

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Handwritten initials

Ecole Nationale Polytechnique
(E N P)

Département : Génie civil

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention d'un Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil

Thème

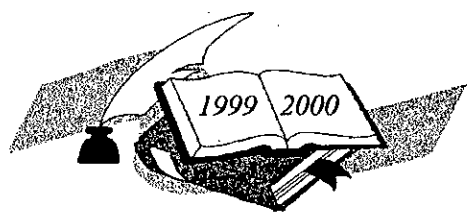
ETUDE D'UN SABLE BITUME

Proposé par :

Mme R.Kettab

Réalisé par :

Mestar Lotfi
&
Bencheikhe Mohamed



DEDICACES

- ❖ *A mon père*
- ❖ *A ma mère*
- ❖ *A mes deux frères*
- ❖ *A mes deux sœurs*
- ❖ *A ma famille*
- ❖ *A mes amis*
- ❖ *A tout les musulmans*
- ❖ *A tout les Algériens & les Algériennes*
- ❖ *A tout ceux qui se battent pour les causes justes*

Je dédie ce travail

Lotfi



Remerciements

*Nous tenons à remercier notre promotrice Mme :R.Kettab
Pour la perspicacité de ses conseils et ses propositions qui visaient à objectiver et
enrichir le contenu de l'étude, qu'elle daigne accepter notre immense gratitude.*

*Nous tenons aussi à remercier l'ensemble du personnel de la
SONATRO et du LCTP qui a ménagé des efforts exceptionnels afin que notre
travail soit mener à bout.*

Sommaire



I. Introduction.....	1
II. Problème de la technique routière au Sahara.....	3
III. Le Sahara contraintes et conséquences.....	7
III.1. L'environnement Saharien.....	7
III.2. Comportement des assises des chaussées aux matériaux naturels en zone désertique.....	11
IV. Le bitume.....	17
IV.I. Le bitume.....	18
IV.I.1. Le bitume naturel.....	18
IV.I.2. Le bitume artificiel.....	20
IV.I.3. Composition chimique des bitumes.....	20
IV.I.4. Utilisation des bitumes.....	21
IV.II. Essais subis par les liants de base (Le bitume).....	22
IV.III. Le contact liant-granulat.....	26
V. Les enrobés bitumineux.....	29
V.1. Classification des enrobés bitumineux.....	29
V.2. Qualité exigée d'un enrobé bitumineux.....	30
V.3. Stabilité des enrobés.....	31
V.4. Facteur influençant un béton bitumineux.....	31
VI. Les sables bitumineux.....	35
VI.1. Définition d'un sable bitumineux.....	35
VI.2. Généralités sur les sand asphalt.....	37
VI.3. Le sable bitume au Sahara.....	39
VII. Formulation d'un sable bitume.....	44
VII.1. Région d'Ourgla.....	44

VII.2. Programme de l'expérimentation.....	45
VII.3. Rappel du principe de l'essai HUBBARD-FIELD.....	46
VII.4. Rappel théorique.....	46
VII.5. Identification des matériaux de composition et expérimentation.....	47
Conclusion.....	74

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
المكتبة — BIBLIOTHEQUE
Ecole Nationale Polytechnique

CHAPITRE I

I) INTRODUCTION :

La construction routière en milieu désertique est devenue un besoin actuel, urgent et de plus en plus important. Les régions désertiques ont toujours été les plus démunies dans le monde à cause de leurs conditions climatiques difficiles et de 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 construction et d'infrastructure de toute sorte. 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 maghrébin surtout, plusieurs activités sont nées, comme :

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

Ces activités se sont accompagnées par une forte volonté de sédentarisation des populations nomades autour de certains points ou pôles devenus stratégiques.

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 construction de routes au Sahara est caractérisée par le fait que les travaux de terrassement sont en général peu importants étant donné la monotonie du relief et que la couche de base est réalisée avec des 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 enrobés revient cher étant donné le coût du transport du bitume ainsi que des matériaux concassés en raison de l'éloignement des sites de concassage, certaines régions du nord-est du Sahara sont dépourvues entièrement de roches concassables sur un rayon de 200 à 300 km, cette contrainte a poussé les ingénieurs routiers des années 50 et 60 à essayer d'utiliser à la place des agrégats concassés le sable éolien couvrant de vastes contrées du nord du Sahara.

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 Ouregla sur plusieurs centaines de kilomètres.

Cette technique à refait surface avec le lancement de grands chantiers de renforcement et modernisation du réseau saharien, vu le potentiel économique et touristique de ses régions, et vue la crise économique que vit l'Algérie. On espère que son utilisation va permettre de réduire le prix de revient des routes tout en étant valable techniquement.

C'est dans cet esprit que s'inscrit notre travail, qui se veut un travail à la fois de recherche bibliographique et expérimental, avec l'utilisation de l'essai Hubbard-field qui est le plus approprié pour l'évaluation de la stabilité des matériaux enrobés fins et pour le choix de la meilleure formulation.

CHAPITRE II

II) PROBLEME DE LA TECHNIQUE ROUTIERE AU SAHARA :

Si les premières routes ont été construites, sans difficultés, dans les régions du Nord-sahara, il a fallu rapidement pénétrer dans les régions où la solution des problèmes n'avait été abordée que sur le plan local, avec de faibles moyens et sans l'intervention des dernières techniques modernes.

Les premières années de l'aventure saharienne ont donc été placées pour l'ingénieur routier sous le signe de *l'inconnu*.

Cet inconnu se présente sous des formes multiples et ne se laisse pas toujours atteindre facilement ; de ses multiples aspects, on propose d'examiner :

1) L'inconnu topographique :

Le Sahara, pays immense, autrefois sans population fixe était parfaitement connu des nomades, mais cette connaissance directe n'était pas traduite sur des documents exploitables par les ingénieurs routiers, si précieux pour l'élaboration des avant-projets étaient pratiquement inexistantes.

Heureusement, le désert ne présente pas pour l'avion les mêmes difficultés que pour l'automobile ; les reconnaissances aériennes à vue sont faciles pendant plusieurs mois de l'année.

Enfin, la photographie aérienne supplée de façon très satisfaisante l'absence de cartes à des échelles convenables.

2) L'inconnu des matériaux naturels :

En même temps qu'il doit prendre connaissance du relief du terrain, l'ingénieur doit évidemment reconnaître la qualité des matériaux naturels, qui conditionnent dans la plupart des cas l'implantation même de la route et la solution à retenir pour la construction future.

Agissant sur une nature vierge, l'ingénieur a une certaine latitude pour placer sa route ; il cherchera évidemment à la placer dans des zones où le sol naturel a une bonne portance.

On peut dire que cette connaissance des matériaux naturels s'effectue en trois stades :

- Le stade de la reconnaissance superficielle.
- Le stade scientifique.
- Le stade technique.

C'est donc seulement quand il arrive à ce stade d'exécution que l'ingénieur routier peut estimer avoir levé l'inconnu des matériaux naturels.

3) L'inconnu dans la préparation des matériaux naturels :

La plupart des matériaux susceptibles d'être employés dans la construction routière au Sahara se présentent sous le même aspect que dans les régions non désertiques.

Néanmoins, certains matériaux sont particuliers au désert ou se présentent sous des formes inhabituelles. L'utilisation de ces matériaux pose un problème de préparation.

En résumé, on peut dire que l'ingénieur routier a dû, en présence des matériaux naturels sahariens, mettre au point des techniques particulières dans l'exécution et la mise en œuvre de ces matériaux, technique dont il n'avait aucune idée précise avant l'exécution des travaux, car elle ne comportait pratiquement aucun précédent.

4) L'inconnu dans la conservation des qualités des matériaux :

Le climat du Sahara est, en général, extrêmement sec et les températures extrêmes varient couramment entre 0° et 80° au soleil ; il maintient, de ce fait, les matériaux rentrant dans la composition des ouvrages dans des conditions de température et d'hygrométrie anormale. On ne pouvait donc savoir, à priori, le comportement des matériaux en cause.

Des inquiétudes s'étaient également manifestées quant à la tenue des liants bitumineux à la chaleur.

Il est évident, par suite, que l'adoption brutale des normes traditionnelle, pour le calcul des chaussées faites pour les climats où la saturation du sol est normale, constituait une très lourde suggestion, et conduisait à des épaisseurs de chaussées prohibitives pour l'économie des projets.

5) L'inconnu du sable :

On a vu dans ce qui précède que la présence de sables éoliens dans les matériaux de surface posait déjà pour l'ingénieur routier un délicat problème de leur traitement, la présence de sable étant généralisée au Sahara, on pouvait également craindre pour la conservation de la route construite dans les massifs dunaires ou dans les zones soumises à des ensablements spécialement importants. La conception des ouvrages a donc dû tenir compte de cette cause éventuelle de dégradation.

6) L'inconnu de l'eau :

Quand on a entrepris l'établissement du réseau routier dans certaines régions assez éloignées de la côte, on avait admis comme hypothèse qu'on ne pourrait disposer en aucun point de quantités d'eau nécessaires à l'exécution des travaux selon les méthodes traditionnelles et qu'il fallait en particulier envisager l'exécution des terrassements à sec. Ceci devait peser très lourdement sur la conception même des chaussées, et sur l'économie entière des projets.

7) L'inconnu physique :

Aux inconnus découlants du caractère désertique des régions empruntées et des matériaux qui leur sont particuliers s'ajoute l'inconnu constitué par les phénomènes physiques ou mécaniques se produisant dans le corps de la chaussée sous l'action des véhicules.

Quelle que soit la région géographique où il exerce ses activités tout ingénieur routier se trouve obligatoirement en face de ce problème car il ne dispose jusqu'à présent d'aucune méthode sûre pour calculer les efforts qui naissent dans la chaussée.

Cette ignorance des ingénieurs est particulièrement gênante au Sahara parce que l'ensemble des conditions déjà examinées entraîne la confection de chaussées de types particuliers et de comportement bien incertain.

On peut donc avancer que le problème de la protection superficielle de chaussées, pour résister aux efforts verticaux, est le problème capital à résoudre.

Il faut bien convenir, tout en le regrettant, que la technique routière s'est jusqu'ici révélée incapable de dégager une solution à ce difficile problème.

CHAPITRE III

III) LE SAHARA : CONTRAINTES ET CONSEQUENCES :

III-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 golf 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.

III-1-1) Le climat saharien

On connaît dans le monde trois niveaux d'aridité : semi-aride, aride et extrêmement aride. Le dernier est celui du Sahara.

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

- **Humidité relative de l'air** (graphe N° 1) : D'après le graphe, on remarque que le Nord est deux fois plus humide (humidité relative) que le Sahara exceptée sa frange Nord et que les hauts plateaux se situant au milieu, ce qui justifie à priori la classification suivante :

Humide	Zones littorales
Sub – humide	Hauts – lateaux
Aride	Le Sahara

- A notre époque, le climat saharien a des **températures** très hautes le jour et faible 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 conditions thermiques (températures extrêmes, écarts thermiques, ensoleillement...) influent sur la température de surface de la chaussée.

Le Sahara est caractérisée par un climat très chaud en été, c'est ce que nous montrent les moyennes pentadaires de température maximale du mois de juillet (le mois le plus chaud de l'année), d'après le graphe N°2 :

- au Sahara la température varie entre 39 et 45 °C.
- dans les hauts plateaux on enregistre 34°C.
- sur le littoral on a de 27 à 29 °C.

L'amplitude journalière de température (écart entre la nuit et le jour) qui est un facteur important, caractérise plus le Sahara que toute autre région, en effet, on relève : 12 à 15.4 °C en été (juillet) et 9.6 à 15°C en hiver (décembre).

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

• **Les vents** sont souvent violents et permettent l'accélération de la désagrégation et le transport de ses produits. Ils provoquent ainsi « l'érosion », connue aussi sous l'appellation « d'érosion éolienne ». Le nombre de jours de vent sable varie de 2 à 7 j/mois.

• **La pluviosité** dans le Sahara est faible, voir nulle durant plusieurs années. Quand les précipitations ont lieu, elles sont violentes, courtes et orageuses. La moyenne annuelle des précipitations est inférieure à 50 mm, avec d'importantes variations. Les oueds et cours d'eau, quand ils existent, sont très larges et peu profonds. Les eaux sont rares et de qualité variable. Les eaux superficielles sont très peu fréquentes à cause des faibles précipitations. Elles se présentent parfois sous forme de sebkha ou chott, avec une salinité élevée le plus souvent.

Les précipitations annuelles dans tout le Sahara n'accèdent pas 80 mm/ an alors qu'elles les régions littorales. Atteignent 243 à 248 mm/ an sur les hauts palataux et arrivent jusqu'à 566 à 770 mm/ an sur les régions littorales (graphe N°3).

III-1-2) Le sol saharien :

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

- **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** sont les matériaux accumulés au pied des montagnes, dans les gorges et dans les oueds et formant 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 ont pris naissance.

- **Les sables**, que l'on trouve 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** sont rencontrées essentiellement dans les dépressions et constituent souvent le support des marécages, des sebkhas et des chotts.

III-1-3) Matériaux utilisés au Sahara :

La construction des chaussées au SAHARA se fait avec des matériaux locaux subnormaux, car ils ne répondent pas aux spécifications des matériaux classiques, d'une manière générale nous pouvons les classer comme suit :

- **Les tufs calcaires** : Ils proviennent des encroûtements calcaires, et se présentent souvent sous forme de graves à granulométrie étalée, les éléments sont moins durs que le calcaire ordinaire et sont essentiellement composés de carbonates de calcium (Ca CO_3).

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

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

• **Les arènes granitiques** : Elles se produisent de l'altération de roches éruptives ou métamorphiques, essentiellement la granite, et se présentent sous forme de grave, de gros sable ou de matériaux fins.

III-1-4) Le trafic :

En général le trafic sur les routes saharienne est très faible par rapport aux routes du Nord, mais il a la particularité d'avoir un pourcentage de poids lourds plus important, qui peut atteindre 60%, et l'existence d'essieux non réglementés qui dépassent largement les 13 tonnes, on pense surtout aux camions KENWARTH, gros porteur utilisé par les entreprise pétrolières .

Les résultats du comptage étalé sur cinq années obtenus entre 1985 et 1989

- EN 3 entre Touggourt et Hajira ,le trafic se situe entre 1176et 2171véhicules par jour dont 42 à 47 % de poids lourd.
- RN 3 entre PK 618 et PK 691le trafic est de 5031 véhicules par jour dont 60%de poids lourds.
- RN 3 entre PK 711 et PK 742le trafic est de 1772véhicule par jour par jour dont 54%.
- RN16le trafic est d'environ1039 1225 véhicules par jour dont le pourcentage varie entre 21et46%.

III-2) COMPORTEMENT DES ASSISES DE CHAUSSEES EN MATERIAUX NATURELS EN ZONE DESERTIQUE :

INTRODUCTION :

Les dégradations des chaussées en zone désertique, assez complexes et variées ont pour origines :

- L'action des roues.
- L'action du trafic.
- Les conditions climatiques.
- L'action du milieu naturel.

Les études théoriques du comportement des chaussées en zones désertiques ainsi que des essais en laboratoire en vraie grandeur, la nature et le comportement des matériaux locaux dans les conditions de trafic, climatiques et du milieu naturel ont amené les ingénieurs à proposer certaines recommandations aux autorités.

La faiblesse du trafic, essentiellement lourd, le comportement sous les conditions climatiques, et le souci de conduite d'une politique d'entretien garantissant un niveau de service et une pérennité des ouvrages ont amené les concepteurs et les gestionnaires du réseau à réfléchir sur une technique de dimensionnement des chaussées s'appuyant sur l'évaluation des risques à prendre par rapport aux actions nuisibles à la conservation des ouvrages et par rapport à la prise en compte des performances des matériaux locaux en tant que matériaux routiers.

III-2-1) L'ACTION DES ROUES :

Les dégradations des chaussées sous l'action des roues ont pour origine une déformation de la chaussée au moment de l'application des charges. Les déformations des couches de matériaux qui constituent la chaussée peuvent être séparées en deux groupes :

- Les déformations élastiques.
- Les déformations permanentes.

Les premières déformations ne sont pas dangereuses par elles-mêmes directement, puisqu'elles conservent à la surface de la chaussée son profil et son uni. Elles engendrent quand même des désordres car les mouvements fatiguent les matériaux.

III-2-2) L'ACTION DU TRAFIC :

L'action du trafic se caractérise par l'usure et le fluage des couches de surface, la fatigue du sol (déformations permanentes) et par la fatigue des matériaux.

Cependant, cette action 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, la connaissance des comportements des matériaux observés in-situ permettent de prévoir l'ampleur de l'agressivité du trafic.

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

- Le trafic même, essentiellement, lourd est assez faible.
- 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 sûre de voir sa ruine très proche dans le temps malgré la faiblesse du trafic.

Ce phénomène sur la tenue dans le temps des chaussées vis-à-vis de l'agressivité du trafic s'explique par le fait que le comportement des matériaux naturels dans les conditions sahariennes est un comportement rigide et élastique.

En conséquence, l'action 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.

III-2-3) L'ACTION DES CONDITIONS CLIMATIQUES :

l'action de la période sèche :

La période sèche, qui dure presque la totalité de l'année a une double action sur l'état et le comportement des chaussées :

➤ Une action confortatrice, liée au comportement des matériaux naturels à faible teneur en eau, traduite par une augmentation de la valeur de la cohésion et du module de déformation, et par voie de conséquence, une forte résistance au poinçonnement et à la déformation.

➤ Une action agressive sur les couches de surface par vieillissement du liant hydrocarboné par temps chaud et ensoleillé et surtout par l'action du gradient thermique fonction de la profondeur pour les couches épaisses des matériaux hydrocarbonés et fonction de l'écart thermique diurne et nocturne sur l'ensemble des revêtements.

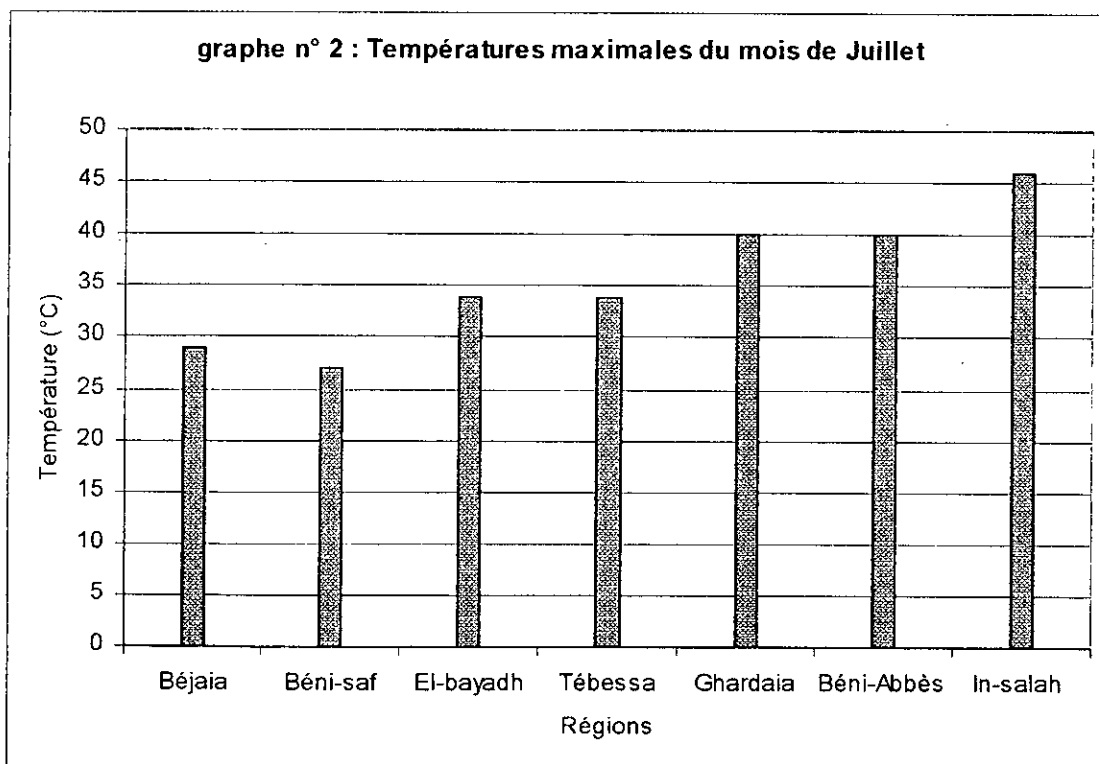
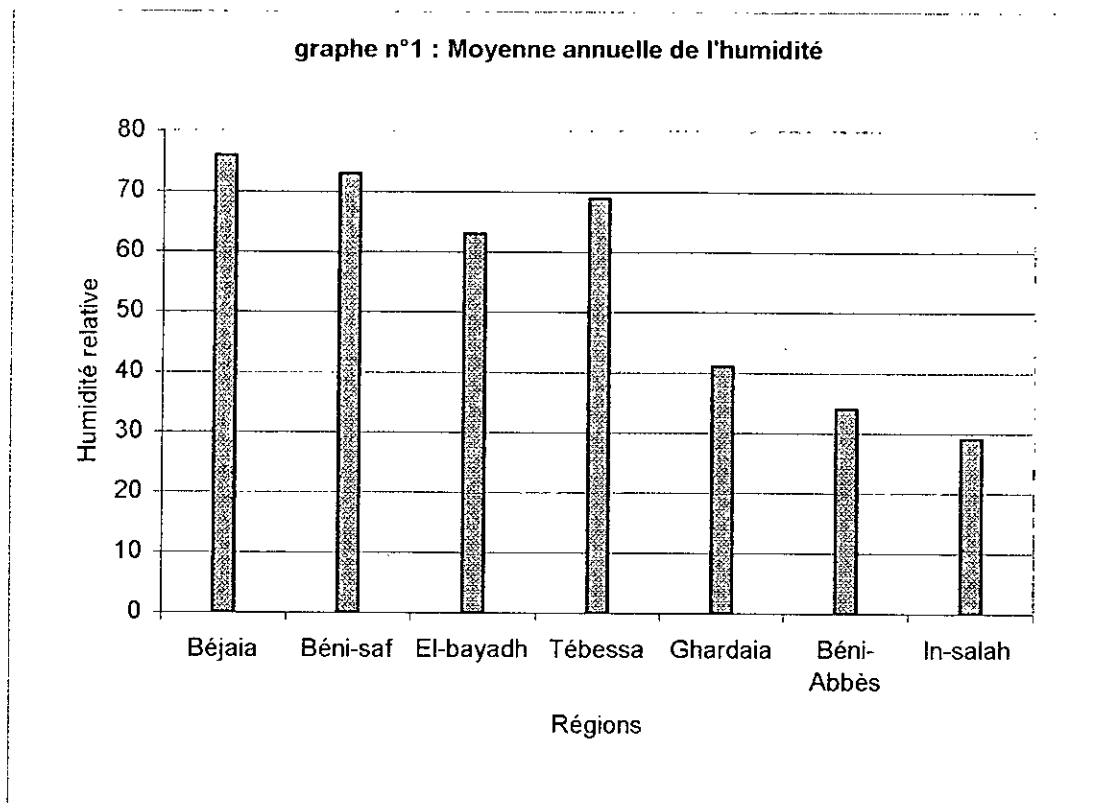
l'action de la période humide :

