

وزارة التعليم والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

2 ex

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**



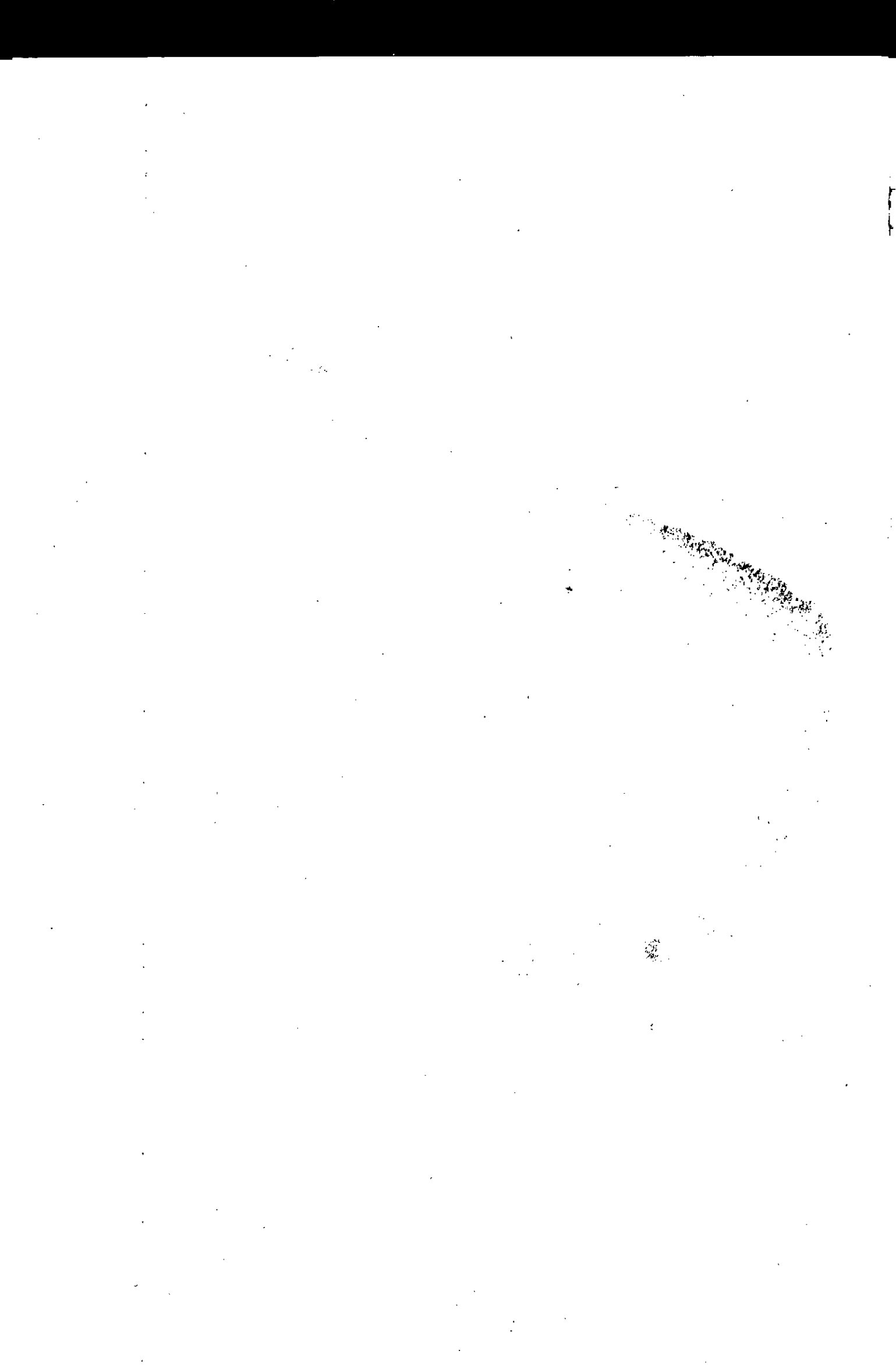
**DEPARTEMENT : GENIE CIVIL**

**Comportement mécanique  
des enrobés hydrocarbonés  
dans une chaussée**

Proposé par :  
L.T.P.C.

