81	Max	7,81	17,5	10,94	Max	12,19
		10,5	6,56	Moy	7,24	19,5	12,19	Moy	11,56
		11,75	7,34	Min	6,56	25	15,63	Min	10,94
BSHF1IV	0,85	10	6,25	Max	6,25	19	11,88	Max	11,88
		9	5,63	Moy	5,83	14,5	9,06	Moy	10,52
		9	5,63	Min	5,63	17	10,63	Min	9,06
BSHF2I	0,7	12,5	7,82	Max	7,82	22	13,75	Max	14,38
		12,4	7,75	Moy	7,5	23	14,38	Moy	14,06
		11,1	6,93	Min	6,93	18,5	11,56	Min	13,75
BSHF2II	0,75	13	8,13	Max	8,13	22,4	14,03	Max	15
		12,75	7,97	Moy	7,97	14,8	23,04	Moy	14,5
		12,5	7,81	Min	7,81	24	15,00	Min	14,03
BSHF2III	0,8	14	8,75	Max	8,75	21,5	13,44	Max	13,44
		12	7,50	Moy	7,71	21,5	13,44	Moy	13,44
		11	6,88	Min	6,88	19	11,88	Min	13,44
BSHF2IV	0,85	11,75	7,34	Max	7,88	14	8,75	Max	11,88
		12,6	7,88	Moy	7,52	19	11,88	Moy	9,9
		11,75	7,34	Min	7,34	14,5	9,06	Min	8,75
BSHF3I	0,7	14,5	9,06	Max	9,84	18,5	11,56	Max	15
		15,75	9,84	Moy	9,45	24	15,00	Moy	14,69
		18,75	11,72	Min	9,06	23	14,38	Min	14,38
BSHF3II	0,75	12,5	7,81	Max	9,38	25	15,63	Max	15,63
		15	9,38	Moy	9,38	24	15,00	Moy	15,31
		15	9,38	Min	9,35	17	10,63	Min	15
BSHF3III	0,8	12,1	7,56	Max	8,44	17	10,63	Max	11,25
		13,5	8,44	Moy	7,94	18	11,25	Moy	10,63
		12,5	7,81	Min	7,56	16	10,00	Min	10
BSHF3IV	0,85	11,75	7,34	Max	7,34	15	9,38	Max	10,94
		10	6,25	Moy	6,51	17,5	10,94	Moy	9,9
		9,5	5,94	Min	5,94	15	9,38	Min	9,38

Tableau A-7: Résultats des compositions avec le sable de Hassi berkine et le laitier

Formulations	E/C	Résultats à 7 jours				Résultats à 28 jours			
		F (KN)	Rc (MPa)	Rc (MPa)		F (KN)	Rc (MPa)	Rc (MPa)	
BSHL1I	0,85	11	6,88	Max	8,56	18,8	11,75	Max	13,75
		13,7	8,56	Moy	7,65	22	13,75	Moy	12,88
		12	7,50	Min	6,88	21	13,13	Min	11,75
BSHL1II	0,9	14,5	9,06	Max	9,69	24	15,00	Max	17,19
		15,2	9,50	Moy	9,42	26	16,25	Moy	16,15
		15,5	9,69	Min	9,06	27,5	17,19	Min	15
BSHL1III	0,95	14,75	9,22	Max	9,22	23,75	14,84	Max	14,84
		13	8,13	Moy	8,8	23,5	14,69	Moy	14,77
		14,5	9,06	Min	8,13	16,75	10,47	Min	14,69
BSHL1IV	1	10,75	6,72	Max	7,5	16,2	10,13	Max	12,19
		12	7,50	Moy	6,72	19,5	12,19	Moy	12,19
		9,5	5,94	Min	5,94	19,5	12,19	Min	12,19
BSHL2I	0,85	18,5	11,56	Max	9,69	24	15,00	Max	15
		13,2	8,25	Moy	8,97	24	15,00	Moy	15
		15,5	9,69	Min	8,25	30	18,75	Min	15
BSHL2II	0,9	13,75	8,59	Max	8,59	24,1	15,06	Max	15,31
		12,2	7,63	Moy	8,01	24,5	15,31	Moy	15,07
		12,5	7,81	Min	7,63	23,75	14,84	Min	14,84
BSHL2III	0,95	12,4	7,75	Max	8,38	22,5	14,06	Max	14,75
		13,4	8,38	Moy	7,98	21,5	13,44	Moy	14,08
		12,5	7,81	Min	7,75	23,6	14,75	Min	13,44
BSHL2IV	1	11,4	7,13	Max	7,25	11,5	7,19	Max	8,13
		11,2	7,00	Moy	7,13	11,5	7,19	Moy	7,5
		11,6	7,25	Min	7	13	8,13	Min	7,19
BSHL3I	0,85	14,6	9,13	Max	9,13	14,5	9,06	Max	14,56
		13,6	8,50	Moy	8,58	19,25	12,03	Moy	13,3
		13	8,13	Min	8,13	23,3	14,56	Min	12,03
BSHL3II	0,9	14,2	8,88	Max	8,88	23,5	14,69	Max	14,69
		13,5	8,44	Moy	8,1	28	17,50	Moy	14,53
		11,2	7,00	Min	7	23	14,38	Min	14,38
BSHL3III	0,95	12,8	8,00	Max	8,06	20,8	13,00	Max	14,25
		10,8	6,75	Moy	7,6	22,4	14,00	Moy	13,75
		12,9	8,06	Min	6,75	22,8	14,25	Min	13
BSHL3IV	1	10	6,25	Max	7	22	13,75	Max	13,75
		10,3	6,44	Moy	6,56	20	12,50	Moy	12,92
		11,2	7,00	Min	6,25	20	12,50	Min	12,5

Tableau A-8: Résultats des compositions avec le sable de Béchar et le filler calcaire:

Formulations	E/C	Résultats à 7 jours				Résultats à 28 jours			
		F (KN)	Rc (MPa)	Rc (MPa)		F (KN)	Rc (MPa)	Rc (MPa)	
BSBF1I	0,85	7,5	4,69	Max	4,69	13	8,13	Max	8,13
		9,2	5,75	Moy	4,59	9,8	6,13	Moy	6,94
		7,2	4,50	Min	4,5	10,5	6,56	Min	6,13
BSBF1II	0,9	9	5,63	Max	5,63	11,7	7,31	Max	8,63
		9	5,63	Moy	5,63	13,8	8,63	Moy	7,77
		9	5,63	Min	5,63	11,8	7,38	Min	7,31
BSBF1III	0,95	9	5,63	Max	5,63	10,3	6,80	Max	7,6
		8	5,00	Moy	5,1	12,8	7,15	Moy	7,15
		7,5	4,69	Min	4,69	13,6	7,60	Min	6,8
BSBF1IV	1	9,2	5,75	Max	5,75	11,5	7,19	Max	7,19
		8	5,00	Moy	5,25	9,8	6,13	Moy	6,46
		8	5,00	Min	5	9,7	6,06	Min	6,06
BSBF2I	0,85	9,75	6,09	Max	6,5	13	8,13	Max	9,38
		10,4	6,50	Moy	5,86	15	9,38	Moy	8,44
		8	5,00	Min	5	12,5	7,81	Min	7,81
BSBF2II	0,9	10,75	6,72	Max	6,72	15	9,38	Max	10,63
		8,75	5,47	Moy	6,15	15	9,38	Moy	9,79
		10	6,25	Min	5,47	17	10,63	Min	9,38
BSBF2III	0,95	8,75	5,47	Max	6,94	10	6,25	Max	7,81
		11,1	6,94	Moy	6,43	12,5	7,81	Moy	7,6
		11	6,88	Min	5,47	11,5	7,19	Min	6,4
BSBF2IV	1	8,2	5,13	Max	6,25	11	6,88	Max	8,75
		9,5	5,94	Moy	5,77	14	8,75	Moy	7,6
		10	6,25	Min	5,13	11,5	7,19	Min	6,88
BSBF3I	0,85	12,5	7,81	Max	7,81	13,5	8,44	Max	8,44
		10	6,25	Moy	6,98	18,8	11,75	Moy	7,97
		11	6,88	Min	6,25	12	7,50	Min	7,5
BSBF3II	0,9	11	6,88	Max	7	17,5	10,94	Max	10,94
		11	6,88	Moy	6,92	17	10,63	Moy	10,83
		11,2	7,00	Min	6,88	17,5	10,94	Min	10,63
BSBF3III	0,95	13	8,13	Max	8,13	13	8,13	Max	8,13
		12	7,50	Moy	7,29	12,5	7,81	Moy	7,92
		10	6,25	Min	6,25	12,5	7,81	Min	7,81
BSBF3IV	1	8,7	5,44	Max	6,75	12,8	8,00	Max	8,5
		10,8	6,75	Moy	6,27	16	10,00	Moy	8
		10,6	6,63	Min	5,44	19	11,88	Min	7,8

Tableau A.9: Résultats des compositions avec le sable de Béchar et le laitier:

Formulations	E/C	Résultats à 7 jours				Résultats à 28 jours			
		F (KN)	Rc (MPa)	Rc (MPa)		F (KN)	Rc (MPa)	Rc (MPa)	
BSBL1I	0,95	8,5	5,31	Max	5,94	10,5	6,56	Max	9,19
		9,5	5,94	Moy	5,52	14,7	9,19	Moy	7,88
		8,5	5,31	Min	5,31	?	?	Min	6,56
BSBL1II	1	9,5	5,94	Max	6,38	19	11,88	Max	12,5
		10,2	6,38	Moy	5,98	20	12,50	Moy	12,19
		9	5,63	Min	5,63	15	9,38	Min	11,88
BSBL1III	1,05	7	4,38	Max	6,06	17,3	10,81	Max	11,25
		9	5,63	Moy	5,35	14,5	9,06	Moy	10,4
		9,7	6,06	Min	4,38	18	11,25	Min	9,6
BSBL1IV	1,1	8	5,00	Max	6,13	12	7,50	Max	10
		7,5	4,69	Moy	5,27	15,5	9,69	Moy	9,84
		9,8	6,13	Min	4,69	16	10,00	Min	9,69
BSBL2I	0,95	8,5	5,31	Max	6,56	21,5	13,44	Max	13,44
		8,8	5,50	Moy	5,79	18	11,25	Moy	12,15
		10,5	6,56	Min	5,31	18,8	11,75	Min	11,25
BSBL2II	1	11,5	7,19	Max	7,19	19,5	12,19	Max	12,19
		11	6,88	Moy	6,67	17,3	10,81	Moy	11,1
		9,5	5,94	Min	5,94	16,5	10,31	Min	10,31
BSBL2III	1,05	11,5	7,19	Max	7,5	15,2	9,52	Max	11,47
		10,5	6,56	Moy	7,08	16,75	10,50	Moy	10,5
		12	7,50	Min	6,56	18,4	11,47	Min	9,52
BSBL2IV	1,1	10	6,25	Max	6,25	15,6	9,75	Max	10
		6,75	4,22	Moy	5,26	19,75	12,34	Moy	9,88
		8,5	5,31	Min	4,22	16	10,00	Min	9,75
BSBL3I	0,95	7,5	4,69	Max	5,63	16	10,00	Max	12,13
		9	5,63	Moy	5,31	18,5	11,56	Moy	11,23
		9	5,63	Min	4,69	19,4	12,13	Min	10
BSBL3II	1	9	5,63	Max	6,56	22,8	14,25	Max	10,63
		10,5	6,56	Moy	6,04	17	10,63	Moy	10,16
		9,5	5,94	Min	5,63	15,5	9,69	Min	9,69
BSBL3III	1,05	10,5	6,56	Max	6,88	21	13,13	Max	10
		11	6,88	Moy	6,72	16	10,00	Moy	10
		13	8,13	Min	6,56	16	10,00	Min	10
BSBL3IV	1,1	7,5	4,69	Max	5	17	10,63	Max	10,63
		8	5,00	Moy	4,9	15,75	9,84	Moy	10,03
		8	5,00	Min	4,69	15,4	9,63	Min	9,63

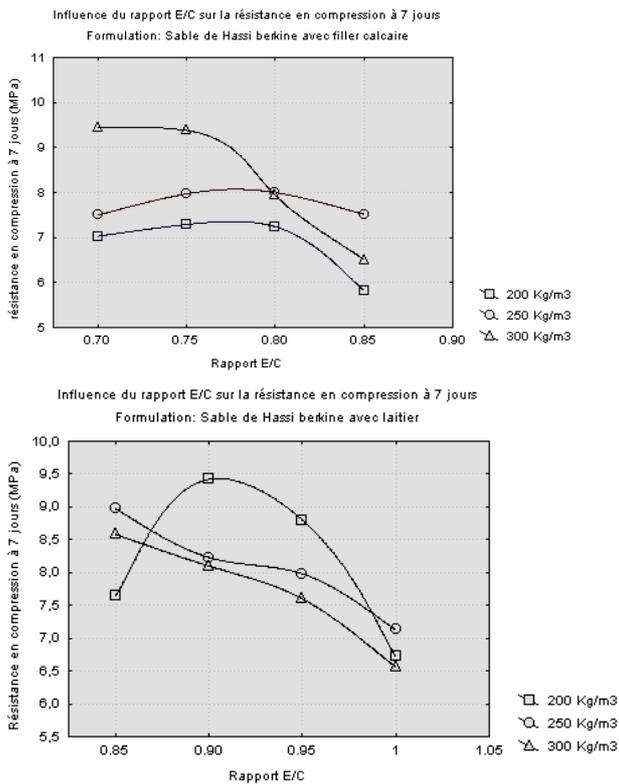


Figure A.1. : Influence du rapport E/C sur $R_{C7jours}$ en fonction de la nature de l'ajout (H. Berkine).

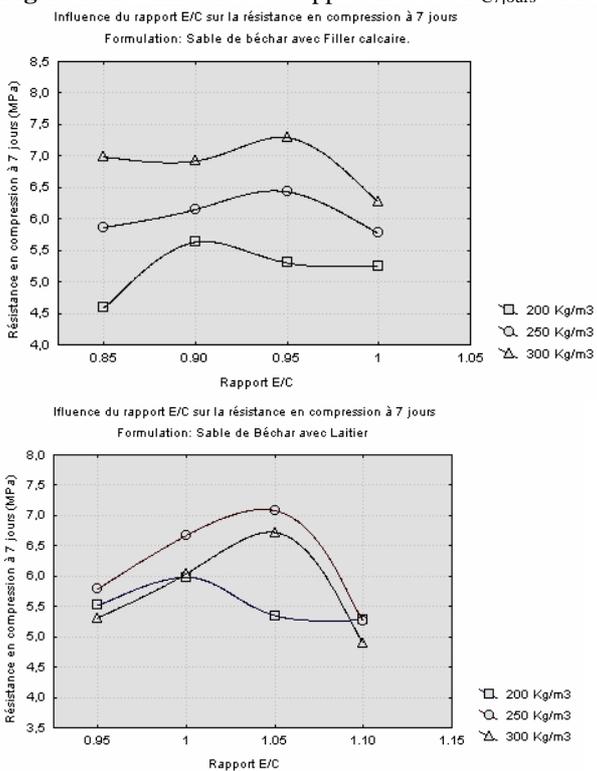


Figure A.2 : Influence du rapport E/C sur $R_{C7jours}$ en fonction de la nature de l'ajout (Béchar).

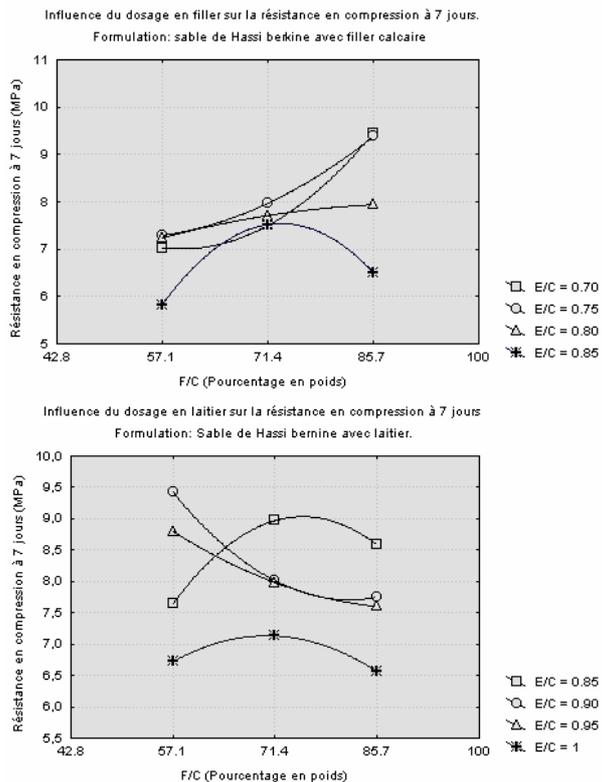


Figure A.3: Influence du rapport F/C sur $R_{C7jours}$ en fonction de la nature de l'ajout (H.Berkine).

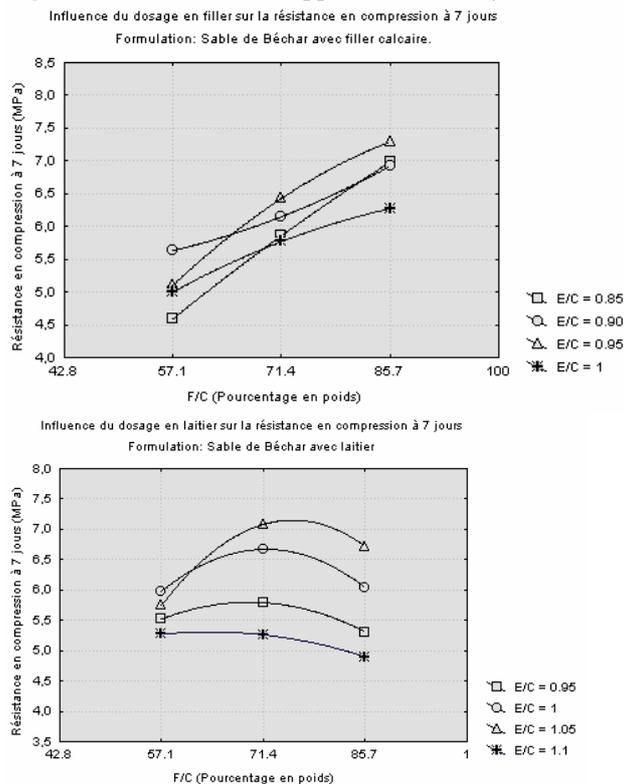


Figure A.4: Influence du rapport F/C sur $R_{C7jours}$ en fonction de la nature de l'ajout (Béchar).

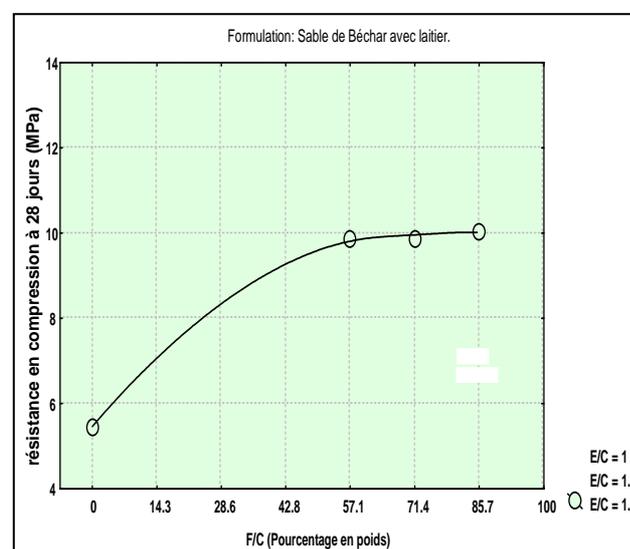
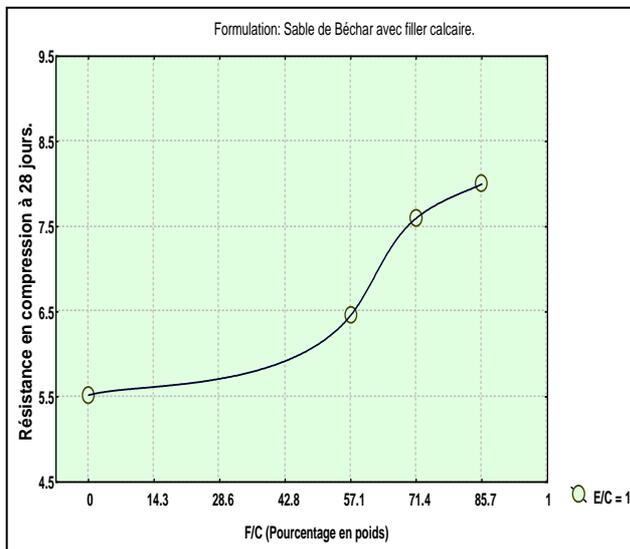
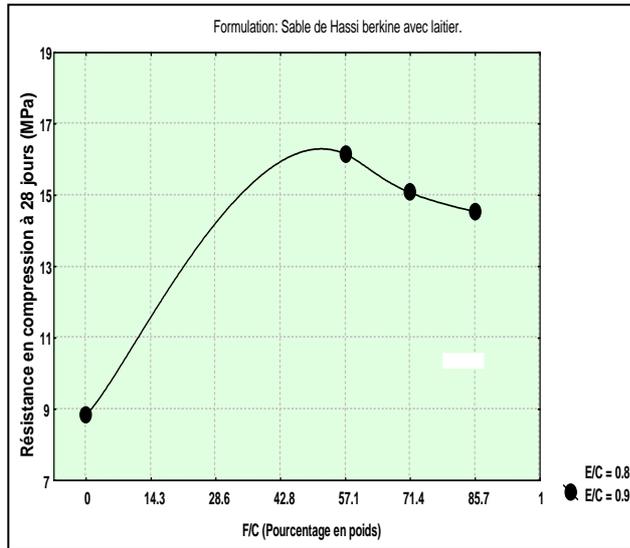
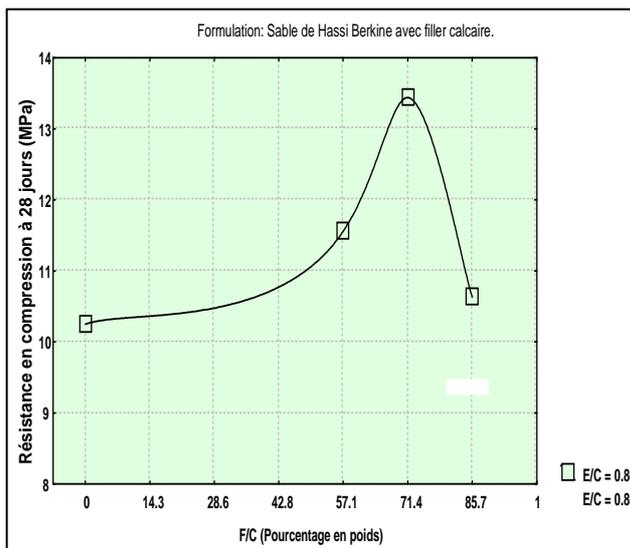


