



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

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

Ecole Nationale
Polytechnique

2/01

Département
GENIE CIVIL

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتشبية
BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention d'un Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil

Thème

SABLE BITUME

ETUDE COMPARATIVE À FROID & À CHAUD

Proposé & dirigé par :

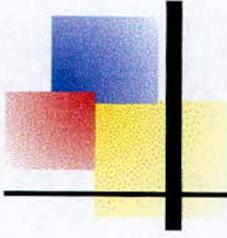
Mme R. KETTAB

Etudie par :

Amar Salim BOUKHALKHAL
Khadir BOUKHALFA

Promotion
2001

E.N.P 10, Avenue Hassan Badi, EL HARRACH, ALGER
Tél. (021) 52.53.01/03 Fax. (021) 52.29.73 E-mail : ENP@IST.CERIST.DZ



Dédicace

Je dédie ce travail :

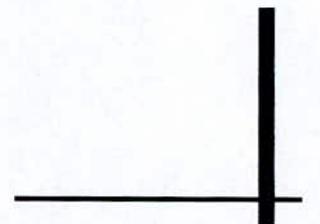
A mes très chers parents

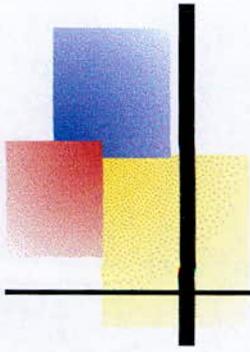
A mes sœurs

A mes frères

A tous mes amis

Khadir





Dédicace

Je dédie ce travail :

A mon père

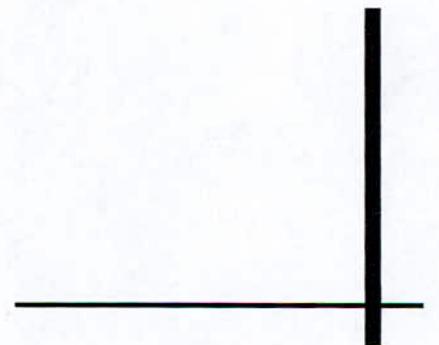
A ma mère

A mes frères

A mes sœurs

A tout mes amis

AMAR SALIM



Remerciements

On remercie Dieu, tout puissant de nous avoir donné le courage et la capacité d'arriver à ce stade du savoir et de présenter ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de notre projet nous citons en particulier notre promotrice *Mme KETTAB*.

Nous remercions également tout le personnel de *SONATRO* et du *L.C.T.P* en particulier, *M. BEDRICI* et *M. BOUKERROU*.

Nous ne manquerons pas d'exprimer aussi toute notre gratitude et reconnaissance à nos amis.

Nos remerciement vont aussi aux *Lamine* et *Abd El Rahman* qui ont participé dans ce travail.

TABLE DES MATIÈRES



LISTE DES FIGURES
LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION

2

CHAPITRE I

TECHNIQUE ROUTIÈRE SAHARIENNE

I.1. L'ENVIRONNEMENT SAHARIEN.....	5
I.1.1. LE CLIMAT SAHARIEN.....	5
I.1.2. LE SOL SAHARIEN.....	6
I.2. PARTICULARITES DE LA TECHNIQUE ROUTIERE AU SAHARA.....	6
I.2.1. HISTORIQUE.....	6
I.2.2. GENESE DE LA TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE.....	7
I.2.3. DEFINITION DE LA TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE.....	8
I.2.3.1. LES IDEES GENERALES.....	8
I.2.3.1.1. LE TRAFIC.....	8
I.2.3.1.2. LE CLIMAT.....	8
I.2.3.2. PRINCIPES DE LA TECHNIQUE.....	9
I.2.4. LES FACTEURS INTERVENANT DANS LA STRUCTURE D'UNE CHAUSSEE AU SAHARA.....	10
I.2.4.1. FACTEUR CLIMATIQUE.....	10
I.2.4.1.1. TEMPERATURE.....	10
I.2.4.1.2. PLUVIOMETRIE.....	11
I.2.4.1.3. HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR.....	11
I.2.4.1.4. INSOLATION.....	11
I.2.4.1.5. EVAPORATION.....	11
I.2.4.2. FACTEUR DU MILIEU NATUREL.....	11
I.2.4.3. FACTEUR DU TRAFIC.....	12

CHAPITRE II

LES LIANTS HYDROCARBONÉS

II.1. INTRODUCTION.....	14
II.2. DEFINITIONS.....	14
II.2.1. BITUME.....	14
II.2.2. GOUDRON.....	14
II.3. ORIGINE DES BITUMES.....	15
II.3.1. BITUMES NATURELS.....	15
II.3.2. BITUMES ARTIFICIELS.....	15



II.4. LES CARACTERISTIQUES DU BITUME..... 16

 II.4.1. LA CONSISTANCE..... 17

 II.4.2. ADHESION ET COHESION..... 18

 II.4.2.1. LE MOUILLAGE..... 18

 II.4.2.2. DESENROBAGE..... 20

 II.4.3. CONSTITUTION CHIMIQUE..... 21

II.5. FORMES D'UTILISATION..... 21

 II.5.1. LE BITUME POUR ENROBAGE A CHAUD..... 21

 II.5.2. BITUMES FLUXES OU FLUIDIFIES..... 22

 II.5.3. LES EMULSIONS..... 22

 II.5.3.1. FABRICATIONS DES EMULSIONS..... 23

 II.5.3.2. LES EMULSIONS ROUTIERES DE BITUME..... 23

II.6. LE GOUDRON..... 24

Chapitre III **Utilisation Des CUT BACKS ET DES EMULSIONS DANS LE DOMAINE DES ROUTES**

III.1. INTRODUCTION..... 26

III.2. CUT BACKS..... 26

 III.2.1 DEFINITION..... 26

 III.2.2. FABRICATION DES CUT BACKS..... 27

 III.2.3. DOMAINE D'APPLICATION DES CUT BACKS..... 28

 III.2.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS..... 29

III.3. EMULSION..... 29

 III.3.1. DEFINITION..... 29

 III.3.1.1. L'EMULSION DE BITUME..... 29

 III.3.1.2. EMULSION DIRECTE ET INVERSE..... 30

 III.3.1.3. FABRICATION DES EMULSIONS..... 30

 III.3.2. DOMAINE D'APPLICATION DES EMULSIONS..... 30

III.4. AVANTAGE ECONOMIQUE..... 31

III.5. CONCLUSION GENERALE..... 32

Chapitre IV **LES ENROBES HYDROCARBONÉS**

IV.1. DIFINITION..... 34

IV.2. CLASSIFICATION GENERALE DES ENROBES HYDROCARBONES..... 34

 IV.2.1. D'APRES LE MODE DE FABRICATION..... 34

 IV.2.2. D'APRES LA COMPACTE..... 34

 IV.2.3. BETON BITUMINEUX COULE..... 35

IV.3. UTILISATION DES ENROBES BITUMINEUX.....	36
IV.3.1. EN TECHNIQUE ROUTIERE.....	36
IV.3.2. DANS LES TRAVAUX HYDRAULIQUE.....	37
IV.4. QUALITES EXIGES D'UN ENROBE.....	37
IV.4.1. LA STABILITE.....	37
IV.4.2. LA FLEXIBILITE.....	37
IV.4.3. L'ABSENCE DE SENSIBILITÉ A L'EAU.....	38
IV.5. ESSAIS SUR LES ENROBES.....	38
IV.5.1. L'ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE L.C.P.C.....	38
IV.5.2. ESSAI MARSHALL.....	39
IV.5.3. ESSAI DURIEZ.....	39
IV.5.4. ESSAI HUBBARD FIELD.....	39
IV.5.5. ESSAI HVEEM.....	40
IV.5.6. ESSAI D'ORNIERAGE.....	40



CHAPITRE V

LES ENROBÉS À FROID

V.1. INTRODUCTION.....	42
V.2. DEFINITION.....	42
V.3. DOMAINES D'UTILISATION.....	43
V.4. LES ENROBES A FROID AU BITUME FLUIDIFIE (CUT BACK).....	43
V.4.1. LES CUT BACKS.....	43
V.4.2. LES ENROBES A FROID AU CUT BACK.....	44
V.5. LES ENROBES A FROID A EMULSION.....	44
V.5.1. EMULSIONS DE BITUME.....	44
V.5.2. ENROBE A FROID A L'EMULSION.....	45
V.6. FORMULATION D'ENROBE A FROID.....	46
V.7. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES ENROBES A FROID.....	47

CHAPITRE VI

SABLE BITUME

VI.1. INTRODUCTION.....	49
VI.2. DEFINITION.....	49
VI.3. SPECIFICATION ET RECOMMANDATIONS.....	50
VI.3.1. SPECIFICATION POUR LES SABLES BITUMES A CHAUD (BITUME 40/500).....	50
VI.3.2. RECOMMANDATIONS.....	51

VI.3.2.1. EPAISSEURS.....	51
VI.3.2.2. CARACTERISTIQUES DES SABLES BITUMES.....	51
VI.4. LES SABLES TRAITES AU BITUME POUR COUCHES DE ROULEMENT.....	52
VI.4.1. LE SABLAGE.....	52
VI.4.2. CONSTITUANT D'UN ENROBE 0/D.....	52
VI.4.3. MATERIAU PRINCIPAL.....	52

Chapitre VII

FORMULATION du Sable Bitume

VII.1. INTRODUCTION.....	55
VII.2. RAPPELS THEORIQUES.....	55
VII.2.1. DETERMINATION DE LA TENEUR EN LIANT.....	55
VII.2.2. CALCUL DE LA COMPACTE DES EPROUVETTES.....	56
VII.3. NOTION DE STABILITE.....	56
VII.4. PROGRAMME DE L'EXPERIMENTATION.....	57
VII.5. ESSAIS EFFECTUES EN LABORATOIRE.....	57
VII.6. PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISES.....	58
VII.6.1. LES LIANTS.....	58
VII.6.2. LES SABLES.....	59
VII.7. PREMIERE SERIE D'ESSAIS.....	65
VII.8. POURCENTAGE DE LIANT UTILISE DANS LES MELANGES.....	68
VII.9. DEUXIEME SERIE D'ESSAI.....	68
VII.10. TROISIEME SERIE D'ESSAI.....	74
VII.11. INFLUENCE DU DOSAGE EN FINES.....	80
VII.12. COMPARAISON ENTRE SABLE BITUME A FROID ET A CHAUD.....	82
Conclusion	87

Bibliographie

ANNEXES

LISTE des FIGURES

N°	Titre	Page
II.1	Les caractéristiques du bitume (adhésivité et cohésion).	16
II.2	Les variations de consistance du bitume	17
II.3	Contact granulat liant (à séc).	18
II.4	Contact granulat liant (En présence d'eau).	19
III.1	Caractéristiques des solvants pétroliers.	27
III.1	Constitution des cut backs selon le viscosimètre STV.	27
III.2	Caractéristiques des cut backs courants à séchage moyen (M.C)	28
VII.1	Courbe granulométrique du sable de dunes de Hassi Berkine.	60
VII.2	Courbe granulométrique du sable concassé de Haoud El Hamra.	62
VII.3	Courbe granulométrique du sable gypseux.	64
VII.4	Influence de la teneur en cut back sur la stabilité Hubbard Field (100 % sable de dunes).	66
VII.5	Influence de la teneur en cut back sur la compacité (100 % sable de dunes).	66
VII.6	Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité Hubbard Field de l'enrobage à froid.	69
VII.7	Influence de la teneur en sable concassé sur la compacité de l'enrobé à froid.	69
VII.8	Influence de la teneur en sable gypseux sur la stabilité Hubbard Field de l'enrobé à froid.	72
VII.9	Influence de la teneur en sable gypseux sur la compacité de l'enrobé à froid.	72
VII.10	Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité Hubbard Field sur le sable bitume enrobé à chaud.	75
VII.11	Influence de la teneur en sable concassé sur la compacité sur le sable bitume enrobé à chaud.	75
VII.12	Influence de la teneur en sable gypseux sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100).	78
VII.13	Influence de la teneur en sable gypseux sur la compacité (bitume 80/100).	78
VII.14	Influence de la teneur en fines sur la stabilité pour le sable bitume enrobé à froid.	80
VII.15	Influence de la teneur en fines sur la stabilité pour le sable bitume enrobé à froid.	80
VII.16	Comparaison entre la stabilité de sable bitume enrobé à froid et enrobé à chaud (sable de dunes + sable concassé à 18 °C).	82
VII.17	Comparaison entre la stabilité de sable bitume enrobé à froid et enrobé à chaud (sable de dunes + sable concassé à 60 °C).	82
VII.18	Comparaison entre la stabilité de sable bitume enrobé à froid et enrobé à chaud (sable de dunes + sable gypseux à 18 °C).	83
VII.19	Comparaison entre la stabilité de sable bitume enrobé à froid et enrobé à chaud (sable de dunes + sable gypseux à 60 °C).	83
VII.20	Comparaison entre la compacité de sable bitume enrobé à froid et à chaud (sable de dunes + sable concassé).	84
VII.21	Comparaison entre la compacité de sable bitume enrobé à froid et enrobé à chaud (sable de dunes + sable gypseux).	84

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
III.1	Caractéristiques des solvants pétroliers.	27
III.2	Constitution des cut backs selon le viscosimètre S'IV.	27
III.3	Caractéristiques des cut backs courants à séchage moyen (M.C)	28
VI.1	Classification des enrobés hydrocarbonés.	35
V.1	Le dosage en émulsion en suivant la granulométrie des matériaux.	45
VII.1	Caractéristique du cut back 400/600.	58
VII.2	Caractéristique du bitume 80/100.	58
VII.3	Analyse chimique sommaire du sable de dunes.	59
VII.4	Analyse chimique sommaire de sable concassé.	61
VII.5	Analyse chimique sommaire de sable gypseux.	63
VII.6	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le sable de dunes de Hassi Berkine.	65
VII.7	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le mélange (sable de dunes + sable concassé) pour un enrobé à froid.	68
VII.8	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le mélange (sable de dunes + sable gypseux) pour un enrobé à froid.	71
VII.9	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le mélange (sable de dunes + sable concassé) pour un enrobé à chaud.	74
VII.10	Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le mélange (sable de dunes + sable gypseux) pour un enrobé à chaud.	77

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Introduction

INTRODUCTION.



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

La construction routière en milieu saharien est devenue un besoin actuel, urgent et de plus en plus important. Le SAHARA a toujours été les plus démunis à cause de ses conditions difficiles et l'absence totale de ressources naturelles en surface.

La présence de l'homme y est très faible aussi, ce qui a limité les projets de constructions et d'infrastructure de toutes sortes. Mais les hommes commencent à mieux explorer ces régions et à y investir pour une exploitation plus large de ce que nous offre la nature. Dans le SAHARA, plusieurs activités sont nées, dont :

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

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

La technique routière au SAHARA est maintenant très particulière. Elle possède son expérience, ses normes empiriques propres et il paraît intéressant de commencer par retrouver sa genèse.

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

Par contre la couche de roulement en matériaux revient considérablement cher étant donné le coût du transport des constituants de l'enrobé et particulièrement les agrégats, en raison de l'éloignement des sites de concassages ; cette contrainte a poussé les ingénieurs routiers des années 50 et 60 à essayer d'utiliser à la place des agrégats

concassés, le sable éolien courant de vastes contrées du Nord de reg oriental ou dans la mesure du possible des sables alluvionnaires qui se trouvent sur les anciens lits d'oued.

Ainsi, la technique de sable bitume en couche de roulement a vu le jour à l'occasion de la réalisation des premiers tronçons de la RN 3 et la RN 48 au Nord du SAHARA ensuite cela a été généralisé à l'ensemble du réseau routier d'EL OUED, TOUGGOURT et OUARGLA sur plusieurs centaines de kilomètres.

Depuis un certain temps une tendance de réhabilitation de la technique du sable bitume se dégage avec le lancement de grands chantiers de renforcement et modernisation du réseau principal compte tenu des restrictions financières dues à la conjoncture économique actuelle, et on espère que son utilisation de nouveau permet de réduire le prix de revient des routes tout en étant techniquement valable.

C'est dans ce cadre là que s'inscrit notre travail de recherche sur le sable bitume enrobé à froid dans un premier temps en utilisant un cut back (éviter des distances de transport importantes à partir d'installations fixe minimiser le coût ; séchage des granulats et chauffage du liant ; protéger l'environnement contre la pollution) et ensuite en gardant le même squelette un enrobé à chaud.

Pour cela nous avons utilisé le sable de dunes de Hassi Berkine en faisant varier les apports (sable concassé de Haoud El Hamra et sable gypseux) ainsi que leur pourcentage et nous avons étudié les performances de chaque composition de chaque enrobé en utilisant l'essai HUBBARD FIELD qui permet d'évaluer la stabilité des matériaux enrobés fins et choisir la meilleure formulation.

Chapitre 1

**Technique
Routière
Saharienne**

I. TECHNIQUE ROUTIÈRE SAHARIENNE

I.1. L'ENVIRONNEMENT SAHARIEN.

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

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

I.1.1. LE CLIMAT SAHARIEN.

- **L'aridité.**

L'aridité est un aspect du climat mondial dépendant de particularités bien établies de la circulation atmosphérique générale. C'est un régime quasi stable et qui ne peut être modifié d'une manière significative à l'échelle l'une vie humaine. On estime qu'une variation climatique périodique ou apériodique importante, due aux changements de l'insolation, a besoin de 10 000 ans à un million d'années pour produire des effets durables.

- **Température.**

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

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

- **Les vents.**

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

- **La pluviosité.**

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

I.1.2. LE SOL SAHARIEN.

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

- **Les sables.**

Que l'on trouve généralement dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions.

Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable.

- **Les argiles.**

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

- **Les limons.**

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

- **Les roches.**

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

- **Les éboulis.**

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

I.2. PARTICULARITES DE LA TECHNIQUE ROUTIERE AU SAHARA.

I.2.1. HISTORIQUE.

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

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

Dans le cadre de la politique générale de développement de l'ALGERIE et en vue de prospection pétrolière, la transformation, de pénétration, en routes des trois axes nord-sud traditionnels a été engagée à cette époque :

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

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

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

I.2.2. GENESE DE LA TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE.

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

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

Les différentes parties de chaussées étant à l'image d'Europe de bas en haut :

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

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

Du fait de la grande monotonie de la géologie et de la géographie saharienne, les matériaux traditionnels utilisés en corps de chaussées ne sont pas disponibles. Les matériaux disponibles dans ces vastes zones sont de types restreints. En effet, ces régions sont complètement dépourvues de cailloux et de graviers.

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

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

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

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

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

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

I.2.3. DEFINITION DE LA TECHNIQUE ROUTIERE SAHARIENNE.

I.2.3.1. LES IDEES GENERALES.

I.2.3.1.1. LE TRAFIC.

Le trafic saharien est essentiellement composé de camions gros porteurs souvent en surcharge. Le nombre d'essieux qui circulent annuellement est faible, mais ceux-ci sont pour la plupart très lourds. En effet, ils imposent une chaussée qui accepte, sans désordre, des déformations élastiques très élevées. Les déflexions sous les pneus peuvent être grandes mais doivent être entièrement réversibles et ne doivent pas laisser de trace de déformation permanente. Les phénomènes de fatigue doivent apparaître lentement. La solution qui consiste à adopter des chaussées peu déformables est très onéreuse, étant donné l'importance des charges, et ne sera justifiée économiquement.

I.2.3.1.2. LE CLIMAT.

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

Cette dernière permet de définir la pluviométrie par des moyennes sur 25 ans, dans des régions sahariennes, qui moins de 50 mm et plus souvent moins de 20 mm. Ces

quelques pluies annuelles tombent presque toujours en précipitations relativement importantes pendant un temps très court.

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

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

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

I.2.3.2. PRINCIPES DE LA TECHNIQUE.

Les conséquences pratiques de ces idées générales ci-dessous sont :

1. La couche de roulement cohérente qui est placée en surface de la chaussée doit être suffisamment souple pour se plier sans se rompre. Cette condition exclut les couches épaisses denses. En effet, considérant la couche comme une poutre fléchie lors d'une déformation, les contraintes sont proportionnelles à l'épaisseur. Cette couche est formée soit par des enrobés souples en couche la plus mince possible, soit par l'enduit superficiel ;

En effet, ces revêtements doivent avoir l'épaisseur minimale suffisante pour résister aux efforts tangentiels importants appliqués par des essieux lourdement chargés ;

2. Le matériau de la couche de base doit pouvoir supporter des déformations élastiques sans dommage, qui peuvent être relativement importantes à la seule condition qu'elles soient entièrement réversibles (comme dans toutes les techniques routières, aucune déformation permanente ne peut être tolérée). Cette condition, la seule imposée est beaucoup moins rigoureuse que la précédente et permet d'utiliser de nombreux types de matériaux ;
3. La sécheresse ouvre beaucoup l'éventail des matériaux utilisables notamment en couche de base. Sous un climat humide, il n'est possible d'utiliser que les matériaux à angle de frottement important car, sauf cas tout à fait exceptionnel, les matériaux cohérents contiennent beaucoup d'éléments très fins qui font perdre frottement et cohésion en présence d'eau. La cohésion des sols est en général obtenue par la présence d'argile, mais de quand celle-ci est humide elle sert de support et maintient l'eau sur les points de contact entre les grains qu'elles lubrifient parfaitement. Par contre, les matériaux ne risquent pas d'être imbibés d'eau, leur résistance aux efforts appliqués peut être obtenue soit par frottement entre grains, soit par cohésion, c'est à dire une liaison plus ou moins rigide entre grains. Ces liaisons peuvent être obtenues par présence d'argiles ou d'éléments fins gypseux ;

4. L'épaisseur de la couche de base peut être faible, il suffit qu'elle répartisse suffisamment les pressions sur le sol de fondation pour que celui-ci ne subisse pas de déformation permanente. Le sol de fondation étant généralement sec, sa portance est en général bonne ;
5. La possibilité d'utiliser des matériaux cohérents plus ou moins argileux en couche de base impose de s'assurer du bon écoulement des eaux de pluies. La sécurité demande que le bombement de la route ne soit pas très faible, 2 à 3 % paraissent raisonnables pour ne pas avoir de flaques d'eau même après de petites déformations inévitables.

I.2.4. LES FACTEURS INTERVENANT DANS LA STRUCTURE D'UNE CHAUSSEE AU SAHARA.

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

I.2.4.1. FACTEUR CLIMATIQUE.

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

I.2.4.1.1. TEMPERATURE.

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

La période sèche, qui dure presque la totalité de l'année a un effet sur l'état et le comportement des chaussées, qui sont :

- Les températures réagissent directement sur les vitesses des réactions chimiques qui se déroulent dans certains matériaux routiers ;
- Les fluctuations de températures se traduisent par des variations des modules de déformations des matériaux des couches de revêtement bitumineux provoquant surtout des ressuyages sous l'effet des températures élevées ;
- Les variations de températures ont une influence sur le choix du liant et des formulations des matériaux enrobés aux liants ;
- Les précipitations sont très faibles (inférieures à 80 mm/an), ce qui favorise la bonne tenue de la chaussée, et permet l'emploi des matériaux sensibles à l'eau sans traitement ;
- Les températures sont très élevées en été l'insolation est importante ; cela soumet la couche de surface d'une chaussée à une agression thermique contraignante influençant sur le comportement des couches de roulement bitumineuses.

I.2.4.1.2. PLUVIOMETRIE.

Les périodes humides sont assez courantes durant l'année ; les précipitations sont rares et de courte durée ; les précipitations annuelles dans tout le Sahara n'accèdent pas 80 mm/an alors qu'elles atteignent 243 à 248 mm/an sur les hauts plateaux et arrivent jusqu'à 566 à 770 mm/an sur les régions littorales.

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

I.2.4.1.3. HUMIDITE RELATIVE DE L'AIR.

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

- Humide : zone littorale ;
- Sub-humide : les hauts plateaux (Semi-aride) ;
- Aride : le Sahara.

En effet, la vapeur d'eau contenue dans l'air peut se condenser sous le revêtement, imperméable. Ce qui fait que les teneurs en eau en axe de la chaussée soient supérieures à celles de rive.

I.2.4.1.4. INSOLATION.

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

I.2.4.1.5. EVAPORATION.

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

I.2.4.2. FACTEUR DU MILIEU NATUREL.

En zone saharienne, des régions sont formées par les hamadas, sebkha, erg, plaine alluvionnaire. Les matériaux de chaussée proviennent des surfaces du sol même des zones traversées par l'ouvrage malgré la diversité géologique et minéralogique de ces matériaux. Certains matériaux sont de formation calcaire d'autres gypso-calcaire ...etc.

Dans les conditions climatiques désertiques, les cycles humidité sécheresse ont pour conséquence des phénomènes de prise des matériaux calcaires et gypso-calcaires qui sont très répandus dans la nature, sous diverses formes.

I.2.4.3. FACTEUR DU TRAFIC.

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

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

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

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

Chapitre 2

Les

Liants

Hydrocarbonés

II. LES LIANTS HYDROCARBONÉS

II.1. INTRODUCTION.

Les liants hydrocarbonés ne sont certes pas une création de la civilisation moderne : leur premier usage remonte à la Mésopotamie (3800 avant J.-C.), comme liant pour la construction de réservoirs, canaux et piscines, leur premier usage routier remonte au milieu du XIX^e siècle (en utilisant des roches asphaltiques), dans la région Rhône-Alpes. Cependant depuis cette époque, la qualité de ces liants a considérablement évolué.

II.2. DEFINITIONS.

II.2.1. BITUME.

Le bitume est un corps noir ou brun, solide ou semi-solide à température ambiante, constitué de molécules hydrocarbonées et qui, soit existe dans la nature, soit résulte de la distillation fractionnée d'un pétrole brut.

En fait, dans les deux cas, il y a eu distillation fractionnée d'un pétrole brut, dans le premier cas (bitume « naturel »), elle s'est accomplie naturellement au cours des temps géologiques, dans le deuxième cas, elle est effectuée volontairement par l'homme, beaucoup plus rapidement dans les raffineries.

II.2.2. GOUDRON.

- Le goudron n'existe pas à l'état naturel, car il est le produit d'une réaction chimique. C'est le résultat d'une distillation destructive ou pyrogénéation d'un certain nombre de substances organiques (houille, bois, sucre, coton...);
- Le produit ainsi obtenu est un goudron brut qui doit subir des traitements complémentaires avant d'être un goudron routier.

On distingue :

- Les goudrons purs, sans ajouts ;
- Les goudrons modifiés comportant des substances le plus souvent macromoléculaires autres que fines minérales ou additifs d'adhésivité. Il comprend les goudrons-vinyles et le goudron-styrène ;
- Les goudrons composés comportant plus de 50 % de goudron et du bitume pur.

II.3. ORIGINE DES BITUMES.

II.3.1. BITUMES NATURELS.

Comme nous l'avons dit précédemment, il existe des bitumes naturels, qui sont en fait des pétroles bruts, complètement dépourvus de fractions légères et contenant par contre un certain pourcentage de matières minérales.

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

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

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

II.3.2. BITUMES ARTIFICIELS.

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

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

Le pourcentage de bitume peut varier de très grandes proportions :

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

GAZ	
CARBURANTS	
GAS-OIL	
FUELS	<ul style="list-style-type: none"> domestiques fluides lourds
BITUME	

En fait, on distingue, dans les pétroles bruts :

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

II.4. LES CARACTERISTIQUES DU BITUME.

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

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

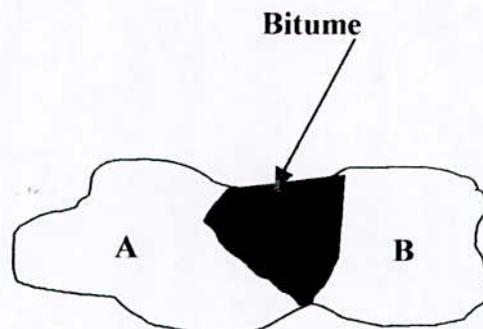


Figure II.1 : Les caractéristiques du bitume (adhésivité et cohésion).

Par exemple, en cas d'importants rejets lors de l'exécution d'un enduit superficiel.

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

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

II.4.1. LA CONSISTANCE.

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

Si on le chauffe, il se ramollit progressivement sans présenter de phénomène de fusion franche.

De même, si on le refroidit, il se durcit jusqu'à devenir aux températures basses ou très basses, un solide très dur et fragile.

Deux domaines de températures sont particulièrement intéressants de regarder :

- Celui des températures de « service » ;
- Celui des températures de « mise en œuvre ».

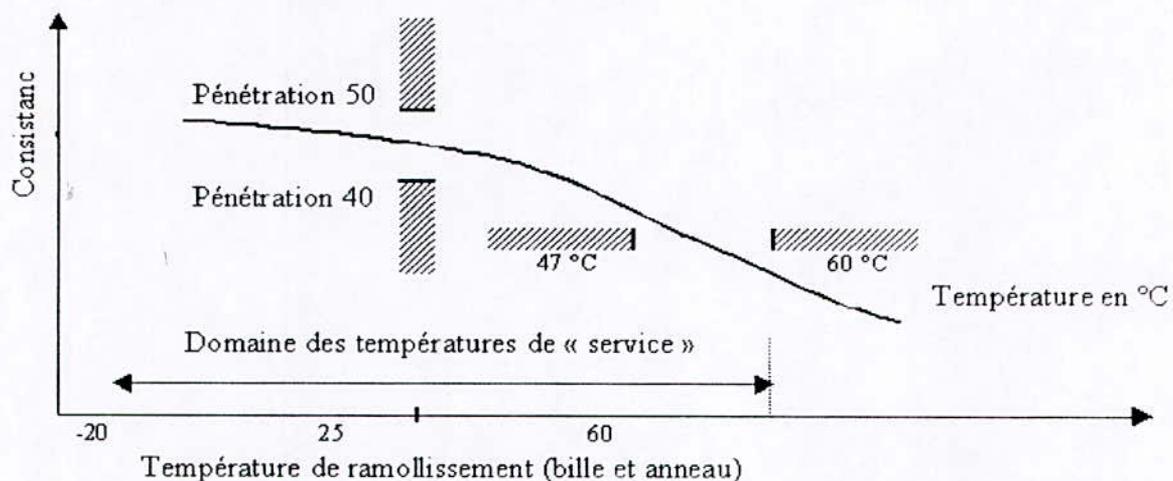


Figure II.2 : Les variations de consistance du bitume.

Pour que le bitume puisse être manipulé par des pompes, à l'intérieur de canalisations relativement fines (rampes de pulvérisation), et pour qu'il puisse enrober des granulats, il faut que sa viscosité soit très notablement abaissée, de façon à être voisine de celle de l'eau.

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

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

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

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

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

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

II.4.2. ADHESION ET COHESION.