Dirigé par :  
MM. CHARIF Abdelhamid  
P.h.d. maître de conférence  
Air ABDESLEM Ali

Etudié par :  
ANTRI BOUZAR (Mohamed)  
BENDJOUADI (Mouloud Salim)



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement et de la Recherche Scientifique

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

**DEPARTEMENT : GENIE CIVIL**

# **Comportement mécanique des enrobés hydrocarbonés dans une chaussée**

Dirigé par :

**MM. CHARIF Abdelhamid**  
P.h.d. maître de conférence  
Aï ABDESLEM Ali

Etudié par :

**ANTRI BOUZAR Mohamed**  
**BENDJOUADI Mouloud Salim**

Proposé par :  
**L.T.P.C.**

**PROMOTION JANVIER 1987**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

DEDIDACES



JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL :

- A MON PERE,
- A MA MERE,

pour tous les efforts qu'ils n'ont jamais cessé de  
me prodiguer, avec toute mon affection.

- A MON FRERE, MES SOEURS ET MON BEAU FRERE.
- A TOUTE MA FAMILLE.
- A MES AMIS(ES).

Mouloudj

~~المكتبة الوطنية المتعددة التقنيات~~

REMERCIEMENTS

*Qu'ils nous soient permis de remercier :*

*- nos promoteurs, MM. CHARIF et AIT ABDESLAM pour leurs conseils éclairés.*

*- nos plus sincères remerciements à Mr KEDOURI pour son aide précieuse ainsi qu'à Mr TEREJA et à tous les membres du laboratoire du L.T.P.C., pour l'assistance et la disponibilité dont ils nous ont fait bénéficier.*

*- toute notre gratitude à nos professeurs qui nous ont guidé au cours de nos études, parmi eux les membres de notre Jury, qui nous font l'honneur de juger notre travail.*

*- A tous nos amis(es),*

*M. ANTRI BOUZAR & M.S. BENDJOUADI.*



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

وزارة التعليم العالي

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات

DEPARTEMENT : Génie Civil

فرع : الهندسة المدنية

PROMOTEURS : CHARIF. A  
AIT ABDESLAM. A

الموجهان : شريف  
ايت عبد السلام

ELEVES INGENIEURS : ANTRI BOUZAR Mohamed

BENDJOUADI Mouloud Salim

الطلابان : المهندس انترى بوزار محمد  
بن جوادى مولود سليم

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

الموضوع : السير الميكانيكي للغطاء الهيدروكربوني في الطرق .

المخلص : ان هدف التجربات المتعلقة بالغطاء الهيدروكربوني هو تعيين

المميزان الميكانيكية للمادة .

ندرس تشكيل البيتون الهيدروكربوني وذلك بالاعتبار على المقاييس سيترا - السبسس

(Setra - L.C.P.C.) ، ( تجريبات مرشال ودورياز العادية ) ونعين بعد ذلك قانون

السير . ( تجريبات الفحص الديناميكي ، والضغط ذو ثلاث محاور ) . ونختتم

بالحصول على كل ما يستعمل للقياس وذلك بالاعتبار على الشكل .

SUJET : Comportement mécanique des enrobés hydrocarbonés (bitume).

Résumé : Les essais sur enrobés hydrocarbonés ont pour objectif de déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau.

Nous examinons à partir des normes Setra - LCPC la formulation des bétons bitumineux (essais traditionnels Marshall, Duriez) et déterminons par la suite une loi de comportement (essai à l'auscultation dynamique, à la presse triaxial) et, enfin calculons le module complexe à partir de la formulation.

SUBJECT : Mechanical behaviour of the hydrocarbonate coverage (bitume).

Abstract : The aim of the experiments made on hydrocarbonate coverage is to determine the mechanical characteristics of the material.

In this study, the formulation of bituminous concrete is elaborated on the Setra - LCPC standards (usual Marshall, Duriez experiments) and then the law behaviour is determined (experiment made with a dynamic auscultation, and with the triaxial instrument). The last thing done in this work is the calculation of the complex module starting from the formulation.