Figure A. 5. Influence du dosage en fines d'addition sur la résistance en compression à 28 jours comparaison entre les compositions sans et avec fines d'addition

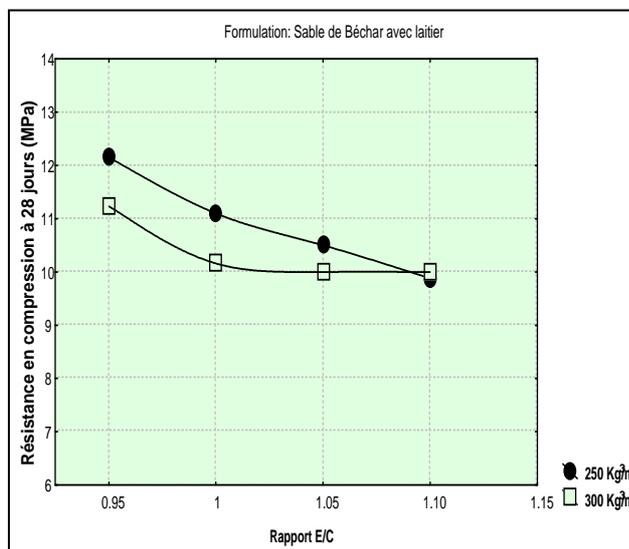
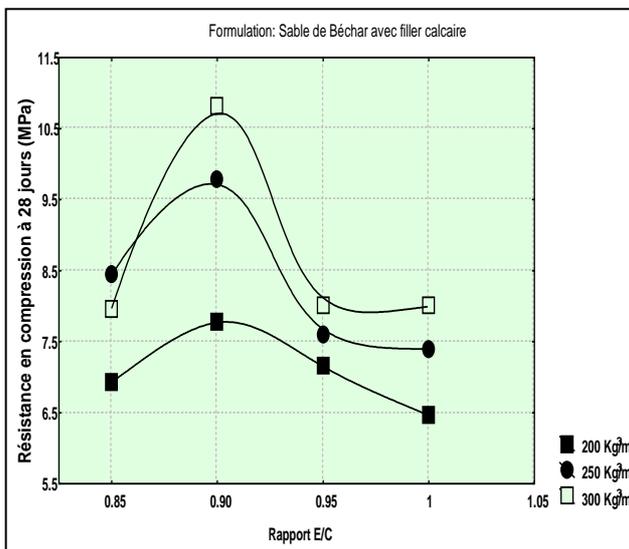
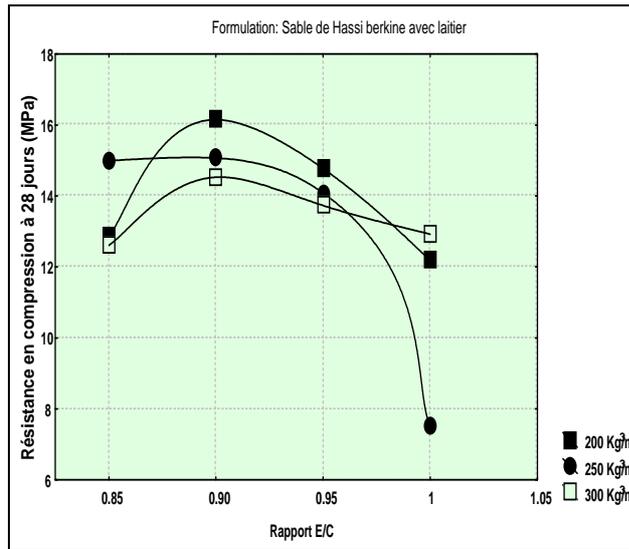
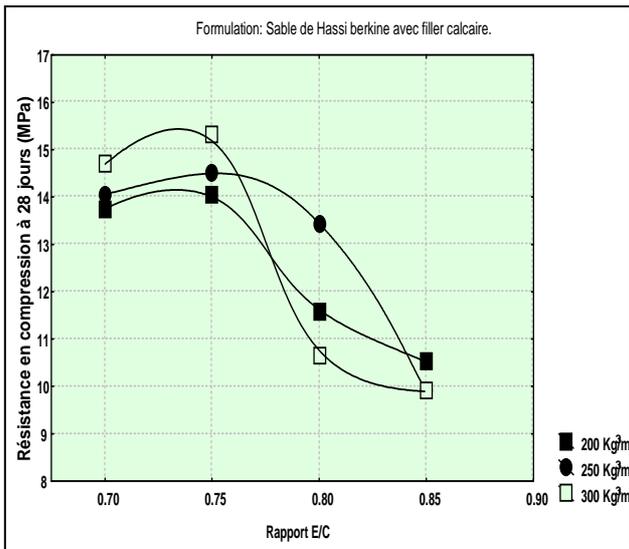


Figure A.6 : Influence du rapport E/C sur la résistance en compression à 28 jours

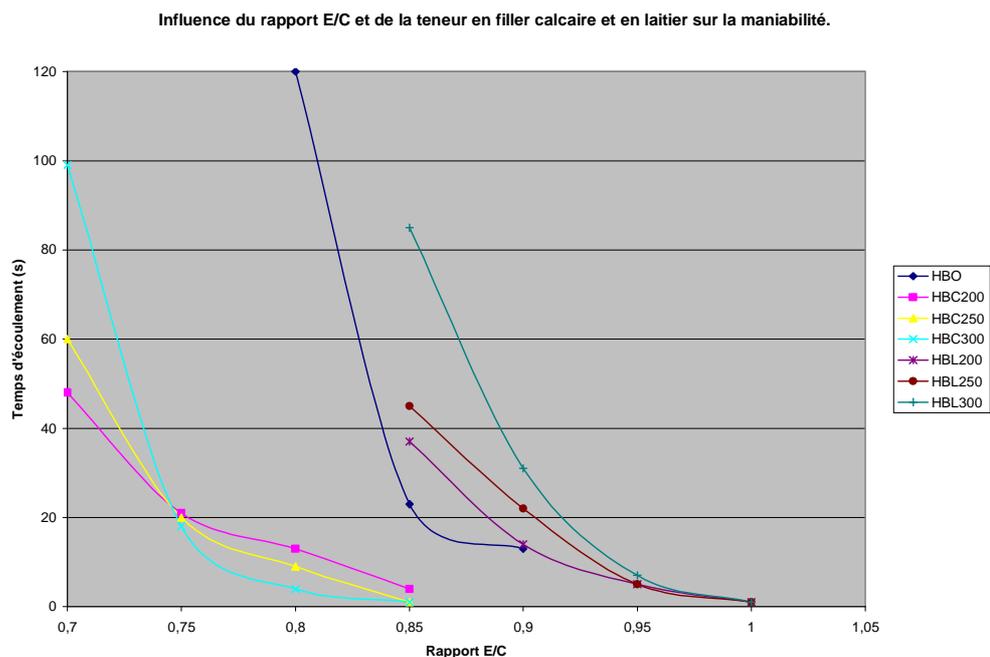


Figure A.7 : Influence du rapport E/C et de la teneur en filler sur la maniabilité (Sable I).

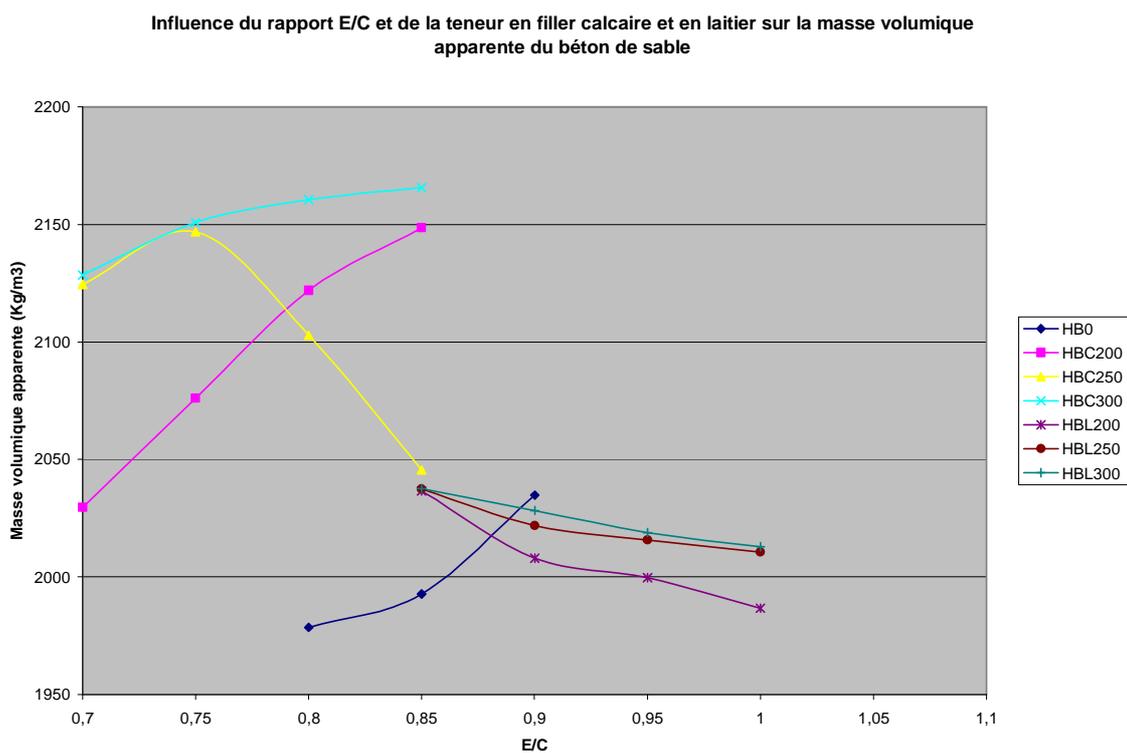


Figure A.8 : Influence du laitier et du rapport E/C sur la masse volumique (Sable I).

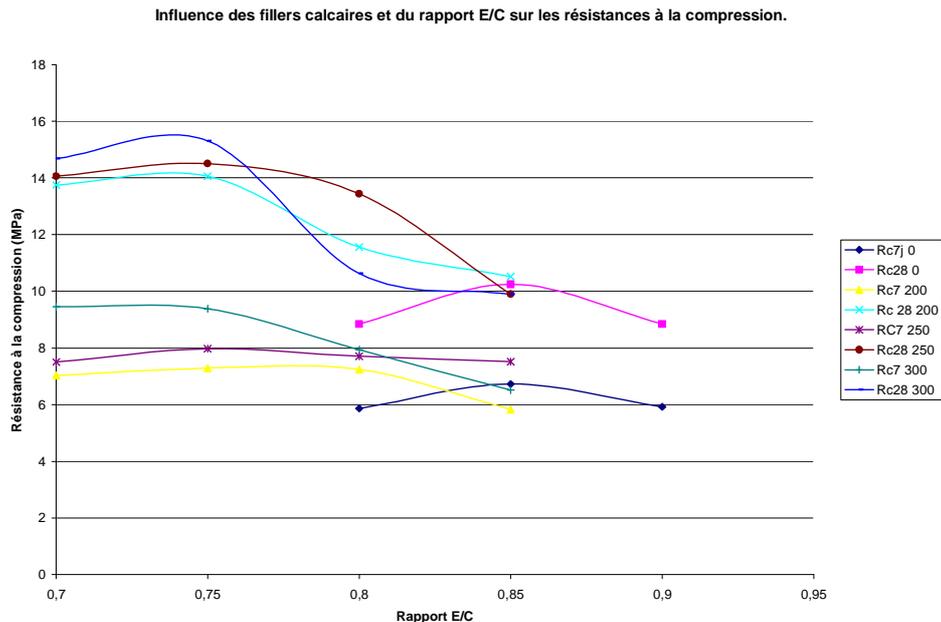


Figure A.9: Influence du filler Calcaire et du rapport E/C sur les résistances à la compression (Sable I).

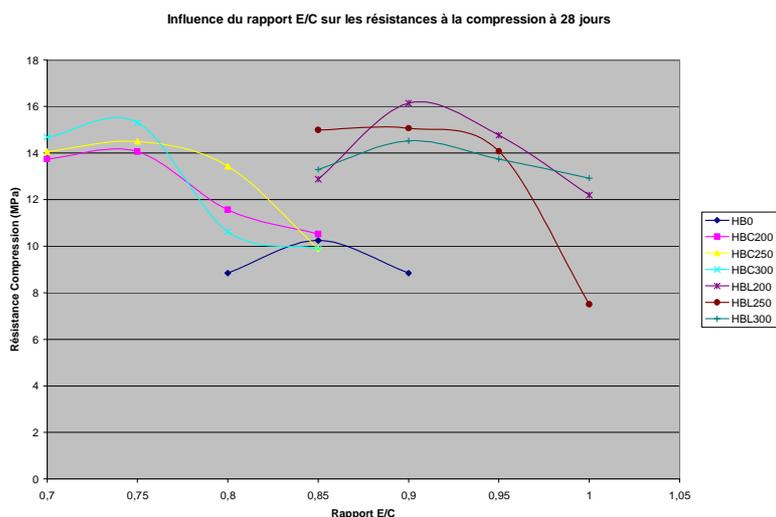


Figure A.10: Influence du laitier et du rapport E/C sur les résistances à la compression (Sable I).

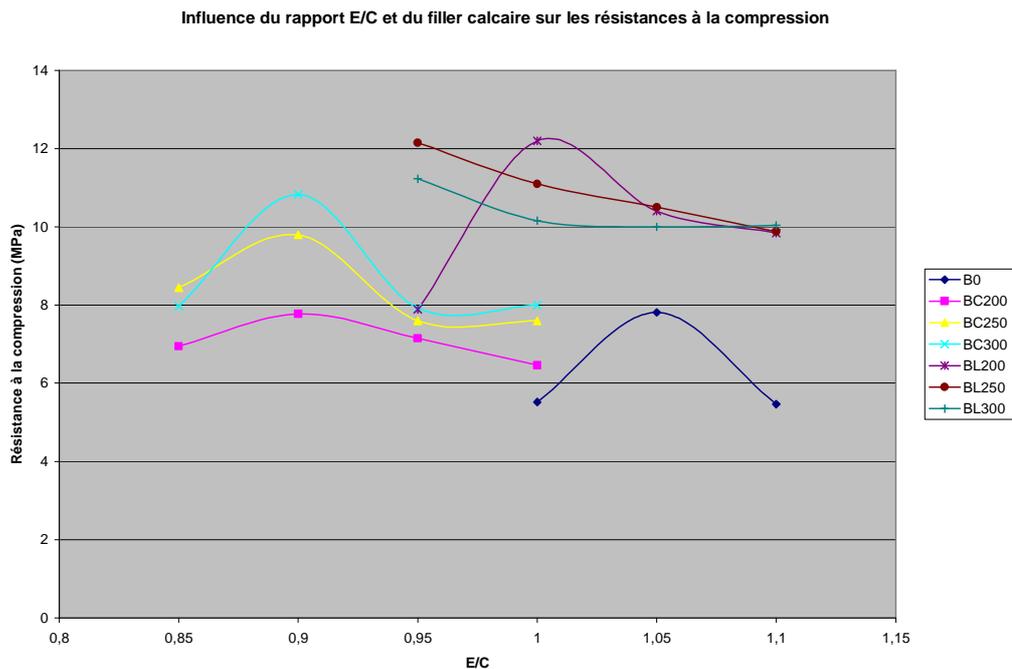


Figure A.11 : Influence du filler Calcaire et du rapport E/C sur les résistances à la compression (Sable II).

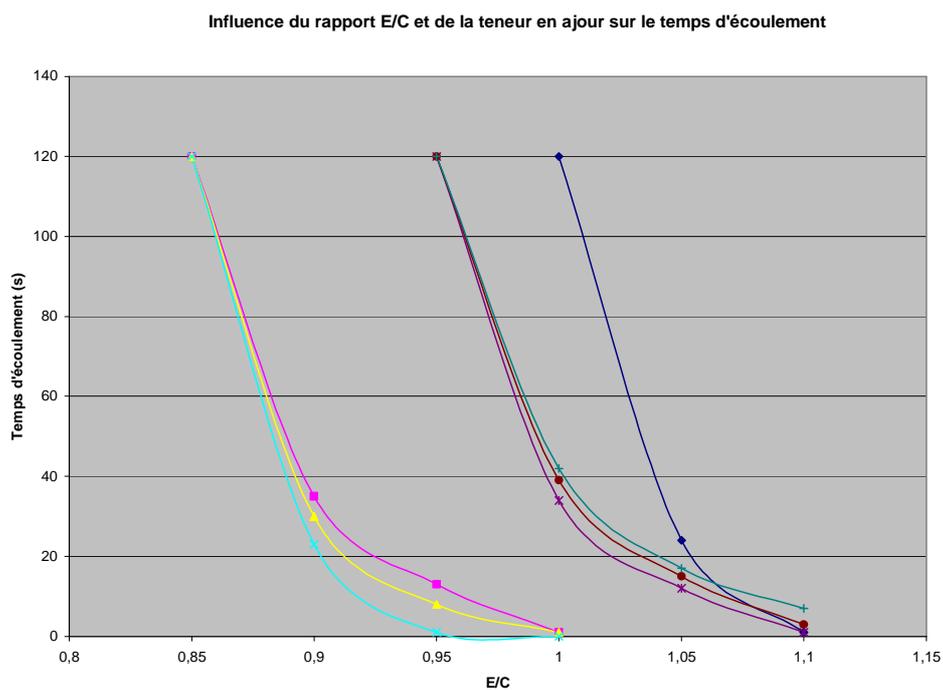


Figure A.12 : Influence du rapport E/C et de la teneur en filler sur le temps d'écoulement (Sable II).

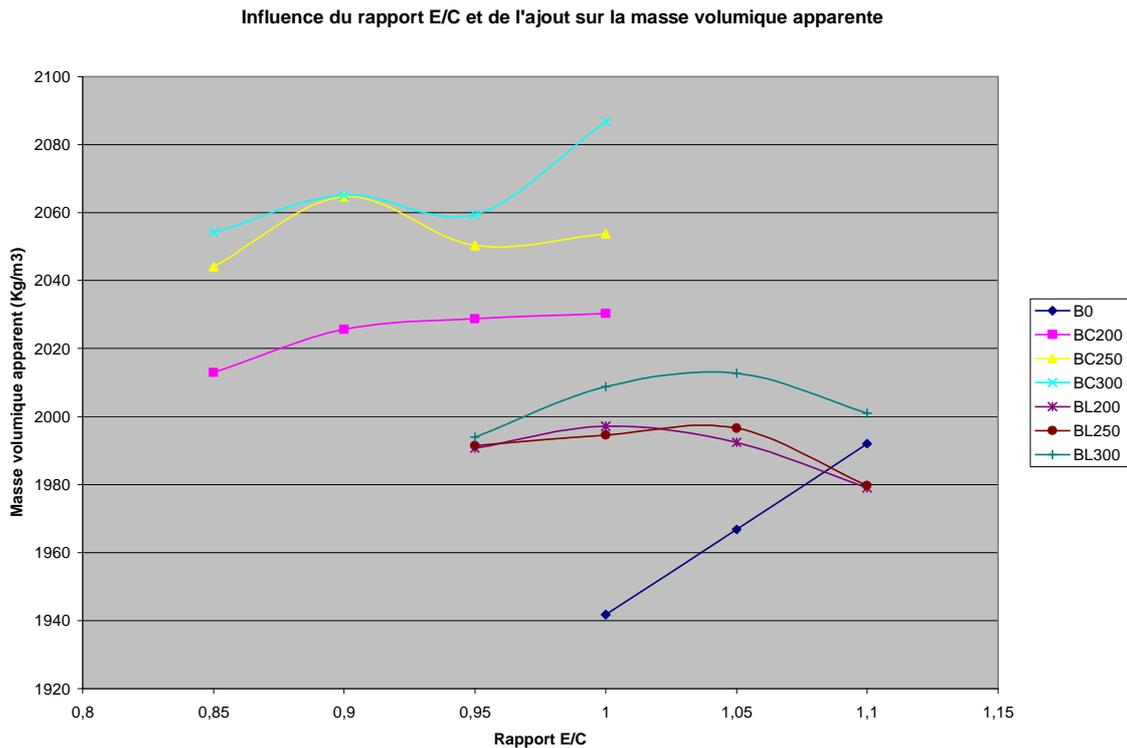


Figure A. 13: Influence du rapport E/C et de la teneur en filler sur la masse volumique (Sable II).

ANNEXE « B » : Essais sur enrobés hydrocarbonés

B.1. Essai de compression simple sur enrobés hydrocarbonés (essai duriez LPC)

B.1.1. Objet et domaine d'application

B.1.1.1. Définition et but de l'essai

L'essai de compression simple type LPC a pour but de déterminer, pour un compactage donné, la résistance à la compression d'une éprouvette d'enrobé de poids et de section déterminés.

Il permet également de définir la tenue à l'eau de l'enrobé par le rapport des résistances à la compression après et avant immersion de l'éprouvette dans un bain d'eau thermostatique.