L'existence ou le maintien de la liaison bitume-granulat doit s'examiner :

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

II.4.2.1. LE MOUILLAGE.

- **A sec.**

Si l'on considère une goutte de liant à la surface du granulat, les forces en présence sont :

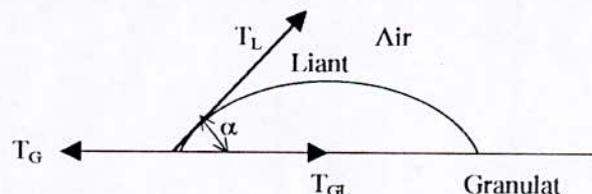


Figure II.3 : Contact granulat liant (à sec).

- T_G : Tension superficielle du granulat.
- T_L : Tension superficielle du liant.
- T_{GL} : Tension interfaciale liant-granulat.
- α : Etant l'angle de mouillage.
- A l'équilibre : $T_G = T_L \cos \alpha + T_{GL}$

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

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

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

- **En présence d'eau.**

C'est le même graphique que précédemment mais avec :

T_{LE} : Tension interfaciale liant-eau.

T_{GE} : Tension interfaciale granulat-eau.

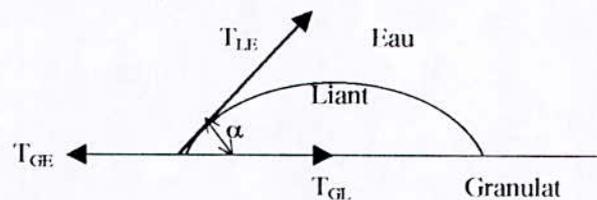


Figure II.4 : Contact granulat liant (En présence d'eau).

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

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

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

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

On distingue :

- Les composés anioniques du type R-C 00, savons d'acides gras (oléates, stéarates, résines de pin...), de métaux lourds ;
- Les composés cationiques : chlorures d'alkyl propylène di-amine, qui seuls conviennent pour les granulats acides.

II.4.2.2. DESENROBAGE.

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

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

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

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

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

Mais il existe des cas, malheureusement, où il se produit :

- Par exemple, le développement du salage hivernal a nettement accru ce risque de désenrobage, en accroissant notablement le temps pendant lequel l'enrobé se trouve attaqué par l'eau (car le verglas, la neige ou la glace, « eaux sèches » ne peuvent désenrober), l'énergie étant fournie par le trafic.

On évoque parfois, comme facilitant ce désenrobage, l'existence de fissures à l'interface liant-gravillons par suite de chocs thermiques et dilatations (ou contractions) différentielles ;

- De même, dans le cas des revêtements sur ouvrages d'art :
 - Il y a présence continue d'eau (l'eau qui a traversé le revêtement toujours plus ou moins perméable, se trouve arrêtée par la chape d'étanchéité) ;
 - Il y a fourniture d'énergie, par suite notamment, de la concentration des contraintes de cisaillement dans la partie inférieure du revêtement (cas d'une couche souple reposant sur une couche rigide).

II.4.3. CONSTITUTION CHIMIQUE.

Le bitume est un matériau extrêmement complexe dont la structure prédominante est naphtheno-aromatique avec de nombreuses chaînes paraffiniques.

On peut fractionner un bitume par des solvants sélectifs et distinguer :

- Les carboïdes, insolubles dans le sulfure de carbone ;
- Les carbènes, solubles dans le sulfure de carbone et insolubles dans l'heptane normale ;
- Les maltènes, solubles dans les trois solvants précédents et que l'on peut décomposer-en :
 - Résines ;
 - Huiles.

En faisant abstraction des carboïdes et des carbènes, on peut représenter le bitume comme une dispersion des asphaltènes dans les huiles, les résines jouant le rôle d'agent peptisant.

II.5. FORMES D'UTILISATION.

L'utilisation d'un liant hydrocarboné n'est possible que s'il possède une fluidité suffisante :

- Pour être pompable, il faut une viscosité de l'ordre de 1 000 à 1 500 centistokes ;
- Pour qu'il puisse mouiller un granulat, il faut une viscosité de 100 à 200 centistokes ;
- Pour qu'il puisse être répandu, il faut une viscosité de 40 à 100 centistokes.

II.5.1. LE BITUME POUR ENROBAGE A CHAUD.

Il s'agit de bitume pur et tout ce que nous avons dit précédemment lui est applicable. Il y a dix ou quinze ans, le problème principal était celui de reprofilage des chaussées trop déformées, l'objectif étant de leur rendre un état de surface convenable, sans se soucier de limiter leur déformabilité, on utilisait donc essentiellement des bitumes mous, le risque principal de dégradations étant la fissuration en hiver et au printemps.

A l'heure actuelle, le problème prioritaire est celui du « renforcement » des chaussées anciennes, ou de la construction de chaussée neuve convenablement dimensionnée. Le risque principal de dégradations est alors celui d'excessives déformations en été (fluage,orniérage).

Actuellement, certaines sociétés pétrolières proposent des bitumes spéciaux dits « à faible susceptibilité thermique » qui permettent de fabriquer des enrobés résistants à de

fortes températures sans déformation plastique excessive, tout en n'étant pas plus rigides aux basses températures.

II.5.2. BITUMES FLUXES OU FLUIDIFIÉS.

On distingue :

- Le bitume fluidifié dans lequel le fluxant est d'origine pétrolière (anciennement dénommé cut-back) ;
- Le bitume fluxé dans lequel le fluxant est d'origine houillère (anciennement dénommé cut-back mixte).

Tous deux sont utilisés essentiellement pour les enduits superficiels.

Le problème est celui d'un choix correct du fluxant compte tenu des conditions climatiques car, sauf certaines fractions lourdes dans le cas des bitumes fluxés qui sont à considérer comme des plastifiants, tout le fluxant doit s'évaporer dans un délai raisonnable :

- Ni trop court, ce qui conduirait à de mauvaises mises en œuvre ;
- Ni trop long, ce qui donnerait un comportement non convenable au début de la mise en service.

Leur faible viscosité, au moment de la mise en œuvre (tant que l'évaporation du fluxant n'est pas totale), les rend très susceptibles au désenrobage en cas de conditions météorologiques défavorables, lors de la mise en œuvre ou immédiatement après. Ils doivent dans être toujours utilisés dopés ; cependant, dans le cas des bitumes fluxés, l'huile de houille joue dans une certaine mesure, un rôle analogue aux dopes.

II.5.3. LES EMULSIONS.

Une émulsion est une dispersion intime de deux liquides insolubles l'un dans l'autre, constituant de phases séparées :

- D'une part, la phase dispersée ;
- D'autre part, la phase dispersante.

II.5.3.1. FABRICATIONS DES EMULSIONS.

Pour fabriquer une émulsion, il faut :

1. Une énergie de dispersion, fournie par des appareils allant du simple agitateur jusqu'à l'homogénéiseur dont les pales, tournant à grande vitesse (3 000 trs/min), forcent les composants à traverser un ou deux entrefers, de quelques dixièmes de millimètres, également mobiles, en passant par des turbines pour des systèmes de vibration appropriés ;
2. Un émulsifiant qui joue un double rôle :
 - Faciliter l'émulsification en abaissant la tension interfaciale entre les deux phases (TLE en l'occurrence) ;
 - Stabilise le produit en se fixant à la périphérie des globules dispersées, empêchant ainsi le rapprochement des globules (coalescence), et amorce la rupture de l'émulsion.

II.5.3.2. LES EMULSIONS ROUTIERES DE BITUME.

Ce sont en général des émulsions dites directes (ou du type huile dans l'eau), constituées par une dispersion de globules de bitume dans l'eau.

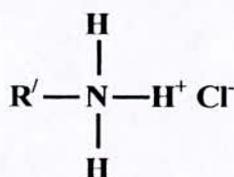
On distingue les émulsions anioniques qui tirent leur nom du fait que lorsqu'on plonge deux électrodes, les globules de bitume se dirigent vers l'anode.

On utilise pour les obtenir un savon alcalin d'acides gras de formule générale :



et les émulsions cationiques (les globules de bitume se dirigent vers la cathode).

On utilise pour les obtenir des savons acides de formule générale :



II.6. LE GOUDRON.

Le goudron routier qui provient de la cokéfaction de la houille, dite « de haute température » est obtenue à une température $> 1\ 000\ ^\circ\text{C}$, favorable à la formation des noyaux aromatiques.

De cette origine le goudron tient une composition chimique notablement différente de celle des bitumes. Il se caractérise :

- Par une teneur importante en hydrocarbures aromatiques mono et polycycliques ;
- Par le fait qu'il contient des composés polaires (phénols et base) pyridiques ;
- Par une quantité notable de carbone libre.

L'on admet généralement que le goudron peut être représenté comme un ensemble de micelles constitué de grains de « carbone libre » entourés de couches de molécules étagées selon leur grosseur et fortement fixées par adsorption, en suspension dans un liquide intermicellaire (houille).

Le comportement général de goudron se trouve voisin de celui qui a été décrit pour le bitume, en notant que le goudron contient un pourcentage notable de houille et se trouve donc correspondre dans la gamme des viscosités et des emplois, aux bitumes fluxés et fluidifiés alors qu'au bitume pur correspond le brai plus ou moins gras.

Cependant la composition chimique particulière du goudron lui communique un certain nombre de particularités :

1. Caractéristiques améliorées d'adhésivité aux granulats ;
2. Susceptibilité thermique plus accentuée (plus fragile à basse température élevée) ;
3. Non solubilité dans les solvants d'origine pétrolière ;
4. Evolution plus importante (évaporation des houilles légères, oxydation, polymérisation) ;
5. Propriétés herbicides et fongicides ;
6. Compatibilité plus forte avec les résines de synthèse permettant ainsi la mise au point de liants spéciaux. La réactivité relativement importante du goudron faisant qu'il n'y a pas simplement co-habitation, mais pratiquement formation de copolymère goudron-résine.

Compte-tenu, d'une part des quantités réciproques produites (plus de 2 000 000 t de bitume, 150 000 t de goudron routier) et d'autre part de ses caractéristiques particulières, le goudron ne se pose pas en liant concurrent du bitume, mais en liant complémentaire susceptible d'apporter des solutions intéressantes à certains problèmes particuliers.

Notons en outre que les mélanges de bitume et de goudron sont possibles et peuvent également apporter des solutions intéressantes.

Chapitre 3

**Utilisation des
Cuts Backs et
des Emulsions
Dans le Domaine
des Routes**

III. UTILISATION DES CUTS BACKS ET DES EMULSIONS DANS LE DOMAINE DES ROUTES.

III.1. INTRODUCTION.

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

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

Il faut reconnaître que cette technique a déjà fait ses preuves durant les années cinquante, mais si aujourd'hui cette dernière a été abandonnée, c'est parce qu'il y a eu l'apparition du bitume, qui a contribué au développement rapide de l'emploi des enrobés bitumineux.

III.2. CUT BACKS.

III.2.1 DEFINITION.

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

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

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

On distingue selon la volatilité :

— **Les Rapid-Curing-(R-C).**

Bitume fluide à l'essence avec les caractéristiques, selon STV
A 25°C 10 mm – 25/75 et 150/250 s.

— **Les Médium-Curing-(M-C).**

Bitume fluide au kérosène, dont la volatilité est du pétrole lampant. Il existe 05 catégories à intervalles respectifs de viscosités.

(STV, 25°C et 10 mm) -0/1, 10/15, 50/100, 150/250, 400/600 s.

— **Les Slow-Curing (S-C).**

Bitume fluidifié au gaz-oil.

III.2.2. FABRICATION DES CUT BACKS.

Les cut backs sont constitués d'un mélange de bitume général de pénétration 200/100 avec du solvant pétrolier ou du pétrole lampant.

Les solvants pétroliers ont les caractéristiques suivantes :

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

Tbleau III.1 : Caractéristiques des solvants pétroliers.

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

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

Tbleau III.2 : Constitution des cut bachs selon le viscosimètre STV.

III.2.3. DOMAINE D'APPLICATION DES CUT BACKS.

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

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

CARACTERISTIQUES	Méthode normalisée de référence	Bitume fluidifiés					
		0 - 1	10 - 15	150 - 250	400 - 600	800 - 1400	
Pseudo-viscosité mesurée au viscosimètre							
- d'orifice 4 mm, à 25 °C	S NF T 66-005	< 30	—	—	—	—	
- d'orifice 4 mm, à 25 °C	S	—	10 à 15	150 à 250	400 à 600	—	
- d'orifice 4 mm, à 25 °C	S	—	—	—	—	80 à 200	
Densité relative à 25 °C (pycnomètre)	NF T 66-007	0,90 à 1,02	0,90 à 1,02	0,92 à 1,04	0,92 à 1,04	0,92 à 1,04	
Distillation fractionnée (résultats exprimés en pourcentage du volume initiale)							
Fraction distillant au-dessous de :							
190 °C	NF T 66-003	< 9	—	—	—	—	
225 °C	%	10 à 27	< 11	< 3	< 2	< 2	
315 °C		30 à 45	16 à 28	6 à 15	5 à 12	3 à 11	
360 °C		< 47	< 32	< 20	< 15	13	
Pénétrabilité à 25 °C, 100 g, 5 s du résidu à 360 °C de la distillation 1/10 mm	NF T 66-004	80 à 250	80 à 250	80 à 200	80 à 200	80 à 200	
Température limite de pompabilité °C	—	20	35	65	70	80	
Nature du solvant		Kérosène					
Pourcentage moyen de solvant	%	—	38	24,5	15	12,5	10

Tableau III.3 : Caractéristiques des cut backs courants à séchage moyen (M.C)

III.2.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS.

Avantages.

- Economie d'investissement ;
- Disponibilité ;
- Enrobés à froid dans les climats chauds ;
- Distances de transport (allant parfois à des dizaines de km) ;
- Commodités d'emploi partiels.

Inconvénient.

- **Sécurité.**

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

- **Adhésivité.**

En présence des granulas mouillés, l'emploi de dope est nécessaire.

III.3. EMULSION.

III.3.1. DEFINITION.

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

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

III.3.1.1. L'EMULSION DE BITUME.

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

Dans l'émulsion de bitume, qui est dispersé, les particules ont un diamètre variant de 1 à 10 microns.

Le liquide qui le reçoit (insoluble dans le bitume, de densité presque égale et de surcroît toujours disponible) est l'eau.

Le bitume constitue la phase dispersée, l'eau qui constitue la phase dispersante, n'est qu'un simple véhicule, alors que dans beaucoup d'émulsions, naturelles ou fabriquées, les deux ont un rôle noble.

III.3.1.2. EMULSION DIRECTE ET INVERSE.

Les émulsions se divisent en 2 groupes, selon les phases :

1. Emulsion directe : (O-W = Oil-Water), bitume ou huile dispersée dans l'eau ;
2. Emulsion inverse : (W-O) = constituées par des globules d'eau dispersées dans le bitume ou huile.

Pour l'émulsion directe, la phase aqueuse est continue ou appelée encore phase interne.

L'émulsion inverse présente une phase aqueuse qui est discontinue ou interne. Selon la polarité, on distingue 2 groupes d'émulsions :

- Les émulsions anioniques ;
- Les émulsions cationiques.

Une émulsion est dite cationique si dans une phase d'électrophorèse, les particules du liquide dispersés se dirigent vers la cathode, elles contiennent des émulsifs qui sont généralement des sels d'amions dit type $(R-NH)^+$ (C1), qui en solution s'ionisent pour donner un anion négatif $(Cl)^-$, et le reste de la molécule devient positif, $(R-NH_3)^+$, et confère aux particules de bitumes une charge électropositive. Selon leur viscosité les émulsions cationiques sont classées en rapide, lent, et sur stabilisée.

III.3.1.3. FABRICATION DES EMULSIONS.

Pour fabriquer une émulsion, il faut une énergie de dispersion et un émulsif¹. Ce procédé consiste essentiellement à faire passer dans une turbine (sorte de pompe centrifuge) un mélange de bitume, d'eau et de produits tensio-actifs.

La turbine disperse le bitume en fines gouttelettes dans l'eau et l'émulsion est alors stockée dans des bacs avant livraison.

III.3.2. DOMAINE D'APPLICATION DES EMULSIONS.

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

Les émulsions les plus couramment employées sont en effet le plus souvent des émulsions directes.

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

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

¹ Type de savon fabriqué par le raffineur (il empêche les sphères de bitume de fusionner)

À la lumière de l'expérience il semble que l'établissement d'une étude technico-économique détaillée sur l'emplois des cut backs est indispensable, afin de promouvoir cette technique (les enrobés à froid).

Emulsion de bitume.

Si on considère que le prix de revient à la tonne d'une émulsion de bitume se situe entre 14 849,06 à 17 070,00 DA TTC selon la nature de l'émulsion, très coûteuse par rapport au bitume pur (enrobé à chaud), il faut qu'on sache faire la différence sur l'emploi de ces liants à travers les chantiers.

Nous ne pensons pas utile de décrire les matériels utilisés qui sont maintenant en général bien connus en Algérie.

À titre d'exemple le dispositif en centrale d'enrobés à chaud consomme pour la fabrication d'une tonne de grave-bitume 3 fois plus qu'une grave-émulsion, en calories de chauffage, en équipement, et en moyens humains.

Afin de promouvoir l'emploi de cette technique, il est souhaitable que les entreprises de réalisation mettent en œuvre un recueil général sur le coût des prix de revient d'un enrobé à froid par rapport à un enrobé à chaud.

III.5. CONCLUSION GENERALE.

La présente réflexion ne peut être considérée comme terminée, car le but recherché par ce modeste travail que nous avons entrepris est d'exploiter au maximum possible la technique des enrobés à froid pour contribuer d'une part à la réduction de la pollution de l'environnement ainsi qu'une considérable énergie.

L'évolution technique est faite pour rechercher l'efficacité maximum avec le plus bas prix de revient possible.

Des études plus poussées sont nécessaires pour développer au maximum cette technique des enrobés à froid.

La recherche constante des solutions économiques adaptées aux conditions locales doit être la seule préoccupation de tous les ingénieurs techniciens spécialisés dans le domaine des routes.

Chapitre 4

**Les Enrobés
Hydrocarbonés**

IV. LES ENROBÉS HYDROCARBONÉS

IV.1. DIFINITION.

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

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

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

IV.2. CLASSIFICATION GENERALE DES ENROBES HYDROCARBONES.

Pour s'y reconnaître à l'intérieur de ce très vaste domaine de compositions et utilisations possibles, on a introduit une classification qui repose sur la granularité et la compacité.

IV.2.1. D'APRES LE MODE DE FABRICATION.

On distingue :

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

IV.2.2. D'APRES LA COMPACITE.

On Distingue :

- Dans le cas des enrobés dans lesquels le calibre des plus gros éléments du squelette minéral est compris entre 6,3 et 20 mm :
 - **Les enrobés denses** : dans lesquels le pourcentage de vide est inférieur à 10 %. A l'intérieur de cette catégorie se placent les bétons bitumineux (ou hydrocarbonés), enrobés denses de haute qualité caractérisés par des spécifications plus sévères en ce qui concerne la qualité des granulats, la viscosité du liant, la courbe granulométrique, les performances mécaniques et le soin apporté à la fabrication ;

- **Les enrobés semi-denses** : dans lesquels le pourcentage des vides est compris entre 10 et 15 % ;
- **Les enrobés ouverts** : dans lesquels le pourcentage des vides est supérieur à 15 %.

La combinaison de cette classification avec celle résultant du mode de fabrication aboutit à une classification résumée par le tableau suivant :

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

Tableau IV.1 : Classification des enrobés hydrocarbonés.

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

On supprime la classification basée sur la compacité. On leur attribue le nom général d'enrobés fins. S'il s'agit d'enrobés fins présentant des caractéristiques de recherche de qualité analogues à celles des bétons bitumineux vis-à-vis des enrobés denses, on leur attribue le nom de «micro-béton bitumineux » (ou hydrocarbonés).

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

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

IV.2.3. BETON BITUMINEUX COULE.

L'apparition d'une cohésion importante, due à la mobilisation des forces de tension superficielle, dans les enrobés bitumineux, implique que l'on soit en présence d'un mélange à 3 phases : granulats, bitume (ou goudron), air.

Si l'on arrive dans un enrobé bitumineux à une compacité de 100 % (ou très voisine) et qu'on se trouve ainsi en présence d'un mélange à 2 phases, le comportement rhéologique du matériau change et devient très proche de celui d'un liquide.

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

Ce comportement de liquide se manifeste à la mise en œuvre : le matériau se met en œuvre sans compactage, mais par coulée, et également dans le comportement ultérieur (aptitude particulière aux grandes déformations plastiques).

Il n'est pas d'usage d'inclure ces matériaux coulés dans les enrobés bitumineux. Ils n'ont d'ailleurs généralement pas d'utilisation routière au sens strict. Sous le nom « asphalte » ils sont utilisés dans les travaux d'étanchéité, pour les revêtements de trottoirs... Par contre le « béton bitumineux coulé » est utilisé pour la construction des chaussées.

Dans ce matériau, le manque de la stabilité résultant du comportement de type « liquide » des matériaux bitumineux pleins, est, dans une certaine mesure compensée par l'utilisation d'un bitume très dur, rigidifié par l'addition massive de filler (aux environ de 20 %) ; la teneur en bitume n'étant que très faiblement majorée (8 % au lieu de 6 %).

IV.3. UTILISATION DES ENROBES BITUMINEUX.

IV.3.1. EN TECHNIQUE ROUTIERE.

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

Pour les enrobés bitumineux utilisés en couche de surface — et tout spécialement en couche de roulement — la conception des enrobés bitumineux doit s'efforcer de répondre le mieux possible au triple problème posé :

- Offrir au roulement des véhicules une surface convenable quant à la sécurité (propriétés antidérapantes) et au confort (uni) ;
- Résister aux sollicitations engendrées par le trafic pour que les qualités précédentes ne soient pas détruites :
 - Sollicitations verticales (poinçonnement, déflexion) ;
 - Sollicitations tangentielles (usure, polissage, fluage, glissement).
- Résister aux sollicitations engendrées par les agents externes, autres que le trafic :
 - Soleil ;
 - Eau ;
 - Gel ;
 - Fondants chimiques (sels de déverglaçage) ;
 - Produits pétroliers.

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

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

IV.3.2. DANS LES TRAVAUX HYDRAULIQUE.

Les enrobés bitumineux sont également très utilisés dans les travaux hydrauliques (revêtements de canaux, digues, barrages...) :

- Soit pour constituer des écrans imperméables. On utilise à cet effet des bétons bitumineux encore nettement plus compacts que les bétons bitumineux routiers. L'étanchéité demandée en ce cas ne peut être obtenue que par des indices de vide inférieurs à 3 % ;
- Soit pour constituer des couches drainantes ou filtrantes. On utilise alors des enrobés à chaud (ouverts ou semi-denses).

IV.4. QUALITES EXIGES D'UN ENROBE.

Les qualités essentielles qui doit être avoir un enrobe sont :

IV.4.1. LA STABILITE.

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

L'insuffisance de stabilité se traduit par un fluage avec formation des dépressions d'ornière et d'ondulations.

La stabilité augmente avec l'angle de frottement interne des granulats et la dureté du liant si bien que la tendance actuelle pour les chaussées à trafic lourd réside dans l'emploi de bétons bitumineux constitués de bitumes durs (du 40/50 par exemple) et granulats durs et anguleux.

IV.4.2. LA FLEXIBILITE.

On entend par flexibilité l'aptitude à admettre sans fissuration, les déformations d'ensemble qui peuvent être imposées à la couche d'enrobés par la déflexion des couches inférieures. L'insuffisance de la flexibilité se manifeste par des fissures du tapis. La flexibilité dépend en premier lieu par la ductilité du liant qui doit demeurer suffisante aux basses températures pendant toute la durée de vie de l'enrobé.

Pour obtenir un enrobé à la fois stable et flexible, il faut donc un liant qui reste visqueux en été sans devenir fragile en hiver et qui de plus résiste bien au vieillissement.

IV.4.3. L'ABSENCE DE SENSIBILITÉ A L'EAU.

Une bonne affinité entre le liant et les granulats peut augmenter par des dopes, et permet de résister au risque de désenrobage des matériaux sous l'action de l'eau. Celle-ci peut d'autre part altérer les éléments fins de l'enrobé ; par conséquent les fillers doivent contenir peu d'argile. Cette dernière réduit considérablement la stabilité d'enrobé humide.

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

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

IV.5. ESSAIS SUR LES ENROBES.

La rhéologie des enrobés hydrocarbonés était mal connue et surtout difficile à prévoir lorsqu'on est en présence des granulats d'une part, et du liant d'autre part, mais l'adoption des méthodes empiriques a donné de bons résultats définissant des enrobés satisfaisant certaines exigences de la pratique.

De ce fait, des recherches toutes récentes s'orientent vers des essais plus spécifiques qui caractérisent parfaitement le comportement des enrobés sur chaussées même à long terme.

Les essais courants sont des essais qui permettent d'estimer un des paramètres caractérisant l'enrobé tel que la stabilité, la cohésion ...etc.

IV.5.1. L'ESSAI DE COMPRESSION SIMPLE L.C.P.C.

Les éprouvettes sont réalisées dans des moules cylindriques de 80 mm de diamètre intérieur et 150 mm de hauteur. Tout le granulat doit passer au tamis à maille carrée de 20 mm. Liant et granulat sont, préalablement au malaxage, portés à 140 °C.

Les éprouvettes sont compactées à la presse, de préférence avec une embase mobile pour avoir une pression appliquée sur les deux faces. La pression de moulage est de 120 kg/cm², elle est appliquée en une minute et maintenue cinq minutes.

On réalise en règle générale 7 éprouvettes pour une même teneur en liant :

1. Pour la mesure de résistance à sec 8 jours ;
2. Pour la mesure de résistance après 8 jours d'immersion ;
3. Pour la mesure de la densité à la balance hydrostatique.

Les éprouvettes sont conservées à 18 °C. celles destinées à la mesure de la résistance à sec sont écrasées à la vitesse de 1 mm/s sous une presse à avancement contrôlé. On note l'effort maximum, converti en résistance exprimée en kg/cm². On note également l'écrasement au moment de la rupture et on appelle indice d'affaissement le rapport de l'écrasement à la hauteur initiale de l'éprouvette.

Les éprouvettes destinées à la mesure de la résistance après immersion subissent les traitements suivants :

1. Conservation à sec durant 24 heures à 18 °C ;
2. Mise dans une cloche à vide pendant 1 heure ;
3. Introduction d'eau dans la cloche jusqu'à recouvrir les éprouvettes de 2 à 3 cm. On maintient le vide durant 2 heures ;
4. on immerge ensuite les éprouvettes dans l'eau à la pression atmosphérique à 18 °C (durant 7 jours) ;
5. Après sortie de la cloche à vide, puis au bout de 2 jours et enfin des 7 jours d'immersion, on pèse et en mesure les dimensions des éprouvettes afin de déterminer l'absorption et le gonflement.

IV.5.2. ESSAI MARSHALL.

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

IV.5.3. ESSAI DURIEZ.

Le but de l'essai Duriez est de caractériser les qualités de résistances mécaniques et de résistance au désenrobage par l'eau, dans le cas de matériaux enrobés classiques, les résultats de l'essai Duriez suffisent à eux à caractériser convenablement la qualité du matériau, dans d'autres cas, on pourra avoir avantage à les compléter par les résultats d'autres essais (Essai Hubbard Field pour les matériaux fins, et l'essai Marshall pour les matériaux à base de granulats ronds ou très anguleux). L'essai Duriez diffère de l'essai Marshall dans la température de l'essai qui est de 18°C au lieu de 60°C, il lui diffère aussi dans le mode d'application de la charge qui est axial alors qu'il était radiale pour l'essai Marshall.

IV.5.4. ESSAI HUBBARD FIELD.

Le but de l'essai est de déterminer la stabilité Hubbard Field, il consiste à mesurer l'effort maximum s'exerçant sur une éprouvette placée sur un appui cylindrique creux d'un diamètre intérieur légèrement inférieur au diamètre extérieur de l'éprouvette. L'essai s'effectue à 60°C aux États unis, et à 18°C en France en écrasant l'éprouvette avant et

après 7 jours dans l'eau. La charge est appliquée à la face supérieure de l'éprouvette à une vitesse de 1 mm/sec, de l'effort maximum durant l'extrusion de l'éprouvette on peut définir la stabilité Hubbard Field.

IV.5.5. ESSAI HVEEM.

Le but de l'essai est de déterminer la teneur en liant requise en bitume d'un enrobé, et d'en vérifier les propriétés mécaniques. Cet essai s'effectue en deux phases successives : essai au stabilomètre et essai au cohesomètre, à noter que cet essai est spécifique aux enrobés contenant bitume semi-dur, émulsion ou au bitume cut-back et aux granulats dont $D \leq 25$ mm.

IV.5.6. ESSAI D'ORNIERAGE.

C'est un essai nouveau qui sert à l'étude des nouvelles formulations, il éclaire les lumières sur :

- La nature du liant (dureté, susceptibilité ...)
- L'angularité des granulats ;
- Le rapport fillers / bitume.

Chapitre 5

**Les Enrobés
à Froid**

V. LES ENROBÉS À FROID

V.1. INTRODUCTION.

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

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

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

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

V.2. DEFINITION.

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

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

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

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

V.3. DOMAINES D'UTILISATION.

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

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

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

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

Les limites d'emploi actuel paraissent être les suivantes :

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

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

V.4.1. LES CUT BACKS.

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

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

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

Les usages de cut backs sont multiples :

- Imprégnation de couche de base compactée. Il faudra un liant fluide afin de pénétrer facilement dans la couche traitée et à séchage lent afin que la pénétration ait le temps de se faire avant que la viscosité ait augmenté ;

- Enduits superficiels : il faudra un cut back à séchage rapide afin que les véhicules n'arrachent pas les gravillons, et plus ou moins visqueux selon les facilités d'exécution qu'on recherche ;
- enrobage : il faudra un cut back moyennement visqueux et à séchage rapide selon la durée de stockage avant emploi.

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

V.4.2. LES ENROBES A FROID AU CUT BACK.

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

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

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

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

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

V.5. LES ENROBES A FROID A EMULSION.

V.5.1. EMULSIONS DE BITUME.

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

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

Le rôle de l'émulsifiant est double :

- Faciliter la fabrication de l'émulsion en abaissant la tension interfaciale bitume-eau ;
- Stabiliser l'émulsion en faisant en sorte que les globules, entourés d'une enveloppe d'ions, se repoussent les uns les autres.

• **Caractéristiques principales des émulsions.**

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

V.5.2. ENROBE A FROID A L'EMULSION.