I N T R O D U C T I O N

I E M E P A R T I E : F O N D E M E N T S T H E O R I Q U E S

1. GENEPAIITES	p 1
1.1. <u>LIANTS HYDROCARBONES</u>	p 2
1.1.1. <u>CARACTERISTIQUES USUELLES DES BITUMES</u>	p 2
1.1.1.1. Essais relatifs aux bitumes	
1.1.1.2. Viscosité	
1.1.1.3. Susceptibilité des liants	
1.1.1.4. Ductilité	
1.1.1.5. Cohésion interne	
1.1.1.6. Adhésivité des liants	
1.1.1.7. Mouillage du minéral par le liant.	
1.2. <u>MATERIAUX UTILISES DANS LES CHAUSSEES.</u>	p 9
1.2.1. <u>GRANULATS</u>	p 9
1.2.1.1. Principaux essais sur les granulats.	
1.2.2. <u>FILLERS</u>	p 11
1.2.2.1. Rôle du filler dans les mélanges bitumineux	
1.3. <u>ENROBES BITUMINEUX.</u>	p 12
1.3.1. <u>BETON BITUMINEUX</u>	p 12
1.3.2. <u>GRAVES - BITUMES</u>	p 16
1.3.2.1. Formulation	
1.3.2.2. Etude au laboratoire	
1.4. <u>FATIGUE DES ENROBES BITUMINEUX</u>	p 23
1.4.1. <u>COMPOTEMENT EN FATIGUE</u>	p 24
1.4.2. <u>LES ESSAIS DE FATIGUE SUR ENROBES BITUMINEUX</u>	p 26
1.4.3. <u>CARACTERISTIQUES MECANQUES</u>	p 27
1.4.4. <u>LOI DE FATIGUE</u>	p 32
1.4.5. <u>PRINCIPAUX PARAMETRES DE FORMULATION INFLUENCANT LE COMPORTEMENT.</u>	p 32

1.5. <u>DEFORMATIONS PERMANENTES</u>	p 33
1.5.1. <u>IMPORTANCE DU PROBLEME</u>	p 33
1.5.2. <u>FACTEURS EXTERIEURS</u>	p 34
1.5.3. <u>RESISTANCE A LA DEFORMATION PERMANENTE</u>	p 35
1.5.4. <u>ESSAIS DE FLUAGE</u>	p 36
1.5.5. <u>PRINCIPAUX PARAMETRES INFLUENCANT LA DEFORMATION</u>	p 37

## 2 EME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

2.1. <u>ETUDE DE FORMULATIONS</u>	p 40
2.1.1. <u>METHODE L.C.P.C. (ESSAI DURIEZ)</u>	p 40
2.1.1.1. Mesures effectuées.	
2.1.2. <u>ESSAIS MARSHALL</u>	p 42
2.1.2.1. Mesures effectuées	
2.1.3. <u>APPLICATION</u>	p 44
2.1.3.1. Grave - bitume	
2.1.3.2. Béton bitumineux	
2.1.4. <u>CALCUL DU MODULE ELASTIQUE EN FAIBLE DEFORMATION</u>	p 53
2.1.4.1. Description de l'appareillage	
2.1.4.2. Préparation des éprouvettes	
2.1.4.3. Résultats de l'essai	
2.1.5. <u>LOI DU COMPORTEMENT EN ESSAI DE COMPRESSION</u>	p 58
2.1.5.1. Description de l'appareillage	
2.1.5.2. Préparation des éprouvettes	
2.1.5.3. Préparation des résultats.	
2.1.6. <u>CONCLUSION GENERALE</u>	p 60

III EME PARTIE : METHODE DE RESOLUTION DU MODULE COMPLEXE  
DES MELANGES BITUMINEUX.