Cet essai, applicable à tous les enrobés à base de bitume, est effectué :

- Soit avec un moule de 8 cm de diamètre, dit « moule normal » destiné aux matériaux ne comportant pas d'éléments égaux ou supérieurs à 14 mm ;
- Soit avec un moule de 12 cm de diamètre, dit « moule dilaté » destiné aux matériaux comportant des éléments égaux ou supérieurs à 14 mm et inférieurs à 31,5 mm.

Cet essai est communément appelé « Essai Duriez LPC ».

B.1.1.2. Principe de la méthode à chaud

- Confection (jour J)
- Maturation
 - 1^{er} jour : conservation à sec à température ambiante (J+1)
- Conservation
 - 7 jours : conservation à sec à 0 – 18 ou 50° C – hygrométrie constante à 50% pour 18 à 50° C (J+8)
 - ou
 - 7 jours : immersion – température donnée : 18 ou 50° C (J+8)
- Compression
 - L'essai est effectué à la vitesse théorique de 1 mm/s, 8 jours après confection des éprouvettes (J+8)

Soit R la résistance à la compression après conservation à sec.

Soit r la résistance à la compression après conservation avec immersion.

Le rapport $\frac{r}{R}$ exprime la tenue à l'eau de l'enrobé.

B.1.2. Matériel utilisé dans la formulation à chaud

B.1.2.1. Matériel spécifique à chaque essai

Presse

La multipresse de compactage LPC, si l'on ne dispose pas de cette presse, il faut utiliser une presse permettant de maintenir une charge de 180 kN pendant 5mn. Dans ce cas, on aura besoin également de deux pistons et un système de jeu de cales permettant le remplissage des moules et le compactage par double effet.

Moules LPC

Pour les enrobés inférieurs à 14m, il faut un minimum de 12 moules de compactage composés d'un cylindre creux de 80 mm \pm 0,1 (diamètre intérieur) et de 195 mm de hauteur, muni d'une plaque de base et d'une pastille supérieure ayant chacune 27,5 mm d'épaisseur.

Pour les enrobés supérieurs ou égaux à 14 mm, il faut un minimum de 10 moules de compactage composés d'un cylindre creux de 120 mm \pm 0,1 (diamètre intérieur) et de 275mm de hauteur, muni d'une plaque de base et d'une pastille supérieure de 27,5 d'épaisseur chacune.

Disques

Une série de disques en carton très rigide de 3 mm d'épaisseur, environ (3 kg/m²).

Deux dimensions selon les diamètres de l'éprouvette : 100×100 et 150×150.

B.1.2.2. Matériel non spécifique

Appareillage commun aux deux essais

- Une balance de précision moyenne, de portée \geq 5kg et d'échelon 1 g ;
- Une balance hydrostatique de précision fine, de portée \geq 3,5 kg et d'échelon 0,1g ;
- Une étuve pour la mise en température et le séchage des granulats et le préchauffage du bitume, ayant la possibilité d'une gamme de températures de 50 à 250° C \pm 1° C, à vide ;
- Un entonnoir métallique ;
- Deux mains métalliques pour la manutention des mélanges ;
- Un malaxeur mécanique, équipé de deux cuves ;
- Un couteau de vitrier pour le nettoyage des pales du malaxeur ;
- Un pied à coulisse au 1/10 ;
- Une armoire à température et humidité réglables capable d'assurer dans le volume utile une température de 18° C \pm 0,5° C e une humidité de 50% \pm 5% ;
- Une armoire à température réglable capable d'assurer dans le volume utile une température de 0° C \pm 0,5° C ;
- Un bain thermostatique capable d'assurer une température de 18° C \pm 0,5 ° C ;
- Un bain thermostatique capable d'assurer une température de 50° C \pm 0,5 ° C ;
- Une presse à avancement contrôlé réglée à la vitesse de 1 mm/s, équipée d'un enregistreur et d'un peson permettant de mesurer l'effort en cours d'essai ;
- Un thermomètre métallique fréquemment calibré aux valeurs utiles.

Produits

- Paraffine de masse volumique réelle connue.

Matériel spécifique aux essais à chaud

- Un récipient métallique (1litre) pour le liant ;
- Un thermomètre métallique pour le contrôle de la température du liant ;
- Deux paires de gants de cuir ignifugés, 5 doigts, avec manchettes de 40 cm ;
- Oléate de soude glycéricé ;
- Une cloche à vide double entrée, équipée d'une pompe à moteur, pompe à vide. 2000 l/h, vide limite : à 002 mm de Hg, 1/8 ch, 1400 tr/mn.

B.1.3. Préparation du matériau

B.1.3.1. Préparation des prises d'essais

Chacun des granulats entrant dans la composition de l'enrobé est relevé à partir de lots homogénéisés, selon la norme NF-P 186553 « préparation d'un échantillon pour essai ».

La quantité prélevée doit permettre de confectionner :

- Une gâchée de 13kg de granulats dans le cas d'un enrobé <14mm, ce qui correspond à 12 éprouvettes ;
- Ou deux gâchées comprenant 19kg chacune dans le cas d'un enrobé \geq 14mm, ce qui correspond à 2 fois 5 éprouvettes.

Les pesées de chaque classe granulaire sont lues au gramme près.

Essai à chaud

Au moment du malaxage, les températures des granulats, du bitume et de la cuve du malaxeur et des moules sont définies comme suit :

- | | |
|----------------------------------|--------|
| ➤ Enrobé à base de bitume 80/100 | 140° C |
| ➤ Enrobé à base de bitume 60/70 | 150° C |
| ➤ Enrobé à base de bitume 40/50 | 160° C |
| ➤ Enrobé à base de bitume 20/30 | 180° C |

Tous les granulats prélevés et pesés, y compris les fines, sont versés doucement dans la cuve du malaxeur de préférence, sinon, dans un récipient de capacité analogue. L'ensemble devra séjourner 12 heures minimum à la température de malaxage définie plus haut. Les différents matériels cuves de malaxeur, moules de compactage, doivent être entreposés à la même température, ce qui nécessite un séjour de 3 heures minimum à l'étuve.

Préparation du liant

On prépare également dans un récipient métallique la quantité de bitume nécessaire à l'enrobage de la gâchée, plus une marge de sécurité de 50g environ. Le chauffage du liant s'effectue en deux phases :

- a) ramollissement à l'étuve, à la température de malaxage, pendant une demi-heure environ ;
- b) mise en température sur plaque chauffante à gaz. Pour éviter tout risque de surchauffage, et afin de permettre une homogénéisation de la température, le bitume est agité constamment à l'aide d'un thermomètre métallique. Lorsque la

température du liant est à 10° C en dessous de la température requise, le chauffage est diminué afin de ne pas dépasser cette température.

B.1.3.2. Malaxage

La cuve contenant les granulats est centrée sur le malaxeur mécanique, réglé sur une vitesse moyenne (environ 32 trs/mn). On actionne le malaxeur « à blanc » quelques tours, afin de mélanger les différents granulats. On verse la quantité de liant nécessaire par différence de pesée du récipient contenant le liant. Si un excès de liant est introduit. Il ne devra pas dépasser 1% du liant, sinon la gâchée devra être rejetée.

La durée de malaxage n'est pas imposée : elle est appréciée visuellement par le technicien jusqu'à homogénéisation correcte. Elle est généralement de l'ordre de la minute.

Après malaxage, les palettes du malaxeur sont grattées à l'aide d'un couteau de vitrier. Tout l'enrobé doit être alors remélangé au moyen d'un main métallique qui servira aux prélèvements.

B.1.3.3. Remplissage des moules

Enfin de malaxage, les 12 moules d'essais (enrobé <14mm) ou les 5 moules d'essai (enrobé ≥14mm) sont sortis de l'étuve dans l'ordre 1, 2, 3, ... jusqu'à 12 ou 5, qui sera l'ordre de remplissage et de démoulage.

Pesée : avant chaque pesée, le technicien mélange la gâchée à l'aide de sa pelle, afin d'éviter toute ségrégation.

On pèse alors des prélèvements de :

- 1 kg ± 1 g dans le cas des enrobés < 14 mm ;
- 3,5 kg ± 1,5 g dans le cas des enrobés ≥ 14 mm.

Cette précision est particulièrement nécessaire lorsqu'on dispose d'une multipresse ; en effet, la hauteur des éprouvettes étant identique, une différence de poids entre éprouvettes entraîne des différences de compacité.

Remplissage : le prélèvement est introduit en une seule fois dans le moule très légèrement graissé au moyen d'un pinceau enduit d'oléate de soude glycérine. Les 12 ou 5 prélèvements sont introduits successivement dans l'ordre de remplissage. Les moules pleins sont ensuite introduits dans une étuve à la température du malaxage, et doivent y séjourner ½ heure.

B.1.4. Conditions d'essai

B.1.4.1. Confection des éprouvettes à chaud

Les moules repérés de 1 à 12 ou de 1 à 5 sont sortis de l'étuve.

La pastille supérieure est placée sur la surface de l'enrobé. Les moules sont alors déposés sur le plateau porte-moule de la presse ; la montée et le positionnement se font automatiquement.

Pression appliquée :

- Pour les enrobés < 14 mm : 60 kN
- Pour les enrobés ≥ 14 mm : 180 kN

La pression est maintenue pendant 5 minutes. Au bout de ce temps, la mise en pression est interrompue ; le plateau revient à sa position initiale.

On relève la pastille supérieure après compactage.

Démoulage : Les éprouvettes sont démoulées après complet refroidissement (durée minimale 4 heures) et placées sur une surface plane à température ambiante, afin d'éviter toute déformation.

Remarque : Il est nécessaire que la fabrication des éprouvettes soit assurée par deux techniciens, afin de procéder le plus rapidement possible aux manipulations et d'éviter au maximum les déperditions de température.

B.1.4.2. Essais préliminaires (à chaud)

Après démoulage, les éprouvettes soigneusement numérotées sont pesées à 1g près, soit P. on procède ensuite aux mesures géométriques pour contrôler la fabrication des éprouvettes. Elles sont mesurées au moyen d'un pied à coulisses au 1/10 mm, à raison de 3 mesures pour le diamètre et de 3 mesures pour les hauteurs, ces mesures devant être réparties sur la hauteur et la périphérie de l'éprouvette.

On calcule ensuite la masse volumique apparente MVA à partir des mesures géométriques. Les résultats des masses volumiques apparentes doivent être tels que la différence ne doit pas excéder $\pm 0,02$ par rapport à la moyenne. Si une différence plus importante apparaît, il est préférable de rejeter soit l'éprouvette, soit la série complète.

Essai Commun – Calcul de la masse volumique apparente au moyen d'une balance hydrostatique (MVA) : afin d'effectuer les calculs ultérieurs, on détermine la masse volumique apparente au moyen de la balance hydrostatique sur deux éprouvettes. Ces deux éprouvettes sont prélevées au hasard dans la série de 12, dans le cas des enrobés < 14mm, et à raison d'une par série de 5, dans le cas des enrobés ≥ 14 mm.

La pesée dans l'eau se fait après paraffinage de l'éprouvette, la paraffine étant à 70° C. on doit vérifier la densité de la paraffine.

B.1.4.3. Maturation des éprouvettes

Durant les premières 24 heures après la fabrication des éprouvettes, celles-ci sont conservées à température ambiante sur une surface plane.

Distribution des éprouvettes (commune aux deux essais)

Pour les enrobés < 14 mm, 5 éprouvettes sont prélevées au hasard pour la conservation à sec ; sur les 7 éprouvettes restantes, 5 sont destinées à la conservation avec immersion, ceci pour une température donnée, et 2 à la mesure de la masse volumique apparente par la méthode de la balance hydrostatique.

Pour les enrobés ≥ 14 mm, 2 éprouvettes sont prélevées au hasard dans chacune des deux séries pour conservation à sec ; sur les 6 éprouvettes restantes, 4 sont destinées à la conservation avec immersion, ceci pour une température donnée, et 2 à raison d'une par série, sont préservées à la mesure de la masse volumique apparente par la méthode de la balance hydrostatique.

Conservation des éprouvettes

Conservation à sec : J étant le jour de confection des éprouvettes, on commence la conservation au jour (J+1)

- Essai à 18° C : les éprouvettes sont placées sur un plateau de l'enceinte de conservation, réglée à 18° C \pm 0,5° C et à 50% \pm 5% d'humidité relative. Cette conservation dure 7 jours.
- Essai à 50° C : les éprouvettes sont placées sur un plateau de l'enceinte de conservation, réglée à 18° C \pm 0,5° C et à 50% d'humidité relative. Cette conservation dure 6 jours. Les éprouvettes sont ensuite placées dans une enceinte réglée à 50° C \pm 0,5° C et à 50% \pm 5% d'humidité relative jusqu'au lendemain.
- Essai à 0° C : les éprouvettes sont placées sur un plateau de l'enceinte de conservation, réglée à 0° C \pm 0,5° C. Cette conservation dure 7 jours.

Quelle que soit la température de l'essai (18° C ou 50° C), les éprouvettes sont soumises à un traitement de dégazage, 24 heures après confection, les éprouvettes sont introduites dans une cloche à vide après avoir été lavée rapidement afin d'enlever l'oléate de soude glycinée. La cloche doit être absolument hermétique. On raccorde une des deux entrées avec une pompe à moteur et on assure une pression résiduelle de 350 mmHg pendant 1 heure. Après ce premier temps, on relie la deuxième entrée de la cloche à vide à un robinet d'eau et, tout en maintenant la pression résiduelle de 350 mmHg, on introduit de l'eau jusqu'à immersion totale de éprouvettes.

On maintient ainsi les éprouvettes immergées, sous pression réduite, pendant deux heures. Au bout de ce temps, on arrête le maintien de la pression résiduelle, on ouvre la cloche, on sort les éprouvettes que l'on essuie légèrement en les roulant sur un chiffon humide, et on les pèse ensuite à \pm 0,5 g près, soit P_{j+1} .

- Essai à 18° C : après la pesée précédente, les éprouvettes sont introduites dans un bain thermostatique, réglé à 18° C \pm 0,5° C. Cette conservation dure 7 jours.
- Essai à 50° C : après la pesée précédente, les éprouvettes sont introduites dans un bain thermostatique, réglé à 18° C \pm 0,5° C. Cette conservation dure 6 jours. Pendant les dernières 24 heures de conservation, les éprouvettes sont placées dans un bain thermostatique à 50° C \pm 0,5° C.

Quelle que soit la température de l'essai, les éprouvettes sont pesées après essuyage rapide sur un chiffon humide avant l'essai au bout de 2 (ou 4) jours, soit P_{j+3} (ou P_{j+5}) et 7 jours d'immersion, soit P_{j+8} .

Pour l'essai à 50° C, il est recommandé de remettre les éprouvettes dans le bain thermostatique à 50° C à moins 1 heure avant l'essai, afin que l'éprouvette soit à la température requise.

B.1.4.4. Essai de compression simple (à chaud)

Au jour $j+8$, les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression, qu'elles aient subi une conservation à sec de 7 jours, ou une conservation avec immersion de 7 jours.

Les éprouvettes sont sorties une à une des enceintes de conservation.

Les éprouvettes sont placées entre le plateau supérieur de la presse et le peson relié à l'enregistreur dont la sensibilité est choisie en fonction de la charge de rupture des éprouvettes.

On interpose entre le plateau, le peson et l'éprouvette deux disques en carton.

On déclenche le mécanisme d'avancement de la presse. La vitesse du plateau est réglée à 1 mm/s. On enregistre la courbe d'effort en fonction du temps.

On arrête l'essai lorsque la courbe atteint son maximum ; ce maximum correspond à la résistance à la compression simple à la vitesse d'avancement de 1 mm/s. Cette résistance est exprimée en 10^5 Pascals. Elle s'obtient en divisant l'effort à la rupture exprimé en daN par la surface de l'éprouvette, soit 50 cm² dans le cas des enrobés < 14 mm, ou 113 cm² dans le cas des enrobés \geq 14 mm.

B.1.5. Exploitation des résultats.

La résistance à la compression simple à une température donnée, avec ou sans immersion, est exprimée en 10^5 Pascals et représente la moyenne de quatre ou cinq mesures suivant le diamètre des moules employés.

On établit également le rapport à la résistance avec immersion : r, à la résistance à sec : R, le rapport $\frac{r}{R}$ est exprimé en 0,01 près.

- Si : P : poids de l'éprouvette après démoulage
 P_{j+1} : poids de l'éprouvette après traitement par le vide
 P_{j+3} ou 5 : poids de l'éprouvette après 2 ou 4 jours d'immersion
 P_{j+8} : poids de l'éprouvette après 7 jours d'immersion

On a :

- Pourcentage d'imbibition :

- Après 1 heure sous vide et 2 heures sous vide dans l'eau,

$$W_{j+1} = \left(\frac{P_{j+1} - P}{P} \right) \times 100$$

- Après 2 ou 4 jours d'immersion,

$$W_{j+3} \text{ ou } W_{j+5} = \left(\frac{P_{j+3 \text{ ou } 5} - P}{P} \right) \times 100$$

- Après 7 jours d'immersion,

$$W_{j+8} = \left(\frac{P_{j+8} - P}{P} \right) \times 100$$

Calcul :

- Masse volumique apparente obtenue par des mesures effectuées avant l'essai, moyenne obtenue à partir de deux éprouvettes, soit MVA ;
- Masse volumique apparente obtenue par la méthode de la balance hydrostatique, moyenne obtenue à partir de l'ensemble des éprouvettes, soit MVA ;
- Masse volumique réelle des granulats, compte tenu de la masse volumique réelle de chacun d'entre eux et de leurs proportions dans le mélange des granulats, soit MVRg ;

En appelant P_1, P_2, P_n les pourcentages en masse des différents granulats et $MVRg_1, MVRg_2, MVRg_n$, les masses volumiques réelles correspondantes, on a :

$$MVRg = \frac{100}{\frac{P_1}{MVRg_1} + \frac{P_2}{MVRg_2} + \frac{P_n}{MVRg_n}}$$

- Masse volumique réelle de l'enrobé, compte tenu de la masse volumique réelle des granulats et de la masse volumique réelle du liant, ainsi que de leur proportion dans l'enrobé, soit MVR

En appelant P_1 le pourcentage en masse du liant et MVR_1 sa masse volumique réelle, on a :

$$MVR = \frac{100 + P_1}{\frac{100}{MVRg} + \frac{P_1}{MVR_1}}$$

- Compacité de l'éprouvette, soit C :

$$C = \frac{MVA}{MVR} \times 100$$

- Pourcentage de vide résiduels, soit V_R :

$$V_R = 100 - C$$

- Masse volumique apparente du granulat dans l'éprouvette, appelée également « densité sèche », soit MVA_g :

$$MVA_g = MVA \left[1 - \frac{P_1}{100 + P_1} \right]$$

P_1 étant le pourcentage en poids du liant en négligeant le poids de l'air des vides.

- Pourcentage des vides occupés par l'air et le liant, soit V_1 :

$$V_1 = \frac{V - V_R}{V} \times 100$$

B.2. Mode opératoire de l'essai MARSHALL (matériaux enrobés : béton bitumineux et enrobé denses) essai de stabilité Marshall

B.2.1. Objet

Ces essais et déterminations sont effectués d'une part en vue de l'étude préalable de recherche de la meilleure composition à adopter pour la confection d'un enrobé ou béton hydrocarboné, d'autre part, en vue du contrôle de la constante du produit en cours de fabrication.

B.2.1.1. Etude préalable

Les essais Marshall donnent des indications de qualité globale de l'enrobé ou du béton dont le choix et le dosage des constituants ont fait l'objet d'une série préliminaire d'essais :

Essai de qualité des agrégats (Deval ou Amédée Mannheim, équivalent de sable, teneur en argile et fillers, analyses granulométriques, etc.)

L'essai Marshall a donc en partie le même objet que l'essai Duriez, dont il diffère cependant par deux caractéristiques importantes :

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

On constatera en fait que les renseignements fournis par les deux essais ne sont pas obligatoirement en corrélation. Il est recommandé de compléter l'étude Duriez par une étude Marshall notamment dans le cas des mélanges présentant un faible frottement interne.

Il faut également noter que la forte dispersion des résultats de l'essai Marshall incite à le considérer comme un essai complémentaire, et non comme l'essai fondamental des études de matériaux enrobés.

Une application intéressante de l'essai Marshall consiste à étudier l'évolution des caractéristiques des mélanges enrobés mesurées dans cet essai, notamment la stabilité et la densité « sèche » de l'agrégat en fonction des variations de la teneur en liant. On admet pour de pareilles études, que le compactage des éprouvettes Marshall, plus énergique que celui de l'éprouvette Duriez, est analogue par ses effets à celui que subissent les matériaux enrobés sur la route, et que, par conséquent, les maxima observés (correspondant d'ailleurs à des teneurs en liant variables selon la caractéristique étudiée) donnent une indication sur la teneur en liant optimale à choisir pour le matériau enrobé.

Remarque

Nous signalons que la compacité de l'essai Duriez a été choisie pour donner la compacité exacte du revêtement routier correctement cylindré ou compacté dans les travaux de chantier, juste au moment où le revêtement est livré à la circulation. La compacité Marshall est celle qui correspond à la compacité sur chaussée après un an ou dix-huit mois de circulation. A noter que nous avons prévu l'essai à 60°C sur nos éprouvettes, 60°C étant la plus haute température atteinte en France par le revêtement l'été : la cohésion étant très diminuée, il met mieux en valeur le frottement interne dû aux granulats.

B.2.1.2. Contrôles de fabrication

L'étude du matériau enrobé avec des teneurs en liant variables permet de déterminer l'évolution de la compacité en fonction de la teneur en liant. On montre aisément que celle-ci varie assez rapidement dans le domaine des teneurs en liant usuelles. On peut donc en sens inverse déduire la teneur en liant de la compacité des éprouvettes Marshall confectionnées avec des matériaux prélevés sur la fabrication, d'un poste d'enrobage : c'est un moyen de contrôle commode, qui suppose cependant qu'on est assuré d'une constante suffisante de la composition de l'agrégat. La mesure des stabilités Marshall de telles éprouvettes peut fournir un second élément, de contrôle, se rapportant davantage à l'agrégat qu'à la teneur en liant.