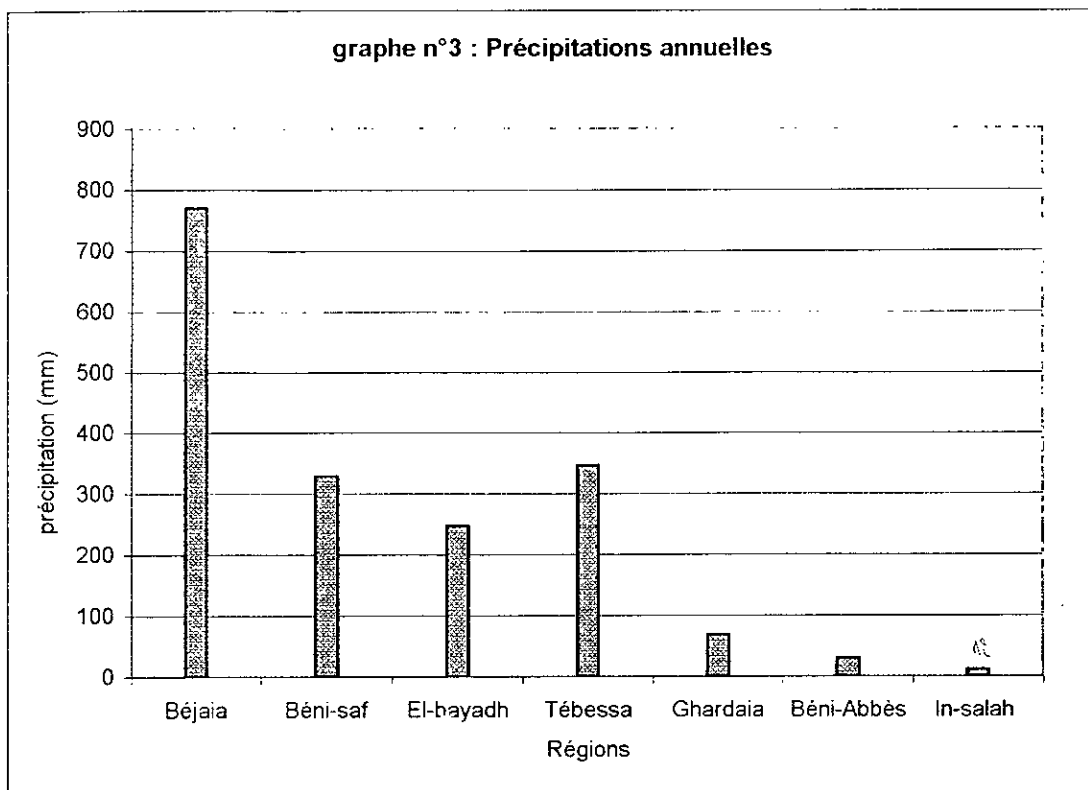
Les périodes humides sont assez courantes durant l'année ; les précipitations sont rares et de courte durée. Sur les chaussées cette humidité réside et demeure selon l'état des surfaces et du profil en travers. En effet la chaussée peut retrouver son état sec quelques heures après la précipitation si 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.

III-2-4) L'ACTION DU MILIEU NATUREL :

En zone désertique, de vastes régions sont formées par les Hamadas, Sebkhah, 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 certains 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.





CHAPITRE IV

IV) LE BITUME :

Généralités sur les liants noirs :

Les liants noirs sont des matériaux effectivement noirs (ou brin foncé) ; riches en carbone et en hydrogène (mélanges hydrocarbures lourds) ; naturels ou obtenus en général par distillation de matières organiques.

Ces matériaux connus depuis l'antiquité, sur tout comme liants, constituent des matières de base pour la réalisation de divers produits commerciaux intéressant de plus en plus la construction et particulièrement dans le domaine de l'étanchéité et celui de la technique routière.

On les désigne par l'expression «matières bitumineuses » par ce qu'elles renferment toutes du bitume ou en possèdent les qualités ; il faut les différencier des «produits bitumineux » qui sont les produits commerciaux fabriqués pour un usage défini à partir des matières de base :

Bitume et asphaltes qui ont subi ou non après extraction certains traitements (raffinage, broyage... etc.

Les brais et goudrons divers qu'on utilise dans la construction proviennent de la distillation du pétrole et de la houille.

Ils possèdent des propriétés remarquables :

1. Souplesse et plasticité, d'où leur emploi en chape souple et en écran étanche.
2. Une imperméabilité remarquable à l'eau, à l'air, d'où leur destination comme revêtement d'étanchéité de couverture de cuvelage.
3. Ductilité, élasticité : ils sont inattaquables par la plupart des produits chimiques, et possèdent la faculté de durcir à l'air ; ils résistent à l'usure, ce qui les destine aux revêtements de chaussées de pistes... etc. à la réalisation de mortiers et de bétons hydrocarbonés où il joue le rôle de liants.
4. Une adhésivité remarquable et un pouvoir pénétrant qui exaltent les qualités précédant néanmoins des défauts (faible résistance mécanique, fragilité, ramollissement à la chaleur) aux quels on remédie par une mise en œuvre appropriée.

IV-1) Le bitume :

C'est le bitume pur, qui est un mélange colloïdal d'hydrocarbures lourds naturels, d'origine minérale, pouvant être liquide, visqueux ou solide.

Il ne contient pas de produits volatils à température ordinaire, il est entièrement soluble dans le sulfure de carbone CS_2 et est doté d'un pouvoir nettement adhésif. Sa densité voisine l'unité (1.01). C'est la base des produits d'étanchéité autre que l'asphalte coulé.

Il résiste à toutes les eaux agressives naturelles, mais il faut noter que la chaux libre attaque le bitume vivement.

IV-1-1) Le bitume naturel :

C'est un mélange de bitume pur, de petites quantités de matière solubles dans CS_2 , et d'autres insolubles (l'eau, l'argile, etc.).

On trouve ces bitumes naturels en Asie mineure (près de la mer morte), aux Antilles (lac de la Bréa dans l'île de trinité mesurant 40 ha, à 57% de bitume pur), en Albanie. Ces bitumes ont pour origine le pétrole, qui ayant rompu le dôme argileux qui l'emprisonnait s'est trouvé polymérisé en bitume par l'argile colloïdale.

Le bitume naturel brut est un matériau à l'état solide qui se ramollit à la chaleur vers $50^{\circ}C$, coulé à $100^{\circ}C$, il brûle facilement avec d'épaisses fumées, et une odeur forte caractéristique.

Origine du bitume naturel :

Les bitumes se rencontrent à l'état naturel, plus au moins mélangés avec des matières minérales, comme le bitume de TRINIDAD certaines roches telle que les calcaires asphaltiques sont des roches poreuses imprégnées d'une certaine quantité de bitume naturel beaucoup de calcaires asphaltiques contiennent moins de 10% en poids de bitume. Mais on peut dire d'une

manière générale que l'origine des bitumes naturels a été longtemps controversée, dont quatre théories différentes ont été émises :

- **La théorie volcanique :**

Formation des bitumes naturels par combinaison directe de carbone et de l'hydrogène, à haute pression et à haute température, et par condensation successive jusqu'aux produits les plus lourds, cette théorie est aujourd'hui abandonnée.

- **La théorie houillère :**

Elle accord au bitume une origine végétale comme la houille, les distillations et transformations s'étant effectuées à l'intérieure dans la terre et pour comprendre mieux cette théorie il faut définir et comprendre que veut dire Houille et distillation, la houille est un combustible minéral fossile prévenant des végétaux ayant subit au cours des temps géologiques une transformation lui conférant un grand pouvoir calorifique, d'autre part la distillation est l'opération consistant à vaporiser partiellement un liquide et à condenser les vapeurs formés pour les séparer, on peut considérer la distillation comme l'opération qui consiste à débarrasser de ses composants gazeux (le coke s'obtient par distillation de la houille).

- **La théorie de l'asphaltisation des pétroles :**

Elle explique la formation des bitumes par polymérisation et desydragénation des pétroles au contact de l'air est des eaux sulfatées (d'où l'origine de soufre contenu dans les bitumes).

- **La théorie organique :**

Elle attribue une origine animale à la formation des bitumes, par décomposition des mollusques sédimentés au voisinage des mers anciennes(exemple : la mer morte).

Aujourd'hui, après les données trouvées jusqu'à maintenant la théorie la plus probable est la théorie organique, elle semble plus convainquante vu les recherches faites sur la composition chimique des bitumes.

IV-1-2) le bitume artificiel :

Les bitumes ou brais de pétrole se sont les résidus obtenus à partir de pétroles lourds :

- soit par distillation fractionnée ; brais de pétrole de distillation, très utilisé en technique routière.

- Soit par oxydation (soufflage à l'air comprimé) ; brai de soufflage ou bitume oxydé employé en étanchéité (enduits appliqués à chaud).

Les principaux centres de production se trouvent au Mexique, en Californie et au Venezuela. Les produits plus ou moins pâteux, à la température ordinaire, sont très agglomérants et fusibles, ils contiennent peu de produits volatils, et sont solubles dans le sulfure de carbone.

IV-1-3) composition chimique du bitume :

Le bitume, corps plus au moins viscoélastique, est un corps complexe et il est illusoire de vouloir identifier la totalité de ses composants. De ce fait le fractionnement des bitumes en famille chimiques est apparu comme l'approche la plus efficace.

Le bitume est composé d'hydrocarbure de poids moléculaires élevés appartenant en majorité aux groupes naphthétiques et asphaltiques.

D'une façon générale, le bitume contient :

80 à 85% de carbone

10 à 15% d'hydrogène.

2 à 3% d'oxygène.

traces : soufre, azote, nickel, aluminium.

Le traitement du bitume par des solvants sélectifs permet de le séparer en plusieurs fractions.

Par traitement à l'heptane normal, on sépare le bitume en deux fractions : les maltènes et les asphaltènes. les maltènes constituent la partie soluble dans l'heptane normal et peuvent par

traitement à l'hexane normal, être fractionnées en deux parties ; les huiles et les résines. Les huiles à leur tour peuvent être séparées en huiles aromatiques et huiles saturées.

D'une façon générale, on considère le bitume comme formé de trois familles correspondantes à des entités chimiques bien définies mais résultant de différents procédés de séparation.

Exemple : composition pour un bitume 80/100 :

11% d'asphaltènes

34% de résines

55% d'huiles

les proportions respectives des différentes fractions dépendant des facteurs suivants :

- l'origine du pétrole.
- le procédé de fabrication du bitume.
- le procédé de séparation.

IV-1-4) utilisation des bitumes :

Ils sont surtout utilisés dans les travaux routiers, soit par pénétration (bitume émulsionné en générale) soit par tapis (mortiers et bétons bitumineux, bitumée). Les goudrons – bitumes mélangés donnent des chaussées antidérapantes et plus plastiques, ne fendillant pas l'hiver. Les bitumes servent en outre :

- à l'hydrofugation des mortiers hydrauliques (3% dans l'eau de gâchage)
- à la fabrication de divers caoutchoucs, mastics et peintures l'émulsion de bitume s'emploie également comme liant de granulats de liège ou de sciure de bois traitée, pour réaliser des sous-couches résilientes d'isolation phonique aux bruits d'impact.

Il faut éviter également les plaques ondulées bitumées (support fibreux minéral et végétal saturé sous vide et à haute température de brai de pétrole) pour couverture et bandage.

Utilisation des différents bitumes : Les bitumes 180/220 sont utilisés pour la confection des émulsions et des enrobés fins, outre leur emploi en répandage superficiel. Ils ne sont utilisés qu'exceptionnellement pour la confection d'enrobés denses. Lorsqu'il s'agit d'obtenir des revêtements particulièrement souples sur des sols très déformables.

Les bitumes 80/100 et 60/70 sont destinés à la confection des enrobés denses et des bétons.

Les bitumes 40/50 et 20/30 sont des bitumes durs qui peuvent avoir les mêmes emplois que les précédents, mais sous des climats chauds. A signaler toute fois la tendance actuelle à utiliser les bitumes 40/50 pour la confection d'enrobés particulièrement soignés.

IV-II) Essais subis par les liants de base (le bitume):

Les essais qui s'effectuent dans les laboratoires spécialisés sont nombreux et complexes. Ils visent surtout à mesurer les qualités recherchées ; adhésivité, cohésion interne, viscosité, on peut citer :

- *l'essai de pénétration* :

L'essai de pénétration consiste à enfoncer dans un échantillon de liant à une température donnée 25°C une aiguille standard pendant une durée de temps de 5 secondes sous une charge totale de 100 g ; l'enfoncement de l'aiguille, mesuré au 1/10 de mm, est appelé " pénétration " du bitume étudié. Classification des bitumes suivant le type et la valeur de pénétration :

1. Bitume dur ⇒ pénétration 40 / 50.
2. Bitume demi-dur ⇒ pénétration 80 / 100.
3. Bitume demi-mou ⇒ pénétration 180 / 220.
4. Bitume mou ⇒ pénétration 280 / 300.
5. Bitume très mou ⇒ pénétration 300 / 350
6. Bitume fluide (Cut back, road, oil) ⇒ pénétration supérieure à 350.

- **Le mesure de point de ramollissement :**

Cet essai consiste à couler un disque de bitume dans un anneau de 15.9 mm de diamètre intérieur et 6.3 mm d'épaisseur et à placer sur le disque de bitume une bille d'acier de 3.5 g l'ensemble est mis dans un bain-marie et est progressivement chauffé jusqu'à ce que le disque de bitume flue sous le poids de la bille et vienne toucher le fond du récipient.

On note la température qui représente le point de ramollissement bille-anneau.

- **L'essai de vieillissement :**

On a deux essais de vieillissement, l'un est l'essai d'exposition, l'autre d'étuvage en couche mince.

Ces essais s'appliquent aux liants seuls, d'autres portant sur les mélanges d'agrégats et de liants, ont été développés et sont actuellement utilisés dans tous les laboratoires de recherches.

- **The thin film oven test :** Il consiste à étuver 5H à une température $T = 163^{\circ}\text{C}$, un film de liant de 3,2 mm d'épaisseur.

Cette condition de vieillissement correspond en pratique à un an de vieillissement sur la route.

- **The rolling thin film oven test :** Il consiste à étuver 35 g de bitume contenu dans une fiole cylindrique animée d'un mouvement de rotation autour de son axe horizontal pendant 75 minute, à une température de 163°C en présence d'oxygène.

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

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

- **Viscosité des bitumes :**

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

Soient deux plans de surface situés à une distance D et se déplaçant parallèlement l'un par rapport à l'autre sous l'effet d'une force F à une vitesse V .

La viscosité dynamique μ est définie par la relation :

$$\frac{F}{S} = \frac{V}{D} \times \mu .$$

La viscosité des liants à l'état de liquide visqueux est mesurée avec un viscosimètre à écoulement muni d'un ajustage de 10 mm et parfois de 4 mm de diamètre " viscosimètre BRTA ".

Pour les émulsions et parfois pour les liants ordinaires, on se sert d'un viscosimètre à écoulement muni d'un ajustage de 2,8 mm, qui est le " viscosimètre ENGLER ".

Pour les liants solides, on peut caractériser la viscosité par la durée d'écoulement, on exploite deux méthodes de mesure :

1. - mesure de pénétration.
2. - mesure de point de ramollissement.

Entre la viscosité η d'un liant exprimée en kilo poisses et sa pénétration " P " exprimée en dixièmes de mm on a sensiblement la relation : $\eta = \frac{1,58 \times 10^{10}}{pen \times 2,16}$

- **essai de poids spécifique :**

Les résultats sont généralement donnés à 20/25°, ce qui signifie que l'essai a été effectué sur la base des volumes égaux de produits et d'eau, tous deux à 25°. Cette détermination est nécessaire pour les conversions volume/poids.

- **essai de perte de masse au chauffage :**

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

- **essai de ductilité :**

C'est une caractéristique complexe qui est fonction à la fois de la viscosité et de la cohésion interne du liant.

Un liant est ductile à une certaine vitesse de déformation, lorsqu'il peut être étiré à cette vitesse et à une certaine température sans se rompre.

On mesure la ductilité d'un liant au moyen d'un ductilimètre standard et l'essai se fait dans l'eau sur des éprouvettes en forme de «8 ».

La susceptibilité croît \Rightarrow la ductilité d'un liant croît.

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

- **point d'éclair :**

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

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

- **essai de fragilité Fraass :**

Cet essai ne fait l'objet d'aucune norme, fournit la température T_{FR} à la quelle une fissure apparaît dans un film de bitume étalé sur une plaque métallique, refroidie et soumise à la flexion. Cet essai, le seul utilisé à basse température, se situe dans le domaine solide-fragile ($-30^{\circ}\text{C} < T_{FR} < 0^{\circ}\text{C}$).

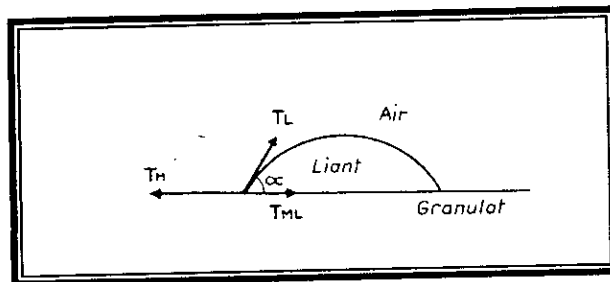
IV-III) Le contact liant – granulat :

Les liants hydrocarbonés ne sont utilisés que pour agglomérer les granulats. Ce n'est qu'incidemment que leurs propriétés hydrophobes et leur imperméabilité apportent à la chaussée des qualités complémentaires. Le but principal lors de la confection de couches bitumineuses est d'obtenir une cohésion efficace et d'assurer une rigidité élevée de la chaussée ce collage des granulats sous-entend :

- Un bon mouillage des grains minéraux par le liant fluide.
- Une bonne adhérence du liant durci aux grains minéraux.
- Le maintien de cette adhérence même en présence d'agents qui tendent à se substituer au liant à la surface des grains. L'agent de déplacement le plus dangereux, parce que toujours présent, est l'eau.

1) le mouillage :

Condition nécessaire mais non suffisante pour une bonne adhésivité du liant et du granulat, est l'étalement en film mince du liant liquide à la surface du granulat supposé à la même température que le liant (cette condition est indispensable car un liant chaud répandu sur un granulat froid fige immédiatement et le mouillage ne peut se produire).



la figure montre la coupe d'une goutte de liant s'étalant à la surface d'un solide. Si, selon l'usage, on formule l'hypothèse de l'existence de tensions tant à la surface du liant (T_L) qu'à la surface du granulat (T_M) et qu'à la surface du liant et du granulat (T_{ML}), on pourra écrire à l'équilibre :

$$T_M = T_L \cdot \cos \alpha + T_{ML}$$

Si $T_M - T_{ML} > T_L$ l'équilibre est impossible à réaliser et il y a étalement du liant, c'est-à-dire mouillage.

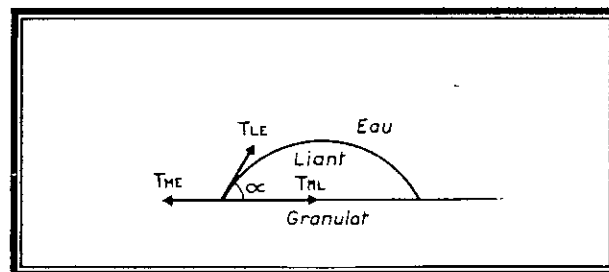
Si $T_M < T_{ML} - T_L$ l'équilibre est également impossible et il y a rétraction du liant et absence de mouillage.

Le mouillage sera d'autant meilleur que T_M est grand et que $T_{ML} + T_L$ est faible. Les liants à faible tension superficielle et interfaciale mouillent bien. On notera que la viscosité intervient quand à la rapidité du mouillage mais n'a pas d'influence sur le résultat final.

C'est ainsi que l'eau est un bon mouillant parce que sa tension interfaciale est en général faible, malgré une tension superficielle élevée, l'eau étant très peu visqueuse, de plus, le mouillage est rapide.

2) le déplacement par l'eau :

si par suite d'un quelconque défaut d'enrobage il existe un point du granulat où du liant est lacunaire, on aura tôt ou tard ~~et~~ contact les trois phases : liant, granulat, eau.



La figure donne les conditions d'équilibre des trois phases et on peut écrire :

$$\cos \alpha = \frac{T_{ME} - T_{ML}}{T_{LE}}$$

T_{ME} = tension interfaciale eau-granulat.

T_{ML} = tension interfaciale liant-granulat.

T_{LE} = tension interfaciale liant-eau.

Or T_{ME} est toujours extrêmement faible ; $\cos \alpha$ est donc négatif et il y a formation de gouttes de liant, celui-ci étant généralement chassé par l'eau. mais ce déplacement est gêné par la

viscosité du liant et par les liaisons mécaniques ou chimiques qui ont pu s'établir entre le liant et le granulat.

3) l'adhésivité :

l'adhésivité d'un liant à un granulat peut être définie comme l'effort nécessaire pour arracher le liant de la surface enduite. Mais cette notion d'apparence très simple est en réalité complexe.

CHAPITRE V

V) LES ENROBES BITUMINEUX :

Introduction :

On appelle enrobé l'ensemble des matériaux résultant du mélange d'un granulat et d'un liant hydrocarboné qui peut être soit du bitume donnant un «enrobé bitumineux», soit un goudron donnant un «enrobé goudronneux».

Un enrobé bitumineux peut être considéré comme un système constitué d'une phase solide (pierres, sables, fillers), liquide(liant), et gazeuse(vide).

- Phase solide : fournit à l'ensemble l'élasticité et la résistance au cisaillement.
- Phase liquide : contribue à la cohésion et à la viscoélasticité de l'ensemble.
- Phase gazeuse : n'influence qu'indirectement certaines propriétés physiques et mécaniques de l'enrobé ; dans le contexte pratique, on mentionne la teneur en vide comme une caractéristique importante de l'enrobé.

L'emploi de l'enrobé bitumineux pour la construction et le renforcement des chaussées c'est développé considérablement, depuis quelques années au fur et à mesure que la fabrication industrielle de ce matériau permettait à la fois d'améliorer ses qualités et d'abaisser son prix de revient.