- p 65

3.1. GENERALITES

p 66

3.2. APPLICATION

p 67

3.3. CONCLUSION

p 69

B I B L I O G R A P H I E

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

## I N T R O D U C T I O N

Les travaux de recherche sur les bitumes et enrobés bitumineux figurent depuis quelques années au L.T.P.C., c'est normal puisque leur utilisation dans la construction et l'entretien des routes est le débouché principal et que le bitume continue à y tenir un rôle important, tout particulièrement dans les couches de surface.

Pour cela les techniques d'utilisation du bitume doivent s'adapter à l'évolution des conditions de circulation.

La caractérisation des enrobés bitumineux fait appel à de multitudes d'essais normalisés, certains de ces essais peuvent être qualifiés de "classique" (essai normalisé "Duriez, Marshall") car ils sont couramment utilisés dans les études de formulation.

C'est ainsi qu'en Algérie au L.T.P.C. plus exactement, les études de formulation sont basées sur les essais Marshall qui détermine la stabilité et le fluage de la chaussée, facteurs très importants dans notre pays, et l'essai Duriez qui nous donne les caractéristiques mécaniques des enrobés.

Ces essais normalisés (Marshall, Duriez) donnent une vue restreinte et sommaire de la loi du comportement des bétons bitumineux. Nous nous sommes donc penchés à d'autres essais pour prévoir une loi de comportement avec les moyens existants au L.T.P.C., tel que l'auscultation dynamique qui nous renseigne sur le module tangentiel donc module élastique linéaire isolé à faibles déformations et l'essai de compression simple à la presse triaxiale avec différentes vitesses de déformation.

L'étendue du champ d'analyse devrait porter à l'avenir sur l'influence de la température, du mode de sollicitation (cisaillement, ou cission), la fréquence de sollicitation et la forme de sollicitation (sinusoïdale, triangulaire), du mode de cycle, de fluage et relaxation etc...

En dernier lieu nous avons essayer de déduire avec des paramètres facilement calculables le module de rigidité  $S_m$  (module complexe par un programme (Shell, AMSTERDAM), et grâce aux abaques de Vander Poel, le module du bitume.

1 ERE PARTIE : FONDEMENTS THEORIQUES



## 1. G E N E R A L I T E S.

Les matériaux utilisés dans la construction des chaussées sont essentiellement :

- les matériaux pierreux appelés granulats (sable, gravier, filler),
- les liants hydrauliques (ciment, chaux),
- les liants hydrocarbonés (bitume, goudron),
- les résines pour certains cas particuliers.

Nous ne traiterons pas ici les liants hydrauliques, mais notre étude est basée sur les liants hydrocarbonés (bitumes) et les granulats.

Nous nous bornerons à rappeler les principales priorités des liants hydrocarbonés qui, en génie civil, ne sont utilisés que pour les routes et autoroutes.

### 1.1. LIANTS HYDROCARBONES.

Les principaux liants sont les goudrons, les bitumes; les bitumes fluidifiés, les émulsions, etc.... Les bitumes généralement employés dans les travaux routiers sont livrés par les raffineries de pétrole. Issus de la distillation directe du brut, ils sont ensuite traités avec des huiles légères, et parfois oxydés pour diminuer leur susceptibilité thermique. Leur composition est extrêmement complexe et s'étudie en les fractionnant par des solvants sélectifs; cependant les constituants essentiels sont :

- les MALTHENES : constituant un liquide visqueux de couleur foncée ;
- les ASPHALTENES : qui ont des propriétés colloïdales qui sont transmises aux bitumes.

A température ordinaire, les bitumes sont des solides noirs à cassure nette ou des corps déformables; pour les bitumes mi-durs ou moux, la complexité de leur composition chimique fait qu'ils n'ont pas de point de fusion déterminé et que, lorsque leur température croît, leur consistance varie allant progressivement de celle d'un solide à celle d'un liquide visqueux en passant par des états pâteux. On est donc amené pour caractériser un bitume à indiquer :

- soit la température à laquelle il a une consistance déterminée (essai bille et anneau) ;
- soit sa consistance à une température donnée (essai de pénétration à l'aiguille).