B.2.2. Principe et définition

L'essai de stabilité Marshall est un essai de compression exercée suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique semi-frettée. Cette compression est appliquée sur l'éprouvette après 1/2 h d'immersion dans l'eau à 60 °C, et à la vitesse de 0,846 mm/s.

On appelle « stabilité Marshall » la charge en Kilogrammes, atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette.

En même temps que l'on applique l'effort de compression, on mesure la déformation à l'aide d'un appareil se composant d'un manchon de guidage et d'un indicateur de fluage.

On appelle déformation Marshall, la diminution du diamètre vertical qui est atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette. Cette déformation est exprimée en 1/10 de mm.

Par des mesures de dimensions et de poids de l'éprouvette, après confection, on détermine la densité apparente et, connaissant la densité du liant et des agrégats, on calcule le pourcentage de vides occupé par le liant. On appelle proportion des vides occupés par le liant, le pourcentage volumique des vides de l'agrégat comblé par le liant.

B.2.3. Le domaine d'application

Les essais Marshall peuvent être effectués pour tous les enrobés hydrocarbonés. Il y a cependant une restriction en ce qui concerne la dimension maximum des agrégats, ceux qui doivent tous passer au module 45 (tamis de 25 mm ou passoire 31,5 mm).

Il y a lieu aussi de tenir compte de la nature du liant pour la confection des éprouvettes, le mode opératoire n'étant décrit que pour un matériau enrobé à chaud au bitume pur.

B.2.4. Appareillage

- 1 presse développant 2 tonnes, sensible au Kilogramme, équipée d'un dispositif d'application de la compression à la vitesse de 0,846 mm/s ;

- Généralement on emploie une presse C.B.R. équipée d'un anneau dynamométrique d'une tonne (dans le cas où la pression d'écrasement est supérieure à une tonne, on utilisera de préférence un anneau de 2 tonnes, plutôt que d'extrapoler la courbe de l'étalonnage de l'anneau d'une tonne), d'un piston de compression à appui à billes, d'un indicateur de cadence à 0,846 mm/s complété par un « contrôleur de cadence »

- 1 appareillage Marshall ou mieux, 2 moules de compactage, 2 dames, 1 piston extracteur, 2 appareils de stabilité, d'un appareil pour mesurer la déformation (indicateur de fluage).

L'appareillage Marshall comprend :

- 1 moule de compactage (1 hausse, 1 moule, 1 paquet de base). La plaque de base et la hausse s'adapte indifféremment aux 2 ouvertures du moule proprement dit ;
- 1 piston extracteur ;

- 1 dame de compactage

Le compactage est réalisé par les coups répétés du marteau pesant 4,5 Kg et tombant verticalement d'une hauteur de 45 cm. Chaque coup porte sur la presque totalité de la surface de l'éprouvette.

- 1 appareil de stabilité Marshall. La mâchoire semi-cylindrique supérieure coulisse librement sur les 2 tiges de guidage. Lorsqu'une éprouvette est placée entre les mâchoires les extrémités en regard de ces dernières doivent être à 19,1 mm l'une de l'autre.
- 1 indicateur de fluage petit appareil à vernier coulissant, gradué en 0,5mm, qui s'adapte lors de la mesure à une des tiges de guidage.
- Bain d'eau thermostatique réglé à 60 °C. \pm 0,5 et pouvant contenir simultanément sur un support perforé au moins 4 éprouvettes complètement immergées et 2 appareils de stabilité Marshall.
- 2 étuves, l'une réglée entre 175 °C et 190 °C, l'autre réglée à 140 °C ;
- Récipients de 2 000 m³ de capacité pour le chauffage et le malaxage des agrégats et du liant ;
- Spatules ou grandes cuillères en métal ;
- 1 balance de portée minimum 3 Kg et sensible à 5 dg ;
- 1 paire de gants appropriée à la manipulation à chaud du matériel
- Disques papier filtre de diamètre 10 cm, texture moyenne de préférence ;
- Glycérine technique ;
- Oléate de soude glycérine ;
- Pétrole pour le nettoyage ;
- 1 thermomètre industriel 0°C à 200 °C avec tige plongeante et 13 cm pour le contrôle de la température de l'enrobé ;
- 1 pied à coulisse au 1/50^e.

B.2.5. Mode opératoire

En raison de la dispersion de l'essai, on confectionnera au moins quatre éprouvettes pour chaque formule étudiée.

B.2.5.1. Préparation du mélange et confection des éprouvettes

Dans un récipient métallique de 2 000 m³ de capacité environ, placé sur le plateau d'une balance, on pèse successivement les quantités fixées des différents agrégats, filler compris. Ces quantités sont calculées de manière à obtenir une gâchée de 1 200 g environ (liant compris). On mélange énergiquement et on porte le récipient et son contenu dans une étuve réglée à 175 \pm 190 °C où ils séjourneront une heure.

Dans le dernier quart d'heure du chauffage des agrégats, on porte dans une étuve réglée à 140 °C les moules à confection (base, cylindre et hausse montés), la dame de compactage et le piston extracteur.

Dans un second récipient, de 2 000 cm³, on pèse la quantité prévue de liant, et on chauffe celui-ci par exemple dans l'étuve réglée à 140 °C, de manière à lui conférer la fluidité nécessaire à l'enrobage, sans qu'il atteigne la température où la vaporisation des huiles devient excessive (le bitume ne doit pas émettre de vapeurs).

On retire d'abord de son étuve, le récipient contenant le liant, puis les agrégats, et l'on verse ceux-ci dans le récipient du liant. On mélange la totalité à la cuillère. La température du mélange ne doit pas être tombée au dessous de 150 °C à la fin du malaxage. Si la température tombe au dessous de cette valeur, on ne doit en aucun cas réchauffer le mélange, qui doit être rebuté.

VARIANTE TOLEREE

Le mélange pourra être effectué dans un malaxeur mécanique convenable par exemple du type à axe verticale et à contre-courant. Le malaxeur devra être tel que la ségrégation des matériaux soit réduite au minimum. Dans ce cas, on confectionnera 6 éprouvettes pour chaque mesure, au lieu de 4. on portera dans le malaxeur les agrégats chauffés à 175 ± 190 °C, comme il a été indiqué, puis la quantité voulue de bitume. On vérifiera que la température ne tombe pas au dessous de 125 °C à la fin du remplissage du dernier moule. On pourra utiliser un malaxeur chauffant, mais dans ce cas, on doit vérifier avec le plus grand soin qu'il ne se produit pas de surchauffe au sein du matériau durant le malaxage, et le chauffage du malaxeur devra être aussi modéré que possible.

Dans le cas où l'on utilise un malaxeur mécanique, on devra avoir un jeu complet de 6 moules, bases et pistons.

Dans ce cas, pour éviter un refroidissement excessif du mélange on pourra réintroduire celui-ci dans l'étuve à 140 °C, après malaxage pour une durée de 15 minutes au maximum.

On sort de l'étuve le moule à confection. On l'enduit intérieurement d'une légère couche d'oléate de soude de glycérine, puis on place dans le fond 2 disques de papier filtre.

On verse plusieurs fois la gâchée, en tassant à chaque fois avec la cuillère.

On égalise la surface avec la surface extracteur, auquel on communique un léger mouvement de rotation. On place un disque de papier filtre sur le mélange et on dame à raison de 50 coups sur chaque 2 bases de l'éprouvette. Pour cela, il est préférable de placer le moule sur un support de fixation, à 50 cm au-dessus du sol. On maintient fermement à la verticale la tige de la dame et on laisse tomber 50 fois sur le marteau. On démonte et remonte le moule en intervertissant la base et la hausse. On répète à nouveau le damage.

On enlève la base.

On place l'éprouvette toujours dans son moule sous un robinet d'eau pendant 5 minutes, afin d'accélérer le refroidissement. (l'éprouvette est couchée et l'eau coule sous le moule.)

Pour démouler, on fait passer l'éprouvette dans la hausse, dont le diamètre est légèrement plus grand que celui du moule proprement dit, en s'aidant du piston extracteur et de la presse.

L'éprouvette, qui doit être manipulée avec soin, est numérotée et laissée pendant une heure au moins à l'air libre afin d'être amenée à la température ambiante. Elle doit avoir une hauteur de 63,5 mm à 5 mm près. Si on utilise des gâchées de 1150 à 1175 g les hauteurs des éprouvettes sont presque toujours dans ces limites.

Si cette tolérance n'est pas respectée, on doit modifier en conséquence le poids de la gâchée à placer dans le moule. Les disques de papier filtres qui restent collés sur les bases ne sont pas retirés.

Pendant ce temps, on passe à la confection des autres éprouvettes. Il est pratique d'avoir 2 dames et 2 moules à confection.

Un jeu peut alors être placé en étuve pendant que l'autre est utilisé. Le bitume et les agrégats sont, bien entendu, laissés en étuve durant les temps morts de confection des éprouvettes. Le nettoyage de la base et de l'intérieur des moules se fait au moyen d'un chiffon imbibé de pétrole.

B.2.5.2. Détermination de la densité apparente

Après refroidissement, on mesure au 1/10 de mm près les dimensions des éprouvettes (au moins 6 hauteurs et 3 diamètres) et on pèse à 5 dg près. Le rapport poids sur volume donne la densité apparente. Dans le cas où la surface est irrégulière, il est recommandé de déterminer la densité apparente par la méthode de la balance hydrostatique (pesées dans l'air et dans l'eau, mais sans paraffinage de l'éprouvette). Cette méthode peut cependant échouer si la surface est trop poreuse.

B.2.5.3. Essai de stabilité et de déformation

Après confection des éprouvettes, celles-ci sont conservées pendant 5 heures ($\pm 1/2$ heure) à la température ambiante puis on les immerge dans le bain thermostatique réglé à $60 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ avec l'appareil d'essai, pour une durée de 30 mn (± 1 mn).

Pendant ce temps, on donne, entre le plateau et l'appui à bille de la presse C.B.R., l'écartement juste nécessaire pour placer l'appareil Marshall. On installe également le dispositif contrôleur de cadence réglé pour une vitesse de 0,846 mm/s. On retire de l'eau l'appareil Marshall.

On lubrifie à la glycérine les tiges de guidage et la mâchoire supérieure devra pouvoir glisser sans heurts sur les tiges de guidages. On enlève cette dernière.

Ces préparatifs préliminaires sont indispensables car le temps écoulé entre l'instant où l'éprouvette est retirée du bain d'eau et celui de la mesure de la stabilité doit être inférieur à 30 secondes.

L'éprouvette retirée de l'eau est placée immédiatement dans la mâchoire inférieure de l'appareil d'essai, couchée et bien centrée. On adapte la mâchoire supérieure et on place le tout sur la presse C.B.R. en veillant à ce que l'appui à bille soit juste en regard de son point d'appui sur la mâchoire (petite concavité). On amène en contact la bille et la mâchoire ; le comparateur de l'anneau dynamométrique permet d'apprécier ce contact.

On règle le comparateur au zéro. On adapte l'indicateur de fluage sur l'une des tiges de guidages, en assurant fermement son contact avec la mâchoire supérieure. On note la division indiquée. Deux opérateurs sont nécessaires pour cette phase de l'essai ; l'un manœuvre la presse à la cadence imposée, l'autre surveille le comparateur de l'anneau dynamométrique tout en maintenant appuyé l'appareil pour la mesure de la déformation.

Quand tout est prêt, on manœuvre le volant de la presse pour suivre la cadence. La rupture se produit au moment où le comparateur de l'anneau dynamométrique indique un maximum. En lisant ce maximum, il faut libérer en même temps, l'appareil de mesure de déformation.

La courbe d'étalonnage de l'anneau dynamométrique permet de convertir le chiffre maximum relevé sur le comparateur en charge exprimée en Kg.

Cette valeur est corrigée, pour tenir compte du volume de l'éprouvette, il suffit de la multiplier par un coefficient de corrélation, celui-ci correspond à la hauteur de l'éprouvette.

Volume de l'éprouvette en cm ³	Hauteur de l'éprouvette en mm	Coefficient de corrélation
471-482	58,74	1,14
483-495	60,32	1,09
496-508	61,91	1,04
509-522	63,50	1,00
523-535	65,08	0,96
536-546	66,67	0,93
547-559	68,26	0,89

La nouvelle valeur obtenue est celle de la stabilité Marshall.

On lit sur l'appareil de mesure de déformation la nouvelle division. La différence entre les deux divisions, en dixièmes de millimètres arrondis à 0, et 5, donne la déformation Marshall.

B.2.5.4. Calcul du pourcentage de vides occupés par le bitume

Pour ce calcul, il faut connaître la densité apparente de l'éprouvette la densité du bitume, la densité de chacun des agrégats, les pourcentages en poids de chacun des constituants rapportés à 100 (liant et filler compris). Ces déterminations, sauf celle de la densité apparente de l'éprouvette, font l'objet des essais préliminaires à l'étude de l'enrobé ou du béton hydrocarboné.

Soit d_m la densité apparente de l'éprouvette ;

D_b la densité du bitume ;

D_a la densité de l'agrégat 1 ;

D_{a2}, D_{a3} etc. celle des agrégats 2,3 etc.

P_b le pourcentage en poids du bitume ;

P_{a1} , P_{a2} , P_{a3} , ceux des agrégats.

Densité vraie de l'éprouvette

$$D_m = \frac{100}{\frac{P_b}{D_b} + \frac{P_{a1}}{D_{a1}} + \frac{P_{a2}}{D_{a2}} + \frac{P_{a3}}{D_{a3}} + \dots}$$

Pourcentage volumétrique des vides résiduels ou vides de l'éprouvette : V_m

$$V_m = 100 \frac{(D_m - d_m)}{D_m}$$

$\frac{d_m}{D_m}$ est le volume vrai des agrégats dans l'éprouvette de volume 1.

Compacité C ou pourcentage volumétrique des pleins

$$C = 100 - V_m$$

Densité apparente de l'agrégat dans l'éprouvette ou densité sèche : d_A

Dans la densité apparente de l'éprouvette, le bitume intervient pour P_b % et l'agrégat pour $(100 - P_b)$ % (en négligeant le poids de l'air des vides).

$$d_A = d_m \left(1 - \frac{P_b}{100} \right)$$

Poids spécifique de l'agrégat : D_A

$$D_A = \frac{\text{Poids del 'agrégat}}{\text{Volumevrai del'agrégat}} = \frac{100 - P_b}{\frac{P_{a1}}{D_{a1}} + \frac{P_{a2}}{D_{a2}} + \frac{P_{a3}}{D_{a3}} + \dots}$$

Pourcentage volumétrique des vides occupés par l'air et par le bitume dans l'éprouvette (vide de l'agrégat) : V_A

$$V_A = 100 \frac{(D_A - d_A)}{D_A}$$

$\frac{d_A}{D_A}$ volume vrai de l'agrégat dans l'unité de volume de l'éprouvette.

Pourcentage de vides comblés par le bitume : R_b

R_b est le pourcentage volumétrique des vides de l'agrégat comblés par le bitume, c'est-à-dire 100 fois le rapport du volume du bitume au volume des vides de l'agrégat dans l'éprouvette.

$$V_b = V_A - V_m$$

V_b étant le volume des vides occupés par le bitume, en fait le volume du bitume lui-même.

$$R_b = 100 \frac{V_b}{V_A} = 100 \frac{V_A - V_m}{V_A}$$

Les valeurs consignées dans le procès verbal sont :

- Déformation en 1/10 (1)
- Stabilité en Kg..... (2)
- Densité apparente de l'éprouvette (3)
(par la détermination des mesures)..... d_m
- Densité vrai de l'éprouvette D_m
- % des vides résiduels V_m
- Compacité de l'éprouvette C
- Densité apparente de l'agrégat dans l'éprouvette
ou densité sèche d_A
- Poids spécifique de l'agrégat D_A
- % des vides occupé par l'air et le bitume dans l'éprouvette V_A
- % des vides comblés par le bitume R_b

B.3. Essai de stabilité Hubbard Field sur mortiers et bétons bitumineux (Méthode du laboratoire central des ponts et chaussées dérivée de la méthode Hubbard-Field)

B.3.1. But de l'essai

Cet essai, qui n'est pas exactement l'essai américain Hubbard Field, a pour but de donner des indications sur la stabilité, c'est-à-dire sur la résistance à la déformation d'un mortier ou d'un béton bitumineux.

B.3.2. Principe de l'essai :

Cet essai consiste à mesurer sous quelle pression une éprouvette de mortier ou de béton bitumineux, dont les dimensions et la confection sont normalisées, peut fluer à travers un orifice calibré.

Suivant le béton bitumineux à examiner, il est utilisé deux appareils différents, dont les indications ne sont pas comparables.

B.3.3. Appareillage pour l'essai de stabilité des mortiers et des bétons bitumineux à éléments fins (bétons contenant des éléments de dimension maximum ne dépassant pas 16mm et ne contenant pas plus de 35% en poids d'éléments retenus au amis de 2mm).

Il faut (figure B.1) :

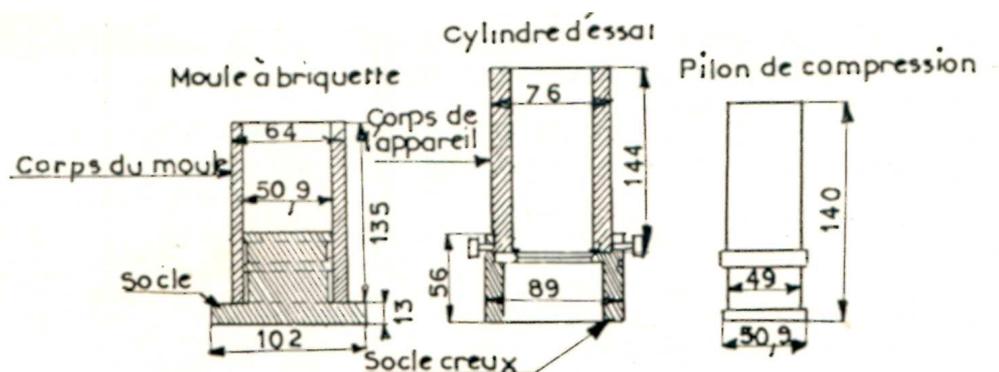


Figure B.1 : Appareils Hubbard Field petit modèle pour l'essai de stabilité des bétons bitumineux préparés à chaud

- Une presse hydraulique pouvant développer un effort de compression de 5t ;
- Un moule cylindrique pour la confection des éprouvettes ;
- Un cylindre d'essai avec pilon de compression et anneau de base ;
- Deux pilons de damage, référence n°1 et n°2.

Pour la confection des mélanges et la conservation des éprouvettes, l'appareillage est le même que celui utilisé pour l'essai de résistance à la déformation par compression simple des bétons bitumineux (Duriez) à savoir :

- L'appareillage qu'on vient de citer ;
- Deux récipients en métal de 1000 cm³ ;
- Un récipient en métal de 500 cm³ ;
- Une spatule ou une cuillère en métal ;
- Une balance sensible u décigramme ;
- Une salle à température constante (18°C) ;
- Une étuve réglée à 140°C ;
- Une étuve réglée à 100°C ;
- Un comparateur à tige et cardan gradué au 1/100 de mm.

B.3.4. Mode opératoire

Connaissant la granulométrie de l'agrégat minéral et la teneur en liant, on pèse dans un récipient de 1000 cm³ les différentes portions granulométriques. Les pesées sont calculées de façon à obtenir 200g d'agrégats.

Dans un autre récipient, on pèse la quantité de liant correspondant à 200g d'agrégats. Le récipient contenant les agrégats est conservé pendant 1 heure dans une étuve chauffée à 140°C. Le récipient contenant le liant est maintenu pendant 1 heure à 100°C dans une

étuve. Au bout de ce temps, les agrégats sont versés dans le récipient contenant le liant et malaxé à l'aide d'un malaxeur, sinon à l'aide d'une spatule ou cuillère métallique.

Les agrégats un fois enrobés, on place 100g du mélange dans le moule préalablement chauffé à 100°C et légèrement graissé (par un mélange d'oléate de soude et de glycérine) .

On dame le mélange de 60 coups énergiques avec le pilon de damage n°1, puis de 15 à 20 coups avec le pilon N°2 ; on introduit ensuite le pilon de compression et l'on place le moule sur le plateau de la presse.

On applique sur le pilon une pression de 210 kg/cm² (soit un effort de 4200kg pour une surface de 20cm² environ) ; cette pression est maintenue pendant 5mn. On revient lentement à l position initiale, l'éprouvette est démoulée, celle-ci exposée pendant 24 heures à 18°C et l'essai de stabilité est effectué de la façon suivante :

On introduit l'éprouvette dans le cylindre d'essai en la plaçant au-dessus de l'anneau d'essai préalablement fixé sur son support.

L'ensemble est placé sur le plateau de la presse, on exerce une pression sur l'éprouvette et on règle la pression à une vitesse de 1,56 mm/s. il se produit d'abord une distorsion de l'éprouvette à travers l'orifice de l'anneau d'essai. La pression enregistrée au manomètre de la presse s'élève rapidement pour atteindre un maximum après lequel elle diminue brusquement lorsque l'éprouvette flue à travers l'orifice.

La valeur maximale de la charge totale appliquée sur l'éprouvette est par définition la valeur de la stabilité. Cette valeur donnée en kilogrammes par centimètre carré pour une température de 18°C. L'essai peut aussi être effectué à la vitesse de déformation de 0,21 mm/s.

Enfin, l'essai est effectué soit à 18°C soit à 60°C en utilisant une vitesse de déformation de 1mm/s.

