

N° d'ordre : 05/2003-M/G.C

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



UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE

FACULTE DE GENIE CIVIL

THESE DE MAGISTER

Présentée par

Mme El djouher BENNOUR (née CHIGARA)

Ingénieur d'Etat en Génie Civil de l'U.S.T.H.B.

Option : Construction

Thème

LES ENROBES BITUMINEUX A FROID **INFLUENCE DU TEMPS DE MURISSEMENT** **EN LABORATOIRE**

Soutenue le : 19 / 07 / 2003, devant le jury composé de :

Mr A.BALI	Professeur à l'E.N.P.	Président
Mr N.LARADI	Professeur à l'U.S.T.H.B.	Directeur de thèse
Mme K. AIT MOKHTAR	Chargée de recherche à l' USTHB.	Co- directrice de thèse
Mme F.KHARCHI	Maître de Conférences à l'U.S.T.H.B.	Examinatrice
Mr S.HADDADI	Chargé de recherche à l'U.S.T.H.B.	Examineur
Mr A.NECHNECH	Maître de recherche à l'USTHB.	Examineur

RESUME

Les mélanges à l'émulsion de bitume voient leurs propriétés mécaniques évoluer en fonction de la cinématique de départ de l'eau résiduelle au cours du temps, contrairement aux enrobés hydrocarbonés à chaud qui atteignent la quasi-totalité de leurs performances mécaniques par simple refroidissement.

Lors de la mise en œuvre, la phase de compactage facilite la coalescence des gouttelettes de bitume, s'accompagnant d'une forte réduction de la teneur en eau et de la teneur en air du matériau foisonné. Toutefois il reste encore dans l'enrobé, une certaine quantité d'eau dont l'évaporation peut durer plusieurs semaines, voire plusieurs mois selon l'épaisseur de la couche considérée et les conditions climatiques, et de cette étape va dépendre l'obtention des propriétés mécaniques finales.

La formulation en laboratoire des enrobés à l'émulsion implique la détermination, dans un délai aussi court que possible, des propriétés mécaniques qu'atteindra le mélange après mûrissement donc après évacuation de l'eau résiduelle.

L'objet de cette étude consiste d'une part à formuler en laboratoire un enrobé à froid, chose qui n'est pas simple du tout vu le manque de normes dans ce sens puis à étudier dans une seconde étape, le temps de mûrissement nécessaire pour atteindre les caractéristiques mécaniques recherchées.

SUMMARY

The miscellanies to the emulsion of asphalt see their mechanical properties evolving according to the kinematics of departure of the vestigial water during the time, contrary to coat them hydrocarbonés to hot that reach the quasi - totality of their mechanical performances by simple cooling.

At the time of the setting in œuvre, the phase of compaction facilitates the coalescence of the asphalt droplets, coming with a strong reduction of the content in water and the content in air of the material abounded. However he/it remains again in coated it, a certain quantity of water whose evaporation can last several weeks, or even several months according to the thickness of the layer considered and the climatic conditions, and of this stage is going to depend on the final mechanical property obtaining.

Formulation in laboratory of coated them to the emulsion implies the determination, in a delay as short as possible, of the mechanical properties that the mixture will reach therefore after mûrissement after evacuation of the vestigial water.

The object of this survey consists on the one hand in formulating in laboratory a coated to cold weather, thing that is not quite simple of the seen the lack of norms then in this sense to studying in one second stage, the necessary mûrissement time to reach the sought-after mechanical features.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

PARTIE I : SYNTHESE BIBLIGRAPHIQUE

CHAPITRE I : ETUDE DES EMULSIONS DE BITUME

I.1- Introduction.....	3
I.2- Historique	3
I.3- Les constituants de l'émulsion	5
I.3.1- Bitume.....	5
I.3.2- Emulsifiants (ou émulsifs).....	6
I.3.3- Eau	8
I.3.4- Acide.....	8
I.4- Classification des émulsions.....	8
I.4.1- Teneur en bitume.....	8
I.4.2- Type ionique d'une émulsion.....	9
I.4.2.1- Les émulsions anioniques.....	9
I.4.2.2- Les émulsions cationiques.....	10
I.4.3- Caractéristiques physico-chimiques.....	13
I.4.3.1- Le pH des émulsion.....	13
I.4.3.2- La granulométrie.....	13
I.4.3.3- Facteurs influants la granulométrie.....	17
I.4.4- Caractéristiques technologiques des émulsions.....	18
I.4.4.1- La stabilité des émulsions.....	18
I.4.4.2- Adhésivité des émulsions.....	26
I.4.4.3- Viscosité.....	27
I.5- Processus de fabrication.....	31
I.6- Réception et stockage des matières premières.....	32
I.6.1- Bitumes.....	32
I.6.2- Acide.....	32
I.6.3- Emulsifiants.....	32
I.6.4- Eau	32
I.6.5- Chaufferie.....	32
I.6.6- Poste de livraison des émulsions de bitume.....	33
I.6.7- Laboratoire d'usine.....	33
I.7- Fabrication de l'émulsion.....	33
I.7.1- Préparation de la phase dispersée (liant).....	34
I.7.2- Préparation de la phase dispersante (aqueuse)	35
I.7.3- Emulsification.....	36
I.8- Paramètre de fabrication d'une émulsion.....	37
I.8.1- Energie de dispersion.....	37
I.8.2- Viscosité et température des constituants.....	38
I.8.3- Dosage des constituants.....	38
I.9- Principaux emplois des émulsions.....	38
I.10- Choix de la formulation des émulsions.....	38
I.10.1- Choix de l'émulsifiant.....	39
I.10.1.1- Les amines grasses et leurs dérivés : diamines et polyamines.....	40
I.10.1.2- Les amidoamines.....	40

I.10.1.3- Les hétérocycles azotés du type imidazoline.....	40
I.10.2- Quantité d'émulsifiant.....	41
I.10.3- Neutralisation de l'émulsifiant.....	41
I.10.4- Stabilisants.....	42
I.11- Méthode de formulation.....	43
I.12- Conclusion.....	44

CHAPITRE II : ETUDE DES ENROBE A FROID

II.1- Introduction.....	46
II.2- Avantages et inconvénients des enrobés à froid.....	46
II.2.1- Avantages des enrobés à froid.....	46
II.2.2- Inconvénients des enrobés à froid.....	47
II.3- Domaine d'emploi.....	47
II.3.1- Les usages particuliers.....	47
II.3.2 - Les usages routiers.....	48
II.4- Classification des enrobés à froid.....	50
II.4.1- Enrobés denses à froid (EDF)	50
II.4.1.1- Définition.....	50
II.4.1.2- Avantages et inconvénients de la technique des enrobés denses à froid.....	51
II.4.1.3- Constitution des enrobés denses à l'émulsion.....	52
II.4.2- Enrobés semi-denses à froid (ESDF)	55
II.4.3- Enrobés ouverts à froid (EOF)	56
II.4.3.1- définition.....	56
II.4.3.2- Avantages et inconvénients des enrobés ouverts à froid.....	57
II.4.3.3- constituants des enrobés ouverts à froid.....	58
II.4.4- La grave émulsion (GE)	59
II.4.4.1- Définition.....	59
II.4.4.2- Avantage de la grave émulsion.....	60
II.4.4.3- Constitution d'une grave-émulsion.....	60
II.4.5- Enrobé coulé à froid (ECF).....	64
II.4.5.1- Définition.....	64
II.4.5.2- Avantages et inconvénients de l'enrobé coulé à froid.....	65
II.4.5.3- Constitution des enrobés coulés à froid.....	66
II.4.6- Enduit superficiel (ES)	67
II.4.6.1- Définition.....	67
II.4.6.2- Avantages et inconvénients de l'enduit superficiel.....	67
II.4.6.3- Constitution de l'enduit superficiel.....	68
II.4.6.4- Formulation des enduits superficiels.....	70
II.4.6.5- Choix de la structure.....	71
II.4.7- Les sables bitume traité à froid (SBF)	72
II.4.7.1- Définition.....	72
II.4.7.2- Domaine d'emploi.....	72
II.4.7.3- Constituants du sable bitume à froid.....	73
II.4.7.4- Caractéristique du mélange.....	74
II.5- Domaine d'emploi.....	74
II.6- Conclusion.....	74

CHAPITRE III : ETAT ACTUEL DE LA RECHERCHE

III.1- Introduction.....	75
III.2- Etude de la cohésion des enrobés à froid.....	75
III.2.1- Simulation de la phase malaxage-répendage.....	76
III.2.2- Comportement au jeune âge des enrobés coulés à froid.....	77
III.2.3- Le test HCT (Hilt Cohesion test)	77
III.2.4- Test TCSS.....	79
III.3- Etude de la maniabilité des enrobés à froid.....	83
III.3.1- Test de maniabilité Nynas.....	84
III.3.1.1- Description générale.....	84
III.3.1.2- Protocole expérimental.....	85
III.3.2- Test de maniabilité Esso.....	86
III.3.2.1- Description générale.....	86
III.3.2.2- Protocole expérimental.....	87
III.3.2.3- Evaluation de la cohésion des enrobés mise en œuvre.....	87
III.3.2.4- Influence de la formulation de l'émulsion sur la maniabilité de l'enrobé.....	88
III.3.2.5- Influence du temps de stockage.....	89
III.4- Etude du film de liant.....	94
III.4.1- Observation du film humide.....	96
III.4.2- L'observation du film sec.....	97
III.5- Etude de l'influence des fines sur la rupture des émulsions.....	98
III.6- Modification de l'émulsion par incorporation d'un système réactif.....	101
III.7- Utilisation des recyclats pour la fabrication des enrobés à froids.....	103
III.8- Etude de la Formulation des émulsions.....	105
III.9- Caractérisation des enrobés à froid au moyen des essais à la presse à cisaillement giratoire (PCG) et des essais Duriez.....	106
III.10- Etude du temps de mûrissement des enrobés à froid.....	109
III.11- Situation en Algérie.....	111
III.11.1- Introduction.....	111
III.11.2- Formulation d'une grave émulsion entre M'sila et Barika.....	111
III.11.3- Formulation de grave émulsion R'MADA.....	113
III.11.3.1- composition du mélange.....	113
III.11.3.2- Teneur en eau.....	114
III.11.3.3- Essais P.C.G.	115
III.11.4- Recyclage à froid de la RN3-Ouargla.....	116
III.11.5- Solution contre la remontée des fissures au sud Algérien.....	118
III.11.6- Etude de réhabilitation de la RN30 Tizi-ouzou.....	122
III.12- Conclusion.....	124

PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV : ANALYSE DES GRANULATS

IV- Analyse des granulats.....	125
IV.1- Provenance des granulats.....	125
IV.2- Caractéristiques des granulats.....	126
IV.2.1- Analyse granulométrique.....	126
IV.2.2- Analyse chimique sommaire.....	128
IV.2.3- Mesure des poids spécifiques des granulats.....	128
IV.2.4- Evaluation de la pollution.....	129
IV.2.4.1- Mesure de la propreté superficielle des granulats.....	130
IV.2.4.2- Essai d'équivalent de sable à 10 %.....	130
IV.2.4.3- Essai au bleu de méthylène.....	131
IV.2.5- Essai de résistance au choc.....	133
IV.2.6- Essai de résistance à l'usure : Micro Deval.....	133
IV.3- Conclusion.....	134

CHAPITRE V : ANALYSE DU LIANT

V- Analyse du liant.....	135
V.1- Détermination de la teneur en eau.....	135
V.2- Détermination du signe de charge des particules.....	137
V.3- Détermination de l'indice de rupture.....	138
V.4- Pseudo-viscosité Engler.....	140
V.5 - Détermination du pH de l'émulsion.....	142
V.6- Essai d'adhésivité.....	142
V.7- Essai de stabilité au stockage.....	143
V.8- Conclusion.....	144

CHAPITRE VI : ETUDE DE FORMULATION

VI- Formulation de l'enrobé à froid.....	145
VI.1- Détermination de la composition du mélange.....	145
VI.1.1- Détermination du squelette granulaire.....	145
VI.1.2- Détermination de la teneur en eau d'apport.....	146
VI.1.3- Détermination de la teneur optimale en émulsion.....	148
VI.1.3.1- Détermination du pourcentage du bitume résiduel.....	149
VI.1.3.2- Détermination de différentes teneurs en émulsion.....	149
VI.1.3.3- Choix de la teneur finale en émulsion : Essai DURIEZ.....	150
VI.2- Choix de la force de compactage.....	159
VI.2.1- Force de compactage par rapport au pourcentage des vides.....	160
VI.2.2- Force de compactage par rapport au pourcentage des fines.....	161
VI.3- Conclusion.....	162

CHAPITRE VII : ETUDE DU TEMPS DE MURISSEMENT

VII- Etude du mûrissement.....	164
VII.1- Préparation des éprouvettes.....	164
VII.2- Résultats obtenus.....	165
VII.2.1- Influence du temps de mûrissement sur la teneur en eau résiduelle évaporée.....	165
VII.2.2- Influence du temps de mûrissement sur le poids des éprouvettes.....	166
VII.2.3- Influence du temps de mûrissement sur la résistance à la compression...	167
VII.4- Conclusion.....	168
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	169

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Evaluation de la consommation de l'émulsion.....	3
Figure I.2 : Différents constituants d'une émulsion.....	5
Figure I.3 : Schématisation d'une molécule d'émulsifiant.....	7
Figure I.4 : Influence de l'émulsifiant sur le mélange eau-bitume.....	7
Figure I.5 : Emulsion anionique.....	10
Figure I.6 : Emulsion cationique.....	11
Figure I.7 : Détermination du signe charge d'une émulsion.....	12
Figure I.8 : Vue au microscope d'une émulsion de bitume.....	14
Figure I.9 : L'opacité en fonction du diamètre moyen.....	15
Figure I.10 : Le compteur Coulter – comptage granulométrique.....	16
Figure I.11 : Analyse granulométrique d'une émulsion par comptage.....	16
Figure I.12 : Courbes granulométrique pour différentes émulsions.....	17
Figure I.13 : Décantation-sédimentation.....	19
Figure I.14 : Les différentes étapes de la stabilité au stockage.....	20
Figure I.15 : Processus de rupture.....	21
Figure I.16 : Etapes de la stabilité des émulsions vis-à-vis des granulates .	22
Figure I.17 : Schématisation du phénomène de la prise.....	22
Figure I.18 : Schématisation du phénomène de mûrissement.....	23
Figure I.19 : Homogénéisation de l'émulsion.....	25
Figure I.20 : Adhésivité active d'une émulsion.....	26
Figure I.21 : Adhésivité passive d'une émulsion.....	27
Figure I.22 : Viscosité de l'émulsion en fonction de la teneur en liant.....	29
Figure I.23 : Evolution d'un globule contenant du sel.....	30
Figure I.24 : Composition de l'usine pour la fabrication de l'émulsion.....	31
Figure I.25 : Schéma théorique de fabrication d'une émulsion.....	34
Figure I.26 : Préparation directe de la phase aqueuse.....	35
Figure I.27 : Préparation indirecte de la phase aqueuse.....	36
Figure I.28 : Matériel de mise en émulsion.....	37
Figure I.29 : Technologie du déroulement d'une étude de formulation.....	43
Figure II.1 : Enrobés denses à froid.....	51
Figure II.2 : Les enrobés semi-denses à froid.....	55
Figure II.3 : Les enrobés ouvert à froid.....	56
Figure II.4 : Les deux usages de la grave émulsion.....	60
Figure II.5 : Constituants d'une grave émulsion.....	61
Figure II.6 : Teneur en eau de la grave émulsion.....	64
Figure II.7 : Fuseaux granulométriques des gravillons courant.....	69
Figure II.8 : Structure type d'un enduit superficiel.....	71
Figure III.1: Maniabilité des ECF en fonction de la teneur en additif.....	76
Figure III.2: Schéma de principe du test HCT.....	78
Figure III.3: Valeur de cohésion HCT à différentes températures de cure, émulsion à 20° C.....	78
Figure III.4: Appareil de l'essai TCSS.....	80
Figure III.5: Aspect d'un échantillon de cohésion correcte après essai TCSS.....	81
Figure III.6: Aspect d'un échantillon d'ECF non cohésif.....	81
Figure III.7 : Evaluation des ECF au TCSS.....	82

Figure III.8	: Répartition granulométrique des granulats.....	84
Figure III.9	: Test Nynas ; vue d'ensemble pendant un essai.....	85
Figure III.10	: vue générale du test de maniabilité Esso.....	86
Figure III.11	: Résistance à l'écrasement Duriez en fonction du temps de cure pour les formules (A, B, C, D et E).....	87
Figure III.12	: Maniabilité des 5 formulations mesurée avec les tests Nynas.....	88
Figure III.13	: Maniabilité des 5 formulations mesurée avec les tests Esso.....	88
Figure III.14	: Maniabilité des différentes formulations après stockages de 20 minutes, 2 et 6 heures (protocole Esso).....	89
Figure III.15	: Essai de validation du maniabilimètre Nynas : force de cohésion en fonction du temps.....	91
Figure III.16	: Etude au maniabilimètre - Incidence de la granulométrie et la teneur en émulsifiant résiduel – Granulométrie des émulsion.....	93
Figure III.17	: Influence du temps de cure sur la cohésion.....	94
Figure III.18	: Microscope à force atomique.....	95
Figure III.19	: Visualisation d'une émulsion Humide par microscope optique.....	95
Figure III.20	: Visualisation du film d'émulsion de bitume par microscope optique, présence d'une séparation de phases.....	96
Figure III.21	: Deux photos prise par AFM de deux émulsions à l'état humide et sur un support minéralogique.....	97
Figure III.22	: La visualisation deux émulsions de bitume adsorbées et en état sec, (a) avec fissures et trous, (b) homogène et continue.....	97
Figure III.23	: Visualisation par AFM de la surface du film sec séparé selon la deuxième méthode (surface continue et homogène).....	98
Figure III.24	: Courbe granulométrique des fines utilisées.....	99
Figure III.25	: Distribution granulométrique du mélange 0,008/10.....	100
Figure III.26	: Distribution granulométrique du mélange 0,008/10.....	103
Figure III.27	: Courbe granulométriques des enrobés recyclés concassés tels quels et après désenrobage.....	104
Figure III.28	: Répartition granulométrique des gouttelettes de bitume de deux émulsions d'enrobage.....	105
Figure III.29	: Evolution des résistances en compression en fonction de la teneur en eau dans différentes conditions de conservation.....	110
Figure III.30	: Courbe granulométrique du mélange.....	114
Figure III.31	: La variation de la compacité en fonction du nombre de girations.....	115
Figure III.32	: Vue de la section réalisée en enrobé ouvert à l'émulsion.....	121
Figure III.33	: Remontée des fissures sur la section réalisée en sand Asphalt.....	121
Figure III.34	: Remontée des fissures sur la section réalisée en BB.....	122
Figure IV.1	: Courbe granulométrique des fractions 0/3, 3/8 et 8/15.....	127
Figure IV.2	: Essai au bleu de méthylène.....	132
Figure V.1	: Appareil pour la détermination de la teneur en liant.....	136
Figure V.2	: Détermination du signe de charge des l'émulsion.....	137
Figure V.3	: Appareillage pour la mesure de la vitesse de rupture.....	138
Figure V.4	: Viscosimètre Engler.....	141
Figure V.5	: pH-mètre.....	142
Figure V.6	: Essai de stabilité au stockage.....	143
Figure VI.1	: Courbe du mélange granulaire.....	146
Figure VI.2	: Courbe Proctor du mélange.....	148
Figure VI.3	: Moule utilisé pour le confécionnement d'une éprouvette Duriez, avec un enrobé à froid.....	153

Figure VI.4 : Presse utilisée pour le confécionnement d'une éprouvette Duriez.....	153
Figure VI.5 : Temps de maturation des éprouvettes pour 7.58 % d'émulsion.....	156
Figure VI.6 : Temps de maturation des éprouvettes pour 7.91 % d'émulsion.....	156
Figure VI.7 : Temps de mûrissement des éprouvettes pour 8.24 % d'émulsion.....	157
Figure VI.8 : Variation de la résistance immersion - compression en fonction de la teneur en émulsion.....	159
Figure VI.9 : Evolution du pourcentage du vide en fonction la force de compactage.....	160
Figure VI.10 : Extracteur type Kumagawa.....	161
Figure VI.11 : Evolution du pourcentage des fines en fonction de la force de compactage.....	162
Figure VII.1 : La teneur en eau résiduelle en fonction du temps de mûrissement.....	166
Figure VII.2 : Variation du poids des éprouvettes en fonction du temps de mûrissement.....	167
Figure VII.3 : La résistance à la compression en fonction du temps de mûrissement.....	172

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Spécifications correspondant à différentes catégorie de liant.....	6
Tableau I.2 : Catégorie d'émulsion en fonction de la teneur en eau.....	9
Tableau I.3 : Classification des émulsions cationiques.....	24
Tableau I.4 : Variation de l'indice de rupture en fonction et de la nature de l'émulsifiant.....	24
Tableau I.5 : Variation de l'indice de rupture en fonction de granulométrie.....	25
Tableau I.6 : Spécification sur la viscosité Engler.....	28
Tableau I.7 : Influence de la quantité d'émulsifiant en fonction du pourcentage de fillers.....	41
Tableau I.8 : Influence de pH sur l'indice de rupture d'une émulsion.....	42
Tableau I.9 : Variation de l'indice de rupture d'une émulsion due à une addition d'électrolyte.....	42
Tableau II.1 : Classe granulaire par rapport aux différentes catégories d'enrobés à froid.....	50
Tableau II.2 : Fuseau granulaire des enrobés semi-dense à froid.....	56
Tableau II.3 : Fuseau granulaire des enrobés ouverts.....	58
Tableau II.4 : Fuseau de spécification d'une grave 0/14.....	62
Tableau III.1 : Niveau de maniabilité de différentes formules d'enrobé.....	86
Tableau III.2 : Caractéristique des émulsions utilisées.....	92
Tableau III.3 : Caractérisation granulométriques des fines utilisées.....	98
Tableau III.4 : Composition des différents enrobés étudiés.....	100
Tableau III.5 : Exemple de caractéristiques d'émulsions.....	102
Tableau III.6 : Caractéristiques mécaniques.....	102
Tableau III.7 : Résultats de L'essai Duriez.....	104
Tableau III.8 : Résultats de L'essai au PCG.....	105
Tableau III.9 : L'influence de la formulation de l'émulsion sur la prise de Cohésion.....	106
Tableau III.10 : Incidence de la teneur en eau à l'essai PCG.....	107
Tableau III.11 : Incidence de la teneur en fines totale à l'essai PCG.....	107
Tableau III.12 : Résultats de l'essai Duriez pour un matériaux quartzitiques.....	108
Tableau III.13 : Résultats de l'essai Duriez pour un matériaux diabases.....	108
Tableau III.14 : Caractéristiques de l'émulsion (M'sila et Barika).....	111
Tableau III.15 : Les caractéristiques chimiques des granulats(M'sila et Barika).....	112
Tableau III.16 : Synthèse des résultats de l'essai Duriez(M'sila et Barika).....	112
Tableau III.17 : Granulométrie du mélange de la grave de R'MADA.....	113
Tableau III.18 : Détermination de la teneur en eau (R'MADA).....	114
Tableau III.19 : Résultats de l'Essais P.C.G(R'MADA).....	115
Tableau III.20 : Teneurs en eau totale mesurées avant et après l'essai(R'MADA).....	115
Tableau III.21 : Granulométrie du mélange de l'ancienne chaussée (RN3-Ouargla).....	117
Tableau III.22 : Résultats de l'essai Duriez de l'ancien enrobé(RN3-Ouargla).....	117
Tableau III.23 : Résultats de l'essai Duriez après recyclage ((RN3-Ouargla).....	118
Tableau III.24 : Caractéristiques générales des granulats de Haoud-El-Hamra.....	119
Tableau III.25 : Caractéristiques de l'émulsion de Haoud-El-Hamra.....	120
Tableau III.26 : Résultats des essais Duriez de Haoud-El-Hamra.....	120
Tableau III.27 : Résultats des essais Duriez de la RN30 Tizi-ouzou.....	121

Tableau IV.1	: Analyse granulométrique.....	126
Tableau IV.2	: Détermination des coefficients granulométrique.....	127
Tableau IV.3	: Analyse chimique sommaire.....	128
Tableau IV.4	: Poids spécifique des granulats.....	129
Tableau IV.5	: Propreté superficielle des gravillons.....	130
Tableau IV.6	: Propreté du sable.....	131
Tableau IV.7	: Valeurs du bleu de méthylène.....	132
Tableau IV.8	: Résistance au choc.....	133
Tableau IV.9	: Résistance à l'usure.....	134
Tableau V.1	: Teneur en eau de l'émulsion.....	137
Tableau V.2	: Indice de Rupture (IR).....	139
Tableau V.3	: Pseudo-viscosité Engler.....	141
Tableau V.4	: Détermination du (pH).....	142
Tableau V.5	: Stabilité au stockage.....	144
Tableau VI.1	: Fuseau de référence relatif à un enrobé à froid 2/14.....	145
Tableau VI.2	: Détermination de la quantité d'eau d'apport minimale.....	147
Tableau VI.3	: Détermination de la teneur en bitume résiduel.....	149
Tableau VI.4	: Détermination de la Teneur en émulsion.....	150
Tableau VI.5	: Détermination de la Teneur en émulsion.....	155
Tableau VI.6	: Variation de la teneur en émulsion en fonction de la force de la Résistance.....	158
Tableau VI.7	: Variation de la teneur en émulsion en fonction de la force de la Résistance.....	160
Tableau VI.8	: Pourcentage de fines en fonction des forces de compactages.....	161

ANNEXE

Tableau 1 : Emulsions cationiques

Tableau 2 : Emulsions anioniques

Introduction générale

Les routes constituent la voie de communication la plus importante et la plus utilisée. Leur importance ne nous apparaît que par leur absence, soit qu'elles manquent pour accéder à un lieu soit encore qu'elles sont momentanément coupées.

La route fait partie d'un système technique : son tracé, sa construction, son entretien et son exploitation font appel à des considérations politiques, économiques et financières, à des connaissances et des techniques variées et variables au cours du développement des sociétés.

Par ailleurs, de par sa construction, le granulat est un matériau très consommé dans les routes.

On citera :

- 1 m³ de béton consomme 1.8 à 1.9 t de granulats
- 1 logement consomme 100 à 300 t de granulats
- 1 km de voie ferrée consomme 10000 t de granulats
- 1 km de route consomme 30000 t de granulats

Au vu de ces chiffres, on conçoit que la réalisation d'une route est très onéreuse et que les nouvelles techniques d'enrobés visent toutes soit à réduire le corps de chaussée en utilisant des techniques plus performantes soit à minimiser le prix de revient de la route en utilisant des techniques faisant appel à un gain financier sur le matériel utilisé et l'énergie dépensée.

Dans cette optique, on se propose d'étudier la technique des enrobés à froid et en particulier à étudier leur comportement à travers ce travail de recherche qui s'intitule « les enrobés bitumineux à froid; influence du temps de mûrissement en laboratoire ».

Le travail sera subdivisé en deux grandes parties précédées d'une introduction générale et suivies d'une conclusion générale et perspectives.

La première partie qui s'intitule « Etude bibliographique » comportera une introduction et les chapitres suivants :

❖ Chapitre I : *Etude des émulsion de bitume*

Dans ce chapitre on commencera par définir les émulsions de bitume et on donnera leurs historique et leurs constituants (bitume, eau, acide ,émulsifiant). On classera les émulsions de bitume d'après leur caractéristiques physico-chimiques (pH, granulométrie) et technologiques (stabilité, adhésivité, viscosité). Pour réussir la fabrication de l'émulsion on donnera le processus et la méthode, ainsi que le choix et le dosage des constituant de cette dernière.

❖ Chapitre II : *Etude des enrobés à froid*

On débutera ce chapitre par une introduction et les avantages et inconvénients des enrobes à froid en générale et leurs domaine d'emploi. Nous essayerons ensuite de définir les différents

types d'enrobés à froid et de donner pour chacun le domaine d'utilisation. Nous clôturons ce chapitre par une petite conclusion.

❖ **Chapitre III : Etat actuel de la recherche**

Dans ce chapitre nous ferons le point sur l'état actuel dans le domaine des émulsions en particulier et des enrobés à froid en général.

A cet effet nous donnerons quelques recherches faites dans des laboratoires étrangers et des formulations d'enrobés testées en laboratoire pour des applications réelles sur site en Algérie

La deuxième partie qui s'intitule « Etude expérimentale » comportera une introduction et les chapitres suivants :

❖ *Chapitre I : Analyse des granulats*

Dans ce chapitre nous présenterons et nous définirons les granulats qui seront utilisés pour la formulation. Pour classer ces granulats et connaître leurs caractéristiques nous procéderons à une analyse granulométrique, analyse chimique, détermination du poids spécifique, évaluation de leurs pollution, détermination de leurs résistance au choc et à l'usure. Nous terminerons ce chapitre par une conclusion.

❖ *Chapitre II : Analyse du liant*

Ce chapitre synthétisera l'étude du liant qui sera utilisé pour la formulation. On commencera par l'identification de l'émulsion et on déterminera ses caractéristiques qui sont sa teneur en eau, sa polarité ionique, sa stabilité vis à vis des granulats (indice de rupture), son pH, son adhésivité et sa viscosité. On terminera par une Conclusion.

❖ *Chapitre III : Etude de la formulation*

Dans ce chapitre nous commencerons par fixer le pourcentage des granulats pour chaque fraction afin de former un mélange granulaire dont la courbe granulométrique s'insérera dans un fuseau bien défini. On déterminera aussi la teneur en eau d'apport, la force de compactage nécessaire pour confectionner nos éprouvettes et enfin la teneur optimale en émulsion par l'essai DURIEZ et nous terminerons par une conclusion.

❖ *Chapitre IV : Etude du temps de mûrissement*

Une fois la formulation faite, nous passerons à la confection de nos éprouvettes sur lesquelles nous procéderons à des essais de compression simple afin d'évaluer l'influence de l'évaporation de l'eau sur la résistance à la compression.

Les résultats principaux seront présentés sous forme de courbe.

CHAPITRE I : ETUDE DES EMULSIONS DE BITUME

I.1 - Définition

Une émulsion est une dispersion de deux liquides non miscibles l'un dans l'autre, préparée généralement à l'aide d'un produit dénommé émulsifiant ou émulsif. Elle est composée de deux phases : une phase dispersée (liant hydrocarboné) et une phase dispersante (l'eau).

La technique routière fait largement appel aux émulsion de bitume, c'est ainsi que depuis plusieurs années près de 30 % de bitume consommé est transformé en émulsion.

Cette dernière est devenue un matériau de choix pour l'ensemble de travaux routiers ; le domaine couvert par ces applications va de la réparation à la construction de chaussées neuves.

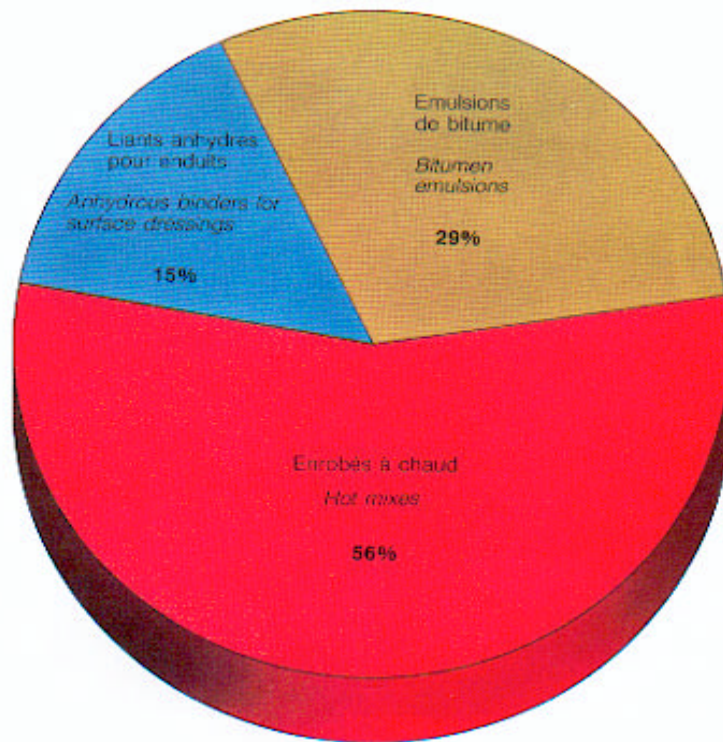


Fig I.1 : Evaluation de la consommation de l'émulsion

I.2- Historique

Il est souvent difficile d'affirmer, lorsqu'on tente d'écrire l'histoire d'un produit industriel ou d'un procédé technologique, la date précise de la découverte, donc le nom de l'inventeur [46].

Il en va de l'émulsion de bitume comme pour bien d'autres choses. Les premiers liants routiers furent des goudrons, on indique la date de 1854 comme étant celle du premier revêtement d'une chaussée, la place Sallinis à Auch (Gers, France), avec du goudron fluide d'usine de gaz.

On est moins sûr du premier répandage d'une véritable émulsion directe de bitume dans l'eau. Il semble que les premiers essais de dispersions d'huiles lourdes de pétrole et d'eau ont été réalisés dès les premières années du XX^e siècle. On cite, en 1903 en France, l'application « d'huiles lourdes de pétrole émulsionnées et saponifiées par des eaux ammoniacales »; en 1904 « de l'huile de pétrole émulsionnée » est appliquée sur le circuit des Ardennes pour éviter les accidents dus aux nuages de poussière soulevées par les voitures de course...

En revanche, c'est sous l'impulsion d'un médecin suisse, le Docteur Ernest GUGLIEMINETTI, que le goudronnage des routes connaît, à partir de mars 1902, à la suite d'essais réalisés à Monaco, un remarquable essor, à telle enseigne qu'en 1904 la surface goudronnée représente déjà en France 360.000m².

Sous l'impulsion de cet éminent scientifique, le congrès international de la route se réunit pour la première fois à Paris en octobre 1908 en présence des délégués de 37 nations. Au fil des ans, on a pu définir avec plus de précisions les conditions d'une véritable technique routière, essentiellement à base de goudron.

C'est donc dans un environnement favorable d'idées et de connaissances qu'un chimiste anglais Hugh Alan MACKAY, prend un brevet n° 202.021, en date du 9 mai 1922 sur l'émulsion de bitume. On peut dire que cet événement marque le point de départ d'une nouvelle génération de liants routiers qui va, en quelques années, modifier profondément la technique des revêtements superficiels.

Dès 1923, il se répand dans le monde une centaine de tonnes d'émulsion. On estime, en 1926, la production totale cumulée des cinq pays équipés d'usines de fabrication: Angleterre, Allemagne, Denmark, Australie, Inde, à plus de 150.000 tonnes.

Au plan technique, en 1951 apparaissent les émulsions cationiques. Compte tenu de leurs propriétés propres, celles-ci remplacent rapidement les émulsions anioniques: en 1962. Seulement 10 années après les tout premiers essais, 50% du tonnage fabriqué est cationique, et, en 1971, il dépasse 92%.

Un dernier fait est intéressant du point de vue historique: c'est l'apparition, à partir des années 1970, de l'émulsion concentrée.

D'abord à 70%, officiellement à 69% à partir de 1978 (Directive SETRA-LCPC « Réalisation des Enduits Superficiels »), l'émulsion concentrée supplante rapidement, dans la technique des enduits, les émulsions à plus faible concentration, 65% voire 60%.

Enfin, sans entrer dans leur place dans ce survol historique, citons des applications d'émulsions dans les domaines les plus divers: stabilisation en association avec des liants hydrauliques, fixation de graines de semence, injection en étanchéité de retenues d'eau, enrobage de boues radioactives, etc....

I.3- Les constituants de l'émulsion

Les émulsions de bitume sont constituées par une phase dispersée qui est le bitume et une phase dispersante qui est constituée par de l'eau additionnée de divers produits (acide ou base, amine ou résine) les globules de bitumes sont tapissés par un film protecteur d'émulsifiant [61].

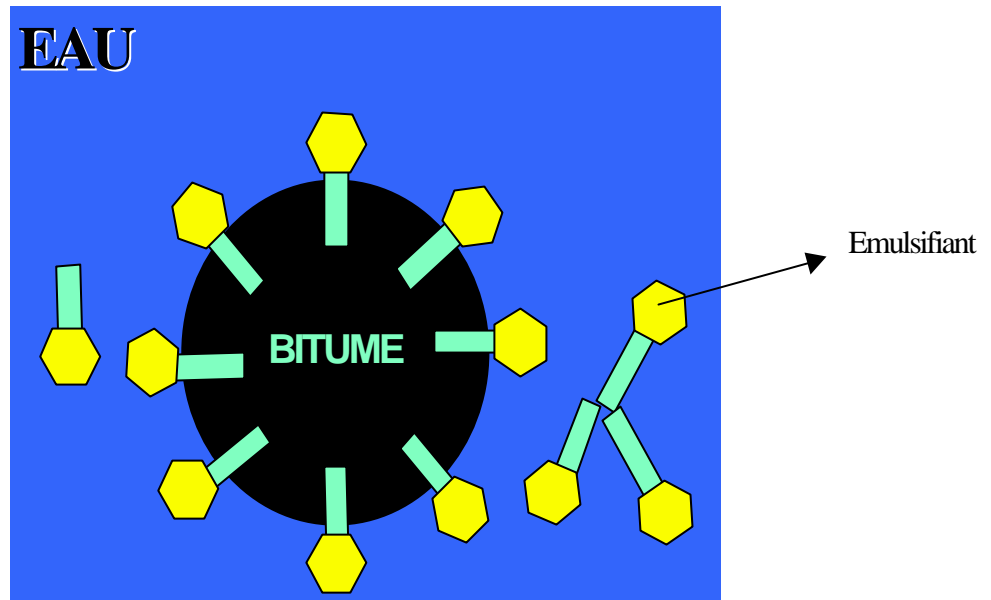


Fig I.2 : Différents constituants d'une émulsion

I.3.1- Bitume

Les liants de base utilisés pour la fabrication des émulsions de bitume employées pour la construction et l'entretien des chaussées sont des bitumes purs ou modifiés, éventuellement fluidifiés ou fluxés.

Le bitume pur est produit par les raffineries de pétrole. Un additif facilitant la mise en émulsion et améliorant les qualités de stabilité et d'adhésivité est habituellement incorporé en raffinerie avant les livraisons.

Le fluidifiant est également produit par les raffineries de pétrole. Il s'agit d'un bitume dans lequel on ajoute un diluant plus ou moins volatil provenant de la distillation du pétrole, dans le but d'abaisser la viscosité.

Le fluxant est généralement du bitume additionné à un diluant provenant de la distillation du goudron de houille, pour ramollir le bitume.

Parmi ces trois natures de bitume, le bitume pur est le plus utilisé dans la fabrication d'une émulsion.

Les émulsions de bitume, peuvent être fabriquées à base de bitume de pénétrabilités différentes (180/220, 80/100, 60/70, 40/50). Cette classification intéresse principalement les divers usages auxquels les émulsions sont destinées.

Les qualités du liant servant à fabriquer l'émulsion doivent répondre aux spécifications correspondant à sa catégorie ; nous les rappelons dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Spécifications correspondant à différentes catégorie de liant

Qualité	180/220	80/100	60/70	40/50
Point de ramollissement bille et anneau (°C)	34 à 43	41 à 51	43 à 56	47 à 60
Pénétration à 25 °C 100 g, 5 s en 1/10 mm	180/220	80/100	60/70	40/50
Densité relative à 25 °C	1 à 1.07	1 à 1.07	1 à 1.10	1 à 1.10
Perte de masse au chauffage à 163 °C pendant 5 heures (%)	< 2	< 2	< 1	< 1
Pourcentage de pénétrabilité restante (%)	> 70	> 70	> 70	> 70
Point d'éclair (°C)	> 230	> 230	> 230	> 250
Ductilité à 25 °C (cm)	> 100	> 100	> 80	> 60
Solubilité dans le CS ₂ (%)	> 99.5			
Teneur en paraffine (%)	< 4.5			

I.3.2- Emulsifiants (ou émulsifs)

L'émulsification consiste à diviser le bitume en fines particules chargées, douées d'un pouvoir répulsif les une pour les autres. L'émulsifiant doit :

- ✓ Abaisser la tension interfaciale entre la phase hydrocarbonée et la phase aqueuse, il diminue donc le travail d'émulsification.
- ✓ Créer un film protecteur autour des particules. Eventuellement il peut jouer le rôle d'un dôle d'adhésivité.

Ces diverses exigences nécessitent que l'émulsifiant soit sous forme ionisable et qu'il possède une structure chimique telle qu'il puisse former un film interfaciale.

La gamme des émulsifiants généralement utilisés, compte tenu de leur coût et de leur efficacité, se réduit :

- ✓ Pour les émulsions anioniques : aux acide gras, abeitiques et naphténiqne, salifiés par une base forte (en règle générale la soude ou la potasse).
- ✓ Pour les émulsions cationiques aux polyamines, amido-amine, imidazoline et ammoniums quaternaires à chaîne grasse.

L'acide fort servant à la salification est généralement l'acide chlorhydrique(HCl).

Les émulsifiants couramment utilisés sont des produits chimiques de la classe des amines.

Ils se caractérisent en particulier, par leur consistance liquide ou pâteuse qui conditionne leur manipulation, leur stockage et leur dosage.

Les molécules d'émulsifiant sont constituées de deux parties :

- ✓ Une partie apolaire présentant une grande affinité pour les bitumes ce qui leurs permet de se piquer dans les globules de bitume.
- ✓ Une partie polaire émerge dans l'eau et crée en s'ionisant des charges électriques à la surface des particules de bitume.

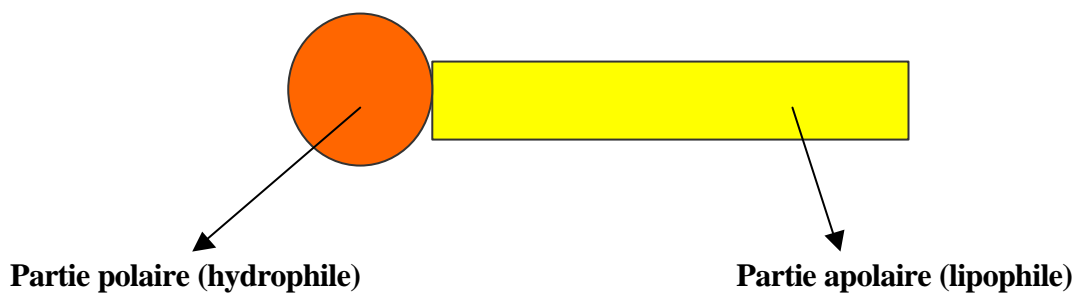


Fig I.3 : Schématisation d'une molécule d'émulsifiant

Ces charges électriques étant de même signe, elles forcent les particules de bitume à se repousser par répulsion électrostatique et empêchent donc leur agglomération.

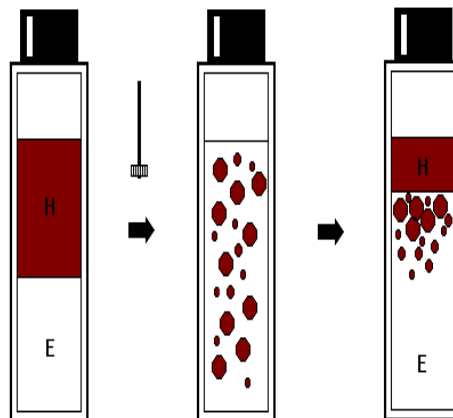


Fig I.4 : Influence de l'émulsifiant sur le mélange eau-bitume

I.3.3- Eau

L'eau choisie ne doit contenir qu'un minimum d'impuretés organiques et minérales. Il est en général nécessaire, pour la fabrication de certaines émulsions, de «permuter» l'eau au moyen d'un appareil approprié. La permutation consiste à remplacer les ions calcium et magnésium contenus dans l'eau par des ions sodium apportés.

En effet, les ions calcium et magnésium ont tendance à réagir en particulier sur les émulsifs du type $C_nH_m-COONa$ pour former des composés insolubles dans l'eau n'ayant plus de propriétés émulsifiantes.

I.3.4- Acide

Les émulsifiants étant insolubles dans l'eau, il est nécessaire de les transformer en sels pour permettre leur dissolution dans la phase dispersante.

A cet effet, on les fait réagir avec un acide qui le plus souvent est de l'acide chlorhydrique (HCl) en solution aqueuse à 20-22° Baumé.

I.4- Classification des émulsions

L'émulsion de bitume est définie et classée d'après les paramètres suivants [23] :

- ✓ La nature et la teneur en bitume.
- ✓ Le type ionique (cationique et anionique).
- ✓ Les caractéristiques physico-chimiques : pH et la granulométrie.
- ✓ Les caractéristiques technologiques : stabilité, adhésivité et viscosité.

I.4.1- Teneur en bitume

Cette caractéristique fondamentale pour une émulsion permet de connaître le pourcentage de liant hydrocarboné que renferme cette dernière.

La détermination directe de la teneur en eau donne par simple différence, le pourcentage de liant contenue dans une émulsion donnée.

La teneur en liant influe directement sur de nombreuses caractéristiques telles que la viscosité, la stabilité au stockage, la vitesse de rupture, ainsi que l'aptitude à l'enrobage des matériaux.

Pour une catégorie d'émulsion déterminée, la teneur en eau mesurée ne doit pas s'écarter en valeur absolue de plus de 1 % de la valeur théorique exigée.

Par exemple une émulsion à 60 % doit contenir de l'eau à la teneur de 40 ± 1 % .

Les catégories commerciales courantes sont les suivantes :

Tableau I.2 : Catégorie d'émulsion en fonction de la teneur en eau

Catégorie d'émulsion (%)	Teneur en eau (%)
50	50
55	45
60	40
65	35
69	31

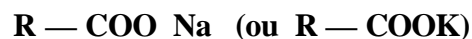
I.4.2- Type ionique d'une émulsion

Les deux phases de l'émulsion (phase dispersée, phase dispersante), sont séparées par un film protecteur d'émulsifiant dont les molécules tapissent la surface des particules.

Ces particules ont leurs partie apolaire piquée dans la phase hydrocarbonée, leur partie polaire immerge dans l'eau et crée, en ionisant, des charges électriques à la surface des particules. Le signe de ces charges confère aux émulsions leur caractère anionique ou cationique [4].

I.4.2.1- Les émulsions anioniques

On utilise le plus fréquemment comme émulsifiant, les sels alcalins d'acides gras et d'acides résiniques obtenus par saponification de la résine liquide dite « Tall-Oil ». il s'agit d'un produit résiduaire, distillé, provenant de l'industrie de la pâte à papier issue des bois résineux traités par le procédé dit « au sulfate ». La formule générale de ces savons est :



Dans laquelle R est la chaîne caractéristique de l'acide gras ; elle constitue la partie apolaire de la molécule et est lipophile.

Le groupement $\text{CO}_2 \text{ Na}$ constitue la partie polaire hydrophile.

En solution dans la phase aqueuse continue, les molécules de savon s'ionisent :

- ✓ Les ions Na (ou K) constituent les cations par l'eau.
- ✓ Les ions R - COO , constituant les anions adsorbés par les globules de bitume.

Ces savons furent beaucoup utilisés lorsque les émulsions anioniques existaient seules sur le marché.

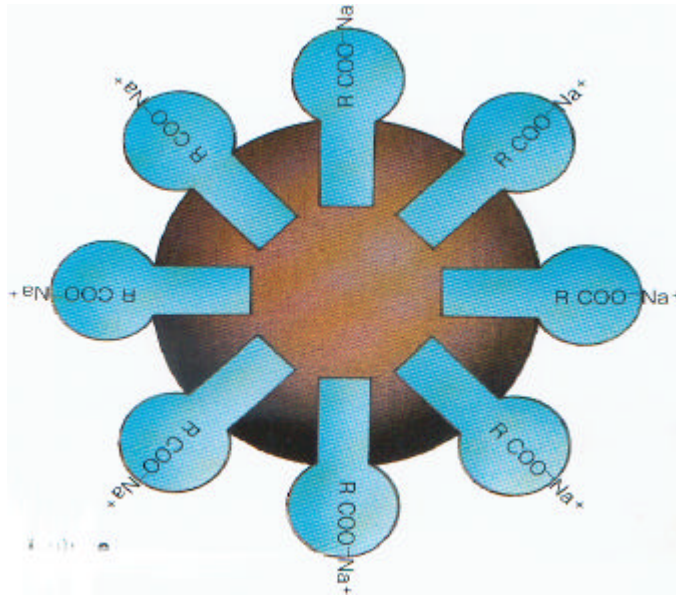


Fig I.5 : Emulsion anionique

On distingue les émulsions anioniques suivantes :

- ✓ Les émulsion anioniques à rupture rapide :EAR
- ✓ Les émulsion anioniques à rupture lente :EAL
- ✓ Les émulsion anioniques à rupture surstabilisée : EAS

I.4.2.2- Les émulsions cationiques

Les savons cationiques sont constitués par des molécules polaires dont la formule générale peut être schématisée de la façon suivante [45] :



Dans laquelle R' est la chaîne hydrocarbonée caractéristique du surfactif : elle constitue la partie hydrophobe ou lipophile de la molécule.

Le groupement $NH_3^+ Cl^-$ constitue la partie hydrophile. En solution dans la phase aqueuse, les molécules de savons s'ionisent en produisant des cations $R' NH_3^+$ et des anions Cl^- .

Au cours de la fabrication de l'émulsion, les cations sont adsorbés par les globules de bitume, la partie lipophile R' tournée vers l'intérieur, le groupement NH_3^+ se plaçant à l'interface bitume/eau. Les anions Cl^- restent dans l'eau.

Du fait de la couronne de groupement NH_3^+ qui s'est formée à leur périphérie, les globules de bitume se trouvent chargés positivement. Ceci assure d'une part la stabilité de l'émulsion par répulsion électrostatique et d'autre part une bonne affinité des globules de bitume vis-à-vis des surfaces minérales chargées négativement.

Les utilisations des émulsions cationiques sont nombreuses, et font appel à des techniques diverses. Il en résulte une variété de formules.

On se contentera de citer quelques exemples typiques répondant à des besoins précis choisis dans les classes les plus représentatives des spécifications les concernant.