### 1.1.1. CARACTERISTIQUES USUELLES DES BITUMES.

#### 1.1.1.1. Essais relatifs aux bitumes :

La pénétration standard d'un liant caractérise son état de viscosité à une température de 25°C. Mais pour brais et bitumes, de pénétration inférieure à 20 n'a plus de sensibilité. Au contraire, pour les liants très moux, de faibles variations dans la viscosité entraînent de très fortes variations dans la pénétration ; d'ailleurs, il est possible avec le pénétromètre de mesurer une pénétration supérieure à 300 (3 cm). Il est vrai que l'on peut, dans le cas de liants très durs, mesurer la pénétration à une température plus élevée, 35°C par exemple ou davantage; au contraire, pour les liants très moux, on peut mesurer la pénétration à une température plus basse (15°C ou même 0°C).

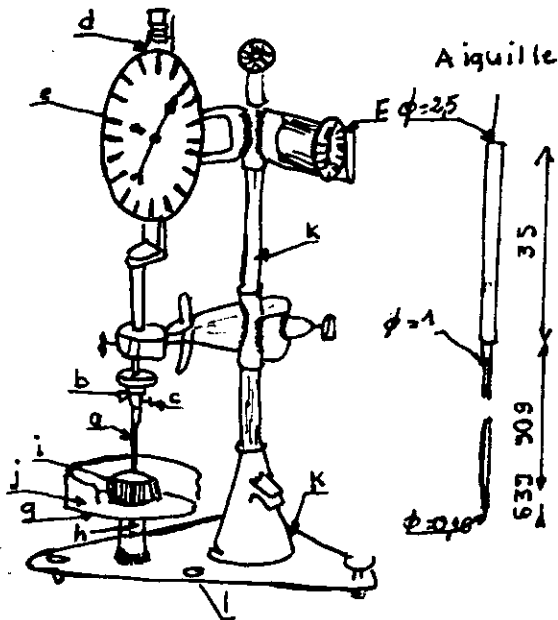
- Essai de pénétration à l'aiguille : l'essai de pénétration consiste à enfoncer dans un échantillon de liant à une température donnée (25°C) une aiguille standard pendant une durée de temps de 5 secondes sous une charge totale de 100 g. L'enfoncement de l'aiguille, mesuré au 1/10 de mm. est appelé "pénétration" du bitume étudié. Au moyen de cet essai une classification est établie.

- bitume dur de pénétration 40/50
- bitume demi-dur de pénétration 80/100
- bitume demi-mou de pénétration 180/220
- bitume mou de pénétration 280/300
- bitume très mou de pénétration 300/350
- bitume fluide (cut-back et road-oil) de pénétration supérieure à 350.

- APPAREIL POUR LA DETERMINATION DE LA PENETRATION -

- a. Aiguille
- b. Dispositif de déclenchement
- c. Vis de blocage
- d. Crémaillère
- e. Cadran gradué en  $\frac{1}{10}$  mm
- f. Chronomètre