B.4. Essai de traction indirecte répétée au NAT (Nottingham Asphalt Tester)

B.4.1. Principe de l'essai

Le principe de l'essai de traction indirecte répétée (figure B.2) consiste à soumettre une éprouvette cylindrique de façon répétée à une charge verticale de compression le long d'un diamètre, provoquant ainsi une contrainte de traction le long du diamètre perpendiculaire à la direction du chargement. La déformation transitoire (horizontale) due à cette contrainte est mesurée. Le module élastique est une fonction de la charge de compression et de la déformation de traction. La contrainte de traction (σ_{ti}) et le module élastique (E_{ti}) sont donnés respectivement par les relations suivantes :

$$\sigma_{ii} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot e}$$

$$E_{ii} = \frac{P(v + 0,27)}{\Delta D \cdot e} \text{ avec :}$$

σ_{ii} : contrainte de traction indirecte.

E_{ii} : module d'élasticité de traction indirecte.

P : effort vertical appliqué

D : diamètre de l'éprouvette.

ΔD : variation du diamètre
(déformation horizontale).

e : épaisseur de l'éprouvette.

v : coefficient de Poisson

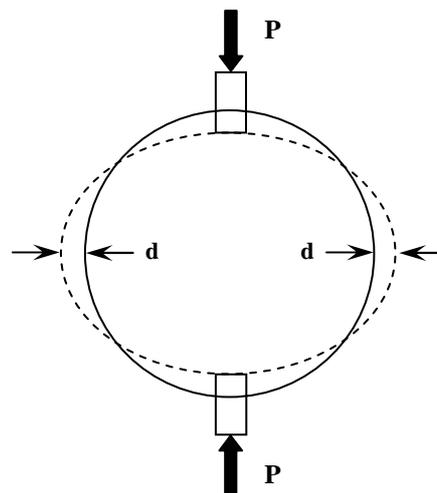


Figure B.2. : Déformation d'une éprouvette Essai de traction indirecte NAT

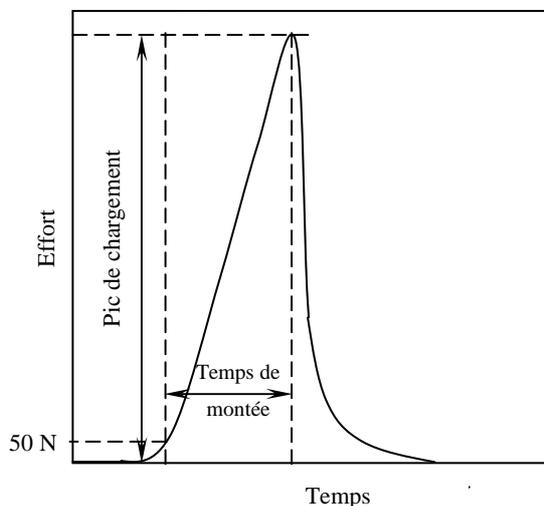


Figure B.3.: Evolution de l'effort de déformation en fonction du temps.

Avant l'essai proprement dit, l'éprouvette est soumise à 5 pulsations de conditionnement, dont le but est la stabilisation des barres de chargement par l'intermédiaire desquelles l'effort est transmis à l'échantillon. Cinq pulsations d'essai (figure B.3.) sont ensuite réalisées à une fréquence imposée avec mesure du module élastique à chaque pulsation. Le module obtenu est la moyenne de ces 5 valeurs. Le coefficient de poisson est estimé et la valeur communément utilisée est 0,35 à 20°C à 0,25 à 10°C.

Matériel utilisé :

La (figure B.4.) montre le dispositif de chargement NAT pour l'essai de traction indirecte.

Le contrôle et l'acquisition de données sont reliés via une interface à un ordinateur. Les dimensions de l'éprouvette (160mm maxi pour le diamètre et 80mm maxi pour l'épaisseur), le niveau de déformation de traction 5 à 10 microns, le temps de montée en

charge 60 à 160 millisecondes ainsi que le coefficient de poisson sont des saisies comme données d'entrée.

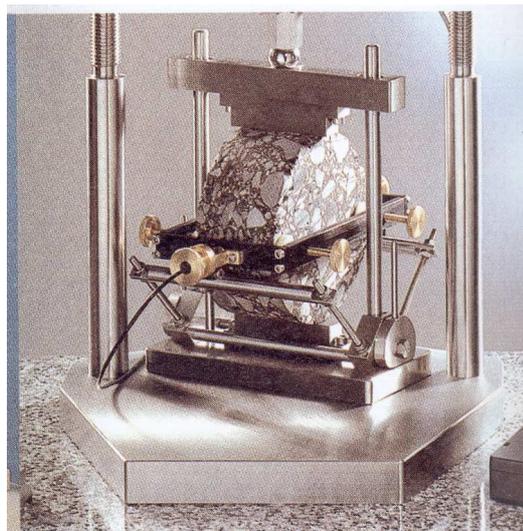
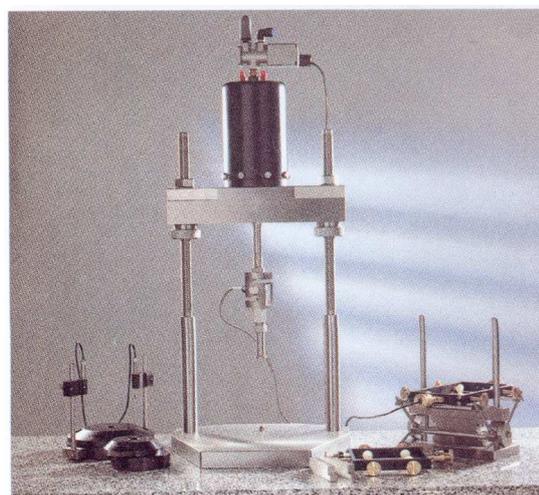


Figure B.4. : Matériel utilisé dans l'essai de traction indirecte répétée au NAT



Les éléments constitutifs du système de montage de l'éprouvette et des capteurs de déformation sont représentés par les figures B.5. et B.6.. L'ordinateur ajuste le régulateur de pression d'air de manière à stocker dans le réservoir une quantité d'air à la pression nécessaire pour la génération des pulsations. L'activation de la valve permet ensuite au vérin d'appliquer l'effort requis à l'échantillon. L'effort est contrôlé par l'ordinateur de telle sorte que toute déviation est corrigée par un ajustement automatique de la pression de régulation réalisant ainsi un système en boucle fermée.

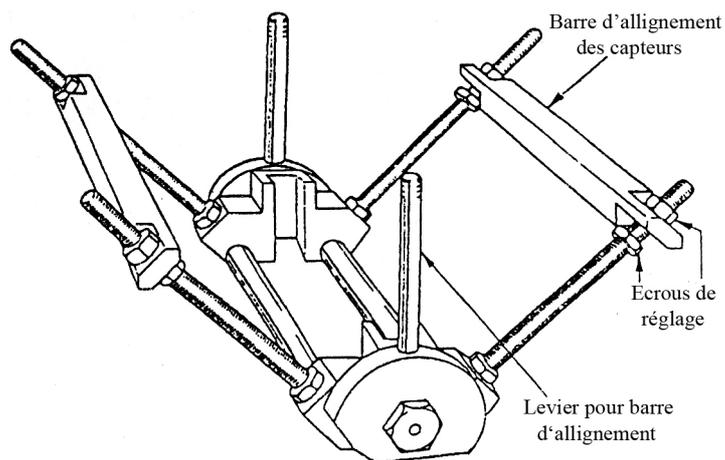


Figure B.5. : Dispositif de montage de l'éprouvette.

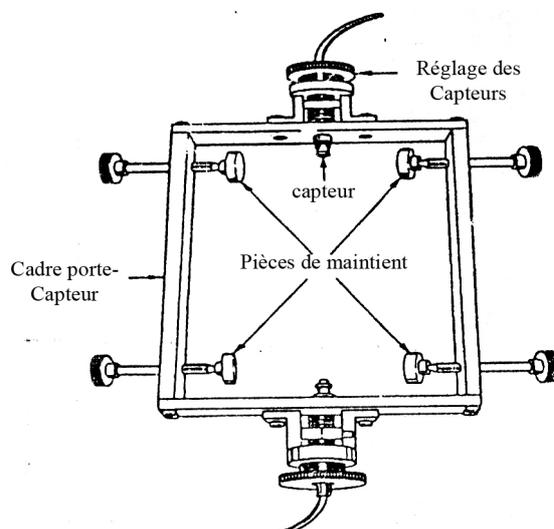


Figure B.6. : Capteurs de déformation.

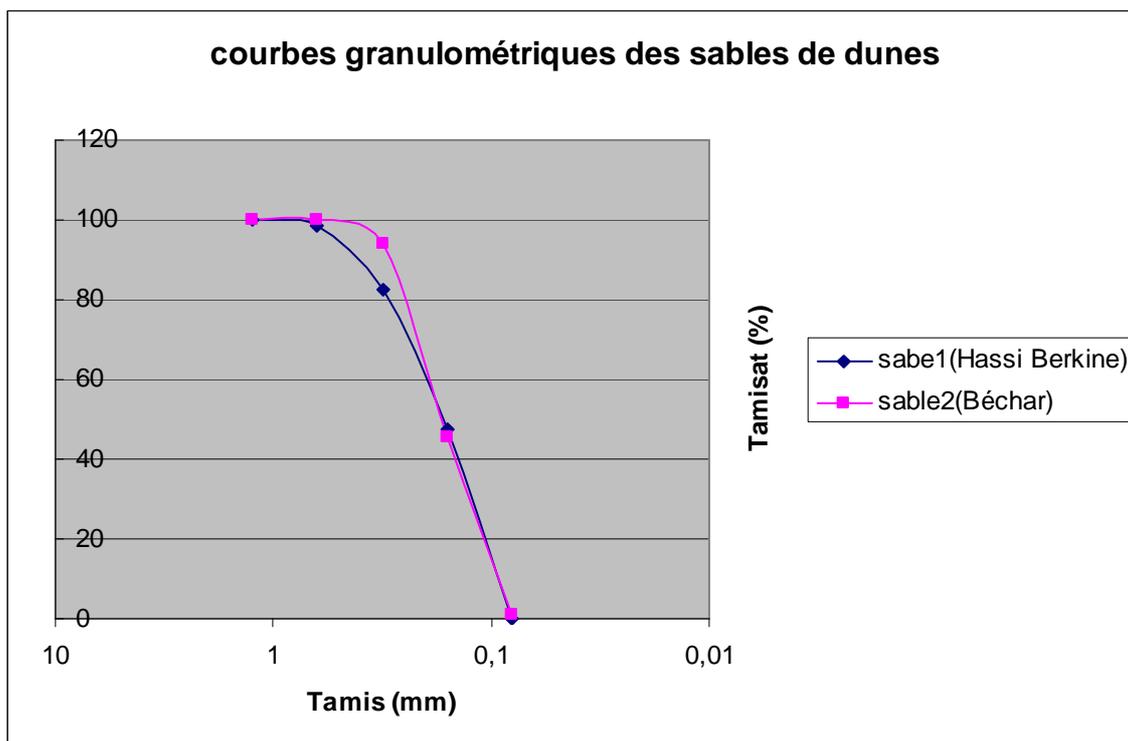


Figure C.1 : Courbes granulométriques des sables de dunes

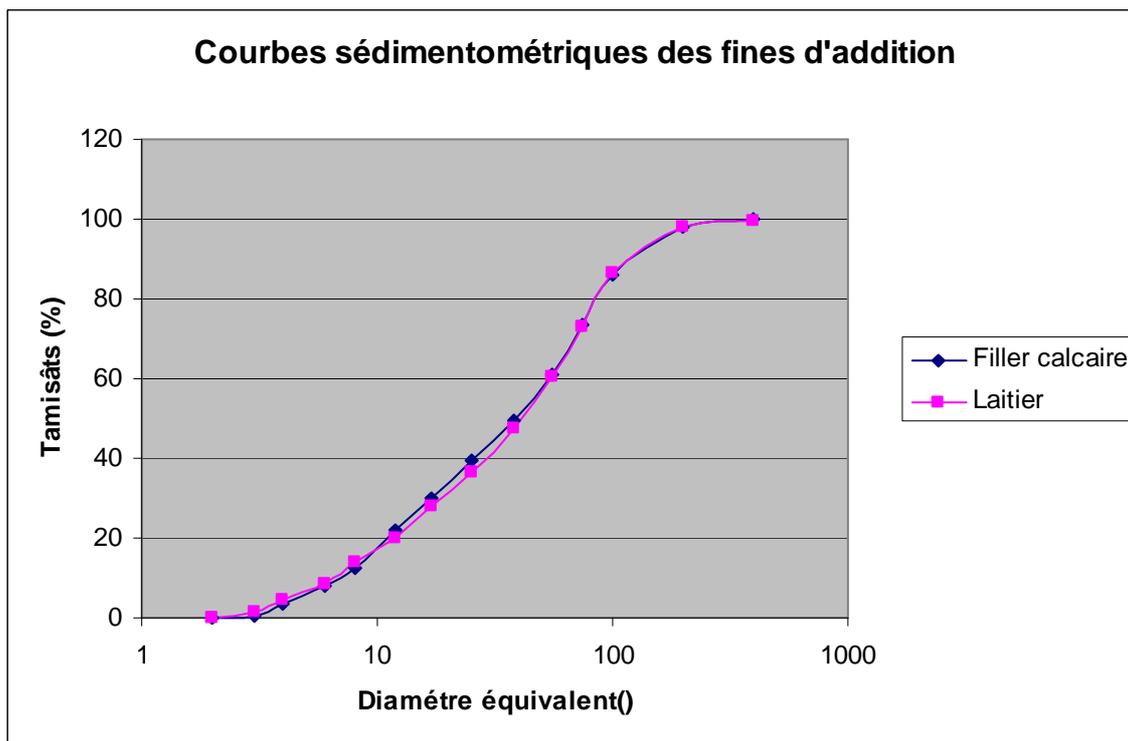


Figure C.2 : Courbes granulométriques des fines d'addition.

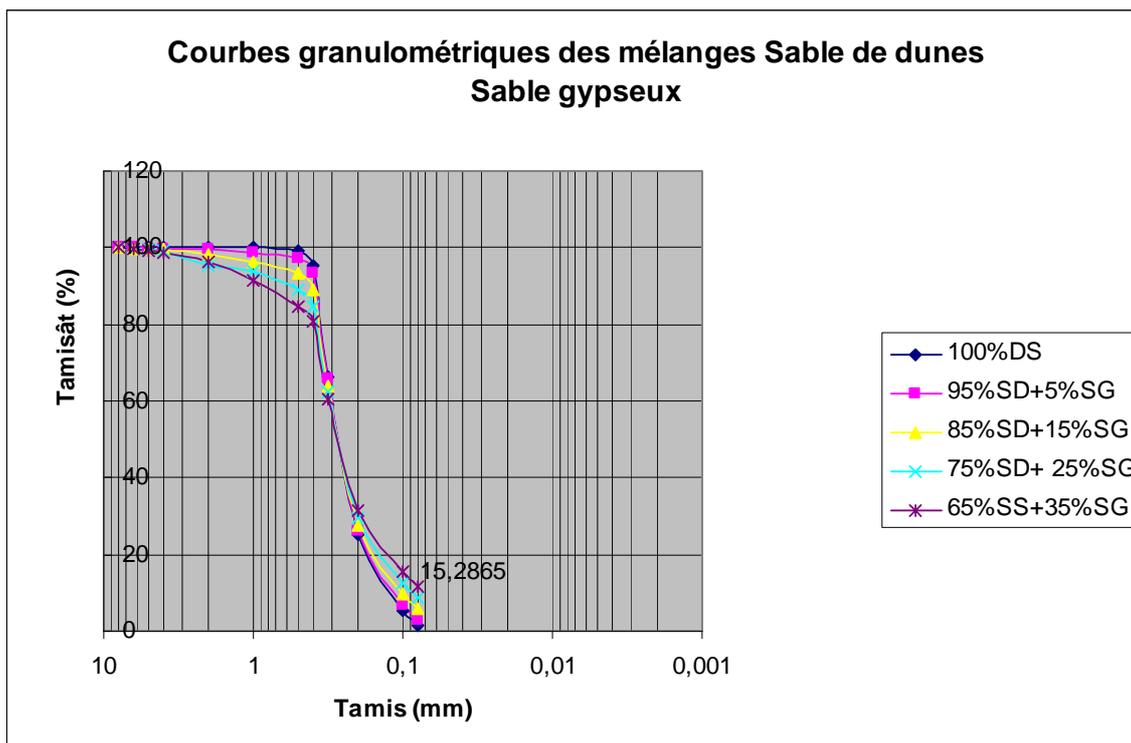


Figure C.3 : Courbes granulométriques des mélanges Sable de dunes Sable gypseux.

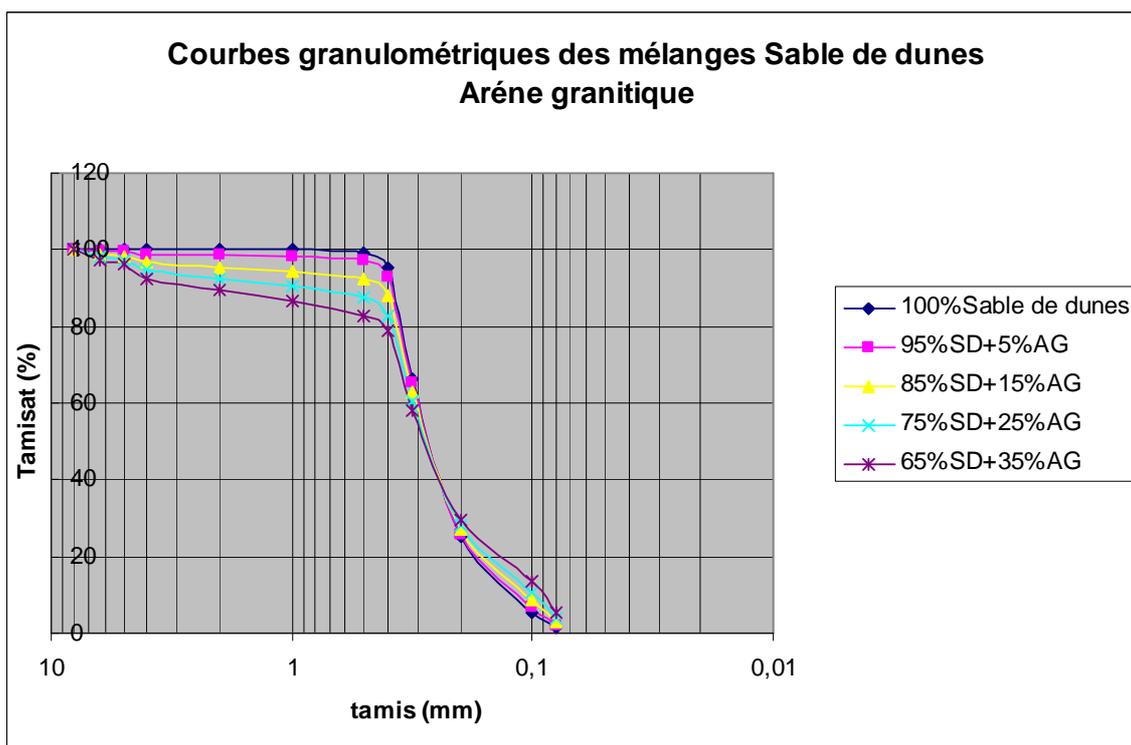


Figure C.4 : Courbes granulométriques des mélanges Sable de dunes Arène granitique.

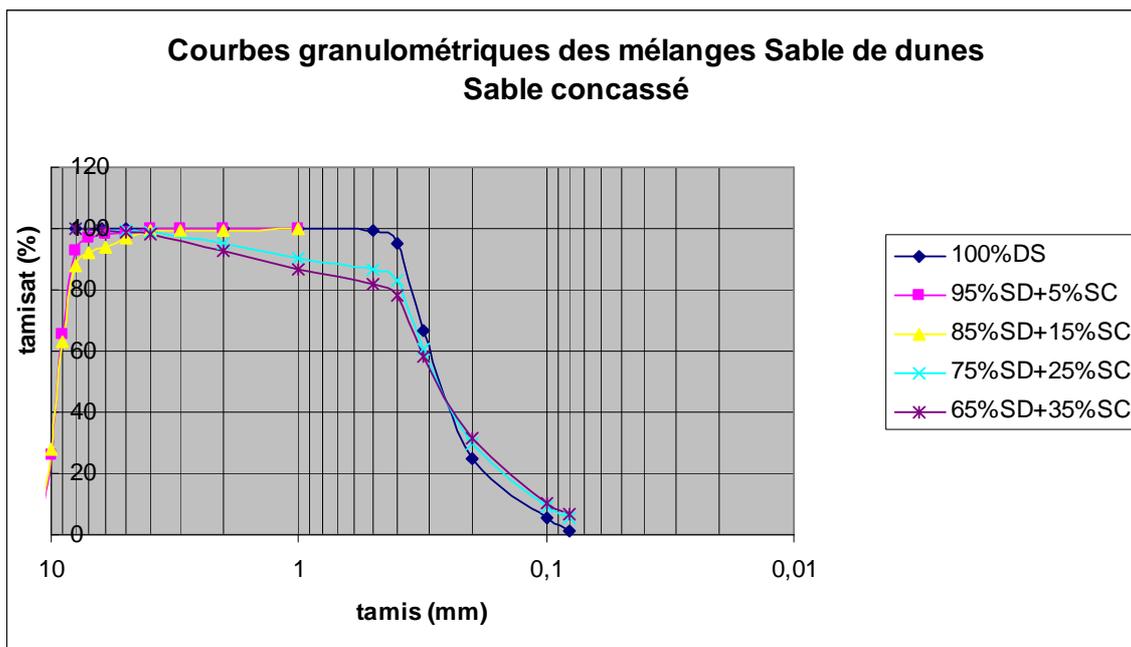


Figure C.5 : Courbes granulométriques des mélanges Sable de dunes Sable de concassage.