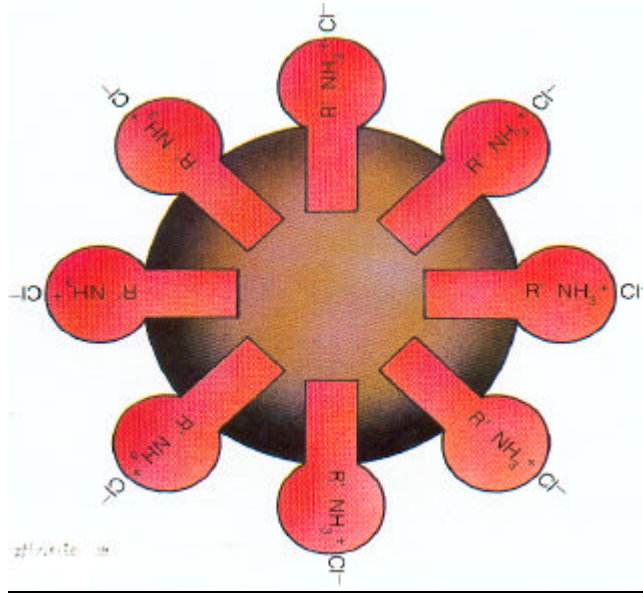


Fig I.6 : Emulsion cationique

➤ **Les émulsions cationiques à rupture rapide (classes ECR) :**

C'est le domaine d'emploi incontestablement le plus fourni. On y trouve en particulier les émulsions de bitume et les émulsions de bitume modifié avec des polymères, toutes variantes destinées aux enduits superficiels.

Les molécules doivent être sous forme de sel. Bien qu'il soit possible d'utiliser à cet effet différents types d'acides organiques : acétique, formique, lactique, on utilise pratiquement l'acide chlorhydrique compte tenu du minimum de contraintes découlant de son emploi.

➤ **Les émulsions cationiques à rupture moyenne (classe ECM) :**

Elles sont utilisées en pénétration ou pour l'enrobage de granulats, sans éléments granulaires fins.

➤ **Les émulsions cationiques à rupture lente (classe ECL) :**

Elles sont généralement utilisées en mélange, soit en poste d'enrobage soit en place à l'aide de matériels adaptés.

Elles interviennent dans les grave-émulsion et les enrobés à froid d'emploi immédiat de granulométrie O/D.

➤ **Les émulsions cationiques surstabilisées (classes ECS) :**

Elles sont destinées essentiellement à des techniques d'emploi par mélange. Un domaine typique est l'enrobé coulé à froid.

Pour différencier les émulsions cationiques des émulsions anioniques, on doit déterminer la polarité des particules de bitume qui dépend de la polarité de l'émulsifiant utilisé dans les émulsions de bitume.

On fait passer un courant continu à travers une émulsion de bitume placée entre deux électrodes à plaques parallèles.

Le dépôt d'une couche de bitume sur l'anode indique une charge négative : L'émulsion est donc anionique.

Le dépôt d'une couche de bitume sur la cathode indique une charge positive : L'émulsion est donc cationique.

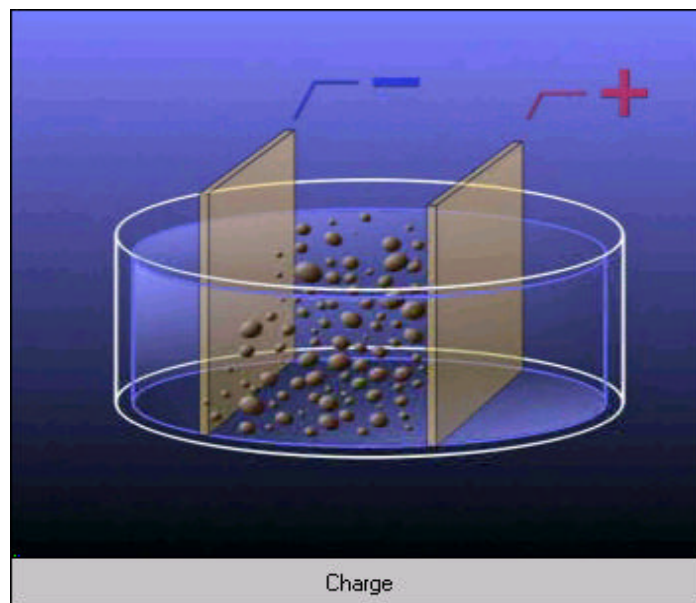


Fig I.7 : Détermination du signe charge d'une émulsion

Les émulsions cationiques sont moins mouillantes que les émulsions anioniques du fait de l'hydrophilie moins marquée des émulsifiants.

En fonction des granulats, calcaires ou basaltes (électropositifs), ou siliceux (électronégatifs), une bonne adhésivité du bitume est obtenue par des émulsions cationiques ou anioniques pour les premiers, et uniquement par émulsions cationiques pour les seconds. C'est la raison pour laquelle les émulsions anioniques sont très peu utilisées [10].

I.4.3- Caractéristiques physico-chimiques

On entend par caractéristiques physico-chimique :

- Le pH
- La granulométrie

I.4.3.1- Le pH des émulsion

Le pH d'une émulsion est une caractéristique de sa phase aqueuse après émulsification. Il peut être perturbé par des substances susceptibles de migrer d'une phase dans l'autre [17].

Le pH permet de mesurer l'état d'acidité d'une solution contenant un acide, une base ou un mélange des deux espèces.

La valeur du pH a une très grande importance, tant du point de vue stabilité que du point de vue adhésivité : on sait qu'en règle générale l'adhésivité des émulsions cationiques est plus grande pour des pH compris entre 3 et 5 que pour des pH inférieurs à 3, mais qu'au contraire la stabilité est meilleure pour des pH plus bas.

Il faut toutefois signaler que l'on rencontre des émulsions très stables bien que leur pH soit élevé; il suffit que la quantité d'émulsifiant salifié, soit suffisante ou que l'on utilise un stabilisant, ce qui dans la pratique est plus rentable.

Le pH d'une émulsion peut être déterminé par un galvanomètre (gradué en unité de pH) qui mesure la différence de potentiel entre une électrode de référence et une électrode de mesure, plongée dans la solution à tester.

Aujourd'hui les pH-mètres modernes ne possèdent plus qu'une seule électrode qui regroupe les deux fonctions.

I.4.3.2- La granulométrie

L'examen au microscope d'une préparation d'émulsion diluée fait apparaître, au sein de la phase aqueuse, des globules de bitume dont les dimensions sont étagées.

Plusieurs méthodes, permettent de déterminer le diamètre moyen des globules de bitume d'une émulsion [47]. Dans tout les cas, il s'agit d'évaluer la finesse de la dispersion du bitume dans l'eau.

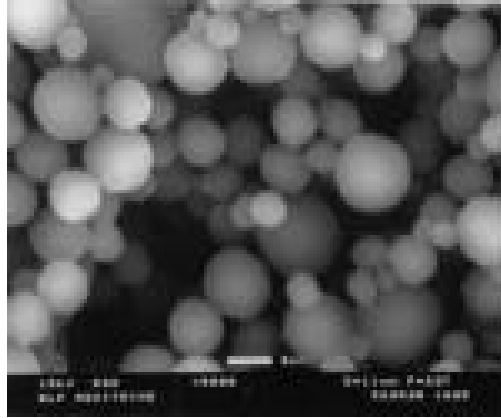


Fig I.8 : Vue au microscope d'une émulsion de bitume

Les méthodes les plus utilisées sont les suivantes :

- Les méthodes globales [63] : opacimétrie, hématimétrie.
- Les méthodes par dénombrement : tel le comptage avec l'appareil Coulter.

a- Méthodes globales

a.1- Méthode opacimétrie [37]

L'appareil utilisé, est un opacimètre qui permet de mesurer l'opacité qui est le coefficient d'affaiblissement de l'intensité de la lumière dans des conditions normalisées, de certaines surfaces ou de certains milieux vus en transparence.

L'opacité d'une suspension est en relation avec le diamètre moyen des particules par la relation :

$$\bar{d} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2}$$

Avec :

n_i : nombre de globules de diamètre d_i

\bar{d} : Diamètre moyen

Cette méthode simple à l'avantage de pouvoir être utilisée dans les usines pour contrôler la finesse de dispersion des fabrications industrielles.

a.2- Méthode hématimétrie

L'instrument utilisé s'appelle « Hématimètre de Thoma » il est destiné au dénombrement des globules de sang et est constitué principalement d'une lame de verre comportant en sa partie centrale un volume creux de dimensions connues, sur le fond duquel est gravé un quadrillage très fin. Par examen au travers d'un microscope optique,

on compte les globules situés dans un volume donné, ce qui permet de déterminer les caractéristiques quantitatives du sang.

Par extension, l'usage de l'hématimètre à été appliqué au comptage des globules des émulsions.

$$d = \sqrt[3]{\frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i}}$$

Avec :

n_i : nombre de globules de diamètre d_i

\bar{d} : Diamètre moyen

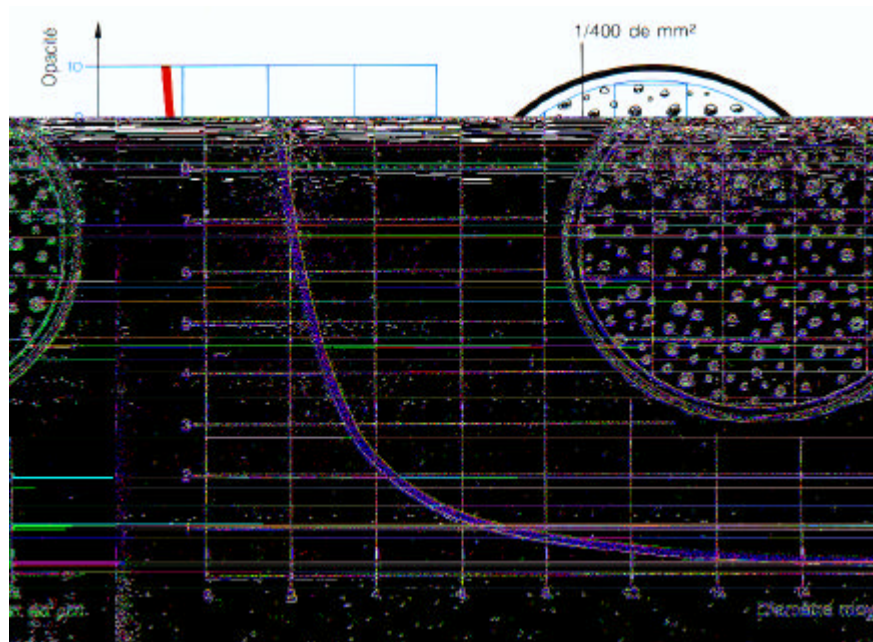


Fig I.9 : L'opacité en fonction du diamètre moyen

a.3- Méthodes par dénombrement de particules

Le compteur Coulter fournit directement la distribution granulométrique des globules qui très représentative, étant donné le grand nombre de particules comptées. La courbe granulométrique est en forme de S.

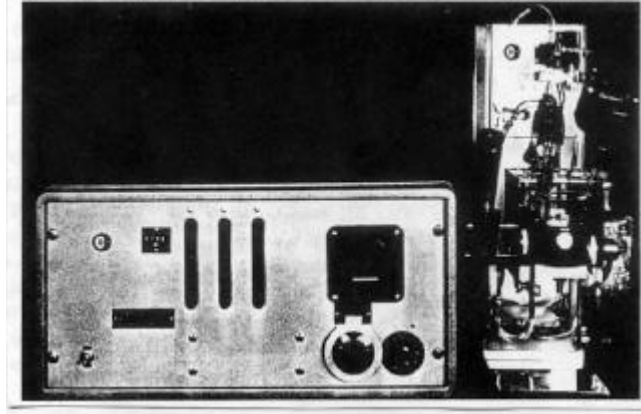


Fig I.10 : Le compteur Coulter – comptage granulométrique

La distribution granulométrique est caractérisé par une valeur du diamètre médian D , définie comme étant l'abscisse du point à 50 % sur la courbe granulométrique.

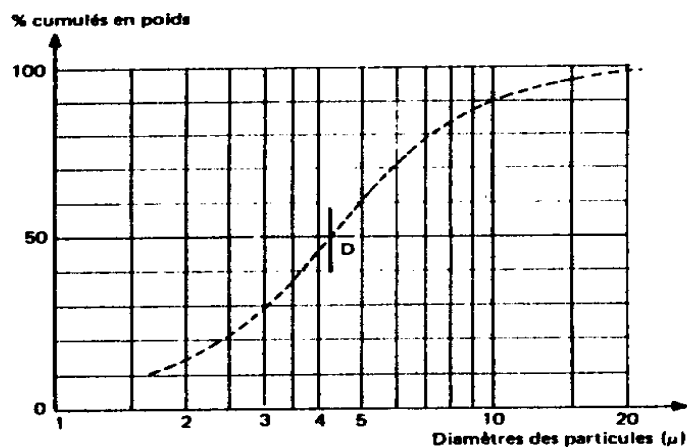


Fig I.11 : Analyse granulométrique d'une émulsion par comptage

Les méthodes globales ne fournissent pas la granulométrie des particules et ne permettent de connaître le diamètre moyen qu'après avoir mesuré par ailleurs la concentration de l'émulsion. De plus elles reposent sur l'hypothèse que toutes les particules ont le même diamètre ce qui n'est pas exact.

Alors que les méthodes par dénombrement de particules permettent de tracer toute la courbe granulométrique et d'en déduire, par calcul, tous les diamètres moyens désirés ainsi que le coefficient de dispersion.

La figure suivante montre un exemple d'un tracé de courbe granulométrique, pour différentes émulsions[48].

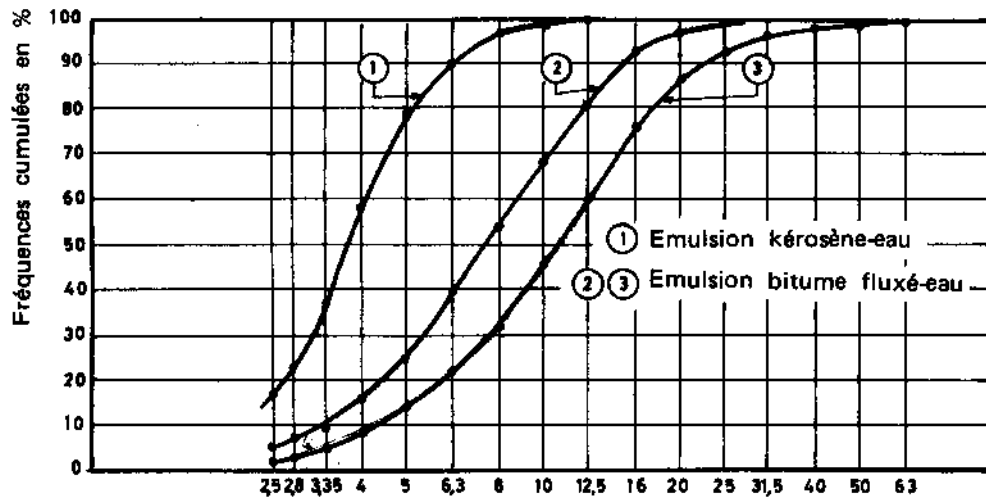


Fig I.12 : Courbes granulométrique pour différentes émulsions.

I.4.3.3- Facteurs influants la granulométrie

La finesse de dispersion d'une émulsion influence notablement les propriétés technologiques, en particulier :

- ✓ La viscosité : Une émulsion est d'autant plus visqueuse que sa granulométrie est plus serrée et qu'elle est plus fine.
- ✓ Adhésivité : Une émulsion de diamètre médian élevé rompt irrégulièrement et dans la plupart des cas, le bitume est déplacé par l'eau, car il n'y a pas eu formation d'un film continu.
- ✓ La stabilité au stockage et la rupture : Les émulsions les plus fines sont les plus stables et leur rupture est plus lente
- ✓ Nature de l'émulsifiant : La finesse des émulsions dépend de l'émulsifiant utilisé ; on peut, grâce à des études physico-chimiques (par tensiométrie, chromatographie ou mesure de constante diélectrique), apprécier le pouvoir émulsifiant des diverses substances chimiques et établir une relation entre la nature de l'émulsifiant et la granulométrie des émulsions.
- ✓ Quantité d'émulsifiant : La finesse de l'émulsion est d'autant plus grande que la quantité d'émulsifiant est plus importante. VOGT J.C. a définie une loi empirique reliant un diamètre moyen de l'émulsion à la quantité d'émulsifiant :

$$d = a \left(\frac{1}{C_m} \right)^n + b$$

Avec:

C_m : la concentration en émulsifiant

n : la constante qui dépend de la nature de l'émulsifiant

d : diamètre moyen des particules

a et b sont des constantes

ROWE E.J. (17) et RAMOND G. (18) ont défini une autre relation empirique :

$$d = M_0 - M_1 \lg c_m$$

Où :

M_0 et M_1 sont des constantes.

d et c_m ont la même définition que plus haut.

I.4.4-Caractéristiques technologiques des émulsions

On entend par caractéristiques technologiques, les paramètres suivants [61] :

- ✓ Stabilité
- ✓ Adhésivité
- ✓ Viscosité

I.4.4.1- La stabilité des émulsions

Les émulsions de bitume sont des dispersions liquides thermodynamiquement instables. Cette instabilité résulte de la tendance du système à minimiser dans le temps son énergie libre de surface, ce qui se traduit pratiquement par la diminution progressive de la surface interfaciale bitume-savon.

Une émulsion stockée, même de façon prolongée, doit conserver une dispersion homogène, ce qui signifie que ses constituants ne se séparent pas.

Une émulsion à stockage limité devra présenter une décantation inférieure à 5 % au bout de 15 jours à 3 mois.

Pendant les périodes ainsi définies, la conservation d'une émulsion doit pouvoir se faire sans risque. A tout moment une simple agitation suffit pour remettre en suspension les globules de bitume accumulés à la partie basse du réservoir.

La phase ultime de cette évolution est la séparation des constituants en deux phases séparées non miscibles.

Il est nécessaire de considérer deux sortes de stabilité :

- ✓ Stabilité au stockage
- ✓ Stabilité vis à vis des granulats

a- Stabilité au stockage

On distingue trois phénomènes qui sont les suivants:

- ✓ La décantation
- ✓ La floculation
- ✓ La coalescence

a.1- la décantation

La différence de densité des deux phases est un élément déterminant le phénomène de décantation dont la vitesse est régie par la loi de Stokes.

La décantation peut se traduire, soit par une sédimentation, soit par un crémage :

- **La sédimentation** : hétérogénéité de l'émulsion pour laquelle la teneur en eau diminue à la partie inférieure.

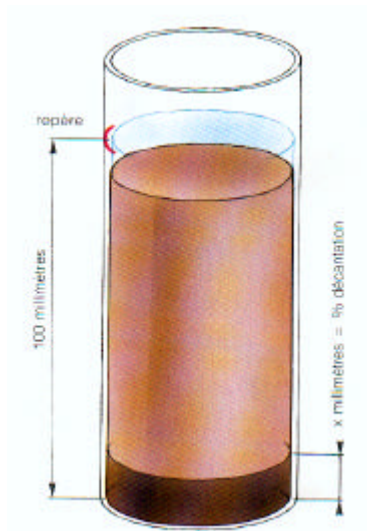


Fig I.13 : Décantation - sédimentation

- **Le crémage** : C'est le phénomène inverse de la sédimentation; hétérogénéité de l'émulsion pour laquelle la teneur en eau diminue à la partie supérieure.

La vitesse de décantation est donnée par la loi de Stokes qui a pour formule:

$$V = \frac{Dg(\rho_1 - \rho_2)}{18\mu}$$

Avec :

V : La vitesse de décantation.

D : Le diamètre du globule.

g : L'accélération de la pesanteur.

ρ_1 : Masse volumique de la phase dispersée (bitume).

ρ_2 : Masse volumique de la phase dispersante (phase aqueuse)

μ : Viscosité de la solution

On peut donc ralentir la décantation par :

- ✓ Une différence de masse volumique aussi faible que possible entre la phase dispersée et la phase dispersante. Les émulsion de bitume remplissent aisément cette condition, la densité de bitume étant de l'ordre de 1.02 ; ce n'est pas le cas des émulsions de goudron dont la densité est voisine de 1.25.
- ✓ L'augmentation de la viscosité de la phase dispersante tout en restant compatible avec les conditions d'emploi.
- ✓ L'augmentation de la finesse de l'émulsion.

a.2- La floculation

C'est le premier stade de la coagulation. Les particule s'agglomèrent mais ne perdent pas leur individualité, ce phénomène est encore réversible.

a.3- La coalescence :

C'est le second stade de la coagulation. Les particules agglomérées se combinent pour donner une particule plus grosse. Ce phénomène est irréversible.

Ces deux derniers phénomènes sont inséparables l'un de l'autre et c'est le plus lent qui détermine la vitesse de rupture.

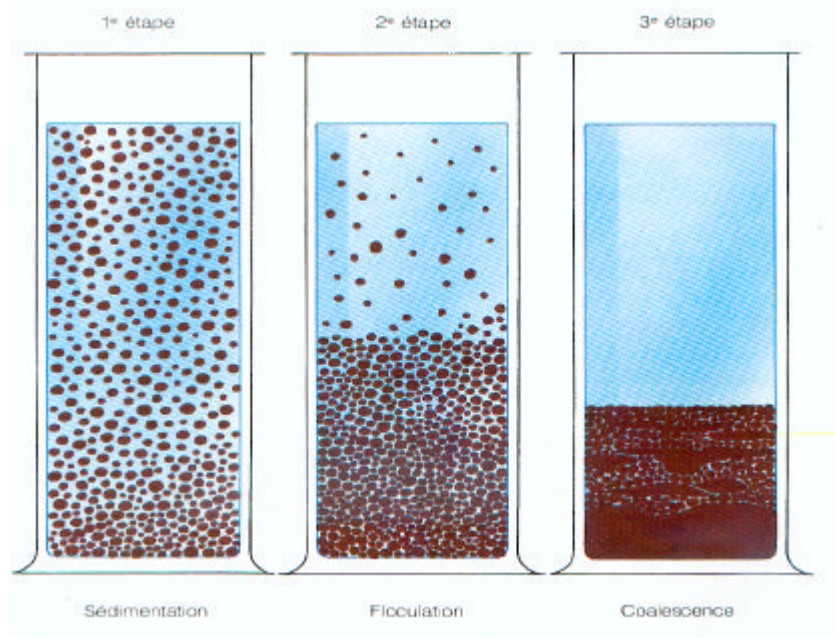


Fig I.14 : Les différentes étapes de la stabilité au stockage

En résumé l'amélioration de la stabilité sera obtenue préférentiellement par l'augmentation de la finesse de la dispersion.

Ainsi tous les facteurs qui agissent sur le diamètre des globules doivent être optimisés : Nature et dosage de l'émulsifiant, nature et puissance de l'appareil de dispersion, vitesse de passage des phases, différence entre la température de chaque phase, viscosité et cohésivité du liant à disperser.

L'expérience montre que pour des émulsions normales, les globules dont le diamètre est supérieure à 10 μm , compromettent la stabilité et qu'en revanche ceux dont le diamètre est inférieur à 1 μm jouent un rôle favorable.

Pour une émulsion anionique, un pH insuffisamment élevé, c'est-à-dire trop acide, fait reculer l'ionisation du savon. RCOO^- a tendance à se transformer en RCOOH , la répulsion électrique diminue et l'émulsion est instable (un phénomène analogue se produit pour les émulsions cationiques si le pH n'est pas suffisamment bas).

De plus, la force ionique du milieu influe fortement sur la stabilité de l'émulsion et un excès d'électrolyte fort peut amener l'instabilité : De trop larges excès de base dans une émulsion anionique, d'acide dans une émulsion cationique, de sels, peuvent amener la rupture.

Une émulsion stockable devra présenter une décantation inférieure à 5 % pour une période entre 15 jours et 3 mois.

b- Stabilité des émulsions vis-à-vis des granulats

La stabilité des émulsions de bitume vis-à-vis des granulats est une propriété fondamentale qui a fait l'objet d'un certain nombre de théories scientifiques expliquant rationnellement les mécanismes de la rupture.

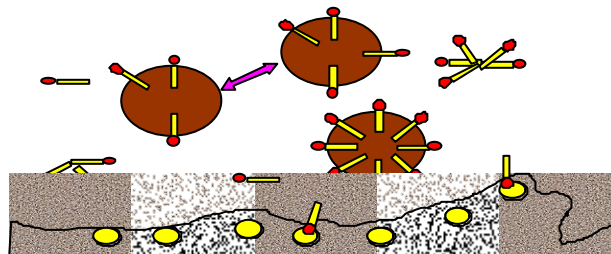


Fig I.15 : Processus de rupture

Il est difficile de répéter, en laboratoire, les phénomènes de rupture tels qu'ils se produisent au contact de la chaussée et des granulats, c'est pourquoi aucun essai ne traite simultanément tous les cas, mais fait intervenir séparément les facteurs qui influent sur le phénomène.

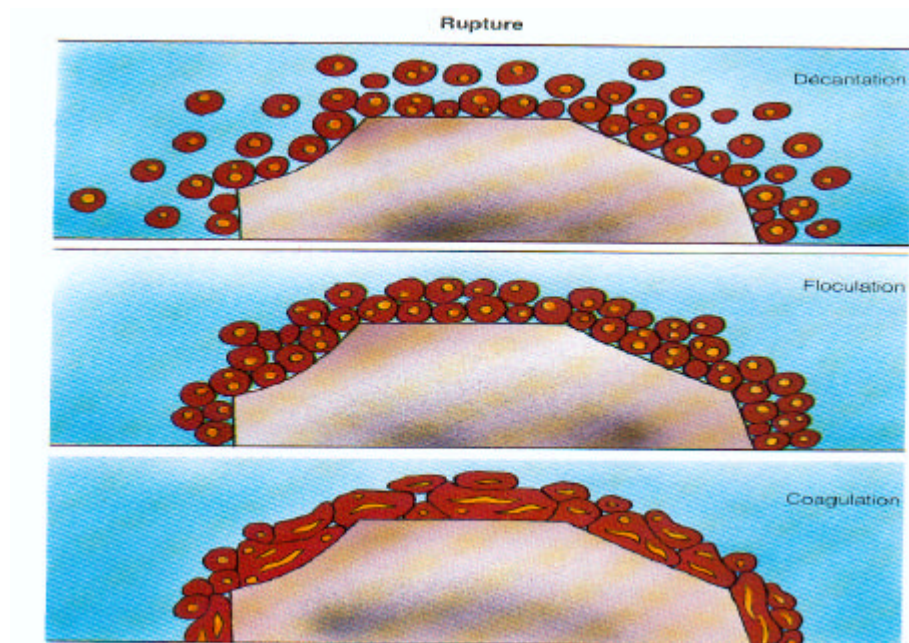


Fig I.16 : Etapes de la stabilité des émulsions vis-à-vis des granulats

La figure I.16 nous montre les étapes de la stabilité vis à vis des granulats (décantation floculation, et coalescence) traité auparavant dans la stabilité de l'émulsion au stockage. Arrivé au stade de la coalescence, deux phénomène de stabilisation débutent et qui sont les suivant :

b.1- Prise (setting)

Il s'agit du phénomène intervenant lorsque l'émulsion est en contact avec le granulat. Ce processus débute par la rupture aboutissant dans son stade final au départ de l'eau.

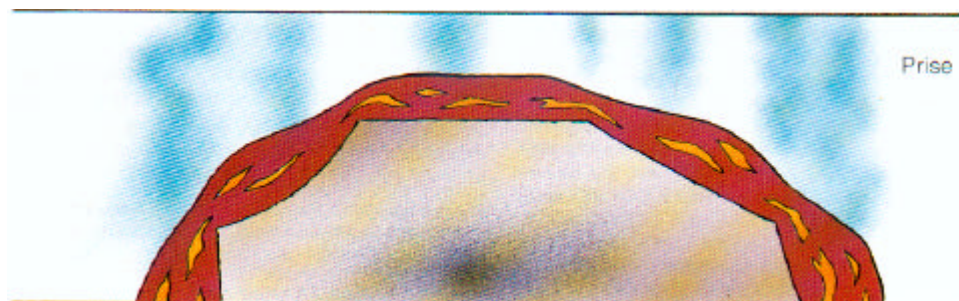


Fig I.17 : Schématisation du phénomène de la prise

b.2- Mûrissement (curing)

C'est la continuation et la fin du phénomène précédent (prise). Il se manifeste lorsque le liant anhydre de l'émulsion contient un diluant possédant des fractions légères. Ces dernières commencent par disparaître en même temps que l'eau.

La phase finale est celle où le liant résiduel n'est plus constitué que d'hydrocarbures non volatils.

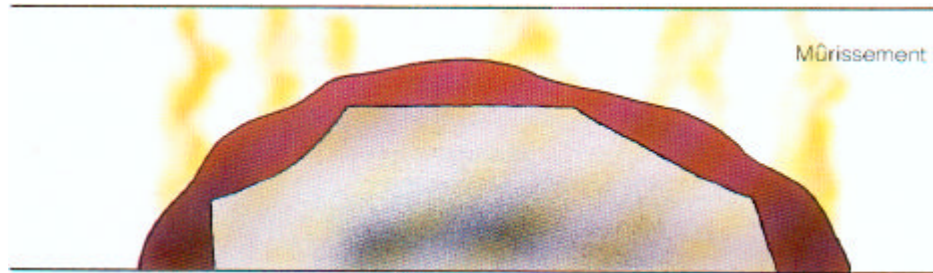


Fig I.18 : Schématisation du phénomène de mûrissement

On distingue trois méthodes qui ont été mises au point pour tenter de quantifier ce paramètre (rupture de l'émulsion), chacune présentant diverses variantes :

- ✓ Par contact de l'émulsion avec les granulats.
- ✓ Par évaporation de l'eau dans des conditions définies.
- ✓ Par action d'électrolytes qui jouent le rôle de flocculant

Parmi ces méthodes, nous examinons seulement la première, qui a été adaptée aux émulsions cationiques car elle a un avantage certain qui permet, par un seul essai de couvrir en technique routière la gamme complète de stabilité.

Cette méthode est mise au point pour quantifier le paramètre qui est la vitesse de rupture.

b.3- Vitesse de rupture

Une grande majorité des méthodes mises au point pour quantifier la rupture fait appel à un réactif qui peut être, soit une espèce chimique référencée, comme le chlorure de calcium, soit une substance minérale de caractéristiques spécifiées, comme le ciment ou les fines.

Nous présentons ci après une méthode permettant d'évaluer la rupture des émulsions. Cette méthode est basée sur l'activité d'une émulsion en présence de matériaux fins [25]. Elle permet de mesurer la vitesse de rupture d'une émulsion, dans des conditions normalisées vis à vis d'un matériau de référence, qui est le filler siliceux de composition chimique et granulométrique bien définies.

La méthode consiste à mesurer la masse de fines nécessaire à la rupture complète d'une quantité bien définie d'émulsion.

La classification des émulsions cationiques est donnée dans le tableau suivant :

Tableau I.3 : Classification des émulsions cationiques

Indice de rupture	Classification de l'émulsion
IR < 80	Rupture rapide
80 < IR < 120	Rupture semi-rapide
IR ≥ 120	Rupture lente

b.4- Stabilité au ciment

Cet essai est réservé aux émulsions dites surstabilisées qui doivent présenter un indice de rupture supérieur à 120.

La méthode consiste à mesurer la masse de bitume agglomérée par le ciment dans des conditions bien définies.

Dans tous les cas, le résultat devra être inférieur ou égal à 2.

c- Facteurs influant sur la rupture de l'émulsion

c.1- Facteurs liés à l'émulsion

- ✓ On sait que la vitesse de rupture des émulsions est inversement proportionnelle à la quantité d'émulsifiant. Elle varie de façon importante avec sa nature, en particulier avec le nombre de fonctions ioniques de la molécule : une diamine donne généralement, toutes choses restant égales par ailleurs, des émulsions à rupture plus rapide que celles fabriquées à l'aide de polyamines.
- ✓ Elle dépend aussi du pH de l'émulsion : pour les émulsions cationiques, la meilleure stabilité est généralement atteinte pour des pH bas.

A titre d'illustration, nous donnons un exemple dans le tableau I.3 :

Tableau I.4 : Variation de l'indice de rupture en fonction et de la nature de l'émulsifiant

pH	Indice de rupture	
	polyamine	Imidazoline
1.5	153	116
2.0	141	103
3.0	133	92
4.0	123	80
5.0	110	67
6.0	81	-
7.0	52	-

- ✓ Cette vitesse de rupture varie aussi avec les paramètres granulométriques des émulsions, diamètre médian: plus une émulsion est fine et mono-dispersée, plus elle est stable vis-à-vis du granulat. Le tableau N°4 : montre cette variation.

Tableau I.5 : Variation de l'indice de rupture en fonction de granulométrie

Diamètre médian en microns	Indice de rupture
3.0	> 120
4.60	176
5.60	163
9.70	96
20.00	45

- ✓ Les émulsions de bitume se caractérisent par la dispersion de globules de bitume dans une phase aqueuse (homogénéité).
L'homogénéité est évaluée par l'essai de tamisage dont les spécifications limitent le refus maximum exprimé en pourcentage par rapport à la masse totale de l'émulsion [41] :

- Tamis 630 μ m : Refus maximum 0,1 %
- Tamis 160 μ m: Refus maximum 0,25 %

La fraction retenue sur le tamis de 630 μ m représente des particules relativement sphériques, de dimension variables, généralement appelées « billes ».

Les plus souvent ces billes constituent un pourcentage très faible, presque nul ; dans le cas contraire, il peut se produire de graves inconvénients qui peuvent compromettre la qualité de l'application et révéler également l'existence de la dégradation d'autres caractéristiques telles que la stabilité, l'indice de rupture, l'adhésivité etc...

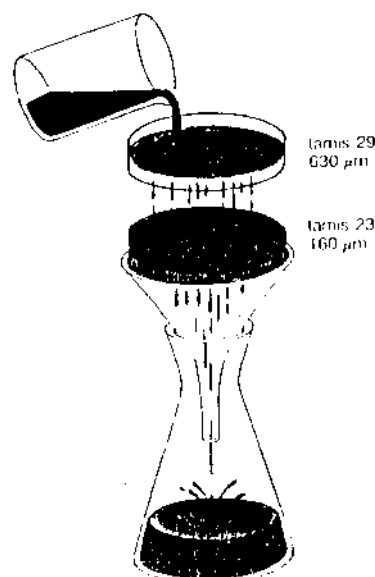


Fig I.19 : Homogénéisation de l'émulsion

c.2- Facteurs liés au granulat minéral

- ✓ La rupture dépend de la nature et de la granulométrie du matériau minéral. Il est bien connu qu'un granulat contenant une grosse proportion de fines amène une rupture beaucoup plus rapide qu'un granulat propre. Cela se conçoit parfaitement car la rupture est avant tout un phénomène de surface; de plus, les fines ont tendance à absorber de l'eau. ce phénomène est plus sensible dans le cas des émulsions cationiques.
- ✓ En face d'un cas donné de granulat minéral, il faudra donc agir sur les facteurs liés à l'émulsion (quantité d'émulsifiant, pH, granulométrie) pour contrôler la vitesse de rupture.

I.4.4.2 - Adhésivité des émulsions

L'adhésivité d'un bitume est l'une de ces propriétés principales du point de vue technologique. C'est l'affinité d'un liant pour un granulat.

On distingue deux types d'adhésivité :

- Adhésivité active
- Adhésivité passive

a- L'adhésivité active.

Il faut tout d'abord que le liant puisse entrer en contact avec les corps en présence, et particulièrement les gravillons, et pour ce faire il doit être non seulement suffisamment « liquide », ce qui est pratiquement toujours le cas, mais encore il doit être « mouillant ».



Fig I.20 : Adhésivité active d'une émulsion

b- L'adhésivité passive.

Si la première condition est remplie, il faut que les éléments restent collés entre eux, le liant et le granulat en particulier ne se séparent pas sous l'effet d'un agent perturbateur, tel que l'eau ; cette action se manifeste en particulier en présence d'éléments fins comme les fillers.

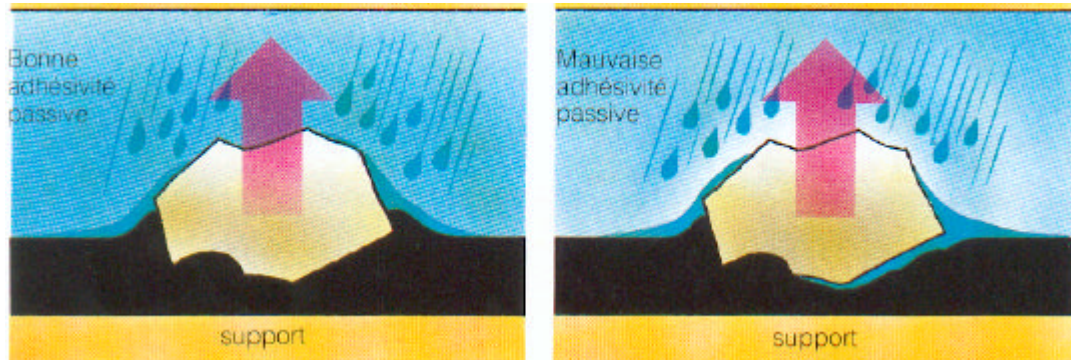


Fig I.21 : Adhésivité passive d'une émulsion

c- Facteurs influants l'adhésivité

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 : on peut s'apercevoir que l'adhésivité est améliorée par augmentation de la quantité d'émulsifiant ; mais on peut pas aller trop loin car on risque de rendre l'émulsion trop stable.
- ✓ Du pH de l'émulsifiant : Chaque émulsifiant a un intervalle de pH où l'adhésivité est la plus grande.
- ✓ De la granulométrie : L'adhésivité est d'autant plus grande que l'émulsion a tendance à la monodispersion.
- ✓ De la nature minéralogique du granulat : De sa propriété, de son humidité et de ses conditions de stockage.

I.4.4.3- Viscosité

La viscosité est la caractéristique d'un liquide de ne permettre le glissement moléculaire et la déformation du corps que sous l'action d'une force dont la grandeur est fonction de la vitesse de déformation et croît avec elle, pour les liquides purement visqueux, cette force s'annule lorsque la vitesse de déformation tend vers zéro.

Pour les émulsions on on parle de viscosité Engler qui est mesurée à l'aide d'appareils à écoulement par gravité du type Engler.

La viscosité de l'émulsion, mesurée à 25° C, exprimée en degrés Engler (° E), est le rapport entre la durée d'écoulement de l'émulsion (t) et la durée d'écoulement d'un égal volume d'eau (t₀) à la même température.

$$E = \frac{t}{t_0}$$

Selon la qualité de l'émulsion considérée, la viscosité est comprise entre les limites suivantes :

Tableau I.6 : Spécification sur la viscosité Engler

Qualité	Viscosité en °E	
	Minimale	Maximale
Fluide	2	6
Semi-fluide	6	15
Visqueuse	15	30

Pour des besoins spécifiques il est admis d'utiliser des émulsions présentant des viscosités supérieures à 30 °E, mais dans ce cas il est nécessaire de les employer à chaud.

Paramètres influants la viscosité

Les paramètres influant sur la viscosité sont les suivants :

- Concentration de la phase dispersée
- Concentration de la phase dispersante
- Sel dans le bitume
- La granulométrie
- La nature de l'émulsifiant
- Température

• Concentration de la phase dispersée

La viscosité des émulsions croit de façon exponentielle avec la teneur en bitume [19]. Cette croissance assez lente au début, devient très rapide lorsqu'on arrive aux teneurs généralement adoptées pour les émulsions de bitume.

Ainsi pour les teneurs en liant comprises entre 50 et 65 %, l'accroissement de la viscosité est peu important lorsque la concentration augmente.

En revanche lorsque, la teneur en liant dépasse la valeur de 65%, un faible accroissement de la concentration en liant entraîne une augmentation importante de la viscosité qui peut rendre délicat la fabrication et l'emploi des émulsions très concentrées.

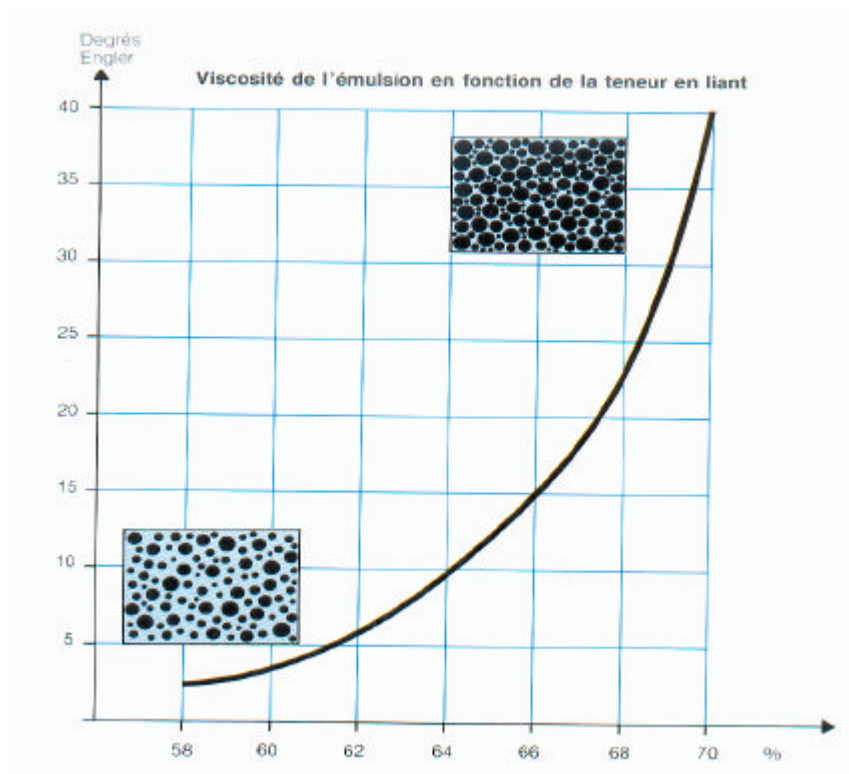


Fig I.22: Viscosité de l'émulsion en fonction de la teneur en liant

- *Viscosité de la phase dispersante*

La phase dispersante est constituée essentiellement par de l'eau enrichie en savon émulsifiant. De ce fait, la viscosité de cette phase n'est pas celle de l'eau, mais présente une valeur plus élevée, liée à la nature du savon.

Certains savons peuvent conduire à la formation de gels qui accroissent de façon considérable la viscosité de la phase aqueuse qui fait augmenter celle de l'émulsion.

- *Sel dans le bitume*

La viscosité d'une émulsion faite avec un bitume qui contient du sel soluble en quantité notable, présente une évolution importante dès la fabrication. Ce phénomène lié à la différence de pression osmotique entre la phase aqueuse et les globules de bitume peut rendre l'émulsion non pompable.

Ces anomalies de viscosité dépendent directement de la concentration du sel soluble renfermé dans le bitume et dans une moindre mesure de la nature du cation ainsi que de la dimension des cristaux.

Afin de limiter l'accroissement de la viscosité, il est recommandé de rétablir l'équilibre osmotique en introduisant du sel soluble (le plus souvent du chlorure de sodium) dans la phase aqueuse. Il faut veiller à ne pas compromettre la tenue de ces émulsions au stockage.

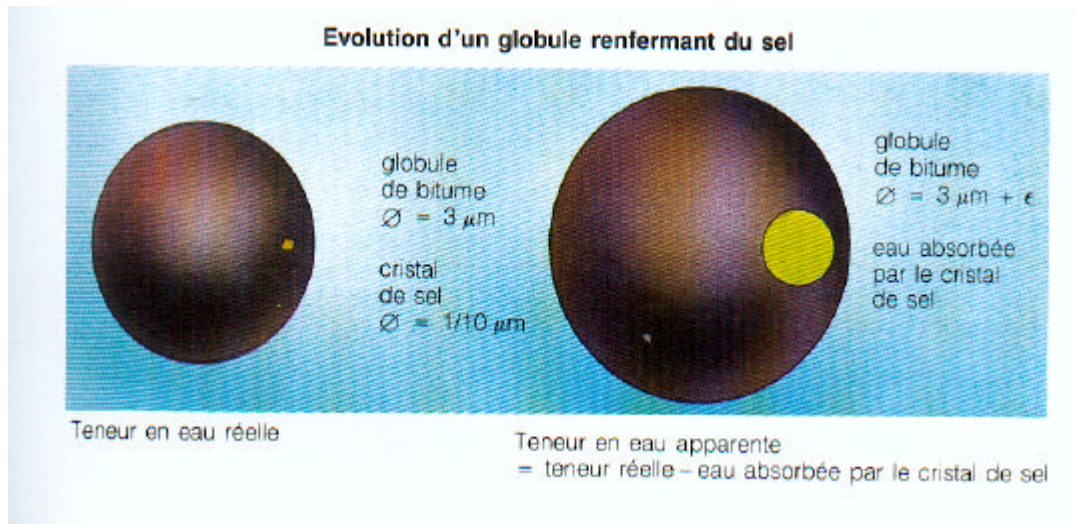


Fig I.23 : Evolution d'un globule contenant du sel

- *La granulométrie*

La viscosité est influencée par la granulométrie ; elle est d'autant plus importante que la courbe granulométrique est plus resserrée et que l'émulsion est plus fine.

- *La nature de l'émulsifiant*

Celle ci intervient de façon complexe puisqu'elle influe sur la granulométrie et la viscosité de la phase dispersante.

- *Température*

La viscosité d'une émulsion varie fortement en fonction de la température. Ce comportement porte le nom de susceptibilité thermique.

La susceptibilité thermique d'une émulsion se déduit de la mesure de la Pseudo-viscosité Engler à deux températures : 10 et 20 ou 20 et 40 °C. pour cela on calcule l'écart entre les valeurs de viscosité obtenue aux deux températures et on le rapporte à la valeur obtenue à 20 °C.

D'une manière générale, la viscosité augmente quand la température diminue.

La viscosité est une caractéristique importante qui intervient :

- ✓ Pour le transfert à travers les canalisations, le pompage et le répandage.
- ✓ Pour l'utilisation sur chantier :

- Un enduit superficiel exige une émulsion relativement visqueuse afin d'éviter les pertes de liant.
- Une imprégnation, exige une émulsion fluide, qui puisse pénétrer dans le corps de la chaussée.

I.5- Processus de fabrication

Le schéma ci-dessous indique le processus de fabrication d'une émulsion de bitume qui nécessite de rassembler en une usine un certain nombre de matériels spécifiques, selon la capacité des stockage et la nature des matières premières utilisées.

Une usine de fabrication d'émulsion doit disposer de :

- 1- Installation de réception et de stockage des matières premières,
- 2- Source de chaleur pour le maintien ou la mise à température d'utilisation des matières premières, des canalisations, des appareils de fabrication, des et des émulsions fabriquées.
- 3- Installation de fabrication.
- 4- Stockage de produits finis.
- 5- Installation de chargement d'émulsion en vrac et en fûts.
- 6- Moyen de pesage des produits livrés.
- 7- Laboratoire de contrôle.

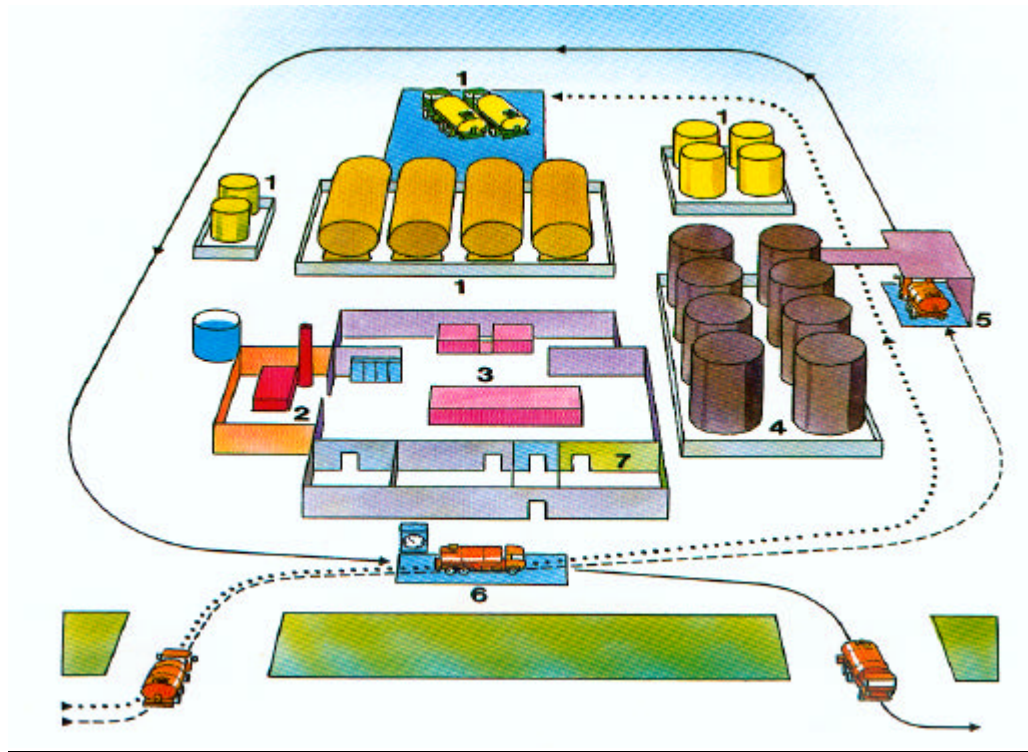


Fig I.24 : Composition de l'usine pour la fabrication de l'émulsion

I.6- Réception et stockage des matières premières

I.6.1- Bitumes

Les émulsions à fabriquer dans l'usine peuvent être à base de bitume de pénétrabilité différentes. Le nombre de réservoirs de stockage à mettre en place tient compte de l'importance de cette gamme de bitumes.

Le bitume peut être reçu par bateaux-citernes ou par wagons-citernes. La plupart du temps, son transport jusqu'à l'usine de production d'émulsion est effectué en camions-citernes gros porteurs calorifugés.

Les réservoirs sont soigneusement calorifugés et impérativement équipés de moyens de réchauffage.

I.6.2- Acide

L'acide est livré à l'usine, soit en touries, soit en vrac. Dans ce dernier cas, l'usine doit disposer d'un réservoir de stockage de capacité appropriée, construit en matériau résistant à la corrosion et installé dans une enceinte étanche.