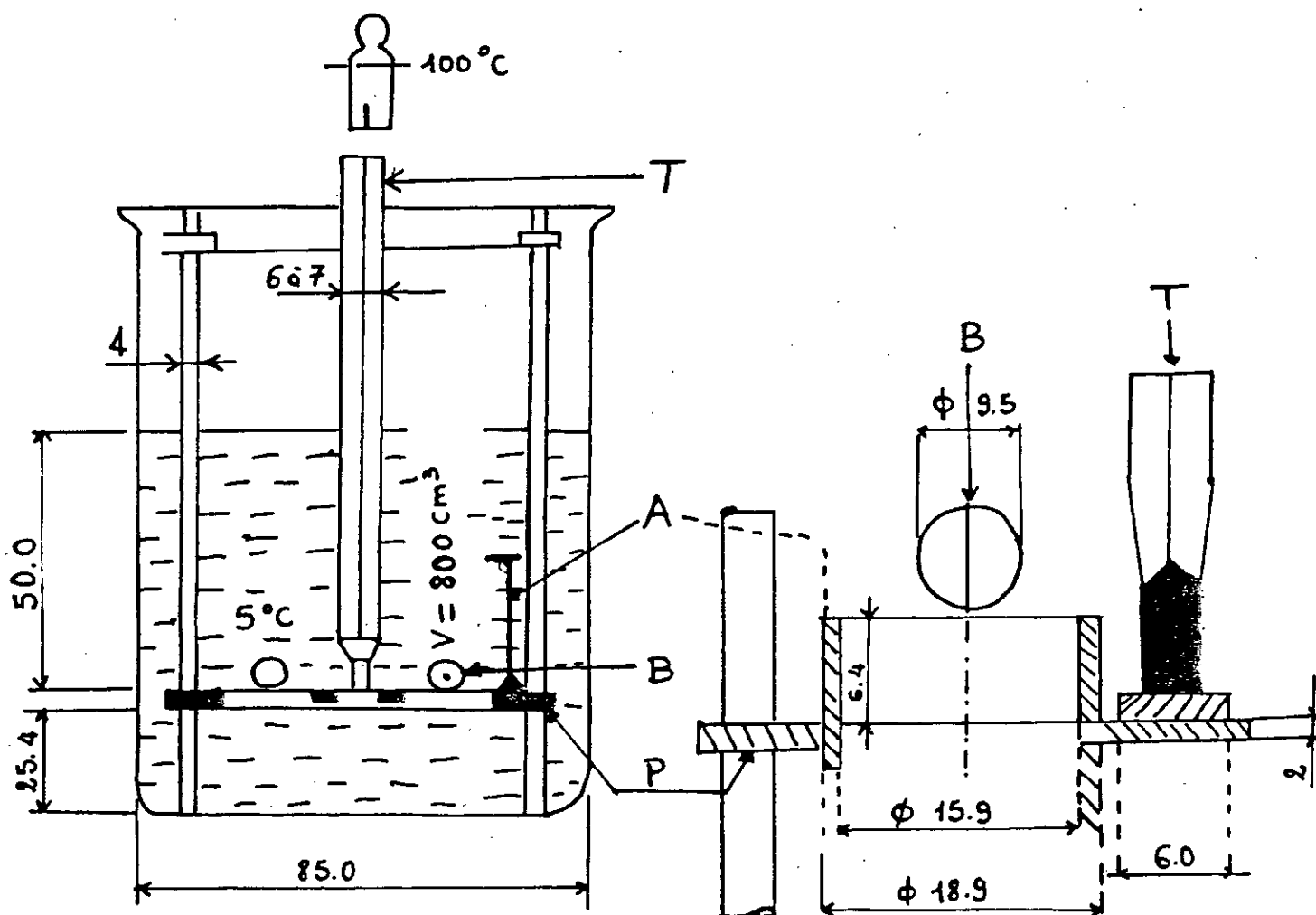
Ensemble de l'appareil



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

- Essai bille et anneau : L'essai bille et anneau consiste à couler un disque de bitume dans un anneau de 15,9mm de diamètre intérieur et 6,3mm d'épaisseur et à placer sur le disque de bitume une bille d'acier de 3,5g ; 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 au moment où le bitume entre en contact avec le fond du bécher. Cette température représente le point de ramollissement bille et anneau.

- APPAREIL POUR LA MESURE DU POINT DE RAMOLLISSEMENT BILLE ET ANNEAU-



A : anneau métallique

P : plaque portante

B : bille d'acier

T : thermomètre

### 1.1.1.2. Viscosité :

La viscosité des liants à l'état de liquide visqueux est mesurée avec un viscomètre à écoulement muni d'un ajustage de 10 mm. et parfois de 4mm. de diamètre "Viscomètre B.R.T.A."