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

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

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

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

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

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

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

L'aptitude à la rupture d'une émulsion dépend de la nature minérale des matériaux et de la surface spécifique qui varie de façon importante avec le taux de filler, c'est pourquoi une émulsion cationique donnée ne peut prétendre enrober tous les matériaux. Si l'émulsion a une rupture rapide elle enrobera parfaitement les matériaux propres mais par contre elle rompra trop rapidement sur des matériaux à surface spécifique élevée : le liant résiduel s'étalera mal sur les surfaces minérales (surtout si celle-ci présente de nombreuses cavités comme c'est le cas pour les roches éruptives) et le liant aura tendance à former des boulettes avec les matériaux les plus fins.

Si l'émulsion est trop stable la rupture sera incomplète et le liant émulsionné s'écoulera des tas d'enrobés. Après mise enrobée à froid place, le tapis n'aura plus suffisamment de cohésion puisque les pellicules de liant seront trop minces et au bout de quelques semaines ou quelques mois les gravillons se détacheront les uns des autres.

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

V.6. FORMULATION D'ENROBE A FROID.

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

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

Les principales méthodes d'essais existantes pour aide à la formulation d'enrobé à froid sont décrites par l'ISSA. Elles permettent l'évaluation de leur maniabilité et leur cohésion, et la détermination de la teneur enrobé à froid liant optimal dans les enrobés.

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

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

V.7. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES ENROBES A FROID.

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

- Le séchage des enrobés à froid doit être possible mais il doit aussi se réaliser avant que la circulation mise en danger. Ces enrobés dont les performances mécaniques sont très médiocres aux premiers âges, il faut donc que le séchage soit aussi rapide que possible, ce qui suppose à la fois un liant à séchage rapide (émulsion, cut back à séchage rapide) et un enrobé aussi ouvert que possible ;
- La couche d'enrobé ainsi réalisée doit vérifier certains critères :
 - Elle doit être étanche afin de ne pas laisser l'eau entrer dans la chaussée ;
 - Elle doit être stable même enrobée à froid, présence d'eau, et ne doit pas voir ses performances mécaniques diminuer en période de pluie.
- Dans le cas d'un enrobé à froid, il convient d'éviter les excès en liant, car ils provoquent une texture fermée qui ne permet pas l'évaporation des solvants et donnent une très grande déformabilité.
- Dans certaines techniques routières et particulièrement au Sahara, l'utilisation des enrobés à froid est une pratique beaucoup plus apte que les enrobés à chaud.

Les inconvénients des enrobés à froid sont de plusieurs types :

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

Chapitre 6

Sable

Bitume

VI. SABLE BITUME

VI.1. INTRODUCTION.

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

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

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

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

VI.2. DEFINITION.

Le sable bitume est un mélange de sable (naturel ou artificiel) avec un bitume traité en centrale et destiné à être utilisé en couche d'assise ou couche de roulement ; pour des questions de coût de revient, les sables généralement utilisés ont été des sables naturels.

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

Les sables naturels utilisés en construction routière sont prélevés :

- Soit dans des gisements appartenant à des couches géologiques classiques ;
- Soit dans des alluvions des rivières ou fleuves ;
- Soit, plus rarement sur les plages ou dunes actuelles.

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

Les essais mécaniques qui permettent de juger les sables bitumes sont donc ceux que subissent tous les mélanges bitumineux posés en assise de chaussée. Les types d'essais mécaniques correspondant aux fonctions de l'assise :

- Essais de module ;
- Essai de fatigue ;
- Essai de fluage dynamique ou l'orniérage I.P.C.

Le sable utilisé est un sable propre ($EL.S > 40$, $IP = 0$). Généralement ce type de sable manque de fines, les fines d'ajout seront soit des matériaux de concassage-broyage (sable, fines calcaires), soit des pulvérulents industriels (chaux, ciment). L'enrobage s'effectue en centrales à l'aide d'un bitume pur dur pour gagner en cohésion.

Les différences essentielles entre les sables bitume et les sables enrobés à froid tiennent à deux aspects :

- La nature des matériaux ;
- La nature et le rôle du liant.

Les sables utilisés pour réaliser des sables enrobés à froid sont naturellement stables, le liant ayant pour rôle de maintenir cette stabilité dans l'environnement climatique du matériau (risque d'imbibition ou au contraire de dessiccation).

A l'inverse, les sables bitume tiennent la majeure partie de leur cohésion au liant utilisé, le niveau de performance atteint résultant à la fois de la dureté du liant et de la granulométrie du matériau.

VI.3. SPECIFICATION ET RECOMMANDATIONS.

VI.3.1. SPECIFICATION POUR LES SABLES BITUMES A CHAUD (BITUME 40/50).

Pour un trafic inférieur à 1000 véhicules/jour :

- **HUBBARD FIELD.**
 - Compacité 88 % à 95 % ;
 - Stabilité minimale à 60 °C : 900 kg
- **DURIEZ.**
 - Compacité 85 % à 92 % ;
 - Rapport imm/comp > 0,75.
- **MARSHALL.**
 - Compacité 87 % à 94 % ;
 - Stabilité minimale à 60 °C : 300 kg

VI.3.2. RECOMMANDATIONS.

VI.3.2.1. EPAISSEURS.

Les sables bitumes à chaud sont utilisables pour des chaussées à faible trafic à moyen d'environ 1 000 véhicules/jour. L'épaisseur employée est généralement de l'ordre de 3 cm avec une certaine tolérance.

VI.3.2.2. CARACTERISTIQUES DES SABLES BITUMES.

Les sables utilisés doivent par ailleurs être propres avec IP non mesurable et I.S > 40.

- **Liants.**

Compte tenu généralement du manque d'angularité du matériau, il conviendra d'éviter les bitumes de pénétration trop importante. Ceci afin d'éviter les risques d'orniérage. A l'inverse des liants de trop faible pénétration peut conduire très rapidement par vieillissement à une rigidité élevée ; ce qui peut avoir comme conséquence de rendre le matériau très sensible aux phénomènes de fatigue. Dans la pratique, il est conseillé de choisir un bitume dont la pénétration soit comprise entre 50 et 100, soit le bitume 60/70.

- **Fabrication.**

Elle s'effectue dans une centrale d'enrobage classique. Compte tenu des faibles épaisseurs mises en œuvre et de la vitesse habituelle des finisseurs le débit de la centrale devra être limité pour éviter l'attente des camions chargés d'enrobés et les arrêts trop fréquents de la centrale. A titre indicatif, pour une mise en œuvre en 3 cm d'épaisseur un débit moyen de 80 T/h sur une chaussée de 7,5 m.

- **Compactage.**

Les sables bitumes ont une stabilité faible avant refroidissement du bitume, ils portent difficilement le compactage et ont tendance à se fissurer, surtout par temps froid.

On aura intérêt à précompacter avec un finisseur à table vibrante lourde. Le compactage se poursuivra :

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

VI.4. LES SABLES TRAITES AU BITUME POUR COUCHES DE ROULEMENT.

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

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

VI.4.1. LE SABLAGE.

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

VI.4.2. CONSTITUANT D'UN ENROBE 0/D.

Selon leur formulation, les enrobés 0/D de couche de roulement sont employés dans une gamme d'épaisseur de 4 à 8 cm. Généralement, le pourcentage de sable employé est compris entre 30 et 60 % selon la granulométrie du sable et la valeur (D) de l'enrobé. Ce sable, dans les formules plus performantes, est concassé. Toutefois, un certain pourcentage de sable roulé peut être employé. Généralement, l'emploi de sable roulé :

- Diminue la résistance à l'orniérage ;
- Affecte la rugosité de surface ;
- Améliore la maniabilité de la formule (élément souvent utile pour des mises en œuvre en faible épaisseur).

Pour des emplois supérieurs à 20 %, les sables roulés seront toujours des sables à granulométrie étalée (sables moyens ou grossiers). L'emploi de sables fins monogranulaires dégrade en effet rapidement les performances. Au-delà d'un tel pourcentage les sables utilisés seront propres ($IP = 0$, $E.S > 40$).

VI.4.3. MATERIAU PRINCIPAL.

Différentes techniques sont envisageables, une caractéristique commune est qu'elles sont toutes employées dans des épaisseurs inférieures à 4 cm.

On peut vouloir réaliser :

- **Un sable enrobé à chaud.** (Sand Asphalt)

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

Ils se distinguent des sables bitumes utilisés en assises :

- Par une teneur en liant plus élevée (6,5 % à 7 % au lieu de 4 à 4,5 %) ;
- Par des exigences de qualité plus restrictives concernant les sables utilisables en particulier du point de vue granulométrique : Les sables fins monogranulaires ne sont pas employés à teneur élevée. La compacité en place de ce type d'enrobés est de l'ordre de 90 %. On peut l'améliorer (mais aux dépens de la rugosité) en faisant évoluer la formulation de ce type d'enrobés vers celle des mastics bitumineux (sheet asphalt) : Ces enrobés peuvent contenir en quantité variable du sable roulé moyen ou grossier, du sable concassé et du sable fin roulé (maxi 30 %). Leur particularité par rapport aux sables enrobés est d'être plus fins et plus riches en fines et en bitume. La rigidité du mélange fines bitume venant compenser l'instabilité liée à l'emploi de sable fin. Ces enrobés sont compacts (95 %) et étanches ; ils sont malheureusement très glissants. Autrefois très utilisés en milieu urbain, leur coût élevé (compte tenu du fort dosage en bitume nécessaire : De l'ordre de 9 %) tend à les faire de plus en plus disparaître des applications.

- **Un enrobé fin.**

C'est une technique réalisée à chaud. Il s'agit d'enrobés 0/D ($4 \leq D \leq 6$ mm). Lorsqu'ils sont constitués entièrement de sable concassé, on constitue des micro-bétons. Ils peuvent cependant contenir un certain pourcentage souhaité lié à l'intensité du trafic.

Ils se distinguent des sables enrobés par une granularité plus étalée et un niveau de performances plus élevé. Ils sont également plus compacts.

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

- **Des coulés bitumineux.**

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

Chapitre 7

**Formulation
du Sable Bitume**

VII. FORMULATION DU SABLE BITUME

VII.1. INTRODUCTION.

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

Une composition des enrobés bitumineux se résume :

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

VII.2. RAPPELS THEORIQUES.

VII.2.1. DETERMINATION DE LA TENEUR EN LIANT.

La teneur d'un enrobé bitumineux dépend de la granulométrie de l'ossature et plus exactement de la surface spécifique. Cette surface est d'ailleurs déterminée en grande partie par le filler proprement dit et dans une certaine mesure par le sable fin. La teneur en liant sera définie lors de l'étude en laboratoire en utilisant la formule suivante :

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

Avec :

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

K : module de richesse.

Σ : surface spécifique conventionnelle tel que :

$$\Sigma = 4,75 + 1,3 f \quad (\text{formule de Duriez})$$

f : pourcentage de fines ($d < 0,08$ mm)

- **Module de richesse.**

Dans l'expression précédente la valeur de $K = P / \alpha \sqrt[5]{\Sigma}$ est appelée « module de richesse en liant » ou en abréviation module de richesse ; il est caractéristique de l'épaisseur du film de liant enrobant les grains d'agrégats, d'où son nom. Son choix est sous la dépendance de la déformabilité, du climat, de la nature et de l'intensité du trafic.

D'une manière générale la valeur du module de richesse K varie entre 3,75 et 4,25.

VII.2.2. CALCUL DE LA COMPACTITE DES EPROUVETTES.

Soit :

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

La densité vraie de l'éprouvette est :

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

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

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

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

$$C = 100 - V_m$$

VII.3. NOTION DE STABILITE.

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

1. ESSAI Duriez.

Il consiste à confectionner des éprouvettes cylindriques dans des conditions déterminées, et soumettre les éprouvettes, après conservation à l'air libre ou en immersion, à l'écrasement pour déterminer la résistance à la compression simple qui sera dite « stabilité Duriez ».

2. Essai Marschall.

C'est un essai de compression simple exercée suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique semi-frettée. Cette compression est appliquée une demi-heure après immersion dans l'eau à 60 °C à une vitesse de 0,86 mm/sec.

3. Essai Hubbard Field.

Cet essai consiste à mesurer sous quelle pression une éprouvette de mortier ou enrobé bitumineux, dont les dimensions et la confection sont normalisées, peut fluer à travers un orifice calibré.

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

température de 18 °C, soit de 60 °C. On signale que pour l'essai à 60 °C, l'éprouvette est émergée dans l'eau une heure.

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

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

VII.4. PROGRAMME DE L'EXPERIMENTATION.

Notre travail expérimental consiste à l'étude du comportement du sable bitume enrobé à froid au moyen de l'essai de stabilité Hubbard Field pour différentes formulations. A cet effet, nous avons étudié :

- La variation de la stabilité en fonction de teneur en bitume (Cut back 400/600) pour un sable de dune ;
- La correction de la granulométrie du sable avec un sable concassé, et son influence sur la stabilité ;
- La correction de la granulométrie du sable avec un sable gypseux, et son influence sur la stabilité ;
- L'influence de la teneur en fines sur les stabilités.

VII.5. ESSAIS EFFECTUES EN LABORATOIRE.

Les essais effectués lors de ces études sont :

1. Identification des sables.

Afin d'identifier et de voir si ces sables répondent aux normes des sables utilisables pour sable bitume en couche de roulement, les essais suivants ont été effectués sur ces sables :

- Granulométrie ;
- Equivalent de sable ;
- Essai de bleu de méthylène ;
- Analyse chimique sommaire ;
- Friabilité du sable ;
- Poids spécifique.

2. Identification du bitume.

- Pour le cut back 400/600 :
 - Essai de la pseudo-viscosité ;
 - Essai de la distillation fractionnée.
- Pour le bitume 80//100 :
 - Essai de point de ramollissement des produits bitumineux ;
 - Essai de pénétrabilité à 25 °C ;

3. Essai mécanique.

Après identification des différents composants du sable bitume (sables de dunes, concassé et gypseux, bitume cut back) nous avons confectionné des éprouvettes afin de les tester à l'essai Hubbard Field.

VII.6. PRESENTATION DES MATERIAUX UTILISES.

Dans cette présente partie, nous allons procéder à la présentation des caractéristiques des matériaux de composition de l'enrobé qui sont : les liants, les sables, les stabilisants.

VII.6.1. LES LIANTS.

- **Cut back 400/600.**

Pseudo-viscosité mesurée au viscosimètre d'orifice 10 mm à 25 °C (sec)	625	400 à 600	Spécification	
Distillation fractionnée (%) à :				
190 °C	—	—		
225 °C	—	< 2		
315 °C	5	5 à 12		
360 °C	8,5	< 15		

Tableau VII.1 : Caractéristique du cut back 400/600.

- **Bitume 80/100.**

Pénétrabilité à 25 °C, 100 g, 5 s	81
Température de ramollissement en °C (B & A)	53

Tableau VII.2 : Caractéristique du bitume 80/100.

VII.6.2. LES SABLES.

1. Sable de dune (sable de Hassi Berkine).

• Analyse chimique.

Eléments	Pourcentage (%)
Insoluble (Silice + Silicates) INS	98,17
Oxyde de fer et d'Alumine (R_2O_3)	1,35
Sulfates ($SO_4 Ca, 2 H_2O$)	Traces
Chlorures (NaCl)	0,11
Carbonates ($CO_3 Ca$)	1,75
Anhydride Carbonique (CO_2)	0,77
Perte au feu à 1050 °C	0,79
Eau de constitution	0,02
BILAN CHIMIQUE PONDERAL	101,4

Tableau VII.3 : Analyse chimique sommaire du sable de dunes.

• Caractéristiques physiques.

- Poids spécifique = 2,64 ;
- Equivalent de sable = 93,94 % ;
- Valeur au bleu de méthylène = 0,05 ;
- Friabilité = 7,00 %.

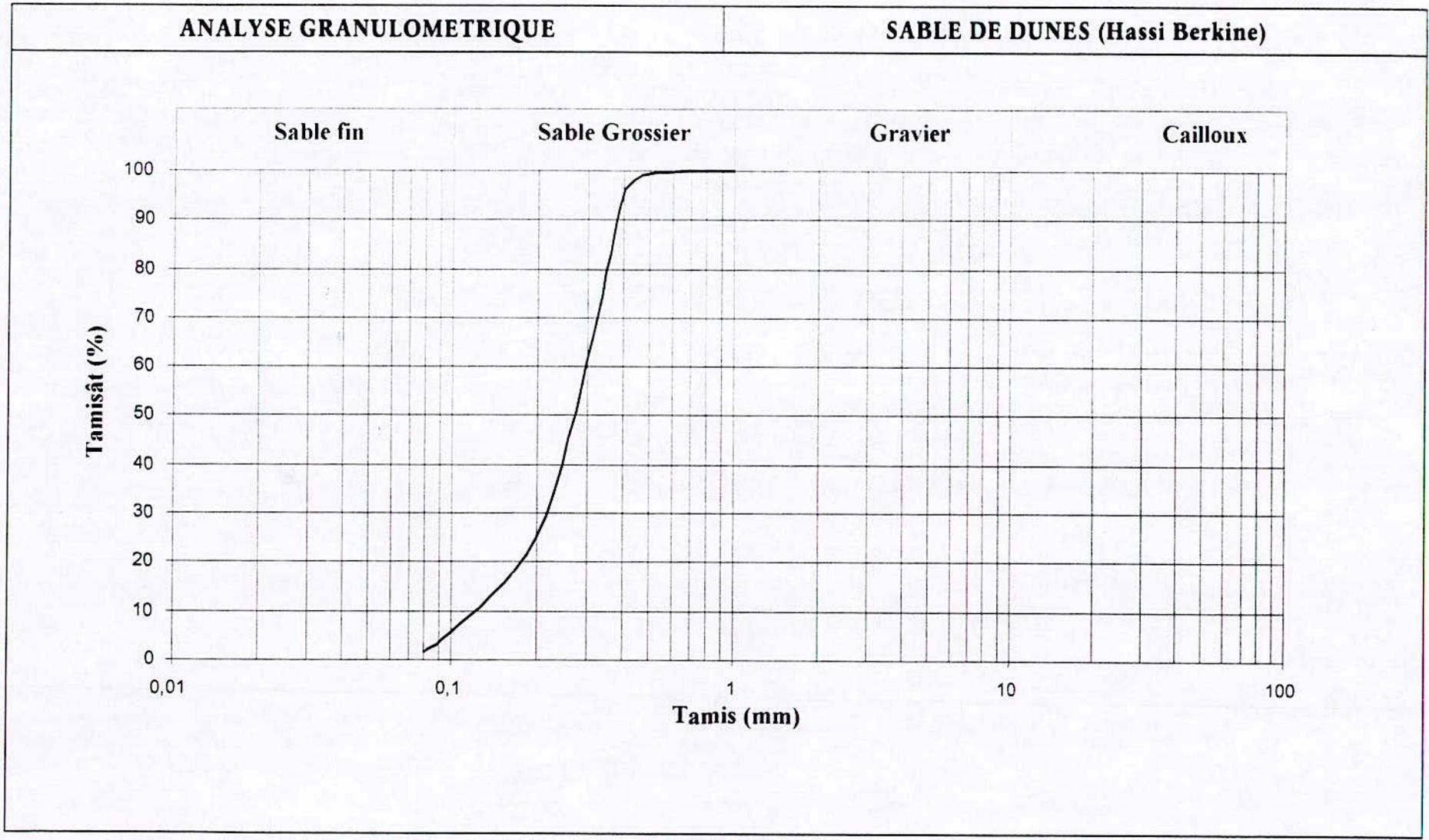


Figure VII.1 : Courbe granulométrique du sable de dunes de Hassi Berkine.

2. Sable concassé (Haoud El Hamra).

- **Analyse chimique.**

Eléments	Pourcentage (%)
Insoluble (Silice + Silicates) INS	33,10
Oxyde de fer et d'Alumine (R_2O_3)	2,50
Sulfates ($SO_4 Ca, 2 H_2O$)	5,14
Chlorures (NaCl)	0,12
Carbonates ($CO_3 Ca$)	58,82
Anhydride Carbonique (CO_2)	25,88
Perte au feu	26,00
Eau de constitution	0,12
BILAN CHIMIQUE PONDERAL	99,78

Tableau VII.4 : Analyse chimique sommaire de sable concassé.

- **Caractéristiques physiques.**

- Poids spécifique = 2,49 ;
- Equivalent de sable = 37,03 % ;
- Valeur au bleu de méthylène = 0,10 ;
- Friabilité = 34,00 %.

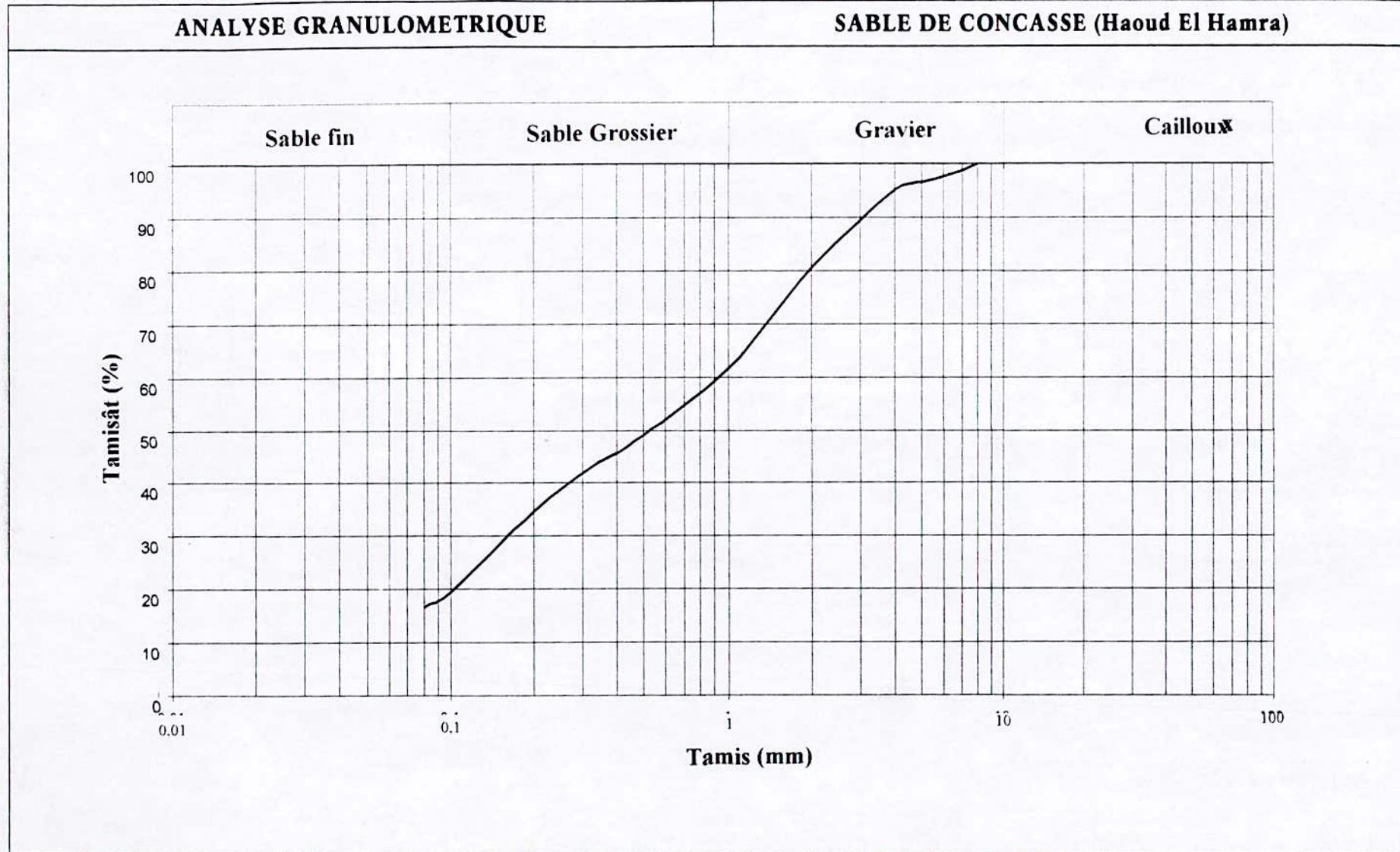


Figure VII.2 : Courbe granulométrique du sable concassé de Haoud El Hamra.

3. Sable gypseux.

- **Analyse chimique.**

Eléments	Pourcentage (%)
Insoluble (Silice + Silicates) INS	10,95
Oxyde de fer et d'Alumine (R_2O_3)	1,32
Anhydride ($SO_4 Ca, 2 H_2O$)	8,68
Gypses ($SO_4 Ca, 2 H_2O$)	49,64
Chlorures (NaCl)	0,70
Carbonates ($CO_3 Ca$)	27,19
Perte au feu	26,12
Eau de constitution	14,16
Eau de cristallisation	10,39
BILAN CHIMIQUE PONDERAL	102,25

Tableau VII.5 : Analyse chimique sommaire de sable gypseux.

- **Caractéristiques physiques.**

- Poids spécifique = 2,24 ;
- Equivalent de sable = 37,19 % ;
- Valeur au bleu de méthylène = 3,00.

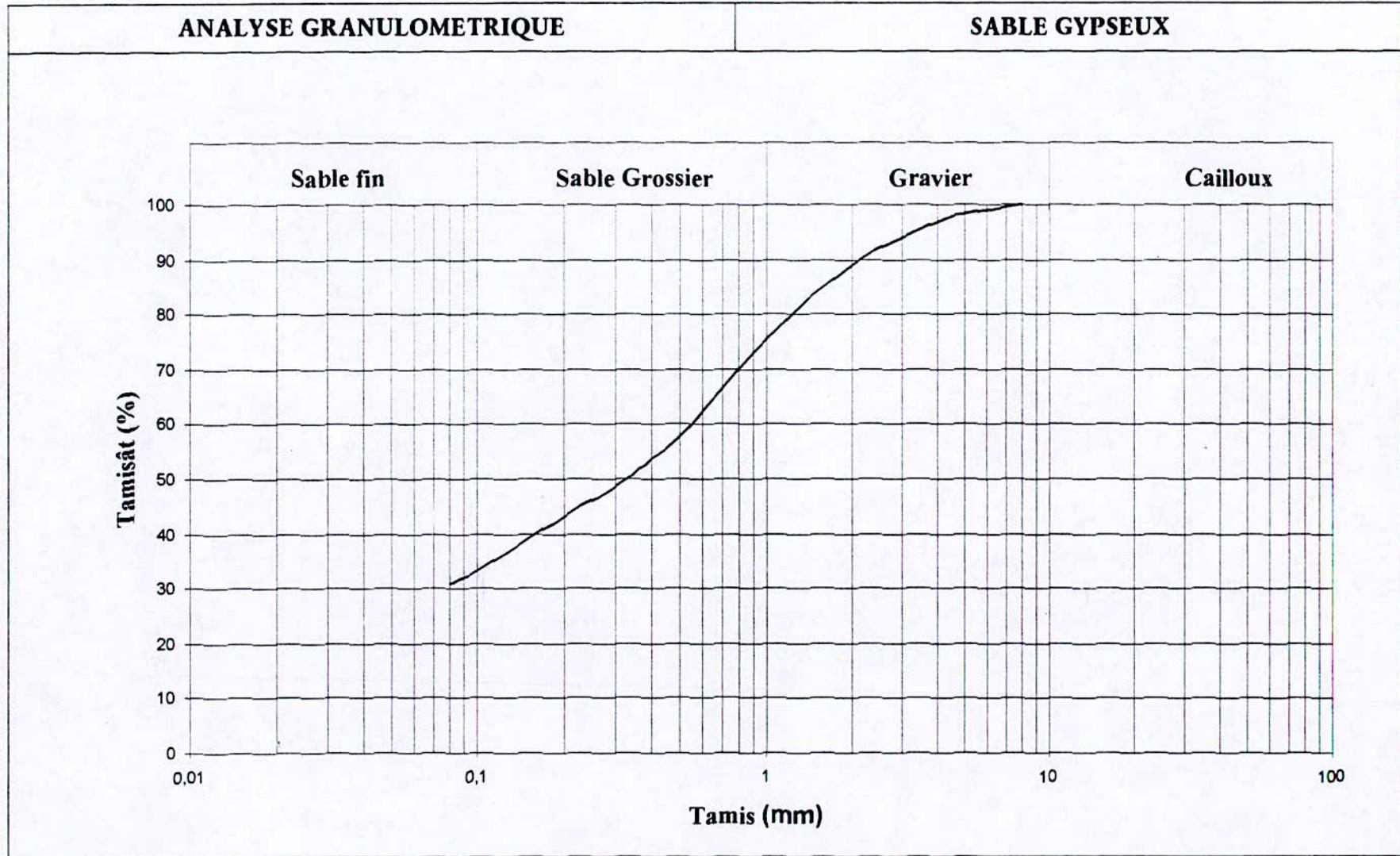


Figure VII.3 : Courbe granulométrique du sable gypseux.

VII.7. PREMIERE SERIE D'ESSAIS.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages en cut back 400/600 sur le sable de dunes pris seul, les résultats de stabilité Hubbard Field sont résumés dans le tableau suivant :

Cut back 400/600						
% Bitume	5,5	6	6,5	7	7,5	8
Module de richesse K	3,77	4,11	4,45	4,79	5,14	5,48
Poids à l'air (g)	100,15	99,78	99,80	100,44	100,70	100,50
Densité apparente	1,92	1,95	1,93	2,01	1,99	1,97
Densité théorique	2,42	2,40	2,38	2,36	2,34	2,32
Compacité (%)	79,64	81,20	83,20	85,00	84,86	83,64
Stabilité H.F à 18 °C (Kg)	133,04	146,16	164,27	186,13	171,56	156,15
Stabilité H.F à 60 °C (Kg)	52,47	64,33	70,05	80,57	69,02	68,08

Tableau VII.6 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le sable de dunes de Hassi Berkine.