V-1) CLASSIFICATION DES ENROBES BITUMINEUX :

Les mélanges réalisés peuvent être très divers notamment du point de vue de granularité du squelette minéral de l'enrobé. les enrobés peuvent être alors :

- soit ouvert : Si le pourcentage des vides est élevé (>12%).
- soit dense : si le pourcentage des vides est faible (<8%), caractéristique obtenue en utilisant

Un squelette minéral à granularité continue et ayant un pourcentage notable de fines.

- soit demi-dense : lorsque le pourcentage des vides varie entre 8% et 12%.

Pour préciser ces trois notions, on a recours à la valeur de la compacité obtenue dans l'essai au laboratoire connu sous le nom d'essai « Duriez ».

En effet, pour les matériaux des mailles maximales D_{20} ; on définit les catégories suivantes :

- Enrobés denses : dont la compacité est supérieure ou égale à 91%
- Enrobés semi-dense : dont la compacité est comprise entre 88% et 91%
- Enrobés ouverts : dont la compacité est inférieure à 88%.

V-2) QUALITES EXIGEEES D'UN ENROBE :

Les qualités essentielles qui doit être avoir un enrobe sont :

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'ornières 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 de granulats durs et anguleux.

LA FLEXIBILITE :

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

L'ABSENCE DE SENSIBILITE 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 aux efforts de poinçonnement, ainsi que la rugosité ce qui suppose que les granulats ne se polissent pas facilement sous l'action de la circulation et qu'ils gardent des arêtes au contact des pneumatiques.

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

V-3) STABILITE DES ENROBES :

L'enrobé mis en place, doit être stable ; cette stabilité, à la quelle doit se joindre la stabilité dans le temps, (résistance au vieillissement et à la déformation), est obtenue en jouant sur différents facteurs de composition et de mise en place dont les principaux sont :

- Stabilité des couches sous-jacentes.
- Une épaisseur appropriée du revêtement en rapport avec la dimension des gros granulats.
- Un échelonnement très étudié des différentes grosseurs des grains de l'ossature minérale, à partir du plus gros jusqu'au plus fin.
- Un choix raisonné de la qualité des granulats .
- Un choix approprié à chaque cas du degré de dureté du bitume choisi dans les nuances dur ou semi-dur.
- Enfin la teneur en liant étudiée.

V-4) FACTEURS INFLUENCANT UN BETON BITUMINEUX

Les propriétés des enrobés hydrocarbonés peuvent varier si l'on influe sur les caractéristiques des trois facteurs principaux de la composition que sont les granulats, les fines, le liant, ainsi que sur la compacité de l'ensemble.

Influence des granulats :

Elle s'exerce sur les propriétés des enrobés par l'intermédiaire de la granularité, de l'angularité et des fines.

➤ Effet de granularité :

Le choix de la granularité pour les couches de roulement n'est pas uniquement imposé par le souci d'obtenir une bonne compacité. Un compromis doit être trouvé étant donné la nécessité d'obtenir une texture superficielle présentant une macrorugosité suffisante pour le maintien des caractéristiques antidérapantes des revêtements et pour mieux résister à l'action des pneus à crampons. A cet effet, on tend à augmenter la dimension maximale des granulats ce qui va dans le sens d'une meilleure compacité (à condition que l'épaisseur de la couche ne permette) et à une diminution de la teneur en bitume.

➤ Effet de l'angularité :

Elle a une influence directe sur la résistance à l'orniérage. La présence de granulats anguleux dans un enrobé hydrocarboné augmente la résistance aux cisaillements grâce aux frottements interne plus élevé du squelette.

Elle augmente également les qualités antidérapantes du revêtement en présentant des arêtes vives plutôt que des faces roulées, c'est pourquoi dans les couches de roulement il est préférable d'utiliser des granulats entièrement concassés, malgré l'inconvénient de conduire à des enrobés difficiles à compacter.

➤ Influence des fines :

Le rôle principal des fines est de remplir les vides du squelette granulaires conduisant ainsi à une augmentation de la compacité et, par suite, à une meilleure imperméabilité de l'enrobé. Le cas extrême est celui des bétons bitumineux coulés qui, avec une teneur en fine allant jusqu'à 25 %, ont une teneur en vide pratiquement nulle, d'où une compacité avoisinant les 100 %.

Les fines agissent également par leur dosage sur les caractéristiques mécanique de l'enrobé et notamment sur la rigidité, puisque c'est surtout la quantité de fines qui détermine l'épaisseur du film de bitumes. Les films minces conduisent à des enrobés plus rigides et moins susceptibles à la température.

L'effet de rigidification des forts rapports fines-bitume se traduit sur de nombreuses caractéristiques mécaniques des enrobés et en particulier sur le module complexe et sur la résistance à l'orniérage. En ce qui concerne ce dernier point il semble cependant que l'utilisation d'un rapport fines-bitume élevé ne suffise pas à conférer au matériau une bonne résistance à l'orniérage si la granularité et l'angularité du squelette n'y contribuent pas également.

Influence de bitume

De tous les facteurs de formulation, le bitume est sans doute celui qui à l'influence la plus nette, car le comportement rhéologique des enrobés hydrocarbonés est le reflet de celui du bitume utilisé. Il intervient par sa dureté et par son dosage dans l'enrobé.

➤ Effet de la dureté du bitume :

La diminution de pénétrabilité du bitume, c'est – à – dire l'utilisation de bitumes plus durs, se traduit par une augmentation importante du module de l'enrobé pour une même température et un même temps de charge, ce qui est important pour la résistance à la fatigue des couches bitumineuses à faible déflexion.

En fin, l'utilisation de bitumes plus durs se traduit par une augmentation de la résistance à l'orniérage. Cette qualité a été mise en évidence par la comparaison des profondeurs d'ornières obtenues dans un essai de simulation utilisant un orniéreur.

➤ Effet de la teneur en bitume :

Une majoration de la teneur en bitume a pour effet immédiat, comme les fines, d'accroître la compacité de l'enrobé par augmentation de l'effet de lubrification des granulats et par le remplissage des vides. De même, à partir d'une basse teneur en bitume les résistances mécaniques à la compression et à la traction croissant avec l'augmentation de la teneur bitume, mais, au-delà d'un certain pourcentage, on assiste à une chute des résistances mécanique par déformabilité excessive lorsque la teneur en vides devient très faible. Le dosage optimum est très difficile à obtenir, car il doit tenir compte des granulats et surtout de l'épaisseur de l'enrobé.

Influence de la compacité

A la différence des facteurs étudiés ci-dessus, la compacité des enrobés n'est pas un critère de formulation, mais une caractéristique du mélange qui résulte, à la fois, des facteurs de formulation et des conditions de mise en œuvre. Le rôle de chacun des facteurs de la formulation sur la compacité a été examiné ; il faut retenir qu'une compacité élevée conditionne un grand nombre de qualités des enrobés hydrocarbonés telle que :

- La résistance à la rupture ;
- Le comportement à la fatigue ;
- La durée de vie : selon Saunier elle est multipliée par trois lorsque la compacité passe de 91 à 95,5 % ;
- Le module complexe ;
- La tenue à l'eau est aux sels de déverglaçage ;
- La résistance au pneu à crampons ;

La résistance au vieillissement par oxydation du bitume.

CHAPITRE VI

VI) LES SABLES BITUMINEUX :

VI-1) DEFINITION D'UN SABLE- BITUME :

Définition :

Le sable bitume est un sable naturel ou artificiel traité en centrale au bitume pur et destiné à être utilisé en couche d'assise ou couche de roulement.

Pour des questions de prix de revient le sables, généralement utilisés, sont des sables naturels.

Toutes sortes de sables, fins moyens ou grossiers, calcaires ou siliceux, ont été employés ;

Seules des raisons de propreté et de performances mécaniques ont fait déconseiller l'emploi de certains sables.

Les sables artificiels (sables concassés ou broyés de carrières ou de ballastières) sont employés en apport à un sable naturel pour améliorer son angularité, sa granulométrie et introduire des fines.

Le bitume en général est du 20/30, des études ont été faites avec du 40/50.

Les sables naturels utilisés en construction routière sont prélevés :

- a) Soit dans des gisements appartenant à des couches géologiques "classiques".
- b) Soit dans des alluvions des rivières ou fleuves (basse vallée ou terrasse).
- c) Soit, plus rarement, sur les plages ou dunes.

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

Les sables bitumes sont utilisés en assise de chaussée (couche de base ou de fondation). Ils sont en effet recouverts d'une couche plus ou moins épaisse d'un autre type d'enrobé bitumineux, qui les protège des agressions trop brutales du trafic ou du climat (pluie).

Or le rôle de l'assise est essentiellement mécanique, elle doit :

- répartir la charge de l'essieu sur le support
- ne pas fissurer par fatigue
- Ne pas orniérer ou subir de grandes déformations permanentes sous les charges répétées.

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 3 fonctions de l'assise :

- Essai de module.
- Essai de fatigue.
- Essai de fluage dynamique ou d'orniérage L.P.C.

Les enrobés bitumineux étant viscoélastiques, leurs propriétés mécaniques varient avec les conditions de sollicitation. Tous les essais peuvent donc être faits à différentes températures, différentes fréquences (pour tenir compte de la vitesse des véhicules) et sous différentes contraintes (pour tenir compte du support plus ou moins rigide de la couche du sable bitume et de l'épaisseur de cette dernière en particulier).

L'assise doit :

- a) Répartir la charge de l'essieu sur le sous-sol ;
- b) Ne pas fissurer par fatigue ;
- c) Ne pas orniérer.

La formulation doit permettre :

- a) Un module élevé ;
- b) Une durée de vie élevée en fatigue ;
- c) Un fluage dynamique.

Le sable utilisé est un sable propre ($ES > 40$, $IP=0$). 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 centrale à l'aide d'un bitume pur, le plus dur possible pour gagner en cohésion.

Les différences essentielles entre des sables - bitumes ou des sables enrobés à froid (les deux étant naturellement stables) est le liant ayant pour rôle de maintenir cette stabilité dans l'environnement climatique du matériau (risque de dessiccation ou au contraire d'imbibition).

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

Domaine d'emploi :

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

Lorsque le niveau de performance d'un sable - bitume ne permet pas de dépasser le niveau d'une couche de fondation, le problème de la compétitivité de cette technique, par rapport à d'autres solutions de traitement, pourra se poser.

Les sables – bitume sont utilisables également en couche de base de renforcement jusqu'à un seuil de trafic qui dépendra là encore de leur niveau de performances.

Selon le niveau de trafic et la nature de la plate-forme, les épaisseurs les plus couramment employées se situent entre 10 et 25cm en ce qui concerne les fortes épaisseurs, outre l'aspect économique, la limitation d'emploi tient d'avantage à des problèmes d'exécution que de nature du matériau (pas de problème de séchage comme dans le cas des sables enrobés à froid). Pour des épaisseurs supérieures à 25 cm, il y a intérêt à passer en deux couches.

VI-2) GENERALITES SUR LES SAND ASPHALT :

Le Sand-Asphalt peut comprendre 0 à 10% de filler, ce matériau est moins riche en liant si on le compare à d'autres enrobés bitumineux tels que les microbétons et les sheet-Asphalt qui eux possèdent aussi beaucoup plus de fines ($< 0.08 \mu$) de l'ordre de 10 à 20%.

On donne dans le tableau suivant la granulométrie du Sand-Asphalt.

Tamis (mm)	Passoires	% de passant
5	6.3	100
2	2.5	80 à 100
0.315	0.4	20 à 85
0.080	0.1	0 à 10

Qualité des constituants :**les sables :**

Les sables utilisés doivent être propres (ES >40) et sans argile (IP non mesurable). Dans des régions de très faibles pluviométries, on pourra admettre des valeurs d'ES plus faibles (ES >20).

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

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

Sable fin —————> sable moyen —————> sable grossier

Le sable employé devra par ailleurs contenir moins de 0.2% de matières organiques.

Dans le cas contraire, il faudra veiller à leur absence de nocivité (tenue à l'immersion).

Remarque : L'utilisation d'un tambour sécheur pour l'enrobage minimise dans bien des cas l'importance de ce paramètre.

le liant :

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

En Europe, bon nombre de chantiers ont été réalisés avec des bitumes de pénétration 20/30. Ce liant est malheureusement peu disponible et le plus souvent c'est un bitume 40/50 ou 60/70 qui sera employé.

Ce souci d'utiliser un liant de grande dureté tient au fait que le principal problème avec les sables – bitume est l'obtention d'une résistance à l'orniérage suffisante, et un bitume dur améliore considérablement les choses.

VI-3) LE SABLE-BITUME AU SAHARA

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 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 ; elle a été utilisée en France et dans d'autres pays du monde, suivant certaines restrictions et spécifications.

VI-3-1) Résultats obtenus sur certaines routes sahariennes :

➤ RN3 Hassi-Messaoud - Edjele :

Après la découverte du grand gisement pétrolier de Hassi-Messaoud et celui d'Edjele plus au sud, on a réalisé une chaussée légère constituée uniquement de 10 cm de sable enrobé à froid posé directement sur le sol naturel.

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

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

➤ **RN3 région de Gassi Touil :**

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

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

- le sol naturel a été compacté à l'état humide
- une couche de fondation de 8 à 18 cm d'épaisseur en sable à granulométrie étalée et contenant 15% à 35% de fines.
- Une couche de base de 12 cm d'épaisseur du même matériau que la couche de fondation mais traitée de lignisulfite (résidu de l'industrie de cellulose)
- Une couche d'accrochage des tapis de 1kg/m^2 en cut-back
- Une couche de roulement tapie de 5.5 cm d'épaisseur en sable enrobé

La formulation du sable -bitume employée est :

- sable à granulométrie étalée avec un pourcentage de fines entre 5% et 8%
- teneur en liant (bitume 80/100) entre 6.4% et 6.8%
- module de richesse égal à 4.

Ce tronçon de route fut mis en service en 1960, deux ans après quelques désordres firent leur apparition sous forme de fissures longitudinales et transversales, qui se sont généralisées le long de la route sans pour autant diminuer considérablement le niveau de service et sans de déformation en surface remarquable, ce tronçon de route continuait à servir jusqu'en 1984, où les premiers travaux de renforcement ont eu lieu.

~~13023~~ **RN3 Still - Touggourt :**

Elle a été réalisée au cours de l'année 1956-1957, le corps de chaussée était constitué de matériau gypseux sur environ 20 à 30 cm d'épaisseur, quant à la couche de roulement, elle est en sable enrobé sur toute la longueur de la route (140 km) avec des épaisseurs variables d'environ 6 cm.

La formule du sable bitume était comme suit :

- sable à granulométrie serrée contenant plus de 95% d'éléments inférieurs à 0.4 mm, entre 55% et 75% d'éléments à 0.2 mm et 22% de fines ($<80\mu$) ; sable de M'RAEIR.
- teneur en liant (bitume 80/100) entre 8.5% et 10%
- module de richesse égal à 4.13
- densité apparente Hubbard-Field entre 1.82 et 1.90 g/cm³
- stabilité Hubbard-Field à 25 °C : 1775 à 2115 kg
- stabilité Hubbard-Field à 60 °C : 720 à 750 kg.

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

- densité apparente entre 1.64 et 1.78 g/cm³
- compacité entre 70% et 78%
- teneur en liant entre 8.1% et 13.3%
- pourcentage en filler entre 21.9% et 32.5%.

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

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

La reprise de la route par un renforcement n'a été effectuée qu'en 1985, après 28 ans de service environ, notons que ce tronçon de route est l'un des plus circulés des routes sahariennes (environ 1800 véhicules par jour, dont la majorité des poids lourds).

➤ **RN48 Still – El-Oued :**

C'est une route de 140 km de longueur, la configuration Nord – sud reliant la RN3 à la ville d'El-Oued, qui fut réalisée en 1956, avec un sable gypseux en corps de chaussée, et en revêtement à sable bitume ; en absence de tout autre sable, le sable de dune constituait le squelette essentiel du matériau enrobé.

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

- 94% de sable de dune (Sif El Menadi)
- 5% de filler d'apport
- 1% de chaux
- 6.2% de bitume pur 80/100
- module de richesse égal à 3.45
- densité apparente Hubbard-Field : 1.82 g/cm^3
- stabilité Hubbard-Field à 25°C : 1624 kg
- stabilité Hubbard-Field à 60°C : 170kg.

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

- pourcentage de bitume entre 5.1 et 7.9
- pourcentage de filler entre 4.3 et 10.4
- module de richesse entre 3.3 et 3.6
- densité apparente 1.64 et 1.88 g/cm^3
- compacité entre 68.4% et 78%

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

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

Cette route n'a bénéficié que d'un entretien superficiel (de temps à autre d'un enduit monocouche ou bicouche), et ce n'est qu'en 1988 qu'on a décidé au renforcement d'un premier tronçon à partir de Stil.

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

- la déformation visuelle de la route presque générale sous forme de fissuration longitudinale et transversale et quelques faïençages ajoutés parfois à des cornières de faibles amplitudes. Les dégradations s'accroissent sur les tronçons de traversées de choix et des bas fonds où le sol est constamment humide
- les mesures des déflexions ne dépassent que rarement cent centièmes de millimètres à l'exception des parties correspondantes aux bas fonds.

➤ **RN49 Ouargla – Hassi- Messaoud :**

Douze kilomètres de cette route ont été réalisés en sable enrobé avec la formulation suivante :

- sable moyen à grains moyens arrondis contenant 93% d'éléments intérieurs à 2 mm et 17% de fines
- compacité Hubbard-Field 88%
- stabilité Hubbard-Field à 25°C : 1540 kg
- stabilité Hubbard-Field à 60°C : 620kg.

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

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

CHAPITRE VII

VII) FORMULATION DU SABLE BITUME

VII-1) Région de Ouargla

➤ Géologie

L'étude géologique de la région de Ouargla, nous révèle une prédominance d'encroûtements(calcaires-gypseux) dus à la remontée capillaire d'eau de nappes, chargées en sels divers qu'elles déposent sous l'influence de l'évaporation(encroûtements gypseux ou salins) ou au départ du CO₂ d'équilibre (encroûtements calcaires).

Encroûtements calcaires:

La solubilité du Carbonate de calcium dépend de la teneur de l'eau en anhydride carbonique

D'après F. NETTERBERG, l'eau du sol contient jusqu'à 1% ou d'avantage d'anhydride carbonique, tandis que l'air atmosphérique n'en contient que 0.132%. cette eau interstitielle est donc capable de maintenir en solution des quantités importantes de carbonate de chaux.

Comme l'eau interstitielle se trouve à une pression inférieure à la pression atmosphérique, il se produit une succion qui donne lieu au dégagement de CO₂.

En temps chaud, l'évaporation accentue la succion par suite de l'abaissement de la nappe ; il y a une augmentation du potentielle capillaire et précipitation de la calcité par suite du dégagement de CO₂.

A un stade avancé, lorsque la teneur en carbonate on a alors à faire aux encroûtements calcaires . l'enrichissement en calcaire se poursuivant, le sol devient imperméable et à la base de celui-ci va se former une croûte durcie (80 à 50% de carbonates) qui peut évoluer vers une dalle compacte.

Encroûtements gypseux:

Les encroûtement gypseux se présentent souvent en bancs blanchâtres, richement formés, ils sont durs, les anciens encroûtements sont peu compacts et friables, mais il n'en perdent pas pour autant leurs qualités comme matériaux de chaussée. Des encroûtements gypseux ont pu être obtenus expérimentalement en laboratoire par R. COQUE qui a ainsi vérifié que le gypse commençait par se déposer aux points de contacts entre les grains de

sable. Ces grains sont écartés et dispersés dans l'encroûtement. Les sables encroûtés par le gypse sont très souvent des sables éoliens, il peut aussi s'agir de sédiments lacustres.

Les gisements de sable gypseux sont situés de plus souvent sur des surfaces topographiques anciennes.

➤ **Température de référence**

Elle décolle de l'ancienne méthode de calcul et qui s'énonce comme suit :

$$T_{ref} = T_1 + \frac{T_2 - T_1}{3} \quad \text{où :}$$

pour Ouargla, la température de référence est 36.2°C avec : $T_1=33^{\circ}6$ et $T_2=41^{\circ}4$

➤ **Pluviométrie**

Suite à une étude d'assainissement, nous avons obtenu les renseignements suivants :

- Hauteur moyenne des précipitations : 53 mm.
- Nombre moyen de jours où les précipitations ont été supérieurs ou égale à 10 mm : 2.
- Evaporation moyenne annuelle: 3237 mm.
- Nombre moyen de jours d'orage : 5.

La faible valeur des précipitations explique l'aridité des passages environnants.

➤ **Gel**

Aucune indication n'a été fournie à ce sujet. L'indice de gel est pratiquement nul. Ce facteur n'interviendra pas dans le dimensionnement du corps de chaussée.

VII-2) Programme de l'expérimentation :

Dans notre travail expérimental, nous avons ciblé deux régions du sud algérien, en essayant d'étudier et de trouver une bonne formulation du sable bitume.

L'essentiel de notre travail au laboratoire consiste à l'étude du comportement du sable bitume par l'essai Hubbard-Field pour différentes formulations. A cet effet nous avons étudié :

- La variation de la stabilité en fonction de la teneur en bitume pour un même échantillon de sable.
- La correction de la granulométrie du sable avec un sable concassé, et son influence sur la stabilité.
- La correction de la granulométrie du sable de dune avec un sable gypseux existant en abondance dans de vastes régions du Sahara.
- L'influence de la dureté des matériaux de correction dans les résultats.
- Le rapport bitume/fines et son importance dans les formulations du sable bitume.

VII-3) Rappel du principe de l'essai Hubbard-Fild :

La mesure de la stabilité Hubbard-Field dans le cas d'un mortier hydrocarboné consiste à mesurer la pression qui provoque l'extrusion ou fluage, d'une briquette de 100g et de 50,8 mm de diamètre à travers un anneau de diamètre intérieur de 44,5 mm. Cette pression est appliquée à la vitesse de 1mm/sec sur une briquette, conservée à sec et 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, mais seulement le temps nécessaire à l'écrasement c'est à dire une heure.

VII-4) Rappels théoriques :

Détermination de la teneur en liant

La teneur en liant d'un enrobé bitumineux dépend de la granulométrie, de l'ossature et plus exactement, de la surface spécifique. Cette surface est d'ailleurs déterminée en grande partie par le pourcentage en fines, on admet d'une manière empirique la formule :

$$p = K \times \sqrt[5]{\Sigma} \quad \text{avec} \quad \Sigma = \text{surface spécifique}$$

K est appelé module de richesse : il caractérise l'épaisseur du film de liant enrobant les grains d'agrégat, son choix est sous la dépendance de la déformabilité, du climat, de la nature et l'intensité du trafic.

En général la valeur de k se situe entre 3,75 et 4,25.