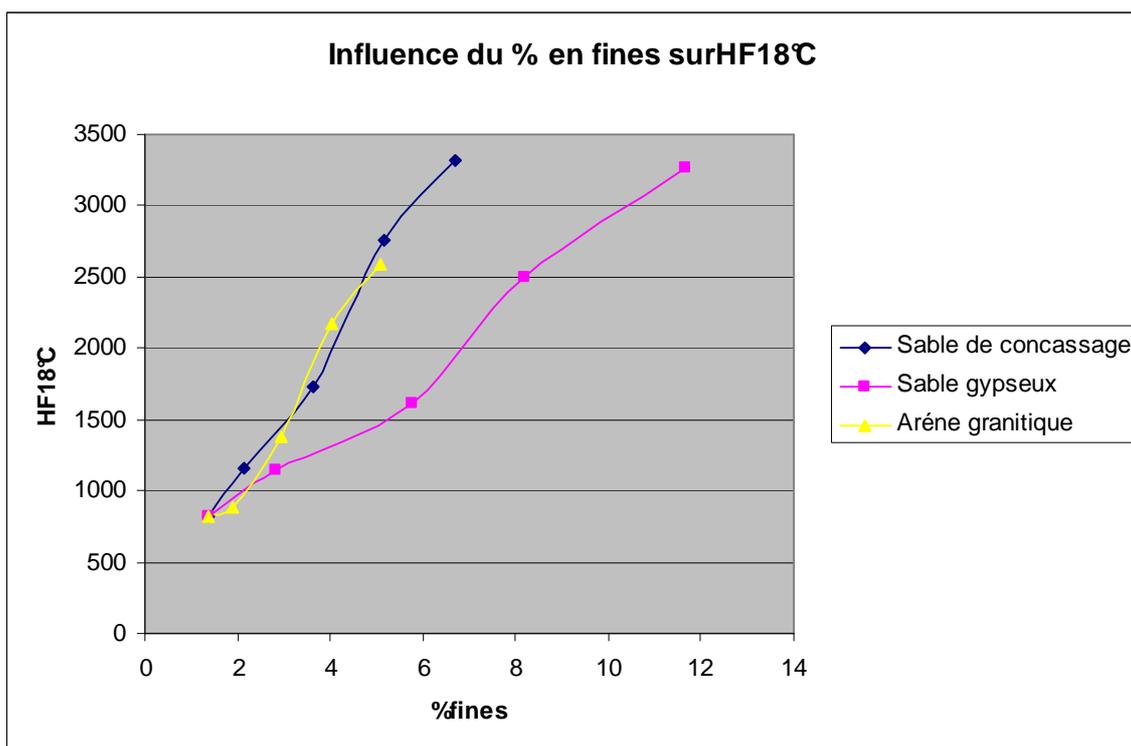


Figure C.6 : Influence de la teneur en fines sur les stabilités Hubbard Field 18°C.

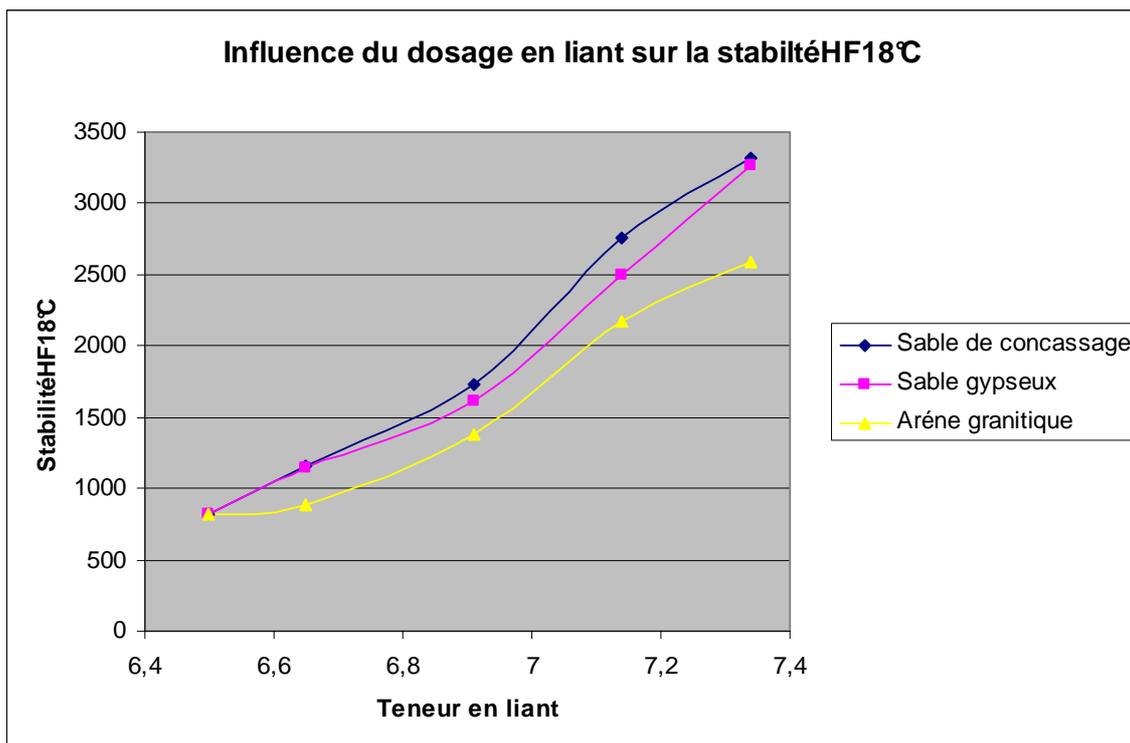


Figure C.7 : Influence du dosage en liant sur les stabilités Hubbard Field 18°C.

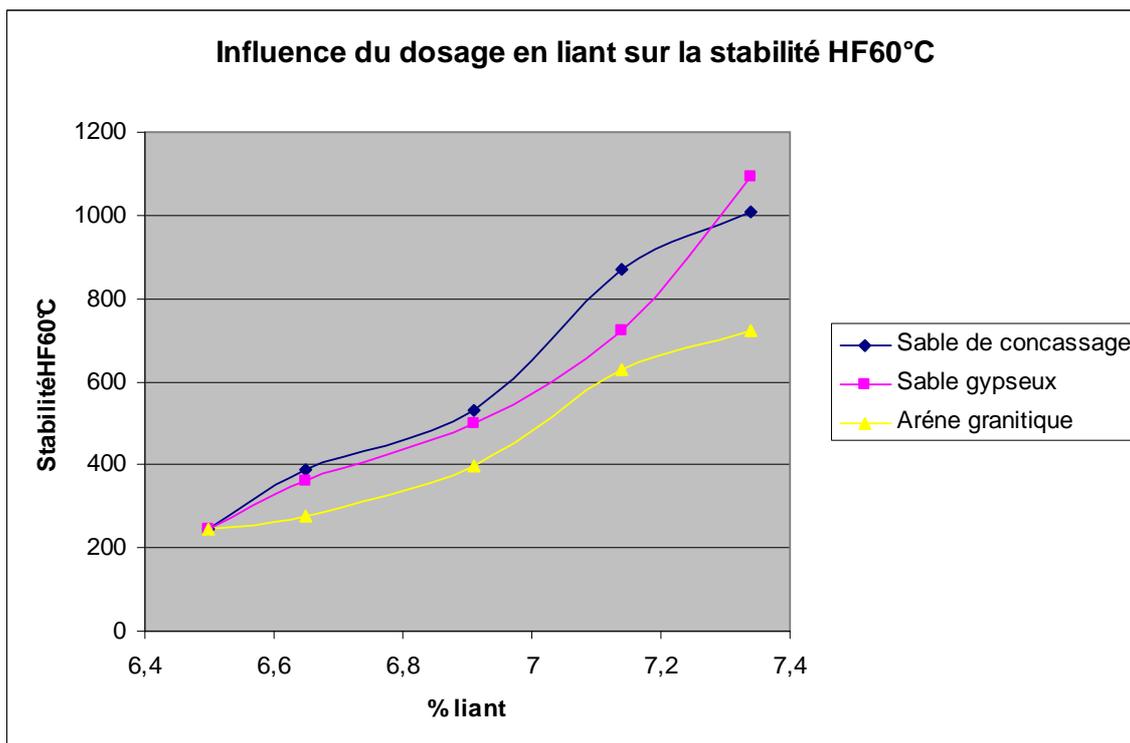


Figure C.8 : Influence du dosage en liant sur les stabilités Hubbard Field 60°C.

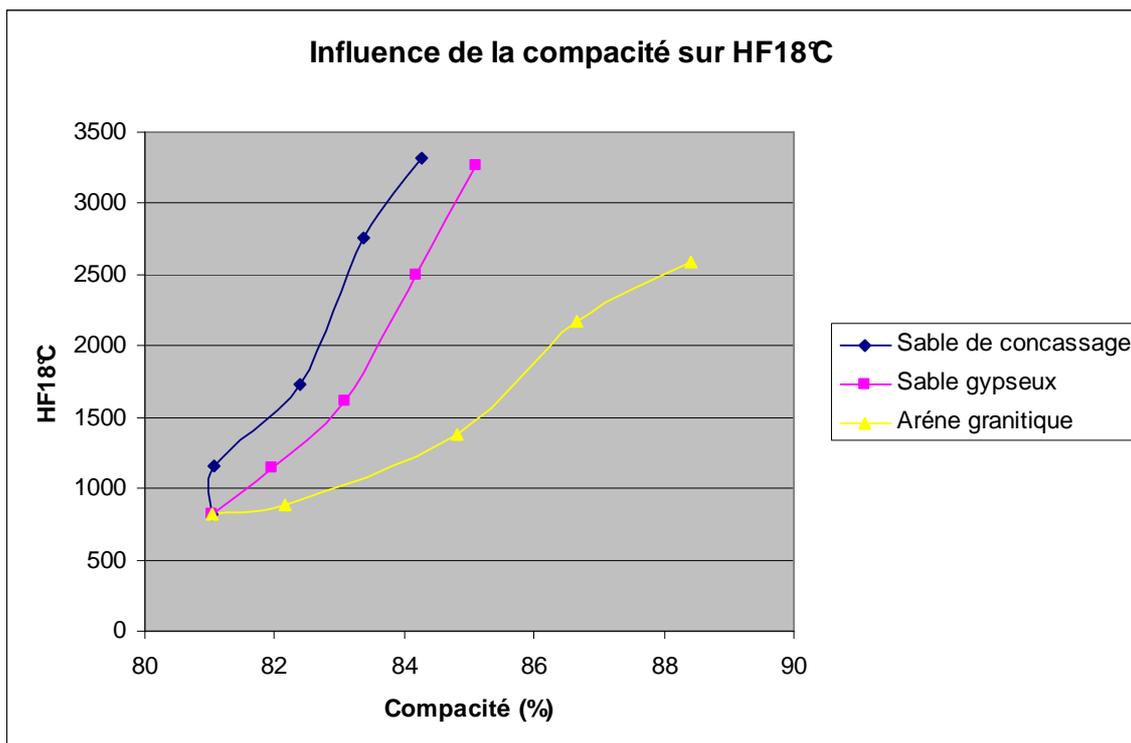


Figure C.9: Influence de la compacité sur les stabilités Hubbard Field 18°C.

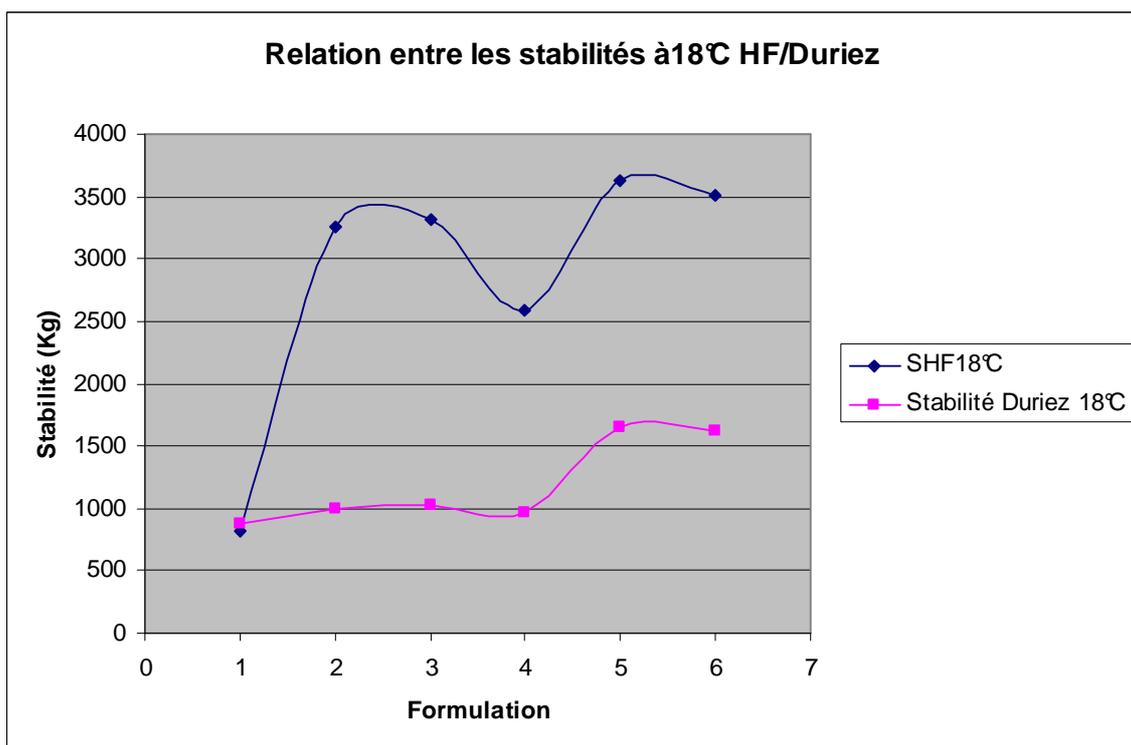


Figure C.10 : Relation entre la stabilité Hubbard Field 18°C et la stabilité Duriez.

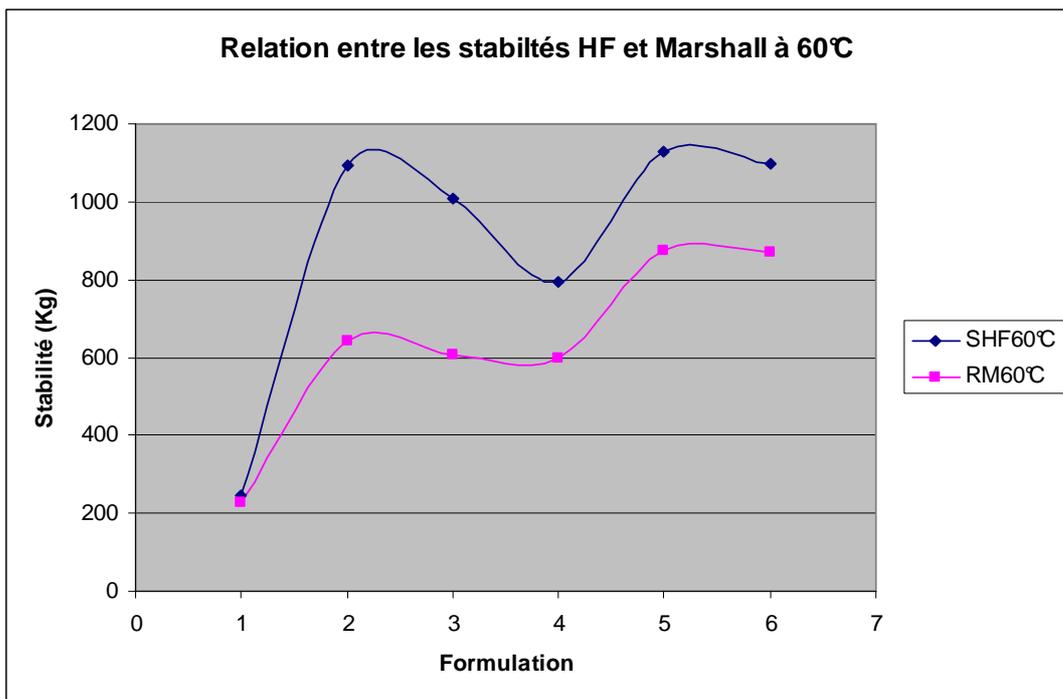


Figure C.11 : Relation entre la stabilité Hubbard Field 60°C et la stabilité Marshall.

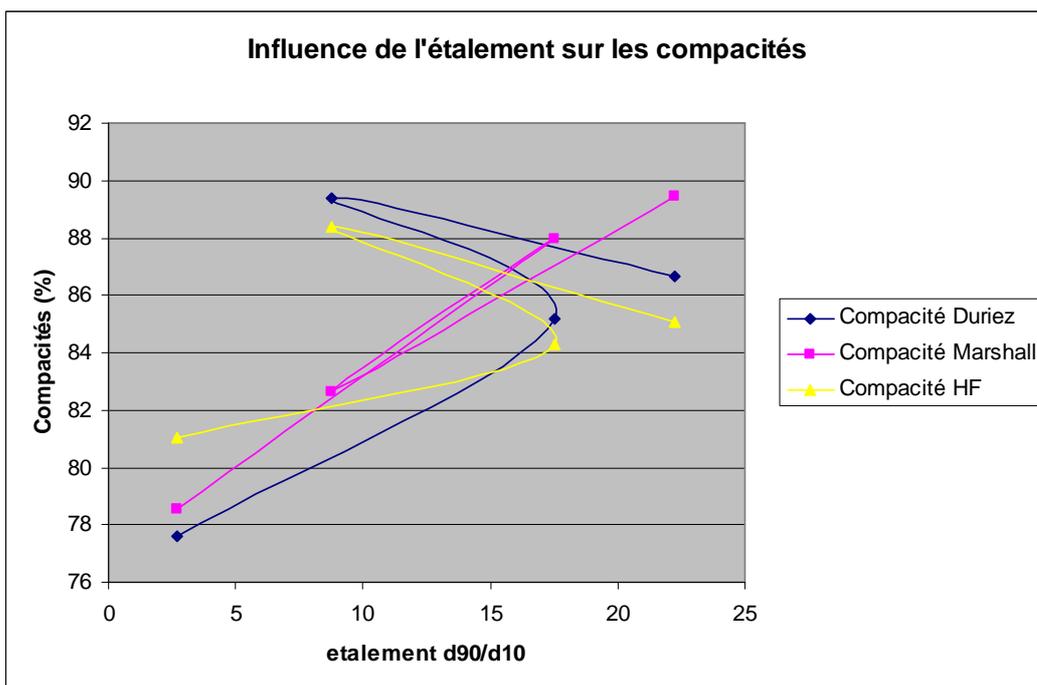


Figure C.12 : Influence de l'étalement D_{90}/D_{10} sur les compacités

I. Bitume 40/50

Tableau D1 : Valeurs performances

Rc	compacité	%liant	% fines
814.49	81.04	6.5	1.36
1163.12	81.08	6.71	2.12
1731.78	82.38	7.05	3.64
2753.32	83.38	7.33	5.16
3319.23	84.27	7.58	6.68
1141.13	82.17	6.86	2.83
1619.84	84.82	7.41	5.77
2493.85	86.66	7.83	8.72
3259.67	88.41	8.17	11.66
881.44	81.97	6.65	1.89
1378.57	83.09	6.91	2.96
2169.82	84.18	7.14	4.02
2588.66	85.09	7.34	5.08

Tableau D2. Statistiques sommaires des variables continues

Libellé de la variable	Effectif	Poids	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Rc	13	13,00	1947,300	840,103	814,490	3319,230
compacité	13	13,00	83,734	2,079	81,040	88,410
%liant	13	13,00	7,191	0,466	6,500	8,170
% fines	13	13,00	4,761	2,826	1,360	11,660

Tableau D3. Matrice des corrélations

	Rc	compacité	%liant	% fines
Rc	1,00			
compacité	0,78	1,00		
%liant	0,88	0,95	1,00	
% fines	0,83	0,95	0,99	1,00

Tableau D4. Matrice des valeurs-tests

	Rc	compacité	%liant	% fines
Rc	99,99			
compacité	3,78	99,99		
%liant	4,99	6,76	99,99	
% fines	4,31	6,77	8,93	99,99

Tableau D5. Tableau des valeurs propres

Trace de la matrice: **4.00000**

Numéro	Valeur propre	Pourcentage	Pourcentage cumulé
1	3,6992	92,48	92,48
2	0,2469	6,17	98,65
3	0,0454	1,14	99,79
4	0,0085	0,21	100,00

Tableau D6. Intervalles laplaciens d'Anderson

Intervalles laplaciens d'Anderson (seuil: 0.95)

Numéro	Borne inférieure	Valeur propre	Borne supérieure
1	0,7392	3,6992	6,6593
2	0,0493	0,2469	0,4444
3	0,0091	0,0454	0,0818
4	0,0017	0,0085	0,0152

Tableau D7. Coordonnées des variables actives

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
Rc	0,91	-0,42	-0,04	0,01
compacité	0,96	0,23	-0,16	0,01
% liant	0,99	0,04	0,06	-0,07
% fines	0,98	0,13	0,13	0,05

Tableau D8. Corrélations des variables actives avec les facteurs

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
Rc	0,91	-0,42	-0,04	0,01
compacité	0,96	0,23	-0,16	0,01
% liant	0,99	0,04	0,06	-0,07
% fines	0,98	0,13	0,13	0,05
(Anciens axes unitaires)				
Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
Rc	0,47	-0,85	-0,19	0,15
compacité	0,50	0,46	-0,73	0,10
% liant	0,52	0,07	0,30	-0,80
% fines	0,51	0,26	0,59	0,57

Tableau D9. Modèle : $V1=V2+V3+V4$

Statistiques sur les 4 variables continues

Libellé de la variable	Effectif	Poids	Moyenne	Ecart-type	Minimum	maximum
Rc	13	13,00	1947,30	840,10	814,49	3319,23
compacité	13	13,00	83,73	2,08	81,04	88,41
% liant	13	13,00	7,19	0,47	6,50	8,17
% fines	13	13,00	4,76	2,83	1,36	11,66

Tableau D10. Estimation des coefficients

Ajustement des moindres carrés (avec terme constant)

13 individus, 4 paramètres (constante en queue).