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures **VII.4** et **VII.5** ci-après :

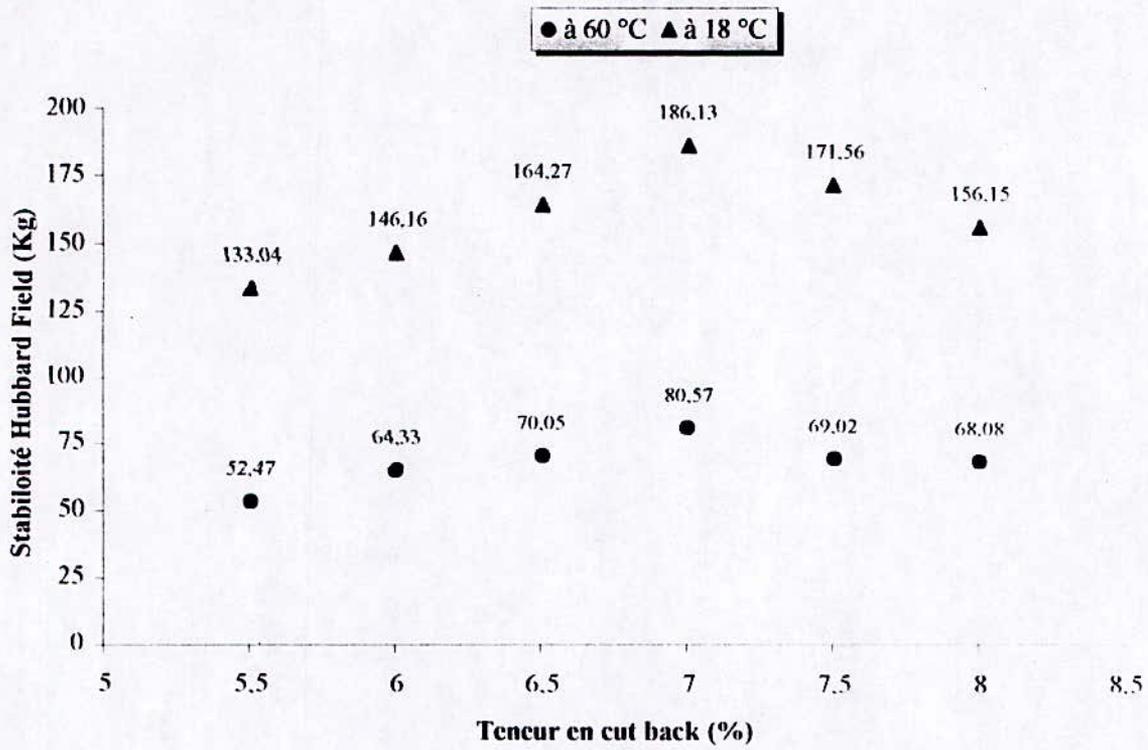


Figure VII.4 : Influence de la teneur en cut back sur la stabilité Hubbard Field (100 % sable de dunes).

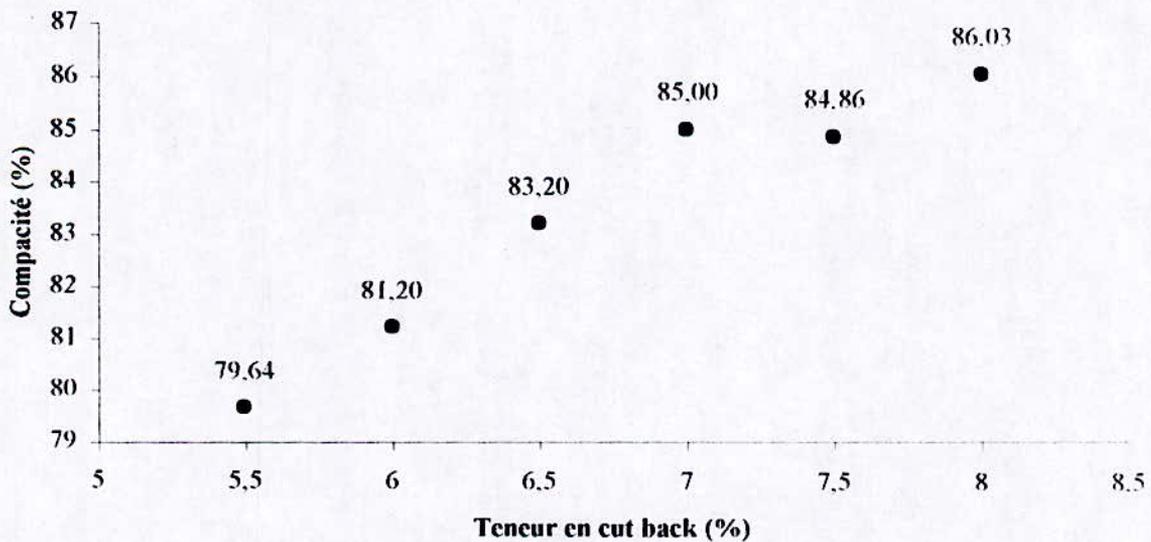


Figure VII.5 : Influence de la teneur en cut back sur la compacité (100 % sable de dunes).

Interprétation.

D'après les résultats obtenus à partir de l'essai Hubbard Field, on peut conclure que le sable de dunes seul enrobé avec un cut back 400/600, donne des compacités et des stabilités insuffisantes ; ceci peut s'expliquer par la granulométrie serrée qui ne permet pas de donner un bon arrangement des grains après compactage.

On remarque aussi que la stabilité optimale est atteinte pour une teneur en cut back de 7 %, elle est de l'ordre de :

- 183,13 Kg à 18 °C ;
- 80,57 Kg à 60 °C.

L'augmentation de la teneur en liant entraîne une augmentation de la compacité, par diminution du volume des vides.

L'optimum de la stabilité est obtenue pour 7 % de cut back, une teneur en cut back inférieure à cette valeur entraîne un mélange moins stable, en raison de l'influence de l'enrobage.

Une teneur en cut back supérieure à cette valeur provoque une chute de la stabilité, à cause d'un mauvais contact entre les grains.

Ces stabilités restent toute fois insuffisantes. Pour cela, on a pensé à les corriger ci en ajoutant des stabilisants tels que le sable concassé et le sable gypseux.

VII.8. POURCENTAGE DE LIANT UTILISE DANS LES MELANGES.

Pour le reste des essais, On fait varier le pourcentage du liant en utilisant la formule suivante :

$$P = \alpha K \sqrt[3]{\Sigma}$$

Si on fait varier le pourcentage de sable stabilisant, on fait varier le pourcentage d'éléments fins dans les mélanges. A partir du calcul de la surface spécifique, on obtient le pourcentage de liant.

$$\text{Tel que : } \Sigma = 4,75 + 1,3 f$$

Pour notre cas nous utilisons un module de richesse ($K = P / \alpha \sqrt[3]{\Sigma}$) calculé à partir de la première série d'essais, pour l'optimum de 7 % de liant.

VII.9. DEUXIEME SERIE D'ESSAI.

1. Stabilisation par le sable concassé de Haoud El Hamra (Enrobé au cut back 400/600).

On a corrigé la granulométrie du sable de dunes par un sable de concassage ; les granulométries de nos mélanges sont données dans l'annexe II.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages de sable concassé (5 à 35 %) avec le sable de dunes pris séparément. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Cut back 400/600					
Module de richesse K	4,79				
Sable de dunes (%)	100	95	85	75	65
Sable concassé (%)	0	5	15	25	35
% Bitume	7,00	7,22	7,60	7,94	8,24
Poids à l'air (g)	100,44	100,40	99,60	100,45	100,60
Densité apparente	2,01	2,01	2,00	2,04	2,08
Densité théorique	2,36	2,35	2,32	2,30	2,28
Compacité (%)	85,00	85,45	86,48	88,61	91,04
Stabilité H.F à 18 °C (Kg)	186,13	242,19	284,31	351,44	494,03
Stabilité H.F à 60 °C (Kg)	80,57	65,52	73,71	114,23	167,60

Tableau VII.7 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le mélange (sable de dunes + sable concassé) pour un enrobé à froid.

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures VII.6 et VII.7 ci-après :

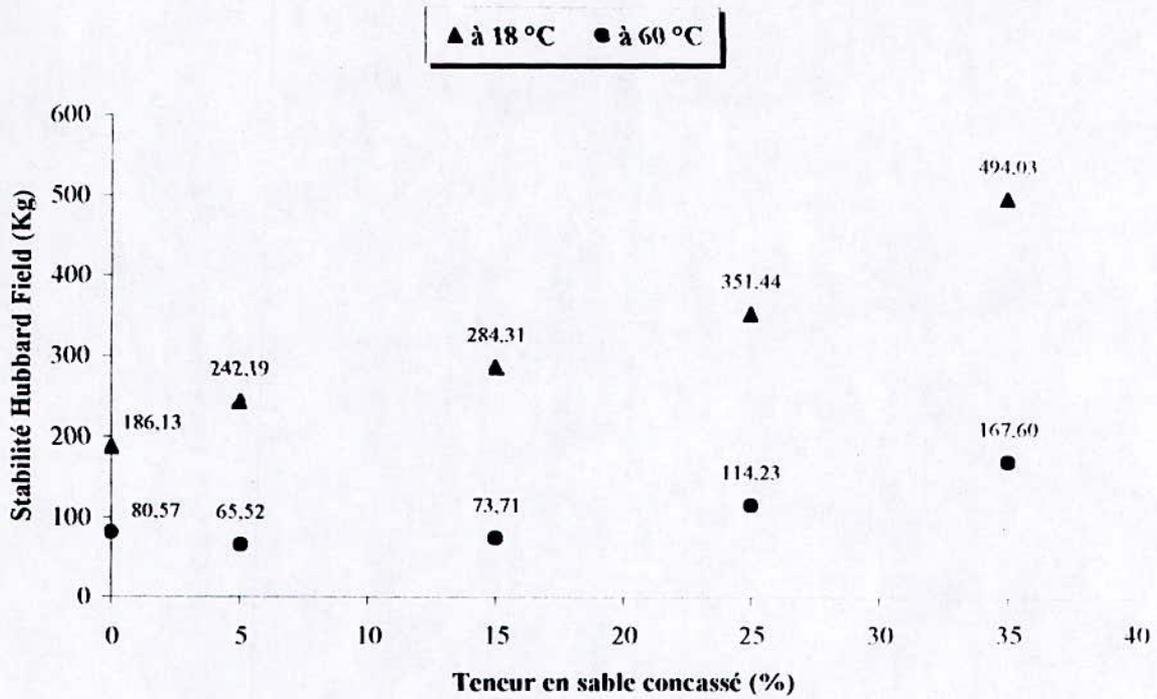


Figure VII.6 : Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité Hubbard Field de l'enrobage à froid.

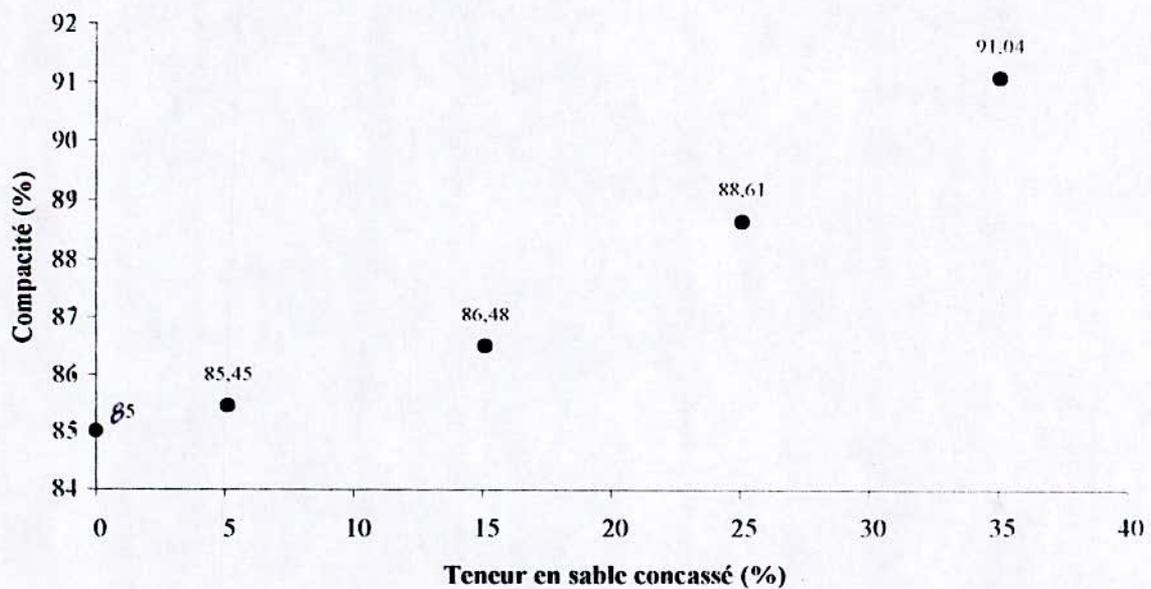


Figure VII.7 : Influence de la teneur en sable concassé sur la compacité de l'enrobé à froid.

Interprétation.

On remarque que la stabilité et la compacité augmentent avec la teneur en sable de concassage.

L'existence du sable concassé améliore la stabilité, d'une manière presque linéaire. Cela s'explique par l'existence de fines, ce qui favorise l'arrangement et le contact intergranulaire.

Donc, l'incorporation d'un sable concassé améliore la courbe granulométrique, l'angularité et le dosage en fines.

La stabilité à 18 °C passe de 186,13 Kg pour 0 % de sable concassé à 494,03 Kg pour 35 % de sable concassé. A 60 °C elle passe de 80,57 Kg à 167,60 Kg pour 0 à 35 % de sable concassé.

2. Stabilisation par le sable gypseux (Enrobé au cut back 400/600).

On a corrigé la granulométrie du sable de dunes par un sable gypseux ; les granulométries de nos mélanges sont données dans l'annexe II.

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages de sable gypseux (5 à 35 %) sur le sable de dunes. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Cut back 400/600					
Module de richesse K	4,79				
Sable de dunes (%)	100	95	85	75	65
Sable gypseux (%)	0	5	15	25	35
% Bitume	7,00	7,42	8,12	8,71	9,24
Poids à l'air (g)	100,44	100,60	100,74	100,64	100,98
Densité apparente	2,01	1,97	1,97	1,99	2,02
Densité théorique	2,36	2,33	2,28	2,23	2,19
Compacité (%)	2,36	2,33	2,28	2,23	2,19
Stabilité H.F à 18 °C (Kg)	186,13	200,51	295,72	507,72	707,85
Stabilité H.F à 60 °C (Kg)	80,57	56,16	64,35	147,42	255,06

Tableau VII.8 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le mélange (sable de dunes + sable gypseux) pour un enrobé à froid.

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures **VII.8** et **VII.9** ci-après :

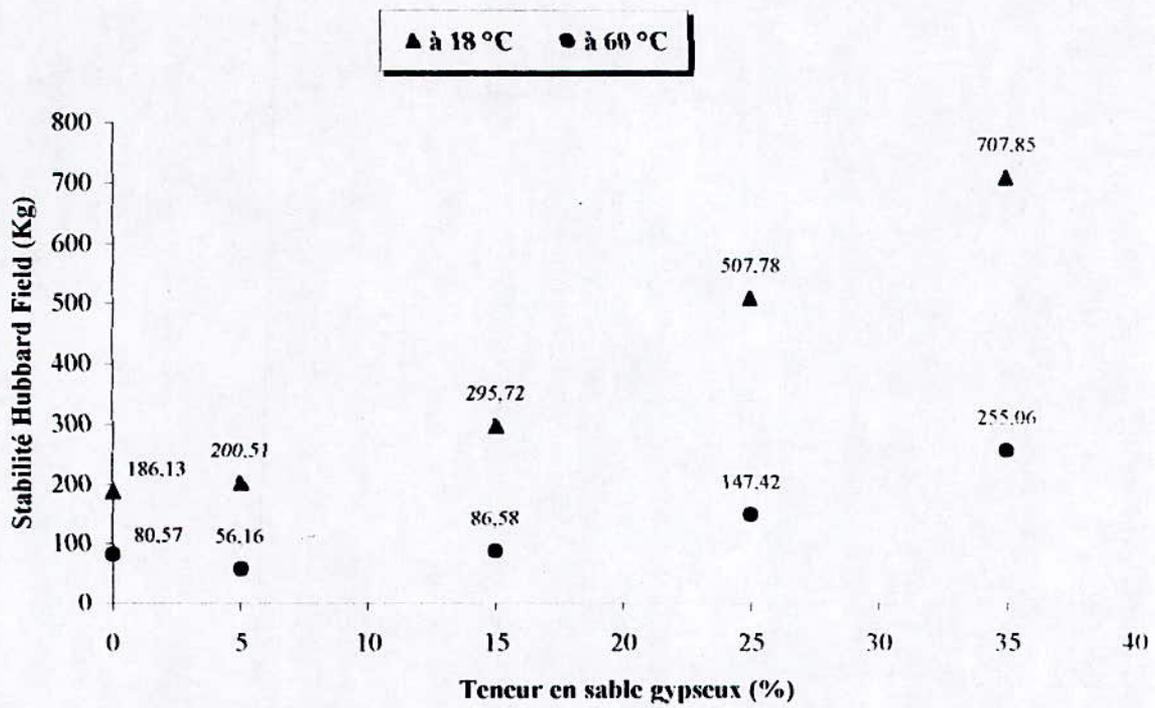


Figure VII.8 : Influence de la teneur en sable gypseux sur la stabilité Hubbard Field de l'enrobé à froid.

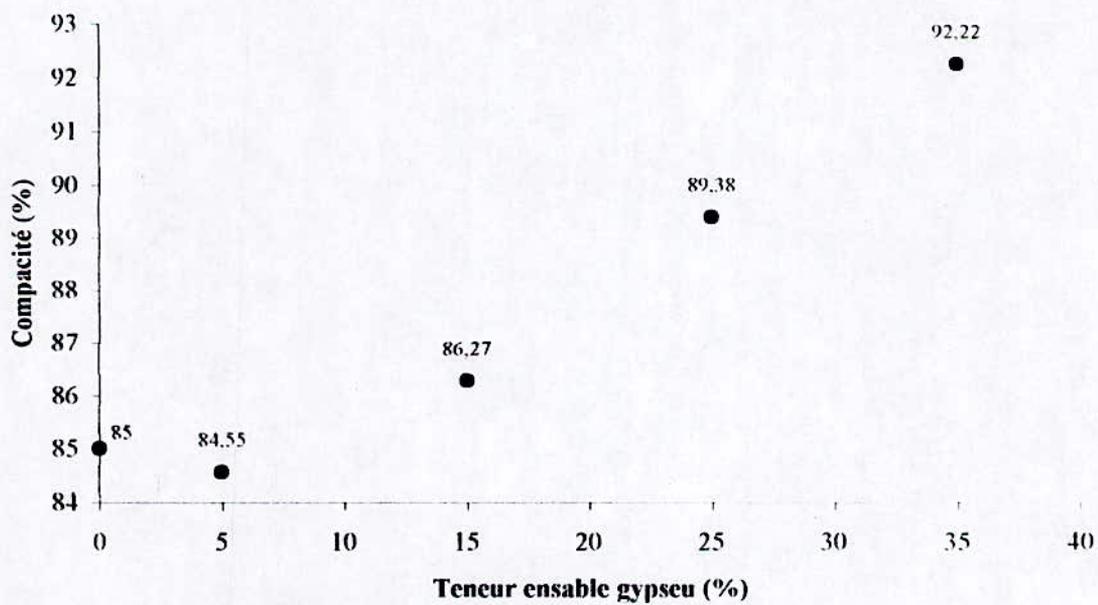


Figure VII.9 : Influence de la teneur en sable gypseux sur la compacité de l'enrobé à froid.

Interprétation.

On remarque que pour l'enrobé au cut back la compacité augmente en fonction de l'augmentation du pourcentage de sable gypseux, à cause du pourcentage de fines qu'il contient.

Ainsi le pourcentage de fines dans nos mélanges passe de 1,36 % pour le sable de dunes pur à 11,66 % pour 35 % de sable gypseux.

La compacité, elle passe de 85 % à 92,22 %.

De même les stabilités augmentent en fonction de la teneur en sable gypseux, elle passent :

- Λ 18 °C de 186, 13 Kg pour 0 % sable gypseux à 707,85 Kg pour 35 % sable gypseux ;
- Λ 60 °C de 80,57 Kg pour 0 % sable gypseux à 255,06 Kg pour 35 % sable gypseux.

Dans un souci d'efficacité ne disposant de seuils que pour des sables bitume à chaud, nous avons complété notre recherche par des essais sur enrobés au bitume.

VII.10. TROISIEME SERIE D'ESSAI.

1. Stabilisation par le sable concassé de Haoud El Hamra (Enrobé au bitume 80/100).

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages de sable concassé (5 à 35 %) sur le sable de dunes pris . Le pourcentage de bitume utilisé dans ces essais est calculé en fonction du pourcentage de bitume résiduel de cut back 400/600 (8,5 % de solvant) pour un optimum de 7 %, donc l'optimum pour le bitume résiduel est égale 6,41 %. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Bitume 80/100					
Module de richesse K	4,39				
Sable de dunes (%)	100	95	85	75	65
Sable concassé (%)	0	5	15	25	35
% Bitume	6,41	6,62	6,97	7,28	7,55
Poids à l'air (g)	99,58	101,81	100,96	100,73	101,71
Densité apparente	1,93	1,94	1,96	1,99	2,01
Densité théorique	2,4	2,39	2,37	2,34	2,32
Compacité (%)	80,3	81,03	82,95	84,84	86,38
Stabilité H.F à 18 °C (Kg)	954,02	1092,49	1314,5	1625,13	1781,33
Stabilité H.F à 60 °C (Kg)	133,35	212,52	281,07	321,83	390,06

Tableau VII.9 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le mélange (sable de dunes + sable concassé) pour un enrobé à chaud.

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures VII.10 et VII.11 ci-après :

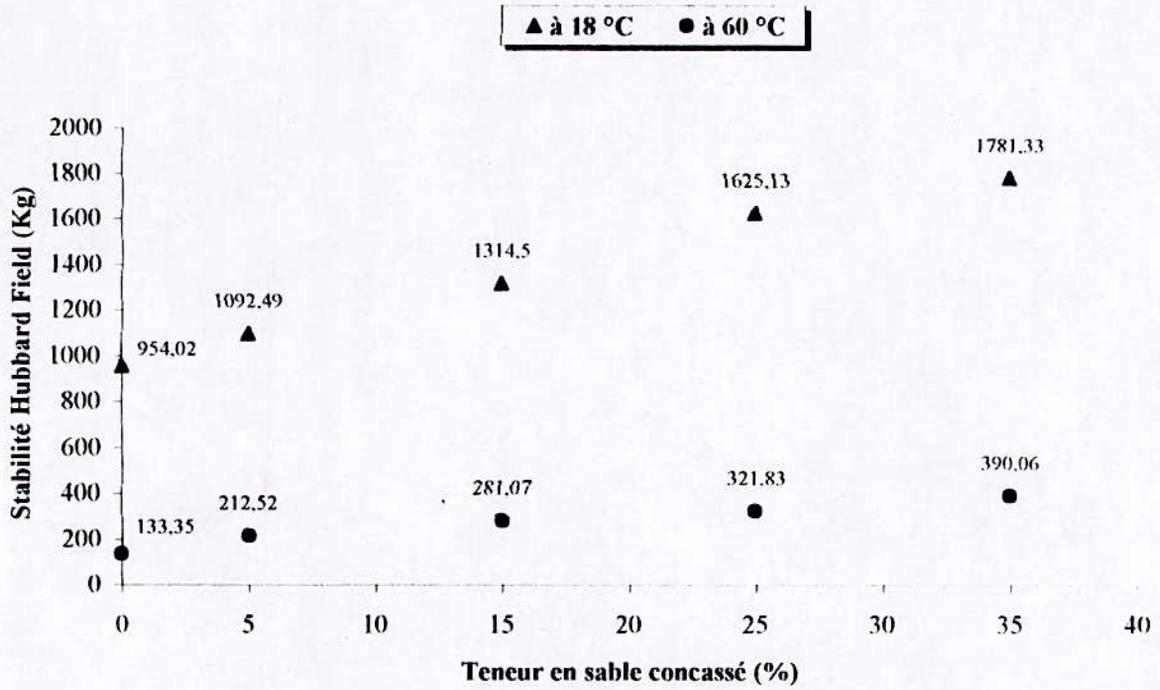


Figure VII.10 : Influence de la teneur en sable concassé sur la stabilité Hubbard Field sur le sable bitume enrobé à chaud.

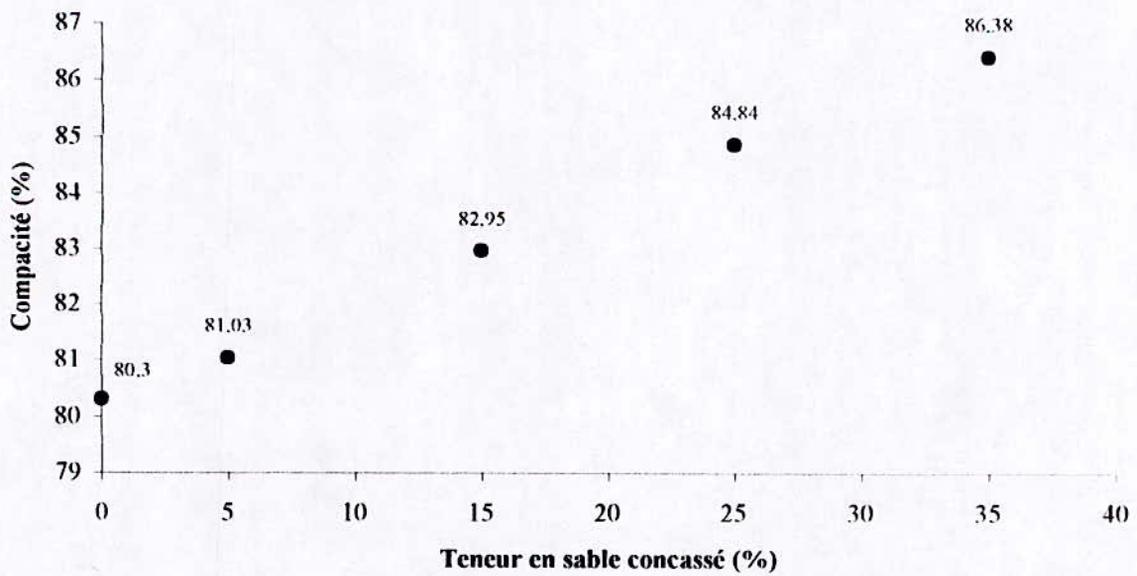


Figure VII.11 : Influence de la teneur en sable concassé sur la compacité sur le sable bitume enrobé à chaud.

Interprétation.

On remarque pour l'enrobé à chaud de même que pour le sable bitume enrobé à froid les stabilités et la compacité augmentent avec la teneur en sable concassé.

La stabilité à 18 °C passe de 954,02 Kg pour 0 % de sable concassé à 1781,33 Kg pour 35 % de sable concassé. A 60 °C elle passe de 133,35 Kg à 390,06 Kg pour 0 à 35 % de sable concassé.

La compacité passe de 80,3 % pour 0 % de sable concassé à 86,38 % pour 35 % de sable concassé.

2. Stabilisation par le sable gypseux (Enrobé au bitume 80/100).

Des essais ont été réalisés à différents pourcentages de sable gypseux (5 à 35 %) sur le sable de dunes pris séparément. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Bitume 80/100					
Module de richesse K	4,39				
Sable de dunes (%)	100	95	85	75	65
Sable gypseux (%)	0	5	15	25	35
% Bitume	6,41	6,80	7,44	7,98	8,46
Poids à l'air (g)	99,58	101,5	101,51	101,78	102,33
Densité apparente	1,94	1,92	1,92	1,93	1,91
Densité théorique	2,4	2,38	2,35	2,32	2,3
Compacité (%)	80,3	80,83	81,53	83,13	83,92
Stabilité H.F à 18 °C (Kg)	954,02	1078,45	1211,83	1329,41	1653,21
Stabilité H.F à 60 °C (Kg)	133,35	244,43	340,9	439,27	462,43

Tableau VII.10 : Résultats des essais Hubbard Field obtenus avec le mélange (sable de dunes + sable gypseux) pour un enrobé à chaud.

L'évolution des différentes performances est représentée dans les figures **VII.12** et **VII.13** ci-après :

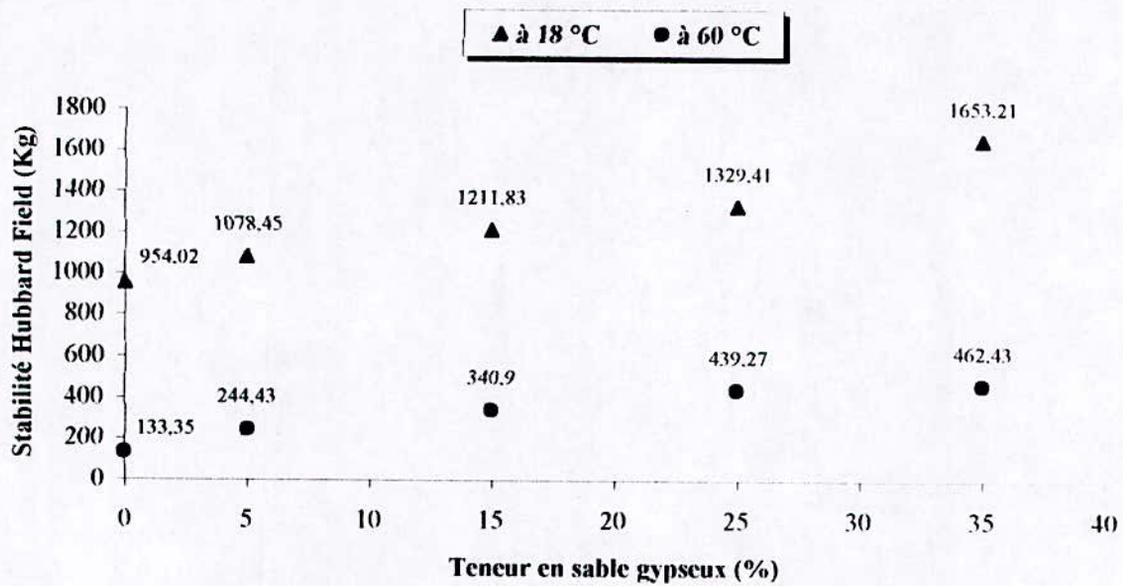


Figure VII.12 : Influence de la teneur en sable gypseux sur la stabilité Hubbard Field (bitume 80/100).

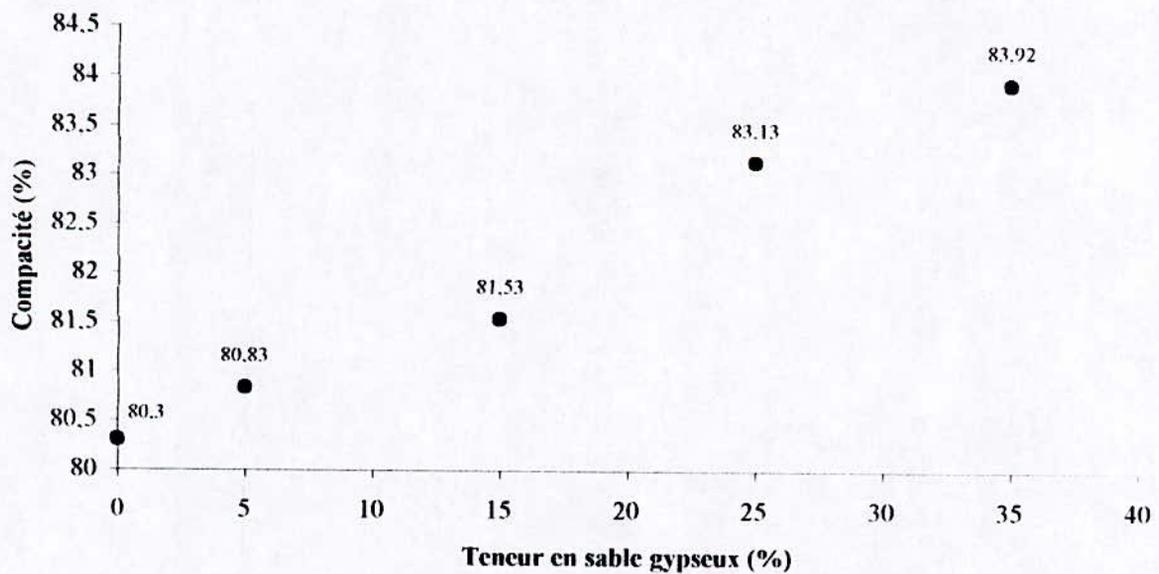


Figure VII.13 : Influence de la teneur en sable gypseux sur la compacité (bitume 80/100).