La surface spécifique :

Exprimée en mètre carré par unité de poids, elle est la somme des surfaces extérieures de tous les grains, elle varie avec la dimension des grains : plus le matériau est fin, plus la surface spécifique est grande.

Pour les enrobés fins on adopte la formule suivante :

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

f = le pourcentage de fines (d < 0,08 mm).

1- Calcul de la compacité :

si on admet que :

- 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 donner par :

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

- Le pourcentage volumique des vides de l'éprouvette est :

$$V_m = 1 - \frac{d_m}{D_m}$$

- La compacité C ou pourcentage volumique des pleins est :

$$C = 100 - V_m$$

Identification des matériaux de composition :

1- Identification du bitume :

Notre bitume est un bitume 40 / 50.

- Pénétration à 25° = 47 (en 1/10 mm).
- Point ramollissement (°C) = 58.
- Point Diminution d'éclaire = 240° C.
- Point de flamme = 270 ° C.
- Ductilité à 25° C = 80.

2. Identification des sables

2.1. Sables originaires D'Ouargla

2.1.1. Sable de dune

a) Analyse chimique :

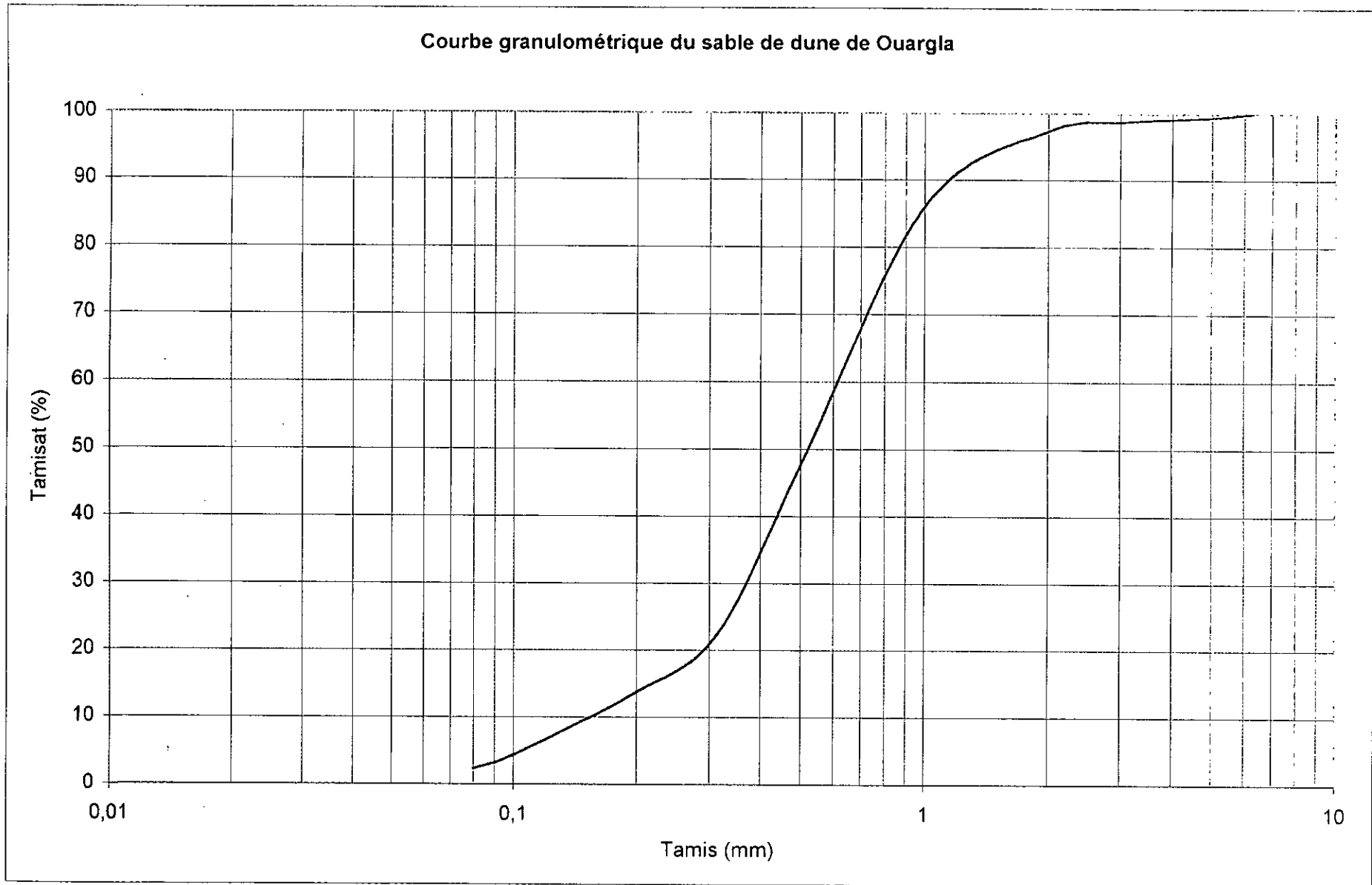
Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles	92,12
Fe ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃	0,95
SO ₄ Ca-2H ₂ O	3,68
Nacl	0,12
CO ₃ Ca	1,66
CO ₂	0,73
Perte du Feu	2,15
Eau de constitution	1,42

b) Analyse granulométrique :

Tamis (mm)	Tamisât
6,3	100
5	99,42
3,15	98,80
2	97,33
1	86,00
0,5	47,62
0,315	22,57
0,2	13,72
0,1	4,37
0,08	2,3

c) caractéristiques physiques :

- Poids spécifique = 2,68.
- Equivalent de sable = 76,63 %.
- Essai au bleu de méthylène, VB = 0,03.



2.1.2. sable concassé :**a) Analyse chimique :**

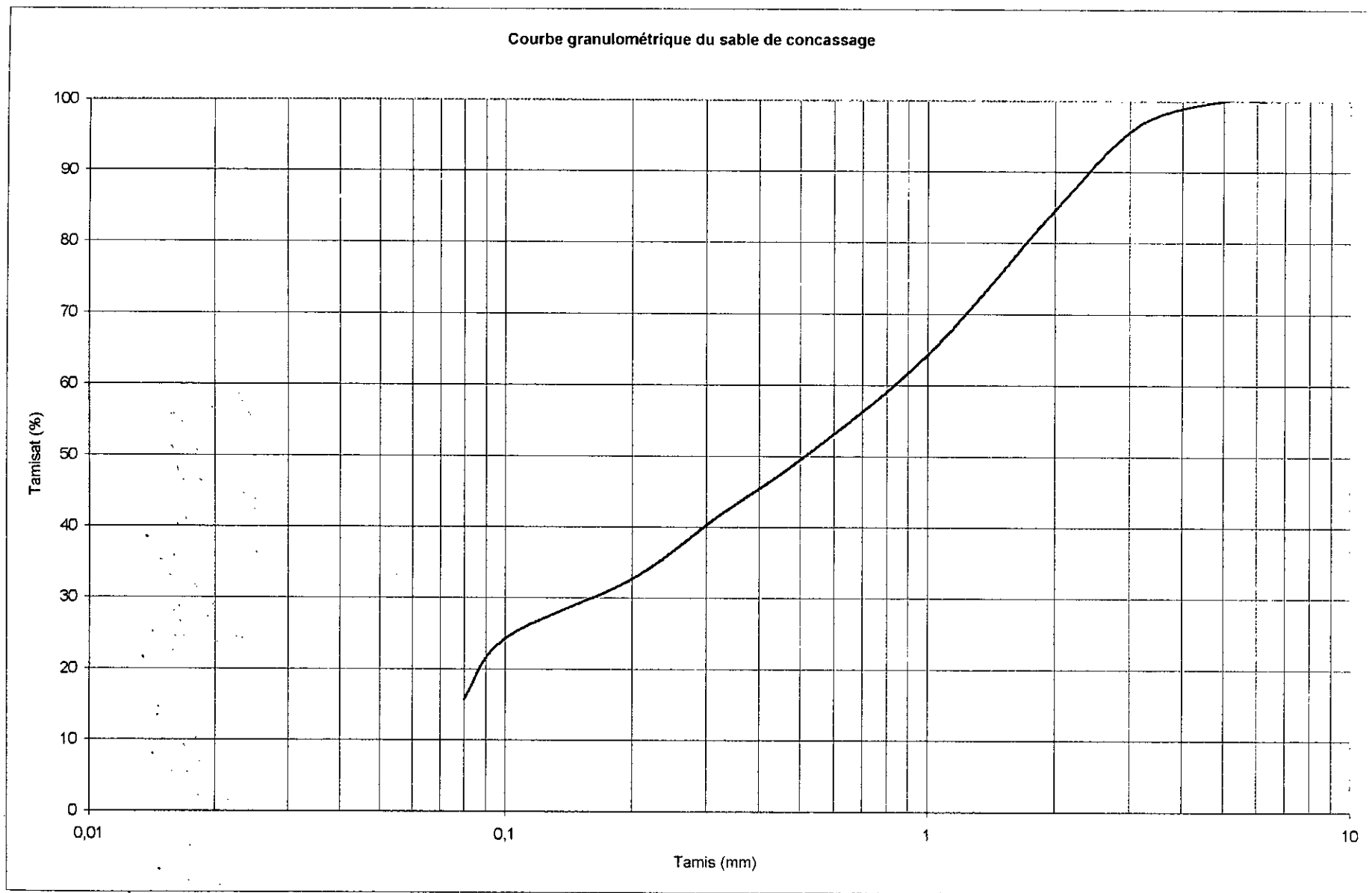
Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles	38,00
Fe ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃	2,00
SO ₄ Ca-2H ₂ O	5,16
Nacl	0,29
CO ₃ Ca	51,23
CO ₂	22,54
Perte du Feu	25,67 %
Eau de constitution	3,13 %

b) Analyse granulométrique :

Tamis (mm)	Pourcentage
6,3	100
5	99,99
3,15	96,54
2	84,6
1	64,3
0,5	49,539
0,315	41,296
0,2	32,74
0,1	24,28
0,08	15,78

c) caractéristiques physiques :

- Poids spécifique = 2,47
- Equivalent de sable = 46,86 %.
- Essai au bleu de méthylène, VB = 0,85.
- Friabilité = 52,40 %.



2.1.3. Sable gypseux :

a) Analyse chimique :

Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles	9,46
Fe ₂ O ₃ -AL ₂ O ₃	2,5
SO ₄ Ca-2H ₂ O	70,58
Nacl	0,87
CO ₃ Ca	6,61
CO ₂	2,9
Perte du Feu	23,45
Eau de constitution	20,55

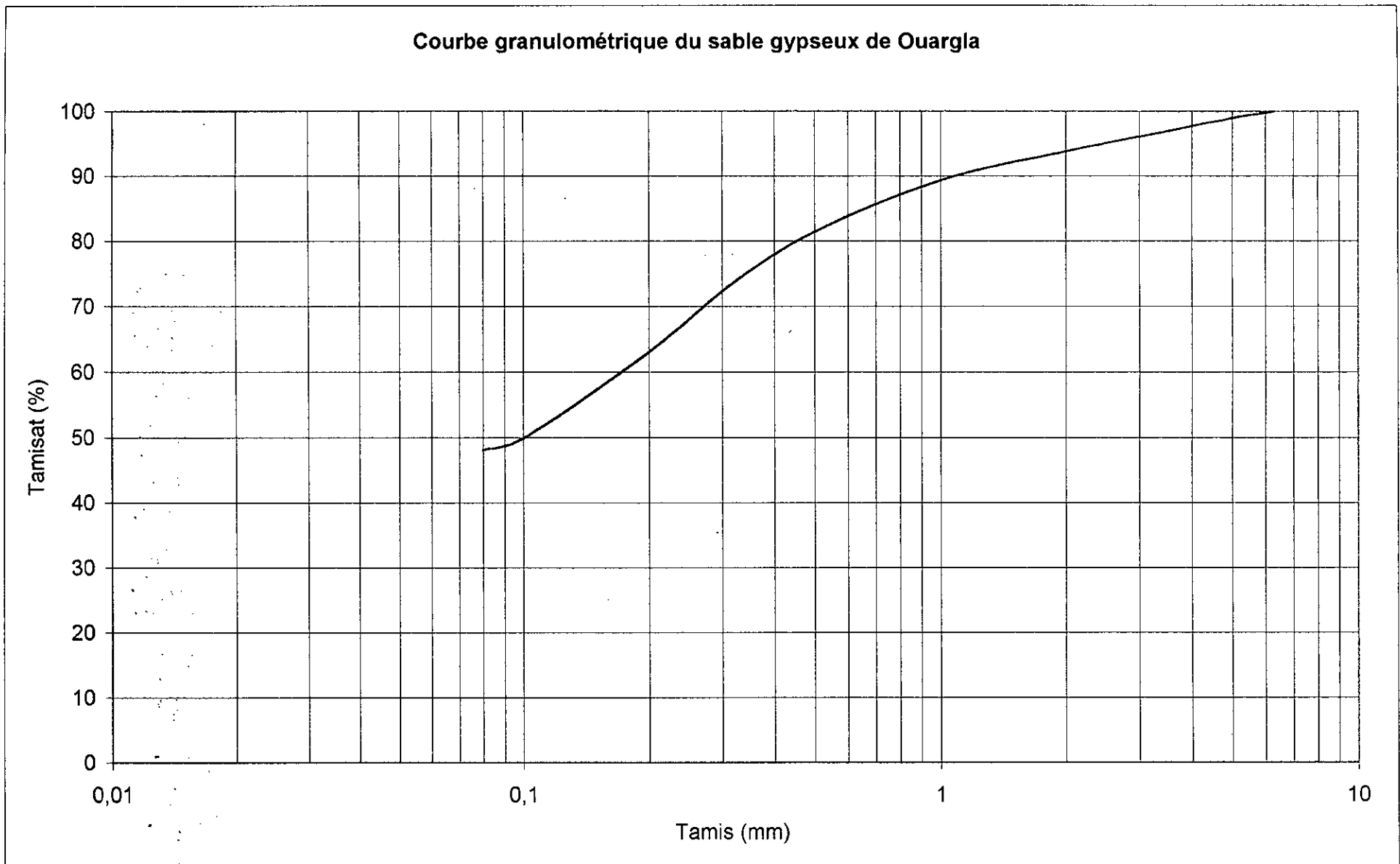
b) Analyse granulométrique :

Tamis (mm)	Pourcentage
6,3	100
5	99,033
3,15	96,355
2	93,77
1	89,382
0,5	81,43
0,315	73,348
0,2	63,11
0,1	49,90
0,08	48,11

c) Caractéristiques physiques :

- Poids spécifiques = 2,35.
- Essai au bleu de méthylène, VB = 2,13.
- Friabilité = 89,60.

Courbe granulométrique du sable gypseux de Ouargla



2.2. Sables originaires de Hassi – Berkine :

2.2.1. Sable de dunes :

a) Analyse chimique :

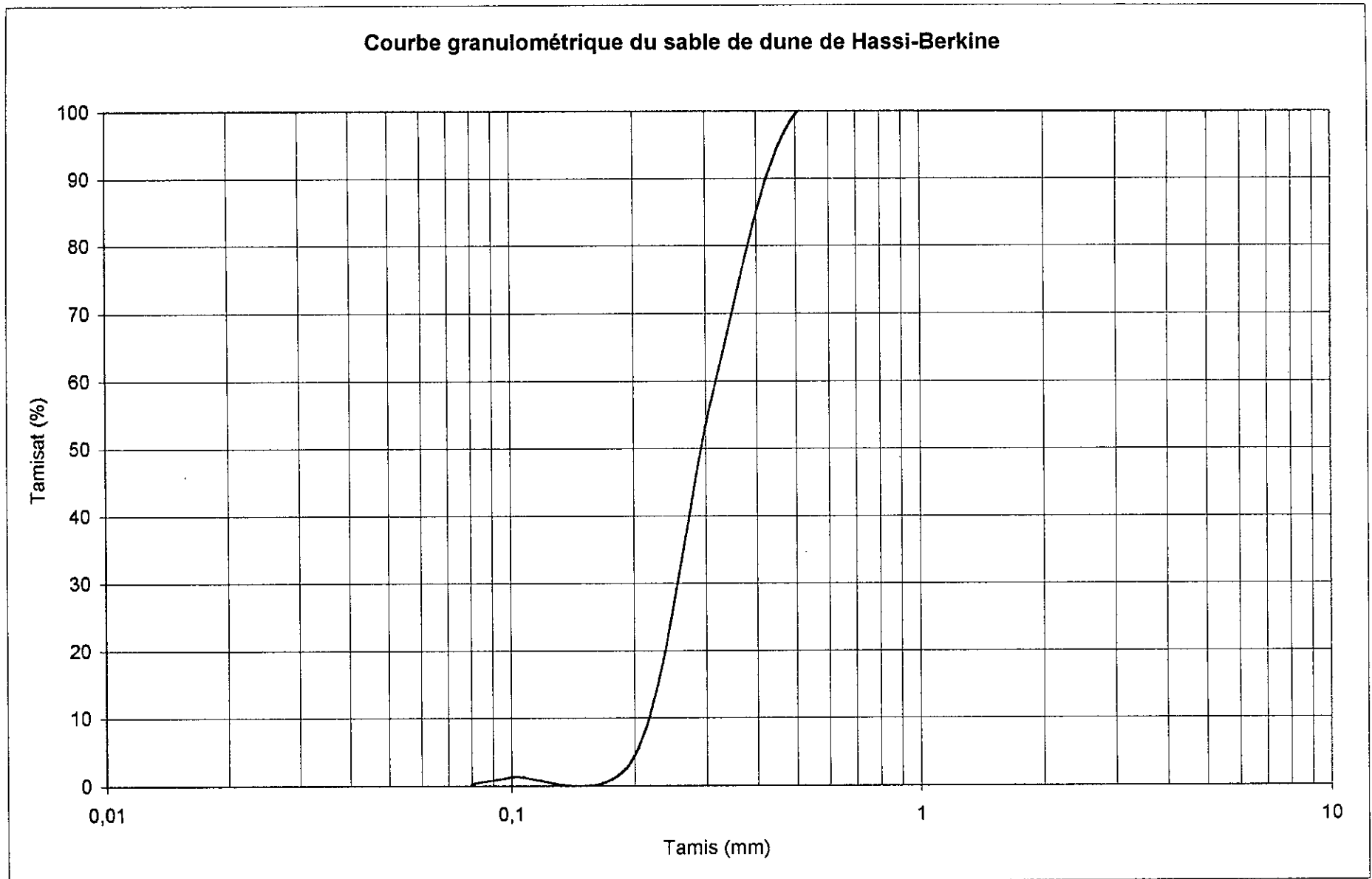
Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles	99,24
Fe ₂ O ₃ -AL ₂ O ₃	0,65
SO ₄ Ca-2H ₂ O	Traces
NaCl	0,23
CO ₃ Ca	0,83
CO ₂	0,36
Perte du Feu	0,55
Eau de constitution	0,19

b) Analyse granulométrique :

Tamis (mm)	Pourcentage
6,3	100
5	100
3,15	100
2	100
1	100
0,5	99,49
0,315	59,88
0,2	4,5
0,1	1,317
0,08	0,342

c) Caractéristiques physiques :

- Poids spécifiques = 2,6.
- Equivalent de sable = 91,7
- Essai au bleu de méthylène, VB = 0,03.



2.2.2. Sable de carrière :**a) Analyse chimique :**

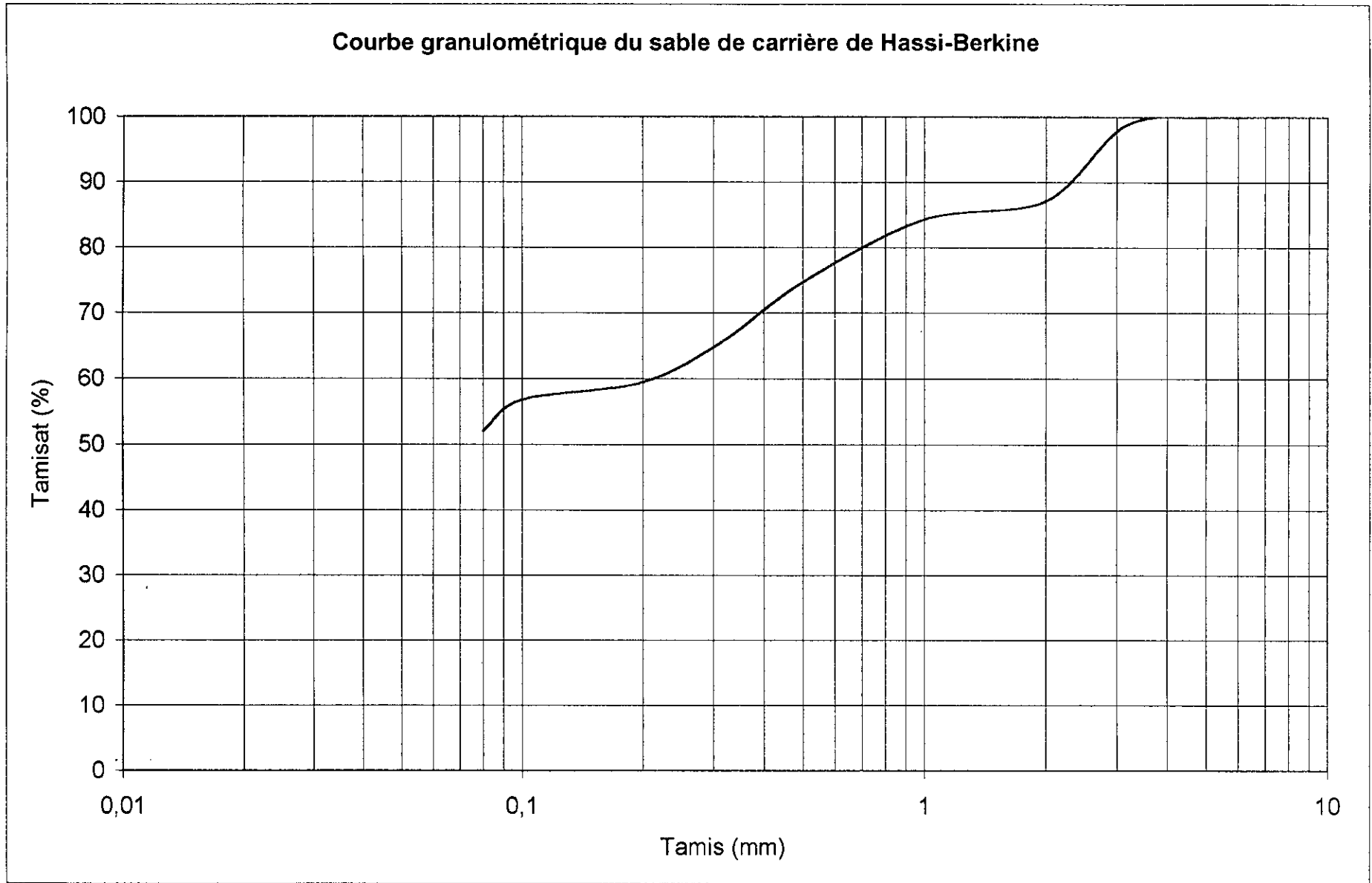
Eléments	Pourcentage (%)
Insolubles	1,1
Fe ₂ O ₃ -AL ₂ O ₃	0,75
SO ₄ Ca-2H ₂ O	65,74
Nacl	0,52
CO ₃ Ca	18,33
CO ₂	8,06
Perte du Feu	26,00
Eau de constitution	17,94
Anhydrite	11,22

b) Analyse granulométrique :