Les équipements de réception, puis de transfert du réservoir à l'installation de fabrication sont conçus, mis en place et entretenus pour tenir compte du danger de manipulation de l'acide.

I.6.3- Emulsifiants

Les émulsifiants sont le plus souvent à l'état pâteux ou liquide à la température ambiante (certains sont solides). Leur livraison à l'usine se fait en conteneurs, en fût, en sacs ou en vrac.

I.6.4- Eau

L'eau destinée à entrer dans la composition des émulsions peut avoir des provenances diverses : réseau public, puits, etc.

Si le débit d'approvisionnement est faible, il est nécessaire de prévoir un stockage intermédiaire de capacité suffisante permettant de répondre aux besoins instantanés de l'installation de fabrication. Ce réservoir est parfois équipé d'un système de préchauffage.

I.6.5- Chaufferie

Le bitume quasiment solide à la température ambiante, nécessite, pour être véhiculé puis mis en émulsion, d'être maintenu ou porté à l'état liquide, il doit donc être réchauffé.

Par ailleurs l'eau entrant dans la composition de l'émulsion doit être introduite à une certaine température. Il faut donc disposer d'une source de calories.

Les moyens de chauffe utilisés actuellement sont :

- la vapeur.
- le fluide caloporteur.
- l'électricité (thermoplongeurs).

I.6.6- Poste de livraison des émulsions de bitume

En principe, une usine conserve un certain temps les émulsions qu'elle produit, elle dispose donc d'un certain nombre de réservoirs de capacité et d'équipement appropriés au stockage. Mais il arrive, que pour certaines fabrications spécifiques correspondant à des quantités limitées, il soit préféré un chargement direct de l'émulsion dans le matériel qui assure le transport vers le lieu d'utilisation.

Une usine dispose pour les livraisons en vrac, de points de chargements adaptés en nombre à ses besoins spécifiques et munis des dispositifs de sécurité prévus par la législation.

Les émulsions sont de plus en plus rarement conditionnées en fûts. Pour prévoir ce cas, l'usine dispose d'une installation d'enfûtage et dans le cas où cela s'avère nécessaire, de nettoyage des fûts vides.

I.6.7- Laboratoire d'usine

L'usine dispose du matériel de contrôle permettant d'effectuer les essais de conformité des émulsions fabriquées aux spécifications auxquelles elles doivent répondre et notamment la teneur en eau.

I.7- Fabrication de l'émulsion

La fabrication de l'émulsion s'opère en deux stades :

- ✓ Le premier est celui de la préparation des deux phases : phase liant et phase aqueuse à partir des différents constituants de base.
- ✓ Le second correspond à l'émulsification de la phase liant dans la phase aqueuse.

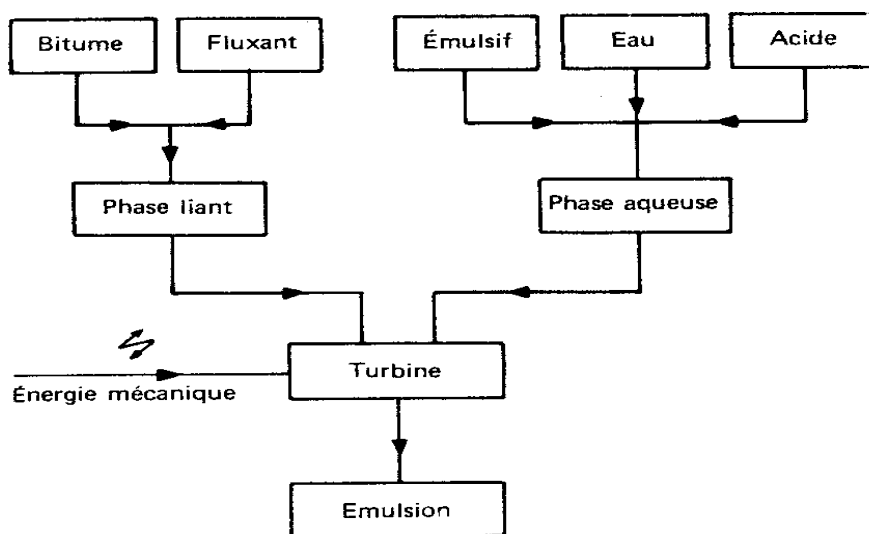


Fig I.25 : Schéma théorique de fabrication d'une émulsion

Les paramètres physiques : températures des phases, fluxage et teneur en liant ont une influence prépondérante sur les propriétés de l'émulsion [49].

Il est nécessaire, de calculer le bilan thermique à chaque changement de teneur en liant.

I.7.1- Préparation de la phase dispersée (liant)

Si le plus souvent le bitume est employé pur, il arrive parfois qu'une addition de fluxant soit nécessaire : c'est le cas des émulsions fabriquées en saison froide ou de certaines fabrication pour usages spéciaux.

Le fluxant peut se faire par admission directe du fluxant à l'entrée de la turbine. C'est le procédé le plus simple, mais le mélange du liant et du fluxant n'est pas intime et l'on risque fort d'aboutir à la superposition de deux émulsions : une émulsion de bitume et une émulsion de fluxant.

De la même manière on peut mélanger au bitume pur, un fluidifiant ou d'autres agents, par exemple des élastomères, il s'agit donc d'un bitume modifié.

Il semble préférable de préparer le liant à l'avance dans un malaxeur conçu à cet effet. C'est une opération supplémentaire, mais le résultat est beaucoup plus sûr qu'avec le procédé direct.

Pour que le liant se disperse bien dans la phase aqueuse, il est nécessaire de respecter les températures suivantes :

- Bitume pur 180/220 —————> 140° C.
- Bitume pur 80/100 —————> 150° C.
- Bitume pur 40/50 —————> 160° C.

I.7.2- Préparation de la phase dispersante (aqueuse)

La phase dispersante de l'émulsion de bitume est composée d'eau et de différents agents émulsifiants. La quantité adéquate d'émulsif est introduite dans un bac de préparation avec la quantité correspondante d'acide.

Remarquons à ce sujet que la plupart des émulsifs ne sont pas solubles dans l'eau, mais que c'est leur chlorhydrate qui l'est. c'est pourquoi il faut introduire l'émulsif et l'acide ensemble. On ajoutera une quantité d'eau pour éviter une réaction trop brutale.

Le stockage de l'acide en citerne permet de se servir de bacs-doseurs, ce qui diminue considérablement les risques d'accidents et les émanations de vapeurs toxiques.

certaines usines sont équipées d'un pH mètre permettant de vérifier en continu pendant la fabrication de la phase dispersante, puis de l'émulsion, la conformité entre le pH indiqué et celui défini par la formulation.

Suivant le mode de fabrication adopté, la phase aqueuse est préparée suivant deux processus qui sont les suivants :

a- Préparation directe

La cuve étant de dimensions appropriées, il suffit de compléter la cuve en une seule fois par l'acide , l'émulsifiant et la quantité d'eau nécessaire.

Le plus souvent le chauffage et le brassage de cette préparation sont assurés par une simple injection de vapeur vive (figure I.26).

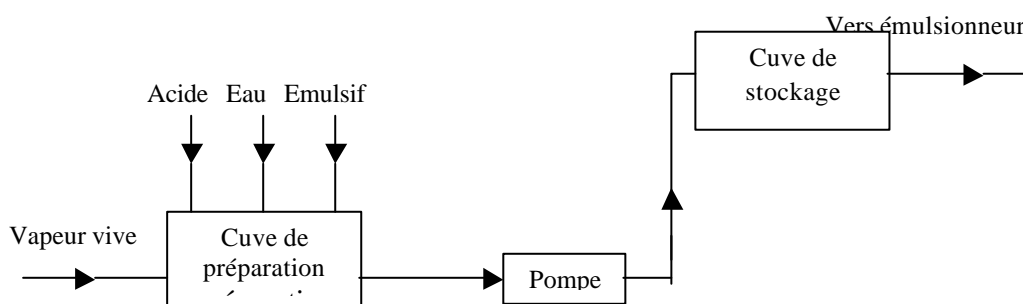


Fig I.26 : Préparation directe de la phase aqueuse

b- Préparation indirecte

On prépare une solution mère aqueuse concentrée en ajoutant à l'émulsif et à l'acide une partie de l'eau requise.

Cette solution mère est brassée mécaniquement, puis refoulée dans un autre bac où elle reçoit son complément d'eau et est portée à la température voulue.

L'intérêt de ce procédé réside dans le fait que la solution mère étant froide, il est possible de la refouler au moyen d'un élévateur-éjecteur, appareil beaucoup moins sensible à la corrosion qu'une pompe (figure I.27).

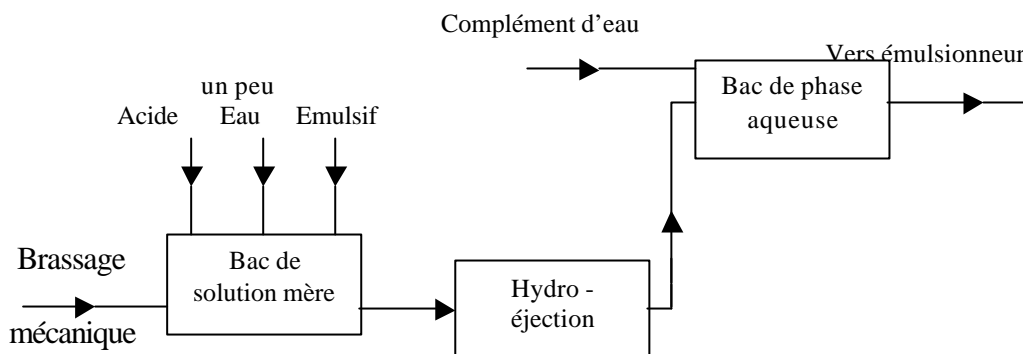


Fig I.27 : Préparation indirecte de la phase aqueuse

c- Mise de la température de phase aqueuse

La phase aqueuse doit être à une température telle que, à la sortie de la turbine, l'émulsion soit la plus chaude possible, tout en restant naturellement au-dessus de 100° C.

On peut alors faire un bilan thermique de l'opération, en tenant compte des chaleurs spécifiques des deux phases : Les calories perdues par le liant dont la température était de **B** sont reprises par la phase aqueuse qui se trouvait à la température **A**.

On prendra comme chaleurs spécifiques les valeurs approchées de 1 pour la phase aqueuse et de 0.5 pour le liant. On aura donc :

$$(B - 90) \times 0.5 \times b = (90 - A) \times 1 \times a$$

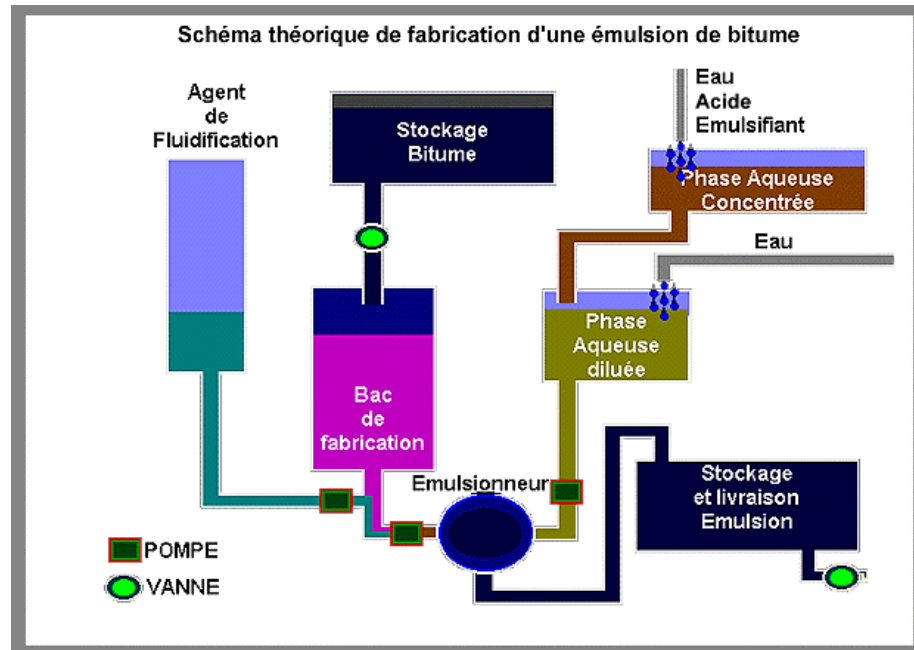
A et B sont en ° C.

Les constantes a et b étant les pourcentages respectifs de la phase aqueuse et de la phase de liant telle que (a + b = 100).

Connaissant **B** et la teneur en liant de l'émulsion, il est possible de calculer la température **A** à laquelle on doit porter la phase aqueuse.

I.7.3- Emulsification

La fabrication industrielle des émulsions fait appel à des appareils appropriés réalisant une agitation intense en vue d'obtenir des dispersions de finesse et de stabilité plus ou moins grandes. Elle se fait selon :



I.8- Paramètre de fabrication d'une émulsion

L'émulsion se forme en faisant arriver simultanément dans la turbine, le bitume et la phase aqueuse.

En laboratoire, on suppose que le matériel de fabrication et l'énergie disponible sont connus et suffisants.

Le liant est généralement imposé par la localisation, la densité de circulation et les conditions climatiques.

I.8.1- Energie de dispersion

La dispersion de l'émulsion est provoquée par une énergie mécanique et une énergie physico-chimique.

L'énergie mécanique divise le bitume en fines particules et la finesse de l'émulsion croît avec la puissance de fractionnement [18].

L'énergie physico-chimique apportée par l'émulsifiant doit :

- ✓ Abaisser la tension interfaciale entre la phase hydrocarbonée et la phase aqueuse pour faciliter l'émulsification .
- ✓ Créer un film protecteur autour des particules.

I.8.2- Viscosité et température des constituants

Comme on a déjà dit, pour que le liant hydrocarboné se disperse bien dans la phase aqueuse, il est nécessaire que sa viscosité soit relativement faible.

La température de l'émulsion à la sortie de la turbine ne doit pas dépasser 100°C pour éviter les moussage. Il est donc nécessaire d'établir un bilan thermique afin de déterminer la température de la phase aqueuse.

Ainsi, pour une émulsion à 60 % de liant, la température de la phase aqueuse sera choisie de façon à ce que la somme des température des deux phases, la phase aqueuse et la phase hydrocarbonée soit voisine de 195°C.

I.8.3- Dosage des constituants

Le dosage des constituants doit être d'une grande précision, en particulier celui des émulsifiants et de l'acide : une variation de ce dosage, même faible, peut avoir des conséquences importantes [67].

I.9- Principaux emplois des émulsions :

Les principaux emplois des émulsions sont les suivants [44] :

- ✓ Réparations par « point à temps » : l'émulsion doit être adhésive, relativement visqueuse et présenter une rupture rapide.
- ✓ 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.

I.10- Choix de la formulation des émulsions

Il n'y a guère de formulation type, la formulation doit être mise au point pour chaque bitume et chaque technique d'emploi.

Les propriétés techniques et physico-chimiques des émulsions sont choisies en fonction de leurs conditions d'emploi :

- Technique : répandage, enrobage, pénétration, etc....
- Matériel utilisé.
- Conditions climatiques.

On sait, par exemple, qu'une émulsion de répandage doit répondre aux caractéristiques suivantes :

- ✓ Rupture rapide (de l'ordre d'une demi-heure).
- ✓ Bonne adhésivité vis-à-vis de granulats secs ou humides.
- ✓ Viscosité suffisante pour que l'émulsion ne s'écoule pas avant rupture.

Bien entendu, ces exigences peuvent accepter plusieurs solutions et inversement une formulation peut satisfaire à plusieurs emplois. L'intervention du laboratoire consiste donc à définir les caractéristiques d'une émulsion en fonction de son emploi, puis à établir les règles de fabrication de cette émulsion.

Malheureusement cela pose parfois des problèmes complexes, car on exige très souvent des propriétés relativement contradictoires telles qu'une bonne stabilité au stockage et une rupture rapide sur les matériaux. La technologie de fabrication doit donc être étudiée pour aboutir aux meilleurs compromis possibles entre les diverses exigences de la technique routière.

L'étude de la formulation est destinée à choisir l'émulsifiant (nature et quantité) et son taux de neutralisation afin d'obtenir la meilleure granulométrie d'émulsion compatible avec la vitesse de rupture désirée. Cela peut amener à ajouter à l'émulsion terminée un stabilisant (tensioactif ou non).

I.10.1- Choix de l'émulsifiant

On sait que les émulsifiants n'ont pas tous la même efficacité du point de vue :

- Répartition granulométrique
- Stabilité au stockage
- Vitesse de rupture
- Adhésivité

Il faut donc choisir l'émulsifiant qui donne les propriétés optimales.

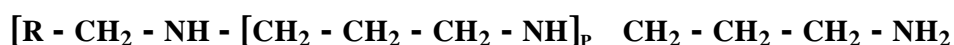
En pratique, le choix de l'émulsifiant se limite, pour les tensio-actifs cationiques, à trois types principaux :

I.10.1.1- Les amines grasses et leurs dérivés : diamines et polyamines

- ✓ Les amines grasses sont obtenues par amidation des acides gras, déshydratation des amides et hydrogénation du nitrile obtenu. Leur formule chimique peut être représentée par :



- ✓ Les polyamines sont obtenues par addition d'acrylonitrile sur l'amine inférieure :

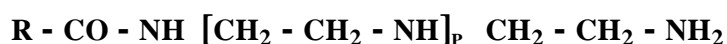


p variant de 0 à 2.

- ✓ Les monoamines sont peu utilisées sous forme d'émulsifiant.
- ✓ Les diamines et les polyamines constituent la majeure partie des émulsifiants cationiques routiers.
- ✓ Les diamines sont surtout utilisées dans la fabrication d'émulsions à rupture rapide ou semi-rapide, mais peuvent également servir de base à certaines formulations d'émulsions à rupture lente. Elles donnent des émulsions possédant une excellente granulométrie ; l'adhésivité du bitume résiduel est bonne.
- ✓ Les polyamines sont surtout destinées à la formulation à rupture lente. Le bitume résiduel est généralement adhésif.

I.10.1.2- Les amidoamines

Elles sont obtenues par réaction entre un acide gras et une polyamine ne comportant pas de chaîne grasse :



I.10.1.3- Les hétérocycles azotés du type imidazoline

Ce sont des condensations d'amidoamines sur elles même :

Les amidoamines et les imidazolines sont surtout utilisées pour les émulsions à rupture rapide. Elles confèrent à l'émulsion une bonne adhésivité, mais la stabilité au stockage est inférieure à celle obtenue avec les diamines.

Ces produits ont l'avantage subsidiaire de se présenter sous forme fluide et sont, par conséquent, d'un emploi très aisé.

I.10.2- Quantité d'émulsifiant :

Le choix de l'émulsifiant étant fait en fonction des classes d'émulsions (rapide, semi-rapide et lente), la quantité d'émulsifiant est déterminée par les conditions réelles d'utilisation :

- Nature et granularité du matériau pierreux.
- Nature du bitume.
- Conditions climatiques.
- Matériel de mise en œuvre.

Comme le montre le tableau suivant , l'augmentation de la quantité d'émulsifiant permet l'enrobage de matériaux de plus en plus fillérisés.

Tableau I.7 : Influence de la quantité d'émulsifiant en fonction du pourcentage de fillers

Dosage en diamine (Kg/t)	Indice de Rupture (IR)	Essais d'enrobage		
		6/10mm	6/10m (1)	0/12,5 mm (2)
1,6	< 80	Bon	Mauvais	—
2,5	80 < IR < 120	Bon	Bon	mauvais
6,0	≥ 120	—	Bon	Bon

(1) 6/10 mm contenant une quantité de filler ≤ 1 %.
(2) Formule granulométrique d'un béton bitumineux grenu 7 % de filer.

Pour une même formule granulométrique, un malaxage lent demande une émulsion plus stable et nécessite par conséquent une légère augmentation de la teneur en émulsifiant.

Les conditions climatiques peuvent aussi obliger à de légères modifications de formulation : on sait, par exemple, que la chaleur et le vent accélèrent la rupture.

En principe, comme nous l'avons vu plus haut, les paramètres de fabrication doivent être adaptés aux bitumes utilisés.

Toutefois, il est possible, par augmentation de la teneur en émulsifiant, de compenser la défaillance d'un des paramètres physiques de fabrication ; mais ce procédé n'est pas recommandé car il est fort onéreux et de pratique délicate (problème d'adhésivité et de vitesse de rupture).

I.10.3- Neutralisation de l'émulsifiant

L'émulsifiant, doit être sous forme de sel. La salification doit être faite avec précaution pour aboutir à une phase aqueuse de pH déterminé.

Le taux de neutralisation (quantité d'acide ajoutée par kilogramme d'émulsifiant) a une influence importante sur les caractéristiques des émulsions. Une augmentation de la quantité d'acide améliore la stabilité au stockage et retient la rupture.

A titre d'exemple le tableau suivant montre l'influence de pH sur l'indice de rupture d'une émulsion. Mais cette augmentation de la quantité d'acide peut aussi diminuer l'adhésivité. Aussi n'est-il pas recommandé, d'augmenter la stabilité d'une émulsion en y ajoutant un trop large excès d'acide.

Tableau I.8 : Influence de pH sur l'indice de rupture d'une émulsion

pH de la phase aqueuse	Indice de rupture (filler siliceux)	
	Amidoamine	polyamine
1,5	116	149
1,8	106	146
2,0	103	137
2,5	96	128
3,0	92	124
4,0	80	119
5,0	67	115
6,0	—	113

I.10.4- Stabilisants

Dans certains cas particuliers, il peut être intéressant d'augmenter le temps de rupture d'une émulsion déjà fabriquée.

On emploie, à cet effet, un corps chimique qui sera soit un électrolyte inorganique, soit un véritable stabilisant organique tel que chlorhydrate de polyamine, sel d'ammonium quaternaire, chlorhydrate d'amine éthoxylénée, etc. (tableau I.9)

Tableau I.9 : Variation de l'indice de rupture d'une émulsion due à une addition d'électrolyte

Dosage en électrolyte (g ‰ d'émulsion)	Indice de rupture	
	Cl ₂ Ca	Cl Na
0	114	114
1	132	136
3	137	140
5	129	134
10	125	125
15	120	125

Cette technique étant utilisée pour les émulsions d'enrobage, l'électrolyte est en fonction de la nature minéralogique des matériaux.

I.11- Méthode de formulation

En pratique, le déroulement d'une étude de formulation peut se schématiser selon les indications données ci-après.

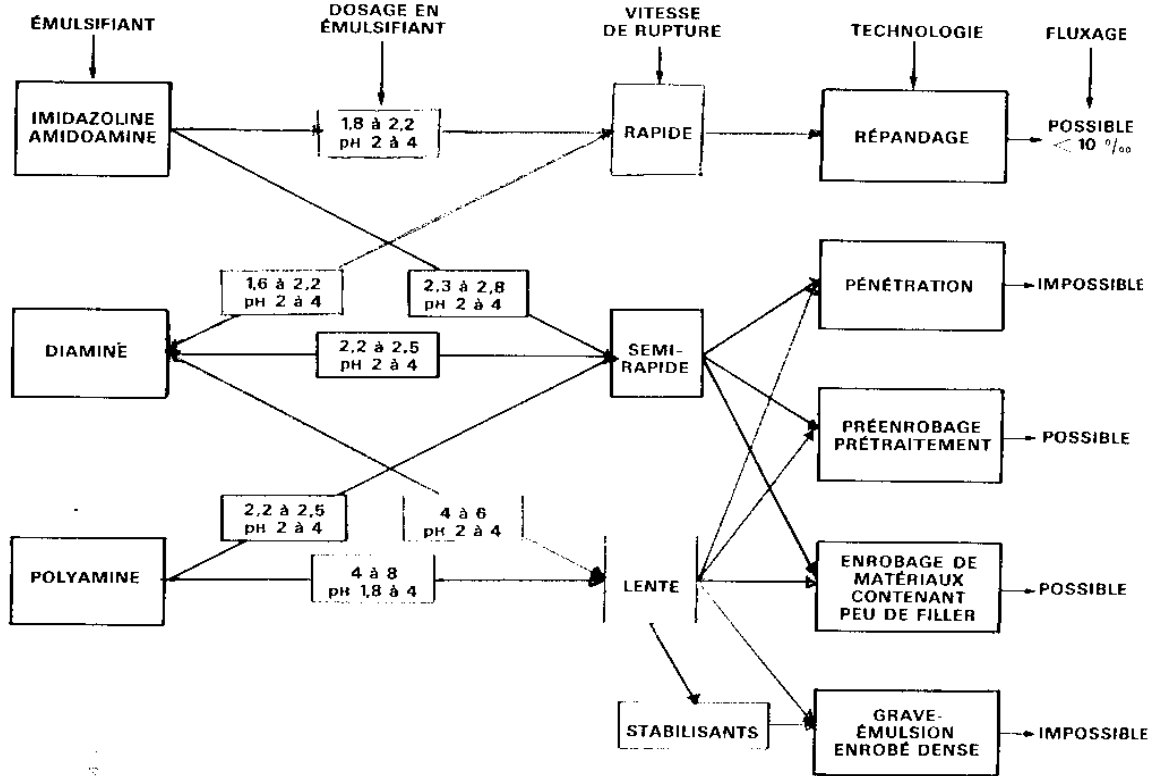


Fig I.29 : Technologie du déroulement d'une étude de formulation

Selon la technologie recherchée, on veillera à respecter les points suivant :

- ✓ Les émulsions de répandage ont pour qualité essentielle la rapidité de rupture et l'adhésivité. leurs émulsifiants doivent donc être choisis en fonction de leur prix, de leur efficacité et de leur pouvoir adhésif.
Aussi utilise-t-on dans la pratique des diamines, des amidoamines et des midazolines en excluant les substances trop stabilisantes.
Pour la fabrication d'émulsions susceptibles d'être stockées en usine, il est préférable d'employer des diamines, celles-ci conduisant à des émulsions plus fines et donc moins sujettes à la décantation.
- ✓ Les émulsions de pénétration doivent avoir une viscosité particulièrement étudiée pour bien percoler le corps de chaussée, tout en évitant de se concentrer à la partie inférieure.

- ✓ Le principal but des émulsions de prétraitement ou de pré-enrobage est l'obtention de matériaux hydrophobés de façon permanente, ces émulsions doivent donc former, sur les granulats, un film mince et très adhésif.
Elles peuvent être de classe semi-rapide ou lente, suivant la nature et la propreté des matériaux à traiter.
- ✓ On utilisera donc les trois types d'émulsifiants et les pH seront généralement élevés afin de faciliter l'adhésion. le liant sera le plus souvent fluidifié ou fluxé pour permettre un meilleur étalement du film résiduel. La concentration peut varier dans des proportions considérables, ces émulsions étant très souvent diluables à l'eau [22].
- ✓ Pour l'enrobage on peut utiliser des émulsions à rupture semi-rapide ou lente formulées à partir des trois familles d'émulsifiants.
Celles destinées aux grave-émulsion et aux enrobés denses seront des émulsions à rupture lente auxquelles il est parfois nécessaire d'ajouter un stabilisant.
Bien que les polyamines soient des stabilisants plus puissants que les diamines, il est souvent nécessaire de les employer en quantités plus élevées, leur pouvoir émulsifiant étant moindre.

Rappelons, en outre, qu'en aucun cas le formulateur ne doit sacrifier l'adhésivité (passive et active) à l'amélioration de la stabilité ; cela entraîne évidemment une contrainte supplémentaire lors du choix de la nature de l'émulsifiant, du stabilisant et de leur taux de neutralisation.

Par ailleurs le fluxage, déconseillé pour les émulsions pour pénétration, grave-émulsion et enrobés denses, ne doit être utilisé, en vue d'autres applications, qu'à la seule fin de faciliter l'étalement du film de bitume.

Il ne saurait être le palliatif du mauvais choix des paramètres physiques de l'émulsification.

I.12- Conclusion

Les paramètres de fabrication de l'émulsion tels que les températures des constituants et la pression jouent un rôle significatif sur les caractéristiques de l'émulsion et donc ses propriétés au stockage et à l'application.

Il est donc important de bien maîtriser non seulement la formulation de l'émulsion mais également les paramètres de fabrication.

L'optimisation des facteurs d'extraction depuis la fabrication au laboratoire jusqu'à la fabrication en usine va permettre d'aller en ce sens, tout en rendant plus efficace la mise au point des produits nouveaux

La formulation des émulsions cationiques, qui est la plus répondeuse se présente actuellement sous deux aspects différents :

a) Adaptation d'une formule à des conditions locales particulières. Ces adaptations sont nécessaires pour les trois classes d'émulsions rapides, semi-rapide et lentes.

Elles sont généralement effectuées par une simple variation de la teneur en émulsifiant ou en acide.

b) Obtention d'une formule d'enrobage spécifique à un matériau considéré. Il s'agit alors véritablement d'une recherche particulière pouvant nécessiter une étude du granulat et un examen plus approfondi de sa partie fillérisée, sur le plan minéralogique et granulométrique.

De telles formulations nécessitent souvent l'utilisation de stabilisants, leurs efficacité sont testées par les essais d'enrobage correspondant à la technique utilisée.

Dans un avenir proche, ce type de recherche augmentera en fréquence et en volume car il conditionne les fabrications d'enrobés denses à froid en emploi général; de plus leur mise au point seront plus délicates que celles concernant les graves-émulsions ou les enrobés denses à froid pour réparations ponctuelles.

L'étude des formulations des émulsions, est particulièrement des émulsions spéciales, suppose une recherche préalable des conditions physiques et mécaniques optimales de l'émulsification, les améliorations des caractéristiques des émulsions par voie chimique étant relativement onéreuse.

Elle suppose également un contrôle rigoureux des matières premières : bitume, émulsifiant, acides et des émulsions terminées, car il serait absurde de rechercher à grands frais une formulation excellente qui ne serait appliquée que de façon très aléatoire.

Chapitre II : Etude des enrobés à froid

II.1- Introduction

Le développement de la circulation routière, notamment celle de la circulation lourde, a conduit les ingénieurs chargés de la construction et de l'entretien à utiliser de plus en plus fréquemment des matériaux traités pour réaliser le corps de chaussée. Cette pratique permet un emploi aussi rationnel que possible des granulats de qualités

La découverte du pétrole en 1848, qui va favoriser l'essor de l'automobile au début du 20^{ème} siècle, va de même faire apparaître un concurrent de poids au goudron : le bitume .

Dés 1896, les premiers dérivés du pétrole sont répandus sur les chaussées .En 1903 ,apparaît le terme «émulsion» qui définit des huiles lourdes émulsions nées et saponifiées avec des eaux ammoniacales.

Dans la terminologie actuelle et par opposition aux enrobés à chaud, les matériaux sont dit traités à froid, quand au moment de leur élaboration, les matériaux ne subissent pas une brusque et nette élévation de température qui a pour but de les déshydrater et de les chauffer.

Le choix des constituants et la formulation des enrobés à froid ne font actuellement l'objet d'aucune spécification de composition. Ils sont faits par l'entreprise qui s'appuie sur des essais fondamentaux et sur son expérience des chantiers réalisés. Il s'accordent pour recommander le respect de la qualité de la chaussée.

Les ingénieurs routiers ont fait face à ces problèmes techniques des enrobé à froid [27] en se basant sur des expériences au laboratoire et sur chantier, et ont put faire des progrès qui ont conduit à l'obtention d'enrobés à froid d'un niveau de performance équivalent à celui d'un enrobé à chaud.

II.2- Avantages et inconvénients des enrobés à froid

Les enrobés à froid présentent des avantages et des inconvénients suivants [58] :

II.2.1- Avantages des enrobés à froid

- ✓ Les enrobés à froid présente [33] une grande souplesse d'emploi, en effet ils peuvent à volonté être stockables ou non, ils s'accommodent pour leur fabrication, d'équipements simplifiés par rapport à ceux utilisés pour les enrobés à chaud. Ce sont souvent des postes mobiles ou déplaçables à proximité de leur lieu d'utilisation. Ils sont applicables avec les engins mécanisés traditionnels de type finisseur et des matériels simples comme la niveleuse.
- ✓ L'enrobage des matériaux à l'émulsion ne nécessitant pas de séchage préalable, il en résulte une économie de chauffage et de transport dans la mesure ou les installations de fabrication peuvent être rapprochées du lieu d'utilisation.

- ✓ L'enrobage à froid évite par ailleurs un vieillissement du liant au cours de l'enrobage et de ce fait permet un meilleur contrôle des propriétés de celui-ci.
- ✓ L'enrobage à température ambiante en milieu humide limite l'émission de poussières et de fumées contribuant aussi à sauvegarder l'environnement et la santé.
- ✓ Bien que n'étant pas encore normalisés, les enrobés denses à froid permettent d'atteindre des performances mécaniques voisines de celles des enrobés à chaud de même catégorie.
- ✓ Les enrobés à froid sont des enrobés dont l'emploi peut différer. Pendant la durée de stockabilité, variable, mais qui n'excède en général pas trois mois, l'enrobé stocké en tas doit rester maniable aux températures ambiantes dépassant 0°C et ne pas être altéré par la pluie ou le gel.

II.2.2- Inconvénients des enrobés à froid

Malgré ces avantages, les enrobés à froid se développent lentement. Les raisons principales suivantes peuvent être invoquées :

- ✓ Les enrobés à froid ont une caractérisation de propriétés difficile. Il n'existe pas en effet de méthodologie simple et adaptée aux enrobés à froid comme il en existe pour les enrobés à chaud.
Il est donc impossible d'attribuer aux matériaux des caractéristiques mécaniques précises et ce d'autant plus qu'elles évoluent au cours du temps.
- ✓ Sur le chantier, le temps d'obtention des propriétés définitives est long ; il peut prendre plusieurs mois durant lesquels les propriétés mécaniques sont faibles par rapport à celles des enrobés à chaud, alors que pour ceux-ci les propriétés définitives sont obtenues dès refroidissement
- ✓ Enfin, le mode de fonctionnement des enrobés à froid sur la chaussés, sous trafic, est mal connu et, de ce fait, il n'existe pas de méthode de dimensionnement rationnelle permettant de calculer l'épaisseur des couches à mettre en œuvre en fonction de la durée de vie désirée, l'intensité du trafic, la portance du sol, etc....

II.3- Domaine d'emploi

Attachons-nous maintenant à énumérer les domaines d'emplois des enrobés à froid à l'émulsion de bitume.

II.3.1- Les usages particuliers

Les usages particuliers les plus couramment effectués avec l'enrobé à froid à l'émulsion de bitume sont les suivants:

➤ **Les aires de jeux**

Une très grande utilisation des enrobés à l'émulsion a été trouvée dans la construction des aires de jeu (tennis, frontons, etc....).

➤ **Les travaux particuliers**

Très largement utilisés par les entreprises routières, les enrobés à l'émulsion de bitume, noirs ou colorés dans la masse, sont employés pour la confection des accès de pavillons ou des voiries privées.

Notons l'apparition d'enrobés de toutes les couleurs avec l'utilisations de bitume clair.

➤ **Les massifs drainants compressibles**

En particulier pour le soubassement des réservoirs métalliques.

➤ **Les réparations provisoires**

La capacité de déformation sans désordre grave permet l'utilisation des enrobés à froid, en général ouverts, pour remblais de tranchées.

La réparation est effectuée en pulvérisant du liant sur la partie défectueuse ; après cette pulvérisation on épand des granulats. Dans le cas de réparations profondes, on intercale plusieurs couches de liant et de granulats. Les matériaux utilisés sont généralement des matériaux de classes granulaires 2/4, 4/6 et 6/10.

II.3.2 - Les usages routiers

L'enrobé à froid à l'émulsion de bitume est maintenant utilisé en technique routière pour :

➤ **Les reprofilages**

Le reprofilage est défini comme une technique d'entretien d'une chaussée consistant à améliorer son uni ou son profil pour que l'eau puisse s'évacuer normalement de la chaussée. Il est utilisé en épaisseur faible mais variable de 0 à 15 centimètres [11].

Il participe aussi à homogénéiser les surfaces par traitement des points bas ressuyants.

Les matériaux traités à l'émulsion de bitume utilisés pour le reprofilage de la couche de surface sont :

- Grave émulsion 0/14
- Enrobé à froid dense 0/6 + enduit monocouche 4/6.
- Enduit superficiel tricouche 10/14.

➤ **Les couches de roulement**

Les enrobés sur couche de roulement peuvent être appliqués sur des épaisseurs très variables (de 3 à 22 cm). Ils présentent une drainabilité permanente.

Le tapis présente un bon comportement même s'il est de faible épaisseur et repose sur un support compressible.

➤ **Les couches de base.**

La couche de base apporte à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic.

L'enrobé appliqué pour les couches de base, est soit un enrobé à froid dense soit de la grave émulsion.

➤ **Les pénétration**

Cette technique consiste à stabiliser un empierrement à l'aide d'une émulsion. Les pénétrations sont utilisées sur les voies à faible trafic et permettent de réaliser des couches de base et de roulement ainsi que des renforcements. Les épaisseurs des couches réalisées varient de 5 à 10 centimètres.

➤ **Imprégnations**

L'imprégnation a pour but de stabiliser la partie supérieure d'une assise constituée de grave non traitée. Cette opération permet d'améliorer le transfert des efforts mécaniques entre la couche de roulement et l'assise; par ailleurs la surface de celle-ci se trouve ainsi imperméabilisée et rendue hydrophobe.

➤ **Les enrobés pour entretien courant**

Conditionnés en sac, ces enrobés à froid généralement additives par des élastomères, sont utilisés pour des petites réparations (entourage de regards, dégradations de chaussées béton).

➤ **Enduits de cure**

Le but d'un enduit de cure est d'imperméabiliser la surface de graves traitées aux liants hydrauliques et d'empêcher la dessiccation des centimètres supérieurs. L'émulsion est parfaitement adaptée à cet emploi car elle seule permet la réalisation d'un film très mince de bitume résiduel, ce qui est difficile à réaliser avec des liants anhydres.

➤ Couches d'accrochage

On emploie également les émulsions pour la réalisation des couches d'accrochage. Ces couches d'accrochage assurent une meilleure liaison entre un support et une couche de béton bitumeux.

II.4- Classification des enrobés à froid

Les enrobés à froid sont classés selon différentes catégories. On distingue :

- Les enrobés denses à froid (EDF).
- Les enrobés semi-denses à froid (EDSF).
- Les enrobés ouverts à froid (EOF).
- La Grave émulsion (G E).
- Les Enrobés coulés à froid (ECF).
- Les Enduits superficiels (ES).
- Les sables bitume (SB)

Les classes granulaires utilisées pour les différentes catégories citées plus haut figure dans le tableau ci après [5] :

Tableau II.1: Classe granulaire par rapport aux différentes catégories d'enrobés à froid

Catégorie d'enrobés	Classe granulaire
EDF	0/6-0/10-0/14-0/20
EDSF	0/6-0/10-0/14-0/20
EOF	2/4-4/6-6/10-10/14
GE	0/6-0/10-0/14-0/20-0/30
ECF	0/4-0/6-0/8 ou 0/10
ES	2/4-4/6-6/10-6/14

II.4.1- Enrobés denses à froid (EDF)

II.4.1.1- Définition

Depuis plusieurs années s'est développée , principalement au travers d'actions de recherche , la technique des enrobés denses à froid à l'émulsion de bitume[2].

L'intérêt porté à cette technique a été motivé par l'excellente tenue des réparations des chaussées effectuées au point à temps dans des sites très difficiles (montagne, trafic important de pneus cloutés...). Au vu des résultats obtenus , l'idée est venue de mettre en œuvre ces enrobés en couche continue .

Ce type d'enrobé , en effet , présente un intérêt pour les régions où il n'y a pas de centrales fixes d'enrobage à chaud et où les prix de transport sont importants et les trafics relativement faibles.

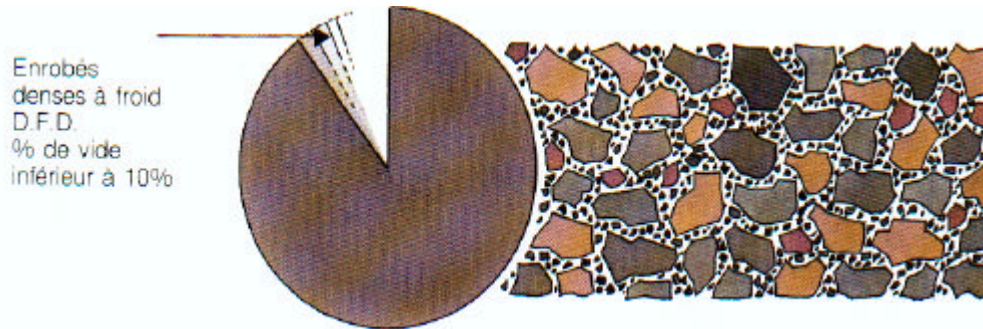


Fig II.1 : Enrobés denses à froid

II.4.1.2- Avantages et inconvénients de la technique des enrobés denses à froid

Comme son nom l'indique, ce type d'enrobés est traité à l'émulsion de bitume et non à l'aide d'un bitume pur à chaud comme les enrobés traditionnels.

Le squelette minéral des enrobés denses à froid est sensiblement identique à celui des enrobés à chaud, sauf qu'il comporte un pourcentage non négligeable de sable et de fillers.

L'analogie avec ces derniers ne s'arrête pas là , et pour mériter le qualificatif de dense, puisque le domaine d'application est le même que celui des enrobés à chaud, leur compacité doit être supérieure à 90 %.

Les enrobés denses à froid présentent des avantages et des inconvénients par rapport aux enrobés à chauds qui sont cités ci-dessous.

➤ Les avantages des enrobés denses à froid

- ✓ Pour les sites où l'on peut craindre des basses températures de service, leur souplesse évite les dégradations bien connues des enrobés à chaud classiques.
- ✓ Le bitume ne subit pas l'altération de la température d'enrobage.
- ✓ Les granulats ne reçoivent pas de choc thermique.
- ✓ Le fait que la technique soit « à froid » évite les inconvénients des pertes calorifiques d'où l'économie d'énergie réalisée par l'absence de chauffage des granulats et du liant.

- ✓ Ce type d'enrobés se caractérise par l'absence de pollution atmosphérique (pas de sécheur, dépoussiéreur), la rusticité de fabrication et le peu d'influence des conditions climatiques d'application.
 - ✓ Absence d'incidence des conditions climatiques de mise en œuvre (vent, déperdition thermique) sur la qualité du produit fini à l'exception bien sûr et exclusivement des fortes pluies.
 - ✓ Centrale d'enrobage rustique, facile d'installation et de fonctionnement.
 - ✓ En outre l'adaptation des enrobés très souples à la qualité des supports (très déformables) de nombreuses chaussées à trafics moyens ou faibles et la disparition de la faiblesse du tapis au niveau du joint longitudinal précisent la spécificité de cette technique.
- Inconvénient des enrobés denses à froid
- ✓ La difficulté d'obtenir des émulsions de stabilité élevés qui permettent un enrobage total et dont la rupture nette ne se produirait qu'au compactage.
 - ✓ Le taux relativement important de liant nécessaire (l'ordre de 10% d'émulsion)
 - ✓ La difficulté de compactage pour obtenir des compacités en place satisfaisante.
 - ✓ La difficulté de respecter un profil en long comparable à celui des bétons bitumineux traditionnels .

II.4.1.3- Constitution des enrobés denses à l'émulsion

Les enrobés denses à froid [24] sont fabriqués avec les mêmes granulats que les enrobés semi-denses à froid mais leur teneur en fines est plus importante. Leur pourcentage de vide est inférieur à 10 %.

Ceux-ci sont fabriqués la plus souvent avec une émulsion composite permettant d'enrober complètement à la fois les sables et les gravillons, ou un procédé de double enrobage.

➤ *Squelette Granulaire*

Les enrobés denses à l'émulsion sont destinés plus aux couches de surface des chaussées et sont répartis, en épaisseur de 5 à 6 cm en moyenne, la granularité la mieux adaptée est le 0/10.

La courbe granulométrique la plus appropriée pour obtenir une densification optimale qui s'inscrit dans un fuseau situé à la limite des formules grenues et semi-grenues définies pour les enrobés à chaud, dont on rappelle les fourchettes ici.

Passant à 6 mm	—————▶	60 à 70 %
Passant à 2 mm	—————▶	35 à 45 %
Teneur en fines totale	—————▶	6 à 9 %

Pour arriver à ce résultat , cette composition sera obtenue par mélange, comme pour les enrobés à chaud, de généralement trois fractions granulaires :

- Sable fillérisé, exemple 0/2.
- Petit gravillons, exemple 2/6.
- Gros gravillons, exemple 6/10.

Les spécifications de ces fractions seront rigoureusement les mêmes que pour les enrobés à chaud que nous rappelons ici :

Il est nécessaire de disposer de sables fillérisé pour obtenir sans ajout la quantité de fines visée car il n'est pas souhaitable d'apporter des fines d'apport qui risquent , par mauvaise diffusion au moment de l'introduction de l'émulsion, de modifier son processus de rupture, et donc de freiner la dispersion du liant au sein du squelette minéral.

Les caractéristiques intrinsèques de la roche mère (Los Angeles , Micro Deval) , coefficient de polissage accéléré et celles du granulat produit (aplatissement et propreté) doivent être les mêmes, à classe de trafic égale, que celles attribuées aux enrobés à chaud.

En particulier, une attention toute particulière doit être apportée à la propreté, traduite par l'équivalent de sable (E.S rigoureusement supérieur à 50 pour un sable ramené à 10 % de fine).

➤ *Emulsion de bitume*

Pour les enrobés à froid, l'émulsion de type cationique est le plus souvent utilisée (pour éviter en particulier le désenrobage pendant la durée de stockabilité), elle doit présenter les caractéristiques suivantes :

• *Bitume de base*

C'est un bitume pur, fluidifiant ou fluxant. La pénétration la mieux adaptée aux couches roulement est 80/100 et on le préférera généralement au 180/220 qui peut présenter, malgré quelques belles réussites, des risques de fluage et d'orniérage dans certaines conditions climatiques.

• *Viscosité et teneur en bitume*

La viscosité doit permettre la dispersion la plus rapide et la plus complète possible dans le squelette minéral (viscosité permettant un bon enrobage). La teneur en bitume de l'émulsion est le plus souvent de 60 % mais l'on utilise aussi des émulsions à 65 % pour diminuer la quantité d'eau apportée par le liant.

• *Stabilité et Vitesse de rupture*

C'est la caractéristique essentielle de l'émulsion .Elle doit être telle que, malgré des teneurs en fines relativement élevées (de l'ordre 7 %) et des teneurs en eau du mélange fluctuantes car difficilement maîtrisables, la totalité des granulats soient enrobés de bitume pour assurer une bonne tenue aux contraintes induites par les véhicules.

Tout ceci , pour que la cohésion de surface de la couche soit maximale, impose une émulsion à rupture lente.

Mais outre un enrobage parfait, on demande encore autre chose à l'émulsion :Il faut que sa stabilité se maintienne jusqu'à la fin de la mise en œuvre (compactage) afin que le produit puisse être densifié sans gros problèmes, et que la viscosité de l'enrobé permette un bon respect du profil en long (qualité de confort de l'utilisateur).

• *Teneur en émulsion des enrobés denses*

Elle doit permettre un enrobage total, mais sans excès pour ne pas affaiblir les performances mécaniques de l'enrobé .

L'expérience a montré que la teneur en bitume résiduel doit généralement être comprise entre 5,5 et 6,5 % ; ce qui représente un taux d'émulsion de l'ordre de 10% qui doit être adapté à chaque cas de figure et fixé par une étude de formulation.

➤ *L'eau d'apport*

L'eau joue un double rôle: elle permet l'introduction du liant dans le mélange (eau de l'émulsion) et d'autre part elle favorise le malaxage et la mise en œuvre (eau des granulats stockés ou eau d'apport et partie de l'eau de rupture).

Pour que le malaxage soit correct et conduise à un bon enrobage il est nécessaire que:

- La teneur en eau soit de l'ordre de 4 à 5 % minimum
- Pour des raisons de compactabilité et traficabilité, l'expérience montre quelle ne doit pas dépasser 8 à 10 %.
- Les études montrent qu'en général le meilleur compromis est obtenu aux environs de 7% d'eau totale, quantité qui permet d'enrober en maintenant au maximum la stabilité de l'émulsion, et ce pour des teneurs en fines totales variant de 6 à 9 %.

➤ *Caractéristiques du mélange*

Nous précisons à nouveau qu'en premier lieu l'enrobage doit être total et que l'enrobé doit

rester malléable et homogène avant tout apport d'énergie (compactage).

Dans ces conditions, les performances physico-mécanique doivent être celles, à catégorie de bitume identique, adoptées pour les bétons bitumineux à chaud, à savoir pour un bitume 80/100 :

- Compacité LCPC comprise entre 91 et 95
- Résistance en compression simple $> 5.10^6$ Pa
- Rapport immersion – compression $> 0,75$

II.4.2- Enrobés semi-denses à froid (ESDF)

Les enrobés semi-denses à froid sont fabriqués avec la même classe granulaire et dans les mêmes conditions que les enrobés denses à froid, ils se différencient par leur teneur en fines qui est plus faible et leur pourcentage de vides qui est compris entre 10 et 15 %.

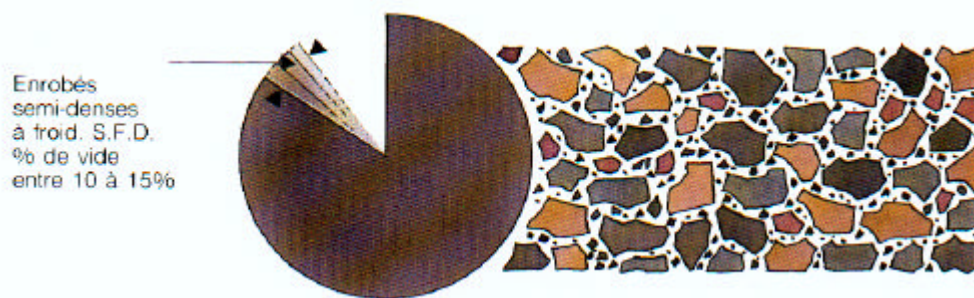


Fig II.2 : Les enrobés semi-denses à froid

Les enrobés ont donc une compacité pratiquement plus grande que 88 %.