Interprétation.

On remarque que les stabilités augmentent avec le pourcentage de sable gypseux d'une façon presque linéaire.

La variation de la compacité est proportionnelle à l'augmentation de la teneur de sable gypseux et qui passe de 83,30 % pour 0 % de sable gypseux à 83,92 % pour 35 % de sable gypseux ajouté.

La stabilité à 18 °C passe de 954,02 Kg pour 0 % de sable gypseux à 1653,21 Kg pour 35 % de sable gypseux. A 60 °C elle passe de 133,35 Kg à 462,43 Kg pour 0 à 35 % de sable gypseux.

VII.11. INFLUENCE DU DOSAGE EN FINES.

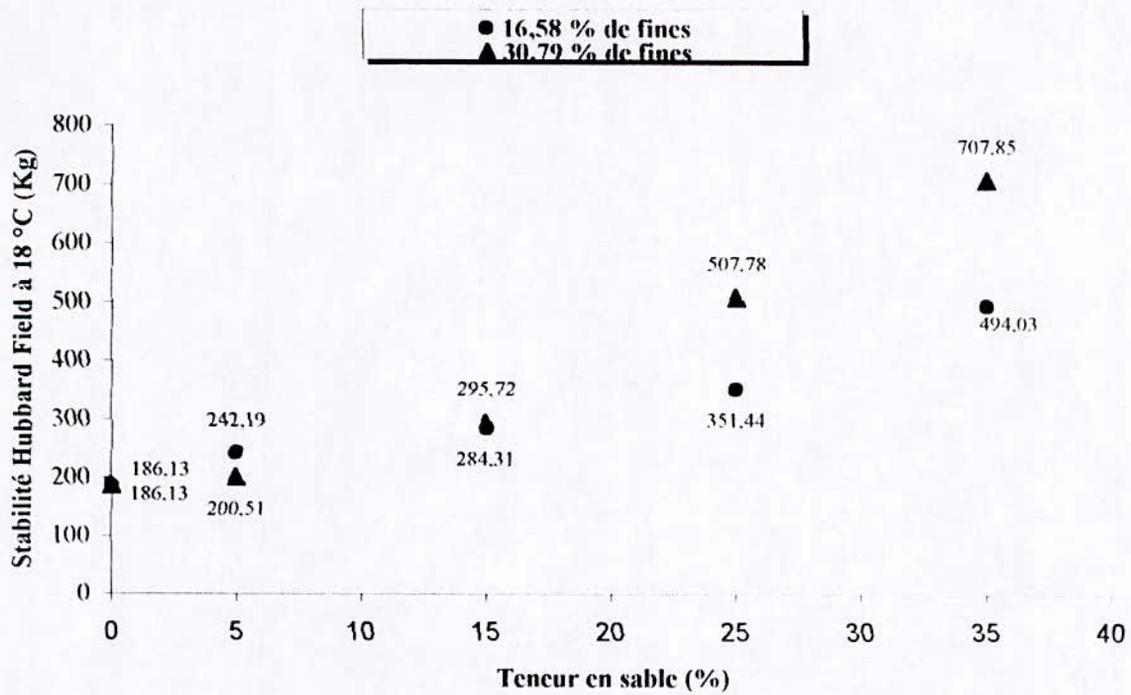


Figure VII.14 : Influence de la teneur en fines sur la stabilité pour le sable bitume enrobé à froid.

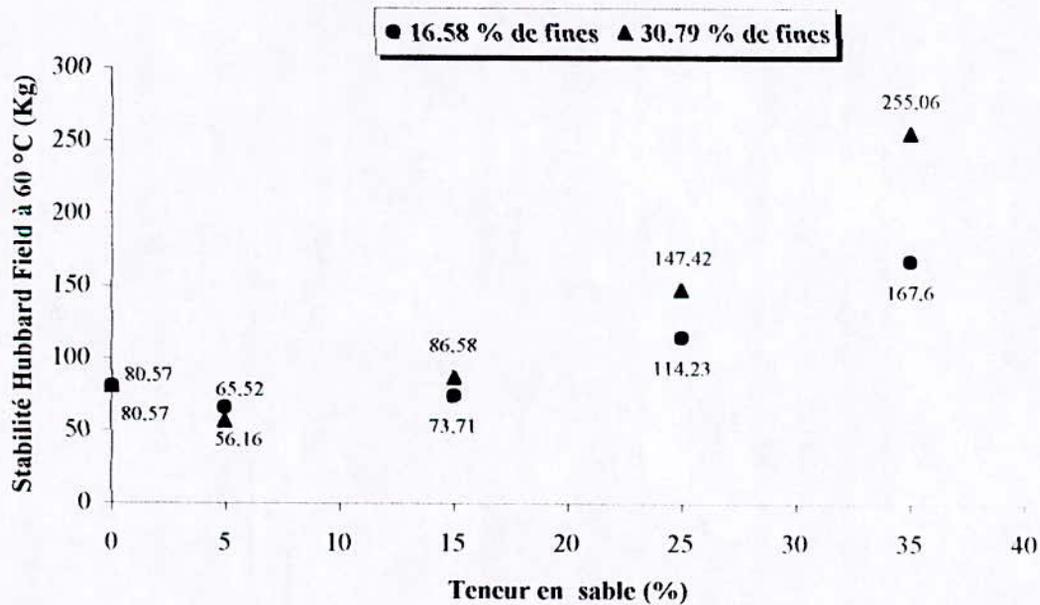


Figure VII.15 : Influence de la teneur en fines sur la stabilité pour le sable bitume enrobé à froid.

Interprétation.

On remarque que pour l'enrobé au cut back la stabilité augmente en fonction de l'augmentation du pourcentage de sable, à cause du pourcentage de fines qu'il contient et cette augmentation est presque linéaire.

Entre 0 et 20 % de sable, il n'y a pas de correction de granulométrie, mais à partir de 20 % de sable il y a un début de correction de granulométrie.

VII.12. COMPARAISON ENTRE SABLE BITUME A FROID ET A CHAUD.

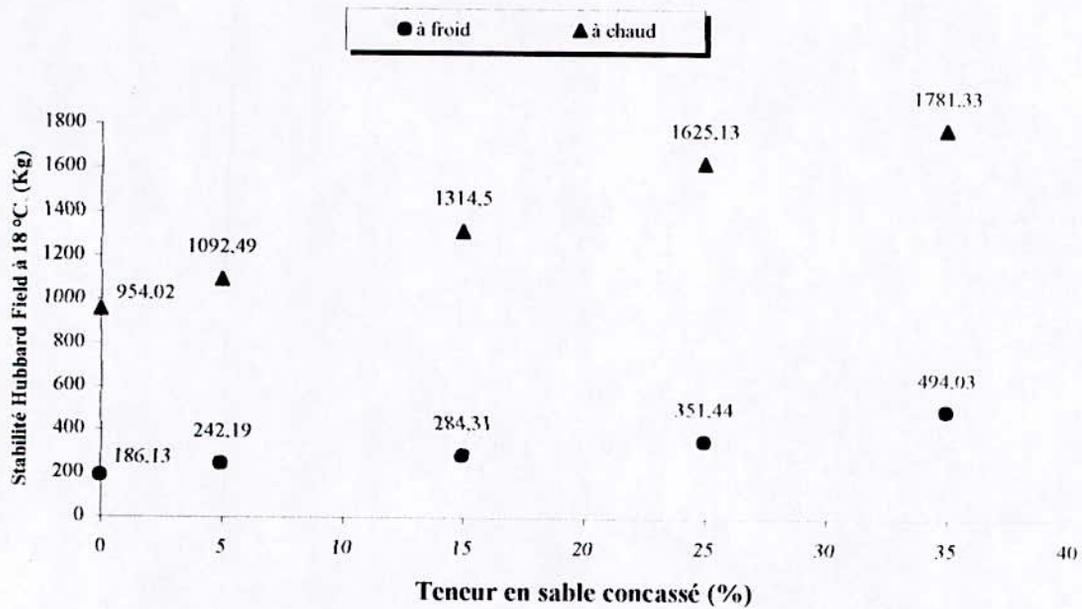


Figure VII.16 : Comparaison entre la stabilité de sable bitume enrobé à froid et enrobé à chaud (sable de dunes + sable concassé à 18 °C).

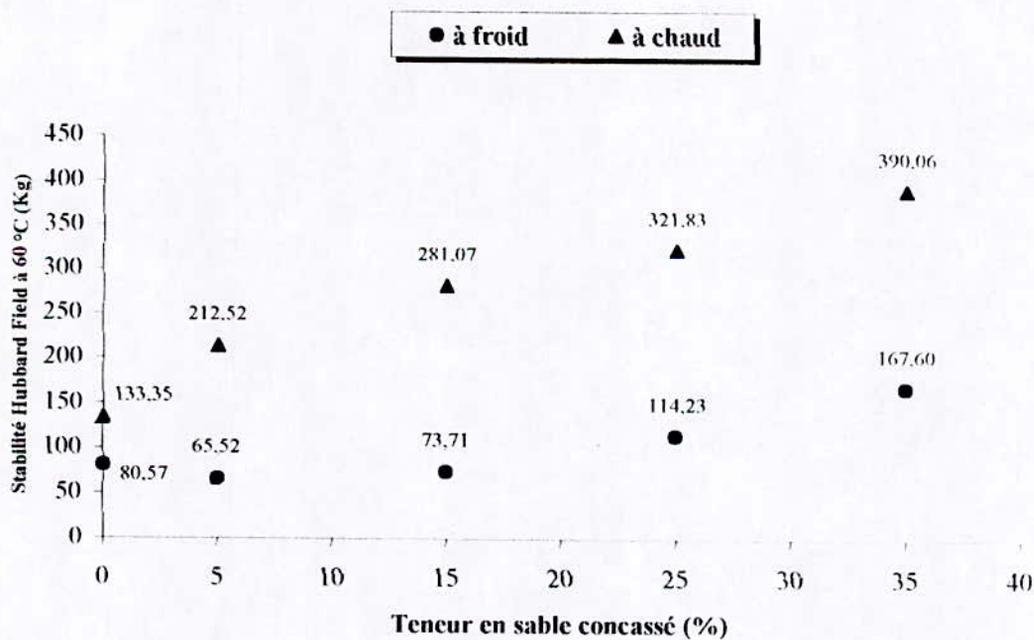


Figure VII.17 : Comparaison entre la stabilité de sable bitume enrobé à froid et enrobé à chaud (sable de dunes + sable concassé à 60 °C).

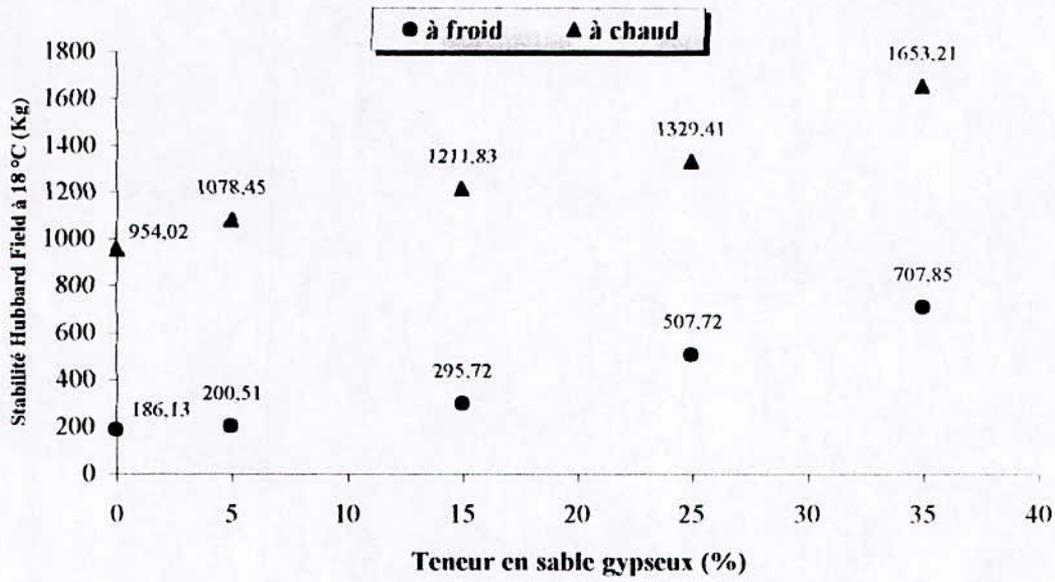


Figure VII.18 : Comparaison entre la stabilité de sable bitume enrobé à froid et enrobé à chaud (sable de dunes + sable gypseux à 18 °C).

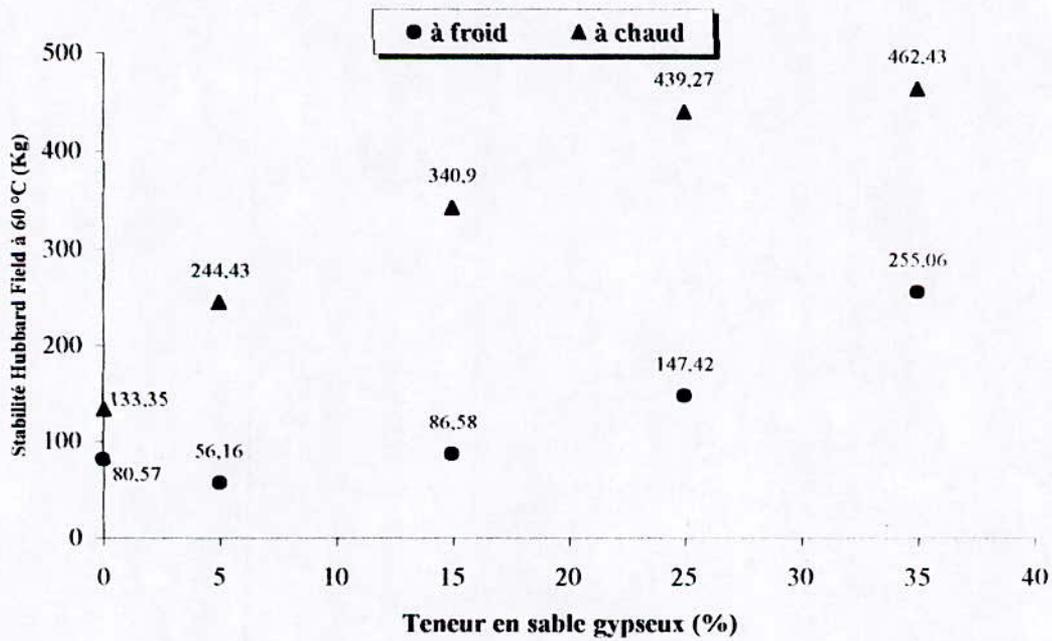


Figure VII.19 : Comparaison entre la stabilité de sable bitume enrobé à froid et enrobé à chaud (sable de dunes + sable gypseux à 60 °C).

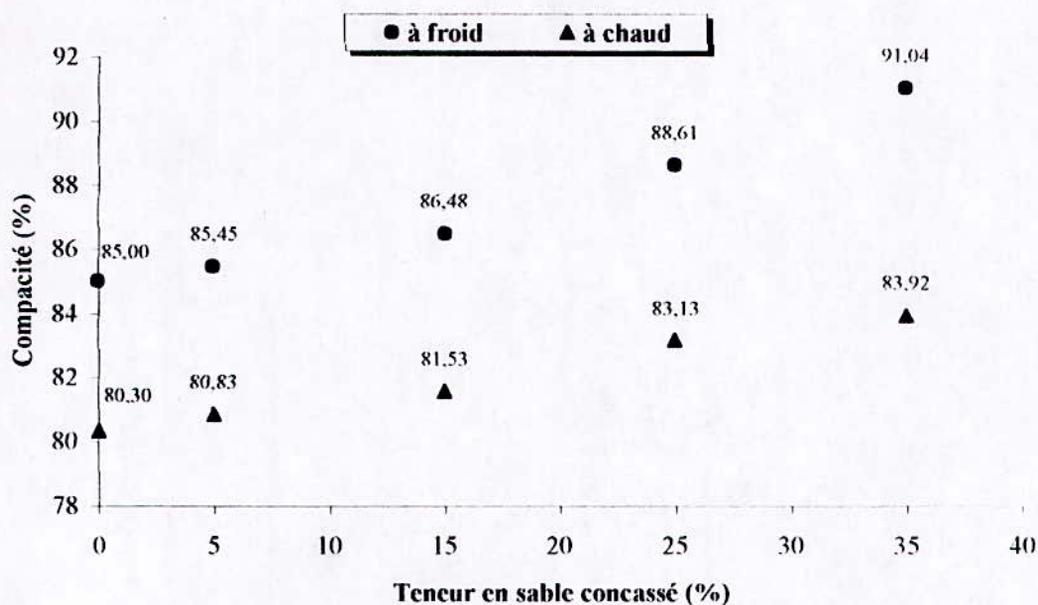


Figure VII.20 : Comparaison entre la compacité de sable bitume enrobé à froid et à chaud (sable de dunes + sable concassé).

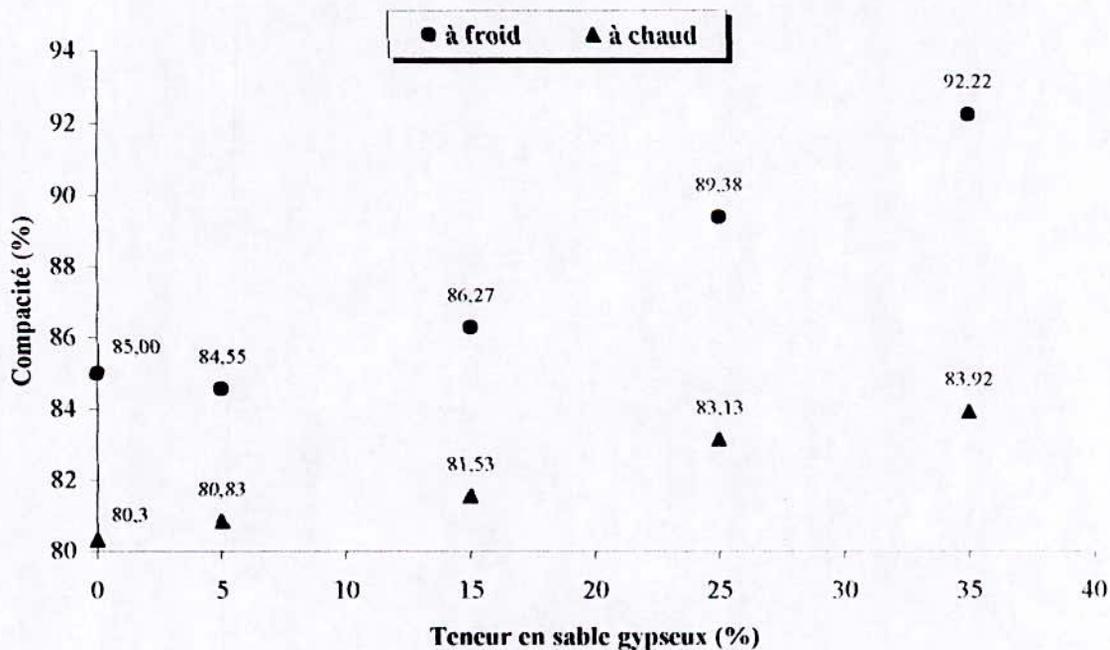


Figure VII.21 : Comparaison entre la compacité de sable bitume enrobé à froid et enrobé à chaud (sable de dunes + sable gypseux).

Interprétation.

On remarque que l'enrobage à chaud donne une stabilité plus importante que l'enrobage à froid, mais pour la compacité c'est le contraire.

REMARQUE.

L'enrobé à froid, c'est un matériau ouvert et par conséquent on devrait avoir des compacités plus petites que l'enrobé à chaud.

Conclusion

CONCLUSION.

Lors de cette étude nous avons présenté le contexte saharien avec ses caractéristiques et ses matériaux de construction. Dans ces régions comme partout ailleurs, il y a un grand intérêt à minimiser autant que possible le transport de matériaux.

Cependant, dans les régions où les graves sont éloignées, alors que les sables convenables sont abondants, il y a un intérêt économique à les employer.

Au laboratoire nous avons étudié le sable de dunes de Hassi Berkine et nous avons corrigé sa granulométrie avec l'apport de deux sables de la même région :

- Sable concassé de Haoud El Hamra (16,58 de fines) ;
- Sable gypseux (30,79 de fines).

Nous avons utilisé deux types d'enrobages :

- Sable bitume à froid avec l'utilisation du cut back 400/600 ;
- Sable bitume à chaud avec l'utilisation du bitume 80/100.

Donc, nous pouvons conclure compte tenu des résultats obtenus que :

1. La granularité du sable influe sur la stabilité ; en effet un sable à granulométrie étalée présente une meilleure stabilité qu'un sable à granulométrie serrée.
2. Il semble y avoir un optimum de teneur en liant, au vu des résultats obtenus, qui se situe entre 7 et 7,5 %.
3. L'apport d'un filler augmente la stabilité de l'enrobé, quel que soit le liant hydrocarboné utilisé, en apportant une correction de la granulométrie et en contribuant à la rigidification du mastic.

4. La formulation de sable bitume ne peut être généralisée au Sahara parce qu'elle dépend de la granulométrie du sable et par conséquent de la région.
5. L'enrobage à chaud donne une stabilité plus importante que l'enrobage à froid.

Nous avons vu l'intérêt que présentent les qualités des enrobés à froid (avec cut back 400/600 à base de bitume 80/100) et vu des résultats obtenus, nous formulons le souhait que, dans les années à venir, il faut utiliser et étudier le sable bitume à froid avec l'utilisation de cut back à base de bitume 40/50 ou d'émulsions.



Annexes

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

MÉTHODE PAR TAMISAGE À SEC APRÈS LAVAGE

I. DOMAINE D'APPLICATION.

Le présent document d'analyse granulométrique par tamisage au moyen de tamis à mailles carrées de dimensions inférieures ou égale à 100 mm s'applique aux sols, aux matériaux rocheux après extraction et aux sous-produits industriels utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil, dans la mesure où les sollicitations provoquées par le processus d'essai ne modifient pas leur structure.

Pour les particules de taille inférieure à 80 μ m, l'analyse granulométrique est faite par la méthode par sédimentation (norme **NF P 94-057**).

Ce présent document s'applique à la description des sols en vue de leur classification à la détermination des classes granulométrique et à la vérification de conditions granulométrique imposées.

II. DEFINITIONS.

Analyse granulométrique par tamisage : C'est l'ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant un échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

Refus sur un tamis : Partie du matériau retenue sur un tamis.

Tamisa ou passant : Partie du matériau passant à travers les mailles d'un tamis.

Classe granulométrique : Ensemble des éléments dont les dimensions sont comprises entre deux ouvertures « d » de tamis définissant un intervalle.

Pourcentage massique d'un tamisât : C'est le rapport, exprimé en pourcentage, de la masse sèche du passant à travers un tamis d'ouverture d, à la masse totale initiale du matériau sec passant à travers le tamis d'ouverture de maille d_m .

Courbe granulométrique : Représentation du pourcentage massique des différents tamisâts en fonction de la dimension nominale d'ouverture des tamis.

III. APPAREILLAGE.

- Un dispositif de lavage avec arroseur et, éventuellement, de malaxage ;
- Un jeu de tamis emboîtables à mailles d'ouvertures carrées conforme à la norme **NF ISO 565** dont les montures ont au moins :
 - Un diamètre ≥ 200 mm pour des ouvertures de maille inférieures à 10 mm ;
 - Un diamètre ≥ 250 mm pour des ouvertures de maille comprises entre 10 mm et 50 mm ;
 - Un diamètre ≥ 315 mm pour des ouvertures de maille supérieures à 50 mm ;

Toutes les montures des tamis d'une même colonne ont le même diamètre imposé par la dimension de la plus grande maille des tamis utilisés.

- Couvercles et fonds de tamis de même diamètre que tamis ;
- Récipients en matériau non altérable, brosse, pinceau, ... ;
- Balances dont les portées maximale et minimale sont compatibles avec les masses à peser et telles que les pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur mesurée ;
- Étuve : une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable à 50 °C et à 105 °C ;

IV. EXECUTION DE L'ESSAI.

IV.1. PRISE DE L'ÉCHANTILLON.

L'échantillon doit représenter le plus fidèlement possible la composition moyenne du matériau à essayer ; le poids de l'échantillon à analyser dépend des dimensions et du pourcentage des éléments le plus gros qu'il contient. Il est recommandé de se tenir aux limites définies par la formule suivante :

$$200 D < P < 600 D$$

- **P** : Poids de l'échantillon exprimé en grammes ;
- **D** : La dimension maximale exprimée en mm des plus gros grains.

IV.2. TAMISAGE PAR VOIE SECHE.

- Le matériau, préalablement échantillonné, est séché dans une étuve à 105 °C ;
- On procède à l'élimination des fines par lavage contenu ; pour cela on introduit le matériau dans un récipient pourvu à sa partie supérieure d'un bec. Le lavage est effectué par renouvellement continu de l'eau qui s'écoule par le bec, cette eau se déverse sur un tamis de 0,08 mm destiné à retenir les éléments supérieurs qui auraient peut être entraînés.
- On poursuit ce procédé jusqu'à ce que l'eau contenue dans le récipient devienne claire.
- On laisse le matériau à l'étuve jusqu'à dessiccation complète. On procède ensuite au tamisage par voie sèche soit manuellement, soit au tamis soit au vibro-tamis.

EQUIVALENT DE SABLE

I. OBJET.

La présente norme a pour objet de définir une caractéristique des sables intitulée « équivalent de sable » et de fixer la méthode permettant cette caractéristique.

II. DOMAINE D'APPLICATION.

La présente norme s'applique aux sables, d'origine naturelle ou artificielle, utilisés dans le domaine du bâtiment et de génie civil.

III. GENERALITES.

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

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

IV. APPAREILLAGE ET PRODUITS UTILISES.

IV.1. APPAREILLAGE.

IV.1.1. APPAREILLAGE D'USAGE COURANT.

- Tamis de 5 mm d'ouverture de mailles avec fond ;
- Spatule et cuillère ;
- Récipients de pesée pouvant recevoir environ 200 ml ;
- Balance dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1 % ;
- Chronomètre donnant la seconde ;
- Réglet de 500 mm, gradué en millimètres ;
- Goupillon pour le nettoyage des éprouvettes ;
- Bacs pour tamisage ;

IV.1.2. APPAREILLAGE SPECIFIQUE.

Éprouvettes cylindriques et transparentes en matière plastique (**figure 1**) (elles seront désignées dans la suite du texte par le terme « éprouvettes ») de diamètre extérieur constant à $\pm 0,5$ mm, de diamètre intérieur de $32 \text{ mm} \pm 0,5$ mm et d'une hauteur de $430 \text{ mm} \pm 0,1$ mm.

Chaque éprouvette porte des traits de repères à :

- $100 \text{ mm} \pm 0,25$ mm et $380 \text{ mm} \pm 0,25$ mm de la base ;

L'éprouvette est fermée par un bouchon de caoutchouc ; l'équipement comprend deux éprouvettes et deux bouchons.

Un piston taré, conforme à la figure 2, constitué par :

- Une tige de $440 \text{ mm} \pm 0,1$ mm de longueur ;
- Une embase de $25 \text{ mm} \pm 0,1$ mm de diamètre, dont la surface inférieure est plate, lisse et perpendiculaire à l'axe de la tige et qui comporte latéralement trois vis de centrage du piston dans l'éprouvette, avec un léger jeu. Ses parties plongeantes sont en métal inoxydable (laiton ou acier inoxydable) ;
- Un manchon de $10 \text{ mm} \pm 0,1$ mm d'épaisseur, qui s'adapte sur l'éprouvette cylindrique et permet de guider la tige du piston, en même temps qu'il sert à répéter l'enfoncement du piston dans l'éprouvette. Ce manchon comporte une vis qui permet de le bloquer sur la tige de piston, ainsi qu'une encoche pour le passage de le réglet ;
- Un poids fixé à l'extrémité supérieure de la tige pour donner à l'ensemble du piston taré, hormis le manchon, une masse totale de $1 \text{ kg} \pm 5$ g ;
- Un tube lavure, conforme à la figure 3, constitué par un tube rigide (acier inoxydable ou cuivre écroui) de diamètre extérieur de $6 \text{ mm} \pm 0,5$ mm et de diamètre intérieur de $4 \text{ mm} \pm 0,2$ mm.

Ce tube lavure est menu à la partie supérieure d'un robinet, à la partie inférieure d'un embout fileté (**figure 4**) en métal inoxydable formant dièdre, chaque face du dièdre étant percée d'un trou de $1 \text{ mm} \pm 0,1$ mm ;

- Un flacon transparent en verre ou en matière plastique, d'environ 5 l, menu d'un système de siphon, dont le font est placé à 1 m au-dessus de la table travail ;
- Un tube de caoutchouc ou de plastique de 1,50 m de longueur de 5 mm de diamètre intérieur reliant le tube lavure au siphon ;
- Un entonnoir à large ouverture pour transvaser l'échantillon dans l'éprouvette cylindrique (**figure 5**) ;
- Une machine d'agitation, manuelle ou électrique, capable d'imprimer à l'éprouvette un mouvement horizontal rectiligne et périodique de $20 \text{ cm} \pm 1$ cm d'amplitude et de période $1/3$ s.

IV.1.3. PRODUITS UTILISES.

IV.1.3.1. SOLUTION CONCENTREE.

La préparation de la solution concentrée s'effectue à partir :

- De chlorure de calcium cristallisé, qualité produit pur ;
- De glycérine à 99 % de glycérol, qualité pharmaceutique ;
- De formaldéhyde en solution en 40% en volume, qualité pharmaceutique ;
- D'eau distillée ou déminéralisée ;

Préparer une solution concentrée avec :

- 111 g \pm 1 g de chlorure de calcium anhydre ;
- 480 g \pm 5 g de glycérine ;
- 12 à 13 g de la solution de formaldéhyde ;

Il est recommandé de stocker la solution concentrée dans des flacons en matière plastique contenant 125 ml \pm 1 ml, pour des raisons de commodité d'emploi et de meilleure conservation de cette solution.