Tamis (mm)	Pourcentage
6,3	100
5	100
3,15	98,75
2	87,15
1	84,34
0,5	74,77
0,315	65,71
0,2	59,49
0,1	56,82
0,08	52,13

c) Caractéristiques physiques :

- Poids spécifiques = 2,35.
- Essai au bleu de méthylène, VB = 2,26.
- Friabilité = 81,63

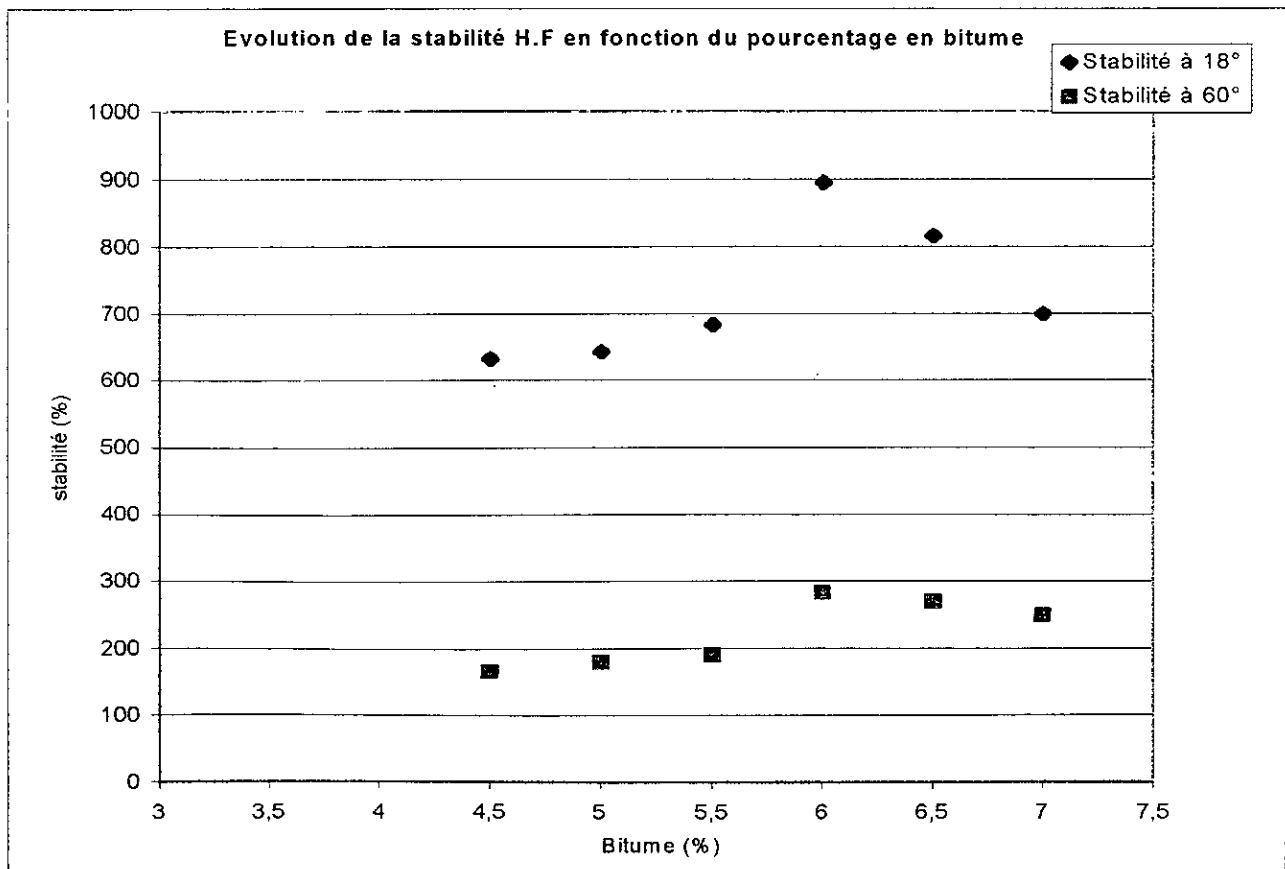
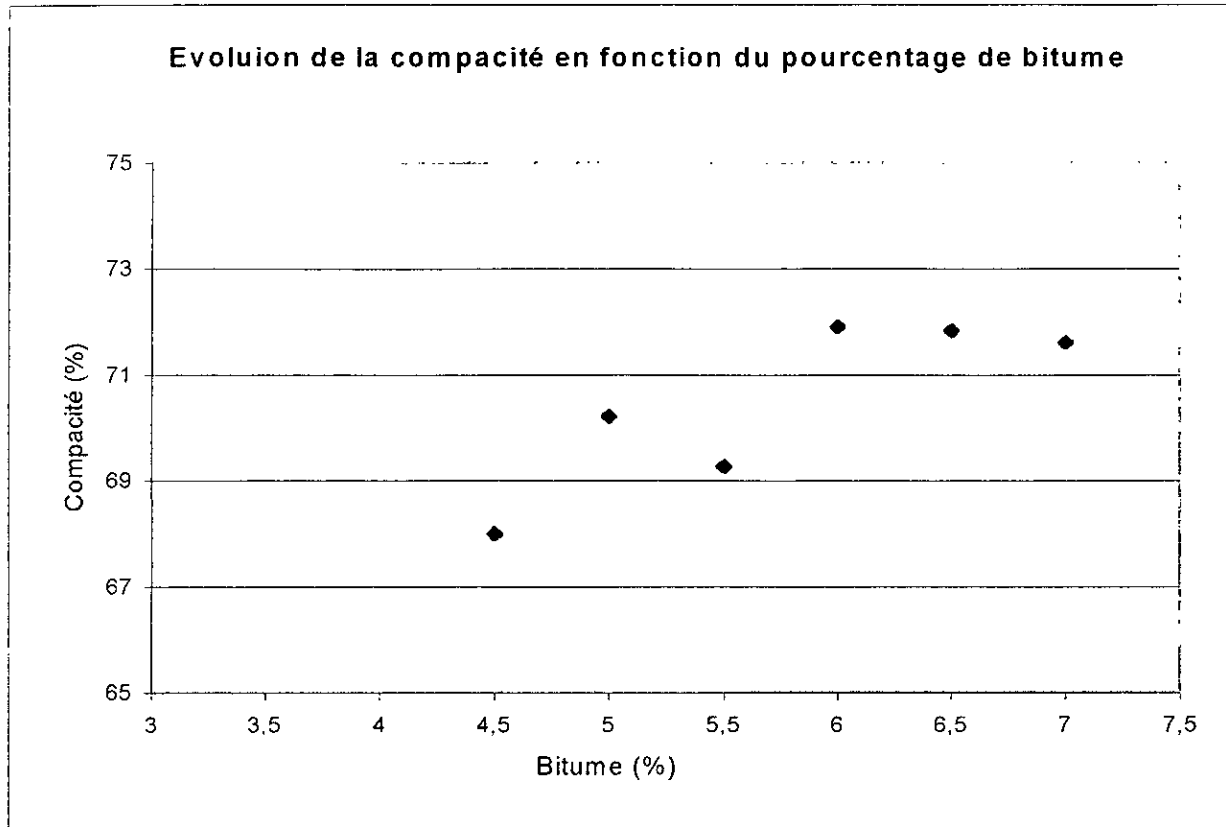


Première série d'essai:*Utilisation du sable de dune pris séparément*

Dans cette série d'essais on va étudier l'influence du pourcentage bitume sur la stabilité H.F.

On fait varier le pourcentage bitume ajouté à un sable de dune pris séparément et on voit la variation de la stabilité.

% bitume	4,5	5	5,5	6	6,5	7
Poids à l'air (g)	100,738	100,952	100,889	100,883	100,717	100,850
Densité apparente	1,710	1,754	1,720	1,774	1,761	1,746
Densité théorique	2,515	2,498	2,483	2,467	2,451	2,438
Compacité (%)	67,99	70,216	69,27	71,91	71,84	71,616
Stabilité H.F à 18° (Kg)	633,33	643,33	683,33	895,05	816,67	700
Stabilité H.F à 60° (Kg)	166,67	180	190	283,33	270	250



Interprétation des résultats :

Les résultats obtenus à partir de l'essai Hubbard-Field, on peut conclure que le sable de dune seul donne après enrobage avec le bitume 40 / 50, donne une compacité et une stabilité insuffisante par rapport aux caractéristiques recommandées.

On peut expliquer ça par le fait que la granulométrie peu étalée du sable de dune ne permet pas un bon arrangement des grains après compactage.

- A 18°C on a une stabilité maximale de 895,05 Kg pour 6% de bitume.
- A 60°C on a une stabilité de 283,30 Kg pour 6% de bitume.

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 6% de bitume, une teneur en bitume inférieure à cette valeur entraîne un mélange moins stable, en raison de l'influence de l'enrobage.

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

Deuxième série d'essais*Stabilisation par le sable de concassage :*

On a corrigé la granulométrie du sable de dune par un sable de concassage de la même région d'Ouargla.

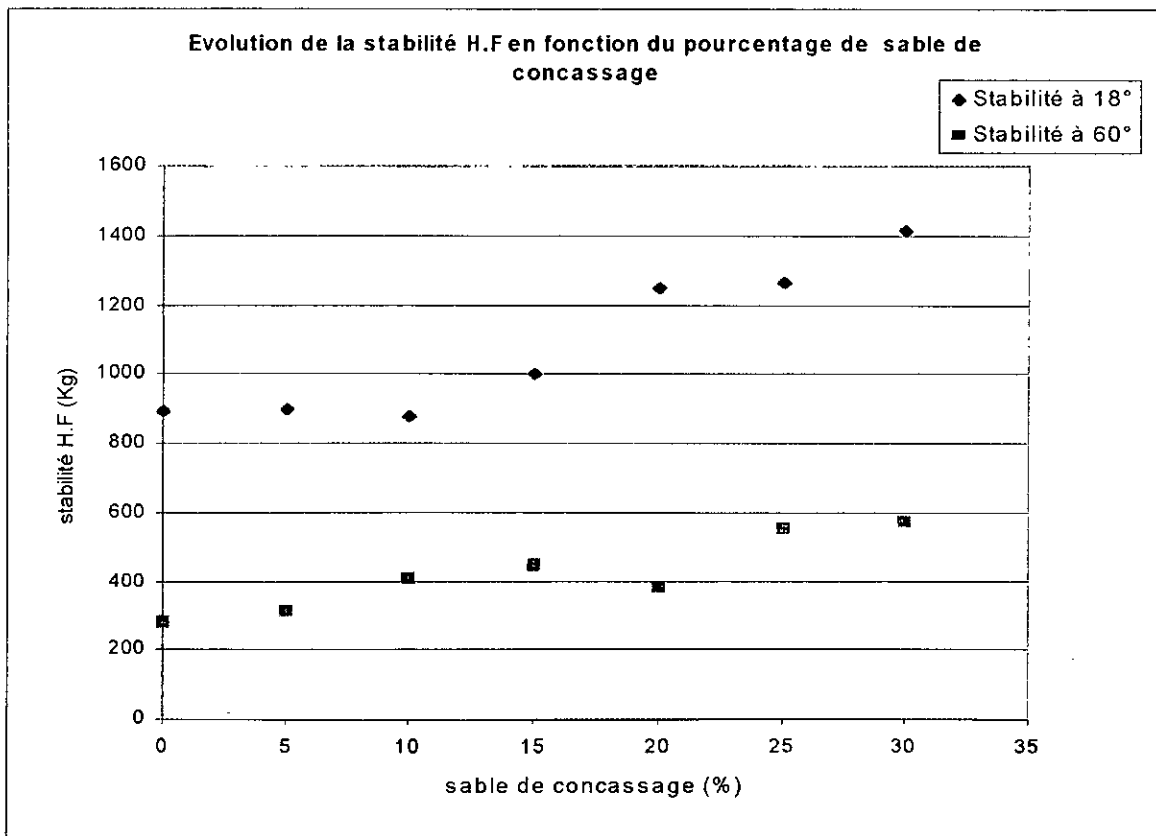
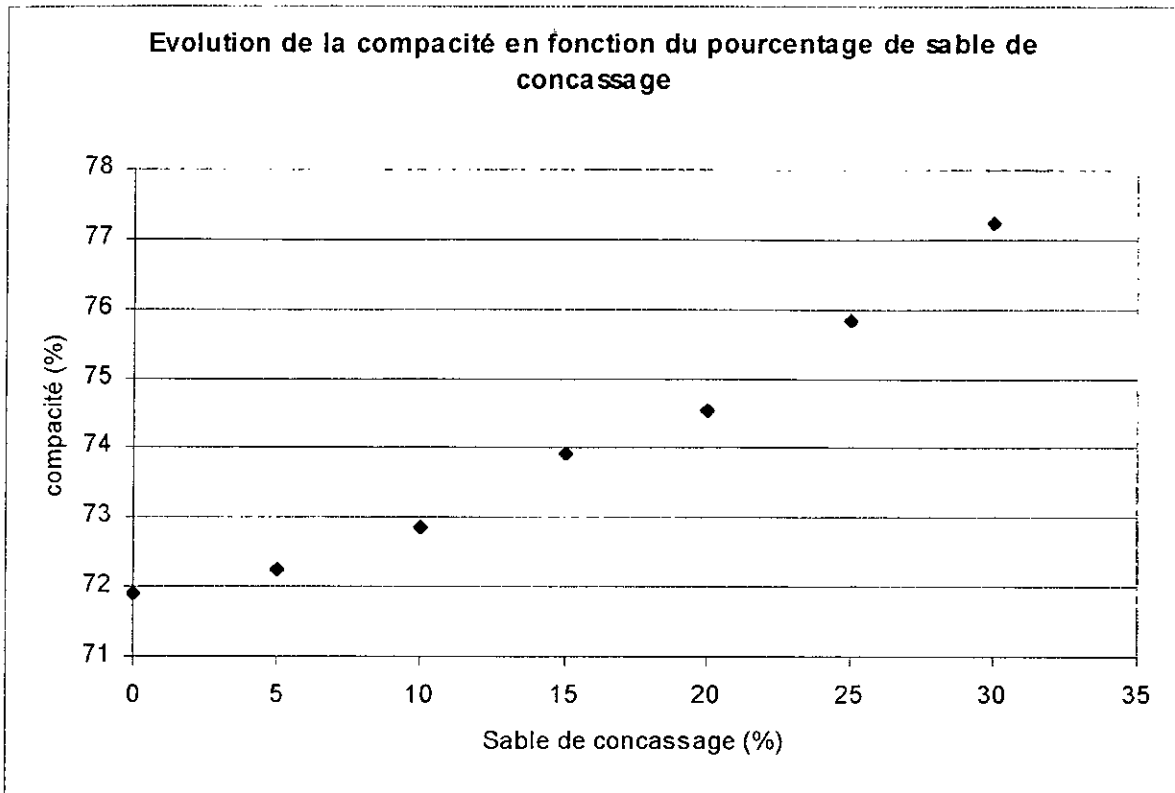
Le pourcentage du bitume est inchangé et il est de 6 %.

La granulométrie de nos mélanges sont représentées dans le tableau suivant :

Tamis (mm)	0,95 SD+ 0,05 SC	0,9 SD+ 0,1 SC	0,85 SD+ 0,15 SC	0,8 SD+ 0,2 SC	0,75 SD+ 0,25 SC	0,7 SD+ 0,3 SC
6,3	100	100	100	100	100	100
5	99,40	99,38	99,35	99,33	99,31	99,29
3,15	98,69	98,57	98,46	98,38	98,23	98,12
2	96,69	96,06	95,42	94,78	94,14	93,51
1	84,92	83,83	82,74	81,66	80,57	79,49
0,5	47,72	47,81	47,90	48,00	48,09	48,19
0,315	23,51	24,44	25,37	26,31	27,25	28,18
0,2	14,67	15,62	16,57	17,52	18,47	19,42
0,1	5,37	6,36	7,35	8,35	9,347	10,34
0,08	2,97	3,65	4,32	4,99	5,67	6,34

Les résultats obtenus après l'essai de stabilité Hubbard-Field sont :

% de sable de dunes	100	95	90	85	80	75	70
% de sable concassé	0	5	10	15	20	25	30
Poids à l'air (g)	100,883	100,55	100,43	100,67	100,58	100,78	100,93
Densité apparente	1,774	1,776	1,784	1,804	1,812	1,837	1,864
Densité théorique	2,467	2,458	2,449	2,44	2,431	2,422	2,413
Compacité (%)	71,91	72,254	72,846	73,934	74,537	75,846	77,248
Stabilité H.F à 18° (Kg)	895,05	900	876,67	1000	1250	1266,67	1416,7
Stabilité H.F à 60° (Kg)	283,33	316,67	410	450	383,33	550	573,33



Interprétation des résultats :

L'ajout de sable de concassage rend la granulométrie plus étalée et on remarque une augmentation de la compacité, c'est prévisible dans la mesure que l'arrangement des grains est de plus en plus favorable.

On remarque aussi une augmentation de la densité, de 1,774 Kg à 1,864Kg.

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. Ainsi que l'enrobage, minimisant ainsi les effets de la Viscoélasticité du bitume.

La stabilité à 18° passe de 895,05 pour 0% de sable de concassage, à 1416,6 pour 30% de sable de concassage. A 60° elle passe de 283,33 à 673,33 pour 0 et 30% de sable de concassage respectivement.

Troisième série d'essais :

Dans cette série d'essai on fait varier le pourcentage du bitume en utilisant la formule de Duriez.

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

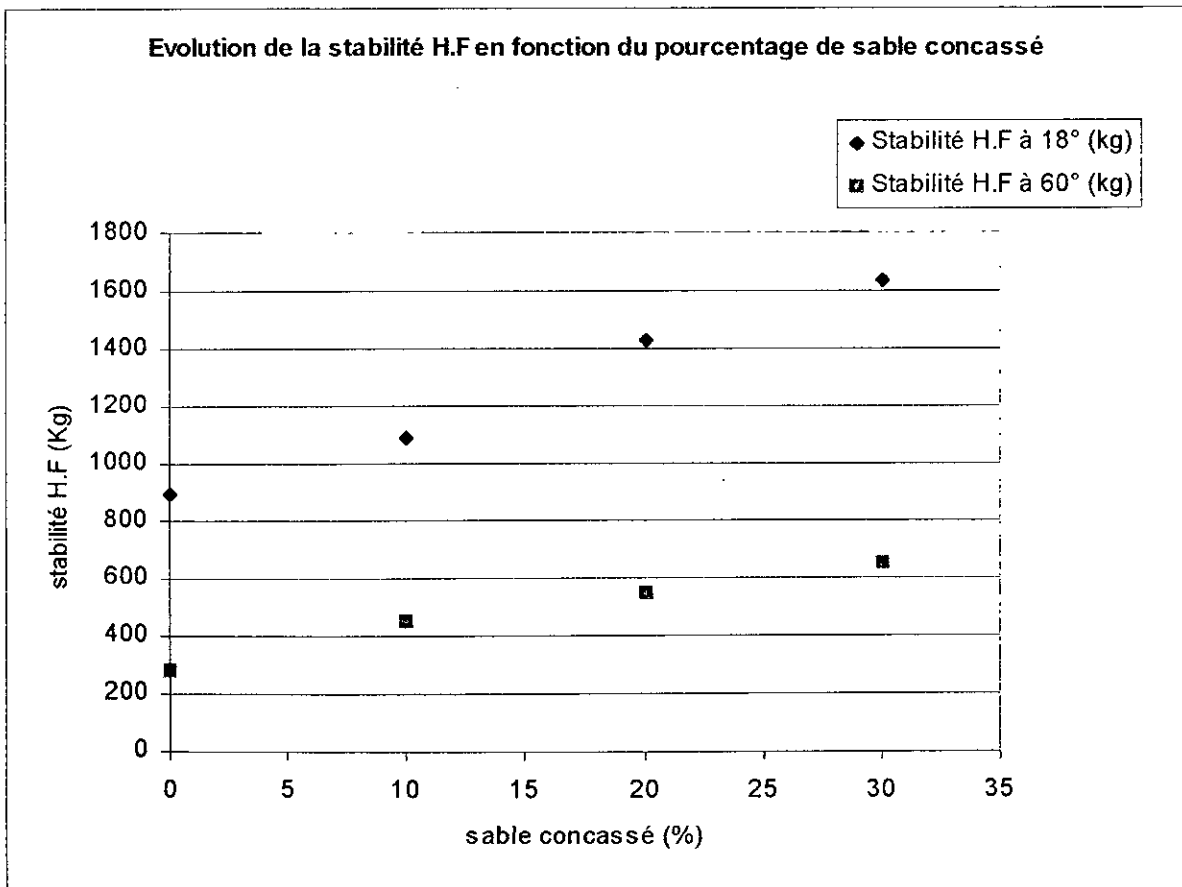
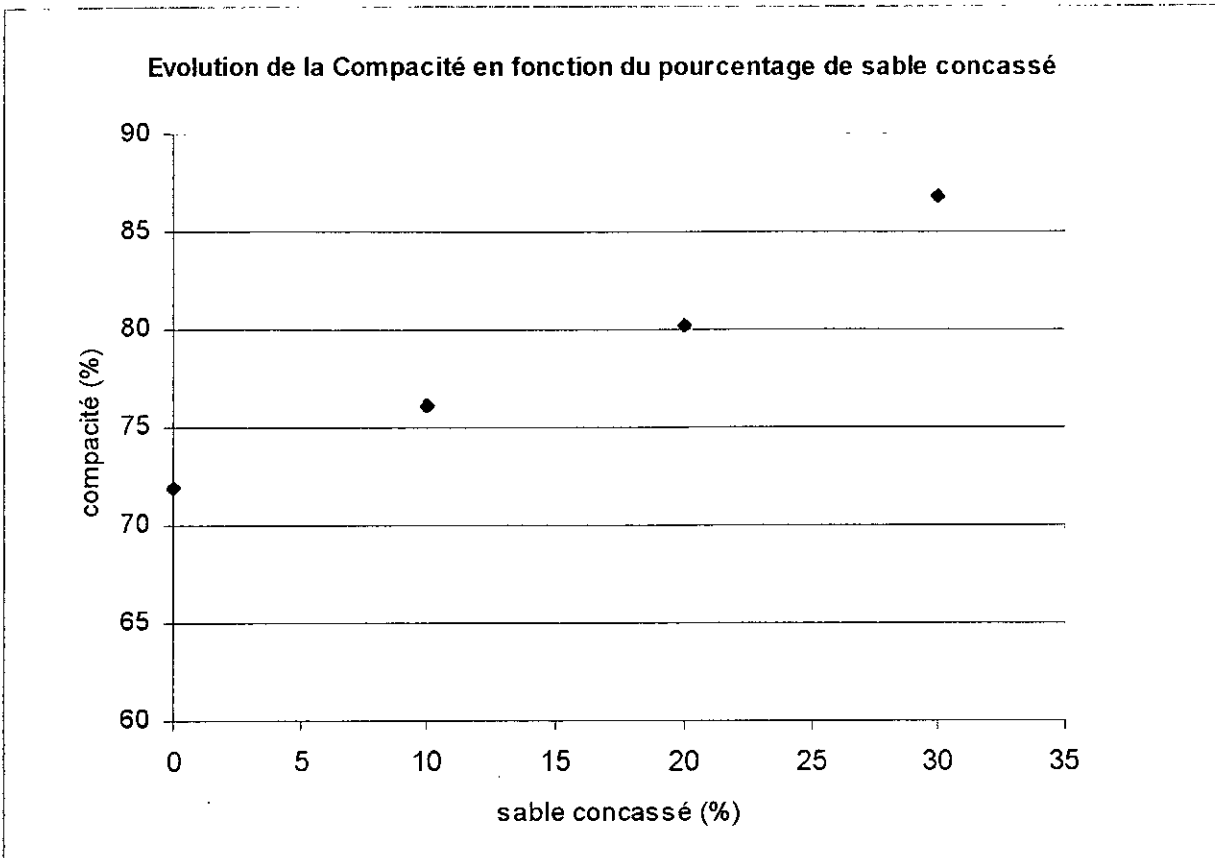
$$\text{On sait que : } p = m \times \sqrt[5]{\Sigma}$$

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

Pour notre cas nous utilisons un module de richesse $m = 4$, (calculé à partir de la première série d'essai, pour l'optimum de 6% de bitume).