Les granulats utilisés sont les mêmes que pour la fabrication des enrobés à chaud et répondent aux mêmes exigences.

L'émulsion de bitume utilisée est le plus souvent un procédé d'entreprise. La formulation permet d'obtenir des enrobés plus ou moins stockables selon la composition de l'enrobé et sa destination, et surtout selon les modalités de mise en œuvre.

Un fuseau granulaire est donné dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : Fuseau granulaire des enrobés semi-dense à froid

Tamis (mm)	Pourcentages des tamisats (%)
25	100
20	90-100
12.5	45-75
6.3	10-25
3.15	0-15
0.080	0-5

II.4.3- Enrobés ouverts à froid (EOF)

II.4.3.1- définition

Les enrobés ouverts à froid sont des enrobés dont le pourcentage de vides est supérieur à 15 %. Les matériaux n'ont entre eux que des points de contact.

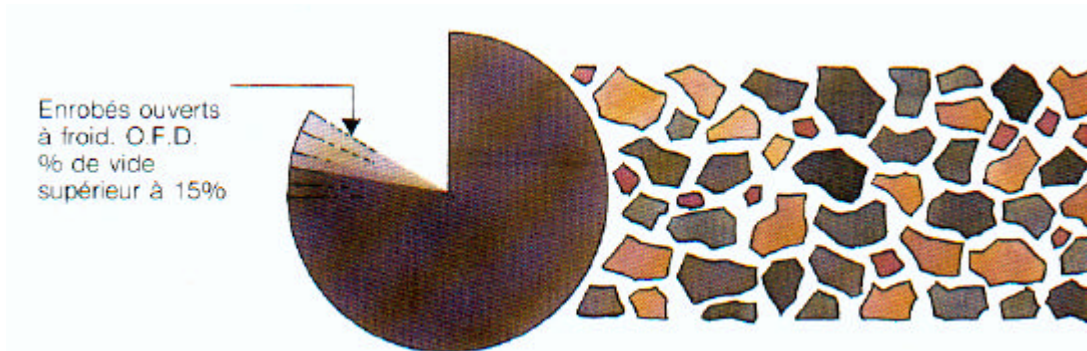


Fig II.3 : Les enrobés ouverts à froid

Les enrobés ouverts sont appliqués en réparations ponctuelles, mais aussi en couche de base et en couche de roulement ou ils connaissent un développement certain.

Pour les dégradations moyennes, on peut réaliser un engravure sur le pourtour de la pièce à traiter, de manière à épauler les bords de l'enrobé, on pulvérise éventuellement un film d'émulsion sur le fond et les parois latérales du trou.

Pour les dégradations profondes, le calibre de l'enrobé sera choisi en fonction de la profondeur à combler. Si elle est importante, il y a lieu de procéder en deux couches, celle de la surface étant réalisée avec un enrobé de stabilité maximale en attendant la consolidation due à l'évaporation des solvants volatils.

II.4.3.2-Avantages et inconvénients des enrobés ouverts à froid

Les enrobés ouverts à froid, présentent des avantages et des inconvénients cités ci-dessous :

➤ *Les avantages des enrobés ouverts à froid*

- Ils sont donc ouverts et de ce fait, permettent l'évaporation rapide de l'eau contenue dans l'émulsion.
- L'enrobé étant prêt à l'emploi, le matériel utilisé est simple et courant; un camion pour le transport, une pelle et un râteau pour la mise en place, une dame ou petit cylindre vibrant pour le compactage suffisent.
- Le personnel n'est pas nécessairement spécialisé.

- Les enrobés ouverts à usage routier peuvent avoir une stockabilité allant jusqu'à un mois.

Grâce à ces propriétés de stockabilité du matériau, on peut disposer par avance de petits tas d'enrobés

➤ ***Les inconvénients des enrobés ouverts à froid***

- Il reste sujet au fluage et à l'orniérage tant que les fluxants du liant ne sont pas complètement évaporés ;
- Les enrobés ouverts à froid ne font l'objet d'aucune recherche de compacité.
- Le dosage du liant est déterminé par l'expérience et il n'existe ni norme d'essai ni d'étude comme c'est le cas pour les enrobés à chaud.
- Ils ne renforcent pas la chaussée sur laquelle ils sont posés.
- Etant ouverts, ils sont très perméables, ils constituent un véritable piège à eau, laquelle risque de détériorer les couches du corps de la chaussée sur laquelle ils sont appliqués.
- Pour cette même raison, si les réparations sont faites dans le cadre de la préparation, les vides ne laissent en surface qu'un dosage insuffisant pour fixer les gravillons. Il y a lieu, dans ce cas, d'une part de procéder à un scellement avec une émulsion sablée, d'autre part d'exécuter les travaux de remise en état plusieurs mois avant l'exécution de l'enduit.

II.4.3.3- constituants des enrobés ouverts à froid

Le principe de fonctionnement mécanique d'une couche d'enrobé presque dépourvue de sable et de fines, impose une très bonne homogénéité des caractéristiques des granulats, en particulier de leurs résistances aux chocs et à l'abrasion qui doivent se situer à un bon niveau. Il nous paraît indispensable que les caractéristiques intrinsèques de la roche soient au moins équivalentes à celles demandées pour les enrobés à chaud pour un trafic donné.

➤ ***Squelette granulaire***

Les enrobés ouverts à froid sont fabriqués à partir de granulats massifs durs, équivalente à celle demandée pour les enrobés à chaud dont la classe granulaire est l'une des suivantes : 2/4, 4/6, 6/10, 10/14, ou 10/20.

Le pourcentage de fines est plus faible par rapport aux enrobés denses à froid, afin d'avoir un pourcentage de vide supérieur à 15 %.

Un fuseau granulaire a été établi, donné dans le tableau suivant :

Tableau II.3 : Fuseau granulaire des enrobés ouverts

Tamis (mm)	Pourcentage des tamisats (%)		
	Enrobé 2/12	Enrobé 2/14	Enrobé 2/16
0.080	0 à 2	0 à 2	0 à 2
1	0 à 5	0 à 5	0 à 4
2	3 à 9	3 à 7	2 à 5
6,3	30 à 55	15 à 40	10 à 25
8	60 à 80	30 à 60	20 à 40
10	80 à 95	60 à 75	40 à 60
12,5	90 à 100	75 à 95	55 à 80
14	100	90 à 100	65 à 90
16	100	100	80 à 100
20	100	100	90 à 100

➤ *Emulsion de bitume*

L'émulsion utilisée pour les enrobés à froid est de type cationique. Cette dernière est caractérisée par les paramètres suivants:

- *Bitume de base*

L'émulsion utilisée pour un enrobé à froid est une émulsion à base de bitume pur 80/100 , fluidifiant ou fluxant .

- *Viscosité et teneur en bitume*

L'émulsion de bitume utilisé est fluidifiée, afin que l'enrobage soit parfait et que la maniabilité soit parfaite. La teneur en bitume est de 60 % ou généralement 65 %.

- *Stabilité et vitesse de rupture*

Il est indispensable que les enrobés ouverts, soient stables et à rupture lente. La température influe sur la viscosité et sur le temps de rupture.

- *Teneur en émulsion*

La teneur en émulsion pour les enrobés à froid est déterminée après une étude en laboratoire, dans le but d'obtenir un enrobage complet de l'ensemble du squelette minéral. L'émulsion est à base de bitume 80/100 pur ou fluidifié et elle est fixée dans la fourchette de 3 à 6 % en fonction de la nature et surtout de la dimension des granulats à enrober, du domaine d'emploi et de la saison de répannage.

- Teneur en eau

La teneur en eau, influe directement sur la qualité de l'enrobage par le biais de la mouillabilité des granulats et la stabilité de l'émulsion.

Ainsi ce paramètre à un double rôle : un net défaut en eau conduit à un enrobage très insuffisant et un excès à des coulures qui conduisent à des sous-dosage en liant.

II.4.4- La grave émulsion (GE)

II.4.4.1- Définition

La grave-émulsion, dérive d'une technique remontant aux années 1950, qui consistait à incorporer de l'émulsion à des matériaux existant de chaussées secondaires, Cette technique économique de traitement avait pour nom anglais « retread process ».

La grave-émulsion est l'une des graves traitées utilisées en industrie routière pour la confection des couches de fondation et des couches de base [3].

A ce titre, elle a pour but de reporter sur le sol support les efforts dus au trafic, en réduisant leur valeur par unité de surface.

Par ailleurs, deux de ses caractéristiques (matériaux fabriqués et répandus sans élévation de température, matériau susceptible d'application en faible épaisseur) font de la grave-émulsion un produit permettant le reprofilage facile des chaussées déformées.

C'est dans ce dernier usage que la grave-émulsion trouve actuellement son meilleur créneau

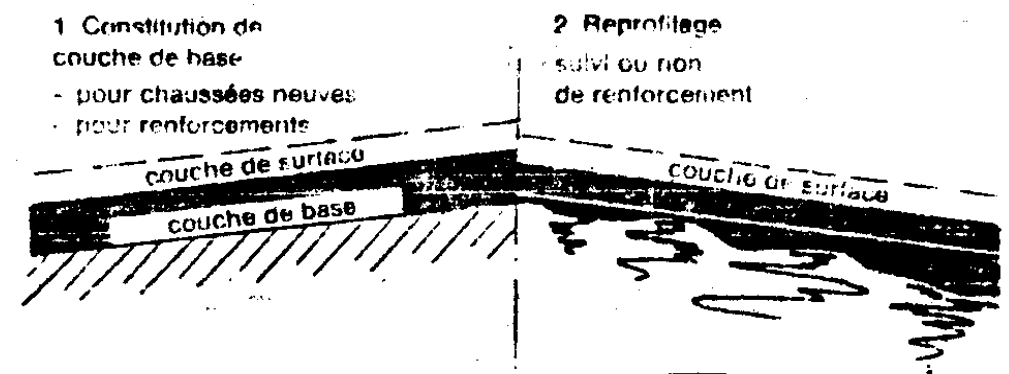


Fig II.4 : Les deux usages de la grave émulsion

La grave-émulsion est obtenue en dispersant à froid, au sein d'une grave, une émulsion de bitume pur à rupture contrôlée afin de lui conférer, de façon permanente, la cohésion qui lui manque sans pour autant en altérer le frottement interne.

Le bitume résiduel est concentré sur les éléments fins. Avec eux, il constitue un mastic qui enclasse les gros grains. C'est pourquoi il n'y a pas d'analogie complète entre le comportement d'une grave-émulsion et celui d'un enrobé à froid ou à chaud, même si celui-ci est préparé avec le même granulat et traité avec un faible pourcentage de liant.

II.4.4. 2-Avantage de la grave émulsion

C'est un procédé qui permet de raccourcir les délais. Les travaux peuvent être réalisés peu après la passation d'un marché si l'on dispose d'un stock de granulats pour lequel on a fait une étude préalable.

En effet, le liant est disponible rapidement et sans limitation pratique de cadence. Le délai d'installation d'une centrale est bref et la cadence de production élevée. Les opérations de mises en œuvre sont rapides et demandent un minimum de préparation.

Ce procédé est aussi très souple : l'émulsion peut être adaptée à tous les matériaux et les opérations de fabrication, répandage et compactage, peuvent être complètement dissociées.

II.4.4.3- Constitution d'une grave-émulsion

Comme son nom l'indique, la grave-émulsion est constituée par la dispersion à froid, au sein d'une grave, d'une émulsion de bitume en présence d'une certaine quantité d'eau facilitant la dispersion.

La granularité est spécialement importante en grave-émulsion. En effet, elle influe d'une part sur la facilité de mise en œuvre ainsi que sur la rapidité de prise du mélange.

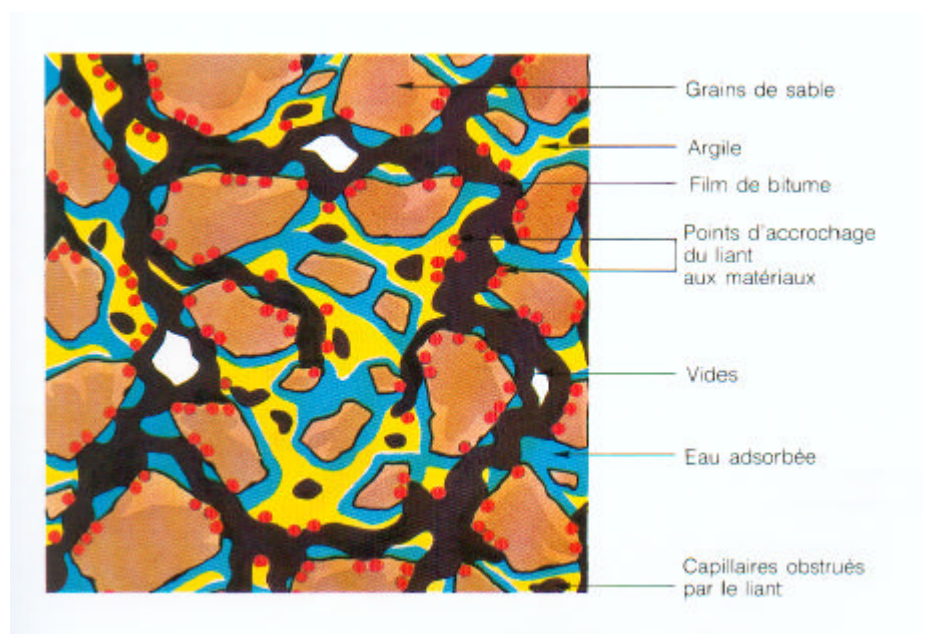


Fig II.5 : Constituants d'une grave émulsion

On sait qu'on appelle grave O/D un granulat comportant à la fois des fines, des éléments moyens et des gros éléments ; chaque classe prend sa place dans les intervalles existant entre les éléments de la classe supérieure, de façon qu'après compactage de l'ensemble, le matériau comporte un minimum de vide.

On sait aussi que si une ou plusieurs classes manquent dans le mélange (par exemple les éléments de grosseur comprise entre 2 et 4 mm) la courbe granulométrique est dite discontinue. Elle est continue dans le cas contraire. L'expérience montre que pour la grave-émulsion les meilleurs résultats sont obtenus avec les courbes continues.

La grave-émulsion est constituée par [59] :

➤ *Squelette Granulaire*

La grave doit présenter un certain nombre de caractéristiques bien définies relatives à sa granulométrie, à la forme de ses éléments et à leur dureté.

Les essais pratiqués en laboratoire portent évidemment sur les caractéristiques concernées par les spécifications. Leur but est d'éliminer les granulats qui ne garantiraient pas toute la sécurité désirable.

Le diamètre D de l'expression O/D varie selon la destination du produit: Un 0/20, pour la réalisation d'une couche de fondation. Si la couche à réaliser ne dépasse pas 8 cm, un 0/14 ou un 0/10 conviendront. Le même 0/14 sera adopté, voir 0/10 ou même un 0/6, si dans certaines parties de l'ouvrage l'épaisseur est encore plus faible (reprofilage).

Tableau II.4 :Fuseau de spécification d'une grave 0/14

Tamis (mm)	Pourcentage des tamisats (%)	
	Couche de base	Couche de fondation
31.5	-	90 - 100
20	90 - 100	70 - 90
10	55 - 75	42.5 - 67.5
6	45 - 60	34 - 54
4	39 - 53	30 - 48
2	29 - 41	24.5 - 39.5
1	20 - 30	19.5 - 30.5
0.5	14 - 24	14 - 22
0.080	4 - 8	3 - 7

➤ *Emulsion*

Actuellement les émulsions les plus employées sont des émulsions cationiques. Elles présentent l'avantage de faciliter l'élimination de l'eau sous l'influence des émulsifs (polyamines).

Le choix de l'émulsion s'effectue en fonction du granulats (nature et pourcentage de fines).

Les émulsions destinées à la fabrication de la grave-émulsion présentent les caractéristiques suivantes :

- ***Bitume de base***

Le choix du bitume de base (180/ 220, 80/100 ou 40/50) entrant dans la fabrication de l'émulsion s'effectue en fonction de la texture du granulat, de l'emploi envisagé et des conditions climatiques.

- ***Teneur en eau***

La teneur en eau doit être respectée et fixée dans une plage qui a pour valeurs:

- ✓ Le minimum correspond à la quantité d'eau nécessaire pour une bonne dispersion à la fabrication.
- ✓ Le maximum correspond à la nécessité de compacter le plus efficacement possible.

Cette étude est donc conduite de manière à assurer une grande souplesse d'adaptation aux conditions locales. Elle est également le gage de l'efficacité du mélange et de la sécurité de son emploi.

- ***Viscosité***

La viscosité de l'émulsion doit être telle que la dispersion dans le grave se fasse aisément. La teneur en bitume, qui est le premier facteur commandant la viscosité, est le plus souvent de 60%, parfois 65%.

- ***Vitesse de rupture***

Les émulsions pour grave-émulsion sont classées parmi les émulsions à rupture lente. Il faut en effet que ce liant pénètre, sans se rompre, au cœur du matériau, jusqu'aux éléments les plus fins.

- ***Teneur en émulsion de la grave-émulsion***

Cette teneur se situe entre 5,5% et 6,5 lorsque l'émulsion est à 60% de bitume. Il est préférable de se tenir dans la partie supérieure de cette fourchette lorsque la grave-émulsion est appliquée en couche minces, ou utilisée en reprofilage.

- Teneur en eau de la grave-émulsion

Comme dans tous les produits routiers, l'eau est successivement une alliée précieuse et une ennemie redoutable.

Dans la grave-émulsion, elle est une alliée précieuse puisqu'elle permet, d'une part d'introduire le bitume dans le granulat (l'eau de l'émulsion est le véhicule du bitume dispersé), d'autre part, de favoriser le malaxage, la mise en œuvre et le compactage.

Mais elle risque d'être un ennemie redoutable si, trop abandonnant, elle s'oppose à un bon démarrage de la rupture de l'émulsion, à un bon comptage, à une prise rapide du matériau.

Dans les techniques à base de bitume chaud, on ne rencontre pas ce problème: l'eau est absente ou presque à la suite du passage dans le sécheur. Dans les techniques à base de liants hydraulique, le danger est atténué par le fait qu'une partie au moins de l'eau disparaît lors des réactions chimiques provoquant la prise du liant.

Dans la grave-émulsion, rien de tel : l'eau qu'elle contient devient indésirable dès la fin du compactage. D'où la méfiance justifiée à l'égard de ce liquide encombrant.

Pour éclairer cette question et faire la distinction entre risque réel de déboires et crainte injustifiée, considérons quelques chiffres : a la fin du compactage, il faut pour que la couche résiste bien aux efforts apportés par les compacteurs eux-mêmes et par le trafic, que le frottement interne subsiste, c'est-à-dire, on le conçoit bien, que les vides entre éléments de la grave ne soient pas entièrement remplis d'eau (Figure II.6).

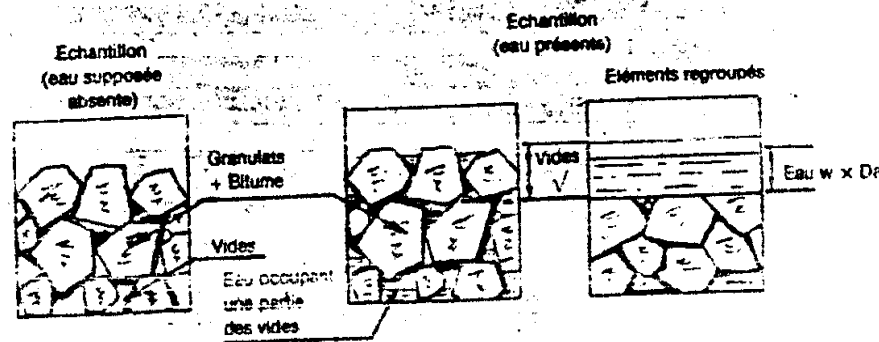


Fig II.6: Teneur en eau de la grave émulsion

Existe-t-il une teneur minimale ? Par expérience, on constate que le malaxage requiert un minimum de 4% environ. Si donc, la teneur en eau des granulats stockés est inférieur à 1,8%, il faudra procéder à un apport d'eau dans le malaxeur.

- Compactage de la grave émulsion

La grave-émulsion demande toujours un compactage énergique : en effet, cette opération a pour but d'améliorer les caractéristiques mécaniques [52] du matériau et de réduire la perméabilité, mais aussi d'accélérer la prise du mélange grâce à l'exsudation de l'eau.

L'opération de compactage exige une forte énergie car la structure même de la grave-émulsion lui confère un angle de frottement interne élevé.

- La grave-émulsion stockable

Pour réaliser l'entretien des chaussées, spécialement de celles du réseau secondaire et de celle de la voirie urbaine, il est souvent souhaitable de disposer en permanence du stock fabriqué à l'avance. La grave-émulsion est l'un des matériaux qu'il est ainsi possible d'avoir en réserve.

Par rapport à la grave-émulsion fabriquée au fur et à mesure des besoins, la grave-émulsion stockable présente pour principale caractéristique un dosage en liant plus élevé d'un à deux pourcents.

II.4.5- Enrobé coulé à froid (ECF)

II.4.5.1- Définition

La technique routière a connu des améliorations sensibles qui ont abouti à l'enrobé coulé à froid. Celui-ci connaît un succès grandissant dans beaucoup de pays industrialisés.

L'enrobé coulé à froid, est un mélange de granulat de dimension inférieure ou égale à 10 mm et d'émulsion répandue en consistance fluide à température ambiante.

II.4.5.2- Avantages et inconvénients de l'enrobé coulé à froid

Parmi les avantages et inconvénient de l'enrobé coulé à froid, on cite les suivants :

➤ *Avantages de l'enrobé coulé à froid*

- ✓ Ils sont généralement utilisés en entretien pour restituer une imperméabilité durable à la chaussée. De plus, grâce à leur très faible épaisseur, ils sont particulièrement adaptés aux rues présentant des seuils de niveaux, la voirie urbaine en est un exemple.
- ✓ Les enrobés coulés à froid ont en plus l'avantage de permettre la réalisation des couches de roulement les plus minces parmi les couches les plus minces. Les quantités sont respectivement de l'ordre de 6, 13 et 18 kg/m² pour les granularités 0/4, 0/6 et 0/10... à comparer aux 30/40 kg/m² des bétons bitumineux ultra minces, 50/60 kg/m² des bétons bitumineux très minces, d'où leur intérêt en voirie urbaine et chaque fois qu'il faut éviter des travaux annexes liés au rehaussement de la chaussée.
- ✓ Du fait de la minceur, les enrobés coulés à froid ne sont pas orniérables et sont indéformables. Après étalement, en général il ne nécessite aucun compactage.

- ✓ Ils offrent pendant une période une surface non glissante, cette qualité d'adhérence étant sa qualité principale. Les niveaux de rugosité que l'on peut atteindre aujourd'hui sont réellement très intéressants, au niveau de ce qu'on obtient pour les bétons bitumineux à chaud et de plus ils se maintiennent dans le temps.
- ✓ Les enrobés coulés à froid n'engendrent pas le rejet de gravillons qui constituent une des difficultés de la technique des enduits.
- ✓ Cette extrême minceur en fait un revêtement très peu coûteux et très économe en énergie.

➤ ***Inconvénients des enrobés coulés à froid***

- ✓ L'aspect visuel n'est pas toujours aussi régulier que celui des enrobés à chaud, ce qui nuit à l'esthétique.
- ✓ Les enrobés coulés à froid sont réputés avoir une durée de vie relativement courte, et, de ce fait, ne sont pas utilisés sur les chaussées à trafic élevé.

II.4.5.3- Constitution des enrobés coulés à froid

Les constituants d'un enrobé coulé à froid sont cités ci dessous :

➤ ***Squelette Granulaire***

Ils doivent répondre à une bonne dureté, résistance au polissage et propreté, ces critères sont conformes pour une couche de roulement relatives aux chaussées neuves et à l'entretien des chaussées anciennes, en fonction du trafic.

La granularité 0/4, 0/6, 0/8 ou 0/10 est choisie en fonction du niveau de non glissance recherché et l'intensité du trafic. Les granulométries spécifiées sont obtenues par reconstitution à partir de trois ou quatre fractions.

L'équivalent de sable est supérieur à 50 %. La teneur en filler est comprise entre 8 et 12 %.

➤ ***Emulsion***

L'enrobé coulé à froid est généralement réalisé avec des émulsions cationiques à rupture contrôlée, soit à base de bitume pur, soit à base de bitume modifié.

La formulation de l'émulsion d'un enrobé coulé à froid présente les caractéristiques suivantes :

- Bitume de base

Le bitume de base à généralement pour pénétrabilité 180/220 ou 80/100. Ce bitume ne provoque pas de collage aux pneus des véhicules.

Comme l'épaisseur de l'enrobé coulé à froid étant toujours faible, il n'est en général pas constaté avec ce bitume, de fluage du produit.

- Teneur en eau

Comme pour tout les enrobés à froid la teneur en eau est fixée de telle manière à assurer tout le mouillage nécessaire des granulats pour éviter toute ségrégation et pour avoir une bonne adhésion entre celui-ci et l'émulsion.

- Viscosité

La teneur en bitume de l'émulsion utilisée pour les enrobés coulés à froid est égale à 60 ou 65 % ; le choix entre ces deux valeurs est déterminé par la nécessité d'obtenir la répartition la plus rapide du liant dans le mélange et mélange.

- Vitesse de rupture

La vitesse de rupture de l'émulsion doit toujours faire l'objet d'une étude de laboratoire préalable à la réalisation du chantier. Cette étude comprend un essai consistant à soumettre le granulat approvisionné, convenablement mouillé, à un malaxage peu énergétique avec l'émulsion et à vérifier que :

- ✓ Le début de prise ne se produit pas avant une minute.
- ✓ Le mélange est normalement fluide et onctueux.
- ✓ L'enrobé coulé à froid étalé en faible épaisseur exsude une eau claire dans un délai de 15 minutes.

II.4.6- Enduit superficiel (ES)

II.4.6.1-Définition

L'enduit superficiel est une couche de roulement de faible épaisseur constituée de couches superposées d'un liant hydrocarboné et de gravillons. La structure de l'enduit, les quantités de matériaux par unité de surface et les qualités recherchées dépendent du problème à traiter. Ce problème peut être l'un des suivants [28] :

- Création d'une couche de roulement.
- Rénovation d'une chaussée après usure.
- Imperméabilisation de la chaussée.

II.4.6.2- Avantages et inconvénients de l'enduit superficiel

Les enduit superficiels présentent des avantages et des inconvénients qui sont les suivants :

➤ *Avantages de l'enduit superficiel*

- ✓ Le revêtement superficiel n'est plus seulement un «plus» apporté aux chaussées ; c'est un revêtement nécessaire pour faire face à la vitesse des véhicules , et assurer avec fiabilité la liaison chaussée-pneumatique.
- ✓ Soit comme enduit de scellement qui couvre et protégé des intempéries la couche de matériaux sur laquelle ils sont répandus .
- ✓ Soit comme couche d'usure soumise aux agressions de la circulation ; protégeant au mieux la structure de la chaussée , cette couche ne nécessite que son renouvellement pour rendre à l'ensemble de la chaussée ses qualités initiales.
- ✓ Soit comme couche de roulement avec des caractéristiques de rugosité qui favorisent l'adhérence ,assurent une bonne drainabilité des eaux de surface ,entraînent un recul important des seuils d'aquaplanage ,et permettent grâce aux pressions élevées subies par les arêtes des gravillons et au relatif emprisonnement des produits de déneigement ,une bonne résistance à la formation du verglas.
- ✓ Outre les avantages techniques qu'ils apportent aux chaussées traitées, les enduits superficiels sont d'un coût très compétitif face à l'ensemble des couches de roulement possibles dans leur domaine d'emploi .

➤ *Inconvénients de l'enduit superficiel*

- ✓ Bruit de roulement nettement supérieur à celui d'un enrobé coulé à froid.
- ✓ Limitations d'emploi, par exemple sur les sections trop pentues ou dans les virages trop serrés.
- ✓ Nécessite davantage d'entretien que les enrobés.
- ✓ Bien qu'à la mise en œuvre il soit moins consommateur d'énergie que l'enrobé, sa forte rugosité accroît légèrement la consommation en carburant des véhicules.

II.4.6.3- Constitution de l'enduit superficiel

Traiter une chaussée donnée, implique de prendre en compte de multiples paramètres tels que la nature du support, le trafic etc. La solution optimale retenue sur le plan technique et sur le plan financier, est de choisir parmi l'ensemble des possibilités de combinaisons liant-gravillon .

➤ *Squelette granulaire*

Les granulats de l'enduit superficiel sont entièrement concassés, issus de roches massive.

Différents paramètres sont à prendre en considération pour le choix de la granularité :

- ✓ L'obtention d'une bonne rugosité.
- ✓ Le maintien de la rugosité dans le temps.
- ✓ Le type de structure d'enduits envisagé.
- ✓ L'environnement (pour des raisons de bruit, de confort au roulement) .

Les granulats généralement utilisés appartiennent aux granulaires, 4/6 - 6/10 - 10/14, mais aussi dans les cas particuliers, les classe 2/4 et 14/20. Ces dimensions courantes sont normalisées (figure II.7).

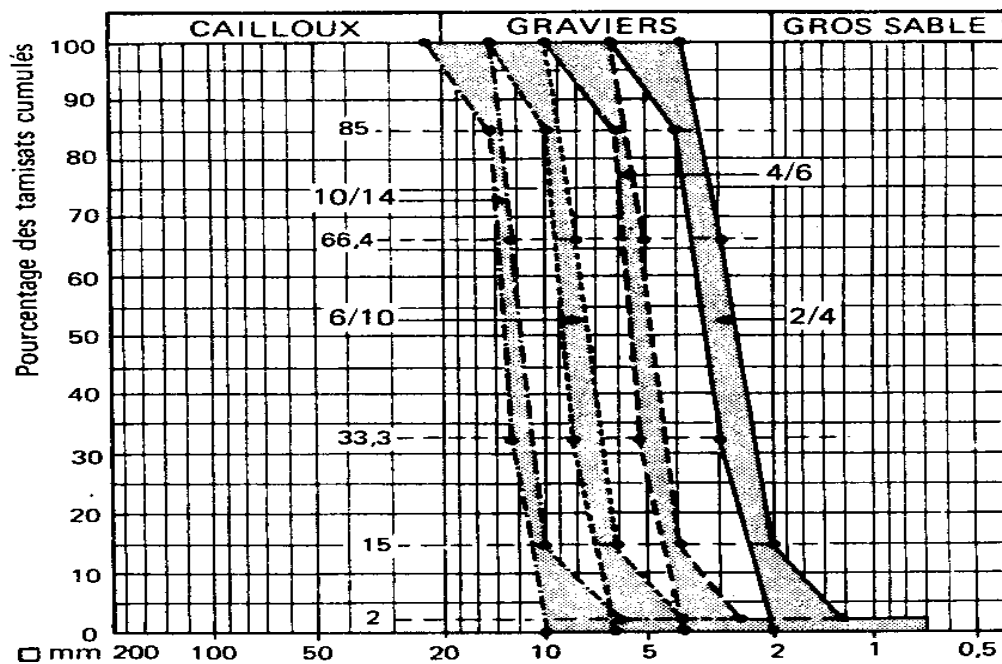


Fig II.7: Fuseaux granulométriques des gravillons courant

Afin d'assurer l'ensemble de ces fonctions, les granulats doivent être dur, très propres, de forme appropriée et profiter au maximum des remarquables qualités adhésives des émulsions .
Des essais normalisés sur les granulats définissent ceux qui permettront des réalisations durables et homogènes .

➤ Emulsion :

Le rôle de l'émulsion de bitume dans l'enduit superficiel est d'assurer ➤ le collage de la maille gravillonnée sur le support et d'imperméabiliser la chaussée .

Le choix de l'émulsion de bitume destinée à un enduit superficiel donné est déterminé en fonction du type et de la nature du support , de l'environnement , du climat de la période d'exécution des travaux , du trafic et du délai de remise en circulation .

Les émulsions utilisées en enduit superficiel sont de nos jours essentiellement les émulsions cationiques caractérisées par une rupture rapide et une viscosité élevée. Toutefois, les émulsions cationiques à rupture semis-rapide peuvent être utilisées dans des régions chaudes et seches.

Le dosage en liant doit donc tenir compte de deux impératifs :

- ✓ Etre suffisant pour que le film de liant assurant le collage puisse résister aux contraintes dues à la circulation .
- ✓ Ne pas remplir la totalité des interstices pour ne pas réapparaître en surface et provoquer le ressuage .

L'émulsion est définie par les caractéristiques suivantes :

• *Bitume*

Les teneurs en liant des émulsions utilisées est de 60 à 69%. L'émulsion à 69% est la plus souhaitable pour les enduits superficiels .

• *viscosité et stabilité*

La viscosité doit être telle que le liant ne s'écoule pas vers les points bas, et qu'elle permette un répannage facile. La viscosité de l'émulsion est directement liée à la pénétrabilité du bitume de base et sa teneur ainsi que de la température. Elle sera d'autant plus faible que la pénétrabilité sera elle-même plus basse. Ceci est mis en évidence, par exemple , avec une émulsion à 69% fabriquée , soit à partir de bitume 180/220, soit à partir de bitume 80/100, la seconde est moins visqueuse que la première. .

La stabilité au stockage des émulsions cationiques à concentration élevée, de haute viscosité, est meilleure que celle des émulsions à 60%. Le plus souvent ,l'exécution de l'enduit suit de très près la fabrication de l'émulsion .De toute manière , les émulsions cationiques pour enduit peuvent supporter aisément un stockage de l'ordre de sept jours ,et éventuellement un stockage prolongé :même pour les émulsions à rupture très rapide ,la protection des micelles de bitume par l'émulsifiant est suffisante pour éviter toute coalescence pendant la durée de ce stockage .

On a constaté qu'une valeur de pH faible (acidité forte) donne une adhésivité moins bonne en revanche la stabilité à l'enrobage des matériaux est facilitée. Dans les techniques d'enrobage ou de stabilisation, on serait donc conduit à adopter des émulsions à pH faible.

II.4.6.4- Formulation des enduits superficiels

La formulation est destinée à préciser la structure de l'enduit, la nature et la granularité des granulats, la nature du liant ainsi que leurs dosages respectifs. Elle est définie en fonction d'un certain nombre de paramètres :

- ✓ Les caractéristiques physiques de la chaussée à revêtir, telles que sa nature (ancien enduit, enrobé bitumineux, béton de ciment), la qualité de ces constituants (types de granulats et de liant), l'état de support (rugosité, homogénéité, fissuration) et de la géométrie de la chaussée (tracé en plan, profil en long et en travers)
- ✓ Les caractéristiques d'usage de la chaussée, telles que le trafic (nombre de véhicules par jour, pourcentage de poids lourds, vitesse autorisée), et les conditions d'exploitation (traitements hivernaux, ou circulation à plus de deux voies).
 - Les conditions d'environnement, telles que la région climatique, la végétation, l'urbanisation, les conditions atmosphériques lors de la réalisation de l'enduit.
 - Les conditions économiques.

La qualité du résultat restera cependant étroitement liée, malgré une formulation sans faille, à la qualité de l'exécution et aux conditions atmosphériques effectives lors de cette exécution.

II.4.6.5- Choix de la structure

On distingue plusieurs structures d'enduits :

- ✓ L'enduit monocouche
- ✓ L'enduit monocouche double gravillonnage
- ✓ L'enduit bicouche.
- ✓ L'enduit «sandwich», ou GLG (gravillons liant- gravillons).

La structure est choisie essentiellement en fonction du type de trafic et de l'état du support.

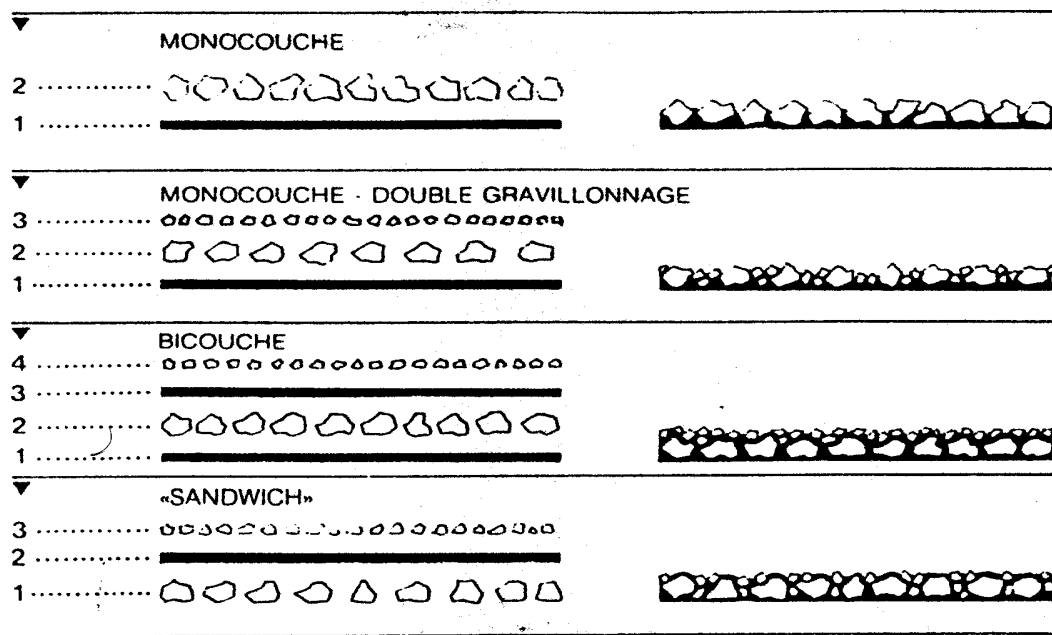


Fig II.8 : Structure type d'un enduit superficiel

Enduit monocouche

La structure monocouche est la plus polyvalente, donc la plus courante pour presque tous les trafics. Elle se réalise le plus souvent avec un granulat 6/10.

Enduit bicouche

Lorsque le trafic est important et/ou le support hétérogène, l'enduit bicouche est à préférer, d'autant qu'on peut estimer qu'il apportera une étanchéité améliorée de l'ancienne chaussée sur laquelle les efforts seront mieux répartis.

Enduit monocouche double gravillonnage

Un compromis intéressant, fortement répandu maintenant, est la structure monocouche double gravillonnage, qui est particulièrement bien adaptée aux trafics

intenses rapides et lourds, dans la mesure où elle est appliquée sur un bon support «dur».

Enduit sandwich

Enfin l'enduit «sandwich» sera cité pour information car il s'est caractérisé par une méthode d'exécution spécifique, il conduit à une structure finale pouvant être jugée comparable à un monocouche double gravillonnage. Il est essentiellement adopté pour des routes secondaires.

II.4.7- Les sables bitume traité à froid (SBF)

II.4.7.1- Définition

Le sable utilisé est un sable propre ($ES > 40$) généralement ce type de sable manque de fines, les fines d'ajout sont, soit des matériaux de concassage-broyage (sables, fines calcaires), soit des fines pulvérulent industriels (chaux, ciments).

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 au 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 du liant et de la granulométrie du matériau.

II.4.7.2- 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 (inférieure à 3000 véhicules/j).

Leur emploi est également envisageable en couche de base de renforcement mais pour des trafics n'excédant pas 1000 véhicules par jour.

Les épaisseurs employées se situent entre 10 et 20cm. 10cm est un minimum technique, 20 cm est l'épaisseur maximum au-delà de laquelle peuvent apparaître des problèmes d'orniérage par suite de difficultés d'élimination des fractions volatiles du liant.

II.4.7.3-Constituants du sable bitume à froid

➤ *Les sables*

Il faut que le sable ait une bonne portance, ce qui nécessite un minimum de fines et n'excluant pas une légère plasticité.

Sont susceptibles d'être utilisés les sables suivants :

- Teneur en inférieure à 80μ : 5 à 30%.
- Coefficient d'uniformité $Cu = D_{60}/D_{10} > 5$.
- Equivalent de sable $15 < E.S < 50$.
- indice de plasticité $Ip < 15$ avec limite de liquidité $L_l < 35$.

Lorsqu'un sable (en particulier les sables fins) ne répondra pas aux critères de traitement, on pourra envisager une correction granulométrique soit par l'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).

A l'inverse, une quantité de fines importante et /ou un excès de plasticité rendra difficile la bonne dispersion du liant et nécessitera des dosages en liant importants et ne permettra pas (par suite d'une faible porosité du matériau) l'élimination des solvants (cas des bitumes fluidifiés) ou provoquera une rupture prématurée (cas des émulsions).

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

➤ *Les émulsions*

• *Bitume*

On peut employer une émulsion dont le bitume résiduel est de pénétration comprise entre 60 et 100 pour des teneurs en fines inférieures à 15% et des I_p supérieures à 10.

Contrairement aux émulsions, les bitumes fluides peuvent être employés avec des sables à teneur en eau faible ou nulle ce qui peut présenter un très grand intérêt dans les régions séchés.

• *Stabilité et vitesse de rupture*

La rupture de l'émulsion ne doit avoir lieu qu'après compactage, elle doit rester parfaitement stable au moment du malaxage pour éviter la formation de nodules de bitume.

Pour cette raison il faut employer des émulsions généralement cationiques soit à rupture lente, soit stabilisées

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

Quand le climat est sec , les émulsions anioniques sont utilisables : par contre en climat humide et/ou froid, il est préférable d'employer des émulsions cationiques.

II.4.7.4- Caractéristique du mélange

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

- ✓ A une bonne diffusibilité du liant au malaxage.
- ✓ A un compactage correct du matériau (compatibilité).

II.5- Domaine d'emploi

Les enrobés à froid répandus en couche de 5 à 8 cm d'épaisseur, sont utilisés en entretien et réhabilitation de chaussée supportant un faible trafic.

Les graves émulsion sont particulièrement adaptées aux utilisations en reprofilage, déflachage et réhabilitation de chaussées déformées supportant un trafic moyen à faible.

Les enrobés coulés à froid et les enduits superficiel sont une technique d'entretien des caractéristiques superficielles des couches de roulement .

II.6- Conclusion

Indépendamment des considérations économiques, le développement des enrobés à froid ne prendra son véritable essor qu'à partir du moment où on aura acquis une maîtrise complète de leur formulation.

Les enrobés à froid, de par la présence de l'eau d'un liant «évolutif» (l'émulsion), fonctionnent différemment et nous avons essayé d'illustrer ce point par nos interprétations concernant le rôle des divers constituants vis à vis de la maniabilité, du comportement lors du compactage et du mûrissement de ces produits.

Chapitre III: Etat actuel de la recherche

III.1- Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire le point sur l'état actuel dans le domaine des émulsions en particulier et des enrobés à froid en général.

Il y a lieu cependant de faire les remarques suivantes :

- ✓ En Algérie, aucune recherche sur ce domaine n'a été répertoriée à ce jour. Il existe seulement des formulations d'enrobés testées en laboratoire pour les applications réelles sur site. Nous avons jugés nécessaire de les présenter à part dans ce chapitre.
- ✓ A travers le monde, peu de laboratoires se sont investis dans ce domaine auparavant. Ce n'est que vers les années 1995 qu'une véritable recherche a été entamée et la plupart des articles que nous présenterons sont très récents.

Nous allons présenter les travaux en les classant par thème :

III.2- Etude de la cohésion des enrobés à froid

En 2000, **C. DENEUVILLERS** a mis au point une nouvelle méthodologie d'étude et de formulation des enrobés à froid [13].

Cette méthodologie (Sgreg), permet de prédire en laboratoire le comportement des enrobés à froid pendant les phases de malaxage et de répandage et au jeune âge sur le terrain.

La méthodologie [43] consiste à fabriquer en laboratoire des échantillons d'enrobé coulé à froid (ECF) en faisant varier les paramètres suivants :

- ✓ La nature et l'origine du liant entrant dans la composition de l'émulsion.
- ✓ Les teneurs en émulsion, eau, additif minéral, régulateur de rupture.

Elle permet aussi de déterminer les effets de ces changements sur l'enrobage, la rupture et la montée en cohésion.

La formulation d'un enrobé coulé à froid [8] consiste à rechercher, dans un premier temps les meilleures proportions de ses différents constituants, après s'être assuré de leur compatibilité, puis à évaluer à l'aide de tests de laboratoire suffisamment prédictifs, d'une part, le comportement de l'enrobé mis en œuvre, et d'autre part sa durabilité sur la chaussée.

Dans la phase malaxage-répandage, qui a lieu presque simultanément, l'enrobé doit être suffisamment liquide pour bien se répandre sur la chaussée. Il doit toutefois être assez épais pour éviter la ségrégation des granulats.

Au jeune âge, il doit être assez cohésif pour supporter une remise au trafic dans les délais les plus brefs.

Au cours de sa vie, l'enrobé doit ensuite compter sur un certain nombre de qualités telles que l'imperméabilité, le collage sur le support, une bonne rugosité, une bonne résistance à l'abrasion et à l'orniérage.

Ces dernières reposent sur la bonne formulation du liant résiduel, la nature et les propriétés des granulats déterminant la rugosité et la résistance à l'abrasion des enrobés coulés.

Pour prédire au laboratoire le comportement des ECF pendant la phase de malaxage-répannage, et au jeune âge sur le terrain, Screg propose une méthodologie permettant la mise au point d'enrobés performants.

III.2.1- Simulation de la phase malaxage-répannage

Dans cette étape, l'enrobé se présente sous forme fluide pour qu'il conserve une bonne fluidité, l'émulsion ne doit pas rompre pendant cette période.

Sa réactivité dépend de la température, de la nature chimique des granulats, de la nature et de la quantité de fines (qui représentent la fraction granulométrique ayant le plus grande surface de contact avec l'émulsion et qui peuvent être très réactives dans le cas de fines argileuses, par exemple).

Pour régler la stabilité de l'émulsion, le pourcentage d'additif incorporé dans l'enrobé coulé à froid (ECF) peut être ajusté. La figure III.1 montre l'influence de la teneur en additif pour une formule donnée d'émulsion et d'enrobé, à teneur en eau totale constante, sur la maniabilité de l'enrobé.

D'autre part, pour un dosage en liant résiduel donné, la «liquidité» de l'enrobé peut être réglée par la teneur en eau d'ajout dans l'enrobé.

Pour obtenir un bon comportement sur le terrain, la formulation de l'émulsion est réglée de manière à ne pas incorporer trop d'additif par rapport aux matériaux secs.

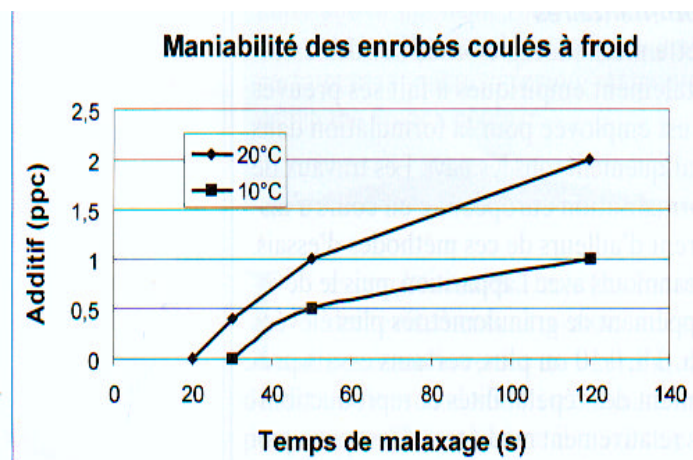


Fig III.1 : Maniabilité des ECF en fonction de la teneur en additif [13]

III.2.2- Comportement au jeune âge des enrobés coulés à froid

Après sa mise en œuvre, l'enrobé coulé à froid doit acquérir rapidement une cohésion satisfaisante permettant une réouverture du trafic la plus rapide possible. Ceci signifie que la rupture de l'émulsion doit être franche et rapide après répandage.

La propreté des granulats est ici une condition indispensable au bon comportement de l'enrobé. En effet, des matériaux pollués par des fines très actives obligent à surdoser l'enrobé en additif pour éviter la rupture de l'émulsion dans la machine, ce qui, ensuite, entraîne une baisse de la cohésion finale de l'enrobé. En effet, l'émulsion va rompre préférentiellement sur les fines alors que sa rupture sur les gros éléments sera différée à cause d'une trop grande quantité de retardateur.

La cohésion nécessaire pour une remise au trafic sans dégradation de l'enrobé est alors largement différée.

La cohésion de l'enrobé dépend de la nature du liant, de celle des matériaux, du système tensioactif utilisé pour réaliser l'émulsion et aussi des conditions climatiques selon lesquelles la mise en œuvre est réalisée.

En formulant judicieusement les composants de base des enrobés, les performances nécessaires en terme de vitesse de montée en cohésion peuvent être atteintes.

Pour les caractériser, deux types de test peuvent être réalisés. Le premier, le test HCT (Hilt Cohesion Test) permet d'évaluer la cohésion. Le second, le TCSS (test de cohésion superficielle Screg) aide à quantifier la cohésion des enrobés au jeune âge.

Ces tests mesurent l'effet sur la montée en cohésion des enrobés coulés à froid (ECF) d'un certain nombre de paramètres de formulation (nature et quantité des composants), des conditions climatiques ou du délai de cure des enrobés.

III.2.3- Le test HCT (Hilt Cohesion test)

La figure III.2 décrit le principe de ce test [29]. Il consiste tout d'abord à fabriquer une éprouvette d'enrobé coulé à froid de dimension 120 x 120 x 15 mm.

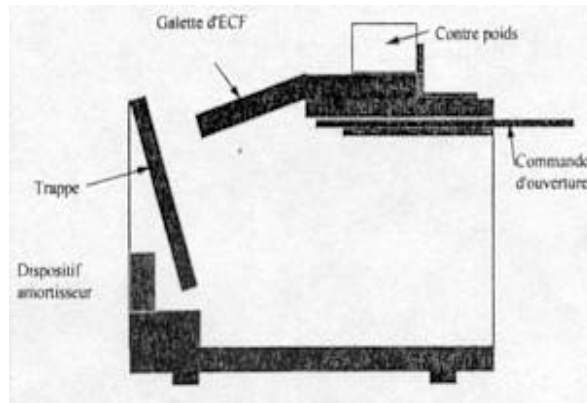


Fig III.2 : Schéma de principe du test HCT

Après un temps de cure déterminé, l'enrobé est démoulé et positionné sur l'appareil avec un contre-poids placé sur sa partie fixe .

On mesure alors le temps nécessaire à la cassure de l'enrobé après ouverture de la trappe .