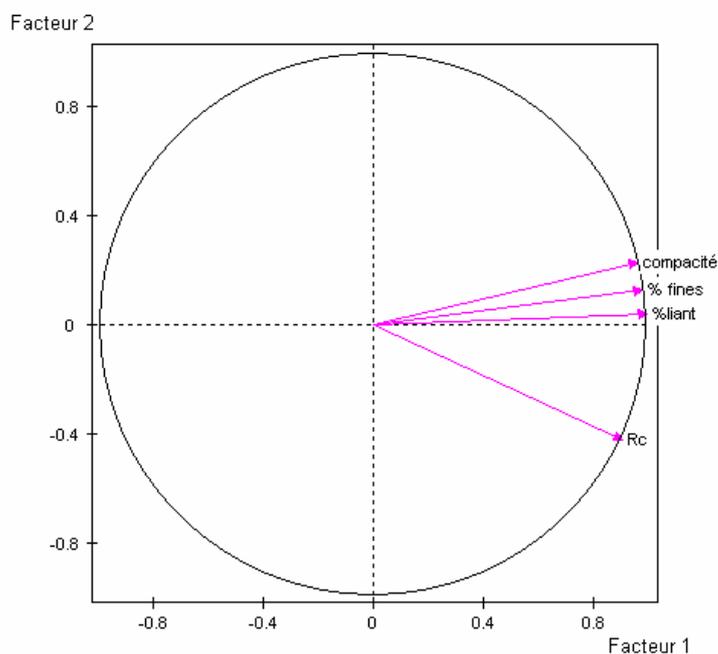
libellé du paramètre	Coefficient	Calculé ou déduit	Ecart-type	Student - NDL (9)	Probabilité	Valeur-Test
V2 - comp	-203,6750	Calculé	181,883	1,120	0,292	-1,05
V3 - % lia	4390,2300	Calculé	1454,160	3,019	0,015	2,44
V4 - % fi	-323,0540	Calculé	240,558	1,343	0,212	-1,25
CONSTANTE	-11029,3000		15151,800	0,728	0,485	-0,70

Tableau D11. Test d'ajustement global

Libellé de la statistique	Valeur
Somme des carrés des écarts (SCE)	1390850,0000
Coefficient de corrélation multiple (R)	0,9211
Coefficient de corrélation multiple (R ²)	0,8484
Variance estimée des résidus (S ²)	154539,0000
Ecart-type estimé des résidus (S)	393,1140
Test de nullité simultanée des coefficients	
Fisher	16,7902
Nb de degrés de liberté au numérateur	3,0000
Nb de degrés de liberté au dénominateur	9,0000
Probabilité critique	0,0005
Valeur-Test	3,2917

Tableau D12. Analyse de la variance (sans effet de répétabilité)

Libellés des sources de variance	Somme des carrés	Fisher	Nb de degrés de liberté au numérateur	Nb de degrés de liberté au dénominateur	Probabilité critique	Valeur-Test
Ecartés résiduels	1390850,000			9		

**Figure D1.** Analyse en composantes principales 1_2

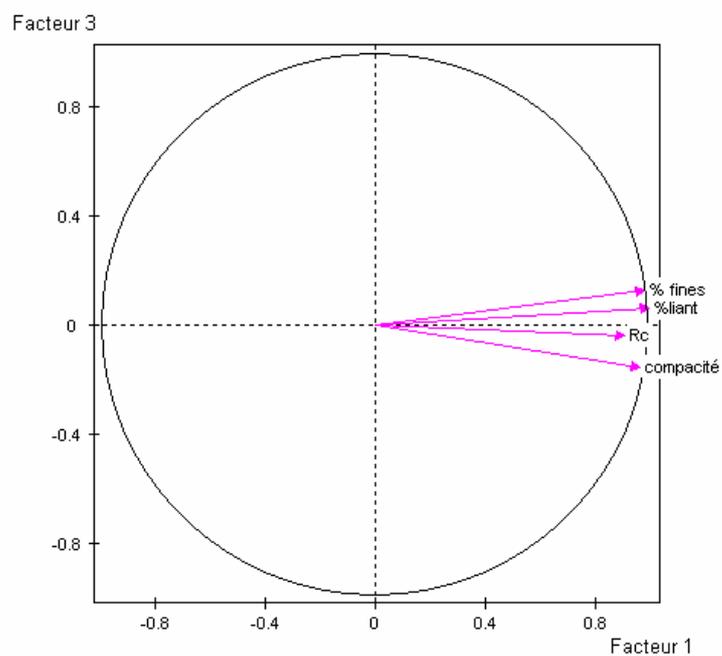


Figure D2. Analyse en composantes principales 1_3

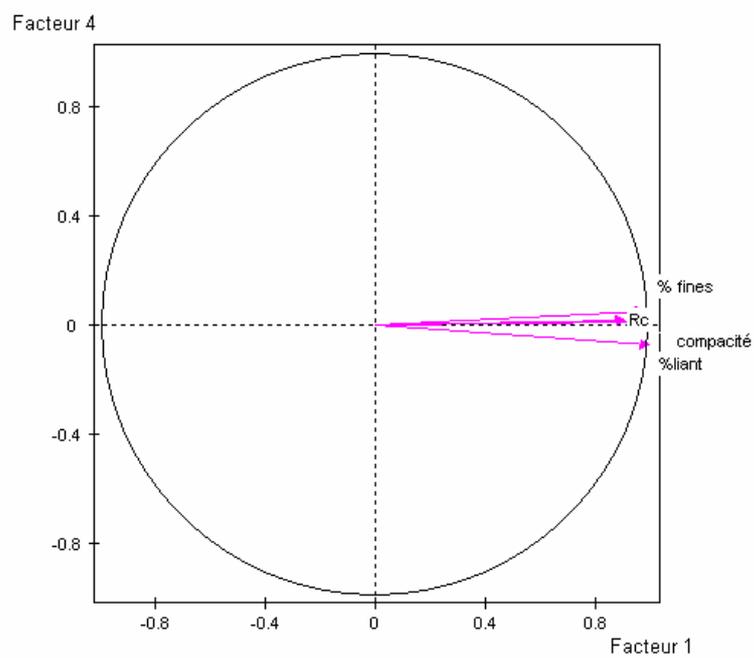


Figure D3. Analyse en composantes principales 1_4

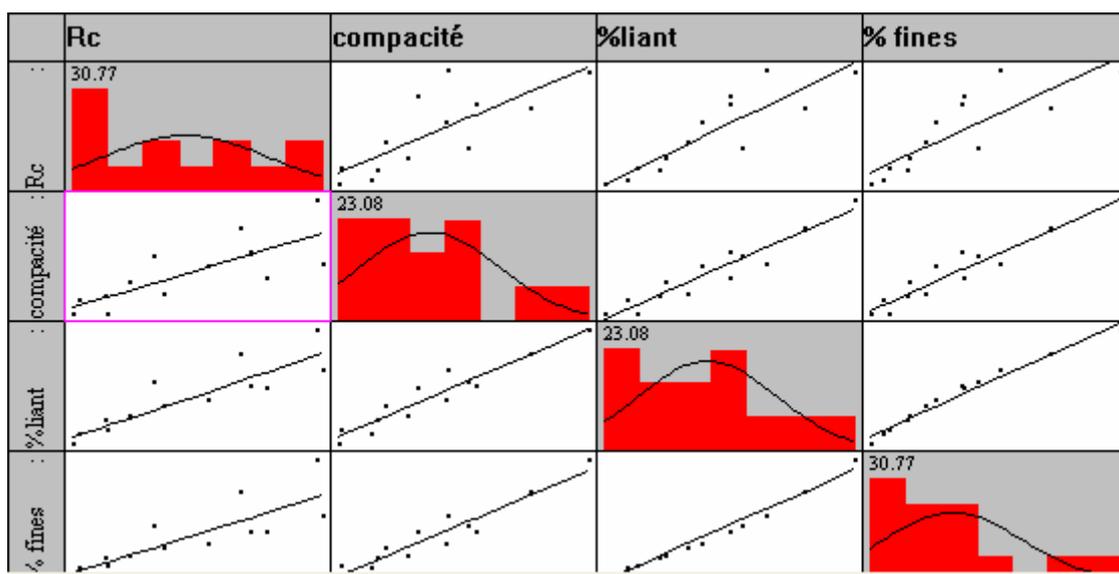


Figure D4. Histogrammes et corrélation entre variables

II. Bitume 80/100

Tableau D13 : Valeurs performances

RC	COMPACITE	%LIANT	%FINES
168.97	81.61	7.34	1.36
238.76	80.63	7.58	2.12
292.84	82.95	7.97	3.64
353.93	84.18	8.28	5.16
499.28	84.84	8.57	6.68
229.38	82.97	7.75	2.83
313.32	85.74	8.37	5.77
496.48	87.80	8.84	8.72
762.74	89.80	9.23	11.66
223.86	81.90	7.52	1.89
243.52	83.75	7.81	2.96
316.28	85.03	8.07	4.02
412.56	86.39	8.29	5.08

Tableau D14. Statistiques sommaires des variables continues

Libellé de la variable	Effectif	Poids	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
RC	13	13,00	350,148	154,601	168,970	762,740
COMPACITE	13	13,00	84,430	2,479	80,630	89,800
%LIANT	13	13,00	8,125	0,525	7,340	9,230
%FINES	13	13,00	4,761	2,826	1,360	11,660

Tableau D15. Matrice des corrélations

	RC	COMPACITE	%LIANT	%FINES
RC	1,00			
COMPACITE	0,88	1,00		
%LIANT	0,94	0,94	1,00	
%FINES	0,97	0,94	0,99	1,00

Tableau D16. Matrice des valeurs-tests

	RC	COMPACITE	%LIANT	%FINES
RC	99,99			
COMPACITE	5,04	99,99		
%LIANT	6,43	6,24	99,99	
%FINES	7,29	6,12	8,90	99,99

Tableau D17. Tableau des valeurs propres

Trace de la matrice: 4.00000

Numéro	Valeur propre	Pourcentage	Pourcentage cumulé
1	3,8286	95,71	95,71
2	0,1183	2,96	98,67
3	0,0422	1,05	99,73
4	0,0109	0,27	100,00

Tableau D18. Intervalles laplaciens d'Anderson

Intervalles laplaciens d'Anderson (seuil: 0.95)

Numéro	Borne inférieure	Valeur propre	Borne supérieure
1	0,7651	3,8286	6,8921
2	0,0236	0,1183	0,2130
3	0,0084	0,0422	0,0759
4	0,0022	0,0109	0,0197

Tableau D19. Coordonnées des variables actives

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
RC	0,97	0,21	-0,12	-0,02
COMPACITE	0,96	-0,27	-0,08	0,00
%LIANT	0,99	0,00	0,13	-0,06
%FINES	0,99	0,05	0,06	0,08

Tableau D20. Corrélations des variables actives avec les facteurs

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
RC	0,97	0,21	-0,12	-0,02
COMPACITE	0,96	-0,27	-0,08	0,00
%LIANT	0,99	0,00	0,13	-0,06
%FINES	0,99	0,05	0,06	0,08

Anciens axes unitaires

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
RC	0,50	0,61	-0,57	-0,22
COMPACITE	0,49	-0,77	-0,40	-0,02
%LIANT	0,51	0,00	0,66	-0,56
%FINES	0,51	0,15	0,29	0,80

Tableau D21. Modèle : $V1=V2+V3+V4$

Statistiques sur les 4 variables continues

Libellé de la variable	Effectif	Poids	Moyenne	Ecart-type	Minimum	maximum
RC	13	13,00	350,15	154,60	168,97	762,74
COMPACITE	13	13,00	84,43	2,48	80,63	89,80
% LIANT	13	13,00	8,12	0,53	7,34	9,23
% FINES	13	13,00	4,76	2,83	1,36	11,66

Tableau D22. Estimation des coefficients

Ajustement des moindres carrés (avec terme constant)

13 individus, 4 paramètres (constante en queue).

libellé du paramètre	Coefficient	Calculé ou déduit	Ecart-type	Student - NDL (9)	Probabilité	Valeur-Test
V2 - COMP	-7,4983	Calculé	15,554	0,482	0,641	-0,47
V3 - %LIA	-49,5266	Calculé	154,443	0,321	0,756	-0,31
V4 - %FIN	68,0629	Calculé	27,816	2,447	0,037	2,09
CONSTANTE	1061,5800		1414,870	0,750	0,472	0,72

Tableau D23. Test d'ajustement global

Libellé de la statistique	Valeur
Somme des carrés des écarts (SCE)	19960,2000
Coefficient de corrélation multiple (R)	0,9673
Coefficient de corrélation multiple (R ²)	0,9358
Variance estimée des résidus (S ²)	2217,8000
Ecart-type estimé des résidus (S)	47,0935
Test de nullité simultanée des coefficients	
Fisher	43,7007
Nb de degrés de liberté au numérateur	3,0000
Nb de degrés de liberté au dénominateur	9,0000
Probabilité critique	0,0000
Valeur-Test	4,2326

Tableau D24. Analyse de la variance (sans effet de répétabilité)

Libellés des sources de variance	Somme des carrés	Fisher	Nb de degrés de liberté au numérateur	Nb de degrés de liberté au dénominateur	Probabilité critique	Valeur-Test
----------------------------------	------------------	--------	---------------------------------------	---	----------------------	-------------

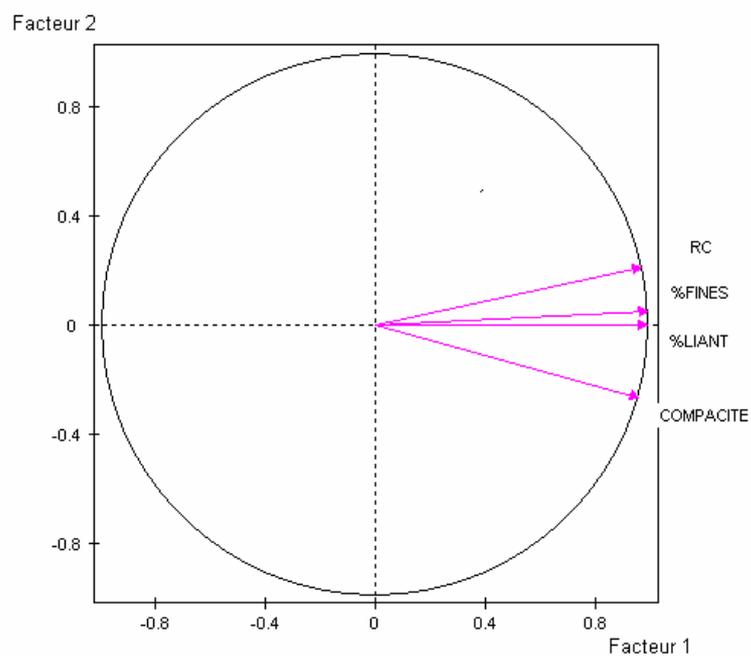


Figure D5. Analyse en composantes principales 1_2

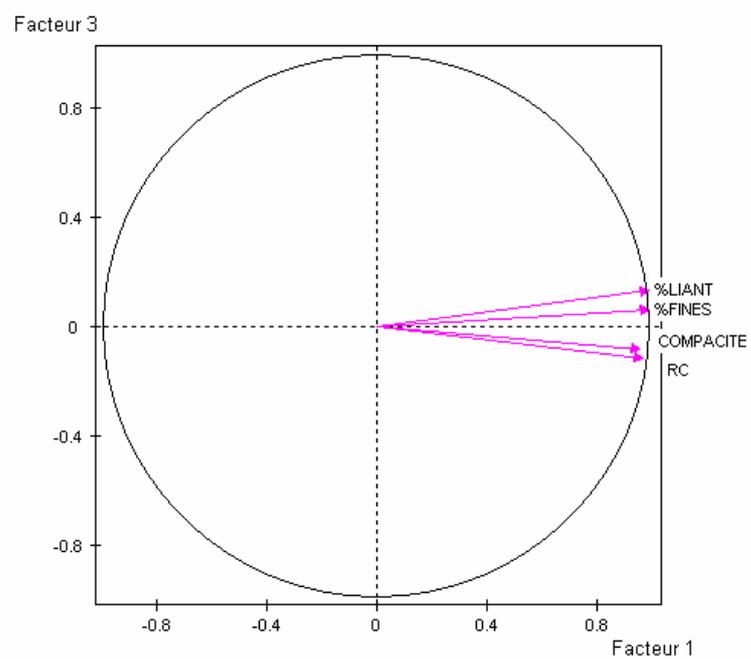


Figure D6. Analyse en composantes principales 1_3

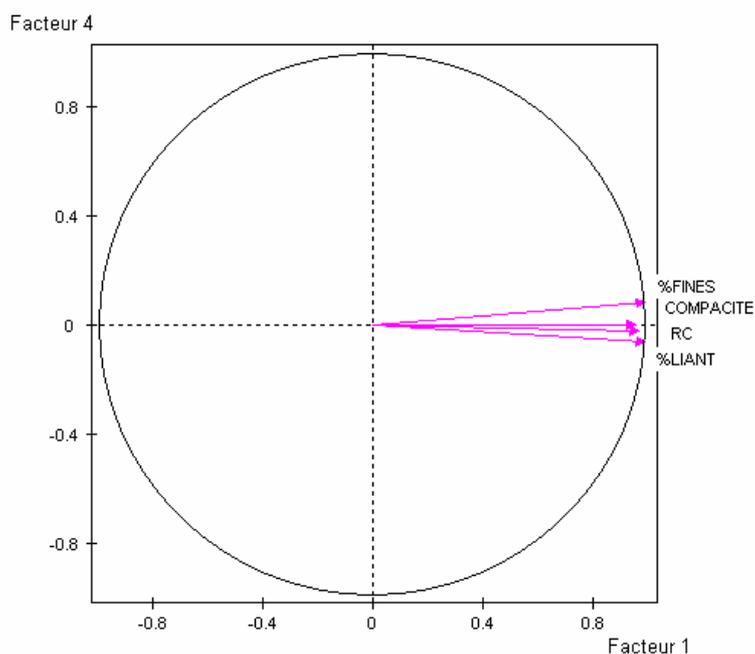


Figure D7. Analyse en composantes principales 1_4

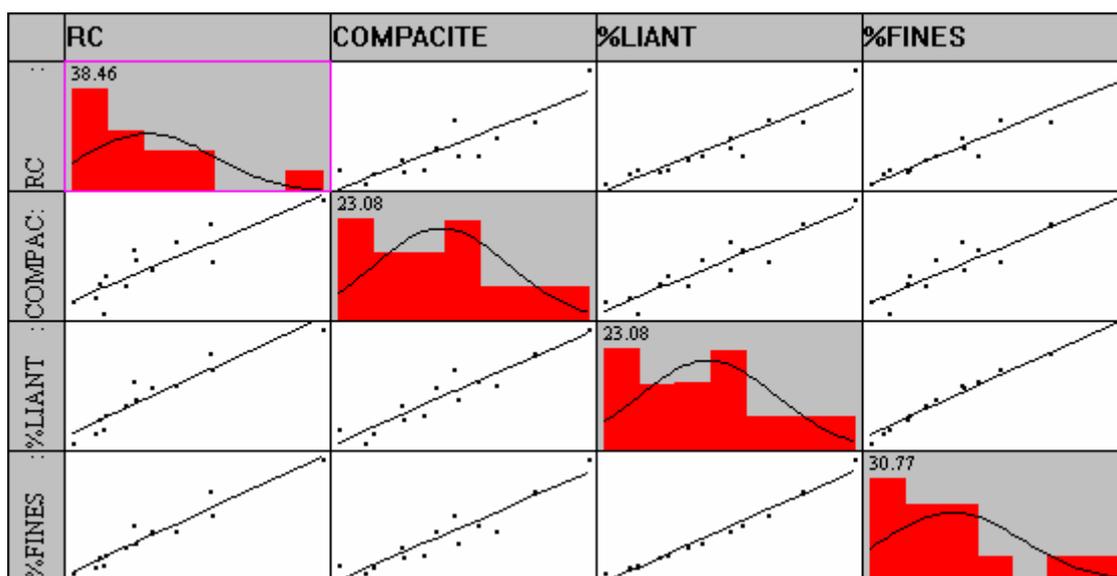


Figure D8. Histogrammes et corrélation entre variables

III. Cut Back 400/600

Tableau D25 : Valeurs performances

Rc	compacité	%liant	% fines
421.83	80.51	6.5	1.36
768.98	81.08	6.71	2.12
998.36	82.28	7.05	3.64
1429.28	83.71	7.33	5.16
1693.68	84.40	7.58	6.68
750.98	82.31	6.86	2.83
1185.44	84.34	7.41	5.77
1867.86	86.60	7.83	8.72

2321.73	88.40	8.17	11.66
593.98	81.26	6.65	1.89
849.46	83.11	6.91	2.96
1243.39	84.31	7.14	4.02
1345.03	85.35	7.34	5.08

Tableau D26. Statistiques sommaires des variables continues

Libellé de la variable	Effectif	Poids	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Rc	13	13,00	1190,000	522,286	421,830	2321,730
compacité	13	13,00	83,666	2,180	80,510	88,400
% liant	13	13,00	7,191	0,466	6,500	8,170
% fines	13	13,00	4,761	2,826	1,360	11,660

Tableau D27. Matrice des corrélations

	Rc	compacité	% liant	% fines
Rc	1,00			
compacité	0,95	1,00		
% liant	0,98	0,96	1,00	
% fines	0,97	0,95	0,99	1,00

Tableau D28. Matrice des valeurs-tests

	Rc	compacité	% liant	% fines
Rc	99,99			
compacité	6,50	99,99		
% liant	8,75	7,10	99,99	
% fines	7,75	6,61	8,93	99,99

Tableau D29. Tableau des valeurs propres

Trace de la matrice: 4.00000

Numéro	Valeur propre	Pourcentage	Pourcentage cumulé
1	3,9015	97,54	97,54
2	0,0619	1,55	99,09
3	0,0268	0,67	99,75
4	0,0098	0,25	100,00

Tableau D30. Intervalles laplaciens d'Anderson

Intervalles laplaciens d'Anderson (seuil: 0.95)