On a obtenu les résultats suivants :

% bitume	6	6,27	6,491	6,681
% de sable de dunes	100	90	80	70
% de sable concassée	0	10	20	30
Poids à l'air (kg)	100,881	100,7	101,1	100,4
Densité apparente	1,774	1,858	1,94	2,078
Densité théorique	2,467	2,440	2,416	2,394
Compacité (%)	71,91	76,15	80,274	86,78
Stabilité H.F à 18° (kg)	895,05	1090	1430	1640
Stabilité H.F à 60° (kg)	283,33	450	550	650



Interprétation des résultats :

Des résultats obtenus on peut voir une nette amélioration de la stabilité, et une augmentation de la compacité.

L'augmentation de la compacité s'explique par le fait que le bitume minimise les vides et prend la place de l'air. L'enrobage est donc plus adéquat.

On remarque que pour 30% de sable concassé la stabilité passe de 1416,66 à 1750 kg à 18°, et de 573,33 à 650 à 60°, ceci veut dire que le bitume est plus accroché au sable donc on peut dire que le désenrobage est faible, et que l'éprouvette est plus résistante vis-à-vis de l'eau.

De plus on peut faire intervenir la forme des grains qui facilite le compactage.

Stabilisation par le sable gypseux :

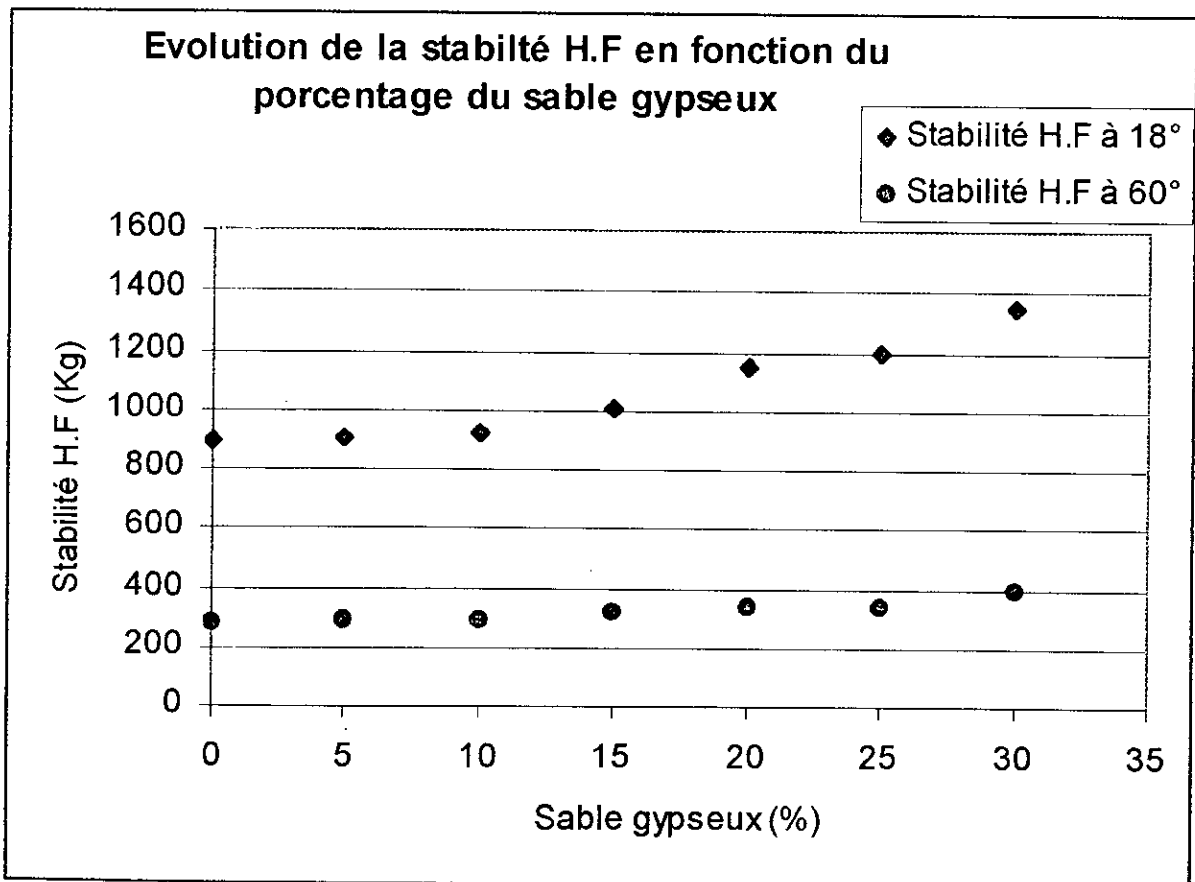
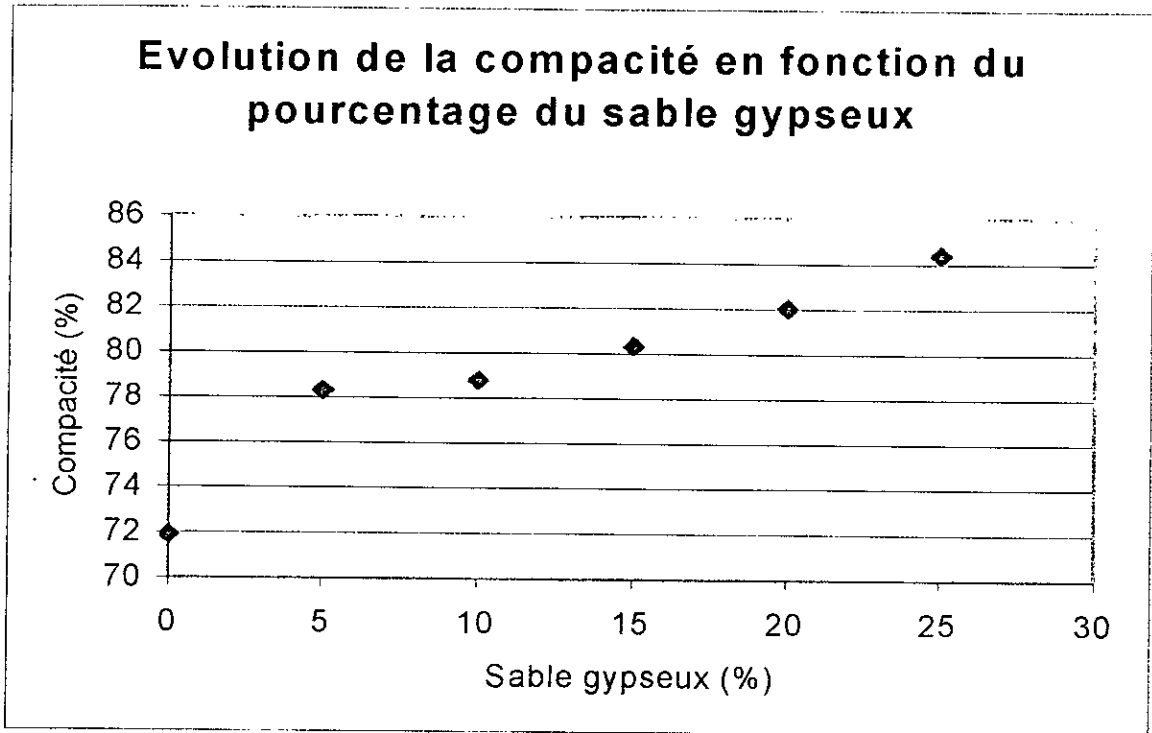
On a réalisé des essais à différents pourcentage de sable gypseux de la même région, on a fait augmenter le pourcentage de sable gypseux de 5% à 30%, pour connaître son influence sur les performances de notre sable bitume.

Les différents mélanges ont donné les granulométrie du tableau suivant :

Tamis (mm)	0,95% SD + 0,05% SC	0,9% SD + 0,1% SC	0,85% SD + 0,15% SC	0,8% SD + 0,2% SC	0,75% SD + 0,25% SC	0,7% SD + 0,3% SC
6,3	100	100	100	100	100	100
5	99,40065	99,3813	99,36195	99,3426	99,32325	99,3039
3,15	98,67775	98,5555	98,43325	98,311	98,18875	98,0665
2	97,152	96,974	96,796	96,618	96,44	96,262
1	86,1691	86,3382	86,5073	86,6764	86,8455	87,0146
0,5	49,3105	51,001	52,6915	54,382	56,0725	57,763
0,315	25,1089	27,6478	30,1867	32,7256	35,2645	37,8034
0,2	16,1895	18,659	21,1285	23,598	26,0675	28,537
0,1	6,6465	8,923	11,1995	13,476	15,7525	18,029
0,08	4,5905	6,881	9,1715	11,462	13,7525	16,043

Les essais de stabilité Hubbard-Field ont donné les résultats suivants :

% sable de dunes	100	95	90	85	80	75	70
% sable gypseux	0	5	10	15	20	25	30
Poids à l'air	100.883	100.5	101.1	100.7	101.8	100.2	101.7
Densité apparente	1.774	1.92	1.88	1.945	1.975	2.02	2.08
Densité théorique	2.467	2.452	2.437	2.422	2.408	2.394	2.38
Compacité	71.91	78.303	78.785	80.306	82.018	84.378	87.395
Stabilité H.F à 18°	895.05	900	920	1010	1150	1200	1350
Stabilité H.F à 60°	283.33	293.33	290	320	340.66	340	400



Interprétation des résultats :

On remarque que la compacité augmente en fonction de l'augmentation du pourcentage de sable gypseux, vu le très grand pourcentage de fines qu'il contient.

Ainsi le pourcentage de fines dans nos mélanges passe de 2,3% pour le sable de dune pur à 16,04 pour 30% de bitume ;

Le pourcentage de bitume étant constant on peut dire que ces éléments fins ont fait augmenter l'arrangement des grains.

La densité apparente de nos éprouvettes augmente, et passe de 1,77 à 2,08.

La compacité, elle passe de 71,90 à 87,395.

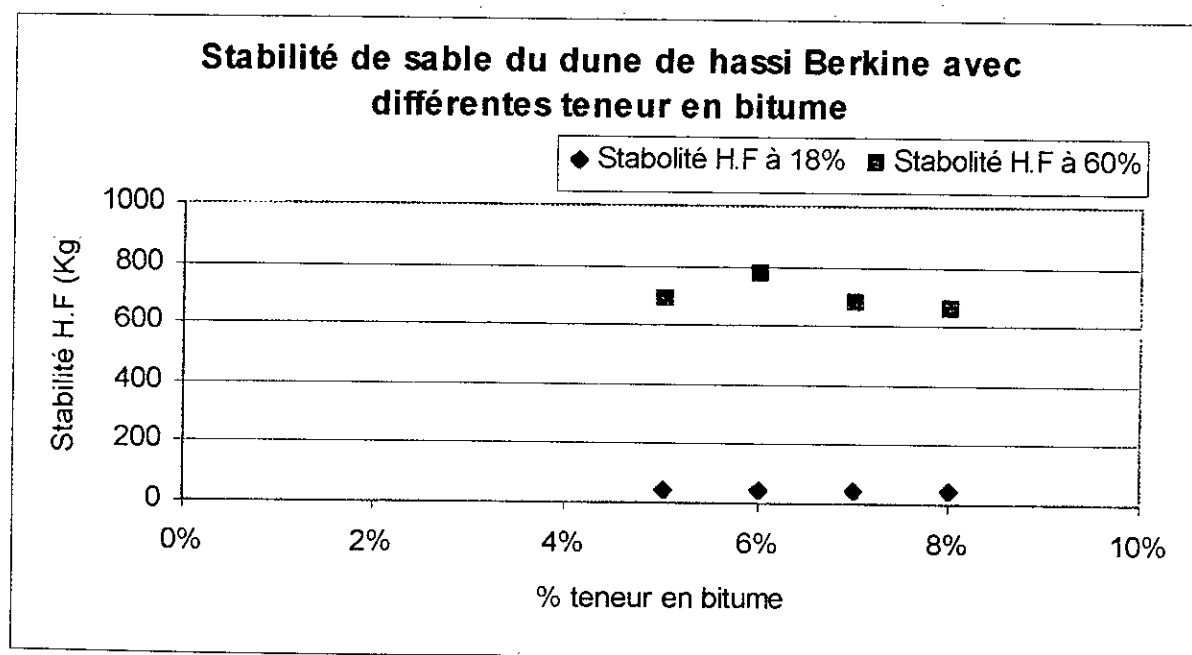
La stabilité augmente d'une façon très nette à 18° et à 60°, mais on remarque qu'elle reste en dessous des résultats obtenus pour le sable concassé.

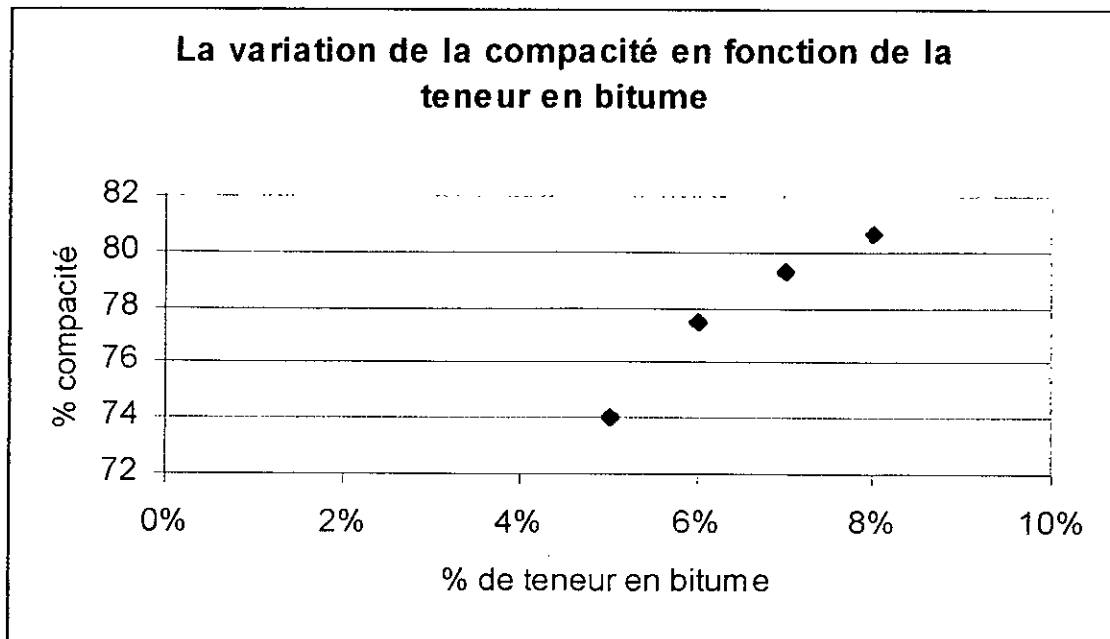
Région de Hassi Berkine

Première série d'essais

Stabilité de sable du dune de Hassi Berkine avec différentes teneur en bitume .

Stabilité / % en bitume	5%	6%	7%	8%
Stabilité H. Field à 18°C	42	48	45	42
Stabilité H. Field à 6°C	690	780	680	667
Densité (g/m ³)	1,8	1,86	1,88	1,88
Densité vrai Dm	2,431	2,402	2,37	2,33
% de vide	25,95	22,56	20,67	19,31
Compacité	74,05	77,44	79,33	80,68





Interprétation des résultats :

En traçant la courbe de stabilité en fonction de la teneur en bitume, pour les deux températures 18°C et 60°C, on obtient un pic qui correspond à la teneur en liant de 6% qui doit être la teneur en bitume, optimum qui assure la meilleure stabilité (pour 18°C = 48Kg, pour 60°C = 780Kg).

Une valeur de teneur en bitume inférieure à cet optimum entraîne un mélange moins stable, en raison de l'insuffisance de l'enrobage, et de compacité.

Une valeur de teneur en bitume supérieure à cet optimum provoque une chute de stabilité à cause d'un mélange plus dense qui ne favorise pas un bon contact entre les grains.

Cet optimum de 6 est supérieur à la teneur en liant qui est 5,95 calculée par la formule de Duriez en adoptant son modèle de richesse ($K = 3,75$).

La compacité est augmentée lorsque la teneur en bitume est croissante, cette augmentation de la compacité de 74,05 à 5% de bitume jusqu'à 80,68 à 8% de bitume, due à la diminution de volume de vide 25,95 à 5% de bitume jusqu'à 19,31 à 8% de bitume.

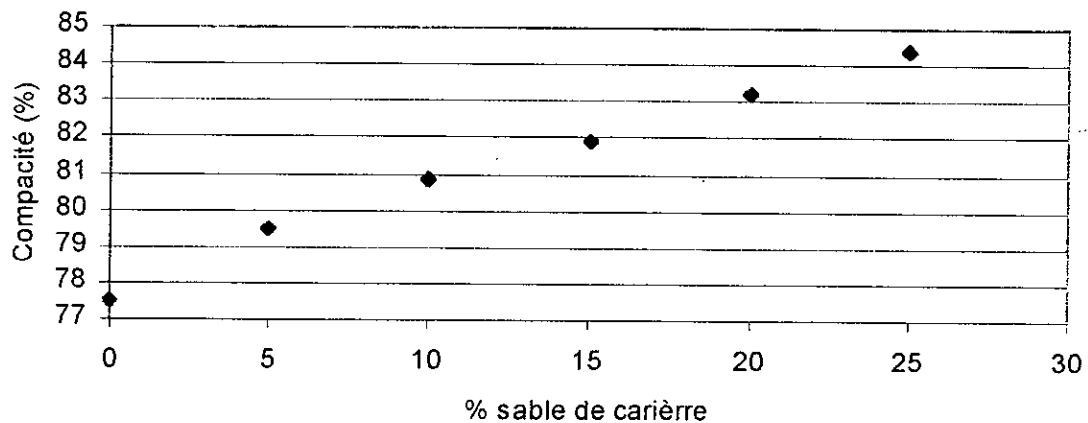
Deuxième série des essais

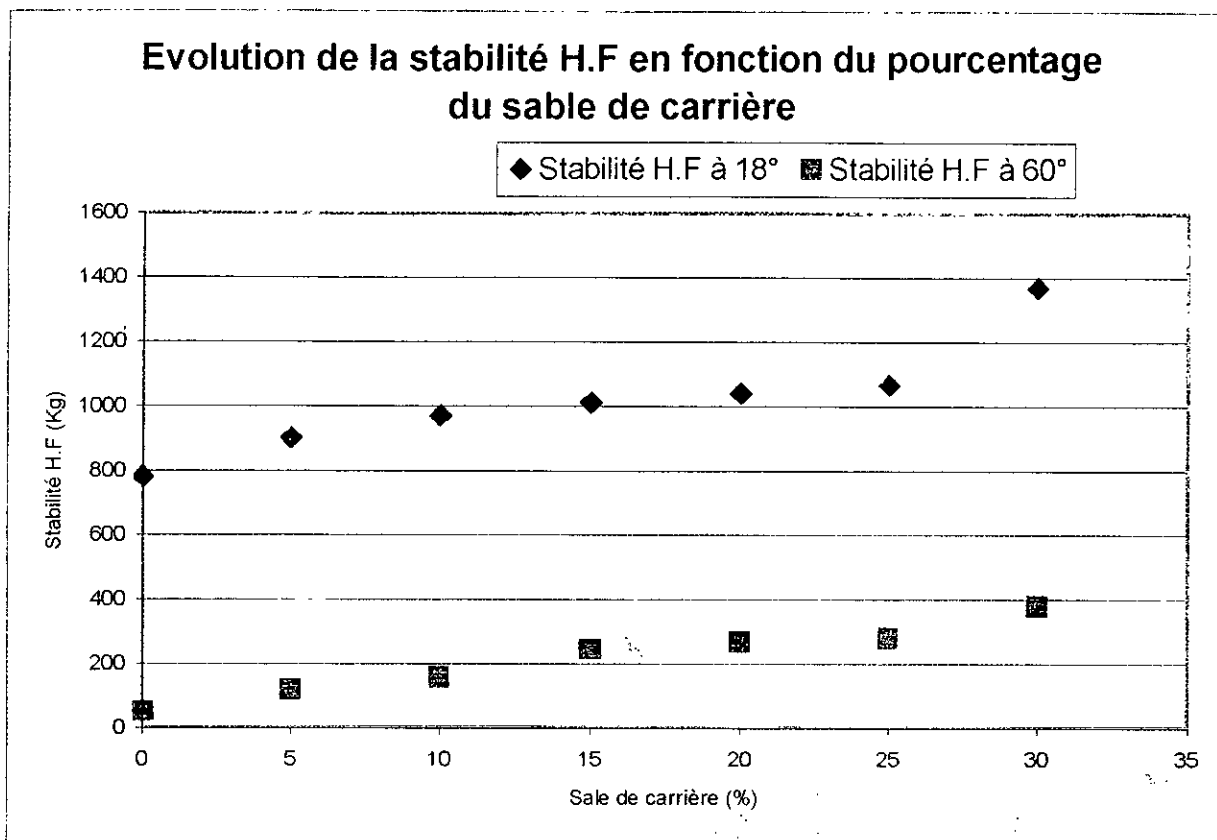
Stabilité par un sable de carrière

On a étudié l'influence d'un sable de carrière de la même région, de Hassi-Berkine, tout en gardant le pourcentage de bitume constant, il est de 6%.