Le résultat obtenu est donné en secondes et représente la valeur de cohésion HCT après un temps de cure donné, dans des conditions de température et d'hygrométrie maîtrisées.

Pour un liant donné, plus la valeur relevée est élevée, plus l'enrobé est résistant à la flexion, et donc plus la montée en cohésion est avancée.

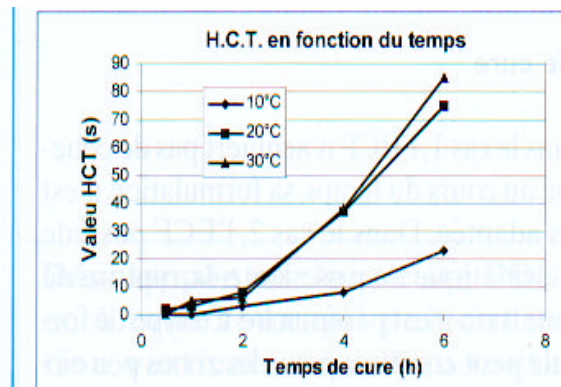


Fig III.3 : Valeur de cohésion HCT à différentes températures de cure, émulsion à 20° C [13]

La figure III.3 montre les cinétiques de montée en cohésion d'une même formule d'enrobé fabriquée à partir d'émulsion à 20° C et de matériaux conditionnés à 10, 20 et 30 °C.

➤ *Composition granulaire*

L'enrobe testé lors de cette étude est composé de :

- Granulats (0/2)	45%
- Granulats (2/6)	55%
- Eau d'apport	8%
- Additif	2%
- Fine d'apport	1%
- Emulsion	11%

Une bonne maniabilité est obtenue quelle que soit la température des matériaux lors de la fabrication des enrobés.

La vitesse de montée en cohésion pour une même formule d'émulsion est beaucoup plus faible à 10°C et montre l'intérêt de formuler une émulsion plus adaptée à basse température.

III.2.4- Test TCSS (Test de cohésion superficielle Screg)

Le principe du nouveau test de TCSS [14], est le suivant :

Un enrobé est coulé juste après sa fabrication dans un moule de 320 mm de diamètre et de hauteur en relation avec la granulométrie des enrobés à analyser :

- 2,7 mm pour les ECF de granulométrie 0/10 mm.
- 10 mm pour les ECF de granulométrie 0/8 et 06mm.
- 6,3 mm pour les ECF de granulométrie inférieure à 0/6mm.

➤ *Appareillage de l'essai TCSS*

Au préalable, une émulsion est utilisée en couche d'accrochage sur base du moule. L'ensemble est pesé. Après un délai de mûrissement donné, l'échantillon est placé dans un moule de 330 mm de diamètre et de 45 mm de hauteur, sur un malaxeur planétaire de type Hobart A 200.



Fig III.4 : Appareil de l'essai TCSS [13]

Les conditions de cure sont enregistrées (température, humidité relative). La hauteur de l'éprouvette est ajustée de manière à la mettre en contact avec la tête abrasive, constituée de deux roues en caoutchouc dur.

Les roues ont un diamètre de 100 mm, une largeur de contact de 22 mm et une dureté Shore A comprise entre 75 et 95.

La poids total du système abrasif est de l'ordre de 1.1kg. L'échantillon est recouvert d'eau et le mouvement planétaire est mis en route à vitesse 1 durant 60 secondes.

Juste après le test, les rejets sont évacués en rinçant l'échantillon à l'aide d'un bêcher contenant un litre d'eau.

L'échantillon est asséché à l'aide d'un papier absorbant et pesé (figure III.5 et III.6). Le rejet est quantifié en grammes.

Il est également possible d'obtenir la masse de rejet par pesée directe de la masse de matériaux rejetés.

figure 7.



Fig III.5 : Aspect d'un échantillon de cohésion correcte après essai TCSS [13]

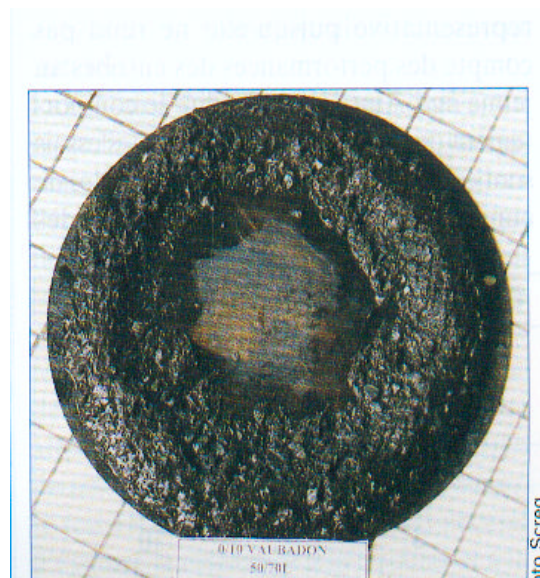


Fig III.6 : Aspect d'un échantillon d'ECF non cohésif [13]

Un grand nombre d'essais à été conduit, et les résultats obtenus, mettent en évidence l'influence de quelque paramètres sur la cohésion des enrobés coulés à froid, tels que la température de cure, le type de matériaux ou de liant utilisé pour fabriquer les émulsions.

Pour toutes les formules testées, le système tensioactif nécessaire à la réalisation de l'émulsion est identique. Les principaux résultats sont les suivants :

- ✓ Il a été noté une nette diminution de la cohésion de l'enrobé lorsqu'il est réalisé à 10° C.
- ✓ La perte de masse est divisée par 5 lorsque l'enrobé est coulé à 20° C.

Une perte de masse inférieure à 100 g est représentative d'un enrobé coulé à froid (ECF) cohésif. Une perte de masse de l'ordre de 300 g correspond à un ECF de cohésion moyenne, et si la perte est proche de 600g, l'ECF correspondant ne résistera pas à une remise au trafic.

Plusieurs cas de figure peuvent se présenter, quelques exemples sont donnés sur la figure III.7.

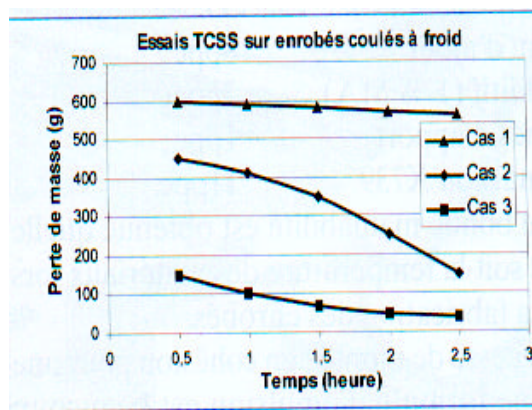


Fig III.7 : Evaluation des ECF au TCSS [13]

Dans le cas 1, l'ECF n'acquiert pas de cohésion au cours du temps, sa formulation n'est pas adaptée.

Dans le cas 2, l'ECF possède une cinétique de prise lente, la rupture de l'émulsion n'est pas franche. Ce type de formule peut convenir pour des zones peu circulées ou lorsque la remise au trafic n'est pas urgente.

Dans le cas 3, la cinétique de prise est idéale. Dans la demi-heure qui suit sa fabrication, l'enrobé a atteint une cohésion suffisante pour une remise au trafic sans risque de dégradation.

Bien sûr, tous les cas intermédiaires à ces exemples peuvent se présenter, et il est possible d'analyser l'effet d'un certain nombre de paramètres sur le comportement au jeune âge des enrobés (température, humidité relative, type de liant, système émulsifiant, type et quantité d'additifs, type et quantité de fines d'apport...).

La méthodologie décrite dans cet article a été employée pour mettre au point de nouvelles formulations d'ECF, adaptés à des situations particulières.

En l'occurrence, des études ont abouti à l'élaboration d'ECF applicables à basse température, ceci, afin d'allonger leur saison de mise en œuvre.

D'autre part, la méthodologie a été mise à profit pour définir des formules d'ECF destinées aux fort trafics, en jouant sur la réparation granulométrique des granulats et sur la liant de base.

III.3- Etude de la maniabilité des enrobés à froid

Une autre étude menée par **V.MEYER** en Octobre 2000, a permis d'étudier la maniabilité des enrobés à froid, qui est un des facteurs-clés permettant le bon déroulement d'un chantier d'enrobé à froid [15].

Lors du déversement du camion ou de la mise en forme par l'engin de répannage (finisseur ou niveleuse), le matériau ne doit pas présenter de raideur excessive.

La maniabilité est évaluée au laboratoire selon des critères visuels. L'intérêt du développement d'un test est donc d'obtenir une mesure quantitative de la facilité de mise en œuvre d'un enrobé.

En plus d'une bonne maniabilité, l'enrobé à froid doit montrer une forte cinétique de montée en cohésion.

L'étude de la maniabilité des enrobés à froid au jeune âge est donc complétée par un suivi de l'évolution de la montée en cohésion au cours du temps pour les différentes formulations étudiées.

Le but de cette étude est de valider les méthodologies de mesure de la maniabilité des enrobés à froid par comparaison de résultats en laboratoire avec les comportements observés sur le terrain.

A l'échelle du laboratoire, la maniabilité est évaluée selon des critères visuels (subjectifs et non quantifiables) et c'est pour cela que deux tests ont été développés à savoir les tests **Nynas** et **Esso** afin de valider une méthodologie de mesure de la maniabilité des enrobés à froid et donc d'obtenir une mesure quantitative de la facilité de mise en œuvre d'un enrobé et donc de sa maniabilité.

Pour cette étude [9], les paramètres variables sont le grade du bitume (70/100 ou 180/220), la nature de l'émulsifiant (réactivité plus ou moins importante) et le mode de fabrication de l'émulsion (classique au moulin colloïdal, amélioré au moulin et procédé hydrodynamique Esso [SMEP]).

Cinq formulations de grave émulsions ont été utilisées à savoir les formules A,B,C,D et E caractérisées par :

- Formule A : bitume 70/100; fabrication SMEP (Emultech); émulsifiant 1 (grand réactivité) [6].
- Formule B : bitume 70/100 ; fabrication moulin ; émulsifiant 1.
- Formule C : bitume 70/100 ; fabrication moulin amélioré ; émulsifiant 1 (même formule que B avec procédé de fabrication différent).
- Formule D : bitume 180/220 ; fabrication SMEP (Emultech); émulsifiant 1.
- Formule E : bitume 180/220 ; fabrication moulin ; émulsifiant 2 (petite réactivité).

Tous les enrobés sont préparés en respectant les quantités suivantes:

- Les granulats utilisés sont de deux types, alluvionnaire et massif (figure III.5).
- Eau totale 5%.
- Liant résiduel 4,2%.

Les cinq formulations de grave-émulsion (A,B,C,D et E) appliquées sur le chantier comparatif ont fait l'objet d'évaluation en terme de cohésion au cours du temps.

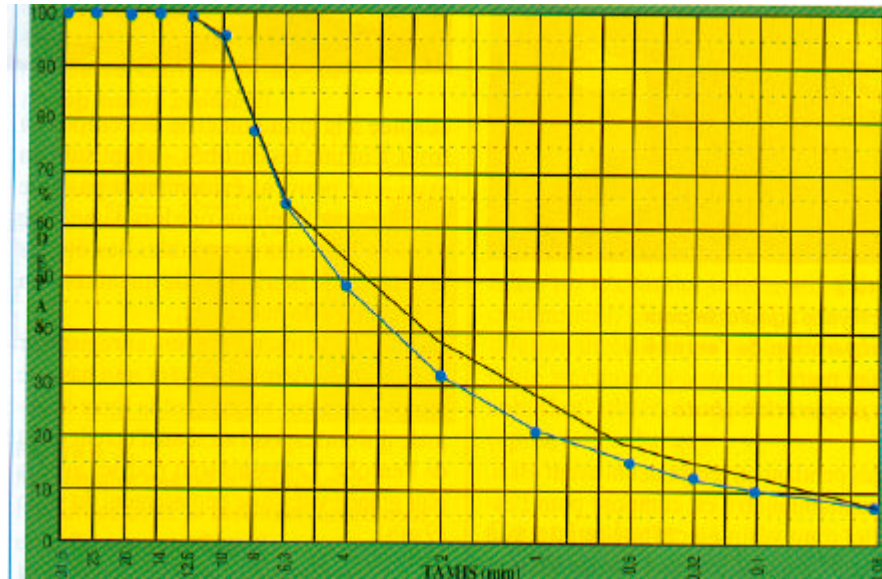


Fig III.8 :Répartition granulométrique des granulats (ouverture des tamis en fonction du pourcentage des passants) [15]

III.3.1- Test de maniabilité Nynas

III.3.1.1- Description générale

Les moules utilisés, sont de dimension (L x l x h = 330 x 220 x 130 mm) et sont remplis d'enrobés à l'aide d'une goulotte ayant pour fonction d'assurer la mise en place de l'enrobé de manière reproductible.

Les échantillons d'enrobés sont ensuite, arasés sans être tassés puis conservés à température et humidité relative maîtrisées pendant un temps défini avant essai.

Le maniabilimètre est composé pour l'essentiel d'un vérin électrique muni à son extrémité d'un capteur de force de 500 N et d'une lame de poussée sur une largeur de 220mm et une hauteur de 50mm (deux parois opposées du moule sont sur une hauteur de 50mm).

L'essai consiste à mesurer la force de résistance opposée par l'enrobé à l'effort de cisaillement généré par la poussée du vérin électrique figure III.9.

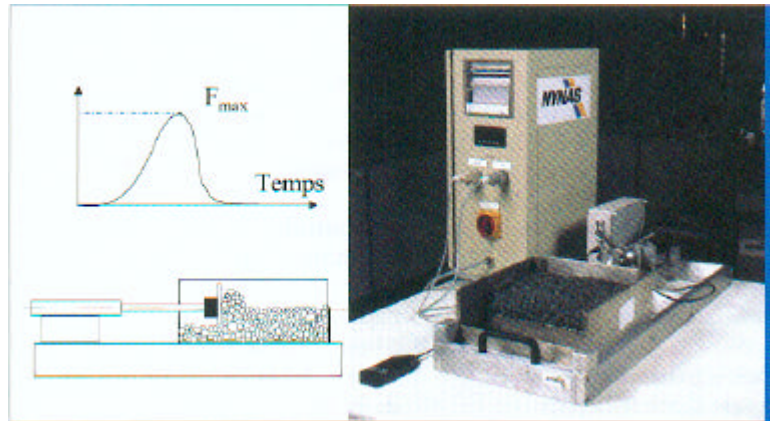


Fig III.9 : Test Nynas ; vue d'ensemble pendant un essai [20]

III.3.1.2- Protocole expérimental

Les enrobés sont préparés à l'aide d'un malaxeur. Ils sont d'abord placés au repos 15 minutes dans le malaxeur, puis dans une trémie et enfin versés dans le moule. Ils sont ensuite soumis à un temps de cure de 1 h 45 à 18° 50% HR avant l'essai.

Des essais de répétabilité ont donné des résultats satisfaisants (5%-6%). Pour ce faire, des enrobés à froid très différents par leur formulation (formule et quantité des liants résiduels et origine des matériaux) et leur niveau de maniabilité sur le terrain ont été réalisés.

Les essais de maniabilité ont été conduits à différentes températures en comparaison avec un enrobé à chaud classique. Les enrobés suivants ont été testés :

- grave-émulsion classique.
- grave-émulsion à forte maniabilité Compograde [56].
- enrobé stockable pour entretien courant Compomac M (très fluxé) [38].
- béton bitumineux à chaud 0/10 (5,7 % de bitume 50/70).

Des exemples de résultats obtenus sont consignés dans le tableau III.1. Les résultats montrent bien l'influence de la température, de la viscosité du liant et du type de matériaux utilisés sur le degré de maniabilité des enrobés à froid et permettent de quantifier le niveau de maniabilité des enrobés à froid [7].

Tableau III.1 : Niveau de maniabilité de différentes formules d'enrobé

Formules	Roche Alluvionnaire	Roche massive
	Maniabilité (N)	
Grave-émulsion 10°C	390	300
Grave-émulsion 17°C	275	260
Compograde 10°C	250	170
Compograde 17°C	200	140
Compograde M stockable 10°C	110	110
Compograde M stockable 17°C	100	120
Béton bitumineux 160°C	100	–

III.3.2- Test de maniabilité Esso

III.3.2.1- Description générale

Le principe du test de maniabilité Esso repose sur la mesure de la force de torsion nécessaire pour déstructurer une certaine quantité d'enrobé à froid.

Les courbes obtenues représentent la force en fonction du temps. Pour l'exploitation des résultats, seule la force maximale mesurée est prise en compte.

L'ensemble du dispositif expérimental est entièrement automatisé et une acquisition informatique des données est effectuée.



Fig III.10 : Vue générale du test de maniabilité Esso

III.3.2.2- Protocole expérimental

Le protocole de préparation de l'échantillon est le suivant :

- ✓ Environ 10 Kg d'enrobé sont préparés dans une mini-centrale d'enrobage, quatre moules rectangles sont remplis avec environ 2.5 Kg de matériaux et sont soumis à une vibration.
- ✓ Ce mode de préparation permet d'obtenir quatre valeurs de « maniabilité » et donc de faire une moyenne des quatre mesures.
- ✓ Le résultats est considéré comme valide si l'écart type relatif est inférieur à 10 % pour trois des quatre valeurs obtenues.
- ✓ Les échantillons sont stockés à $22^{\circ}\text{C} \pm 2$ et à 50% HR avant essai.

III.3.2.3- Evaluation de la cohésion des enrobés mise en œuvre

Les cinq formulations de grave-émulsion (A,B,C,D et E) appliquées sur le chantier comparatif ont fait l'objet d'évaluation en terme de cohésion au cours du temps.

La figure III.11 montre l'évolution de la résistance en compression simple des échantillons de grave émulsion prélevés sur le terrain après différents temps de cure au laboratoire à 18° et 50 % d'humidité relatives.

Le classement Duriez des différentes formules montre un niveau de résistance plus faible pour les grave-émulsion à base de bitume 180/220 (environ 2 MPa de moins que celles fabriquées au 70/100), un très bon niveau de performance pour les formules à base d'émulsion au 70/100 fabriquées au SMEP et d'émulsions fabriquées selon le procédé amélioré au moulin colloïdal.

Cette dernière formule, comparée à la formule classique fabriquée au moulin colloïdal engendre pour l'enrobé à froid correspondant un gain en termes de cohésion de l'ordre de 3 MPa (figure III.11).

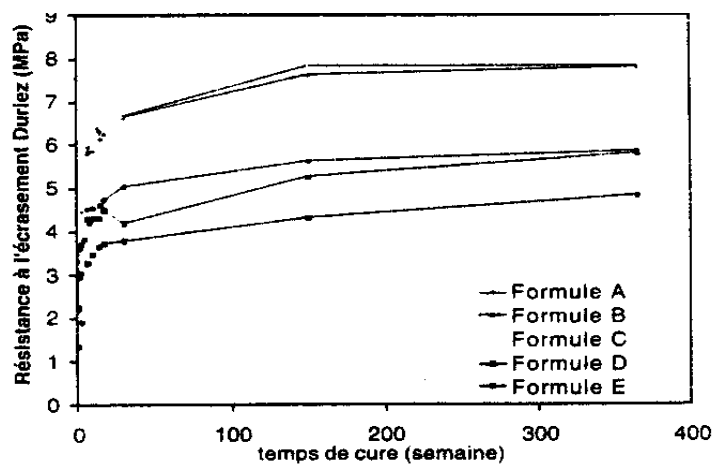


Fig III.11 : Résistance à l'écrasement Duriez en fonction du temps de cure pour les formules (A, B, C, D et E) [15]

III.3.2.4- Influence de la formulation de l'émulsion sur la maniabilité de l'enrobé

La maniabilité des enrobés a été déterminée au laboratoire selon les deux tests décrits ci-dessus. Les figures III.12 et III.13 montrent l'importance de la formulation des émulsions.

En effet, Si l'on compare les deux formules de grave-émulsion fabriquées à base d'émulsion au bitume 180/220 (D et E), celle contenant peu de tensioactif plus « stabilisant » (émulsifiant 2) conduit à une grave-émulsion un peu plus maniable que celle contenant un tensioactif à rupture plus rapide.

D'autre part, si l'on compare les graves - émulsion réalisées à partir de bitume 70/100, on remarque une légère perte de maniabilité pour la grave-émulsion « améliorée » fabriquée au moulin.

Dans le cas présenté ici, pour un écart faible en terme de maniabilité, le gain en cohésion obtenu sur le terrain a été très important.

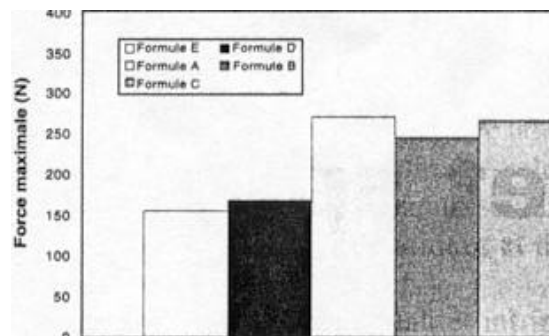


Fig III.12 : Maniabilité des 5 formulations mesurée avec les tests Nynas [15]

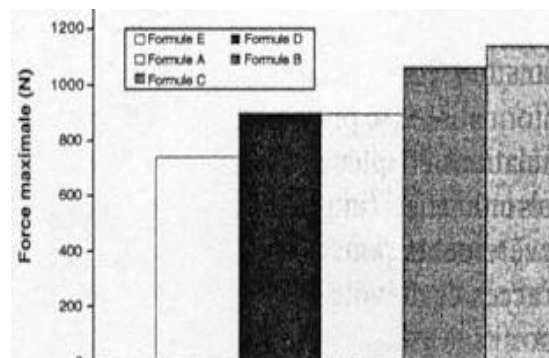


Fig III.13 : Maniabilité des 5 formulations mesurée avec les tests Esso [15]

III.3.2.5- Influence du temps de stockage

Les essais de stockage ont uniquement été réalisés en liaison avec le test de maniabilité Esso.

Après fabrication, les enrobés sont transférés dans les moules, vibrés puis stockés.

Selon les séries, la maniabilité est mesurée immédiatement (20minutes), après deux heures ou six heures de stockage.

Cette procédure permet de quantifier la perte de maniabilité au cours du temps pour chaque formulation.

L'histogramme de la fig III.14 illustre l'évolution de la force nécessaire à déstructurer l'enrobé pour différents temps de cure à température contrôlée.

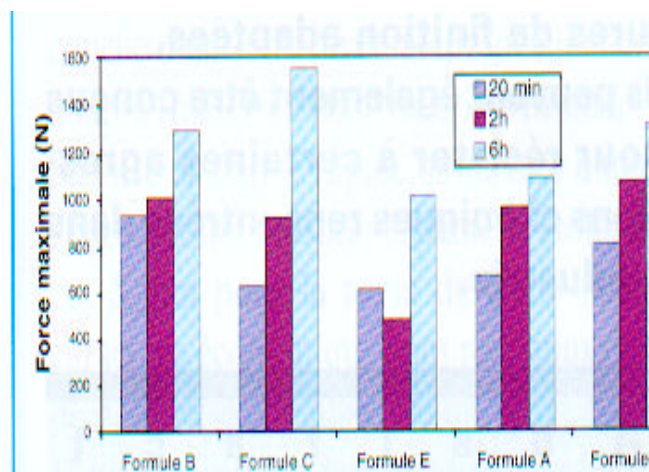


Fig III.14 : Maniabilité des différentes formulations après stockages de 20 minutes, 2 et 6 heures (protocole Esso) [15]

Quel que soit le type de formulation, la maniabilité du matériau diminue au cours du temps (la force nécessaire à déstructurer le matériau augmente). Cette perte de maniabilité peut être associée à un début de prise en cohésion de l'enrobé.

La perte de maniabilité de la grave-émulsion « améliorée » (formule C) est nettement plus importante que celle des quatre autres formulations testées.

En conclusion les deux tests présentés ci-dessus permettent de quantifier la maniabilité au jeune âge des enrobés.

L'influence d'un certain nombre de paramètres est mise en évidence : la température d'essai, la formulation de l'émulsion (grade de bitume, type d'émulsifiant, mode de fabrication), le temps de stockage des enrobés ont un effet important sur le degré de maniabilité des enrobés à froid.

Les résultats présentés ici mettent également en évidence le fait que pour une même formule, une forte augmentation de la cohésion de l'enrobé peut être obtenue en jouant sur les paramètres de fabrication de l'émulsion sans perte significative du niveau de maniabilité (formules A, B et C).

Une autre étude sur la maniabilité présentée par B.ECKMANN et al et réalisée en janvier 2002, a pour but d'étudier d'une façon plus approfondie l'incidence possible, toutes choses égales par ailleurs, des trois paramètres de formulation suivants [20] :

- ✓ La teneur en eau totale
- ✓ La granulométrie de l'émulsion
- ✓ La teneur en émulsifiant résiduel

Le matériel utilisé est le maniabilimètre Nynas décrit précédemment.

Cette étude a porté sur une grave émulsion 0/10 formulée avec une émulsion de bitume 180/220 à 0.8 % d'un polyamine acidifiée avec de l'HCl.

Les facteurs retenus sont les suivants :

- ✓ La nature du granulat (acide ou basique)
- ✓ La température (15, 25°C)
- ✓ Le type de bitume (naphténique/paraffinique)
- ✓ La teneur en émulsion (3.5 et 5.1 % de bitume résiduel)
- ✓ La teneur en eau des matériaux (4 et 6 %).

Les forces de cohésion ont été mesurées pour quatre durées de mûrissement (0 à 15 h).

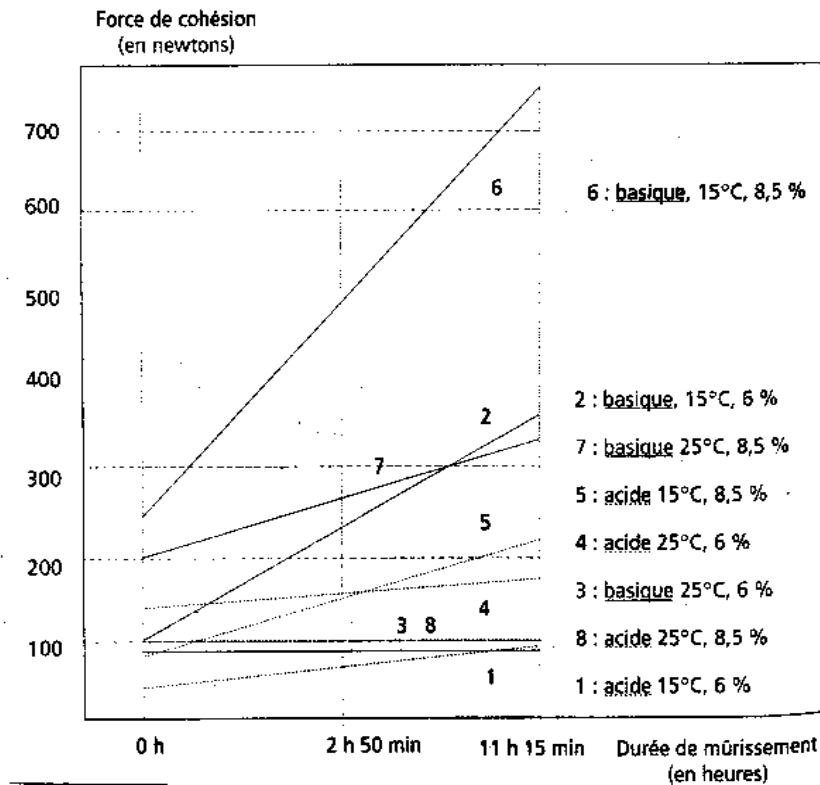
Dans cette étude, les trois facteurs prépondérants de par leur influence sur l'évolution de la maniabilité sont apparus comme étant, par ordre décroissant d'influence :

- ✓ La nature du granulat
- ✓ La température
- ✓ La teneur en émulsion.

Les principaux résultats obtenus sont :

- ✓ La nature du bitume ainsi que la teneur en eau des matériaux n'ont eu qu'un effet limité, voir négligeable, sur le résultat final. En donnant une valeur « moyenne » à ces deux derniers paramètres, on peut alors représenter graphiquement le modèle expérimental

- ✓ traduisant la contribution des trois facteurs les plus importants comme le montre la figure ci dessous (figure III.15).



**Fig III.15 : Essai de validation du maniabilimètre Nynas :
force de cohésion en fonction du temps de mûrissement [20]**

On montre ainsi une très forte contribution de la nature basique du granulat sur la valeur initiale de la cohésion ainsi que sur l'évolution au cours du temps. Cet effet est amplifié lorsque la teneur en émulsion (c'est-à-dire la teneur en bitume résiduel) augmente ainsi que lorsque la température est maintenue assez basse (15°C - 25°C).

L'interprétation du rôle joué par la température est plus délicate car elle agit à la fois sur la cinétique de rupture de l'émulsion et sur le module de rigidité du bitume.

Aux températures élevées (25°C), on obtient une évolution rapide vers des valeurs de cohésion relativement faibles. Celles-ci peuvent s'expliquer à la fois par une mauvaise qualité de l'enrobage (rupture rapide et irrégulière de l'émulsion, plus particulièrement avec un granulat réactif) et par la rigidité plus faible du bitume.

A « froid », la rupture est sans doute plus progressive. D'où un meilleur enrobage et une augmentation soutenue de la cohésion en fonction du temps, vers une valeur ultime élevée résultant à la fois de la rigidité importante du bitume à 15°C et de la « qualité » de l'enrobage.

Cette étude a donc montré la capacité du maniabilimètre à différencier les effets des facteurs de formulation (nature du granulat, teneur en émulsion) ou climatiques (température) majeurs. Il en résulte que le maniabilimètre peut être utilisé pour des études de formulation.

Pour ce qui est de la teneur en eau totale, exprimée en % du poids des matériaux celle-ci a été ajustée aux valeurs de 5 % et 6,5 %.

La granulométrie de l'émulsion définie comme la finesse de l'émulsion, se traduisant notamment par une plus grande surface spécifique, est susceptible d'influencer la qualité de l'enrobage (homogénéité du film de liant) ainsi que le comportement à la rupture de l'émulsion.

Il a été fabriqué, dans la limite des possibilités de l'appareillage, deux types d'émulsions dites à granulométrie « serrée » et « étalée ».

Les principales caractéristiques granulométriques de ces émulsions sont rassemblées dans le tableau ci après :

Tableau III.2 : Caractéristique des émulsions utilisées

Teneur en émulsifiant résiduel	Granulométrie	Diamètre moyen	Diamètre médian
0,3	« Serrée »	5,5	4,9
0,3	« Etalée »	13,1	9,5
0,6	« Serrée »	6,3	5,0
0,6	« Etalée »	9,4	7,6

Les courbes granulométriques de ces deux émulsions sont présentées par la figure III.16 :

La teneur en émulsifiant résiduel, doit bien sûr avoir une incidence sur la maniabilité en modifiant les temps de rupture de l'émulsion.

Afin de garder cette variable indépendante de la granulométrie, il a fallu procéder à un ajustement de cette valeur après la fabrication de chaque émulsion, par ajout d'une solution concentrée de tensioactif. La qualité à ajouter étant définie par un dosage de l'émulsion résiduel après fabrication [62].

Les teneurs en émulsifiant résiduel retenues ont été de 0,3 % et 0,6 %. Le montage de ce plan d'expérience étant assez laborieux, il a été limité à ces trois variables avec comme principales constantes les éléments suivants :

- ✓ Un seul bitume 70/100 d'origine vénézuélienne.
- ✓ Un seul type d'émulsifiant (polyram S).
- ✓ Une teneur en bitume résiduel de 4% (émulsions à 60% de liant).
- ✓ Un seul type de granulat [12], dont la courbe granulométrique retenue étant celle d'une grave-émulsion GE 0/10 (voir chapitre II).

Tous les essais ont été conduits dans des conditions constantes de température et d'hygrométrie (25°C-60% d'humidité relative).

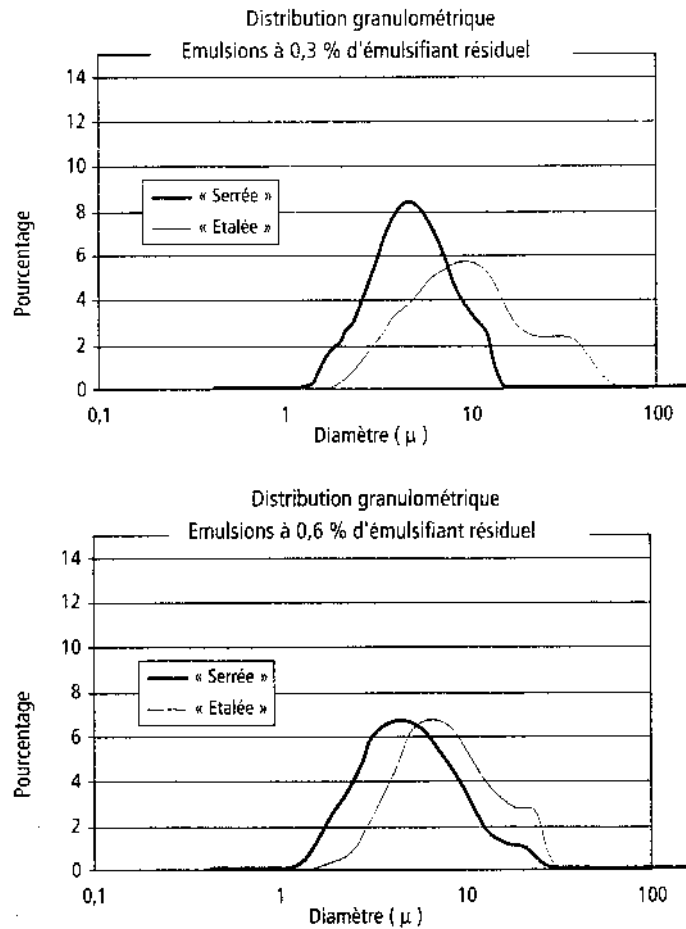


Fig III.16 : Etude au maniabilimètre -Incidence de la granulométrie et la teneur en émulsifiant résiduel – Granulométrie des émulsion [20]

Comme le montre la figure III.17, la teneur en émulsifiant résiduel s'est clairement révélée être le paramètre prépondérant dans ce cas.

Pour des teneurs en émulsifiant résiduel relativement faibles, les forces de cohésion restent à des niveaux faibles et évoluent peu au cours du temps.

Ceci a été attribué à une rupture rapide de l'émulsion entraînant un enrobage irrégulier du granulat. Dans ces conditions ,les plages de variation étudiées des teneurs en eau de la granulométrie de l'émulsion n'ont pas eu d'impact significatif sur le comportement observé.

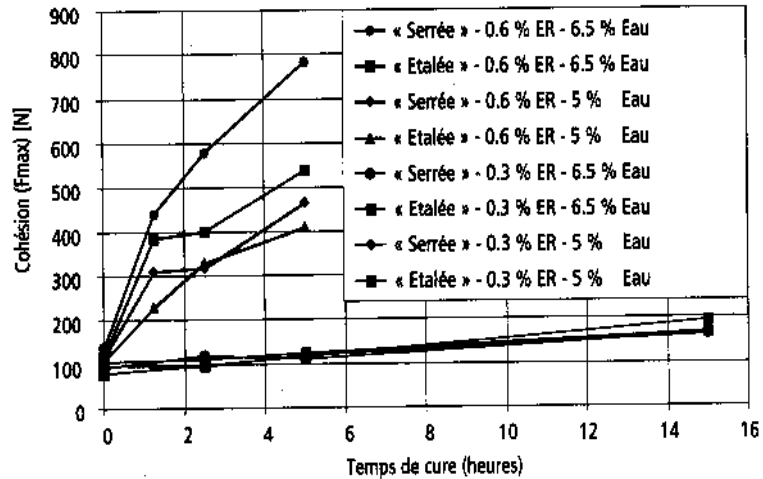


Fig III.17 : Influence du temps de cure sur la cohésion [20]

Des niveaux de cohésion plus importants et surtout, une évolution plus marquée, sont observés pour les fortes teneurs en émulsifiant résiduel. Cet effet a été attribué à une rupture plus agressive de l'émulsifiant conduisant à un enrobage plus uniforme du granulat et donc une multiplication des points de contact. Cet effet de « prise différée » de l'émulsion semble également être favorisé lorsque :

- ✓ la teneur en eau totale augmente
- ✓ la granulométrie de l'émulsion est plus serrée

Cette hypothèse de la rupture progressive a également pu être confortée par le fait que le relargage d'eau durant le temps de cure était plus importante dans le premier cas (0,3 % d'émulsifiant résiduel) que dans le second.

III.4- Etude du film de liant

En 2000, au laboratoire de chimie de l'université du Havre, **L. LOEBER** étudia une nouvelle méthode [36] permettant de contrôler la formation du film de liant dans les enrobés à froid afin de mieux connaître les mécanismes de rupture, d'adhésion et de filmification des émulsions cationiques [61].

Pour cela, le matériel utilisé est un outil très prometteur qui est le microscope à force atomique (**AFM**), qui repose sur le principe suivant [65]:

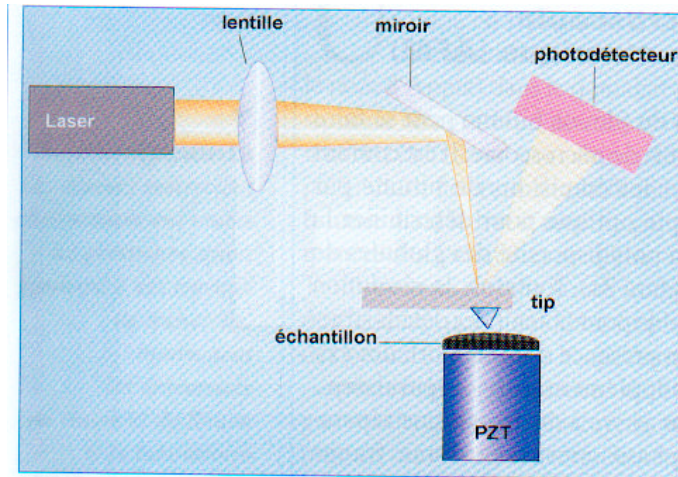


Fig III.18 : Microscope à force atomique [36]

Pour réaliser l'image d'une surface, on peut utiliser l'interaction entre une pointe microscopique placée à l'extrémité d'une lame flexible et un ressort.

La déflexion de lame est proportionnelle aux forces d'interactions entre la surface et l'atome du bout de la pointe. Le balayage de la surface à observer permet d'établir la topographie de l'échantillon.

L'**AFM** permet d'obtenir une approche détaillée de l'arrangement des globules et l'observation en détail, non seulement du film humide pendant la phase de coalescence, mais également le film à l'état sec (rupture complète sur le support minéral). La présence de l'eau n'empêche en aucun cas l'observation.

La performance de cette technique permet une approche de l'état du bitume jusqu'à quelques dizaines de manomètres! Ainsi le tensioactif qui y est toujours présent, peut être localisé, des fissures ou des trous dans le film peuvent être détectés et l'homogénéité du film sec peut être ainsi contrôlée [35].

Une bonne corrélation de la taille des globules de bitume a été trouvée avec celle d'autre types de mesures (granulométrie laser ou Coulter, microscopie optique).

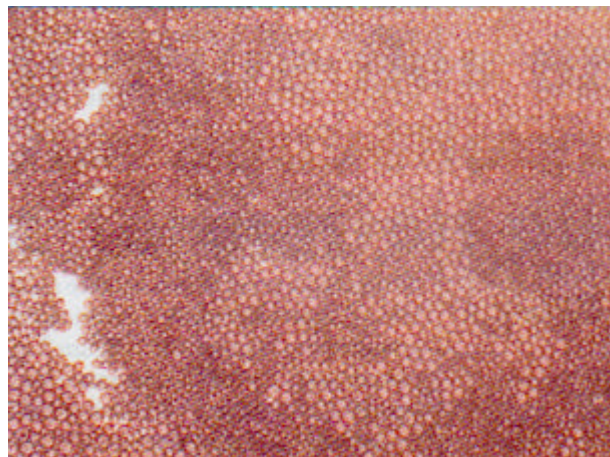
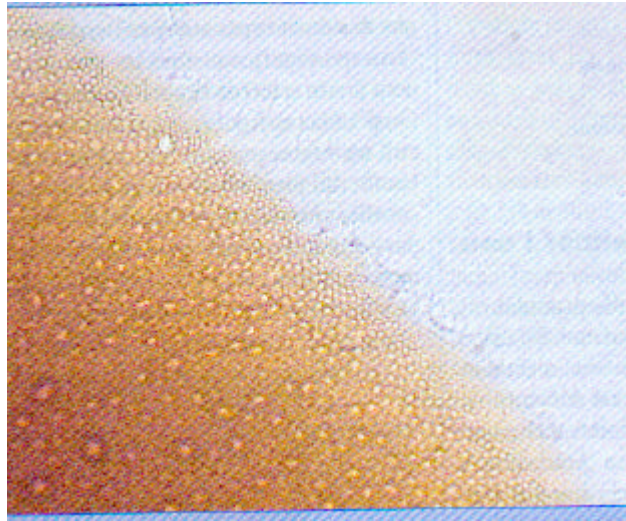
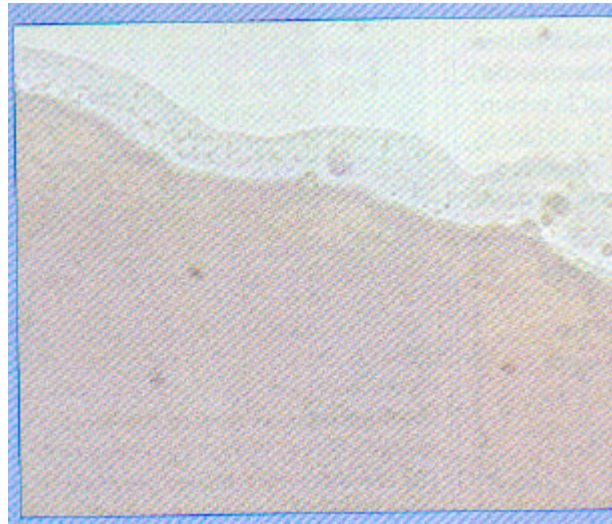


Fig III.19: Visualisation d'une émulsion Humide par microscope optique [36]



(a)



(b)

Fig III.20 : Visualisation du film d'émulsion de bitume par microscope optique, présence d'une séparation de phases [36]

III.4.1- Observation du film humide

En déplaçant le bitume, ou son émulsion sur une surface minérale, une couche mince est adsorbée. On peut y accéder par nettoyages successifs à l'eau. C'est sur ce principe que les analyses par AFM du film humide ont été effectuées.

L'AFM nous permet également de mesurer l'épaisseur des globules : si l'épaisseur apparente est beaucoup plus faible que la dimension d'étalement, on peut supposer que ce globule est en cours d'adsorption sur le substrat [37].

L'AFM est utilisé de façon que l'émulsion reste entourée d'eau. Ceci garantit que la morphologie des globules de bitume n'est pas altérée.

Ils sont toujours séparés par des interfaces nettes et distinctes et adoptent des formes illustrées par la figure III.21 la hauteur du film en coalescence ou adsorbé est comprise entre 150 et 1500 nanomètres.

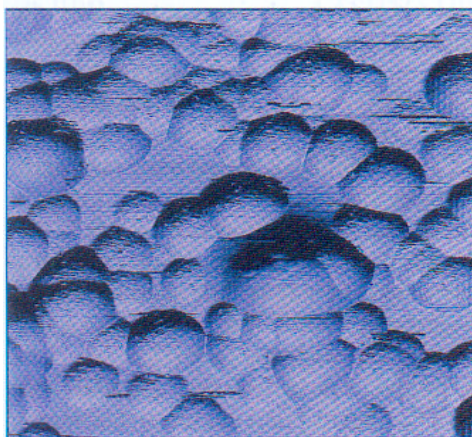


Fig III.21 : Photo prise par AFM de deux émulsions à l'état humide et adsorbées sur un support minéralogique [36]

III.4.2- L'observation du film sec

Pour comparer les films secs de différentes émulsions, deux méthodes de préparation ont été utilisées (AFM dans l'air).

La figures III.22 (a et b) consistait à observer seulement la partie du film adsorbé et séché, d'une faible épaisseur (quelques dizaines de nanomètres 30 à 50).

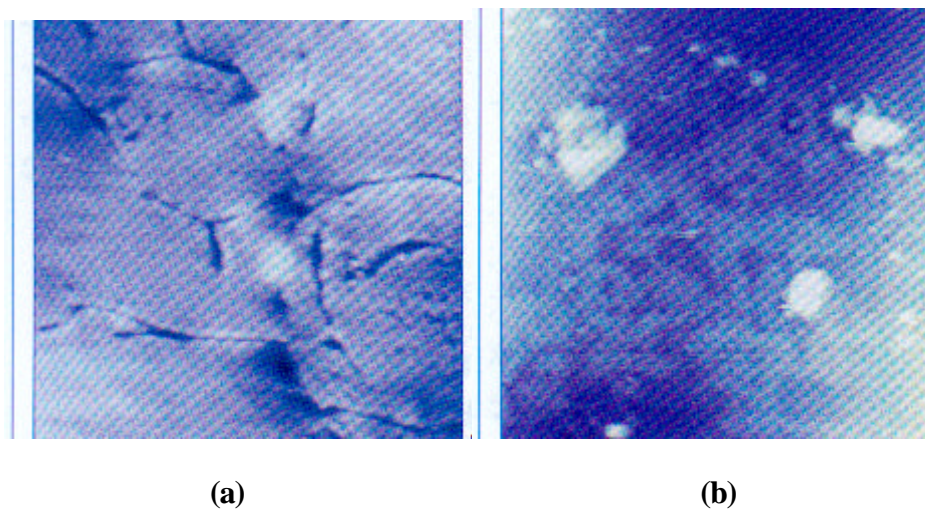


Fig III.22 : La visualisation de deux émulsions de bitume adsorbées et en état sec, (a) avec fissures et trous, (b) homogène et continue [36]

La deuxième méthode a consisté à laisser sécher le film dans sa totalité (une heure sous vide) et à l'observer à sa surface (figure III.23). L'épaisseur du film faisait dans ce cas plusieurs milliers de nanomètres.

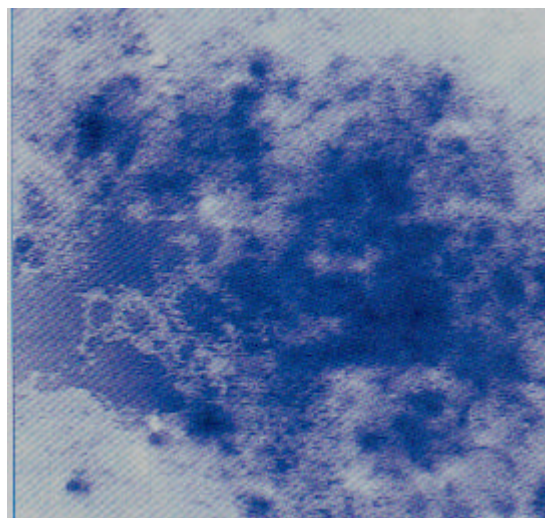


Fig III.23 : Visualisation par AFM de la surface du film sec séparé selon la deuxième méthode (surface continue et homogène) [36]

La deuxième méthode, bien que qualitative quant aux informations obtenues, ne permettait pas de distinguer précisément les deux films. La surface semblait être homogène pour toute émulsion analysée.

L'analyse des émulsions de bitume par AFM nous permet en corrélation avec des méthodes plus classiques, de mieux comprendre les phénomènes à la formation du film.

III.5- Etude de l'influence des fines sur la rupture des émulsions

En 1997, une étude menée à l'école des mines d'Ales par **Z. ZIZI et M. PASTOR, A. BENHASSAINE et A. SAINTON** se sont intéressés à l'influence de fines minérales (dimension et surface spécifique) sur la rupture d'une émulsion bitumineuse dans un enrobé à froid et à ses effets sur l'enrobage du squelette [66].

Quatre fractions de fines siliceuses (non poreuses et inertes chimiquement vis à vis de l'émulsion) comprises entre 0 et 30 μm (densité=2,65 ; 99% de SiO_2) ont été incorporées dans des enrobés à froid par substitution aux fines naturelles du sable.

Tableau III.3 : Caractérisation granulométriques des fines utilisées

Fines	FS1	FS2	FS3	FS4
D₅₀ (μm)	2.2	12.5	21.1	30.5
S (cm^2/g)	14570	8060	4020	2760

Les fines incorporées sont non réactives en présence de l'émulsion, non poreuses et les auteurs ont fait varier uniquement les paramètres surface spécifique S et la dimension d.

Les enrobés ont été confectionnés selon le procédé Duriez. La figure suivante donne les courbes granulométriques des fines utilisées .

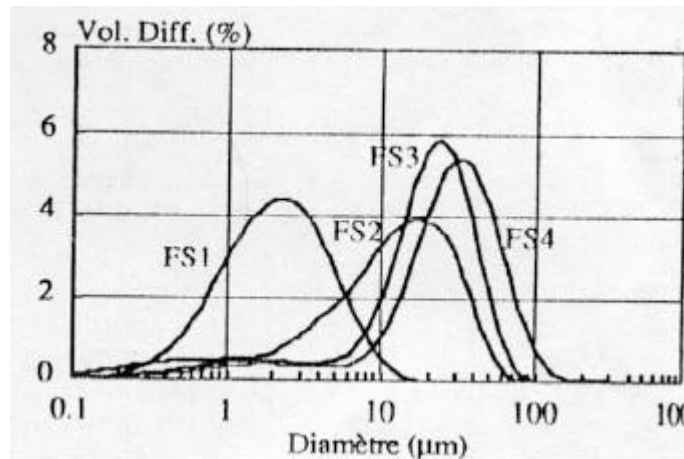


Fig III.24 : Courbe granulométrique des fines utilisées [66]

Les enrobés formulés sont de classe granulaire 0/10. La rupture de l'émulsion dépendant de la surface spécifique développée surtout par la partie fine, la courbe granulométrique a été décomposée en une fraction constante 0.080/10mm et une fraction fine variable 0/0.80mm constituée par les fractions siliceuses.