Numéro	Borne inférieure	Valeur propre	Borne supérieure
1	0,7797	3,9015	7,0234
2	0,0124	0,0619	0,1114
3	0,0053	0,0268	0,0482
4	0,0020	0,0098	0,0177

Tableau D31. Coordonnées des variables actives

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
Rc	0,99	-0,09	-0,11	0,03
compacité	0,98	0,21	-0,01	0,01
% liant	1,00	-0,04	0,01	-0,08
% fines	0,99	-0,07	0,12	0,04

Tableau D32. Corrélations des variables actives avec les facteurs

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
Rc	0,99	-0,09	-0,11	0,03
compacité	0,98	0,21	-0,01	0,01
% liant	1,00	-0,04	0,01	-0,08
% fines	0,99	-0,07	0,12	0,04

Anciens axes unitaires

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
Rc	0,50	-0,37	-0,70	0,34
compacité	0,49	0,86	-0,05	0,11
% liant	0,50	-0,18	0,04	-0,84
% fines	0,50	-0,30	0,71	0,40

Tableau D33. Modèle : $V1=V2+V3+V4$ **Statistiques sur les 4 variables continues**

Libellé de la variable	Effectif	Poids	Moyenne	Ecart-type	Minimum	maximum
Rc	13	13,00	1190,00	522,29	421,83	2321,73
compacité	13	13,00	83,67	2,18	80,51	88,40
% liant	13	13,00	7,19	0,47	6,50	8,17
% fines	13	13,00	4,76	2,83	1,36	11,66

Tableau D34. Estimation des coefficients**Ajustement des moindres carrés (avec terme constant)****13 individus, 4 paramètres (constante en queue).**

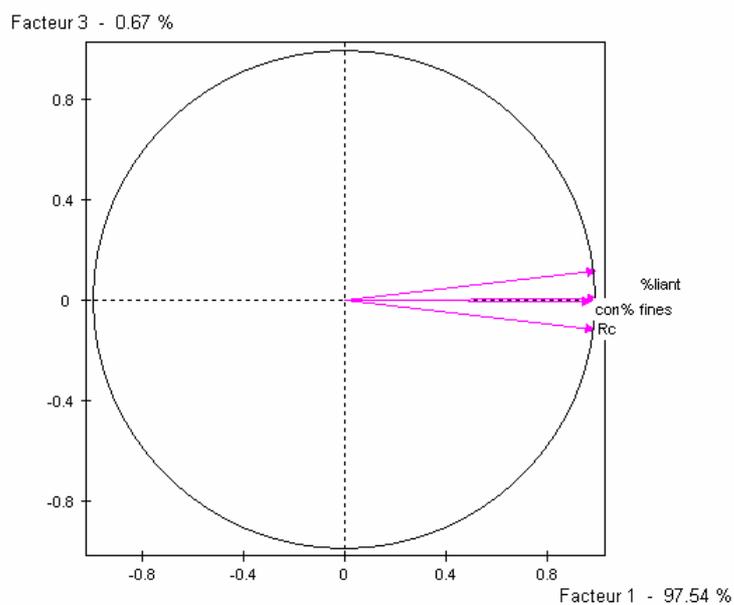
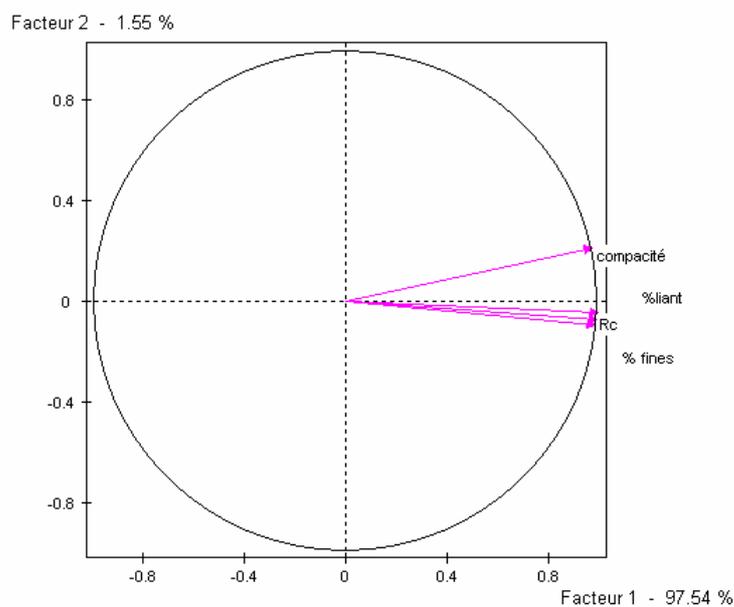
libellé du paramètre	Coefficient	Calculé ou déduit	Ecart-type	Student - NDL (9)	Probabilité	Valeur-Test
V2 - comp	-0,0320	Calculé	50,939	0,001	1,000	0,00
V3 - % lia	1008,3300	Calculé	445,325	2,264	0,050	1,96
V4 - % fi	16,0227	Calculé	64,543	0,248	0,810	0,24
CONSTANTE	-6134,3100		3700,980	1,657	0,132	-1,51

Tableau D35. Test d'ajustement global

Libellé de la statistique	Valeur
Somme des carrés des écarts (SCE)	108048,0000
Coefficient de corrélation multiple (R)	0,9846
Coefficient de corrélation multiple (R2)	0,9695
Variance estimée des résidus (S2)	12005,3000
Ecart-type estimé des résidus (S)	109,5690
Test de nullité simultanée des coefficients	
Fisher	95,4613
Nb de degrés de liberté au numérateur	3,0000
Nb de degrés de liberté au dénominateur	9,0000
Probabilité critique	0,0000
Valeur-Test	4,9150

Tableau D36. Analyse de la variance (sans effet de répétabilité)

Libellés des sources de variance	Somme des carrés	Fisher	Nb de degrés de liberté au numérateur	Nb de degrés de liberté au dénominateur	Probabilité critique	Valeur-Test
Ecartés résiduels	108048,000			9		

**Figure D9.** Analyse en composantes principales 1_3**Figure D10.** Analyse en composantes principales 1_2

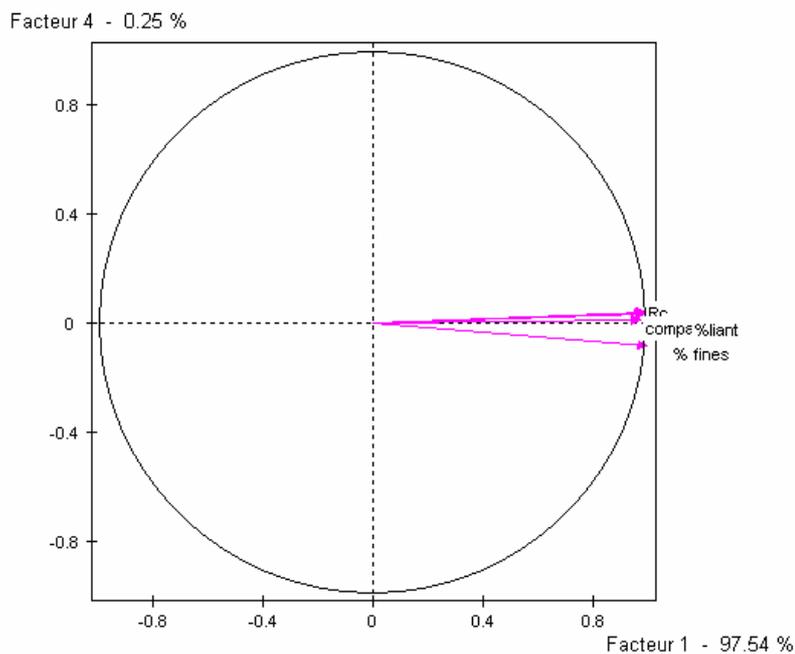


Figure D11. Analyse en composantes principales 1_4

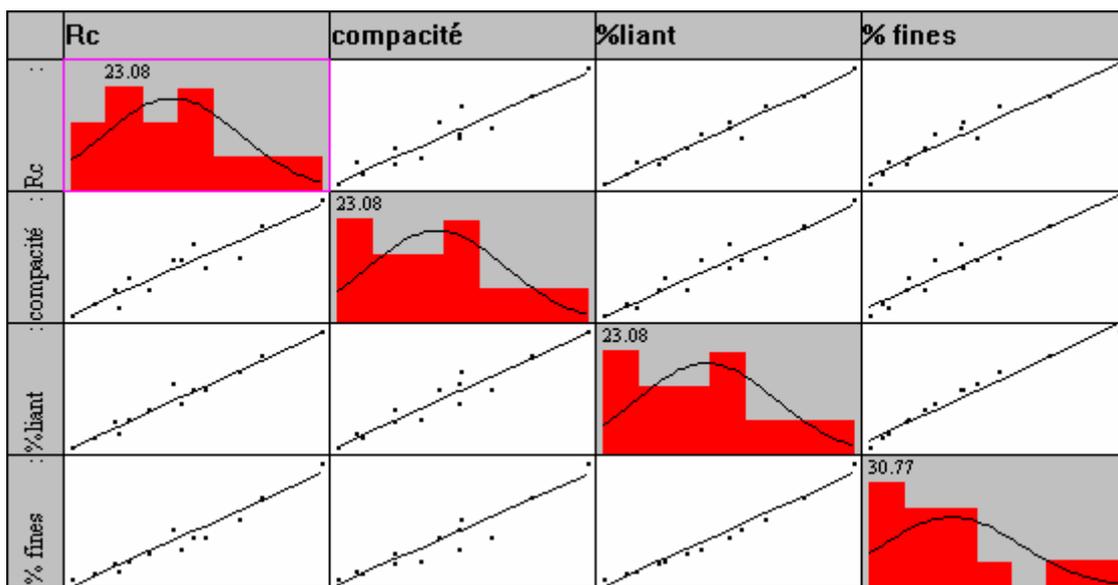


Figure D12. Histogrammes et corrélation entre variables

IV. Emulsion 60

Tableau D37. Valeurs performances

RC	C	%liant	% fines
161.36	81.2	10.74	1.36
253.23	82.38	11.07	2.12
321.16	83.36	11.65	3.64
372.44	85.04	12.12	5.16
537.87	85.59	12.53	6.68
236.35	82.73	11.34	2.83
385.82	85.74	12.25	5.77

663.4	88.3	12.94	8.72
1059.67	90.03	13.51	11.66
216.58	82.45	11.89	
239.63	83.84	11.43	2.96
321.14	84.89	11.8	4.02
456.52	86.11	12.13	5.08

Tableau D38. Statistiques sommaires des variables continues

Libellé de la variable	Effectif	Poids	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
RC	13	13,00	401,936	232,830	161,360	1059,670
C	13	13,00	84,743	2,393	81,200	90,030
%liant	12	12,00	11,959	0,758	10,740	13,510
%fines	13	13,00	4,761	2,826	1,360	11,660

Tableau D39. Matrice des corrélations

	RC	C	%liant	%fines
RC	1,00			
C	0,94	1,00		
%liant	0,91	0,94	1,00	
%fines	0,97	0,97	0,94	1,00

Tableau D40. Matrice des valeurs-tests

	RC	C	%liant	%fines
RC	99,99			
C	6,15	99,99		
%liant	5,29	6,01	99,99	
%fines	7,79	7,76	6,08	99,99

Tableau D41. Tableau des valeurs propresTrace de la matrice: **4.00000**

Numéro	Valeur propre	Pourcentage	Pourcentage cumulé
1	3,8378	95,94	95,94
2	0,0954	2,38	98,33
3	0,0533	1,33	99,66
4	0,0136	0,34	100,00

Tableau D42. Intervalles laplaciens

Intervalles laplaciens d'Anderson (seuil: 0.95)

Numéro	Borne inférieure	Valeur propre	Borne supérieure
1	0,7669	3,8378	6,9086
2	0,0191	0,0954	0,1717
3	0,0106	0,0533	0,0959
4	0,0027	0,0136	0,0245

Tableau D43. Coordonnées des variables actives

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
RC	0,98	0,19	-0,10	-0,05
C	0,98	-0,03	0,18	-0,04
%liant	0,97	-0,23	-0,10	-0,01

% fines	0,99	0,07	0,02	0,10
---------	------	------	------	------

Tableau D44. Corrélations des variables actives avec les facteurs

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
RC	0,98	0,19	-0,10	-0,05
C	0,98	-0,03	0,18	-0,04
% liant	0,97	-0,23	-0,10	-0,01
% fines	0,99	0,07	0,02	0,10

Anciens axes unitaires

Libellé de la variable	Axe 1	Axe 2	Axe 3	Axe 4
RC	0,50	0,62	-0,45	-0,41
C	0,50	-0,10	0,77	-0,38
% liant	0,49	-0,75	-0,44	-0,05
% fines	0,51	0,22	0,10	0,83

Tableau D45. Modèle : $V1=V2+V3+V4$ **Statistiques sur les 4 variables continues**

Libellé de la variable	Effectif	Poids	Moyenne	Ecart-type	Minimum	maximum
RC	12	12,00	417,38	235,85	161,36	1059,67
C	12	12,00	84,93	2,39	81,20	90,03
% liant	12	12,00	11,96	0,76	10,74	13,51
% fines	12	12,00	5,00	2,81	1,36	11,66

Tableau D46. Estimation des coefficients**Ajustement des moindres carrés (avec terme constant)**

12 individus, 4 paramètres (constante en queue).

libellé du paramètre	Coefficient	Calculé ou déduit	Ecart-type	Student - NDL (8)	Probabilité	Valeur-Test
V2 - C	11,0531	Calculé	29,124	0,380	0,714	0,37
V3 - % lia	-290,4800	Calculé	128,520	2,260	0,054	-1,93
V4 - % fin	149,7340	Calculé	30,395	4,926	0,001	3,25
CONSTANTE	2203,8300		2022,940	1,089	0,308	1,02

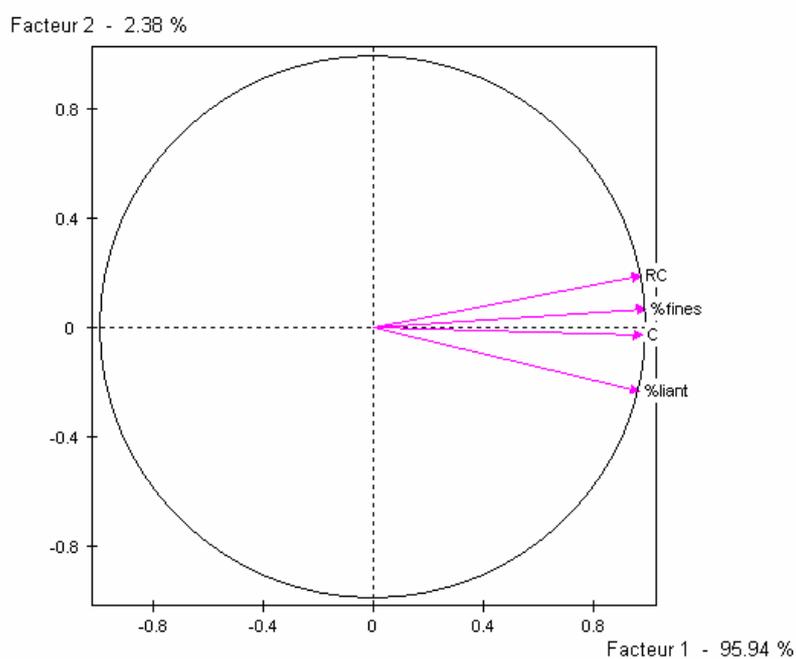
Tableau D47. Test d'ajustement global

Libellé de la statistique	Valeur
Somme des carrés des écarts (SCE)	19512,0000
Coefficient de corrélation multiple (R)	0,9853
Coefficient de corrélation multiple (R2)	0,9708
Variance estimée des résidus (S2)	2439,0000
Ecart-type estimé des résidus (S)	49,3862
Test de nullité simultanée des coefficients	
Fisher	88,5601
Nb de degrés de liberté au numérateur	3,0000
Nb de degrés de liberté au dénominateur	8,0000
Probabilité critique	0,0000

Valeur-Test	4,6064
-------------	--------

Tableau D47. Analyse de la variance (sans effet de répétabilité)

Libellés des sources de variance	Somme des carrés	Fisher	Nb de degrés de liberté au numérateur	Nb de degrés de liberté au dénominateur	Probabilité critique	Valeur-Test
Écarts résiduels	19512,000			8		

**Figure D13.** Analyse en composantes principales 1_2

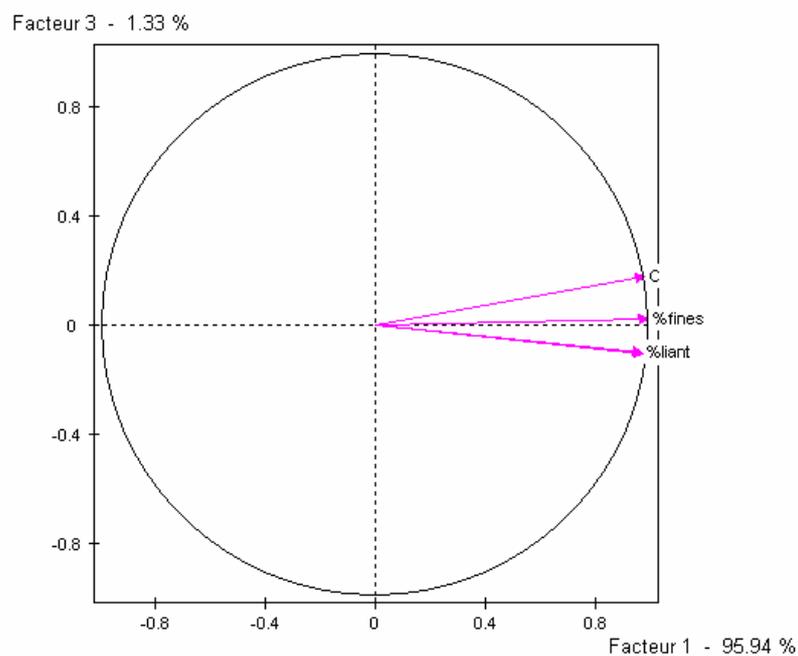


Figure D14. Analyse en composantes principales 1_3

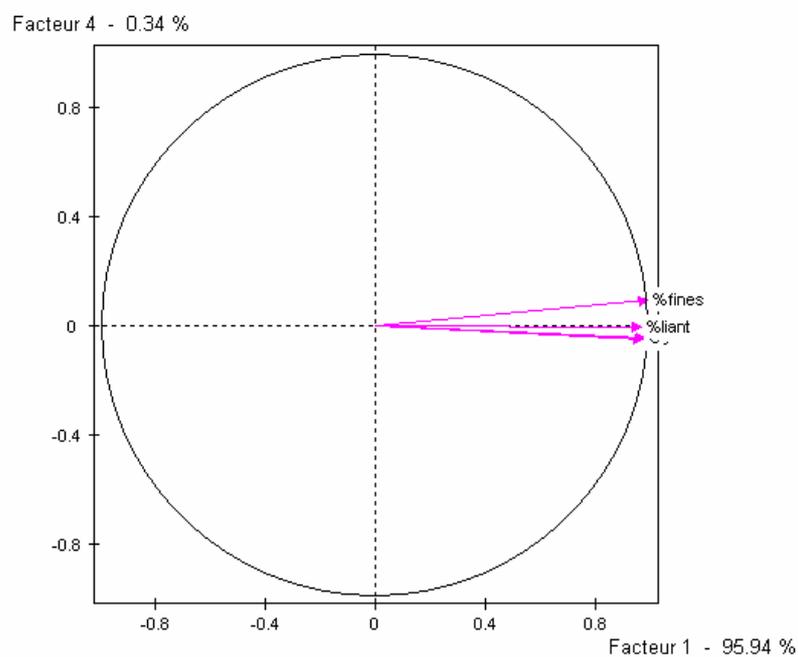


Figure D15. Analyse en composantes principales 1_4

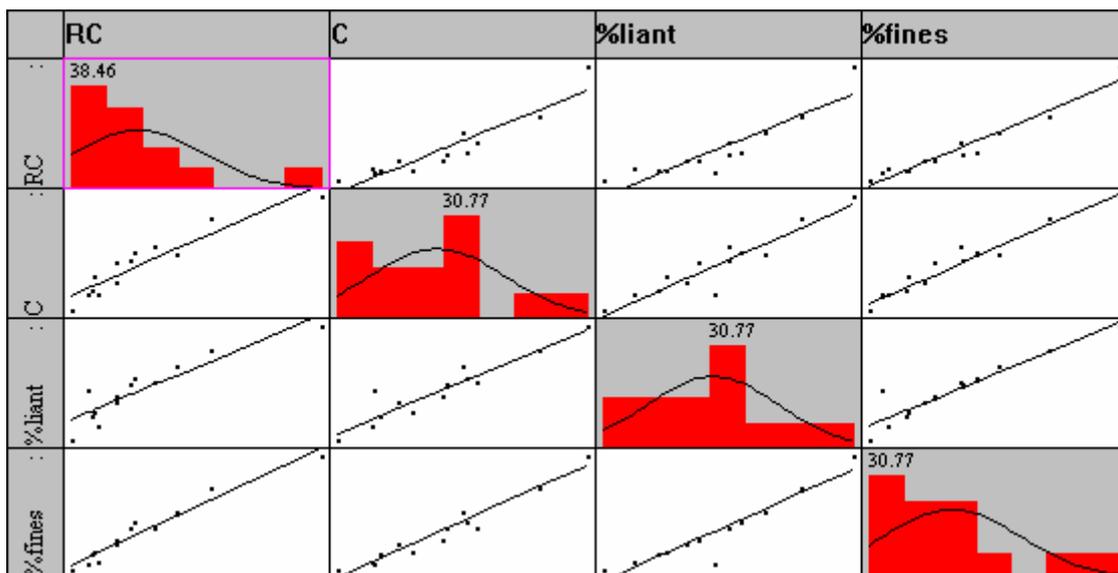


Figure D16. Histogrammes et corrélation entre variables