% de sable de dunes	100	95	90	85	80	75	70
% de sable de carrière	0	5	10	15	20	25	30
Poids (g)	100,7	100,7	101,1	101,1	100,8	102,2	101,4
Densité apparente	1,86	1,9	1,92	1,94	1,961	1,98	2,01
Densité théorique	2,401	2,39	2,379	2,368	2,357	2,346	2,335
Compacité (%)	77,468	79,498	80,832	81,926	83,20	84,40	86,081
Stabilité à 18° (Kg)	780	900	970,33	1010	1040	1066,6	1366,6
Stabilité à 60° (Kg)	48	120	155,5	245,21	268	280	380

Evolution de la compacité en fonction du pourcentage de sable de carrière





Interprétation des résultats :

- Sable du dune avec différent pourcentage de sable gypseux , la stabilité augmente avec le pourcentage de sable de carrière d'une courbe presque linéaire, jusqu'à un seuil à 30% de sable 1366,6 Kg , à 18°C et 400Kg à 60°C.
- La variation de la compacité est proportionnellement l'augmentation de teneur de sable de carrière et qui passe de 70,05 pour 0% de sable carrière à 80,68 pour 30% de sable carrière ajouté .
- La même variation subit la chimiste apparente qui passe de 1,8 jusqu'à 1,88 à 30% de sable carrière

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion générale :

Cette étude, utilisant des données bibliographiques et les résultats expérimentaux du laboratoire, nous a permis de présenter le contexte saharien avec ses caractéristiques climatiques et ses matériaux de construction. Dans ces régions comme partout ailleurs, il y a un grand intérêt à minimiser autant que possible le transport des matériaux.

L'incorporation du sable de dune dans les matériaux routiers est une proportion convenable pour atteindre cet objectif, car les résultats trouvés dans cette étude sont encourageants, et leurs applications dans le chantier présente des avantages économiques certains.

Au laboratoire nous avons étudié deux sables de dune de granulométries différentes :

- Le sable de dune de Ouargla, qui contient 2.3% d'éléments fins.
- Le sable de dune de Hassi –Berkine, qui contient 0.34% d'éléments fins.

Nous avons fait plusieurs traitements, ces traitements sont basés sur l'emploi des matériaux locaux, comme les sables gypseux et les sables de concassage de la même région.

De cette étude nous pouvons conclure ce qui suit :

- 1- La granularité du sable à un grand effet sur les résultats escomptés plus la granulométrie est étalée, plus c'est favorable pour l'obtention d'une meilleure compacité et une meilleure stabilité.
- 2- La teneur en bitume optimale est située entre 6 et 6.5% pour les sables naturels pour avoir une meilleure stabilité. Cette teneur optimale est plus grande pour les sables étalés.

- 3- La correction de la granulométrie du sable de donne avec un sable de concassage peut être envisageable dans la mesure ou elle peut se faire dans des limites raisonnables : 25 à 30%.
Elle améliore d'une manière significative la compacité et la stabilité.
 - 4- L'utilisation du sable gypseux pour corriger la granulométrie du sable est bénéfique à plus d'un titre, mais donne des qualités moindres.
 - 5- La dureté ou la friabilité d'un sable à un rôle important dans le comportement du sable bitumineux.
 - 6- La nature du sable à non influe dans la mesure ou non constaté la différence de vitesse d'enrobage des grains de sable.
 - 7- La formulation de sable bitume ne peut être généralisée au Sahara parcequ'elle dépend de la granulométrie du sable et par conséquent de la région.
- Granulométrie serrée (ajout du sable grossier).
 - Granulométrie étalée (ajout de fines).

ANNEXES

ESSAI DE POINT DE RAMOLLISSEMENT

Norme : NFT 66 004

Définition :

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

Domaine d'application :

La présente norme décrit les conditions de détermination, par la méthode "Bille et Anneau", du point de ramollissement des produits bitumineux ; cette caractéristique est comprise entre 30°C et 200°C.

But de l'essai :

Le point de ramollissement Bille et Anneau désigné souvent par B.A indique la température atteinte par le liant à essayer lorsqu'une bille d'acier standard traverse un anneau rempli de ce liant et lorsqu'elle atteint le fond d'un vase standardisé, chauffé progressivement et rempli d'eau, dans lequel on a plongé l'anneau et la bille.

Principe de l'essai :

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 enveloppée de celui-ci, d'une hauteur déterminée, est prise comme le point de ramollissement du produit étudié.

Appareillage:

1. Un récipient en verre pouvant supporter la chaleur n'ayant pas plus de 8,5cm de diamètre
2. Un thermomètre gravé sur une tige de (-2°C) à (+80°C), la précision étant de 0,2°C, ayant : 380 à 400 mm de longueur et 6 à 7mm de diamètre.
3. Des anneaux de laiton de : 15,9 mm de diamètre intérieur, à 0,25mm près et 6,3mm de hauteur L'épaisseur du cercle est de $(2,4 \pm 0,25)$ mm.
4. Des billes d'acier de 9,5 mm de diamètre et 3,45 à 3,55 de poids.

Mode opératoire :

A. Préparation des anneaux :

L'échantillon sera complètement fondu, à la plus basse température possible et agité jusqu'à ce qu'il soit homogène et exempt de bulles d'air. Il sera ensuite coulé dans l'anneau de façon qu'il y ait un excès à enlever après refroidissement.

Pour cela, on doit poser l'anneau sur une plaque de laiton amalgamée au préalable ou enduite d'un mélange en parties égales de glycérine et de dextrine, afin d'éviter l'adhérence de la matière bitumineuse.

Après refroidissement, l'excès de matière est coupé proprement avec un couteau légèrement chauffé.

On remplit le récipient de verre à une hauteur de 8,25 cm avec de l'eau bouillie, à la température de 5°C, on place sur support :

- Les anneaux contenant l'échantillon, de façon que la surface inférieure du réservoir soit à (exactement) 2,5 cm du fond du récipient et par la suite que la surface supérieure soit à 5cm de la surface de l'eau.

- Les billes dans des évidements pratiqués sur le support:

On suspend le thermomètre de sorte que l'extrémité inférieure de réservoir soit au niveau de la surface inférieure de l'anneau et distant de 0,63 cm sans toucher l'anneau.

On maintient la température de l'eau à 5°C pendant 15mn

Avec une pince convenable, on place alors la bille au centre de l'anneau plein, on chauffe ensuite de telle manière que la température de l'eau s'élève de 5°/mn.

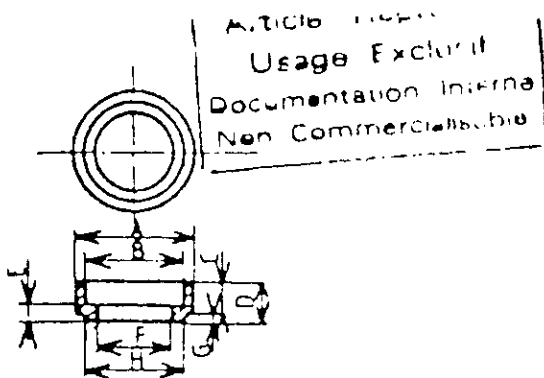
La température enregistrée par le thermomètre à l'instant où la matière bitumineuse touche le fond du récipient de verre, est celle du point de ramollissement.

Remarque :

Ne pas agiter, on ne fait aucune correction de colonne émergente.

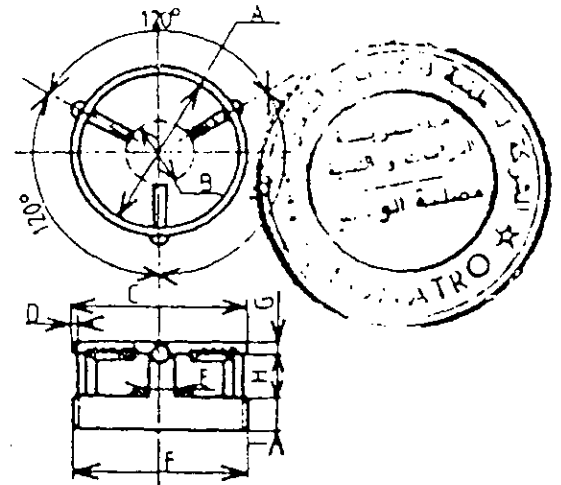
La vitesse de chauffage doit être uniforme et on ne doit pas faire une moyenne pendant la durée de l'essai. On procède à trois essais qui doivent donner les résultats ne variant pas de plus ou moins 1°C de la moyenne.

Une feuille de papier filtre placée au fond du récipient de verre permet un nettoyage rapide.



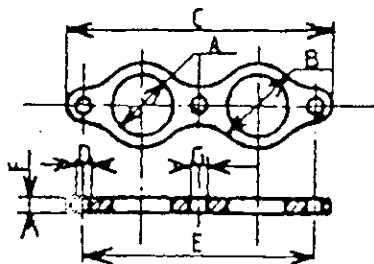
A = $23,0 \pm 0,1$	E = $2,8 \pm 0,1$
B = $19,8 \pm 0,1$	F = $15,9 \pm 0,1$
C = $4,4 \pm 0,1$	G = 2,0
D = $6,4 \pm 0,1$	H = $19,0 \pm 0,1$

Figure 1 — Anneau à épaulement



A = 23,0
B = légèrement plus fort que le diamètre de la bille (9,53) pour permettre le centrage.
C = 24,6
D = 0,8
E = 3,2
F = 23,0
G = 1,6
H = 4,8
I = 4,4

Figure 2 — Guide de centrage de la bille



A = 19,1, ce diamètre doit permettre l'insertion de l'anneau jusqu'à son épaulement.
B = 24,0
C = 76,0
D = 5,5
E = 67,0
F = 1,5
G = 5,5

Figure 3 — Support d'anneau

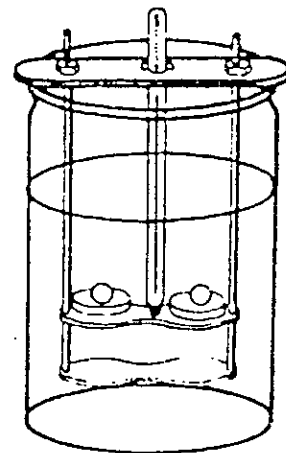


Figure 4 — Ensemble monté

ESSAI DE BLEU DE METHYLENE :

Norme :NFP 18 592

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.

But de l'essai :

Il permet de mesurer la capacité des éléments fins d'un sable à absorber du bleu de méthylène.

Le bleu de méthylène étant absorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxyques de fer, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments.

On appelle " valeur de bleu" des fines, la quantité de bleu de méthylène absorbée par 100 grammes de fines.

Principes de l'essai :

L'essai consiste à mesurer par dosage la capacité d'absorption du matériau.

On injecte successivement des doses élémentaires d'une solution de bleu de méthylène dans le bain aqueux contenant la prise d'essai. On contrôle d'absorption du bleu après chaque ajout en effectuant une tache sur un papier filtre.

Pour un simple contrôle de conformité, la quantité de bleu spécifiée est injectée en une seule fois.

Appareillage :

1°/ Une burette :

capacité : 100 ou 50 cm³

graduation : 1/10 ou 1/5 cm³

2°/ Papier filtre :

Quantitatif et sans cendre (< 0,010), grammage : 95 g/m², épaisseur : 0,20 cm, vitesse de filtration : 75, rétention : 8µm.

3°/ Une baguette de verre :

longueur : 300mm

diamètre : 8mm

4°/ Un agitateur à ailettes :

tournant entre 400 et 700tr/min

5°/ Un récipient :

capacité : 500 cm³ (en verre ou en plastique)

diamètre 100 mm

6°/ Une balance dont la portée limitée est compatible avec la masse de la prise d'essai et qui permet de peser à 1% près.

7°/ Un chronomètre.

8°/ Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau.

9°/ Solution de bleu de méthylène de qualité médicale à (10,0±0,1) g/l

10°/ Eau déminéralisée ou distillée.

Mode Opérateur

A) Mise en place de la prise d'essai :

- La prise d'essai est placée dans un bêcher de 500 cm³ avec 200 cm³ d'eau déminéralisée.

- L'ensemble est soumis à une agitation d'une minute à 700tr/mn puis permanente à 400tr/mn pendant toute la durée de l'essai à l'aide de l'agitateur, les ailettes étant situées à 1 cm au-dessus du fond du récipient.

b) Définition du test de la tache :

- Après chaque injection de bleu, ce test consiste à prélever à l'aide de la baguette de verre une goutte de suspension que l'on dépose sur le papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'un dépôt central de matériau, coloré d'un bleu généralement soutenu, entouré d'une zone humide incolore.

- La goutte prélevée doit être telle que le diamètre du dépôt soit compris entre 8 et 12 mm.

- Le test est dit positif si, dans la zone humide, apparaît autour du dépôt central une auréole bleue clair, il est dit négatif si l'auréole est incolore.

c) dosage :

- A l'aide de la burette, on injecte dans le récipient une dose de 5 cm^3 de solution de bleu, cette addition étant suivie du test de la tache sur le papier filtre.

- On procède ainsi jusqu'à ce que le test devienne positif. A ce moment, on laisse s'opérer l'absorption du bleu tout en effectuant des tests de minute en minute, sans rien ajouter.

- Si l'auréole bleue clair disparaît de la tache avant la minute, on procède à de nouvelles additions élémentaires de bleu qui sont :

- Soit de 5 cm^3 comme précédemment si le volume de la solution de bleu déjà introduit est supérieur ou égal à 30 cm^3 .

- Soit de 2 cm^3 si ce volume est inférieur à 30 cm^3 .

- Chaque addition est suivie de tests effectués toujours de minute en minute.

- Renouveler ces opérations jusqu'à ce que le test demeure positif pendant cinq minutes consécutives ; le dosage est alors considéré comme terminé.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE :

Norme : NFP 18 560

Domaine d'application :

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

Définitions :

Granularité : c'est la distribution dimensionnelle des grains.

Refus sur un tamis : c'est le matériau retenu sur le tamis.

Tamisât (passant) : C'est le matériau qui passe à travers les maille d'un tamis.

Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de taille décroissante ; les dimensions des mailles et le nombre de tamis sont choisi en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisâts sont rapportées à la masse initiale du matériau ; les pourcentages ainsi obtenus sont soit exploités sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

Appareillage :

La liste des passoires et tamis couramment utilisés est :

Modules	0	48	6	4	1	8	4	1	7	4	1	0
passoires	00	3	0	5	2,5							
Tamis	0	50	32	20	10	5	2	1	0,4	0,2	0,1	0,08

Exécution de l'essai :

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 les plus gros qu'ils 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.

NB : En général la limite inférieure de cette formule est suffisante.

2) Tamisage par voie sèche :

* le matériau, préalablement échantillonné, est séché dans une étuve à 105°C.

* on procède à l'élimination des fines par lavage continu ; 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 0.08mm destiné à retenir les éléments supérieurs qui auraient pu 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 vibro-tamis.

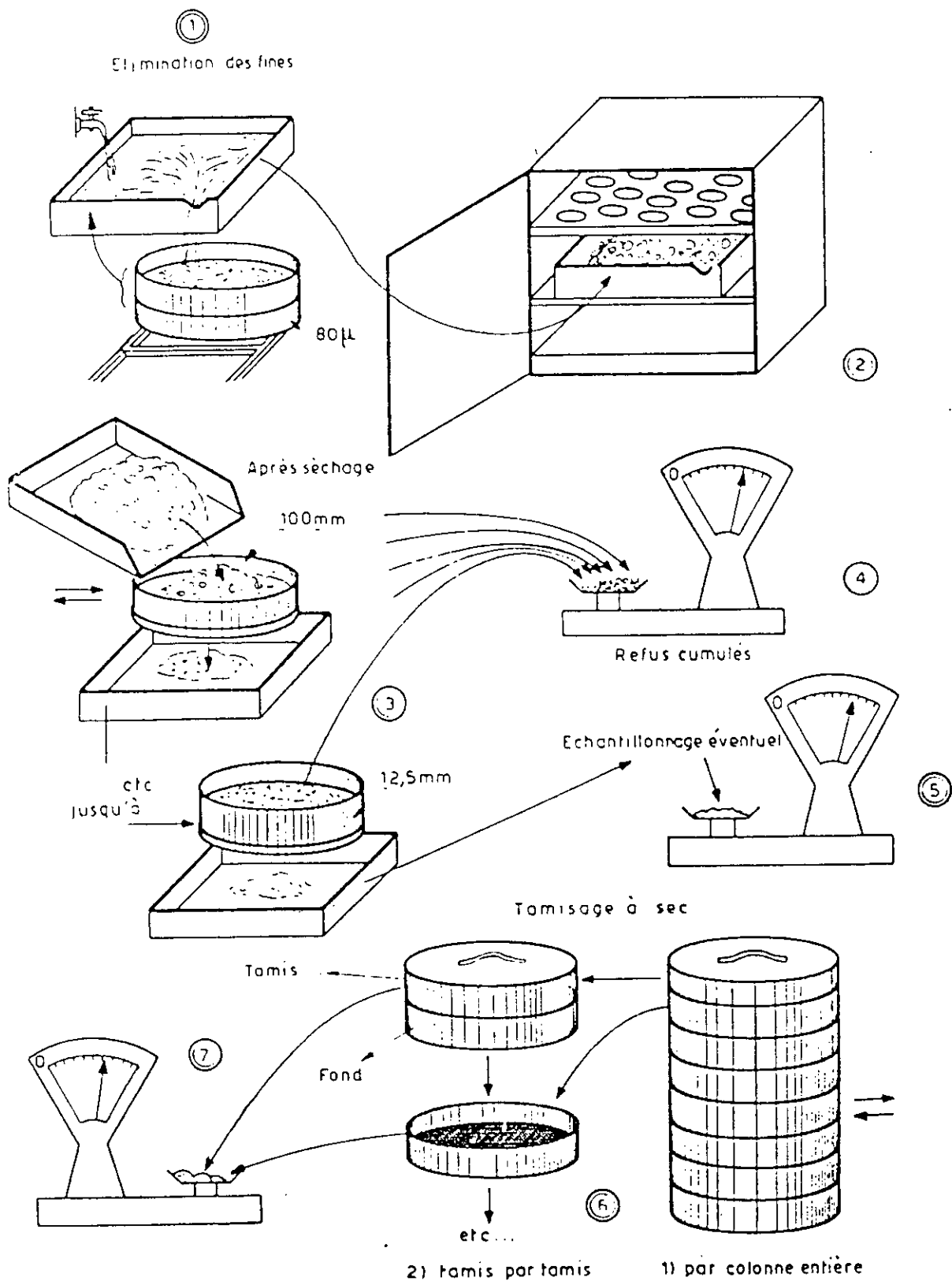


FIG. 8. — Analyse granulométrique par voie sèche.

Essai de Pénétration :

Norme : NFT 66 004

Définition :

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

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.

But de l'essai :

Le degré de pénétration mesure la consistance du liant ; c'est à dire la priorité de ses diverses particules d'adhérer entre elles. Cette qualité lui permet 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.

Appareillage :

- 1°/ Un pénétromètre donnant le 1/10 de millimètre.
- 2°/ Un récipient standard de forme cylindrique à fond plat de :
35 mm de hauteur et 55 mm de diamètre ;
- 3°/ Une aiguille confectionnée à partir d'une baguette en acier inoxydable, ayant :
50,8 mm de longueur et 1,00 à 1,02 mm de diamètre
- 4°/ Un bain d'eau maintenu à $(25,0 \pm 0,1)^\circ\text{C}$

Mode opératoire :

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 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 $25^{\circ}\text{C} \pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

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 le bain à une profondeur d'au moins 100 mm et doit reposer sur une tablette perforée à au moins 50mm 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 $(100,0 \pm 0,1)\text{g}$ 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 réfléchiée sur la surface 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 $(5,0 \pm 0,1)\text{s}$, 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 10mm les uns des autres 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.

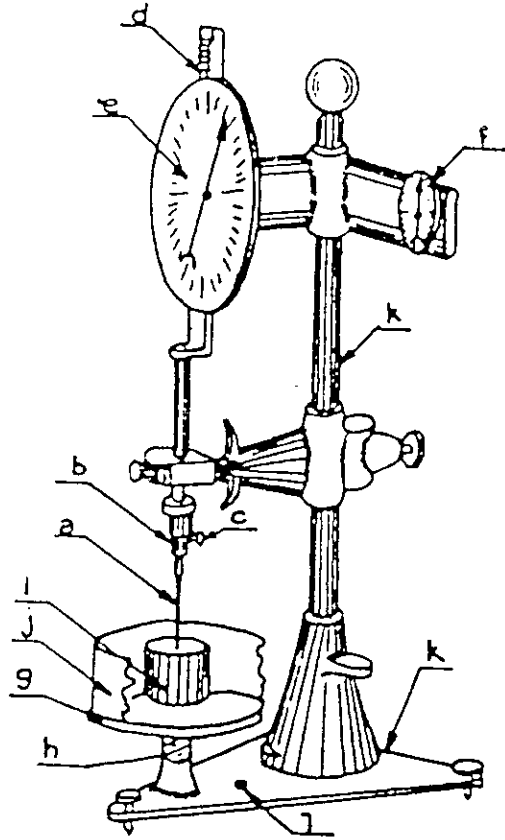
Précautions :

- 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.