La partie granulométrique 0.080/10 est reconstituée à partir de trois fractions de diorite:

Sable	0/2
Gravillon	2/6
Gravier	6/10

Notons que les fines naturelles du sable (fraction inférieure à 0.080mm), soit 7%, ont été éliminées par tamisage (voie humide). Les fractions ont été lavées puis séchées dans un four à 105°C pendant 24 heures.

La distribution granulométrique du mélange 0.080/10 (figure III.25) est maintenue constante pour les formulations étudiées et le tamisât à 0.080mm est constitué par les fines siliceuses.

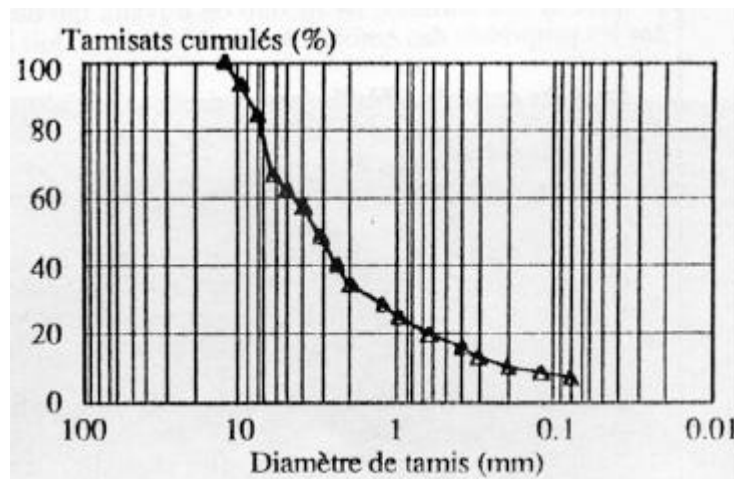


Fig III.25 : Distribution granulométrique du mélange 0,008/10 [66]

Les fines siliceuses (la fraction variable 0/0.80) FS1, FS2, FS3, FS4 ont été incorporées avec un pourcentage de 7 % venant se substituer aux fines naturelles du sable.

L'émulsion de bitume utilisée est une émulsion à 60% à base de bitume pur 180/220.

Quatre types d'enrobés contenant chacun une fraction de fines (FS1 à FS4) ont été confectionnés selon le procédé Duriez -LPC .

Le tableau suivant résume les compositions des différents mélanges.

Tableau III.4 : Composition des différents enrobés étudiés

Type d'enrobé	Fines	% fines	% émulsion	% eau d'ajout
ES1	FS1 (2.2µm)	7%	8.5%	3%
ES2	FS2 (12.5µm)			
ES3	FS3 (21.1µm)			
ES4	FS4 (30.5µm)			

Les éprouvettes, après une période de mûrissement ont servi pour des observations microscopiques sur des échantillons de lames minces (30 x 45mm²) prélevés au cœur des éprouvettes d'enrobé et ont permis de mettre en évidence le type d'enrobage en fonction des caractéristiques granulométriques (surface spécifique, dimension de la fraction fine utilisée) et de le corréler avec le mécanisme de rupture de l'émulsion.

Une rupture et un enrobage optimum ont été atteints en utilisant des fines de 20µm à 30µm. Les fines de dimensions inférieures, de surface spécifique très élevée se sont révélées néfastes.

L'influence de la surface spécifique (et de la dimension) a été examinée par l'étude du système « émulsion - fines siliceuses », et a mis en évidence deux mécanismes de rupture de part et d'autre d'une dimension de 20µm : rupture contrôlée au dessus de 20µm, rupture

instantanée et incontrôlée au dessous de 20 μ m (pour des surfaces spécifiques très élevées) et ceci grâce à une technique d'observation microscopique appropriée [64].

III.6- Modification de l'émulsion par incorporation d'un système réactif

L'emploi de bitumes durs dans les enrobés à froid n'est pas possible en raison de deux types de difficultés :

- ✓ Le compactage est difficile et les compacités obtenues sont basses.
- ✓ La coalescence des globules de bitume est lente (en fait, elle a lieu pendant les périodes chaudes) ; l'enrobé à froid reste donc fragile longtemps, avec tous les risques de désordres que cela peut engendrer.

Dans la pratique, on est donc amené à limiter la consistance des bitumes utilisés. Ainsi, dans les zones dites « tempérées », on ne va guère au-delà de la classe 70/100.

Les performances mécaniques des enrobés à froid s'en trouvent automatiquement limitées.

Dans ce cadre une étude menée par **J.P.Serfass** du **Screg** en 1997 a consisté à utiliser dans l'émulsion d'enrobage, un ensemble réactif [57].

Dans un premier temps le système agit comme un fluxant ; il diminue la viscosité du liant bitumineux. Ensuite, le système réagit progressivement par oxydation et polymérisation en place : la cohésion du liant augmente graduellement dans l'enrobé à froid compacté.

Au moment de la mise en œuvre, on peut donc disposer d'un liant fluide, ce qui facilite le serrage, permet l'obtention de compacités suffisantes et donne de la cohésion rapidement.

Après réaction, le liant atteint un niveau de viscosité élevé, donnant à l'enrobé en place les performances mécaniques correspondantes.

Le concept peut être appliqué à tous les types d'enrobés à froid :

- ✓ Bétons bitumineux à froid pour les couches de roulement
- ✓ Graves-émulsion et graves-bitume à froid pour couches d'assise ou de renforcement.

La formulation des liants et des émulsions est adaptée selon le cas qu'il s'agit de traiter. Le niveau de performances mécaniques visé gouverne le choix du système réactif.

L'émulsion est, de plus, formulée pour obtenir un bon enrobage des granulats utilisés et des caractéristiques de rupture adaptées.

Voici, à titre d'exemple, des caractéristiques d'émulsions formulées pour réaliser des matériaux de type « grave-émulsion » :

Tableau III.5 : Exemple de caractéristiques d'émulsions

Emulsion	Témoin	Réactives Niveau 1	Réactif Niveau 2
Pénétration du liant final (10⁻¹mm)	70 - 100	50 - 70	35 - 50
Teneur en liant(%)	60,00	59,5 - 60,5	59,5 - 60,5
Refus à 0,63mm (%)	0,06	0,02 - 0,06	0,02 - 0,04
Refus à 0,16mm (%)	0,18	0,07 - 0,28	0,03 - 0,08
PH de l'émulsion	2,4	2,1 - 2,6	2,1 - 2,6
Viscosité Engler (°E)	3,2	3 - 5,2	3,3 - 5,1
Indice de rupture	190	160 - 175	130 - 175
Diamètre médian (µm)	4,4	4,0 - 4,2	3,7 - 5,0

On voit que les émulsions réactives considérées sont fines et stables. Employées dans des enrobés à froid pour couches d'assise, elles ont conduit à une bonne qualité d'enrobage de l'ensemble des fractions granulaires.

Les essais de compression simple sur éprouvettes Duriez constituent une première approche des performances mécaniques. Compte tenu du mode de fabrication des éprouvettes, la compacité Duriez obtenue est assez peu sensible à la viscosité du liant utilisé. Par contre, les résistances à la compression croissent avec la dureté du liant.

Plusieurs études ont montré l'intérêt des liants réactifs pour pallier ce problème.

Voici un exemple de résultats :

Liant : 7% d'émulsion (4,2% de liant résiduel)
 Témoin : Emulsion de 70/100
 Réactif : Emulsion réactive Niveau 1
 Mélanges : Grave-émulsion 0/14
 Granulats : Alluvionnaires concassés

Tableau III.6 : Caractéristiques mécaniques

Grave-émulsion	Témoin	Réactive N1
PCG		
Compacité (%) à 200 girations C200 (%)	85,9	88,5
Durez		
Compacité (%)	88,7	89,2
R à 14 jours (MPa)	4,7	4,2
R à 28 jours (MPa)	5,4	6,0
R à 45 jours (MPa)	5,7	7,5
R à 90 jours (MPa)	6,4	7,9
R à 180 jours (MPa)	6,5	8,6

L'évolution des résistances en fonction du temps est illustrée par la figure suivante :

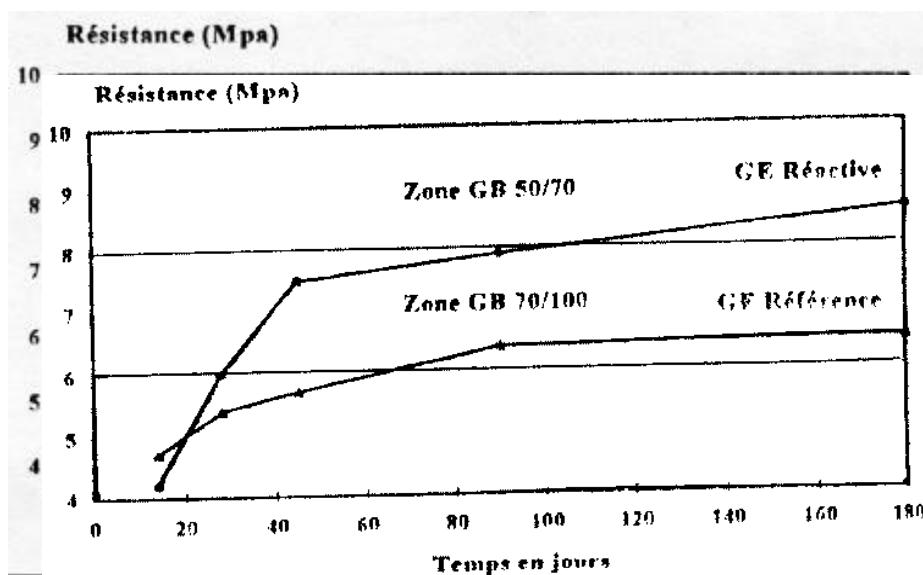


Fig III.26 : Evolution des résistances en fonction du temps [57]

III.7- Utilisation des recyclats pour la fabrication des enrobés à froids

Le souci de préserver l'environnement, conduit à rechercher l'économie des ressources naturelles en particulier en recyclant des enrobés.

Les croûtes d'enrobés et les frisats sont déjà réincorporés dans les enrobés à chaud ou utilisés dans d'autres applications moins valorisantes, mais la reproduction n'est pas entièrement consommée, d'autant plus que dans un avenir proche l'organisation de collecte de ces matériaux devrait en accroître la disponibilité.

Dans ce cadre, **M. JOURDAN, P. DELPAS et JC. VANISCOTE** ont menés une étude, en 2000, qui consiste en le traitement des matériaux à l'émulsion de bitume dont l'ossature granulaire est composée exclusivement d'enrobés recyclés [30].

Cette technique a été utilisée pour la première fois en 1998 en France et a été appliquée sur le réseau routier départemental en couche de reprofilage assurant également le rôle de couche de roulement (épaisseur de mise en œuvre comprise entre 2 et 10cm).

➤ *Le matériau*

Le matériau est composé d'enrobés recyclés concassés de granularité 0/10 et d'une émulsion formulée spécialement pour réactiver le bitume présent dans les « recyclés ».

➤ **Les recyclats**

Les recyclats sont issus du concassage et du criblage à 10mm de croûtes d'enrobés de démolition et de fraisats. L'expérience montre que malgré la diversité des provenances, les recyclats présentent relativement une bonne homogénéité de la teneur en liant et une

bonne régularité de la granularité. Les caractéristiques moyennes suivantes ont été mesurées :

- liant de base :
 - Teneur environ 5 % ;
 - Pénétrabilité ≈ 25 1/10mm
 - Température B et A $\approx 60^\circ$;
- granularité 0/10 (figure III.27).

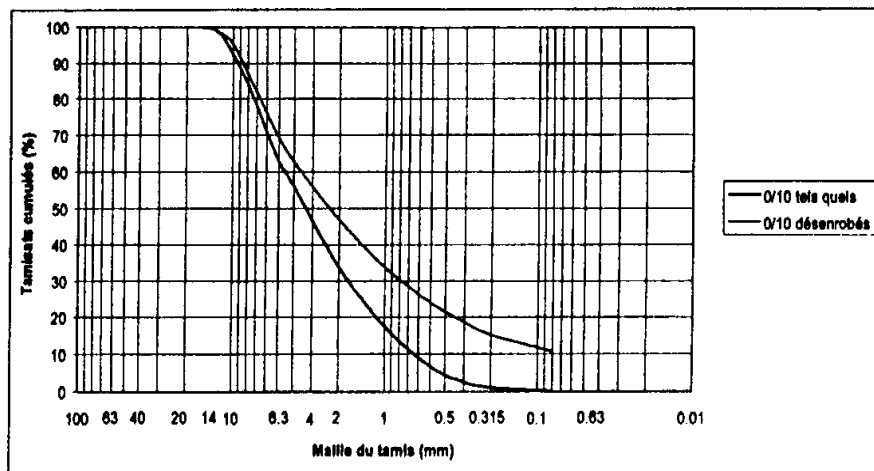


Fig III.27 : Courbe granulométriques des enrobés recyclés concassés tels quels et après désenrobage [30]

➤ **L'émulsion**

C'est une émulsion cationique à rupture lente et à 60% de liant dont la composition a été étudiée pour réactiver le liant présent dans les enrobés recyclés. Son dosage est voisin de 4%.

Les performances mécaniques du matériau, sont déterminés à partir des résultats de l'essai Duriez à froid et l'essai à la presse de cisaillement giratoire (PCG) [44], dont les résultats sont présentés ci après :

Tableau III.7 : Résultats de L'essai Duriez

Essai DURIEZ	
MVR	2,454
% vides	6 %
R 18 j à l'air	3,5 MPa
r/R	0,85

L'essai Duriez conduit à une compacité élevée et à une très bonne tenue à l'eau

Tableau III.8 : Résultats de L'essai au PCG

Essai PCG	
% de vides à	
10 girations	16,2
50 girations	9,7
100 girations	7,4
200 girations	5,2
Pente de la droite	3,80

L'essai à la presse de giration giratoire (PCG) confirme une excellente maniabilité de ce matériau (tableau III.8).

III.8- Etude de la Formulation des émulsions

En Décembre 1997, **JP. SERFASS**, s'est intéressé dans une étude de la formulation de l'émulsion, dans le but de mettre au point des émulsions plus performantes [53].

Des études systématiques ont montré que la nature du tensioactif [16], son dosage et sa répartition entre les phases liant et aqueuse gouvernent directement les propriétés de l'émulsion. En particulier, les paramètres de répartition granulaire des globules de bitume ont une influence marquée sur la capacité d'enrobage de l'émulsion.

L'exemple qui suit correspond à deux émulsions fabriquées à partir d'un même bitume 70/100, l'une avec un tensioactif de type polyamine sur chaîne grasse C18 (TA1), l'autre avec un tensioactif de type diamine moins classique (TA3).

La figure suivante illustre les répartitions granulaires obtenues par un même procédé de fabrication :

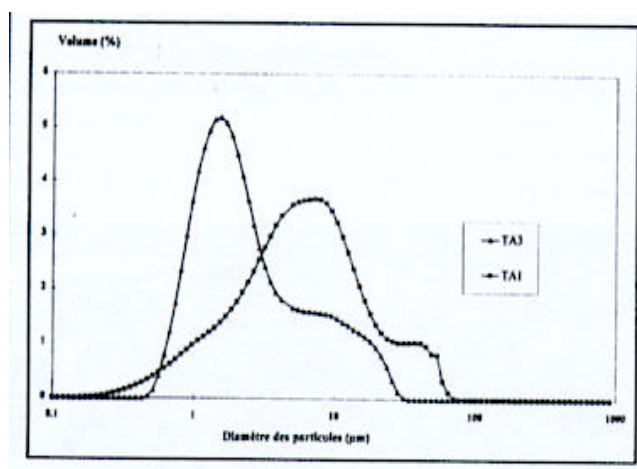


Fig III.28 : Répartition granulométrique des gouttelettes de bitume de deux émulsions d'enrobage

Ces émulsions ont été comparées pour l'enrobage d'un même matériau 0/14 (alluvionnaire entièrement concassé), à un dosage de 4,2 ppc de bitume résiduel [55].

Le tableau ci dessous récapitule les résultats obtenus :

Tableau III.9: L'influence de la formulation de l'émulsion sur la prise de cohésion

Tensioactif	TA1	TA3
Surface spécifique de l'émulsion (cm ² /g)	18900	31000
Surface enrobée (%)	80	95
Résistance en compression à 14 jours	5,3	6,0
Vitesse de montée en cohésion		
R_{c2}/R_{c1}	1,1	1,1
R_{c7}/R_{c1}	1,2	1,4
R_{c14}/R_{c1}	1,4	1,6

Avec :

R_{cn} : Résistance en compression après n jours à 18 ° C

Ces résultats démontrent que la formulation de l'émulsion influe non seulement sur son aptitude à enrober, mais aussi sur la coalescence et la filmification, donc sur la prise de cohésion.

III.9- Caractérisation des enrobés à froid au moyen des essais à la presse à cisaillement giratoire (PCG) et des essais Duriez

En Mars 1995, J.F. LAFON expose les résultats des essais d'étude de laboratoire, puis le suivi sur chantier [32].

Lors de cette étude, les essais suivants ont été effectués :

- Essai à la PCG.
- Essai Duriez.

➤ Résultats de la PCG

Cet essai permet [45], comme pour les enrobés à chaud, de chiffrer la compactabilité et la maniabilité des formules. Il a été effectué dans les mêmes conditions de fonctionnement de la presse que celles en vigueur pour les bétons bitumeux à chaud.

Les conclusions liées des diverses études effectuées sont les suivantes :

- ✓ Pour une teneur en émulsion de l'ordre de 10 % et une teneur en fines de 7 % d'un squelette minéral 0/10 semi-grenu, l'enrobage et le comportement PCG ne sont pas significativement différents quand l'eau d'apport varie de 1 à 4 % (eau totale de 5 à 9 %). A peine relève-t-on une légère augmentation de la compactabilité (coefficient K) jusqu'à 7 % d'eau totale, comme le montre le tableau III.11 (matériaux quartzites).

Tableau III.10 : Incidence de la teneur en eau à l'essai PCG

totale (%)	4	6	7	8
C1 (%)	76	76,5	76	76
K	2,64	2,73	2,92	2,83
C200 (%)	90	91	91,5	91

- ✓ Les essais effectués à teneurs en émulsion et en eau d'apport constantes, pour un squelette donné, montrent que la maniabilité (coefficient C1) croît avec la teneur en fines, alors que dans le même temps la compactabilité (coefficient K) décroît. Pour une émulsion suffisamment stable la qualité de l'enrobage n'est pas modifiée par l'augmentation de teneur en fines, et les teneurs en eau résiduelle au démoulage sont pratiquement identiques.
A titre d'exemple, avec des granulats diabases, nous obtenons pour 7 % d'eau total et 9,7 % d'émulsion à 60 % les résultats représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.11 : Incidence de la teneur en fines totale à l'essai PCG

Teneur en fines totale (%)	4,8	6,8	7,8	8,8	9,8
C1 (%)	79	80	80,5	81,2	81,3
K	2,65	2,45	2,39	2,39	2,32
C200 (%)	93	93	92,9	93,7	93,6

- ✓ L'essai PCG permet également d'apprécier la qualité de l'enrobage. Grossièrement, nous pouvons mentionner que :
 - Pour un bon enrobage, C1 = 80 % # 1 % et K = 2,3 à 2,6
 - Pour un enrobage suffisant, C1 = 75 % # 1 % et K = 2,7 à 2,9

Les enrobés denses [21] à l'émulsion, à relativement forte teneur en liant (~ 10 % d'émulsion) donc en eau d'émulsion, évoluent rapidement vers un état de saturation complet pour des compacités comprises entre 88 et 90 %, ce qui pose le problème de l'évacuation de l'eau sur chantier, et de leur densification.

➤ **Résultats du Duriez**

Ces essais sont effectués dans des moules rainurés, ce qui permet l'évacuation de l'eau lors du compactage.

Les deux exemples donnés dans les tableaux 12 et 13 permettent de juger des caractéristiques physico-mécaniques.

Tableaux III.12 : Résultats de l'essai Duriez pour un matériaux quartzitiques

Matériaux quartzitiques				
Influence de la teneur en liant				
Teneur en liant (bitume résiduel) 80/100 %	5,5	5,7	5,85	6
Compacité %	89.9	90.4	90.1	90.6
W total %	7	7	7	7
Rc 18° bitume 80/100 (10⁶ Pa)	4,6	4,7	4,5	4,5
Immersion / compression	0,69	0,69	0,70	0,70

Tableaux III.13 : Résultats de l'essai essai Duriez pour un matériaux diabases

Diabases	
Squelette minéral identique au précédent	
Teneur en liant (bitume résiduel) %	5,85
W totale %	7
Compacité %	91,9
Rc 18° bitume 80/100 (10⁶ Pa)	4,55
Immersion / compression	0,83

Ces résultats ont permis de constater, pour une ossature minérale (en particulier au niveau des teneurs en fines) et une teneur en bitume résiduel tout à fait comparables à celles des enrobés à chaud [60], que les enrobés denses à l'émulsion, compactés selon le mode opératoire de l'essai Duriez-LCPC à une teneur en eau totale voisine de 7 %, présentent les principales caractéristiques suivantes par rapport aux enrobés à chaud et pour un même bitume de base :

- ✓ Des résistances à la compression à sec plus faibles d'environ 10 %
- ✓ Une aussi bonne, et parfois meilleure, tenue à l'eau (résistance à la compression après 7 jours d'immersion),
- ✓ Des compacités sensiblement identiques.

➤ **Constatation de chantier**

Plusieurs chantiers ont été suivis dans le cadre de cette recherche [56]. Ils ont tout d'abord permis de dégrossir, puis de cerner la technique. Leurs caractéristiques d'environnement étaient les suivantes :

- Site : montagneux,
- Climat : froid humide
- Profil : pentu et tracés sinueux,
- Déflexion : > 100/100 mm
- Trafic : T4 à T1 avec pneus à crampons.

Les centrales de fabrication utilisées ont été du type grave émulsion ou grave hydraulique avec parfois doseur pondéral pour le sable. Les conclusions générales tirées sont les suivantes :

- ✓ Entre les échantillons d'émulsions fabriquées en laboratoire et celles issues des usines de fabrication, il y a souvent une différence en ce sens que l'usine ne peut pas toujours approvisionner le chantier avec une émulsion de qualité constante au niveau de la stabilité à l'enrobage.
- ✓ La qualité de fines totales (entre 6 et 10 %) n'influe pas sensiblement sur la qualité de l'enrobage lorsque l'on travaille à 5,6-5,7 % de bitume résiduel et 7 % d'eau totale.
- ✓ Au niveau de la fabrication, il a été constaté que le respect des compositions minérales est du même ordre que pour les bétons bitumineux à chaud; pour l'ensemble des chantiers, les teneurs en fines varient de 6 à 10 %, des teneurs en eau totales de 6,5 à 9 % et des teneurs en bitume de 4,9 à 6,4 %. Malgré ces fluctuations, avec des palettes en position malaxage difficile, l'enrobage a toujours été bon et sans rupture prématurée.
- ✓ Même pour de faibles distances de transport (moins de 5 km), la cohésion de l'enrobé au déchargement sur chantier, bien que variable, est toujours plus élevée qu'au moment de la sortie d malaxeur, ce qui traduit un début de rupture de l'émulsion.
- ✓ Le passage au travers du finisseur ou le réglage à la niveleuse accentue encore ce phénomène sans que l'on puisse parler de rupture franche, et l'on constate souvent un début de désenrobage des gros éléments minéraux.

III.10- Etude du temps de mûrissement des enrobés à froid

En Janvier 2002, S. LE BEC et al ont réalisé une étude pour évaluer l'influence du temps de mûrissement sur les caractéristiques mécaniques des enrobés à froid [34].

Les phases de mise en œuvre et de compactage des enrobés à froid laissent un matériau incluant une certaine quantité d'eau dont l'évaporation peut durer plusieurs semaines, voire plusieurs mois selon l'épaisseur de la couche et les conditions climatiques.

La formulation en laboratoire impose cependant la connaissance rapide des propriétés finales.

L'approche méthodologique consiste à suivre simultanément l'évolution de la teneur en eau résiduelle et les propriétés mécaniques en compression sont mesurées sur des éprouvettes « Duriez » de diamètre égale à 8 cm, dont on suit l'évolution de la masse dans le temps.

Pour cette expérimentation, la formule retenue est :

- Une grave-émulsion (GE) 0/10 à base de matériau dioritique
- Une teneur en bitume résiduel est de 4,2 % (grade 70/100)
- Une teneur en eau totale initiale de 65 % (% par rapport aux granulat secs).

Trois séries d'éprouvettes sont placées en enceinte climatique, à pression atmosphérique, dans les conditions de conservation suivantes :

- ✓ La première série d'éprouvettes est placée à 18 ° C, 50 % d'humidité relative
- ✓ La seconde série d'éprouvettes est placée à 50° C et 50 % d'humidité relative.
- ✓ Enfin, la troisième série d'éprouvettes est placée à 50° C, en atmosphère sèche (10% d'humidité relative).

La figure suivante représente la montée en cohésion du mélange à froid, traduite par sa résistance en compression, en fonction de la teneur en eau.

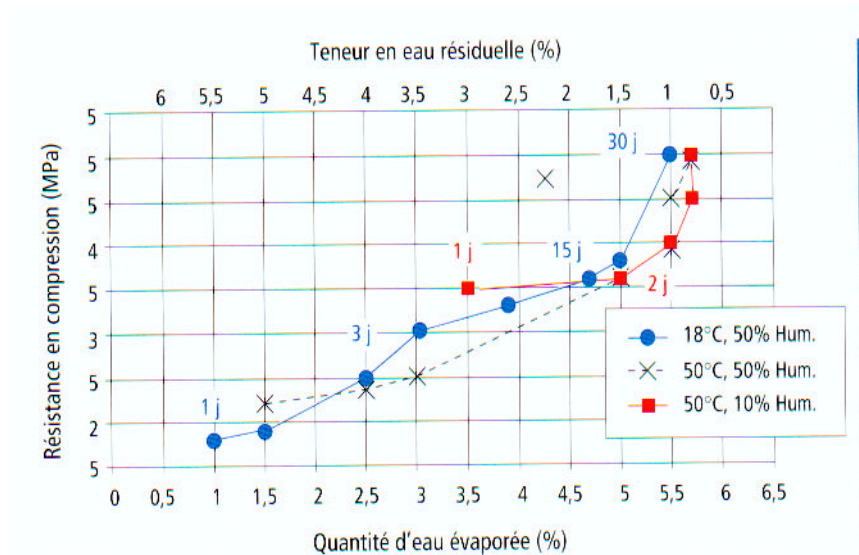


Fig III.29 : Evolution des résistances en compression en fonction de la teneur en eau dans différentes conditions de conservation [34]

On distingue clairement deux régimes liés au départ de l'eau :

Une première zone pour laquelle la cinétique d'évaporation est très rapide. Cette zone se situe entre premier et dixième.

III.11- Situation en Algérie

III.11.1- Introduction

En Algérie , il n'y a pas eu jusqu'à ce jour des méthodes de laboratoire susceptibles de caractériser le comportement vis à vis de la mise en œuvre.

Pour ce qui suit , nous citons quelques travaux fait sur des chantiers en Algérie par différent organisme nationaux :

III.11.2- Formulation d'une grave émulsion entre M'sila et Barika

La fabrication et l'emploi des émulsions de bitume pour les travaux de construction routière en Algérie a connu ces derniers temps un grand intérêt.

Nous donnons ci après quelques résultats d'études [39], faite au **CTTP** d'une planche expérimentale la RN28 avec la technique grave-émulsion qui a été réalisée entre M'sila et Barika en Janvier 1999.

L'émulsion utilisée est une ECL60 de l'unité Naftal d'El-Eulma (wilaya de Setif).

Ses caractéristiques sont résumées dans le tableau si dessous :

Tableau III.14 : Caractéristiques de l'émulsion (M'sila et Barika)

Caractéristique	résultats	Spécification et normes
Teneur en eau (%)	39	-
Pseudo-viscosité (°E)	4.3	2 à 15 ou semis fluide
P H	2.8	$2.2 \geq \text{pH} > 4$
Indice de rupture	135	≥ 120

Les granulats on été ramenées de la carrière de L'EPTR S/Est (Ain-Touta ,wilaya de Batna) , et font partie des classes : 0/3 - 3/8 – 8/15 et 15/25.

Les essais de dureté et d'usure sur les granulats, ont donnés respectivement :

- Los-Angeles : 23.33
- Micro-Deval : 21 %

L'adhésivité moyenne du couple granulat - émulsion est de 60%, comparée à la valeur exigée par la norme NFT 65 011 qui recommande un pourcentage de surface recouverte supérieure à 75% .

Les caractéristiques chimiques des granulats sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.15 : Les caractéristiques chimiques des granulats(M'sila et Barika)

ECHANTILLON	Ain-Touta 0/3	Ain-Touta 3/8
Insolubles (Si O₂ + Silicate) (%)	5,85	0,27
Gypses (Ca SO₄, 2H₂O)	Néant	Néant
Oxyde de fer et d'Al (Fe₂O₃ + Al₂O₃)(%)	-	2,82
Carbonates(CaCO₃) (%)	83,33	87,5
Chlorures (NaCl) (%)	0,58	0,21
%Perte au fers	-	33,29
Eau de constitution %	-	5,21
Matières organiques %)	2,48	2 ,40

Le mélange granulaires retenue est le suivant :

Fraction 8/15 : 39%
 Fraction 3/8 : 16%
 Fraction 0/3 : 45%

L'étude de formulation et la synthèse des résultats de l'essai Duriez sur la Grave-émulsion sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.16 : Synthèse des résultats de l' essai Duriez (M'sila et Barika)

Désignation	Performances mécanique
Teneur en bitume Résiduel pourcentage préconisées (%)	4
Teneur en eau totale %	5,6
Résistance à la compression à sec R (Mpa)	20,9
Résistance à la compression Après immersion r (Mpa)	1,85
R/r	0,64

Les résultats montrent que les performances mécaniques sont acceptables comparées à celles exigées dans la norme NFP 78-121.

Comme première observation, la section expérimentale livrée à la circulation sans couche de protection a montré un bon aspect visuel.

III.11.3- Formulation de grave émulsion R'MADA

Dans le cadre d'une étude de formulation de grave émulsion R'MADA [51], le Laboratoire Régionale des Ponts et Chaussées de CLERMONT-FERRAND, à fait une étude de formulation en 1998 pour l'organisme LTP Est Sétif.

L'étude a porté sur la composition du mélange granulaire, l'essai d'enrobage et sur l'essai P.G.C. Les résultats trouvés sont respectivement les suivants :

III.11.3.1- composition du mélange

- Le mélange choisi est le suivant :
 - Fraction 0/3 : 48 %
 - Fraction 3/8 : 12 %
 - Fraction 8/15 : 20 %
 - Fraction 15/58 : 20 %
- Emulsion à 60 %

La granulométrie du mélange est résumée dans le tableau suivant :

Tableau III.17 : Granulométrie du mélange de la grave de R'MADA

Ouverture des tamis	% des Tamisats cumulé
20	100
16	92
12.5	75
10	62
8	55
6.3	52
5	50
4	43
3.15	37
2	31
1	20
0.5	13
0.2	8
0.08	6.2

La figure suivante représente la courbe granulométrique du mélange :

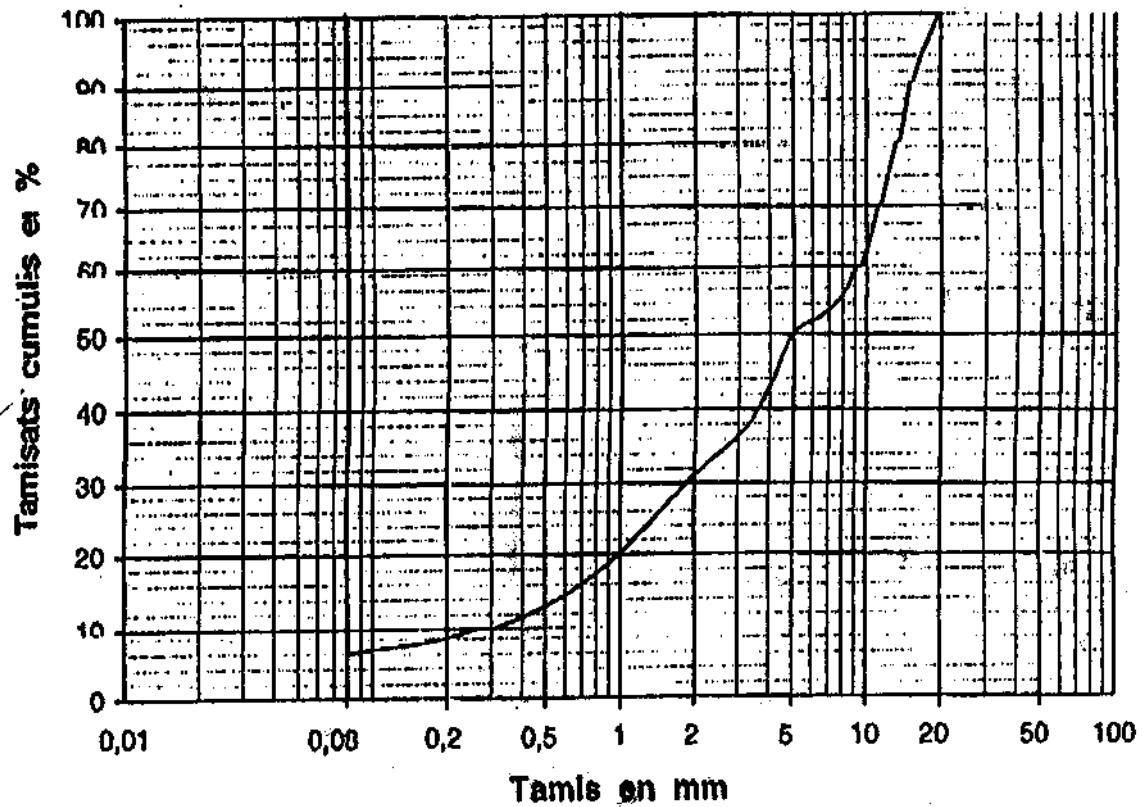


Fig III.30 : Courbe granulométrique du mélange [51]

Les pourcentages respectivement d'émulsion à 60 % de bitume et d'eau totale sont les suivants :

- Teneur en émulsion : 7 %
- Teneur en eau : 6 %

III.11.3.2- Teneur en eau

La teneur en eau a été déterminée, selon le tableau suivant :

Tableau III.18: Détermination de la teneur en eau (R'MADA)

Teneur en eau totale théorique	Teneur en eau totale mesurée	Aspect visuel des mélanges
5.5 %	4.5 %	Enrobage partiel, humidité du mélange insuffisante
6.5 %	5.4 %	Enrobage moyen
7.5 %	6.5 %	Bon enrobage

III.11.3.3- Essais P.C.G.

Un bon enrobage de tous les granulats ayant été observé pour une teneur en eau totale théorique de 7.5 % , une décision à été prise pour effectuer l'essai à la presse à cisaillement giratoire [42] à un teneur en eau totale théorique de 7 % .

Les résultat de cet essai sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.19 : Résultats de l'Essais P.C.G.(R'MADA)

Masse volumique réelle sèche	2.59
Masse volumique après malaxage	2.22
Pourcentage des vides à 80 girations	14.1

Les teneurs en eau totale avant et après l'essai sont les suivantes :

Tableau III.20 : Teneurs en eau totale mesurées avant et après l'essai (R'MADA)

Teneur en eau totale	
Théorique initiale	7.0 %
Mesurée après malaxage	6.1 %
Mesurée après essai P.C.G. à 80 girations	6.0 %
Mesurée après essai P.C.G. à 200 girations	5.0 %

La variation de la compacité en fonction du nombre de girations est donnée dans le figure suivante :

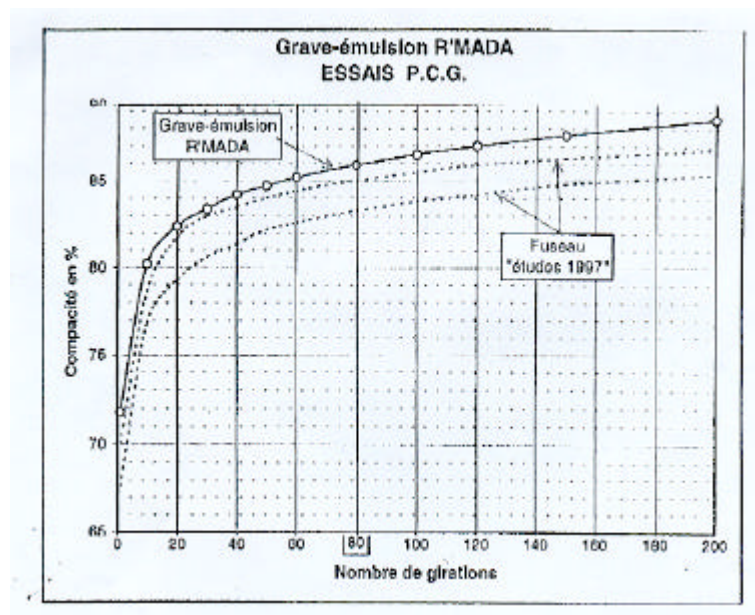


Fig III.31 : La variation de la compacité en fonction du nombre de girations [51]

Les résultats de ces essais, montrent que les pourcentages de vides sont un peu moins important avec les matériaux calcaires qui, ont tendance à se fragmenter davantage lors du compactage P.C.G. .

III.11.4- Recyclage à froid de la RN3-Ouargla

Le retraitement des chaussées à été une préoccupation fort ancienne. En effet il est toujours tentant pour un ingénieur routier de réutiliser des matériaux en place donnant des signes de fatigue.

Il existe maintenant toute une panoplie de procédés de retraitements :

- ✓ Recyclages en centrale avec des corrections granulométriques à des taux plus au moins fort.
- ✓ Recyclage in-situ :
 - Soit à chaud.
 - Soit à froid.

Le présent travail (1994), concerne le «recyclage à froid in-situ» d'une partie de la chaussée de la RN3 située entre **Hassi Messaoud et Hassi Belgueboui** [1].

Cette chaussée présentait des fissurations avancées avec parfois un faïençage généralisé.

Le tronçon à réhabiliter est de 40 Km linéaire, il est constitué de la structure suivante :

- ✓ Une couche de roulement de 8 cm en enrobé ouvert de granulométrie 4/18
- ✓ Une couche de liaison de 5 cm en sable bitume

Devant l'absence de matériaux convenables dans toute la région, une solution de recyclage à été envisagée en collaboration avec le direction des travaux publics (D.T.P) de Ouargla.

Un tronçon de un (01) Km a été scarifié. Il s'est avéré que seule la couche de roulement en enrobé à froid est fissurée. La couche de sable bitume ne présentait aucune fissuration. Il ne s'agit donc pas de problème structural mais de fissuration due au vieillissement du bitume.

Des échantillons de l'enrobé ont été prélevé et analysés au laboratoire [54].

L'enrobé de l'ancienne chaussée présente la granulométrie suivante :

Tableau III.21 : Granulométrie du mélange de l'ancienne chaussée (RN3-Ouargla)

Tamis (mm)	Passants (%)
20	97.04
10	78.80
12.5	36.20
10	23.58
8	15.84
5	9.71
3.15	5.44
2	4.20
1	3.36
0.5	2.89
0.315	2.47
0.1	0.93
0.08	0.64

Le dosage en liant est de 4.7 % en bitume résiduel, le bitume récupéré présente une pénétration comprise entre 10 et 20. Il s'agit donc de bitume vieilli, ce qui confirme que les dégradations de l'enrobé sont dues au vieillissement de celui-ci.

La solution de régénération par recyclage à l'émulsion de la couche de roulement est tout à fait envisageable.

Des éprouvettes de fraisat de l'ancien enrobé ont été confectionnées avec un ajout de 2 à 3 % d'émulsion de 60 %.

Les résultats trouvés sont les suivants :

Tableau III.22 : Résultats de l'essai Duriez de l'ancien enrobé (RN3-Ouargla)

Désignation	Ajout d'émulsion à 60 %		Recommandations
	2 %	3 %	
Bitume résiduel (initial)	4.69	4.69	-
Bitume résiduel total	5.89	6.49	-
Résistance à la compression à sec : R (bars)	31	22	> 30
Résistance à 8 jours d'immersion : r (bars)	17	12	-
r/R	0.55	0.61	> 0.55
Compacité	88	88	> 85

Le dosage retenu est légèrement supérieur à 2 % d'émulsion

Plusieurs planches d'essais ont été effectuées en faisant varier le dosage en émulsion et en encadrant le dosage trouvé au laboratoire qui de l'ordre de 2 %, soit de :

- ✓ 1.09 %
- ✓ 2.23 %
- ✓ 2.37 %

Des échantillons de matériaux recyclés ont été prélevés pour essai de laboratoire à savoir :

- ✓ Granulométrie du matériau recyclé
- ✓ Teneur en liant total
- ✓ Pénétration du bitume régénéré
- ✓ Essai de compression sur éprouvette Duriez

La pénétration du bitume après recyclage est en moyenne de 35, alors qu'elle n'était que de 15 avant recyclage ; ce qui montre que l'émulsion a permis de régénérer le bitume vieilli.

Les résultats de l'essai Duriez dans le tableau ci-dessous confirment les résultats de la formulation. L'optimum du dosage en émulsion étant de 2.5 % pour une résistance de 35 bars et un rapport immersion compression de 0.63.

Tableau III.23 : Résultats de l'essai Duriez après recyclage ((RN3-Ouargla)

Désignation	résultats			recommandations
Liant résiduel total	5.83	6.30	6.11	
Dosage en émulsion	1.90	2.23	2.37	
Dosage en bitume	1.14	1.34	1.42	
Compacité	90	91	91	> 85
Résistance à la compression à sec R (bars)	30.75	34.73	26.77	> 30
Résistance à 8 jours en immersion r (bars)	17.39	21.91	13.28	
r/R	0.57	0.63	0.50	> 0.55

Ce dosage adopté pour le chantier de la RN3 correspond aux dosage adoptés dans d'autres pays à savoir autour de 2.2 %.

III.11.5- Solution contre la remontée des fissures au sud Algérien

Dans le cadre d'un dossier intitulé « **vulgarisation de l'emploi des émulsions** » [26] qui a pour objectif de lancer l'utilisation des émulsions en technique routière en Algérie, des planches expérimentales en enrobé ouvert à l'émulsion ont été réalisées dans la région de **OUARGLA**.

Le bilan d'un suivi de comportement sur trois années de ces sections a montré un comportement satisfaisant du point de vue remontée des fissures, ce qui a motivé la direction des travaux publics à lancer l'utilisation de cette technique sur d'autres tronçons routiers de la région.

La région de OUARGLA jouie d'un climat saharien chaud caractérisé par des températures maximales à la surface du sol de l'ordre de 55° C et minimales à la surface du sol de l'ordre de 1°C. Ces températures sont mesurées à 10 cm au dessus de la surface du sol. La pluviométrie annuelle de la région est inférieure à 100 mm.

Le chantier expérimental fait partie aussi du renforcement de la route nationale N°49 reliant la wilaya de Ghardaïa à la wilaya de Ouargla. Le trafic en poids lourds supporté par cette route est d'environ 600 PL / jour.

Ce travail s'articule sur trois points :

- ✓ Formulation en laboratoire des enrobés ouvert à l'émulsion utilisés dans les planches expérimentales
- ✓ Déroulement des travaux de fabrication et de mise en œuvre des enrobés à l'émulsion
- ✓ Suivi du comportement des sections expérimentales sur une période de trois années

Les granulats proviennent de Haoud-El-Hamra Situé dans la région de OUARGLA. Les classes granulaires employées sont le 3/8 et 8/15.

Les caractéristiques essentielles dans ces matériaux sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau III.24 : Caractéristiques générales des granulats de Haoud-El-Hamra

Caractéristiques	3/8	8/15
Los-Angeles(%)	26	24
Micro-Deval(%)	25	20
Coefficient d'aplatissement(%)	15	10
Densité	2,63	2,65
Propreté superficielle	1	0,35

L'émulsion utilisée est une émulsion cationique d'enrobage de classe 65%. La phase liant est constituée par un bitume 80/100, l'émulsifiant est un Dynorame.

Les principales caractéristiques de cette émulsion sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.25 : Caractéristiques de l'émulsion de Haoud-El-Hamra

Caractéristiques	Résultat
Teneur en eau(%)	34,2
Pseudo-viscosité à 25°C[°E]	3,15
PH	2,45
Indice de rupture	171

Les formules choisies ainsi que les résultats des essais Duriez sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.26 : Résultats des essais Duriez de Haoud-El-Hamra

Formule granulaire retenue	8/15 : 70 % 3/8 : 30 %	
	F1	F2
Teneur en bitume résiduel (%)	4	5
Teneur en eau totale (%)	2,5	3
Indice des vides V (%)	15	14,5
Résistance à la compression à sec R (Mpa)	1,1	1,2

L'expérience algérienne a montré que ce type de mélange donne généralement des résistances à la compression à sec inférieures à 2 Mpa. La formule F2 a été retenue pour la réalisation de la planche expérimentale.

La fabrication de l'enrobé a été effectuée dans une centrale d'enrobage à chaud dont la capacité réelle de production est de 110 tonnes / heure et dont la fonction séchage a été supprimée.

La fabrication a été effectuée sans apport d'eau, la teneur en eau naturelle des granulats est d'environ 0,5%.

La mise en œuvre s'est faite selon les étapes suivantes :

- ✓ Préparation du support : les travaux préparatoires réalisés sur le support ont consisté à colmater les fissures de l'ancienne chaussée.
- ✓ Répandage de la couche d'enrobé à froid : le répandage a été effectué au moyen d'un finisseur.
- ✓ Compactage de la couche mise en œuvre : l'atelier de compactage était

Les compacités moyennes mesurées après carottage à 04 mois d'âge sont de l'ordre de 85 %.

La planche expérimentale a été livrée à la circulation juste après la fin du compactage, sans gravillonnage préalable.

- La cohésion s'est avéré satisfaisante
- Pas d'arrachement ni de plumages
- L'uni est correct

Un suivi de comportement a été fait sur la section expérimentale durant une période de trois années. Ce suivi a montré un comportement satisfaisant du point de vue remontée des fissures contrairement aux sections réalisées durant la même période avec les techniques « Sand Asphalte » et « Béton bitumineux à chaud ».

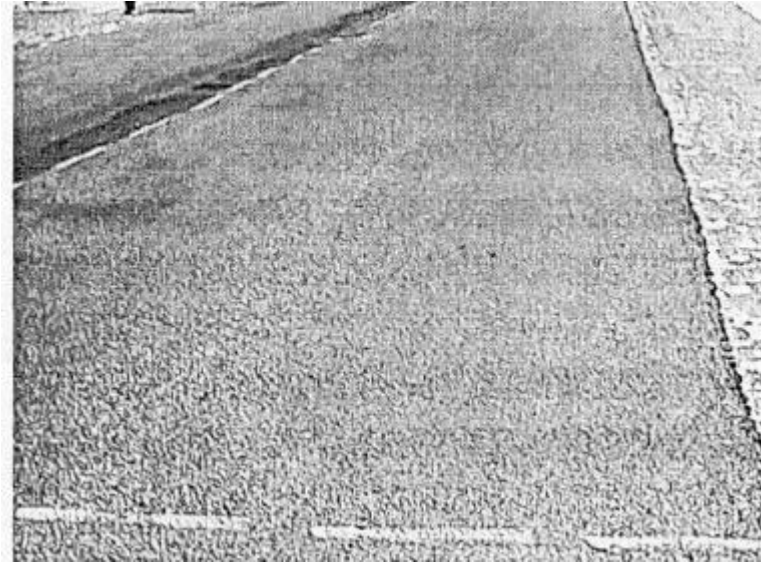


Fig III.32 : Vue de la section réalisée en enrobé ouvert à l'émulsion à OUARGLA [26]



Fig III.33 : Remontée des fissures sur la section réalisée en sand Asfphalt [26]

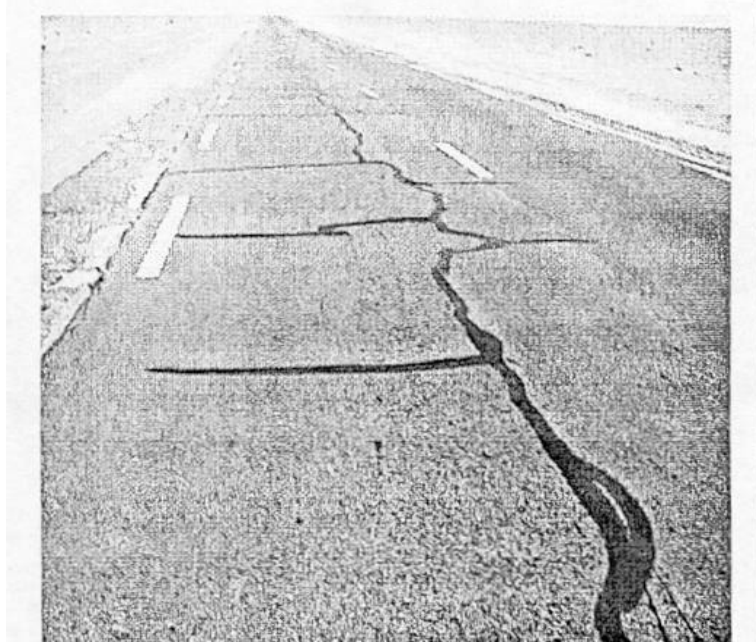


Fig III.34 : Remontée des fissures sur la section réalisée en BB (OUARGLA) [26]

L'expérience de l'enrobé ouvert à l'émulsion dans la région de OUARGLA à été concluante et a montré un comportement satisfaisant du point de vue de la remontée des fissures, ce qui a motivé la direction des travaux publics à généraliser l'utilisation de cette technique dans d'autres tronçons routiers de la wilaya

III.11.6- Etude de réhabilitation de la RN30 Tizi-ouzou

Dans le cadre du projet de « réhabilitation de la RN30 Tizi-ouzou » [50], il a été décidé d'utiliser une grave émulsion 0/20 du PK 0+000 au PK 49+000 de la RN30.

Dans cette étude, les granulats proviennent de la carrière de BENI ZEKI et l'émulsion a été fabriquée par l'unité de transformation de NAFTAL d' EL EULMA.

L'aspect visuel des granulats des granulats est celui d'un calcaire de couleur grise à rouille, l'émulsion était très peu visqueuse.