IV.1.3.2. SOLUTION LAVANT.

La solution lavante est préparée, en prenant 125 ml \pm 1 ml de la solution concentrée et en diluant à 5 l \pm 0,005 l avec de l'eau distillée.

Pour la préparation de la solution lavante, à partir de la solution concentrée, on peut se contenter sur les chantiers d'eau déminéralisée au lieu d'eau distillée et même d'eau potable.

Remplacer la solution lavante au bout d'un mois ou si un léger dépôt ou des troubles apparaissent.

En outre, rincer et nettoyer à l'eau distillée la bonbonne de 5 l à chaque remplissage.

Le mélange est vigoureusement agité au utilisation.

Dans le cas où la solution concentrée serait stockée dans un flacon de 125 ml, rincer plusieurs fois le flacon et verser les eaux de rinçage dans le flacon de 5 l avant de diluer le contenu de ce dernier à 5 l.

V. PREPARATION DE L'ECHANTILLON POUR ESSAI.

L'échantillon pour laboratoire doit être préparé suivant les prescriptions de la norme **p 18-553**. sa masse doit être telle que la fraction passant au tamis de 5 mm pèse 500 à 700 g.

Si l'échantillon pour laboratoire n'est pas humide, l'humidifier afin d'éviter les pertes de fines et la ségrégation.

Sur celui-ci, procéder à la préparation d'un échantillon pour la détermination de la teneur en eau « w » et de deux échantillons pour essai.

L'essai s'effectue sur le sable à sa teneur en eau naturelle, la masse sèche de l'échantillon pour l'essai doit être de $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$.

V.1. DETERMINATION DE LA TENEUR EN EAU DU TAMISAT.

A partir du premier échantillon, déterminer la teneur en eau w exprimée en pourcentage sur deux prises de 100 à 200 g par une méthode rapide de telle que : séchage au gaz, rayonnement infrarouge...

V.2. PREPARATION DES ECHANTILLONS POUR ESSAI.

La masse de l'échantillon pour essai, exprimée en grammes, est alors égale à :

$$120 \left(1 + \frac{w}{100} \right)$$

Dans tous les cas préparer deux échantillons par essai.

VI. EXECUTION DE L'ESSAI.

VI.1. MISE EN PLACE DE LA PREMIERE PRISE D'ESSAI.

La solution lavant ayant été siphonné dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait repère inférieur, la prise d'essai humide, correspondant à une masse sèche de $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de matériau, est versée soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement.

Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon. Laisser reposer dix minutes.

VI.2. AGITATION DE L'EPROUVETTE.

A la fin de cette période de dix minutes, boucher l'éprouvette à l'aide du bouchant de caoutchouc, puis fixer l'éprouvette sur la machine d'agitation.

Faire subir à l'éprouvette 90 cycles ± 1 cycle en $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$.

Remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essai.

VI.3. LAVAGE.

Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavante.

En descendant le tube laveur dans l'éprouvette rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavant, puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette.

Faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale en procédant de la manière suivante : l'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, remonter lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur, relever le tube laveur, de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à hauteur du trait repère. Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.

VI.4. MESURES.

Laisser reposer pendant $20 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$.

Au bout de ces 20 min, mesurer à l'aide de régllet la hauteur h_1 du niveau supérieur du flocculat par rapport au fond de l'éprouvette.

Mesurer également la hauteur h_2 du niveau supérieur de la partie sédimentée par rapport au fond de l'éprouvette.

Descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appui sur l'éprouvette.

Lorsque l'embase du piston repose sur la sédiment, bloquer le manchon coulissant sur la tige du piston. Introduire le régllet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston (**figure 2**).

Lire la hauteur du sédiment h_2 au niveau de la face supérieure du manchon.

Arrondir les hauteurs h_1 , h_2 et h_2 au millimètre le plus voisin.

VII. EXPRESSION DES RESULTATS.

L'équivalent de sable est donné par la formule :

$$E_s = 100 \times \frac{h_2}{h_1}$$

L'équivalent de sable visuel est, dans les mêmes conditions, donné par la formule :

$$E_s = 100 \times \frac{h_2'}{h_1}$$

Ces résultats sont donnés avec une décimale.

La détermination portant sur deux échantillons, la propreté du sable est la moyenne des deux valeurs obtenues.

La valeur de la moyenne est arrondie à l'entier le plus voisin.

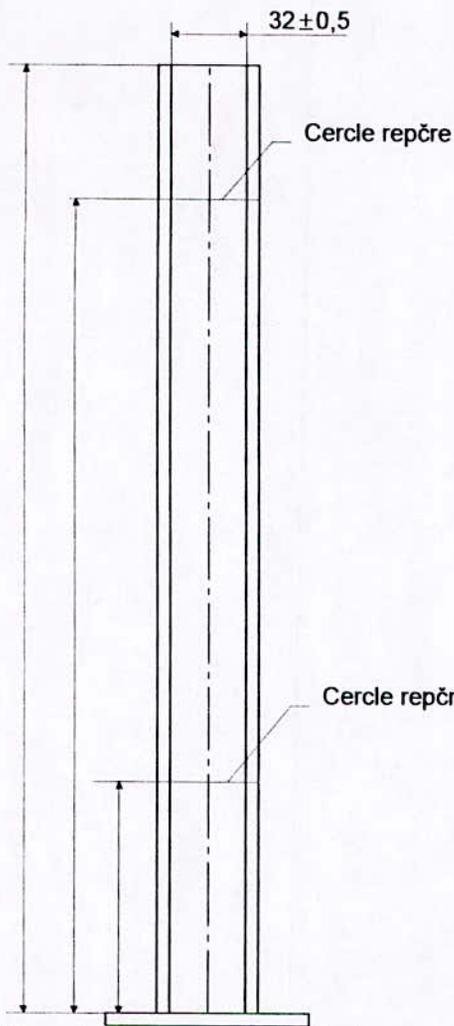


Figure 1. Epruvette d'équivalent de sable

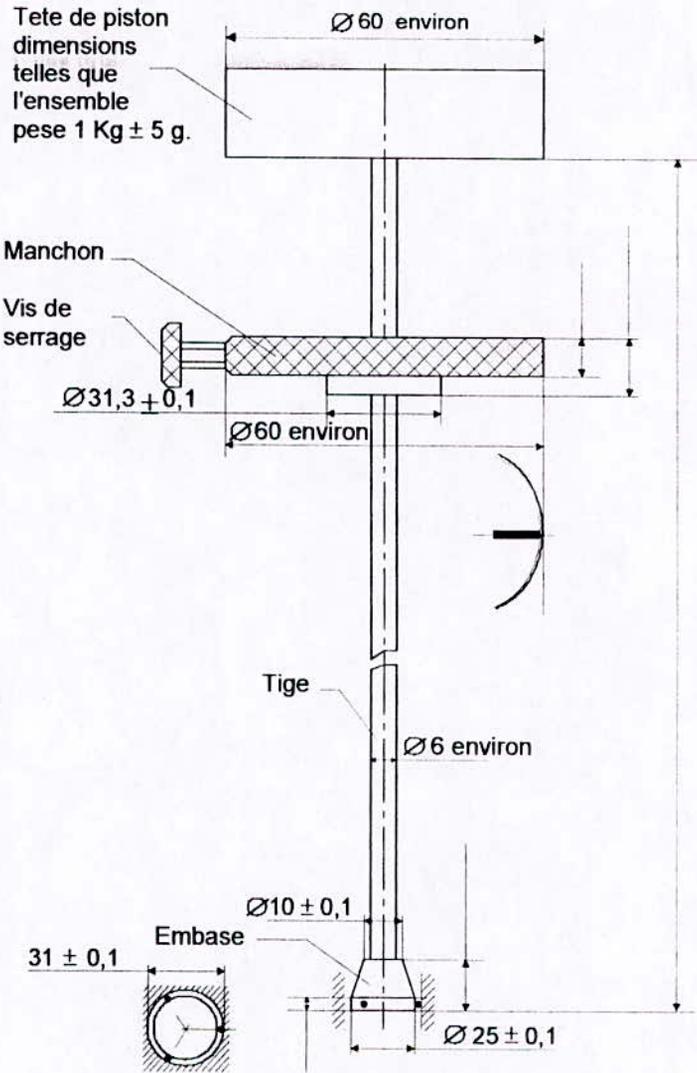


Figure 2. Piston d'essai

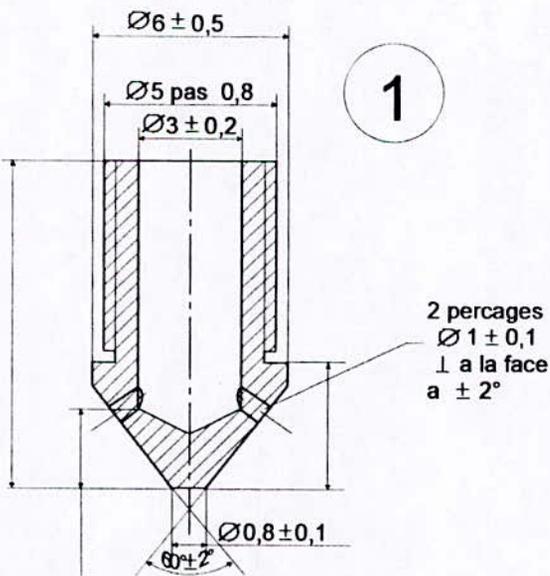


Figure 4. Détail de l'embout (forme diedre) échelle 5/1

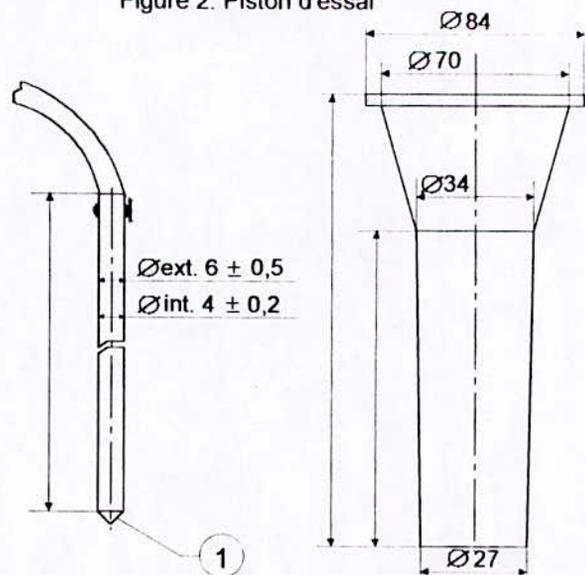


Figure 3. Tube laveur

Figure 5. Entronnoir

ESSAI DE MESURE DU COEFFICIENT DE FRIABILITÉ DES SABLES

I. OBJET.

La présente norme a pour but de définir le mode opératoire pour la détermination de la résistance à la fragmentation des sables.

II. DOMAINE D'APPLIQUATION.

La présente norme s'applique aux sables contenus dans les granulats d'origine naturelle ou artificielle dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

III. GENERALITES.

III.1. BUT DE L'ESSAI.

L'essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique des sables produits dans un cylindre en rotations bien définies, par fragmentation à l'aide d'une charge en présence d'eau.

Les éléments fins du sable, inférieur à 0,1 mm, ne soit pas étudiés.

Le sable est écrété à 2 mm.

III.2. DEFINITION.

L'évolution granulométrique sera caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0,05 mm produits au cours de l'essai.

Si M est la masse de produits au cours de l'essai, par définition le coefficient de friabilité du sable sera :

$$F.S = 100 \times \frac{m}{M}$$

IV. APPAREILLAGE.

IV.1. APPAREILLAGE SPECIFIQUE.

- L'appareil micro-Deval¹ ;
- Une charge abrasive constituée par les billes sphériques en acier inox **Z 30 C 13** conformément à la norme **NF A 35-572**, de diamètre $\begin{pmatrix} 30 & +0,1 \\ & -0,5 \end{pmatrix}$ mm $\begin{pmatrix} 18 & +0,1 \\ & -0,5 \end{pmatrix}$ et $(10 \pm 0,5)$ mm.

¹ **NF P 18-572** « Essai d'usure micro-Deval ».

IV.2. APPAREILLAGE D'USAGE COURANT.

Le matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau¹ et une analyse granulométrique par tamisage² dont un jeu de tamis de 0,05 – 0,1 – 0,2 – 1 – 2 – 8 mm de 200 mm de diamètre au moins.

V. MATERIAUX SOUMIS A L'ESSAI.

V.1. PRISE D'ECHANTILLON.

La masse du matériau envoyé au laboratoire sera d'au moins 2 000 g.

L'échantillon sera préparé suivant les prescriptions de la norme **NF P 18-553**.

L'essai sera effectué sur un sable 0,1/2 mm.

V.2. PREPARATION DE L'ECHANTILLON POUR ESSAI.

- Préparer l'échantillon pour l'essai de façon suivante :
 - Tamiser par voie humide les 2 kg de matériau sur les tamis 0,1 et 2 mm ;
 - Sécher à l'étuve de 105 °C jusqu'à masse constante ;
 - Homogénéiser et peser l'échantillon pour essai de 500 grammes, à deux grammes près.
- Préparer la charge par des billes d'acier de la façon suivante :
 - Prendre 9 billes de 30 mm de diamètre, dont la masse doit être de $\left(\begin{matrix} +10 \\ 975 \\ -50 \end{matrix} \right)$ g ;
 - Ajouter 21 billes de 18 mm de diamètre, dont la masse doit être de $\left(\begin{matrix} +10 \\ 490 \\ -50 \end{matrix} \right)$ g ;
 - Compléter avec des billes de 10 mm de diamètre, de façon que la masse totale de la charge soit de $(2\,500 \pm 4)$ g.

NOTE : L'usure de la charge doit être contrôlée périodiquement. Les billes de 18 et 30 mm sont contrôlées par pesée de l'ensemble et remplacement des plus usées par pesées à l'intérieur des tolérances. Les billes de 10 mm sont contrôlées en les faisant passer sur deux barreaux parallèles de 9,5 mm d'écartement.

VI. EXECUTION DE L'ESSAI.

- Introduire la charge dans le cylindre d'essai, disposé ouverture vers le haut, puis les 500 grammes de matériau préparé suivant les dispositions du paragraphe **V** ;
- Ajouter 2,5 litres d'eau, maître le couvercle ;
- Mettre le cylindre en rotation à la vitesse de (100 ± 5) tr /min pendant 1 500 tours ou 15 min ;

¹ **NF P 18-553** « Granulat – préparation d'un échantillon pour essai ».

² **NF P 18-560** « analyse granulométrique par tamisage ».

- Verser ensuite le matériau et la charge abrasive dans un bac, en évitant toutes les pertes, laver soigneusement l'intérieur du cylindre et recueillir l'eau et les parties minérales entraînées ;
- Verser lentement la totalité du contenu du bac sur 3 tamis de 8 mm (pour recueillir la charge abrasive), de 0,2 mm (pour soulager les tamis de 0,05 mm) et de 0,05 mm ;
- Laver l'ensemble sous un jet d'eau jusqu'à eau claire puis enlever le tamis de 8 mm ;
- Sécher les tamis de 0,2 et 0,05 mm à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante ;
- Tamiser à sec simultanément les refus à 0,2 et 0,05 mm ;
- Peser au gramme près l'ensemble des refus sur les deux tamis, recueillis avec soin, soit m' cette masse.

VII. EXPRESSION DES RESULTATS.

La masse des éléments inférieurs à 0,05 mm produits durant l'essai, à partir des 500 grammes initiaux est égale à $m = 500 - m'$.

Le coefficient de friabilité est alors :

$$F.S = 100 \times \frac{500 - m'}{M}$$

DÉTERMINATION DE LA VALEUR DE BLEU MÉTHYLÈNE PAR L'ESSAI À LA TACHE

I. DOMAINE D'APPLICATION.

La présente norme a pour objet de préciser le domaine d'application de la valeur de bleu méthylène d'un sol et ses modalités de détermination au moyen de l'essai dénommé essai au bleu méthylène « à la tache ».

La valeur de bleu méthylène d'un sol (VBS) constitue un paramètre d'identification qui mesure globalement la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans un sol ou un matériau rocheux.

Si l'un des paramètres d'identification sur lequel s'appuie la classification des sols d'écrite dans la norme **NF P 11-300**. La présente norme d'essai de détermination de la valeur de bleu de méthylène s'applique à tous les sols et matériaux rocheux.

II. PRINCIPE DE L'ESSAI.

L'essai consiste à mesurer, par dosage, la quantité de bleu méthylène pouvant s'absorber sur la prise d'essai. Cette valeur est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50 mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol, laquelle est avant tout régie par l'importance et l'activité des matériaux argileux présents dans la fraction fine du sol.

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

L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleue clair persistante se produit à la périphérie de la tache.

III. APPAREILLAGE ET MATERIEL D'ESSAI.

III.1. APPAREILLAGE SPECIFIQUE.

- Un dispositif de dosage permettant d'injecter par pas de 2,5 cm³ des volumes de solutions de bleu et de connaître la quantité totale injectée à ± 1 cm³;
- Un agitateur mécanique à ailettes tournant entre 400 et 700 tr/min le diamètre des ailettes est compris entre 70 mm et 80 mm ;
- Un récipient cylindrique (en verre, plastique ou métal inoxydable) d'une capacité de 3 000 cm³ et de diamètre de 155 mm ;
- Une baguette de verre de (8 ± 1) mm de diamètre ;
- Un papier filtre blanc avec teneur en cendres < 0,01 % ; de masse surfacique 95 g/cm² ; épaisseur 0,2 mm ; vitesse de filtration de 75 s ; diamètre de rétention 8 mm ;
- Un tamis de maille 5 mm et 50 mm, conforme à la norme **NF ISO 565**.

III.2. APPAREILLAGE COURANT.

- Balances dont les portées sont compatibles avec les masses à peser et permettant de faire les pesées avec une incertitude relative de 0,1 % de la valeur mesurée ;
- Thermomètre gradué en degrés (de 0° à 100°) ;
- Chronomètre indiquant la seconde ;
- Enceinte thermique ou appareil de séchage pour déterminer la teneur en eau des sols selon une méthode normalisée.

III.3. PRODUITS.

- Solution de bleu de méthylène de qualité médicale à 10 g/l \pm 0,1 g/l fabriquée depuis moins de 30 jours et conservée dans flacon bouché à l'abri de la lumière ;
- Eau déminéralisée ou distillée.

IV. PREPARATION DE L'ECHANTILLON.

Si le D_{\max} du matériau est ≤ 50 mm, prélever une masse du matériau à sa teneur en eau naturelle telle que : $m > 200 D_{\max}$ (m en gramme, D_{\max} en millimètres).

Si le D_{\max} du matériau est > 50 mm, prélever 10 kg de sa fraction 0/50 mm.

Si le D_{\max} de l'échantillon prélevé est ≥ 5 mm :

- Séparer par tamisage et si nécessaire par lavage la fraction 0/5 mm contenue dans cet échantillon ;
- Déterminer la proportion pondérale C de la fraction 0/5 mm (sèche) contenue dans le matériau (ou dans sa fraction 0/50 mm lorsque D_{\max} mm). Cette proportion peut être lue sur la courbe granulométrique du matériau si elle est connue par ailleurs ou sinon déterminée sur un autre échantillon représentatif du matériau.

Quarter et homogénéiser la fraction 0/5 mm ainsi séparée (ou la totalité de l'échantillon prélevé si $D_{\max} < 5$ mm) de manière à préparer trois prises d'essai de masse sensiblement égales (± 5 g) et de l'ordre de :

- 30 g à 60 g dans le cas des sols très argileux à argileux ;
- 60 g à 120 g dans le cas des sols moyennement à peu argileux.

La 1^{er} prise d'essai de masse m_1 est introduit dans le récipient de 3 000 cm³, mise en suspension dans 500 cm³ \pm 10 cm³ d'eau déminéralisée et dispersée à l'aide de l'agitateur à ailettes (vitesse 700 tr/min \pm 100 tr/min) au minimum durant 5 min et dans tous les cas jusqu'à disparition visuelle de tout agglomérat de particules d'argile dans la suspension.

La 2^{eme} prise d'essai de masse m_2 est utilisée pour déterminer la teneur en eau de chacune des prises d'essai.

La 3^{eme} prise d'essai est conservée dans un sac ou récipient hermétique en prévision de l'éventualité où l'essai devrait être renouvelé (mauvaise estimation des incréments de solution de bleu ajoutés après chaque teste.

V. MODE OPERATOIRE.

La prise d'essai étant mise en imbibition comme décrit précédemment, procéder au dosage au bleu de méthylène comme indiqué ci-après.

A l'aide de dispositif de dosage, introduire dans la suspension, maintenue en agitation permanente à $400 \text{ tr/min} \pm 100 \text{ tr/min}$, 5 à 10 cm^3 de solution de bleu selon l'argilosité estimée du matériau (10 cm^3 pour les matériaux les plus argileux) ; au bout $1 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$, procéder à l'essai de la tache sur papier filtre de la manière suivante :

- Prélever à l'aide de la baguette de verre une goutte de suspension et la déposer sur le papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau coloré bleu sombre entouré d'une zone humide incolore ;
- La goutte prélevée doit former un dépôt central compris entre 8 mm et 12 mm de diamètre.

Procéder à des injections successives par pas de 5 cm^3 (selon l'argilosité du matériau) de solution de bleu jusqu'à ce qu'apparaisse une auréole bleu clair dans la zone humide périphérique de la tache. L'essai est dit alors positif. A partir de ce moment, laisser se poursuivre l'adsorption du bleu et effectuer des essais, de minute en minute, sans ajout de solution.

Si l'auréole bleue clair disparaît avant la cinquième minute, procéder à de nouvelle injection de bleu avec des pas de 2 cm^3 à 5 cm^3 , selon l'argilosité du matériau, au lieu et place des pas de 5 cm^3 à 10 cm^3 introduits précédemment, car à ce stade de l'essai de suspension et en voie de saturation.

Chaque addition est suivie d'essais effectués de minute en minute. Ces opérations sont renouvelées jusqu'à ce que l'essai devienne positif pendant cinq minutes consécutives. Le dosage est alors terminé et l'on détermine le volume total (v) de la solution de bleu nécessaire pour atteindre l'adsorption totale.

Le récipient et les accessoires en contact avec la suspension de sol et de bleu sont lavé et abondamment rincés à l'eau claire si des produits nettoyant ont été utilisés.

VI. CALCULS ET EXPRESSIONS DES RESULTATS.

Les grandeurs mesurées au cours de l'essai sont :

m_1 : masse humide de l'échantillon constituant la première prise d'essai (en grammes).

m_2 : masse humide de l'échantillon séché à l'étuve (en grammes).

m_3 : masse sèche de l'échantillon séché à l'étuve (en grammes).

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

Les calculs à exécuter sont :

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

$$w = \frac{m_2 - m_3}{m_3}$$

- masse sèche de la prise d'essai :

$$m_0 = \frac{m_1}{1 + w}$$

- masse de bleu introduit (en grammes) :

$$B = V \times 0,01$$

L'expression du résultat est (en grammes de bleu pour 100 de sol sec)

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

Pour les matériaux dont le $D_{max} > 5$ mm, l'expression du résultat est :

$$VBS = \frac{B}{m_0} \times C \times 100$$

Avec C comme proportion de la fraction 0/5 mm dans la fraction 0/50 mm du sol sec.

ESSAI HUBBARD FIELD

I. OBJET.

L'essai de stabilité Hubbard-Field a été adopté pour l'étude des mortiers hydrocarbonés c'est-à-dire des matériaux enrobés dont les agrégats passent à la passoire à trous ou tamis à maille carrée (5 mm pour la passoire, 4 mm pour le tamis).

La valeur de la stabilité donne une indication globale de la qualité du mortier étudié. La comparaison des valeurs de stabilité, obtenues pour différentes formules de composition préalablement établies, permet de faire le choix entre ces formules.

II. PRINCIPE DE L'ESSAI.

La mesure de la stabilité Hubbard-Field dans le cas d'un mortier hydrocarboné consiste à mesurer la pression qui provoque l'extrusion ou fluage d'une briquette de 100 g et de 50,8 mm de diamètre à travers un anneau de diamètre inférieur de 44,5 mm. Cette compression est appliquée à la vitesse de 1 mm/s sur une briquette amenée à la température soit de 18 °C, soit de 60 °C.

On appelle stabilité Hubbard-Field, la charge, exprimée en kg, qu'il faut exercer pour provoquer le fluage.

III. DOMAINE D'APPLICATION.

La méthode s'applique non seulement aux mortiers, enrobés, et bétons hydrocarbonés mais aussi aux sols-bitume, sols-goudron, sols-émulsion etc. Elle est particulièrement indiquée pour les enrobés préparés à froid, par exemple au bitume fluide.

IV. APPAREILLAGE.

1. L'appareil Hubbard-Field se compose de :

- 1 moule à briquettes (avec piston de compression et plaque de base) ;
- 1 cylindre d'essai (avec piston de compression, support d'anneau et anneau d'essai) ;
- 2 pilons de damage ;

Pour une exécution plus commode des essais il est préférable de disposer de 6 appareils mais avec un seul jeu de pilons de damage. On peut cependant se contenter d'un seul appareil.

2. Une presse hydraulique développant un effort d'au moins 5 tonnes et permettant une vitesse d'application de 1 mm/s ;
3. Plusieurs récipients de pesée et de malaxage ;
4. Cuillers ou grandes spatules ;
5. 1 étuve réglée à $60\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}^1$;
6. 1 armoire réglée à $18\text{ °C} \pm 0,5\text{ °C}$;
7. 1 balance de portée minimum 2 kg sensible au décigramme ;

¹ Selon les cas, on se servira ou de l'étuve à 60 °C ou de l'armoire à 18 °C.

8. 1 thermomètre au 1/2 degrés (1 °C ambiante à 100 °C) ;
9. 1 un récipient pour le transport dans l'eau à 60 °C des briquettes et du matériel d'essai ;

V. MODE OPERATOIRE.

Le mode opératoire, ci-dessous, est décrit pour un mortier bitumineux préparé à chaud. Il y a seulement lieu de modifier la confection des briquettes dans le cas d'utilisation de bitume fluide, d'émulsion, ou de goudron.

Chaque résultat consigné dans le procès-verbal est généralement la moyenne de 3 essais. Aussi pour un mélange, 6 éprouvettes sont confectionnées, 3 pour la valeur de stabilité à 18 °C, 3 pour la valeur de stabilité à 60 °C.

V.1. PREPARATION DU MELANGE ET COMPOSITION DES EPROUVETTES.

On pèse successivement, dans un récipient d'environ 1 000 cm³ de capacité, les quantités nécessaires de chacun des agrégats y compris le filler, calculées pour donner une gâchée totale de 700 g (avec le liant).

Les pesées sont faites au dg près. (Si les fines sont trop abondantes, il est préférable de peser le filler à part.) Puis, le récipient et son contenu sont placés 1 heure en étuve à 140 °C.

Dans un deuxième récipient en métal, de 1 000 cm³ de capacité, on pèse, au dg près, la quantité prévue de liant. Le récipient et le bitume ainsi que les moules à briquettes sont placés environ pendant 1/4 d'heure dans l'étuve à 140 °C. On s'arrange pour que ce temps de chauffage se termine avec celui des agrégats. On veille à ce que le bitume ne dégage pas de vapeurs.

On sort les récipients de l'étuve, on verse rapidement les agrégats dans le récipient contenant le bitume et on effectue le malaxage sur une plaque chauffante. Dans le cas où le filler a été pesé à part, on commence par enrober les agrégats puis on ajoute le filler.

On sort de l'étuve un moule à briquette, on le place sur la plaque de base, et le moule est enduit intérieurement d'oléate de soude glycéricé¹ puis on le remplit de 100 g, pesés au dg près, de mélange chaud.

On dame d'abord de 60 coups de pilon n° 1, puis par 20 coups de pilons n° 2. chaque coup consiste à laisser tomber le pilon sous son propre poids, d'une hauteur d'une dizaine de centimètres.

On introduit ensuite le pilon de compression de façon à ce que la partie annelée se trouve à l'intérieur du cylindre et l'on place le tout sur le plateau d'une presse.

On élève rapidement la charge de compression jusqu'à atteindre 4 200 kg (soit 210 kg/cm²) et on maintient 5 min à cette valeur.

On décomprime lentement puis on démoule, en chassant, à l'aide de la presse, la briquette dans un cylindre de diamètre plus grand que celui du moule.

¹ L'oléate de soude glycéricé est préparé en faisant avec le minimum d'eau une pâte d'oléate de sodium que l'on amène ensuite à une consistance presque liquide en ajoutant de la glycérine.

Si l'on doit déterminer la densité apparente du mélange on prend. Les mesures de 3 hauteurs et de 3 diamètres (au pied à coulisse au 1/10 mm près) et on pèse au dg près.

V.2. ESSAI DE STABILITE.

Les 6 briquettes sont placées pour 24 heures en armoire spéciale¹, réglée à +18 °C ± 0,5 °C.

Au bout de ce temps on place dans une étuve à 60 °C ± 0,5 °C, pour une durée de 1 heure, les 3 briquettes destinées à l'essai, ainsi que le matériel d'essai en (cylindre, support d'anneau, anneau d'essai et piston de compression).

Pour l'essai à 18 °C, on introduit la briquette dans le cylindre d'essai en la plaçant au-dessous de l'anneau préalablement fixé sur son support, puis on introduit le piston de compression. On porte le tout entre les plateaux de la presse hydraulique. On exerce la compression à la vitesse de 1 mm/s jusqu'à ce que la charge soit passée par un maximum, c'est-à-dire jusqu'à ce que l'on ait forcé la briquette à fluer à travers l'anneau. Un index mort entraîné par l'aiguille du manomètre permet généralement de repérer la valeur de cette charge maximale.

Pour l'essai à 60°C, on place le cylindre d'essai contenant la briquette et le piston dans un bain d'eau à 60°C. Le niveau de l'eau est tel que la briquette est entièrement immergée.

On porte l'ensemble, récipient et cylindre d'essais, entre les plateaux de la presse et on exerce la compression comme précédemment décrit.

V.3. PRESENTATION DES RESULTATS.

Ils sont présentés comme suit :

Eprouvettes Hubbard-Field de 100 g (compressées à 210 kg/cm²).

- Densité par la détermination des mesures ;
- Stabilité Hubbard-Field à 18 °C en kg ;

Pour une vitesse de déformation de 1 mm /s.

24 heures après confection de l'éprouvette.