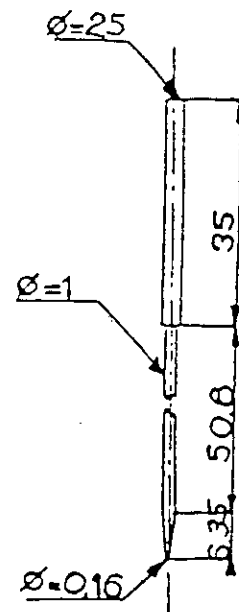
Remarque :

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

Ensemble de l'appareil



Aiguille

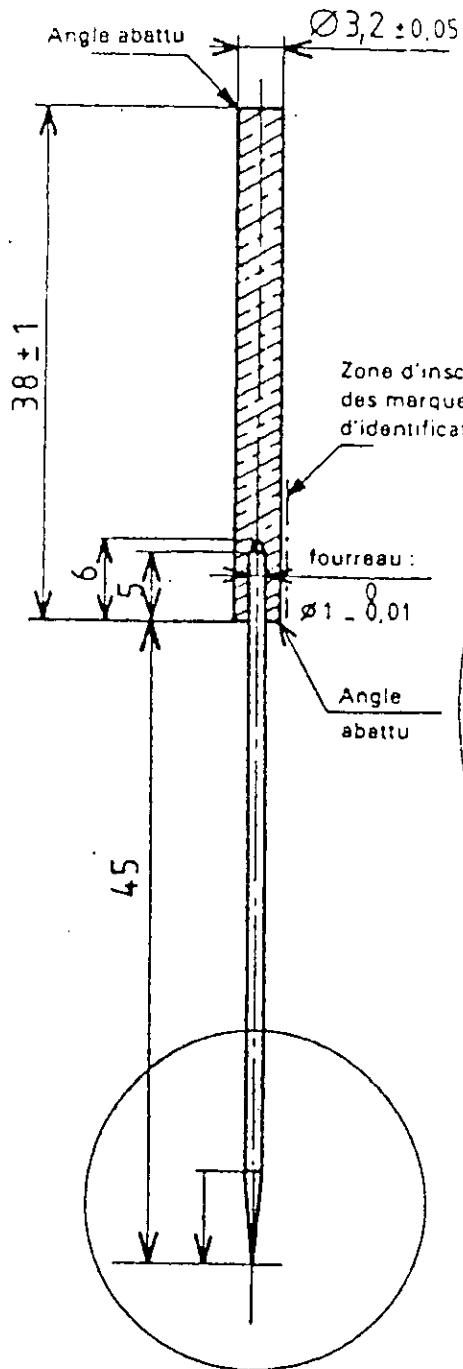
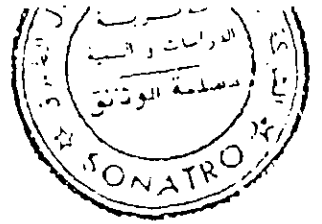


L'aiguille terminée est trempée puis parfaitement polie.

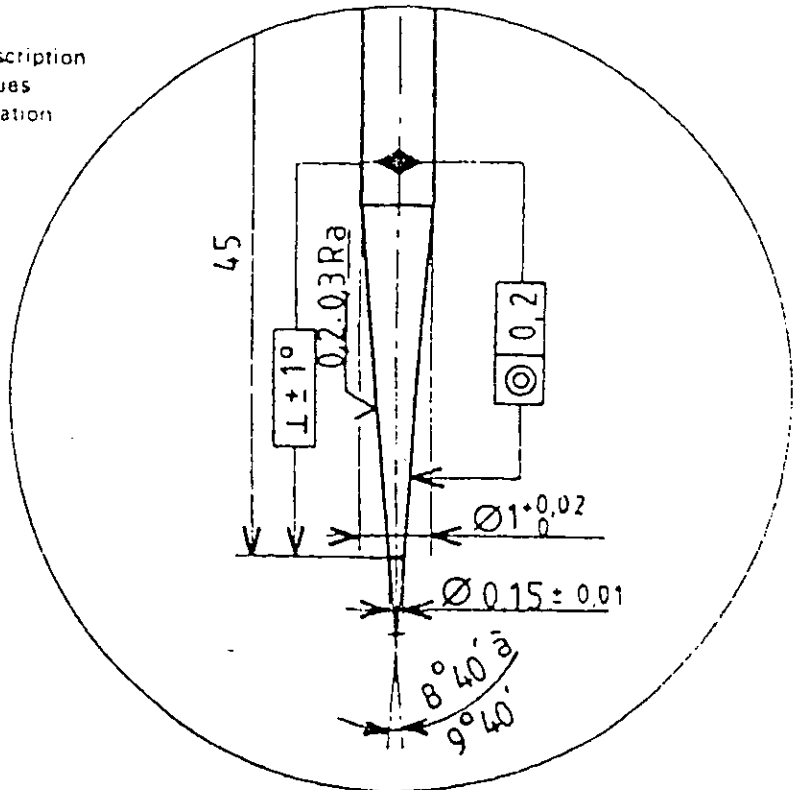
FIG. 63. — Pénétrömètre Standard.

- a) Aiguille ;
- b) Dispositif de déclenchement ;
- c) Vis de blocage ;
- d) Crémaillère ;
- e) Cadran gradué en 1/10 de millimètre ;
- f) Chronomètre ;

- g) Tablette porte-échantillon ;
- h) Vis à faible pas ;
- i) Échantillon ;
- j) Bac en laiton ;
- k) Support ;
- l) Niveau d'eau.



Masse de l'ensemble aiguille et fourreau . $2.5 \text{ g} \pm 0.05 \text{ g}$ à ajuster sur le fourreau par usinage de méplats sur le corps ou perçage de la face supérieure



Alignement axe fourreau/axe aiguille $< 1 \text{ mm}$

Matière :

Aiguille : acier inox, type Z 100 CD 17 ou équivalent, trempé revenu, dureté C54 à 60

Fourreau : laiton ou acier inox.

Figure 1 — Dimensions de l'aiguille et du fourreau

EQUIVALENT DE SABLE :

Norme :NFP 18 598

Définition :

L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100 de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée. Ces hauteurs sont mesurées dans une éprouvette où la prise d'essai a été traitée, dans des conditions définies, par une solution lavante capable de faire flocculer des éléments fins.

L'équivalent de sable est effectué sur la fraction de sol ou de granulat passant au tamis à maille carrée de 5mm. Il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans cette fraction, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés...).

Il s'exprime par :

ES (équivalent de sable, tout court) mesuré au piston.

ESV (équivalent de sable visuel) mesuré à vue.

A la température de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Domaine d'application :

Cette détermination s'applique dans de nombreux domaines, notamment les suivants :

- Choix et contrôle des sols utilisables en stabilisation mécanique
- Choix et contrôle des sables à béton
- Choix et contrôle des granulats pour enrobés hydrocarbonés
- Contrôle des sols utilisés en stabilisation chimique

But de l'essai :

L'équivalent de sable désigné par E.S est déterminé par une méthode simple et récente, basée sur le repérage de la quantité de sable vrai contenu dans un sable plus ou moins souillé de matière argileuse ou colloïdale.

Appareillage :

1. Une éprouvette cylindrique transparente en matière plastique ayant :

- Un diamètre extérieur constant à 0.5mm près.
- Un diamètre intérieur de (32 ± 0.5) mm près
- Une hauteur de (430 ± 0.25) mm

L'éprouvette porte des traits de repère gravés à (100 ± 0.25) mm et (38 ± 0.25) mm de la base.

- Un bouchon de caoutchouc s'adaptant à l'ouverture du cylindre permet de fermer l'éprouvette .
2. Un tube laveur ,il est constitué par un tube rigide de : (6 ± 0.5) mm de diamètre extérieur ,
(3 ou 4 ± 0.2)mm de diamètre intérieur et muni à la partie supérieure d'un robinet inférieur ,d'un embout fileté formant un dièdre ,chaque face du dièdre étant percée d'un trou de (1 ± 0.1) mm.
 3. Un flacon transparent en verre ou en matière plastique d'environ 5 litres ; muni d'un système de siphon .Le fond du flacon est placé à 1 mètre environ au-dessus de la table de travail .
 4. Un tube de caoutchouc ,ou de plastique ,de 1.50 m de longueur et de 5mm de diamètre intérieur ,ce tuyau sert à relier le tube laveur au siphon .
 5. Un piston taré ,constituer par :
 - Une tige de (43 ± 0.25) mm de longueur
 - Une embase de (25 ± 0.25) mm de diamètre ,dont la face inférieure est plate, lisse et perpendiculaire à l'axe de la tige et qui comporte latéralement trois vis de centrage qui centrent le piston dans l'éprouvette cylindrique en laissant un léger jeu
 - Un manchon, de (10 ± 0.1) mm d'épaisseur, s'adapte sur l'éprouvette cylindrique et permet de guider la tige du piston en même temps qu'il sert à repérer l'enfoncement du piston dans l'éprouvette. Ce manchon comporte une vis qui permet de le bloquer sur la tige .
 - Un poids est fixé à l'extrémité supérieure de la tige pour donner à l'ensemble du piston taré ,hormis le manchon, un poids de 1000g à 5g près.
 6. une machine d'agitation ,manuelle ou électrique ,imprime à l'éprouvette un mouvement horizontal ,rectiligne , périodique et sinusoïdal de (20 ± 1) cm d'amplitude et de période 1/3 seconde.

Manipulation :

A.) Mise en place de la première prise d'essai :

- La solution lavante étant siphonnée dans l'éprouvette cylindrique jusqu'au trait repère inférieur ,la prise d'essai correspondant à 120 grammes de sable sec (après échantillonnage) est versée soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette cylindrique posée verticalement sur sa base .
- Taper à plusieurs reprises la base de l'éprouvette cylindrique fortement sur la pomme de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- Laisser reposer 10 minutes .

B) agitation de l'éprouvette :

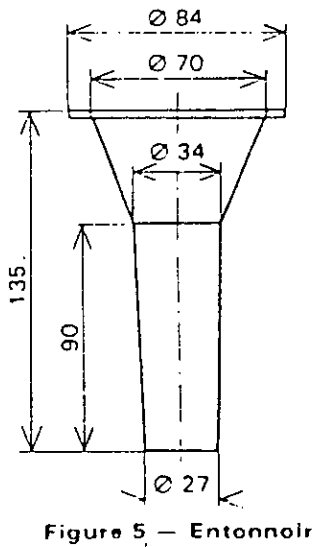
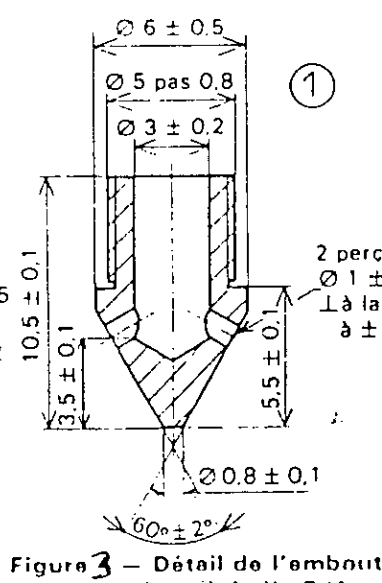
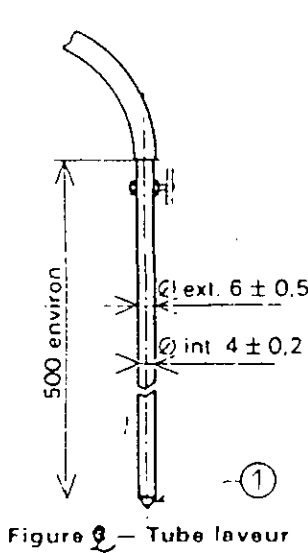
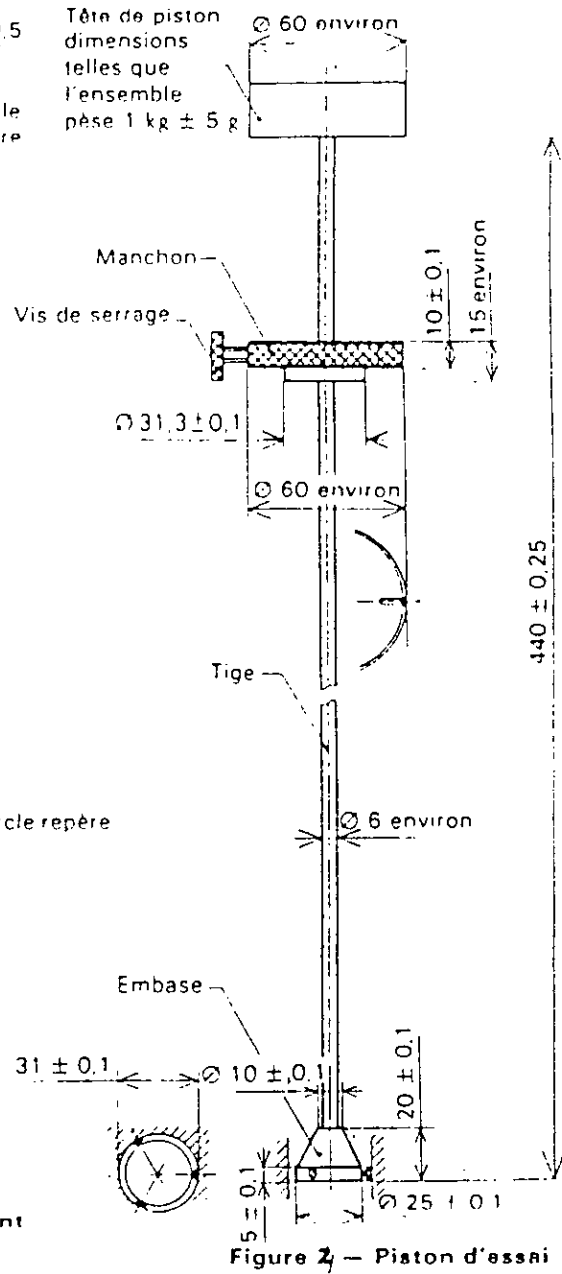
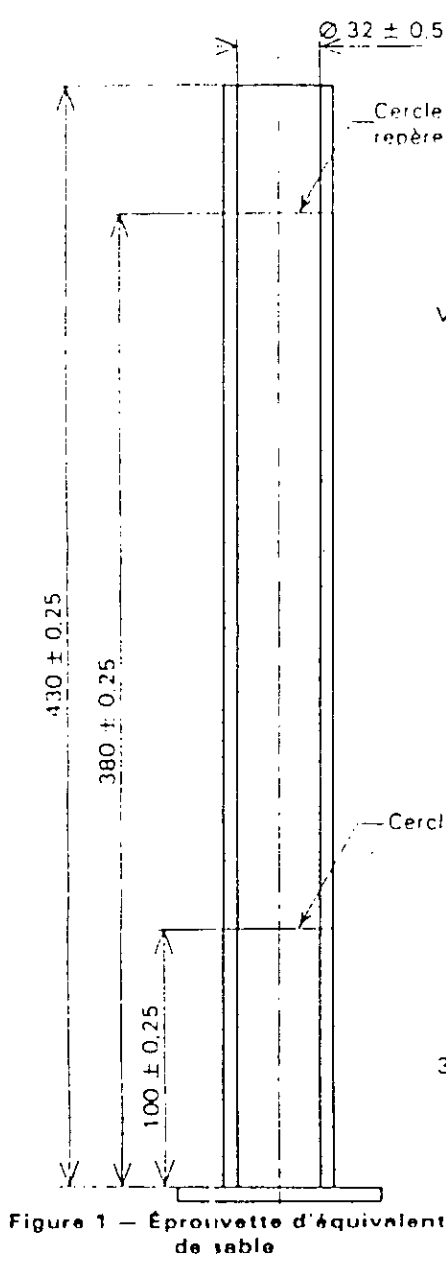
- A la fin de cette période de 10minutes :
 - * boucher l'éprouvette cylindrique à l'aide du bouchon de caoutchouc prévu à cet effet,
 - * fixer l'éprouvette cylindrique sur la machine.
- L'éprouvette cylindrique subit (90 ± 1) cycles en (30 ± 1) secondes.
- L'éprouvette cylindrique retirée de la machine est remise en position verticale sur la table d'essai.

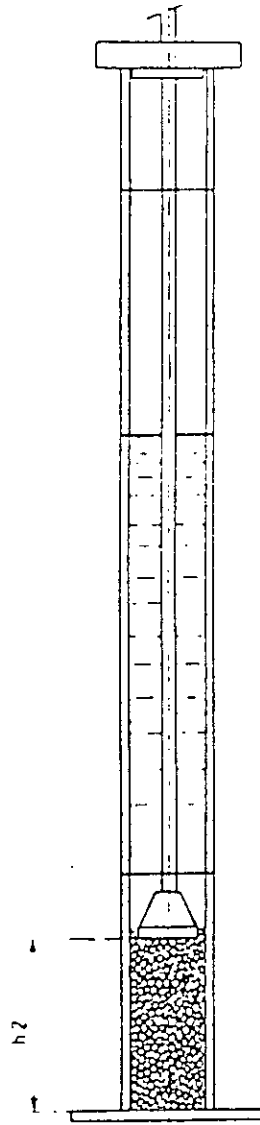
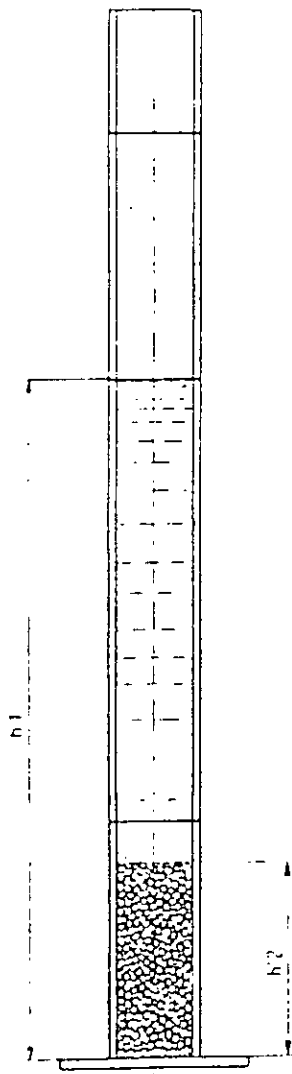
C)lavage :

- Oter le bouchon de caoutchouc et le rincer au-dessus de l'éprouvette cylindrique avec la solution lavante .
- En descendant le tube dans l'éprouvette cylindrique :
 - * rincer les parois de l'éprouvette avec la solution lavante .
 - * puis enfoncer le tube jusqu'au fond de l'éprouvette cylindrique .
- Laver le sable pour faire remonter les éléments argileux tout en maintenant l'éprouvette cylindrique en position verticale ; imprimer un mouvement doux de piquage et rouler le tube laveur entre le pouce et l'index tout en faisant tourner l'éprouvette cylindrique avec l'autre main.
- 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 , relever le tube laveur lentement sans arrêter l'écoulement de façon que le niveau du liquide se maintienne à hauteur du trait repère .Régler l'écoulement juste avant que le tube ne soit entièrement sorti pour ajuster le niveau final au trait repère supérieur.
- Arrêter l'écoulement dès la sortie du tube laveur.

Mesures :

- Laisser reposer sans perturbation pendant 20 minutes \pm secondes.
- Après 20 minutes de stabilisation, mesurer à l'aide de la règle la hauteur H_1 du niveau supérieur du floclât par rapport au fond de l'éprouvette.
- Faire descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette jusqu'à ce qu'il repose sur le sable.
- Lorsque l'embase du piston repose sur le sable, bloquer le manchon coulissant la tige du piston.





- L'équivalent de sable d'une prise d'essai d'un échantillon est, par définition, mesuré au piston et donné par la formule : Quelle formule

Faire 3 essais par un même échantillon et avec décalage de 3 mn pour avoir la moyenne.

Remarque:

Il y a lieu d'attirer l'attention sur la nécessité de respecter la durée fixée à 20 minutes \pm 10 secondes pendant laquelle l'éprouvette cylindrique est laissée au repos. La durée de ce repos influe sur la sédimentation et par suite sur la hauteur du sédiment. Ceci est particulièrement valable dans le cas où un même opérateur effectue simultanément plusieurs essais.

Le tableau ci-dessous présente le programme de travail minuté d'un opérateur effectuant simultanément 3 essais équivalent sable.

BIBLIOGRAPHIE

- 1- ARRAMBIDE.J et DURIEZ .M
« Liants hydrocarbonés mortiers et bétons bitumineux ».
Edition DUNOD.1954
- 2- ARRAMBIDE .j et DURIEZ.M
« Liants routiers et enrobés, matériaux de protection, plâtre, agglomérés, bois ». Edition
DUNOD.1959.
- 3- ARAMBIDE .J et DURIEZ .M
« Nouveaux traité de matériaux de construction » tomes 1 et 2.
Edition DUNOD 1962.
- 4- KASSI .H « Sable bitume en couche de roulement. Etude et formulation »
PFE : ENP .1997.
- 5- BENOUALI .T et CHOUAKI.K « Sable bitume en couche de roulement ».
PFE :USTHB .1996.
- 6- HADDADI .S « Contribution à l'étude du comportement des matériaux traités aux
liants hydrocarbonés : influence des paramètres de composition ».
Thèse de magister, USTHB.1995.
- 7- HADDADI .S et LARADI N. « Etude de sable bitume en couche de roulement ».
2ème congrès algérien de la route. Edition : Association routière maghrébine. 1996.
- 8- HANK. et SENHADJI.F.«Utilisation du sable bitume en couche de roulement » 2ème
congrès de la route. Edition : association routière maghrébine 1996.
- 9- JEUFFROY.G : « conception et construction des chaussées » tome 2.
Edition E.Yrolles. 1983.
- 10- Normes françaises. Edition « AFNOR » (1976 à 1986 ».
- 11- KERROUM .T et M.L Farhi.
« sable bitume en couche de roulement . Etude et formulation. »
PFE . ENP . 1991.
- 12- CHEICH : « Terrassement routiers dans les sables de dunes de Mauritanie ».
Bulletin de liaison des L.P.C. Octobre 1995.
- 13- BEN DHIA.M
« Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en
milieu saharien ».
Bulletin de liaison des L.C.P.C Février 1998.

ملخص

هذا العمل يقدم بعض خصوصيات بناء الطرق في الوسط الصحراوي, توجد اشارة خاصة الى المناخ, التربة الصحراوية, مواد البناء المحلية, و بعض العوائق المطبقة من طرف هذا الوسط. الدراسة المخبرية الموصوفة, تخص ادماج الرمل الصحراوي في مواد بناء الطرق, و تكييفها برمال محلية اخرى.

ABSTRACT :

This work presents some specific aspect af road construction in the Sahara. Special attention is given to the climate, saharan soils, local construction materials and some constraints imposed by this environment.

A laboratory stady is discribed which examines the incorporation of desert sand into road materials, and his stabilisation with other local sands .

RESUME :

Ce travail présente certaines spécificités de la construction routière en contexte saharien. Une attention particulière est portée au climat, aux sols sahariens, aux materiaux locaux de construction et à certaines contraintes imposée par ce milieu.

L'étude de laboratoire décrite porte sur l'incorporation du sable du désert dans les matériaux routiers, et la stabilisation de ce dernier par d'autres sables locaux.

MOTS CLES : sable - désert - construction routière - contraintes.--materiaux locaux - sable bitume - stabilité - compacité - essai - laboratoire.