Les caractéristiques des matériaux sont comme suit :

- Granulats
 - ✓ Les granulats proviennent d'une roche calcaire de 96.29 % de carbonates
 - ✓ Une propreté de 0.6 à 1.5 %
 - ✓ Un Los Angeles de 25 à 28
 - ✓ Un micro Deval en présence d'eau de 10 à 17
 - ✓ Un coefficient de forme variant de 11 pour la fraction 15/25 à 37 pour la fraction 3/8.

- Le liant
 - ✓ Emulsion à base de bitume 80/100
 - ✓ Teneur en eau de 38 % (émulsion à 60 %)
 - ✓ Rupture lente (IR=150)
 - ✓ Emulsifiant polyamine (POLYRAM S)
 - ✓ pH est de 2.3
 - ✓ Acide chlorhydrique (HCl à 28°).

La composition retenue pour le mélange est :

- Fraction 0/3 50 %
- Fraction 3/8 : 10 %
- Fraction 8/15 : 15 %
- Fraction 15/25 : 25 %

Les teneurs en émulsion sont celles qui correspondent aux fourchettes recommandées pour le bitume résiduel soit :

- 6.3 % d'émulsion pour 3.8 % de bitume
- 6.7 % d'émulsion pour 4 % de bitume
- 7 % d'émulsion pour 4.2 % de bitume

L'essai d'enrobage est réalisé conformément au mode opératoire LCPC pour différentes teneurs en eau appliquées à chacune des teneurs en émulsion citées plus haut.

Les teneur en eau d'apport ayant permis d'observer un bon enrobage sont :

- 4.2 % d'eau pour 6.3 % d'émulsion
- 4 % d'eau pour 6.7 % d'émulsion
- 2.7 % d'eau pour 7 % d'émulsion

Les essais Duriez ont permis de comparer les formules entre-elles et le tableau suivant récapitule les résultats obtenus.

Tableau III.27 : Résultats des essai Duriez de la RN30 Tizi-ouzou

Eau %	4.2	4	2.7	4.2	4	2.7	4.2	4	2.7
Emulsion %	6.3	6.3	6.3	6.7	6.7	6.7	7	7	7
R (bars)	20.91	25.00	22.90	24.34	22.57	32.52	26.11	25.22	30.97
R(bars)	2.21	7.74	4.65	4.98	5.75	15.83	13.72	10.62	16.59
r/R	0.11	0.31	0.20	0.20	0.28	0.48	0.53	0.42	0.54

La variante dosées à 6,3% d'émulsion (soit 3,8% de bitume résiduel) est à écarter, les résultats obtenus sont très faibles.

Les deux variantes dosées à 6,7% et 7% d'émulsion soit 4% et 4,2% de bitume résiduel sont favorables pour une eau d'apport de 2,7%, elles sont caractérisées par :

- Densité : 2,32 à 2,33 t/m³
- Résistance à sec : 31 à 32 bars (spécification > 30)
- Résistance après immersion : 15 à 16 bars
- r/R : 0,48 à 0,54 (spécification > 0,50)

La formulation enfin retenue est :

- Fraction 0/3 : 50 %
- Fraction 3/8 : 10 %
- Fraction 8/15 : 15 %
- Fraction 15/25 : 25 %
- Emulsion à 60 % : 7 %

III.12- Conclusion

Si dans le domaine des enrobés à froid, la méthodologie d'étude et les recherches sont clairement définies, il n'en est pas de même dans le cas des enrobés à chaud dont le comportement est complexe vu la multitude et la complexité des constituants.

En effet, les quelques travaux que nous venons de citer montrent que beaucoup reste à faire notamment en ce qui concerne :

- ✓ La formulation de l'enrobé, sur ce point aucune norme ni méthodologie n'existe et tout repose sur les compétences de l'opérateur.
- ✓ Le choix de la quantité d'émulsifiant pour obtenir les meilleures caractéristiques possible de l'émulsion (adhésivité, finesse des particules, stabilité et la rupture voulue).
- ✓ Le choix de l'émulsifiant en fonction de la nature du granulat afin d'obtenir la meilleure adhésivité possible.
- ✓ L'appréciation de la teneur en eau doit reposer sur un essai et non sur une appréciation visuelle qui est sujette à des erreurs selon l'opérateur qui l'effectue.
- ✓ Le choix de la force de compactage pour différents types d'enrobés à froid n'est pas chose évidente.

Par ailleurs, au vu des travaux de recherche, on voit qu'actuellement l'orientation dans ce domaine se fait plus sur les matériels que sur le comportement du matériau lui-même, il y a lieu de faire des études de comportement surtout en fonction :

- ✓ Du type de structure projetée
- ✓ Du climat de la région étudiée
- ✓ De l'intensité du trafic

Un autre point important à signaler est la non constance et la non homogénéité des émulsions produites en Algérie et la rupture de stock signalée trop souvent.

Introduction générale de la partie expérimentale

Les enrobés à froid sont constitués au départ d'un squelette granulaire, de bitume résiduel et de d'eau provenant d'émulsion.

Contrairement aux enrobés hydrocarbonés à chaud qui atteignent la quasi-totalité de leurs performances mécaniques par simple refroidissement, les mélanges bitumineux à froid voient leurs propriétés évoluer en fonction de la cinétique de départ de l'eau résiduelle dont l'évaporation totale peut durer plusieurs mois selon les conditions climatiques.

L'objet de cette étude consiste d'une part à formuler en laboratoire un enrobé à froid , chose qui n'est pas simple du tout vu le manque de normes dans ce sens puis à étudier dans une seconde étape, l'influence du temps de mûrissement de l'enrobé à froid, nécessaire pour atteindre les caractéristiques mécaniques recherchées.

Pour cela, notre travail comportera les étapes suivantes :

- ✓ Analyse des granulats
- ✓ Analyse du liant
- ✓ Formulation de l'enrobé à froid
- ✓ Etude du temps de murissement

Chapitre IV : Analyse des granulats

IV- Analyse des granulats

La qualité d'une route dépend essentiellement de la qualité des granulats et du liant utilisé. Le granulat sert d'élément d'usure et favorise l'adhésion entre la chaussée et les pneumatiques. De même, il est le principal élément entrant dans la construction du corps de chaussée.

Les caractéristiques des granulats dépendent du choix du gisement (caractéristiques intrinsèques), et des caractéristiques de fabrication.

Les caractéristiques intrinsèques répondent aux besoins de résistance aux charges et de résistance à l'usure. Deux essais définissent principalement ces caractéristiques intrinsèques :

- résistance à l'usure mesurée par l'essai Micro Deval (MD).
- résistance au choc mesurée par l'essai Los Angeles (LA).

Les caractéristiques dues à l'élaboration du matériau assurent la rugosité, l'accrochage au liant et la bonne reproduction de la maille gravillonnée.

Quatre critères rendent compte de la qualité de fabrication du granulat :

- La granularité.
- L'angularité.
- Forme.
- Propreté

La connaissance des caractéristiques des granulats permet un gain certain en temps et en argent et aboutit à une exploitation économique des ressources en matériaux.

IV.1- Provenance des granulats

Les mélanges retenus dans le cadre de la présente étude sont ceux couramment utilisés en Algérie dans les couches de surface des chaussées.

Les granulats constitutifs utilisés pour notre enrobé ont été prélevés de la carrière de **KEDDARA** qui est située dans la région centre non loin d'Alger et qui présente d'importantes réserves et était à la date des prélèvements exploitée par l'Entreprise de Viabilisation de Sidi Moussa (EVSM).

Les fractions granulaires extraites sont :

- le sable 0/3.
- les gravillons 3/8 et 8/15.

IV.2- Caractéristiques des granulats

Ils ont été analysés au laboratoire et soumis aux essais suivants :

IV.2.1- Analyse granulométrique [NFP 18-560]

Les granulats sont composés d'un mélange de grains de forme très variées et de différentes tailles, d'où la nécessité de l'analyse granulométrique par la voie sèche (tamisage).

La masse de l'échantillon à étudier dépend du pourcentage et des dimensions des particules les plus grosse. Il est d'usage de se tenir dans les limites données par l'expression:

$$200D < M < 600D$$

Les résultats de cette analyse sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Analyse granulométrique

Tamis(mm)	Pourcentage du Tamisats (%)		
	0/3	3/8	8/15
20	100	100	100
16	100	100	100
12.5	100	100	89.48
10	100	100	53.40
8	100	99.66	30.45
6.3	100	91.62	11.81
5	100	72.17	5.44
4	98.77	29.06	01.72
2	80.19	06.88	01.17
1	59.08	04.63	01.14
0.500	40.17	03.77	01.11
0.400	36.94	03.64	01.11
0.315	32.08	03.48	01.20
0.200	25.63	03.23	01.07
0.100	19.33	02.97	01.01
0.080	17.00	02.78	00.97

Ces résultats nous permettent d'obtenir la courbe granulométrique des différentes fractions testées :

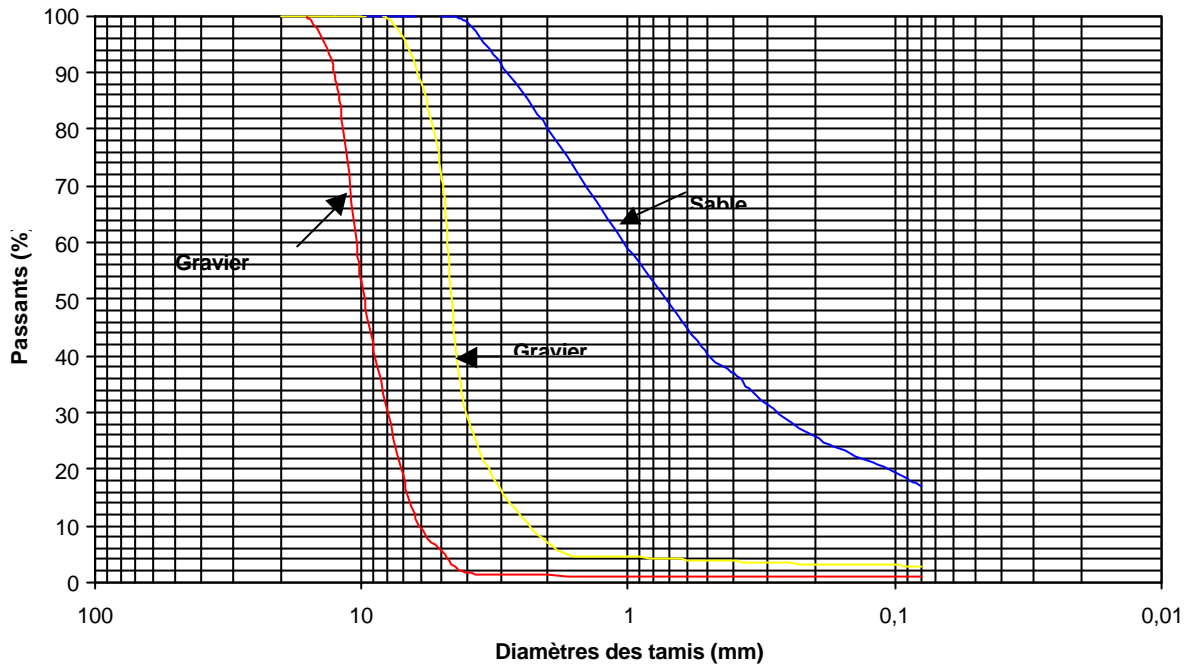


fig IV.1 : Courbe granulométrique des fractions 0/3, 3/8 et 8/15

Après avoir tracé la courbe granulométrique, nous déterminons le diamètre efficace D_{10} , le coefficient d'uniformité C_u et le coefficient de courbure C_c .

Les coefficients D_{10} , D_{30} et D_{60} sont les diamètres correspondant respectivement à 10%, 30% et 60 % des tamisats cumulés.

D et d diamètre maximum et minimum des granulats.

Le tableau IV.2 récapitule tout les résultats trouvés :

Tableau IV.2 : Détermination des coefficients granulométrique

Fraction granulaire	0/3	3/8	8/15
D_{10}	0.12	2.3	6
D_{30}	0.3	4	8
D_{60}	1.1	4.8	11
coefficient d'uniformité (C_u)	9.17	2.1	1.83
coefficient de courbure (C_c)	0.68	1.45	0.97

Le coefficient d'uniformité Cu est supérieur à 2 % pour les granulats de fraction 3/8 et 8/15, on a donc affaire à une granulométrie étalée suivant le critère de Caquot-Kérisel. Contrairement à la fraction 0/3, qui a un Cu inférieur à 2, donc une granulométrie uniforme.

D'après le tableau IV.2, on constate que le pourcentage des fines est important pour la fraction 0/3.

IV.2.2- Analyse chimique sommaire

L'analyse chimique sommaire de notre granulat, figure dans le tableau IV.3 :

Tableau IV.3 :Analyse chimique sommaire

Classes granulaire	Sable 0/3 et graviers 3/8, 8/15
Insolubles (Si O₂ + Silicate) (%)	4.37
Anhydride carbonique(CO₂)	38.89
Oxyde de fer et d'Al (Fe₂O₃ + Al₂O₃)(%)	1.32
Gypses (Ca SO₄, 2H₂O)	traces
Chlorures (NaCl) (%)	0.17
Carbonates(CaCO₃)(%)	94.01
Eau de constitution	0.28
Perte au feu PF (%)	41.63

Vu le faible pourcentage de silice et le grand pourcentage de carbonate (94.01 %), nos granulats sont de nature minéralogique calcaireuse.

IV.2.3- Mesure des poids spécifiques des granulats [NFP 18-554]

Le présent essai concerne la détermination au pycnomètre à eau, du poids spécifique des particules solides.

La procédure d'essai au pycnomètre est la suivante :

- ✓ On pèse le pycnomètre et son bouchon après s'être assuré qu'il étaient propres et secs (m₁)
- ✓ On introduit la prise d'essai dans le pycnomètre et on pèse (m₂) .
- ✓ On déduit la masse des particules solide (m_s) :

$$m_s = m_2 - m_1$$

✓ On remplit le pycnomètre jusqu'à la surface avec de l'eau distillée, on laisse se décanter quelques minutes, on place le bouchon et on pèse (m_3)

✓ On déduit la masse du liquide complémentaire (m_4) qui est elle même son volume (V_4) :

$$m_4 = m_3 - (m_1 + m_s)$$

✓ On vide le pycnomètre, on le sèche, on le remplit uniquement d'eau jusqu'à la surface et on pèse pour déterminer la masse (m_5) qui est elle même le volume du pycnomètre (V_5)

✓ On déduit le volume des particules solides (V_s) :

$$V_s = V_5 - V_4$$

✓ On détermine le poids spécifiques du sol (g_s), qui est le quotient de la masse de ces particules solides par volume des particules solides (V_s) :

$$g_s = \frac{m_s}{V_s}$$

Les résultats obtenus après l'essai sont les suivants:

Tableau IV.4 : Poids spécifique des granulats

Classe granulaire	0/3	3/8	8/15
poids spécifiques (g_s)	2.63	2.65	2.66

IV.2.4- Evaluation de la pollution

La propreté, signifie l'absence d'éléments fins indésirables et conditionne l'adhésivité liant-granulat. Elle peut s'apprécier de différentes façons :

✓ Par l'essai de propreté superficielle pour la détermination de la teneur globale des fines, qui est un paramètre très important dans la composition des enrobés bitumineux. L'analyse granulométrique permet la détermination du pourcentage global des fines, sans pour autant permettre de distinguer les fines silico-calcaires des fines argileuses.

✓ En utilisant les essais d'équivalent de sable et d'équivalent de sable à 10 % de fines qui permettent, selon un processus normalisé, de quantifier la notion de propreté d'un sable.

✓ Par l'essai au bleu de méthylène qui permet d'évaluer le degré d'activité des particules fines argileuses qui sont responsables, dans une large mesure, du désordre et de la dislocation de la liaison liant-granulat causé par le gonflement qui se produit en présence d'eau.

IV.2.4.1- Mesure de la propreté superficielle des granulats [NFP 18-6591]

Elle est définie comme étant le pourcentage pondéral de particules inférieures à 0.5 mm mélangées ou adhérentes à la surface des granulats de diamètre supérieur à 2 mm.

Les résultats obtenus sont les suivants:

Tableau IV.5: Propreté superficielle des gravillons

Classes granulaire	3/8	8/15	Spécification SETRA-LCPC
Propreté superficielle (%)	2	0.05	≤ 2 propre

Le pourcentage de particules inférieures à 0.5 mm est inférieur ou égale à 2 % pour les deux fractions 3/8 et 8/15, le matériaux utilisé est donc propre. On remarque que la classe 8/15 est plus propre que la classe 3/8 et cela peut s'expliquer par le changement du gisements.

IV.2.4.2- Essai d'équivalent de sable à 10 % [NFP 18-598]

Cet essai à pour but de mesurer la propreté d'un sable dans un état standard de 10 % de fine maximum. Il est réalisé de façon classique après avoir réduit la teneur en fine du sable à la valeur de 10 % lorsque celle ci, à l'état naturel, est supérieur à 10 %.

Le pourcentage de filler f est déterminé sur un échantillon de sable 0/2 mm par tamisage sous l'eau sur un tamis de 0,08 mm d'ouverture.

- ✓ Si le pourcentage de filler f est inférieur ou égal à 10 %, on exécute directement l'essai d'équivalent de sable de manière classique qui est la détermination des hauteurs h_1 et h_2 après avoir lavé l'échantillon, selon un processus normalisé et laissé décanté tout le mélange(sable, l'eau et le défloculant), dans une éprouvette.

On en déduit l'équivalent de sable qui par convention, est :

$$ES = 100 \cdot \frac{h_2}{h_1}$$

Avec:

h_1 : hauteur du sable propre + éléments fin.

h_2 : hauteur du sable propre seulement.

- ✓ Si le pourcentage de filler f est supérieur à 10 %, on procède à une augmentation du pourcentage de la fraction sableuse 0,08/2 mm, afin de ramener la teneur en filler du sable à 10 %.

La masse du sable correcteur (m_{sc}) nécessaire à cet ajustement est calculée, pour un échantillon de 120 g, par la relation suivante :

$$m_{sc} = \left[\frac{f \cdot 120}{10} \right] - 120$$

Après exécution de l'essai, le résultat trouvé pour notre sable est présenté dans le tableau suivant :

Tableau IV.6 : Propreté du sable

Classes granulaire	0/3	Spécification SETRA-LCPC
Equivalent de Sable (ES) %	62.56	> 50 propre

On se référant au spécification SETRA-LCPC, le résultat trouvé témoigne de la propreté de notre sable .

IV.2.4.3-Essai au bleu de méthylène [NF P 18-592]

Cet essai, utilisé de manière courante pour caractériser l'activité des argiles contenues dans les sols, est également utilisé pour évaluer l'influence des fines d'origines argileuses contenues dans les sables et graves d'origine naturelle ou artificielle.

L'essai est effectué sur la fraction granulométrique 0/5 mm du matériau car ce sont principalement les élément les plus fins (inférieur à 2 mm) qui contiennent la fraction argileuse.

On prépare 30 g de la fraction 0/5 mm sèche que l'on met à tremper dans 200 ml d'eau déminéralisée.

Le tout est maintenu en agitation permanente au moyen de l'agitateur à ailettes, jusqu'à disparition visuelle de tout agglomérat de particules dans la suspension. Le dosage consiste à injecter successivement des doses bien déterminées de bleu de méthylène dans la suspension de sol, jusqu'à atteindre la saturation des particules d'argile.

Le test de la tache permet de repérer l'instant de cette saturation. on prélève une goutte de liquide dans le bêcher contenant le sol imbibé de bleu, et on dépose celle ci sur le papier filtre (diamètre du dépôt compris entre 8 à 12 mm). Deux cas sont possible :

- ✓ La goutte centrale bleu est entourée d'une zone humide incolore : le test est négatif.
- ✓ La goutte centrale bleu est entourée d'une zone humide teintée de bleu : le test est positif.

La valeur du bleu V_{BS} est donnée par :

$$V_{BS} = \frac{B}{m_0}$$

où

$$m_0 = \frac{m_1}{1+w}$$

B : Masse de bleu introduite (en gramme).

m_0 : Masse sèche de la prise d'essai .

m_1 : Masse humide de l'échantillon constituant la première prise d'essai (en gramme).

Fig IV.2 : Essai au bleu de méthylène

On donne les valeur trouvée dans le tableau suivant :

Tableau IV.7 : Valeurs du bleu de méthylène

Fraction de sable	0/3	Spécification
Valeur au bleu (g)	0.166	1

D'après les Spécifications SETRA/LCPC :

VBS = 0,1, le sol est insensible à l'eau.

VBS = 0,2 , il y a apparition de la sensibilité à l'eau.

On déduit que notre sol est très peu sensible à l'eau.

IV.2.5- Essai de résistance au choc : Los Angeles (LG) [NFP 18-573]

Une chaussée en exploitation est soumise à de multiples agressions mécaniques liés essentiellement au trafic. Les granulats doivent alors résister au chocs produits par la circulation. Il est donc nécessaire de procéder à des essais de résistance au choc, afin que les granulats puissent répondre aux impératifs de pérennité des chaussées.

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant le matériau au choc de boulets normalisés dans la machine Los Angeles.

Si M est la masse du matériau soumis à essai, m la masse des inférieurs à 1.6 mm produite au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation par choc s'exprime par la quantité LA :

$$\% 100 \cdot \frac{m}{M} = LA$$

Les caractéristiques intrinsèques obtenues sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV.8: Résistance au choc

Classe granulaire	3/8	8/15	Spécification SETRA-LCPC
LA (%)	17	20	15 ≤ LA ≤ 20 bon à moyen

En se basant sur les spécifications SETRA-LCPC, notre granulat a une valeur de Los Angeles comprise entre 15 et 20, ce qui nous permet de le classer dans les roches à dureté bonne.

IV.2.6- Essai de résistance à l'usure : Micro Deval [NFP 18-572]

Les granulats doivent résister à l'usure par les frottements résultant des déformations enregistrées par la chaussée sous le passage des poids lourds, d'où l'importance de procéder à l'essai Micro Deval (MD) qui permet de mesurer l'usure produite dans un cylindre en rotation dans des conditions bien définies, par frottement entre les granulats et une charge abrasive.

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai, m la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à l'usure s'exprime par la quantité :

$$\% 100 \cdot \frac{m}{M} = MDV$$

Les caractéristiques intrinsèques obtenues sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV.9 : Résistance à l'usure

Classe granulaire	3/8	8/15	Spécification SETRA-LCPC
MD (%)	20	16	13 ≤ MDE ≤ 20 bon à moyen

En se basant sur les spécification SETRA-LCPC, et d'après le tableau IV.9 les deux classe granulaires 3/8 et 8/15 présentent une usure en présence d'eau bonne.

Toute fois, il y'a lieu de signaler que la différence entre les deux valeurs pourrait être due au changement de gisement comme remarquée pour la propreté citée précédemment .

IV.3- Conclusion

Les granulats et le sable testés et provenant de la carrière de Kaddara et qui sont de nature calcaireuses, présentent donc de bonnes caractéristiques aussi bien intrinsèques que de fabrication.

Logiquement les valeurs du Micro-Deval et du Los Angeles devraient être les mêmes pour les deux fractions du fait que ce sont caractéristiques intrinsèques du matériau.

On remarque que ce n'est pas le cas ici puisque de meilleurs résultats sont à chaque fois enregistrés pour la classe 8/15.

Nous pensons que cela serait dû à une hétérogénéité des gisements exploités.

Chapitre VI : Etude de formulation

VI- Formulation de l'enrobé à froid

La formulation en laboratoire des enrobés à l'émulsion implique la détermination, dans un délai aussi court que possible, des propriétés mécaniques qu'atteindra le mélange après mûrissement donc après évacuation de l'eau résiduelle.

VI.1- Détermination de la composition du mélange

La détermination de la composition du mélange nécessite la détermination du squelette granulaire, la détermination de la teneur en eau d'apport et la détermination de la teneur optimale en émulsion.

VI.1.1- Détermination du squelette granulaire

L'ossature minérale de la formule retenue pour l'étude, est constituée d'un mélange de trois classes dont le pourcentage des différentes fractions est déterminé par tâtonnement, de manière à faire introduire la courbe finale du mélange, le plus possible dans le fuseau de référence relatif à un enrobé à froid 2/14 dans les fourchettes suivante :

**Tableau VI.1 : Fuseau de référence relatif
à un enrobé à froid 2/14 [32]**

Pourcentage des Tamisats	Limite inférieure	Limite Supérieure
.16	100	100
12.5	75	95
10	60	75
8	30	60
6.3	15	40
2	3	7
1	0	5
0.08	0	2

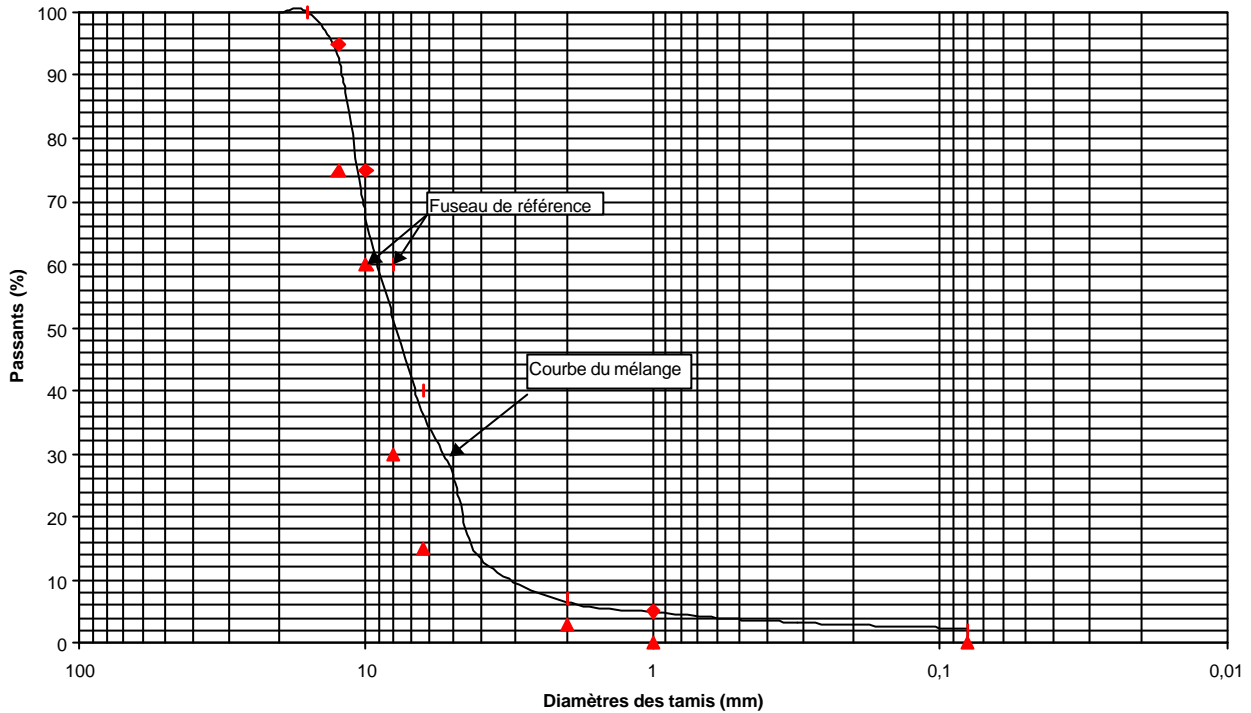


Fig VI.1 : Courbe du mélange granulaire

La composition du mélange retenue est:

Fraction 0/3 :	5 %
Fraction 3/8 :	25 %
Fraction 8/15 :	70 %

Le pourcentage pondéral de la fraction sable n'est pas important, vu que la fraction 3/8 présente un taux en fines relativement élevé et qui est exploitable.

Il est souhaitable de ne pas ajouter des fines d'apport, car le plus souvent elles sont de nature minéralogique différente de celle des matériaux de base, ce qui risque, par diffusion hétérogène au moment de l'introduction de l'émulsion, de modifier son processus de rupture et donc de freiner la dispersion du liant au sein de l'enrobé.

VI.1.2- Détermination de la teneur en eau d'apport

La teneur en eau d'apport est la quantité d'eau utilisée pour mouiller les granulats avant l'ajout d'émulsion de telle manière que la somme de cette dernière et la teneur en eau dans l'émulsion soit égale à la teneur en eau optimale.

On procède par l'essai de mouillage d'une quantité constante de granulats, en faisant varier la teneur en eau.

Le mélange se fait à la spatule dans une coupelle. L'objectif étant l'obtention d'un mélange granulaire assez humide pour faciliter l'adhésion entre granulats et l'émulsion et avoir un enrobage complet homogène sans coulures ni excès.

En effet l'expérience a montré le rôle primordial joué par la teneur en eau des granulats. Cette eau influe directement sur la qualité de l'enrobage par le biais de la mouillabilité des granulats et de la stabilité de l'émulsion. Ainsi ce paramètre a un double rôle : un net défaut en eau conduit à un enrobage très insuffisant et un excès à des coulures qui conduisent finalement à des sous-dosages en liant.

La teneur en eau du mélange est fixée entre un intervalle dont le minimum permet le mouillage de tous les granulats et dont le maximum est la teneur en eau optimale déterminée par l'essai Proctor modifié du mélange.

Dans notre cas, nous avons constaté visuellement, pour les différentes teneurs en eau, l'aspect suivant :

Tableau VI.2 : Détermination de la quantité d'eau d'apport minimale

Quantité d'eau %	Observation
0	Pas humidification
2	Pas humidification
3	Peu humidifié
3.5	Peu humidifié
4	Humidification moyenne
4.5	Bonne Humidification
5	Excès d'eau

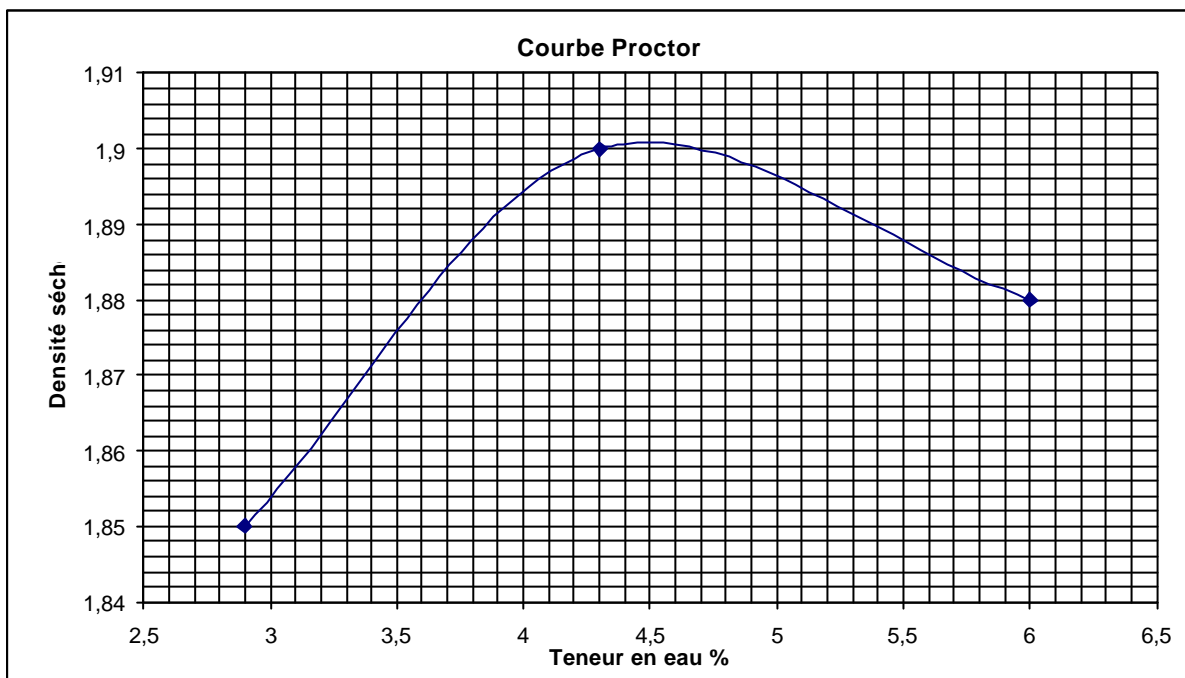
Pour fixer notre teneur en eau d'apport, on effectue le proctor modifié afin de déterminer la teneur en eau optimale.

Les caractéristiques d'un compactage Proctor modifié dénommées respectivement : la teneur en eau optimum Proctor modifié (W_{opt} en %) et la masse volumique sèche maximale Proctor modifié ($\gamma_{d_{opt}}$), sont des paramètres très utilisés pour identifier les matériaux et pour définir les spécifications de compactage qui leur sont applicables lorsqu'ils sont utilisés dans les constructions des remblais, des couches de forme et des assises de chaussées.

Le principe de cet essai consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et le compacter selon un procédé et une énergie conventionnels. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

D'une manière très générale cette courbe appelée courbe proctor présente une valeur maximale de la masse volumique du sol sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau.

Les caractéristiques trouvées pour notre matériau sont résumées dans la figure suivante :



FigVI.2 : Courbe Proctor du mélange

On tenant compte de la courbe Proctor et de l'appréciation visuelle, le pourcentage d'eau choisi pour le mélange est de **4.5 %**.

VI.1.3- Détermination de la teneur optimale en émulsion

Une fois le pourcentage des différentes fractions déterminé et la teneur en eau d'apport calculée, nous passons à la phase du mélange des agrégats avec le liant pour un enrobé à froid 2/14.

Cette phase comprend les étapes suivantes :

- ✓ Détermination du pourcentage du bitume résiduel
- ✓ Détermination de différentes teneurs en émulsion
- ✓ Choix de la teneur finale en émulsion

VI.1.3.1- Détermination du pourcentage du bitume résiduel

L'émulsion utilisée est à base de bitume 80/100, sa concentration en bitume est de 60 %.

La teneur en liant est calculée à partir du module de richesse (K), de la surface spécifique conventionnelle ($\bar{\alpha}$), d'un coefficient (\bar{a}) correcteur de la masse volumique des granulats (\bar{n}_r) exprimée en grammes par centimètre cube et du pouvoir absorbant des granulats, à l'aide de la relation suivante :

$$L (\%) = \bar{a} \cdot k \cdot [\quad]^{\frac{1}{5}}$$

avec :

$$\bar{a} = \frac{2.65}{\bar{n}_r} \quad \text{et} \quad [\quad] = (0,25G + 2,30S + 12s + 135f) \cdot \frac{1}{100}$$

L : Pourcentage en liant.

K : Module de richesse.

G : Pourcentage de refus supérieur à 6.3 mm.

S : Pourcentage de refus compris entre 0.315 mm et 6.3 mm.

s : Pourcentage de refus compris entre 0.08 mm et 0.315 mm.

f : Pourcentage de passant à 0.08 mm.

\bar{n}_r : Masse volumique des granulats

Les résultats trouvés sont résumés comme suit:

$$\begin{aligned} \bar{n}_r &= 2.66 \\ \bar{a} &= 0.9977 \\ [\quad] &= 4.0381 \\ [\quad]^{1/5} &= 1.3220 \end{aligned}$$

Nous donnons les différentes teneurs en bitume résiduel pour les valeurs du module de richesse, qui sont respectivement, 3.45, 3.60 et 3.75 dans le tableau suivant:

Tableau VI.3 : Détermination de la teneur en bitume résiduel

Module de richesse (%)	3.45	3.60	3.75
Teneur en bitume résiduel (%)	4.55	4.75	4.95

VI.1.3.2- Détermination de différentes teneurs en émulsion

Le pourcentage d'émulsion utilisé est calculé en fonction du pourcentage en bitume résiduel déterminé à partir du module de richesse et du pourcentage en bitume contenu dans l'émulsion de 60 %.

$$L_E = \frac{L}{0.60} \%$$

Avec :

L_E : Pourcentage d'émulsion.

L : Pourcentage en bitume résiduel

Les différentes valeurs du pourcentage de bitume résiduel utilisés, sont donnés dans le tableau ci après avec les différentes teneurs en émulsion qui leur correspondent.

Le choix de la teneur à été fait sur la base des teneurs en bitume résiduel qui généralement oscillent entre 4.5 % et 5 %.

Tableau VI.4 : Détermination de la Teneur en émulsion

Module de richesse (%)	3.45	3.60	3.75
Pourcentage de Bitume résiduel (%)	4.55	4.75	4.95
Pourcentage d'émulsion (%)	7.58	7.91	8.24

VI.1.3.3- Choix de la teneur finale en émulsion : Essai DURIEZ

L'essai utilisé pour la détermination de la meilleure teneur en émulsion parmi celles trouvées précédemment , est l'essai DURIEZ.

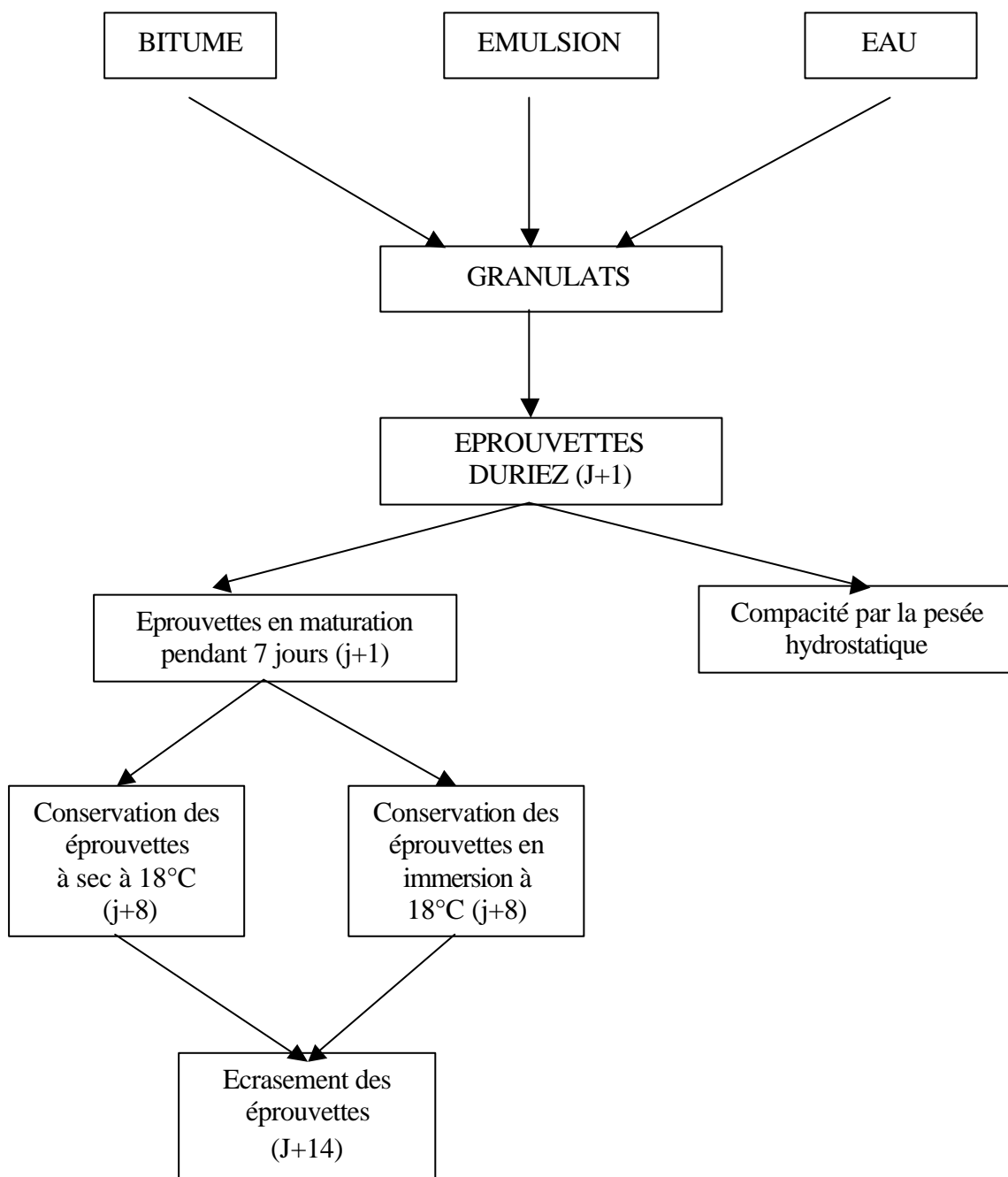
Cet essai à pour but la détermination, pour une température et un compactage donnés, de la meilleure résistance à la compression d'une éprouvette d'enrobé de poids et de section déterminés.

Il permet également de définir la tenue à l'eau de l'enrobé par le rapport des résistances à la compression avant et après immersion de l'éprouvette dans un bain d'eau thermostatique.

On se référant au pourcentage des différentes fractions déterminées précédemment, on détermine le poids pour chaque classe granulaire et on forme le mélange granulaire (gâchée).

Pour chaque gâchée on fait attribuer différentes teneur en émulsion, en maintenant la quantité d'eau d'apport constante et on applique le principe de l'essai DURIEZ. Pour trouver finalement la meilleure teneur en émulsion qui correspond à la plus grande résistance.

DURIEZ



a- Préparation de l'échantillon

Les granulats doivent être froids et secs au moment des pesées. Ils sont alors versés doucement dans la cuve du malaxeur mécanique, pour éviter toute perte de fines.

b- Préparation de l'eau d'ajout

L'eau d'ajout est versée dans un récipient de telle sorte que la quantité introduite soit supérieure d'une dizaine de gramme à celle devant être mise dans le mélange.

La teneur en eau devra être suffisante pour conduire à une répartition uniforme du liant sur les granulats.

c- Préparation de l'émulsion

L'émulsion d'enrobage contenue dans un flacon en matière plastique est soigneusement homogénéisée à l'aide d'une baguette de verre.

On pèse dans un récipient la quantité d'émulsion nécessaire à l'enrobage, plus une quantité correspondant à un léger excès pour pallier les pertes sur les parois du bûcher.

Les différentes teneurs en émulsion utilisées sont : 7.25 %, 7.91 % et 8.24 %.

d- Préparation du matériel spécifique

Le matériel utilisé pour le confectionnement des éprouvettes est composé des pièces suivantes :

- ✓ Moules, dits moules de compactages composés d'un cylindre creux de 80 mm \pm 0.1 de diamètre intérieur et de 195 mm de hauteur (photo 1).
- ✓ Des bases et des pistons comportant tout les deux des rainures triangulaires en longeurs, de 1 mm de profondeur et 2 mm de large, suivant quatre génératrices de 90°, pour l'évacuation de l'eau au moment du compactage (photo 2).



Fig VI.3 : Moule utilisé pour le confécionnement d'une éprouvette Duriez, avec un enrobé à froid

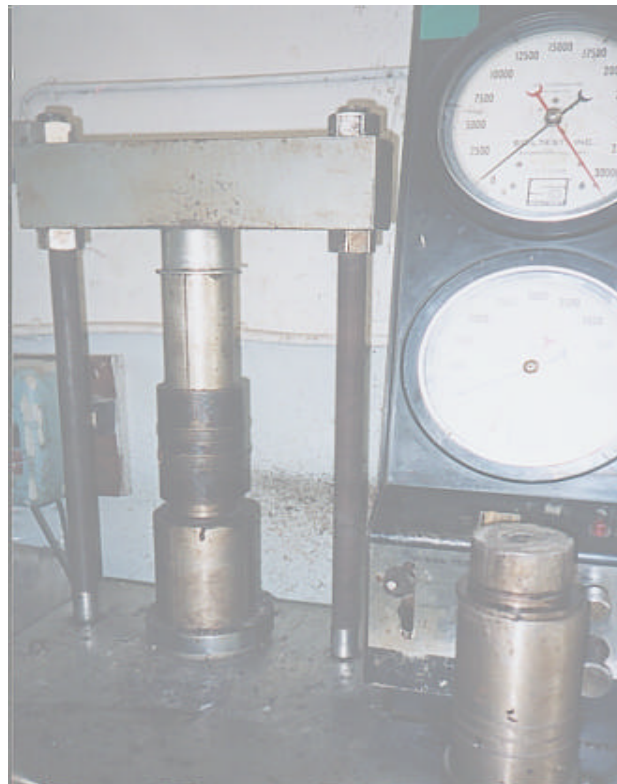


Fig VI.4 : Presse utilisée pour le confécionnement d'une éprouvette Duriez

- ✓ Un système de jeu de cales permettant le remplissage des moules et le compactage par double effet.
- ✓ Couvercles de boîtes métalliques, d'un diamètre minimal de 150mm, dans lesquels seront écrasées les éprouvettes.
- ✓ Presse à avancement contrôlée réglée à la valeur de 1 mm/s, équipée d'un enregistreur et d'un peson permettant de mesurer l'effort en cours d'essai (photo 2).
- ✓ Malaxeur mécanique, équipé d'une cuve.

e- Malaxage

La cuve contenant les granulats est centrée sur le malaxeur mécanique réglé sur une vitesse moyenne de 32 tr/s. On actionne le malaxeur à blanc quelques tours afin de mélanger les différents granulats. On introduit ensuite l'eau d'ajout dans le mélange, on le malaxe pendant 1 minute.

Enfin, la quantité d'émulsion prévue est introduite dans le mélange progressivement. La durée de malaxage n'est pas imposée ; elle est appréciée visuellement jusqu'à homogénéisation correcte. Elle est généralement de l'ordre de la minute.

Après malaxage, les palettes du malaxeur sont grattées d'un couteau de vitrier. Tout l'enrobé doit être alors remélangé au moyen d'une main métallique qui servira au prélèvement.

f- Remplissage des moules

On pèse dans une capsule en tôle émaillée la quantité d'enrobé nécessaire à la confection d'une éprouvette ($1 \text{ kg} \pm 1 \text{ g}$).

Avant chaque pesée on mélange la gâchée à l'aide de sa pelle afin d'éviter toute ségrégation.

On place les bases des moules sur une table mobile, on pose les moules sur les cales, on introduit l'enrobé à l'aide d'un entonnoir et on égalise la partie supérieure.

g- Confectionnement des éprouvettes

La pastille supérieure est placée sur la surface de l'enrobé. Le moule est alors déposé sur le plateau porte moule de la presse. La montée se fait manuellement jusqu'à atteindre 60 KN.

La presse est maintenue à 60 KN pendant 5 minutes. Au bout de ce temps, la mise en pression est interrompue, on fait revenir le plateau à sa position initiale.

On enlève la pastille supérieure et le piston après compactage.

h- Démoulage

Les éprouvettes sont démoulées à l'aide d'un piston le lendemain, soit le jour (j + 1), 24 h après confection.

Dans la mesure du possible, ces opérations de fabrication et de compactage seront réalisées dans l'après- midi du jour (j).

Il est conseillé d'adapter un plateau susceptible de recevoir l'eau d'extrusion lors du compactage.

i- Mesure de la masse volumique apparente au moyen de balance hydrostatique

Après démoulage, les éprouvettes soigneusement numérotées sont pesées à 1 g près. Avant pesée, il faut égoutter les éprouvettes en les essuyant vivement avec un chiffon humide.

Afin d'effectuer les calculs ultérieurs, on prélève deux (2) éprouvettes au hasard dans la série de huit , pour la détermination de la masse volumique apparente au moyen de la balance hydrostatique.

La pesée dans l'eau se fait après paraffinage de l'éprouvette, la paraffine étant à 70°C.

Les résultats des densités apparentes trouvés pour les différentes teneurs en émulsion sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau VI.5 : Densités apparentes pour les différentes teneurs en émulsion

Teneur en émulsion (%)	7.25	7.91	8.24
Densité apparente	2.49	2.48	2.47
Compacité (%)	86.7	87.9	89.1

j- Maturation des éprouvettes

Le jour du démoulage étant (j+1), les éprouvettes sont conservées à température ambiante et pesées pendant toute la période de maturation qui dure sept jours (j+8), contrairement aux enrobés à chaud dont la maturation des éprouvettes n'est que (j+1).