- Pour une surface de 20 cm² environ ;
- Soit en kg /cm² (le résultat précédent divisé par 20) ;

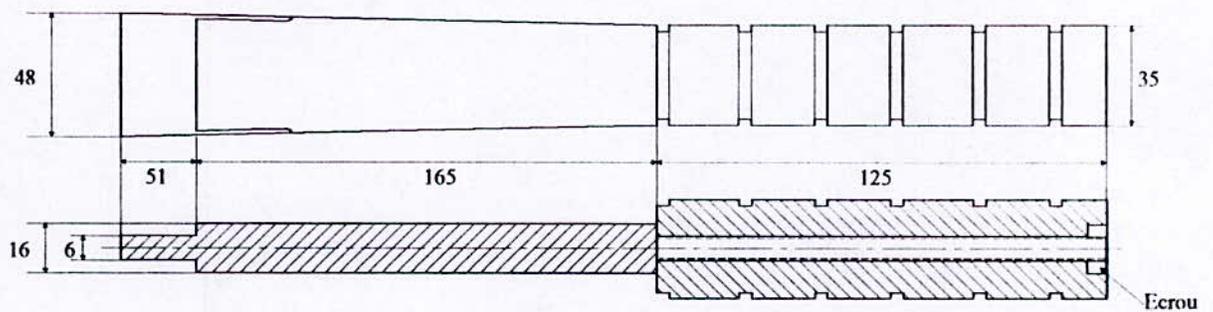
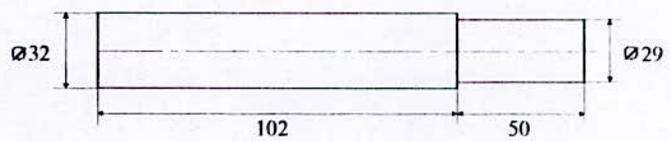
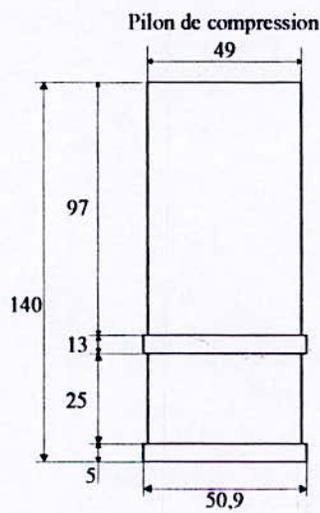
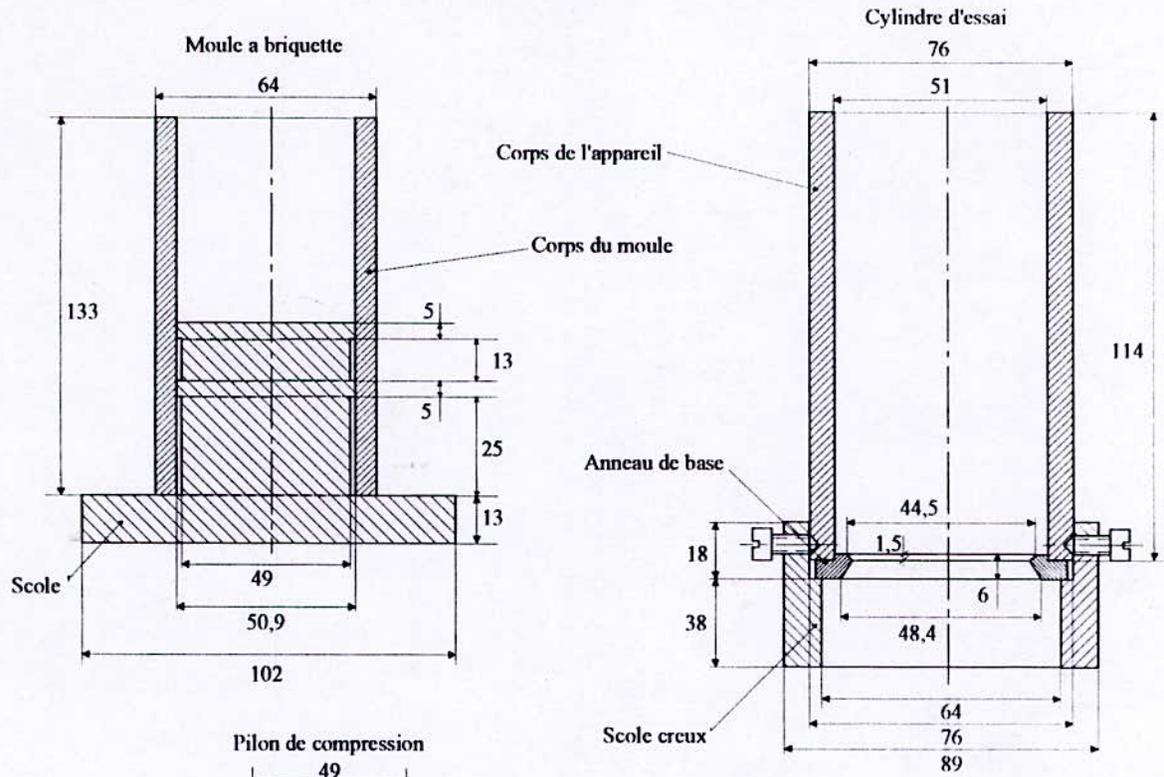
- Stabilité Hubbard-Field à 60 °C en kg ;

Pour une vitesse de déformation de 1 mm/s.

24 heures après confection de l'éprouvette.

- Pour une surface de 20 cm² environ ;
- Soit en kg/cm².

¹ A défaut de cette armoire spéciale, les placer dans une enceinte à température la plus voisine de 18 °C.



Pilon de damage n° 1

BITUMES FLUIDIFIÉS ET BITUMES FLUXÉS

DÉTERMINATION DE LA PSEUDO-VISCOSITÉ

I. OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION.

La présente norme a pour objet la détermination de la pseudo-viscosité, exprimée en unités conventionnelles, des bitumes fluidifiés et des bitumes fluxés au moyen d'un appareil normalisé. Elle ne s'applique pas aux bitumes fluidifiés ou fluxés contenant des polymères¹.

II. PRINCIPE.

L'échantillon est chauffé dans des conditions normalisées. Une prise d'essai est versée dans l'appareil et maintenue à la température voulue ; la durée d'écoulement de 50 ml indique conventionnellement la valeur de la pseudo-viscosité du bitume fluidifiés ou du bitume fluxés.

III. APPAREILLAGE.

III.1. VISCOSIMETRE.

Le viscosimètre ² (**figure 1**) consiste essentiellement en un récipient présentant au centre de sa base un orifice pouvant être obturé. Il existe deux types de récipients différant uniquement par la dimension de l'orifice, le diamètre du plus grand orifice étant de 10 mm et celui du plus petit de 4 mm ; ces deux appareils sont désignés dans la suite de l'exposé respectivement par les mentions « orifice 10 mm » et « orifice 4 mm ».

L'« orifice 10 mm » est employé dans le cas de bitumes fluidifiés ou de bitumes fluxés dont la pseudo-viscosité à 25 °C est égale ou supérieure à 10 s ; si la pseudo-viscosité à 25 °C dépasse 600 s, la température d'essai est portée à 40 °C.

L'orifice 4 mm est utilisé à 25 °C pour les bitumes fluidifiés ou les bitumes fluxés dont la pseudo-viscosité, à cette température, déterminée avec l'« orifice 10 mm », est inférieure à 10 s.

Le récipient est un cylindre en laiton dont le fond est formé par une plaque circulaire en bronze phosphoreux ; La face inférieure du fond est conique pour faciliter l'écoulement du produit.

L'obturateur est constitué par une sphère en bronze phosphoreux fixé à une tige en métal monel ; cette tige est munie d'un ergot indicateur de niveau et porte à sa partie supérieure une demi-sphère permettant de faire reposer verticalement l'obturateur sur son support, en position d'écoulement.

¹ Produits nommés en anglais cut-back bitumen et road-oils.

² Viscosimètre SVT « Standard Tar Viscosimeter » nommé antérieurement BRTA « British Road Tar Association »

III.2. BAIN D'EAU.

Le bain d'eau (**figure 1**) possède un manchon cylindrique destiné à supporter le récipient. Le bain qui est de forme cylindrique peut soit porter un tube latéral auquel on peut appliquer une source de chaleur, soit être chauffé électriquement.

Le manchon est placé à l'intérieure d'un cylindre muni de quatre pales formant agitateur ; cet agitateur est surmonté d'un couvercle bombé muni d'un support destiné au thermomètre du bain, d'un autre pour l'obturateur et d'une poignée d'entraînement en matière isolante.

On peut également utiliser un grand bain d'eau pouvant renfermer plusieurs récipient ; dans ce cas, ceux-ci doivent être séparés les uns des autres et distants des parois du bain de 55 mm moins. Le bain peut être muni d'un dispositif de contrôle thermostatique.

III.3 THERMOMETRE.

Conforme aux spécifications suivantes :

Désignation	Caractéristiques
Immersion d'emploi	65 mm
Echelle de température	0 °C à 45 °C
Graduation	0,2 °C
Plus long graduation chaque	0 °C et 5 °C
Graduation chiffrée tous les	5 °C
Exactitude des graduations	± 0,2 °C
Longueur totale	340 mm ± 10 mm
Diamètre de la tige	5,5 mm à 8,0 mm
Diamètre du réservoir	au plus égal à celui de la tige
Longueur du réservoir	10 mm à 16 mm
Longueur de la partie graduée	150 mm à 190 mm
Distance du fond du réservoir à la graduation 0 °C	115 mm minimum
Chambre d'expansion permettant de monter à	100 °C
Forme du sommet	anneau

III.4. EPROUVETTE.

Eprouvette cylindrique de 100 ml, présentant des graduations correspondant aux capacités 20 ml, 25 ml et 75 ml, conforme à la norme **NF B 35-302**.

III.5. CHRONOMETRE.

Précis à 0,2 s près.

IV. REACTIFS.

Huile minérale fluide.

Solvant convenable des bitumes.

V. MODE OPERATOIRE.

VI.1. PREPARATION DE L'ECHANTILLON¹.

Prélever autant que possible un échantillon ne renfermant pas plus de 0,2 % d'eau, le porter à une température de 60 °C dans un récipient bien clos, pendant 3 heures, en ayant soin d'éviter toute surchauffe locale et toute perte de constituant volatil. Puis laisser refroidir, toujours dans le récipient clos, jusqu'à une température légèrement supérieure à celle de la mesure.

VI.2. EXECUTION DE L'ESSAI.

Nettoyer le récipient du viscosimètre et l'obturateur avec un solvant approprié, puis le sécher soigneusement pour éliminer toute trace de solvant. S'il est nécessaire d'en frotter l'intérieure, ou de nettoyer l'orifice d'écoulement, ne pas utiliser des produits abrasifs, susceptibles de laisser des particules pouvant gêner l'écoulement libre de la prise d'essai à travers l'orifice. L'emploi d'un fort papier filtre est recommandé.

Fermer la partie inférieure de l'orifice du récipient avec un bouchon de liège, mettre en place l'obturateur sur l'orifice, remplir le récipient avec la prise d'essai de l'échantillon préparé comme ci-dessus, jusqu'à ce que l'ergot de l'obturateur, tenu verticalement, soit juste immergé.

Poser sur la partie supérieure du récipient un deuxième bouchon muni d'un trou central et d'une échancrure latérale pouvant laisser passer la tige de l'obturateur. Introduire un thermomètre dans le trou central au bouchon et le disposer de manière que son réservoir soit approximativement au centre géométrique de la prise d'essai.

Immergé verticalement le récipient jusqu'au rebord, pendant 1 h 30 min, dans un bain d'eau maintenu à une température égale, 0,2 °C près, à celle qui est prévue pour l'essai.

Placer le récipient dans le manchon du bain d'eau du viscosimètre, enlever le thermomètre et les bouchons. Extraire tout excès de produit pour que son niveau final soit à la hauteur de la pointe de l'ergot, l'obturateur étant en position verticale.

Maintenir la température du bain à 0,2 °C près durant l'essai et agiter le bain à de fréquents intervalles.

Placer l'éprouvette contenant 20 ml d'huile minérale fluide sous l'orifice du récipient, relever l'obturateur puis l'accrocher sur le support. Déclencher le chronomètre à l'instant où liquide atteint la graduation de 25 ml dans l'éprouvette et l'arrêter lorsque la graduation 75 ml est atteints. En aucun cas, le filât de bitume fluidifié ou fluxé ne doit toucher les parois de l'éprouvette avant l'atteindre la surface de liquide.

¹ Echantillonnage **NF T 66-001**

Noter la durée de l'écoulement en secondes.

VI. EXPRESSION DES RESULTATS.

La pseudo-viscosité est conventionnellement égale à la valeur moyenne, arrondie à la seconde la plus proche, des durées d'écoulement obtenues lors des deux premières déterminations ne différant pas entre elles de plus des écarts indiqués dans la colonne répétabilité du tableau 1.

VII. FIDELITE.

La fidélité de la méthode, établie à partir de l'examen statistique de résultats d'essai inter laboratoires est la suivante :

VII.1. REPETABILITE.

La différence entre des résultats d'essais successifs obtenus par le même opérateur avec le même appareillage dans des conditions opératoires identiques et sur même produit, ne doit pas, au cours d'une longue série d'essais effectués en appliquant correctement et normalement

La méthode d'essai, dépasser plus d'une fois sur vingt les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous.

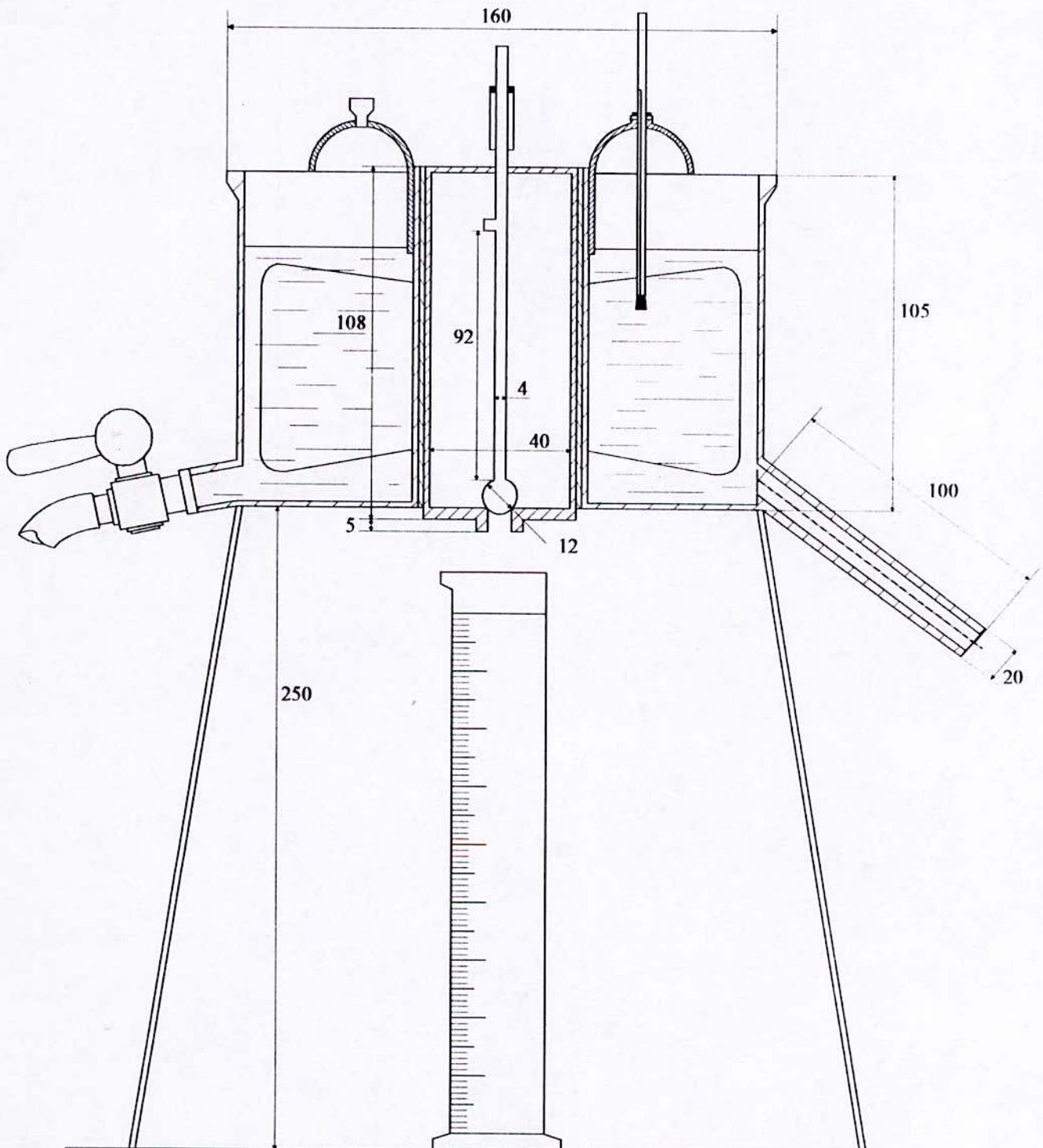
VII.2. REPRODUCTIBILITE.

La différence entre deux résultats uniques et indépendants obtenus par différents opérateurs travaillant dans des laboratoires différents sur un même produit, ne doit pas, au cours d'une longue série d'essais effectués en appliquant normalement et correctement méthode, dépasser plus d'une fois sur vingt les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous.

Durée d'écoulement	Répétabilité	Reproductibilité
Moins de 20	2	2
20 à 40	2	10% de la moyenne
plus de 40	5% de la moyenne	10% de la moyenne

VIII.3. PROCES-VERBAL D'ESSAI.

Le procès-verbal d'essai doit indiquer les résultats et mentionner en outre toutes conditions de l'essai, en particulier le récipient employé et la température de l'essai, ainsi que les incidents éventuels susceptibles d'avoir agi sur les résultats.



Les cotes sont en millimetres

Figure 1. Viscosimetre STV pour la mesure de la pseudoviscosité.

ESSAI DE PÉNÉTRATION STANDARD À 25 °C

I. DEFINITION.

La pénétration d'un liant est l'expression de la profondeur à laquelle pénètre une aiguille type, de dimension déterminée, dans un échantillon de bitume sous des conditions définies de charge, de temps et de température ; (100 grammes, 5 secondes, 25°C).

Elle se mesure surtout pour les bitumes.

II. DOMAINE D'APPLICATION.

La présente norme s'applique aux sables d'origine naturelle ou artificielle, utilisés dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

III. BUT DE L'ESSAI.

Le degré de pénétration mesure la consistance du liant ; c'est à dire la propriété de ses diverses particules d'adhérer entre elles. Cette qualité permet au liant de résister aux efforts auxquels il est soumis, elle varie encore avec le climat de la région où le liant doit être employé et avec le trafic de la route où il est utilisé.

IV. APPAREILIAGE.

- Un pénétromètre donnant le 1/10 de millimètre ;
- Un récipient standard de forme cylindrique à fond plat de :
 - 35 mm de hauteur ;
 - 55 mm de diamètre ;
- Une aiguille confectionnée à partir d'une cbaquette en acier inoxydable, ayant :
 - 50,8 mm de longueur ;
 - 1,00 à 1,02 mm de diamètre ;
- Un bain d'eau maintenu à $(25,0 \pm 0,1)$ °C.

V. MODE OPERATOIRE.

a. Préparation de la prise d'essai.

Chauffer l'échantillon avec précaution, pour éviter les surchauffes locales, à la température la plus basse à laquelle il devient suffisamment fluide pour pouvoir être versé. En aucun cas la température de l'échantillon ne doit être supérieure à 100 °C à son point de ramollissement déterminé par la méthode « Bille et anneau ». Agiter l'échantillon pour l'homogénéité en évitant l'inclusion de bulles d'air, ensuite verser lentement dans le gobelet préchauffé, toujours pour éviter la formation de bulles. Après refroidissement à la température de l'essai, la hauteur de l'échantillon dans le gobelet doit être supérieure d'au moins 10 mm à la profondeur à laquelle l'aiguille est susceptible de pénétrer.

Protéger le gobelet et son contenu de la poussière par un couvercle simplement posé, l'abandonner dans un local dont la température est comprise entre 20 et 30 °C pendant 1 heure à 1 heure et 30 minutes. Placer ensuite le gobelet dans le bain d'eau ainsi

que le récipient de transfert et l'y laisser 1 heure à 1 heure et 30 minutes, le bain d'eau étant maintenu à $25\text{ °C} \pm 0,1\text{ °C}$.

Il est indispensable que la durée comprise entre la fin du coulage de l'échantillon dans le gobelet et la mesure de la pénétrabilité ne dépasse pas 3 heures (1 heure et 30 minutes + 1 heure et 30 minutes).

La prise d'essai doit être immergée dans à une profondeur d'au moins 100 mm et doit reposer sur une tablette perforée à au moins 50 mm du fond du bain.

b. Détermination de la pénétrabilité.

Placer la prise d'essai dans le récipient de transfert d'une quantité suffisante d'eau provenant du bain pour recouvrir complètement le gobelet. Placer ensuite ce récipient sur le plateau du pénétromètre. Déplacer l'aiguille chargée, la charge totale étant de $(100,0 \pm 0,1)$ g pour qu'elle effleure exactement la surface de la prise d'essai, l'affleurement étant détenu en faisant coïncider la pointe de l'aiguille avec son image réfléchi sur de la prise d'essai. Utiliser à cette fin une source lumineuse convenablement placée.

Ramener à 0 l'aiguille du cadran, libérer l'aiguille pendant la durée spécifiée de $(5,0 \pm 0,1)$ s, le bloquer aussitôt et mesurer la profondeur d'enfoncement en dixièmes de millimètre.

Effectuer trois mesures en des points de la surface de la prise d'essai distants d'au moins 10 mm les uns des autres et du bord du gobelet.

Ces trois mesures peuvent être effectuées en tournant le gobelet après chaque mesure :

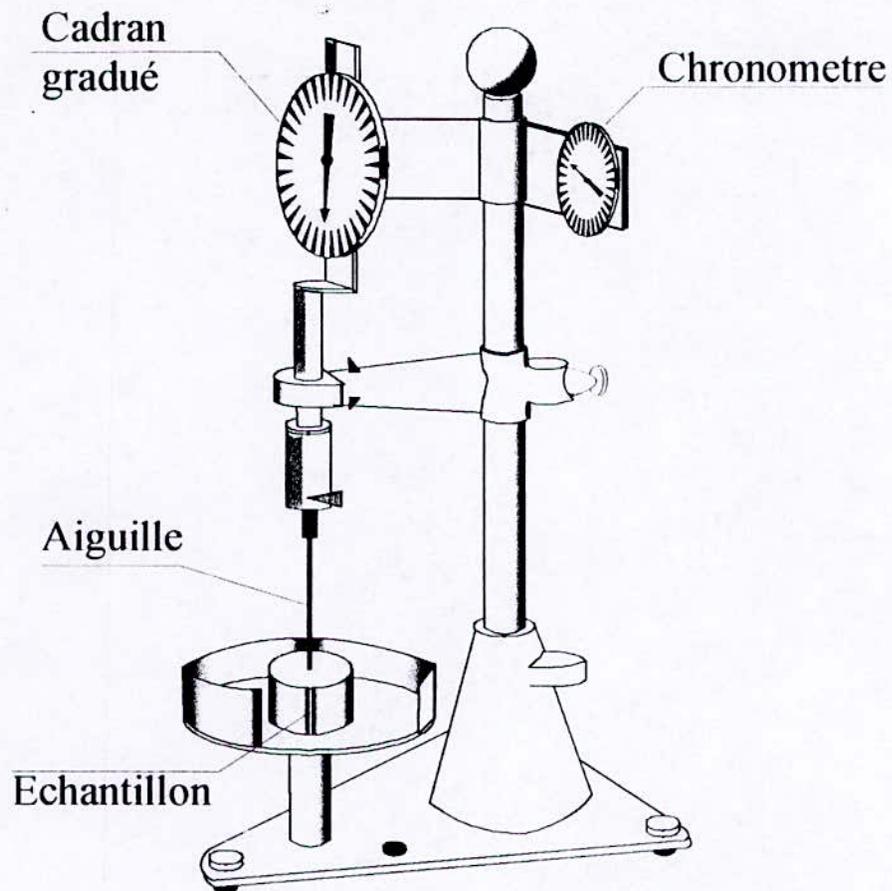
- Soit successivement avec la même aiguille ;
- Soit avec trois aiguilles différentes propres, lorsque la pénétrabilité est supérieure à 150 dixièmes de millimètre, l'aiguille précédemment utilisée étant laissée en place.

VI. PRECAUTIONS.

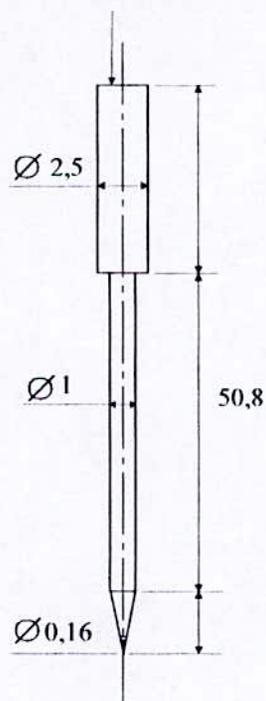
- Après chaque mesure, replacer la prise d'essai et le récipient de transfert dans le bain d'eau ;
- Avant chaque mesure, l'aiguille doit être nettoyée à l'aide d'un chiffon propre imbibé de toluène ou de tout autre solvant convenable, puis avec un chiffon propre et sec.

REMARQUE.

Il est formellement déconseillé de nettoyer les aiguilles avec des produits possédant des propriétés lubrifiantes (silicones...).



Aiguille



Mesure de la pénétrabilité

DÉTERMINATION DU POINT DE RAMOLLISSEMENT DES PRODUITS BITUMINEUX

I. OBJET ET DOMAINE D'APPLICATION.

La présente norme décrit les conditions de déterminations, par la méthode « Bille et anneau », du point de ramollissement des produits bitumineux, dont cette caractéristique est comprise entre 30 et 200 °C.

II. DEFINITION.

Le point de ramollissement est la température à laquelle un produit bitumineux atteint un certain degré de ramollissement dans les conditions normalisées.

III. PRINCIPE.

Une bille d'acier d'une masse déterminée est placée sur une prise d'essai du produit, contenue dans un anneau de métal de dimensions normalisées. L'ensemble est chauffé à une vitesse constante déterminée. La température à laquelle la prise devient assez molle pour que la bille, ayant pénétré le produit bitumineux, tombe d'enveloppée de celui-ci, d'une hauteur déterminée, est prise comme le point de ramollissement du produit étudié.

IV. APPAREILLAGE.

1. ANNEAUX, SUPPORT D'ANNEAUX ET MONTAGE DE L'ENSEMBLE :

- **Anneaux à épaulement en laiton** conformes aux dimensions indiquées sur la figure 1 ;
- La figure 4 montre l'ensemble monté ;

2. BILLES .

- **Billes en acier** dont le diamètre est de 9,53 mm et la masse de $3,5 \pm 0,05$ g ;

3. GUIDES.

- **Dispositif en laiton** pour centrer la bille, ayant la forme et les dimensions indiquées sur la figure ;

4. BAIN.

- **Vase cylindrique en verre**, susceptible d'être chauffé, ayant comme dimensions minimales : 8,5 cm en diamètre et 12 cm de profondeur entre l'évasement du bord supérieur et le fond ;

5. THERMOMETRE.

- **Thermomètres « échelle haute »** conformes aux spécifications données au tableau 1. le thermomètre est suspendu de façon que l'extrémité inférieure de son bulbe soit au niveau de la face intérieure des anneaux et a moins de 12,5 mm de ceux-ci sans toutefois les toucher.

Désignation	Caractéristique	
	Echelle basse	Echelle haute
Immersion	Totale	Totale
Echelle de température	- 2 à + 80 °C	- 30 à + 200 °C
Subdivision tous les	0,2 °C	0,5 °C
Plus longue graduation chaque	1 °C	1 °C
Graduation numérotée tous les	2 °C	5 °C
Erreur maximum en tous points de l'échelle	0,2 °C	0,3 °C
Longueur totale en millimètres	390 ± 10	390 ± 10
Diamètre de la tige en millimètres	5,5 à 8	5,5 à 8
Diamètre du réservoir en millimètres	Supérieur ou égal à 4,5 et pouvant passer dans un orifice de 5,5	
Longueur du réservoir en millimètres	9 à 14	9 à 14
Distance du fond du réservoir à la graduation	0 °C, 75 à 90	30 °C, 75 à 90
Longueur de la partie graduée, en millimètres	245 à 280	245 à 280
Chambre d'expansion permettant une température d'au moins	130 °C	250 °C
Forme du sommet	Anneau de verre	
Inscription sur le thermomètre	Méthode bille et anneau d'échelle basse, norme NF T 66-008	Méthode bille et anneau d'échelle basse, norme NF T 66-008

Tableau : spécifications du thermomètre

V. PREPARATION DE L'ECHANTILLON.

Chauffer l'échantillon en ayant soin d'éviter les surchauffes locales et en l'agitant constamment jusqu'à ce qu'il soit assez fluide pour être versé. La température voulue doit être atteinte en deux heures au plus et ne doit pas dépasser le point de ramollissement présumé de plus de 110 °C. Eviter l'introduction d'air dans l'échantillon.

Verser l'échantillon chauffé dans deux anneaux (IV.1) eux-mêmes préchauffés à la même température. Pendant cette opération, les anneaux reposent sur une plaque enduite d'un mélange en partie égales de glycérine et dextrine pour éviter l'adhérence du produit. Laisser refroidir pendant 30 min au moins mais sans que ce temps ne puisse entraîner une durée totale de l'essai supérieure à 240 min. les échantillons mous à température ambiante doivent être refroidis pendant 30 min au moins à une température intérieure de 8 °C ou plus au point de ramollissement présumé.

Après refroidissement enlever l'excès de produit par arasement, en utilisant une spatule ou un couteau légèrement chauffé.

Dans le cas où l'essai est répété, utiliser un récipient propre et un échantillon nouveau.

VI. MODE OPERATOIRE POUR LES PRODUITS DE POINT DE RAMOLLISSEMENT INFERIEUR OU EGAL A 80 °C.

VI.1. ASSEMBLAGE.

Assembler l'appareillage avec les anneaux, le thermomètre et les guides en position correcte, et remplir le vase (IV.4) avec l'eau distillée récemment bouillie, à 5 ± 1 °C, sur une hauteur comprise entre 102 et 108 mm. Maintenir pendant 15 min à une température de 5 °C, en plaçant si nécessaire le vase cylindrique dans de la glace fondante. Ensuite, à l'aide d'une pince, placer une bille, préalablement amenée à la température du bain, au centre de chaque guide.

VI.2. DETERMINATION.

Chauffer de façon à élever la température de 5 °C par minute.

Utiliser des écrans en cas de courants d'air.

NOTE : Des chauffages électriques ou par brûleur à gaz peuvent être utilisés. Le dispositif chauffage électrique doit présenter un faible temps de réponse et posséder un réglage de sortie de puissance de façon à maintenir le gradient de température nécessaire.

L'élévation de température doit être uniforme et observée sans admettre la notion de moyenne sur l'ensemble de l'essai. La latitude permise sur chaque période d'une minute succédant aux trois premières minutes ne doit pas dépasser $\pm 0,5$ °C. Rejeter tous les essais dans lesquels ce rythme d'élévation de température n'est pas respecté.

Noter pour chaque ensemble anneau-bille la température, indiquée par le thermomètre, à laquelle l'échantillon enveloppant la bille touche la plaque inférieure du support. Ne pas effectuer de corrections de colonne émergente. Si la différence entre les deux valeurs obtenues dans un essai effectué en double dépasse 1 °C, recommencer l'essai.

VII. MODE OPERATOIRE POUR LES PRODUITS POINT DE RAMOLLISSEMENT SUPERIEUR A 80 °C.

Suivre le même mode opératoire qu'au paragraphe 6 à l'exception des points suivants :

- Utiliser pour le liquide dans le vase de la glycérine au lieu d'eau ;
- Utiliser le thermomètre « échelle haute » ;
- Porter le bain liquide à la température initiale de 32 °C ;

NOTE : Pour les produits de point de ramollissement voisin de 80°C, il est nécessaire de noter la nature du liquide du bain, les bains de glycérine donnant des résultats plus élevés que les bains d'eau.

VIII. EXPRESSIONS DES RESULTATS.

Arrondir à 0,5°C près la moyenne des températures enregistrées dans un essai en double et noter ce résultat comme le point de ramollissement.

IX PRECAUTIONS DE SECURITE.

L'utilisation d'eau distillée fraîchement bouillie est essentielle des bulles d'air étant susceptibles de se fixer sur le produit soumis à l'essai et de fausser les résultats. Un respect étroit du rythme de chauffage imposé est absolument nécessaire pour une bonne reproductibilité des résultats.

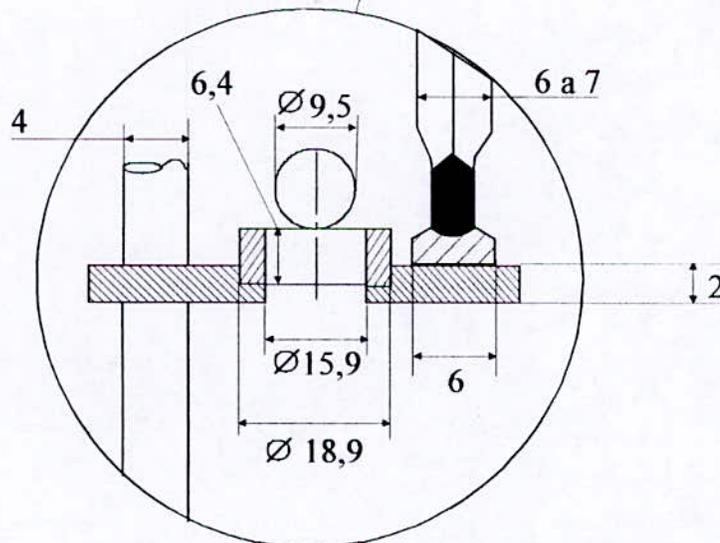
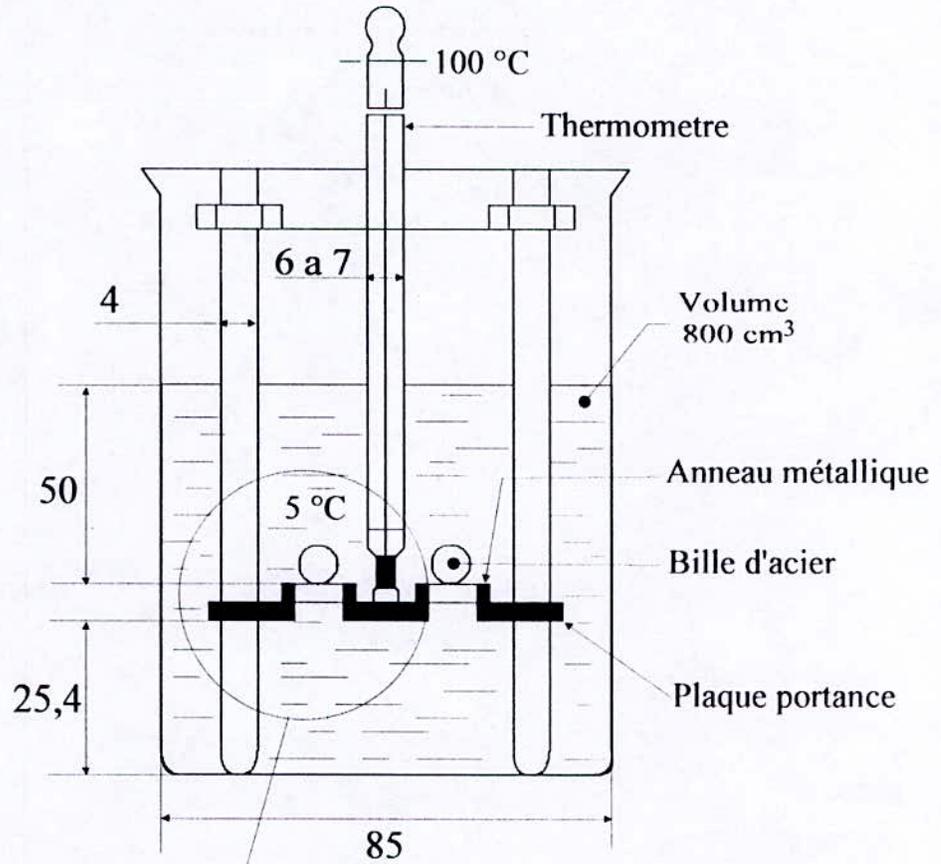
X. FIDELITE.

La fidélité de la méthode chiffrée à partir de l'examen statistique des résultats est a suivante :

Répétabilité : La différence entre des résultats successifs obtenus par le même opérateur, avec le même appareillage, dans des conditions opératoires identiques et sur un produit, ne doit pas, au cours d'une longue série d'essais effectués en appliquant correctement et normalement la méthode, dépasser plus d'une fois sur vingt les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous.

Reproductibilité : La différence entre deux résultats unique et indépendants obtenus par différents opérateurs travaillant dans des laboratoires différents sur un même produit, ne doit pas, au cours d'une longue série d'essais en appliquant correctement et normalement la méthode d'essai, dépasser plus d'une fois sur vingt les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessous.

Point de ramollissement	Répétabilité	Reproductibilité
$\left. \begin{array}{l} > 30 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ \leq 80 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{array} \right\}$	1 °C	2 °C
> 80 °C	2 °C	4 °C



Les cotes sont en millimetres

Appareil bille et anneau pour le point de ramollissement du bitume

DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ RELATIVE DES PRODUITS BITUMINEUX MÉTHODE DU PYCNOMÈTRE¹

I. OBJET DE LA NORME.

La présente norme a pour objet la détermination de la densité relative² des bitumes fluxés et des produits bitumineux concrets.

Cette détermination est faite à 25 °C ± 0,2 °C.

II. DEFINITION.

La densité relative des produits bitumineux est le rapport de la masse d'un volume de produit à 25°C, à celle d'un égal volume d'eau à la même température.

III. APPAREILLAGE.

Pycnomètre : (figure1).

Récipient cylindrique ou conique en verre soigneusement rodé pour recevoir un bouchon de verre fermant bien de 20 mm à 26 mm de diamètre, percé d'un orifice de 1 mm à 2 mm de diamètre à la place de l'ouverture capillaire habituelle.

A mi-volume, le pycnomètre comporte un trait circulaire de niveau.

La partie supérieure du bouchon doit être lisse et parfaitement plane. Et sa partie inférieure concave pour permettre aux bulles d'air de s'échapper plus facilement par l'ouverture ; cette concavité aura une profondeur d'environ 5 mm en son centre.

La capacité du pycnomètre bouché est d'environ 24 ml à 30 ml. Il ne doit pas peser à vide plus de 40 g.

IV. MODE OPERATOIRE.

Tare du pycnomètre.

Peser à la balance de précision le pycnomètre et son bouchon propres et secs. Soit « a » la masse obtenue.

Remplir ensuite le pycnomètre avec de l'eau distillée fraîchement bouillie, portée à 25°C puis, le bouchon étant solidement fixé, l'immerger complètement pendant au moins trente minutes dans un bain d'eau réglé à cette même température.

Les trente minutes écoulées, faire émerger le bouchon pour l'essuyer parfaitement de sorte que sa surface soit sèche et que le ménisque de l'eau de l'orifice central soit de niveau avec le sommet du bouchon. Retirer ensuite le pycnomètre du bain d'eau, le peser

¹ Cette méthode correspond à la méthode ASTM D 70-52

² Densité relative d'un corps : c'est le rapport de la masse volumique de ce corps à la masse volumique d'un corps de référence dans des conditions qui doivent être spécifiées pour les deux corps.

Masse volumique : c'est le quotient de la masse par le volume

$$dr = \frac{m/v}{m'/v'} \text{ si } v = v', \quad dr = \frac{m}{m'}$$

sans délai après avoir enlevé toute trace d'humidité de la surface extérieure à l'aide d'un chiffon propre Et sec.

Soit :

« b » la masse obtenue.

Mode opératoire pour les bitumes fluxés.

Introduire le produit à essayer, à la température du laboratoire (toujours au-dessous de 25°C) dans le pycnomètre jusqu'à ce que celui ci soit plein ; éviter l'inclusion de bulles d'air. Fixer solidement le bouchon et forcer l'excès de produit à passer à travers l'ouverture. Enlever soigneusement le surplus de produit avec un chiffon propre et sec. Immerger complètement le pycnomètre pendant au moins trente minutes dans un bain d'eau maintenu à 25°C. ce temps écoulé, retirer le pycnomètre, l'essuyer soigneusement et rapidement et le peser.

Soit :

« c » la masse obtenue. La densité relative du produit est donnée par la formule :

$$\text{Densité relative } 25^{\circ}/25^{\circ} = \frac{c - a}{b - a}$$

Mode opératoire pour les produits bitumineux concrets.

Pour déterminer la densité relative de matières bitumineuses trop visqueuses par la méthode décrite ci-dessus fluidifier en chauffant une petite quantité de produit en prenant soin d'éviter les pertes par évaporation. Dès que l'échantillon est suffisamment fluide. En verser une quantité suffisante dans le pycnomètre propre, sec légèrement réchauffé pour le garnir, au moins jusqu'au repère circulaire. Éviter l'inclusion de bulle d'air et veiller à ne pas salir les parois du pycnomètre au-dessus du niveau final. Refroidir le pycnomètre et son contenu à la température ambiante et le peser muni de son bouchon.

Soit :

« c » la masse obtenue.

Retirer le pycnomètre de la balance. Le remplir avec de l'eau distillée fraîchement bouillie et adapter solidement le bouchon, puis l'immerger complètement pendant au moins trente dans un bain d'eau maintenu à 25°C. faire émerger ensuite le bouchon pour l'essuyer parfaitement de sorte que sa surface soit sèche et le ménisque de l'eau de l'orifice central, de niveau avec le sommet du bouchon.

Retirer le pycnomètre l'essuyer avec un chiffon propre immédiatement avec son contenu et muni de son bouchon.

La densité relative du produit est donnée par la formule :

$$\text{Densité relative } 25^{\circ}/25^{\circ} = \frac{c - a}{(b - a) - (d - c)}$$

RECOMMANDATIONS.

Pour les déterminations de densités relatives, il est important :

1. Que la température du contenu du pycnomètre soit bien $25\text{ °C} \pm 0,2\text{ °C}$ pendant les pesées du pycnomètre complètement rempli.
2. De prendre des précautions pour prévenir l'expansion et le débordement du contenu pouvant être provoqués par la chaleur de la main pendant l'essuyage de la surface du pycnomètre.
3. D'éviter complètement la formation de bulles d'air dans le pycnomètre au cours du remplissage.
4. D'effectuer rapidement les pesées après le remplissage du pycnomètre et de les effectuer à 1 mg près, un certain nombre d'essais de remplissage et de pesées peuvent être nécessaires pour obtenir le degré de précision voulu.
5. De prendre des précautions pour éviter le bris du pycnomètre lorsqu'on le nettoie après une détermination faite sur un produit très visqueux ou semi-solide. Il est commode de chauffer le pycnomètre dans une étuve à 100°C au plus jusqu'à ce que tout le produit puisse être retiré. Essuyer ensuite avec un chiffon doux ou du papier-filtre. Lorsqu'il est refroidi, le pycnomètre est finalement rincé avec un solvant approprié et enfin essuyé soigneusement.

V. EXPRESSION DU RESULTAT ET FIDELITE DE LA METHODE.

La densité relative est un nombre sans dimension qui s'exprime avec trois décimales.

Le résultat est donné par la moyenne de deux premières déterminations différant de 0,005 au maximum.

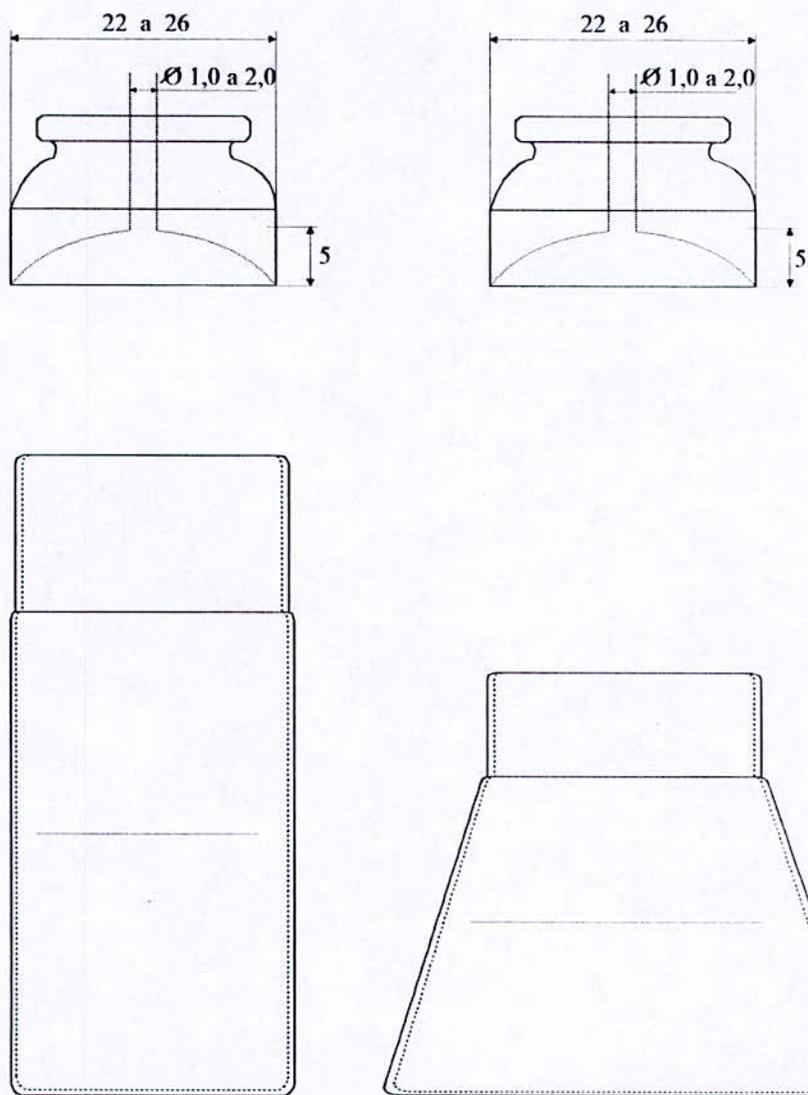


Figure 1. Pycnometre

Tamis (mm)	Tamisa (%)
6,300	100
5,000	100
4,000	100
2,000	100
1,000	100
0,500	99,39
0,400	95,29
0,315	66,41
0,200	25,12
0,100	5,56
0,080	1,36

Tableau : Composition granulométrique du sable de dunes.

Tamis (mm)	Tamisa (%)
8,000	100
6,300	97,87
5,000	96,65
4,000	95,16
2,000	80,60
1,000	61,54
0,500	49,06
0,400	45,65
0,315	42,57
0,200	34,65
0,100	19,58
0,080	16,58

Tableau : Composition granulométrique du sable concassé.

Tamis (mm)	Tamisa (%)
8,000	100
6,300	99,18
5,000	98,37
4,000	96,78
2,000	89,03
1,000	75,53
0,500	57,83
0,400	53,75
0,315	49,56
0,200	43,04
0,100	33,35
0,080	30,79

Tableau : Composition granulométrique du sable gypseux.

Tamis (mm)	0,95 SD+0,05 SC	0,85 SD+0,15 SC	0,75 SD+0,25 SC	0,65 SD+0,35 SC
8,000	100	100	100	100
6,300	99,89	99,68	99,47	99,25
5,000	99,83	99,50	99,16	98,83
4,000	99,76	99,27	98,79	98,31
2,000	99,03	97,09	95,15	93,21
1,000	98,08	94,23	90,39	86,54
0,500	96,88	91,84	86,81	81,78
0,400	92,81	87,85	82,88	77,92
0,315	65,22	62,83	60,45	58,06
0,200	25,59	26,55	27,50	28,45
0,100	6,26	7,66	9,06	10,47
0,080	2,12	3,65	5,17	6,69

Tableau : Granulométrie des différents mélanges obtenus (sable de dunes + sable concassé)

T

Tamis (mm)	0,95 SD+0,05 SC	0,85 SD+0,15 SC	0,75 SD+0,25 SC	0,65 SD+0,35 SC
8,000	100	100	100	100
6,300	99,96	99,88	99,80	99,71
5,000	99,92	99,76	99,59	99,43
4,000	99,84	99,52	99,20	98,87
2,000	99,45	98,35	97,26	96,16
1,000	98,78	96,33	93,88	91,44
0,500	97,31	93,16	89,00	84,84
0,400	93,21	89,06	84,91	80,75
0,315	65,57	63,88	62,20	60,51
0,200	26,02	27,81	29,60	31,39
0,100	6,95	9,73	12,51	15,29
0,080	2,83	5,77	8,72	11,66

Tableau : Granulométrie des différents mélanges obtenus (sable de dunes + sable gypseux)

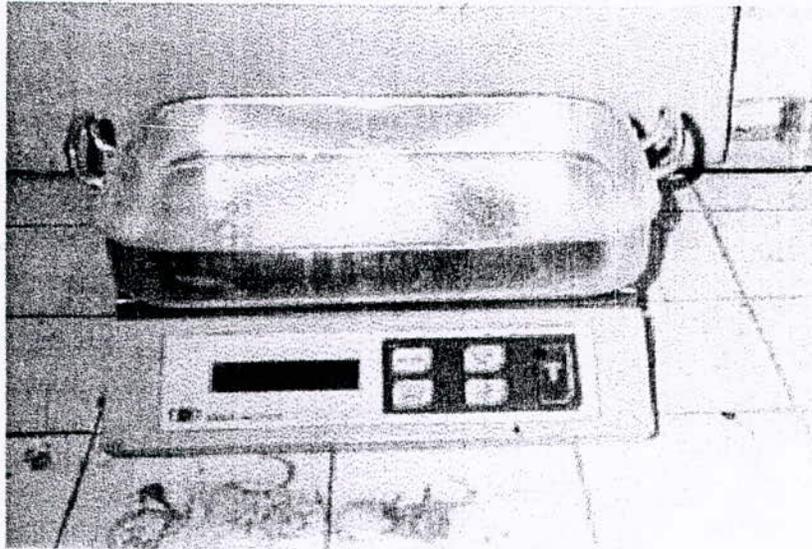


Figure : Le mélange sans liant.

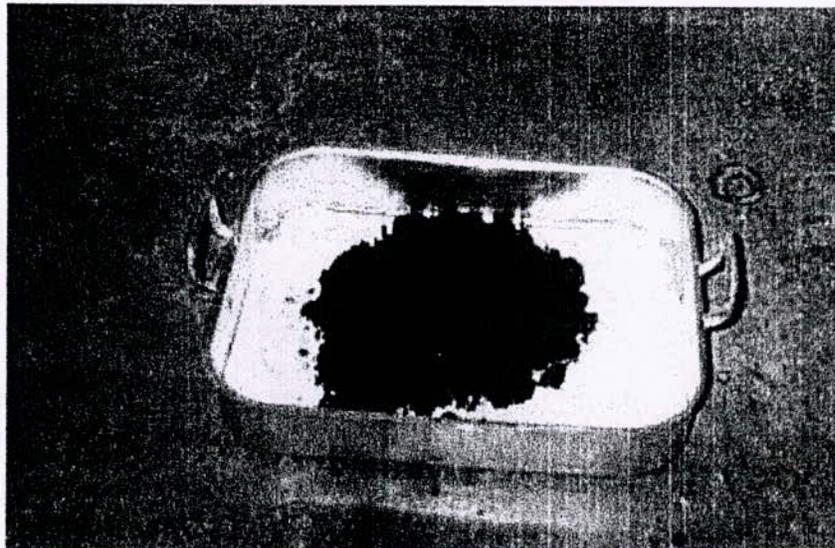


Figure : Le mélange avec liant.

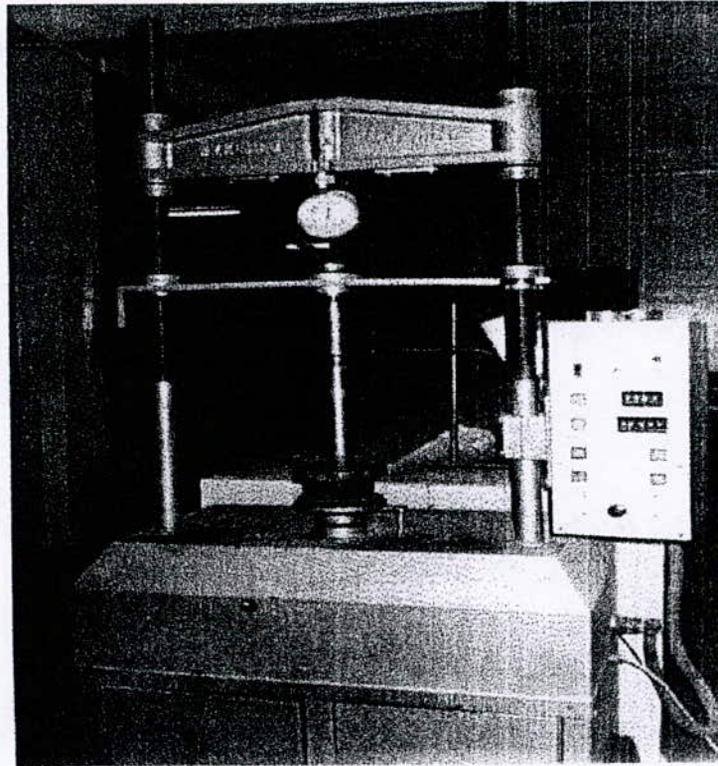


Figure : Presse de compression.

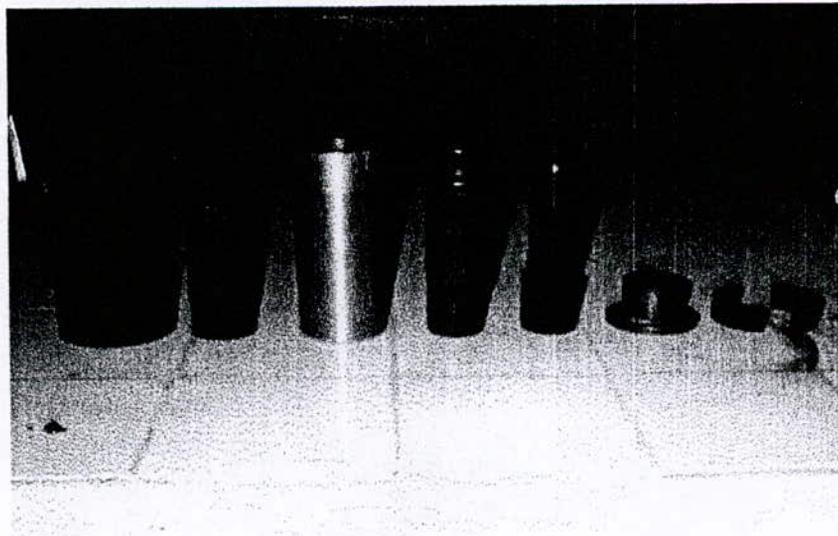


Figure : Les appareils pour l'essai de Hubbard Field.

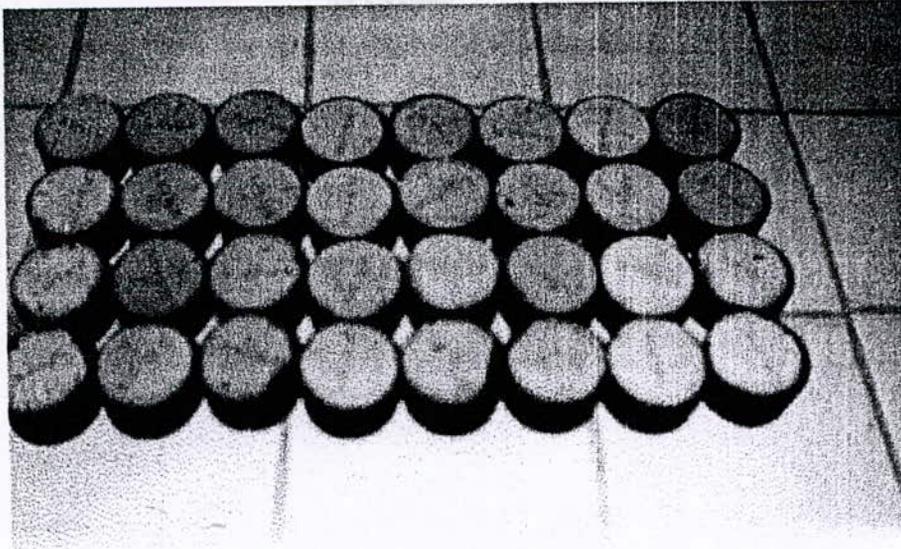


Figure : Les éprouvette avant l'écrasement.

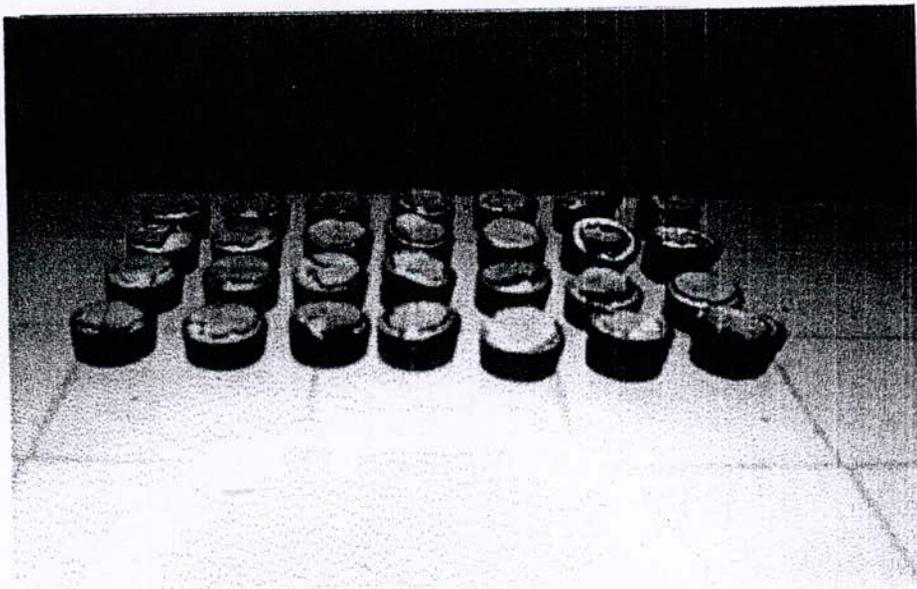


Figure : Les éprouvette après l'écrasement.

Bibliographie

[1] **J.ARRAMBIDE, M.DURIEZ**, « Liants routiers et enrobés, Matériaux de protection, Plâtre, Agglomérés, Bois ». Editions Dunod 1959.

[2] **J.ARRAMBIDE, M.DURIEZ**, « Liants hydrocarbonés et béton bitumineux ».
Editions Dunod 1954.

[3] **M.DURIEZ, J.ARRAMBIDE**, « Nouveaux traité de matériaux de construction ».
Tome I et II, Editions Dunod 1962.

[4] **H.KACI**, « Sable bitume en couche de roulement, étude et formulation »
P.F.E : ENP 1997.

[5] **G. JEUFFROY**, « Conception et construction des chaussées », Tome II
Editions Eyrolles 1985.

[6] **M et Mme BOUKERROU**, « Les enrobés à froid en technique saharienne ».

[7] **A. SMAI**, « Technique des sables bitumes en couche de roulement », Communications
Djanet Mars 1996.

[8] **M. BEN DHIA**, « Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien ». Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, Janvier – Février 1998, N° 213

[10] **J.G. MALLOUK**, « Les enrobés bitumineux » Tome I
Edition Modulo 1982.

[11] **E.FENTEZ**, « Particularités de la technique roulière » revue générale des routes 1966,
N° 411.

ملخص:

في إطار الدراسة التي أجريت لغرض دمج رمل الكثبان في مواد إنشاء الطرق، ومحاولة تحسينها بأخرى محلية. تأتي هذه الدراسة المخبرية بمقارنة بين نمطين : الرمل المزفت على البارد و الرمل المزفت على الساخن.

كما يوجد ذكر عام لبعض خصوصيات بناء الطرق في الوسط الصحراوي، و كذا مختلف العوامل المؤثرة فيه.

RESUME :

Cette l'étude a été faite en vue d'incorporer du sable de dunes dans les matériaux routiers, et la possibilité d'améliorer ses performances avec d'autres sables locaux. On donne dans ce travail expérimental une comparaison entre deux types d'enrobage : à chaud et à froid.

On cite aussi dans cette étude certaines spécificités de la construction routière dans le contexte saharien, et les différents facteurs influents.

ABSTRACT :

Within the context of studies made to incorporate dune sand in road materials and the possibility to improve the performance with other local sands. We give in this experimental study a comparison between: hot and cold coating.

We mention in this study some specificities of road construction in the Saharan context and different influential factors.

Mots-clés : sable – Sahara – construction routière – sable bitume – cut back – stabilité – compacité – zone aride.