L'ensemble des résultats quant à l'évolution du poids des éprouvettes en fonction du temps de mûrissement pour les différentes teneur en émulsion sont portées sur les figures suivantes :

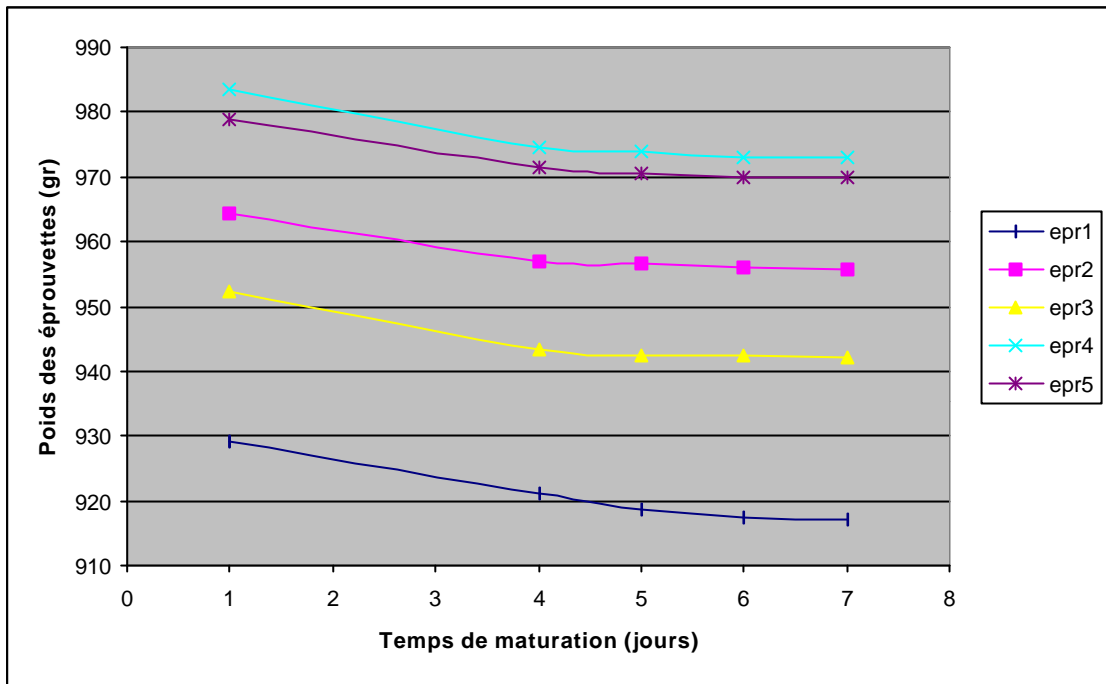


Fig VI.5 : Temps de maturation des éprouvettes pour 7.58 % d'émulsion

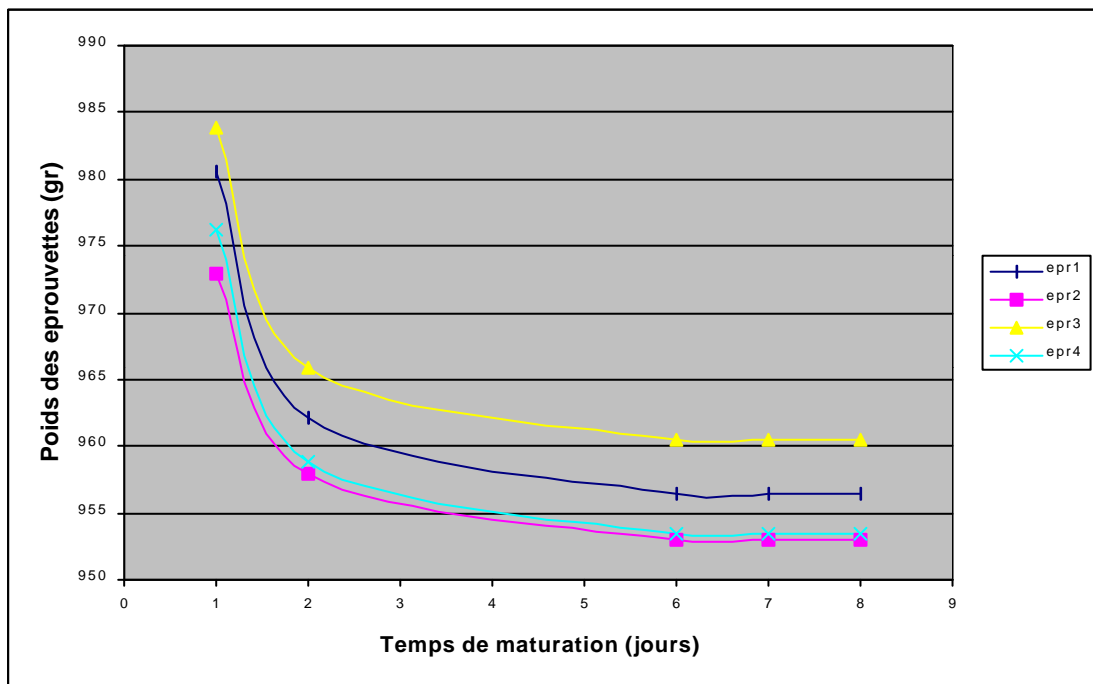


Fig VI.6 : Temps de maturation des éprouvettes pour 7.91 % d'émulsion

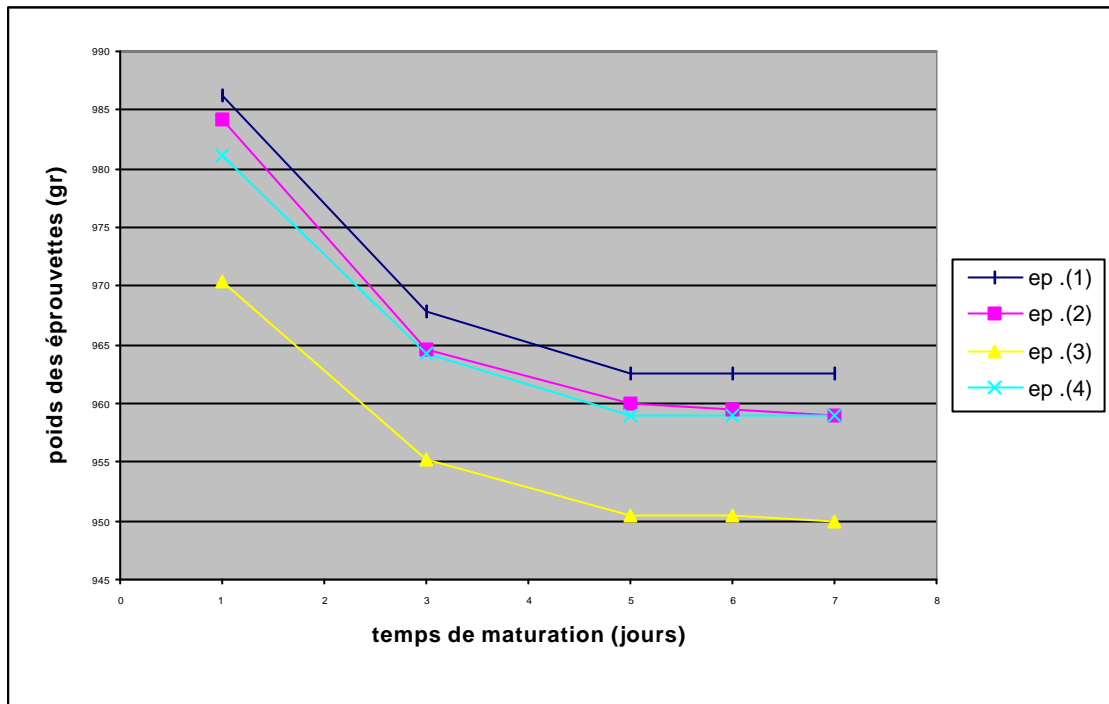


Fig III.7 : Temps de mûrissement des éprouvettes pour 8.24 % d'émulsion

Le poids des éprouvettes, pour les trois gâchées correspondant aux différents pourcentage en émulsion, diminue pendant les cinq premiers jours et tend à devenir constant ; ce qui témoigne de l'évaporation de l'eau. C'est ce qu'on appelle la maturation des éprouvettes Duriez.

h- Conservation des éprouvettes

- **conservation à sec**

Parmi les éprouvettes restantes, la moitié est placée sur un plateau de l'enceinte de conservation climatique réglée, à $18^{\circ} \text{C} \pm 0.5^{\circ} \text{C}$. Cette conservation dure sept (7) jours.

J étant le jour de confection des éprouvettes, on commence la conservation à sec au jour (j + 8).

- **conservation avec immersion**

A partir du jour (j + 8), les autres éprouvettes restantes sont pesées puis immergées dans un bain thermostatique d'une enceinte de conservation climatique réglée à $18^{\circ} \text{C} \pm 0.5^{\circ} \text{C}$, pour une durée de sept (7) jours.

Au bout deux (2) heures de temps en immersion, on fait sortir les éprouvettes de l'eau, on les essuie légèrement en les roulant dans un chiffon humide et on les pèse ensuite à ± 0.5 g près, puis on les remet dans le bain thermostatique.

On refait la même opération, au bout de deux (2) jours et puis sept (7) jours d'immersion.

i- Ecrasement des éprouvettes

Au jour (j + 15), les éprouvettes immergées sont sortis de l'enceinte climatique, puis pesée à ± 0.5 g près et ensuite placées en presse.

Les éprouvettes conservées à sec, sont écrasées sans êtres pesées.

Les éprouvettes sont placées sur le plateau inférieur, mobile de la presse entre deux disques métalliques.

On déclenche le mécanisme d'avancement de la presse. On arrête l'essai lorsqu'on atteint la force maximale qui correspond à la résistance à la compression simple d'une éprouvette.

On établit alors le rapport à la résistance avec immersion (r), à la résistance à sec (R).

On exprime le rapport (r / R) à 0.01 près.

Les résultats trouvés sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau VI.6 : Variation de la teneur en émulsion en fonction de la force de la résistance

Désignation	Résultats			Recommandation
Teneur en bitume résiduel (%)	4.55	4.75	4.95	-
Teneur en émulsion (%)	7.25	7.91	8.24	-
Compacité (%)	86.7	87.9	89.1	> 85
Résistance à la compression à sec : R (bars)	11.94	14.93	15.92	> 30
Résistance à 7 jours d'immersion : r (bars)	6.97	9.95	10.55	-
Rapport immersion - compression : r / R	0.58	0.67	0.66	> 0.55

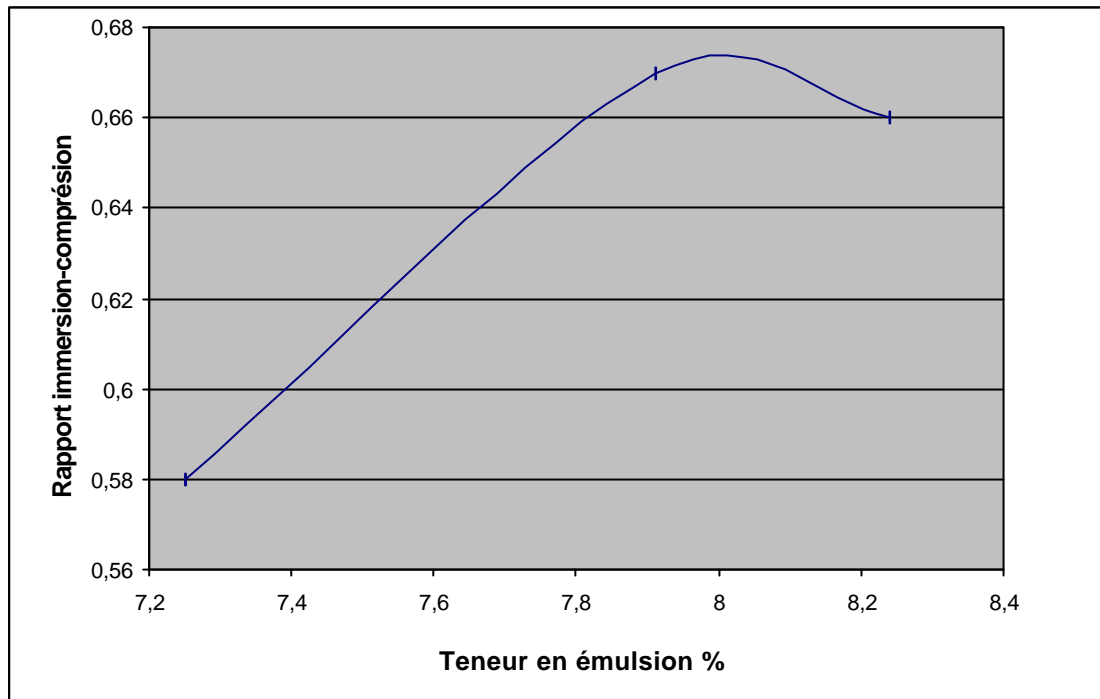


Fig VI.8 : Variation de la résistance immersion - compression en fonction de la teneur en émulsion

Les résultats des essais DURIEZ ci dessus témoigne que le meilleur dosage en émulsion est 7.91 % correspondant à une résistance de 14.93 bars et le plus grand rapport immersion-compression qui est de 0.67 .

Donc la teneur en émulsion retenue est de l'ordre de 7.91 % .

VI.2- Choix de la force de compactage

Les conditions normalisées imposent une force de compactage de 60 KN pour des éprouvettes DURIEZ.

Nous avons constaté, qu'en appliquant une fore de 60 KN, il y'a écrasement des granulats entres eux .

Nous avons jugé qu'il est nécessaire d'examiner l'influence de la force de compactage sur l'éprouvette DURIEZ, pour une teneur en émulsion constante déjà choisie précédemment qui est égale à 7.91 % correspondante à une densité théorique égale à 2.48, Car la norme de l'essai Duriez pour les enrobés à froid n'existe pas. Pour cela, nous nous basons sur deux critères :

- Force de compactage par rapport au pourcentage des vides.
- Force de compactage par rapport au pourcentage des fines.

VI.2.1- Force de compactage par rapport au pourcentage des vides

Nous avons confectionné des éprouvettes avec une teneur en émulsion constante et égale à 7.91 %, ensuite on les a compacté avec des forces de compactage qui sont respectivement de 40, 45, 50 et 60 KN.

Après démoulage, nous avons déterminé la densité apparente par la pesée hydrostatique, pour chaque cas et calculé les compacités et les indices de vide qui leurs correspondent

Le tableau VI.7 ci dessous représente l'évolution des teneurs en vides en fonction des différentes force de compactage.

Tableau VI.7 : Détermination des caractéristique de l'enrobé pour différente force de compactage

Forces de compactage (KN)	40	45	50	60
Densité apparente	2.08	2.12	2.15	2.19
Compacité (%)	83.87	85.48	86.69	88.31
Pourcentage des vides (%)	16.13	14.5	13.31	11.69

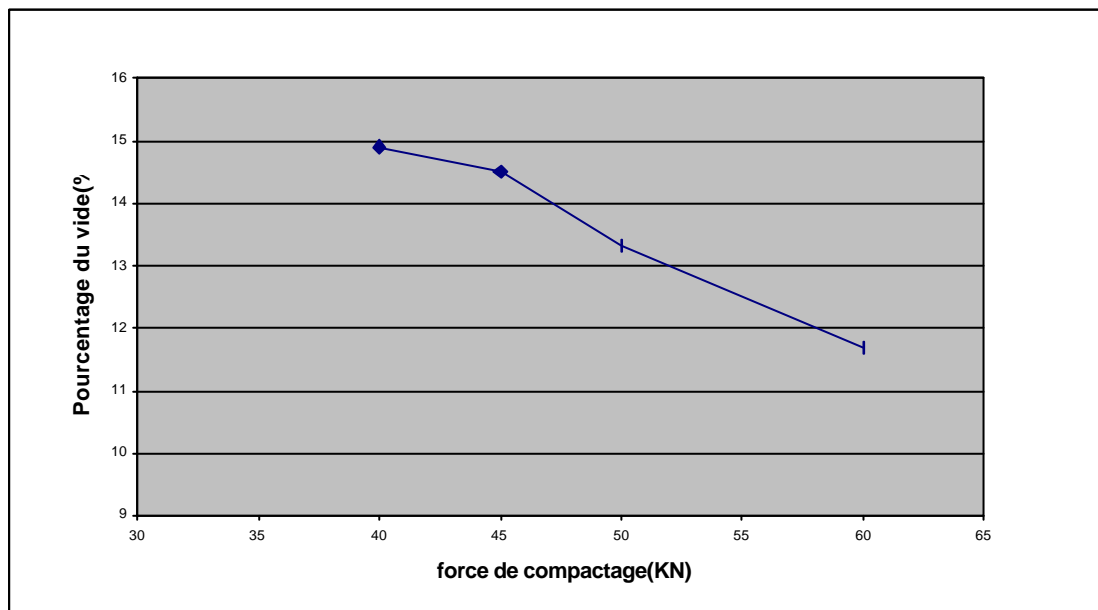


Fig VI.9 : Evolution du pourcentage du vide en fonction de la force de compactage

La teneur en vide, obtenue au laboratoire pour 60 KN, est de l'ordre de 11.69 % . alors dans les chantier, l'expérience montre que dans les cas favorables les teneurs en vides sont très rarement inférieures à 14 % .

On en déduit que la force de compactage nécessaire pour obtenir des teneurs en vide identiques à celles du chantier est de 45 % .

Malgré que, pour une force de compactage de 40 KN, nous avons un pourcentage de vide plus ou moins supérieur à 14 %. Nous avons opté pour la force de 45 KN, et cela dans le but d'éviter un enrobé très ouvert et d'écraser les granulats.

VI.2.2- Force de compactage par rapport au pourcentage des fines

Le principe de cette méthode est de prendre une éprouvette déjà compactée, de la désenrober grâce à un extracteur type Kumagawa [NF P66 001] et ensuite refaire sa granulométrie pour apprécier la teneur en fines de l'enrobé.

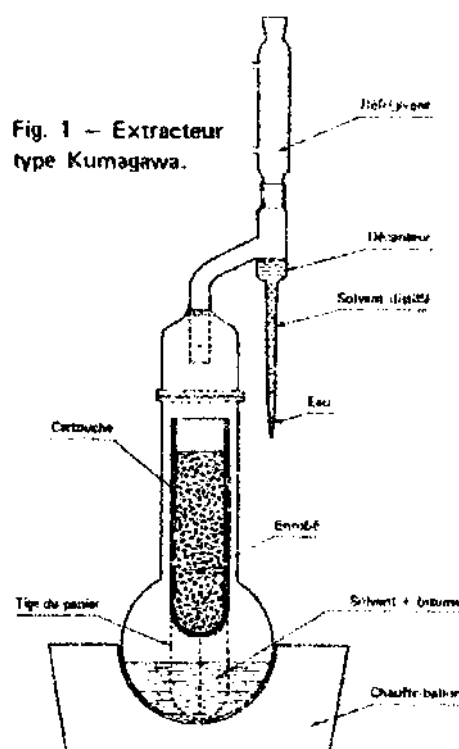


Fig VI.10 : Extracteur type Kumagawa

Les résultats trouvés sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau VI.8: Pourcentage de fines en fonction des forces de compactages

Forces de compactages	40	45	50	60
Compacité	83.87	85.48	86.69	88.31
Pourcentage de fines	4	4.5	15	21.25

Nous remarquons que pour une force de compactage de 60 KN, le pourcentage de fines est beaucoup plus grand par rapport au pourcentage de fines choisi au départ dans le mélange granulaire.

Même dans ce cas les valeurs concernant le pourcentage de fines sont presque égales pour les forces de compactage de 40 KN et 45 KN.

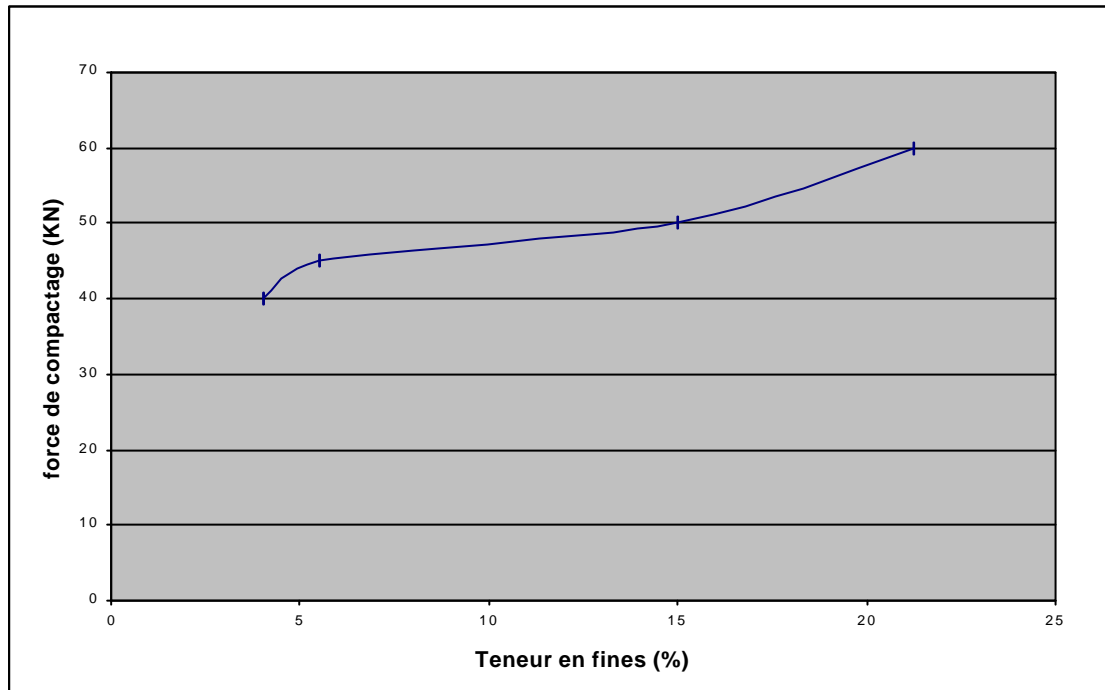


Fig VI.11 : Evolution du pourcentage des fines en fonction de la force de compactage

Nous avons choisi la force de compactage de 45 KN car elle remplit les deux critères qui sont :

- ✓ La teneur en vide se rapproche de celle du chantier.
- ✓ Le pourcentage de fine se rapproche de celui du mélange granulaire initial, ce qui prouve qu'il n'y a pas écrasement des granulats.

VI.2- Conclusion

La composition du mélange retenue est la suivante:

- Pourcentage granulaire est de 5 % (0/3), 25 % (3/8) et 70 % (8/15)
- Teneur en eau de 45 %
- Teneur en émulsion de 7.91 %
- force de compactage de 45 KN

Le point le plus important à signaler ici est l'inexistence d'une méthode de formulation à ne pas confondre avec l'essai Duriez qui n'est qu'un outil d'appréciation.

Par ailleurs, la valeur de la force de compactage devrait être déterminée au cas par cas selon la nature des granulats.

Chapitre VII : Etude du temps mûrissement

VII- Etude du mûrissement

Les mélanges à l'émulsion de bitume voient leurs propriétés mécaniques évoluer en fonction de la cinématique de départ de l'eau résiduelle au cours du temps, contrairement aux enrobes hydrocarbonés à chaud qui atteignent la quasi-totalité de leurs performances mécaniques par simple refroidissement.

Nous avons confectionné nos éprouvettes avec les critères choisis précédemment qui sont :

- Teneur en eau de 45 %.
- Teneur en émulsion de 7.91 % .
- force de compactage de 45 KN.

Les teneur en eau résiduelle déterminée par pesé et les résistances en compression sont mesurées dans le temps entre le premier jour et le trentième jour de mûrissement dans une enceinte climatique.

Pour pouvoir expliquer d'une façon correct nos résultats, nous avons jugé qu'il fallait, pour chaque jour ou pour chaque valeur de résistance, travailler sur une moyenne de trois éprouvettes.

VII.1- Préparation des éprouvettes

Cette étape a nécessité la préparation de quatre-vingt-dix éprouvettes supplémentaires en plus des soixante-dix éprouvettes déjà préparées pou déterminer toutes les caractéristiques précédentes.

Vu le nombre de moules disponibles au niveau du laboratoire d'étude, il nous a été impossible de fabriquer nos quatre-vingt-dix éprouvettes en même temps.

Nous avons procédé de la façon suivante :

J + 28	3 éprouvettes
J + 29	3 éprouvettes
J + 30	3 éprouvettes

La deuxième gâchée comprenant neuf éprouvettes numérotée comme suit :

J + 25	3 éprouvettes
J + 26	3 éprouvettes
J + 27	3 éprouvettes

Et ainsi de suite jusqu'à la dernière gâchée qui été numérotée de la façon suivante :

J + 3	3 éprouvettes
J + 2	3 éprouvettes
J + 1	3 éprouvettes

Ce choix a été fait pour gagner du temps car lorsque la dernière gâchée a été préparée, les éprouvettes de la première gâchée avaient déjà atteint l'âge de vingt neuf jours.

Le lendemain de la dernière gâchée, on a démoulé les neuf dernières éprouvettes et on a commencé l'écrasement des trois éprouvettes numérotées $j + 1$.

VII.2- Résultats obtenus

Une fois toutes nos éprouvettes écrasées et toutes nos moyennes calculées, nous avons étudié l'évolution des paramètres suivants :

- Le poids des éprouvettes.
- La teneur en eau résiduelle évaporée des éprouvettes.
- La résistance à la compression des éprouvettes.

VII.2.1- Influence du temps de mûrissement sur la teneur en eau résiduelle évaporée

Sous l'effet de la température, les éprouvettes perdent chaque jour une quantité d'eau sous forme de vapeur jusqu'à stabilisation du poids de celle ci. On considère que la teneur en eau résiduelle, la masse d'eau évaporée au cours du temps.

L'ensemble des résultats quant à l'évolution de la teneur en eau (w_e %), en fonction du temps de mûrissement est reporté sur la courbe suivante :

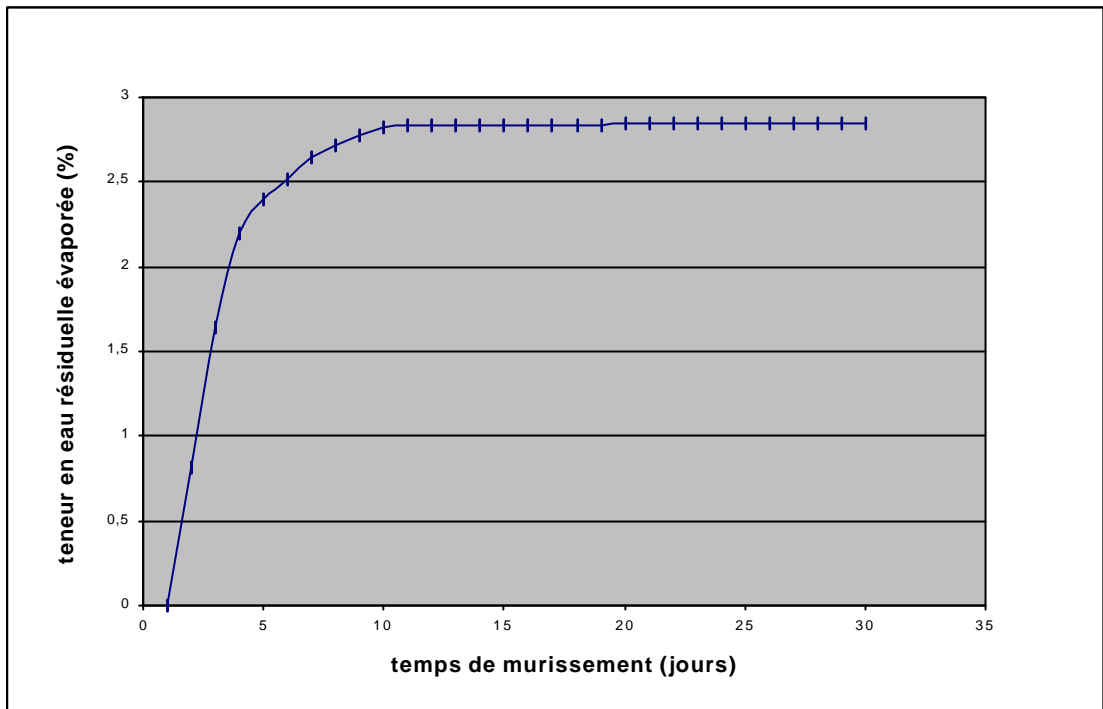


Fig VII.1 : La teneur en eau résiduelle en fonction du temps de mûrissement

La teneur en eau des éprouvettes évolue pendant les dix premiers jours jusqu'à se stabiliser pour une teneur en eau de l'ordre de 2.82 %.

On distingue clairement trois régimes liés au départ de l'eau :

- ✓ Une première zone comprise entre le jour de démoulage de l'éprouvette et le quatrième jour. Cette zone est caractérisée par une cinétique d'évaporation très rapide.
- ✓ Une deuxième zone située entre le quatrième jour et le dixième jour ou la cinétique d'évaporation est ralentie.
- ✓ Une troisième zone où l'évaporation de l'eau est presque constante et semble se stabiliser.

VII.2.2- Influence du temps de mûrissement sur le poids des éprouvettes

Les éprouvettes ont été pesées chaque jour. Chaque point sur la courbe représente la moyenne du poids de trois éprouvettes pour un jour j .

Au cours du mûrissement d'un enrobé à l'émulsion, l'eau s'évapore. Le passage de l'état liquide à l'état vapeur se traduit par une perte de masse des éprouvettes comme le confirme la figure suivante :

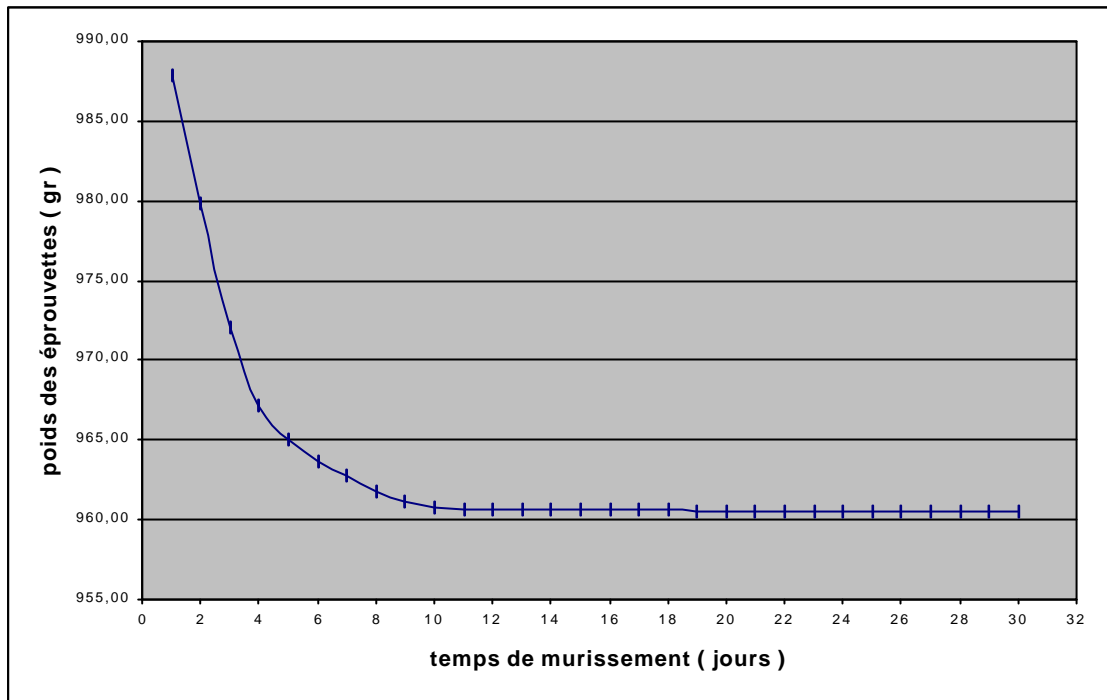


Fig VII.2 : Variation du poids des éprouvettes en fonction du temps de mûrissement

On remarque que le poids des éprouvettes diminue rapidement pendant les quatre premiers jours, évolue moins rapidement durant les six jours suivants et se stabilise à partir du dixième jour. Ceci est en confirmation avec les remarques faites pour la courbe précédente.

VII.2.3- Influence du temps de mûrissement sur la résistance à la compression

Les éprouvettes ont été soumises à une compression simple et le graphe suivant nous donne l'évolution de cette résistance en fonction du temps de mûrissement :

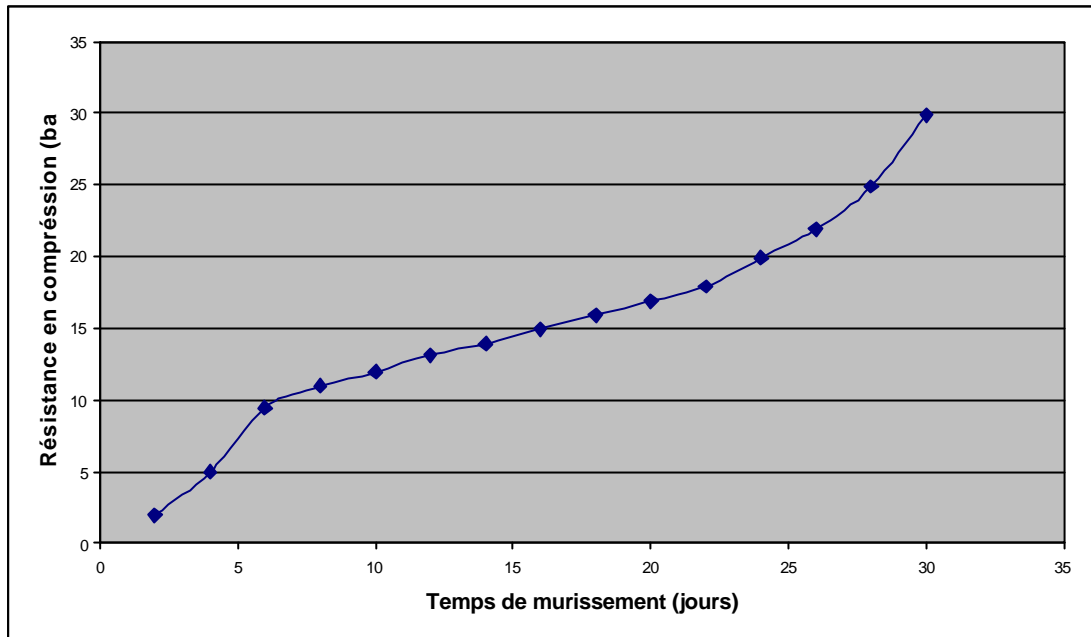


Fig VII.3 :La résistance à la compression en fonction du temps de mûrissement

La stabilisation en terme de résistance n'est pas atteinte, en effet on remarque sur la courbe que la résistance continue toujours à augmenter dans le temps malgré que précédemment, la stabilisation vis à vis du poids est atteinte. Ce phénomène s'explique par le fait que les éprouvettes contenaient en plus de l'eau, l'émulsifiant dont la particularité est de s'évaporer pour laisser en place le bitume seul.

Cette évaporation est plus lente que l'évaporation de l'eau et explique la non stabilisation de nos éprouvettes au bout de trente jours.

VII.4- Conclusion

A la lumière des résultats précédents, on voit que l'évolution de l'eau joue un rôle très important sur les caractéristiques finales de l'enrobé à froid.

Dans les courbes précédentes, on a remarqué une stabilisation franche au bout du dixième jour tout ce qui concerne la teneur en eau évaporée que le poids des éprouvettes. On pourrait peut être s'attendre à cette même évolution pour ce qui est des la résistance à la compression.

On voit bien que sur la figure VII.3, que ce n'est pas le cas et que la résistance à la compression augmente continuellement durant les trente jours de mûrissement.

Ceci est tout à fait normal car si les deux premières courbes ne donnent qu'un aspect quantitatif du poids des éprouvettes lié au départ d'eau, cette dernière courbe montre le passage de l'émulsion de bitume, matériau liquide, au bitume résiduel lui même qui confère à l'éprouvette, au fur et à mesure de l'évaporation de l'émulsifiant, la qualité et la résistance d'un enrobé à chaud.

Ceci montre que l'enrobé à froid atteint ses performances finales longtemps après sa fabrication ou sa mise en œuvre et qu'il y'a lieu de ne pas le fermer complètement pour ne pas gêner l'évaporation de l'émulsifiant qui se fait progressivement.

Conclusion générale et perspectives

Lors de ce travail de recherche, nous avons eu à étudier tant du point de vue théorique qu'expérimental, la formulation et le mûrissement des enrobés à froid.

Pour cela, nous avons été amené à étudier dans la première partie de cette thèse le comportement des émulsions de bitume des enrobés à froid, aussi qu'a faire un état de l'art en ce qui concerne l'état actuel de la recherche sur les enrobés à froid et cela, on les classant par thèmes pour en faciliter la lecture.

A travers l'analyse de thèmes énumérés dans la première partie, nous voyons que le domaine des enrobés à froid et des émulsions de bitume est très complexe et très vaste et il serait illusoire de vouloir tout citer d'une façon complète dans cette thèse.

Néanmoins nous avons essayé de cerner chaque thème et de constituer un document synthétisé et récapitulatif pouvant être d'une grande aide et constituer un point de départ pour les chercheurs qui voudront s'intéresser à ce domaine.

Suite à cela, nous sommes passé à la deuxième partie de notre travail ou nous avons réussi à formuler un enrobé à froid en laboratoire puis a étudier l'influence de l'évaporation des constituants volatils sur ses caractéristiques mécaniques.

Ceci constitue une première en Algérie où, comme nous l'avons signalé dans le chapitre «état actuel» aucune étude de recherche n'a été entreprise dans ce sens par nos entreprises et encore moins au sein de nos universités.

Lors de cette étude expérimentale, nous avons mis en évidence la nécessité de mettre au point un mode opératoire pour la formulation de ce type d'enrobés en insistant surtout sur la nature de l'émulsion en fonction de l'usage envisagée et surtout de la nécessité de faire une étude pour évaluer la force de compactage avec laquelle seront fabriquées les éprouvettes et cela en fonction de la nature et de la dureté des granulats.

Ce point nous paraît très important et il serait utile de lui consacrer une étude particulière afin d'arriver à l'élaboration d'un avant projet de mode opératoire pour la formulation des enrobés à froid.

Un autre point qui nous paraît tout aussi important concerne la détermination de la teneur en eau de l'émulsion de bitume car une de ses fourchettes ou ses limites est l'observation visuelle avec tout ce que cela peut induire comme erreur d'un opérateur à un autre.

Pour ce qui est des résultats obtenues, nous les rappelons succinctement ci dessous :

- ✓ L'enrobé a été fabriqué avec des granulats de type calcaire provenant de la carrière de Kaddara.
- ✓ L'émulsion utilisée est de type cationique à rupture lente et provient de l'usine de Technogum à Chebli willaya de Blida.
- ✓ La formulation de l'enrobé s'est fait sur la base des essais suivant :
 - Le proctor, pour la détermination de la teneur en eau d'apport.
 - Le Duriez pour la détermination de la teneur optimale en émulsion.
- ✓ Les résultats de la formulation sont :

La composition granulaire du mélange choisie est de 70 % de 8/15, 25 % de 3/8 et 5 % de 0/3, la teneur en émulsion est de 7.91, la teneur d'eau d'apport est de 4.5 %, la force de compactage est de 45 KN.

- ✓ L'étude du temps de mûrissement de notre enrobé montre que ce dernier n'atteint ses caractéristiques finales qu'au bout de quelques jours et qu'il y'a lieu de laisser l'eau et l'émulsifiant bien s'évaporer et donc de ne pas fermer le tapis d'enrobé.

Il serait judicieux d'enrichir à l'avenir ce travail par l'étude des points suivant :

- ✓ Etude des caractéristiques mécaniques de l'enrobé à froid en utilisant plusieurs types d'émulsions.
- ✓ Etude du temps de mûrissement des enrobées à froid en fonction de l'hygrométrie et des conditions de conservation.
- ✓ Mise au point d'une méthodologie de formulation propre aux enrobés à froid.
- ✓ Etude du fluage statique des enrobés à froid.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] **AIT ABDESSELAM. M**, « Recyclage à froid in-situ: RN3-OUARGLA », II^{ème} congrès maghrébin de la route, Novembre 1994.
- [2] **ARCHINARD. P, LAMAIZIERE. E, LEVEQUE. J**, « Les matériaux traités à froid aux liants hydrocarbonés : Grave émulsion », Supplément N°34 à la revue Générale des Routes et Aérodrômes (RGRA), Janvier 1982, p3.
- [3] **ARCHINARD. P, LAMAIZIERE. E, LEVEQUE. J**, « Les matériaux traités à froid aux liants hydrocarbonés : Les enrobés dense à l'émulsion », Supplément N°35 à la revue Générale des Routes et Aérodrômes (RGRA), Février 1982, p2.
- [4] **BECHER. P**, « Emulsion Theory and Practice », Reinhold publishing Co. New York, 1965, p20.
- [5] **BOUKERROU. A**, «Les enrobés à froid. Utilisation en technique saharienne » II^{ème} congrès maghrébin de la route, Novembre 1994.
- [6] **BOUSSAD. N, LOMBARDI. B, GANDANGER. Ph.**, « Tigrumuls et Emultech : Les émulsions Esso de nouvelles génération.», CME 93, paris, Octobre 1993.
- [7] **BRION. Y, LE ROUX. C, LINDER. R, MOONEN. R**, « Mesure de l'évolution de la cohésion au jeune âge des enrobés à l'émulsion par la maniabilimètre Nynas », Revue Générale des Routes et Aérodrômes (RGRA) N° 769, Janvier 1999.
- [8] **BRULE. B, SAMANOS. J** « Les enrobés coulés à froid », Revue Générale des Routes et Aérodrômes (RGRA) N° 749, mars 1997.
- [9] **CORNET. E, LOMBARDI. B, MARCHAL. J.L**, « Emulsion : le procédé hydrodynamique Esso. Dix ans d'innovation continue.», Revue Générale des Routes et Aérodrômes (RGRA) N° 779, décembre 1999.
- [10] **CHAPPAT. M**, « L'émulsion au travers des métier: l'émulsion de bitume en technique routière », Revue Générale des Routes et Aérodrômes (RGRA), Mai 1994.
- [11] **CORTE. J.F**, « Les reprofilage des chaussées », Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et chaussé, Décembre 1999.
- [12] **DELFOSSÉ. F, ECHMANN. B, LE ROUX. A**, « Caractérisation des granulats vis à vis des phénomènes de Rupture des émulsions dans les enrobés à froid », Revue Générale des Routes et Aérodrômes (RGRA) N° 798, Septembre 2001.
- [13] **DENEUVILLERS.C, GALLIMARD. M, SAMANOS. J**, « Méthologie d'étude et de formulations des enrobés coulés à froid », Revue Générale des Routes et Aérodrômes (RGRA) N° 781, Mars 2000, p 48-52.

- [14] **DENEUVILLERS. C, GALLIMARD. M**, « Screg Surface Cohesion Test for Slurry Systems », ISSA, 37 th annual conference, Mexico, 1999.
- [15] **DENEUVILIER. C, MEYER. V**, « Evaluation de la maniabilité des enrobés à froid à l'aide de nouveaux tests de laboratoire », Revue Générale des Routes et Aérodrodromes (RGRA) N° 788, Octobre 2000, p 81-83.
- [16] **DENEUVILLIERS. C**, « Etude des interactions entre minéraux et tensioactifs cationiques », Revue Générale des Routes et Aérodrodromes (RGRA), septembre 1997.
- [17] **DRON. R**, « Comportement électrochimique des émulsions de bitume », Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et chaussée N°13, juin1965, p 1-6.
- [18] **DURAND. G**, « L'émulsion de bitume: la fabrication au service de son utilisation », Revue Générale des Routes et Aérodrodromes (RGRA), Mai 1994.
- [19] **DURRIEZ. H, ARRAMBIDE. J**, « Nouveau traité de matériaux », Dunod, 3, 1962, p 134.
- [20] **ECKMANN. B, LE BEC. S, LESUEUR. D**, « Caractérisation des enrobés à froid vis à vis de la mise en œuvre et de la montée en cohésion », Revue Générale des Routes et Aérodrodromes (RGRA) N° 802, Janvier 2002, p 50-58.
- [21] **ECKMANN. B, POTTI. JJ, BOURREL. M**, « Technologies à froid : Les enseignements du projet Optel », Revue Générale des Routes et Aérodrodromes (RGRA) N° 792, Février 2001.
- [22] **GIGER. J, RAMOND. G, AJOUE. AM**, « Aspects chimiques de la formulation des émulsion de bitume », Congrès mondial de l'Association Internationale de Slussy Seal (ISSA), Madrid, Février 1977.
- [23] **GLET. W**, « A five stages Model for the bitumen emulsion setting and its importance for formulation and application of such emulsions », Congrès Mondial des Emulsions, volume 3, 1997.
- [24] **GRIMAUX. J.P**, « Les émulsions de bitume: les enrobés denses à froid à l'émulsion », Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et chaussés, Spécial W, Juin 1984, p 88-95.
- [25] **GROUPE DE RECHERCHES DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES. Ed. LCPC**. « Etude de la rupture des émulsions de bitume en laboratoire et sur site expérimental. Etude commune LCPC-Shell-CECA-Colas. », 1992.
- [26] **GUELLATI. S, IKHLEF. A**, « Les enrobés ouvert à l'émulsion : Une solution contre la remontée des fissures au sud », congrée national de l'émulsion, 2002.
- [27] **GUINARD. G, LAFON. J.F, PUGGELLI. M**, « Les techniques à l'émulsion », Revue Générale des Routes et Aérodrodromes (RGRA), Mai 1994.
- [28] **GUIDE THECHNIQUE SETRA-LCPC**, enduits superficiels d'usure, Mai 1995.

- [29] **HILT. G, JOLY. A** « Evaluation des enrobés coulés à froid en laboratoire » ISSA, IV^e congrès mondial, Paris, 1997.
- [30] **JOURDANE. M, DELPAS. P, VANISCOTE. J.C,** « Béton bitumineux à froid : Une couche de roulement et de reprofilage à base d'enrobés recyclés », Revue Générale des Routes et Aéroports (RGRA) N° 788, Octobre 2000, p 45.
- [31] **LABORATOIRE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS (LNTD),** « Contrôle de composition des enrobés bitumineux », Juillet 1980.
- [32] **LAFON. JF,** « Enrobés à froid traités à l'émulsion de bitume répandus en couches continues, enrobés denses et enrobés ouverts », Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et chaussées N° 136, Avril 1985, p 81-93.
- [33] **LAFON J.F,** « Performances en places des enrobés à froid – Expérience française ». Congrès Mondial des Emulsions, 1993, Volume 3, article 4-12-227.08.
- [34] **LE BEC. S, MAZE. M, BRULE. B,** « Formulation des enrobés à l'émulsion: Accélération du temps de mûrissement en laboratoire », 2eme Eurasphalt & Eurobitume congress Barcelona (Spain), Septembre 2000 Technical session 1 book I, p 416.
- [35] **LEOBER. L, MULLER. G, MALOT. M,** « An attempt to the understanding on the mechanism of film formation of a bituminous emulsion on mineral substrate », Eurasphalt-Eurobitume congress, Barcelone 2000.
- [36] **LEOBER. L, HERITIER. B, JOLIVET. Y,** « Rupture des émulsions, une nouvelle voie pour contrôler la formulation du film de liant », Revue Générale des Routes et Aéroports (RGRA) N° 787, Septembre 2000, p 18-21.
- [37] **LEOBER. L, MULEXANDRE. G, MALOT. M,** Journal of Microscopy, Vol.198 Ptl, April 2000, p 10-16.
- [38] **MAHE DE LA VILLEGLE. B, BERTAUD. M** « Nouveaux développements d'enrobés à froid améliorés. » CME 97, Bordeaux.
- [39] **MEDDAD. D,** « Utilisation des émulsions dans les techniques routières en Algérie », congrès national de l'émulsion, 2002.
- [40] **Mode opératoire LCPC,** « Emulsion de bitume », Dunod, Paris, 1970.
- [41] **Modes opératoires LCPC,** « bitumes et bitumes fluxés, Dunod », Paris 1970.
- [42] **MOUTIER. F,** « Mélanges hydrocarbonés à l'émulsion. Etude de départ de l'eau à l'aide de la presse à cisaillement giratoire », Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et chaussées N°90 Août 1977, p 61-70.
- [43] **Norme Afnor,** NF P98-150, Matériaux coulés à froid.

- [44] **POIRIER. J.E, RAMOND. G**, « Les émulsions de bitume et leurs applications routières. », Journées d'étude, Mars 1992.
- [45] **PORE. J**, « Emulsions, microémulsions, émulsions multiples. », Editions techniques des industries des corps gras.
- [46] **POTTI. J.J, LE BOURLLOT. F**, « Emulsions bitumineuses : évolution et progrès », Revue Générale des Routes et Aérodrômes (RGRA), Mai 1994.
- [47] **RAMOND. G**, « Les moyennes de distribution, application aux émulsions de bitume », Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et chaussée N° 21, avril 1965, p 6-12.
- [48] **RAMOND. G**, « Les émulsion de bitume », Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et chaussée, Spécial W, 1974.
- [49] **RAMOND. G, GIGER. J**, « Influence de divers paramètres de fabrication sur la qualité des émulsions cationiques », Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et chaussée N°30, 1968, p 119-128 .
- [50] **RAPPORT DE L'ORGANISME NATIONAL LCTP**,«Réhabilitation de la RN30-Tizi Ouazou, Mai 2001.
- [51] **RAPPORT DU LABORATOIRE REGIONAL DES PONTS ET CHAUSSEES DE CLERMONT FERRAND**, «Formulation de grave émulsion R'MADA», Mars 1998.
- [52] **SAMANOS. J**, « Contribution à la modélisation du comportement mécanique des graves-émulsion », Congrès Mondial des Emulsions, 1997.
- [53] **SERFASS. J.P**, « Axes de progrès pour les enrobés à froid », Revue Générale des Routes et Aérodrômes (RGRA), décembre 1997.
- [54] **SERFASS. J.P, BENSE. P, BERTAUD. M**, « Une nouvelle approche des enrobés à froid : le double enrobage », Revue Générale des Routes et Aérodrômes (RGRA), décembre 1992.
- [55] **SERFASS. J.P, BERTAUD. M, MAHE DE LA VILLEGLE. B**, « Une nouvelle génération d'enrobés à froid », Eurobitume, Stockholm, juin 1993.
- [56] **SERFASS. J.P, JOLY. A, MAHE DE LA VILLEGLE.** « Expérimentation d'enrobés à froid au manège de fatigue » Revue Générale des Routes et Aérodrômes (RGRA), novembre 1995.
- [57] **SERFASS. J.P, JOLY. A**, « Emulsions modifiées par incorporation d'un système réactif », deuxième congrès mondial de l'émulsion, France, 1997.
- [58] **SERFASS. J.P**, « Avantages, particularités et systèmes des enrobés à l'émulsion », Revue Générale des Routes et Aérodrômes (RGRA) N° 802, Janvier 2002, p 60.

- [59] **SERVICE D'ETUDE TECHNIQUES DES ROUTES ET AUTOROUTES (SETRA)**, « Directive pour la réalisation des assises de chaussée en graves-émulsion.
- [60] **SETRA-LCPC**, directive pour la réalisation des couches de surface des chaussées en béton bitumineux, à paraître.
- [61] **SYNDICAT DES FABRICANTS D'EMULSIONS ROUTIERES DE BITUME SFERB**, « Emulsion de bitume, généralités, applications », paris, 1998.
- [62] **VERZARO. F, VERLHAC. P**, « Méthode de titrage pour la détermination de la concentration en tensioactif libre dans la phase aqueuse d'une émulsion de bitume », Revue Générale des Routes et Aéroports (RGRA) N) 796, Juin 2001.
- [63] **VOGT. J.C**, Thèse de doctorat, Université de paris, 1965.
- [64] **ZIZI. Z**, « Le système bitume-eau-solides minéraux, comportement physique et chimique, conséquences sur les propriétés mécaniques des enrobés », Thèse de doctorat, université Montpellier II, France, 1996.
- [65] **ZIZI. Z, OULAHNA. D, MELON. M**, « le système "émulsions-solides divisés siliceux", la rupture physique de l'émulsion », bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et chaussés, Février 1997.
- [66] **ZIZI. Z, PASTOR. M, BENHASSAINE. A**, « Linfluence des fines sur la rupture de l'émulsion et l'enrobage dans les enrobés à froid », deuxieme congrès mondial de l'émulsion, France, 1997.
- [67] **ZUMER. M**, modes opératoires d'essais sur les émulsions, rapport interne, 1969.