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

Pour les liants solides, on ne peut caractériser la viscosité par durée d'écoulement on emploie deux méthodes de mesure : mesure de pénétration et mesure du point de ramollissement. Entre la viscosité  $\eta$  d'un liant exprimé en kilopoises et sa pénétration "p" exprimée en dixièmes de mm., on a sensiblement la relation suivante :

$$\eta = \frac{1,58}{2,16 \text{ Pen}} \cdot 10^{10}$$

### 1.1.1.3. Susceptibilité des liants :

La susceptibilité d'un liant c'est la caractéristique marquant son aptitude à varier plus ou moins de consistance pour une variation déterminée de la température. C'est une caractéristique qui change avec la température ; il faut donc bien préciser cette dernière. Cette caractéristique peut être soit la viscosité, soit la pénétration. Si l'on examine durant l'hiver un liant dur et fragile, par exemple un liant qui a vieilli, il est certain que la caractéristique à examiner est la viscosité et non la pénétration. <sup>Par</sup> contre s'il s'agit d'un liant très mou dont on doit examiner le comportement durant la saison chaude, c'est la susceptibilité à la pénétration qu'il faut considérer.

### 1.1.1.4. Ductilité :

La ductilité d'un liant 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 à 25°C et la vitesse d'allongement de 5 cm par minute.

L'essai se fait dans l'eau sur des éprouvettes en forme de "8".

La ductilité d'un liant croit quand la susceptibilité croit.

#### 1.1.1.5. Cohésion interne :

La cohésion interne d'un liant hydrocarboné est caractérisée par la résistance à la décohésion ; à une température déterminée, dans des conditions d'allongement ou de cisaillement et de vitesse de déformation déterminée.

La cohésion interne s'oppose à l'adhésivité on l'appelle aussi cohésivité. Elle correspond à la rupture du liant dans sa masse sous certains efforts; elle correspond aussi à l'idée de la résistance à la rupture du liant dans sa masse par opposition au décollement de ce liant à la paroi des agrégats qu'il est chargé d'agglomérer.

La cohésion croit en général avec la viscosité, mais ceci n'est vrai que pour autant que le liant n'atteint pas un certain stade de fragilité ; auquel cas la décohésion survient par déchirement amorcé par un état de surface (fissures ou rayures non parallèles à la direction de l'effort).

#### 1.1.1.6. Adhésivité des liants :

Beaucoup de revêtements sont défailants par suite d'une adhésivité du liant inférieure à celle de l'eau ; ce qui se manifeste lorsque l'eau entre en contact prolongé avec ce revêtement. L'adhésivité d'un liant pour un minéral est marquée par sa faculté de pouvoir mouiller le minéral ; elle est donc considérée comme une caractéristique d'affinité d'un corps pour un autre ; pour que cette affinité d'ordre moléculaire se manifeste, il faut que l'un des corps soit suffisamment fluide pour que ses molécules puissent se déplacer et entrer en contact dans le champ des forces de cohésion avec les molécules du corps rigide.

D'une manière pratique on pourra donc considérer que l'adhésivité d'un liant pour un minéral est la faculté pour un liant ayant mouillé le minéral de résister au déplacement par l'eau.

Donc, l'adhésivité sera d'autant mieux conservée si :

- l'énergie d'adhérence du liant pour le minéral sera plus élevée ;
- le liant sera plus visqueux ;
- l'épaisseur du liant d'enrobage sera plus forte.

#### 1.1.1.7. Mouillage du minéral par le liant :

Ce mouillage est caractérisé par l'affinité au contact moléculaire des deux corps en présence et par la fluidité du liant lui permettant des déplacements faciles et rapides.

Les liants hydrocarbonés contiennent toujours dans leur masse des corps de composition "polaire-apolaire" qui ont tendance à se porter aux surfaces et aux interfaces et dont la partie polaire de la molécule peut avoir de l'affinité chimique, ce qui permet aux liants de mouiller les agrégats et de créer une soudure "liant-agrégats". Cette affinité des corps "polaires-apolaire" peut devenir supérieure à celle de l'eau pour la surface du minéral, il n'y a plus ainsi possibilité de déplacement par l'eau dans les conditions ordinaires.

-Indice de pénétration : Il est important de préciser dans quelle limite on peut utiliser les valeurs de pénétration pour caractériser la consistance des bitumes.

L'utilisation de la consistance est toujours fonction de la température qui est un phénomène complexe liée au changement de l'état physique du matériau.

Dans la pratique, on utilise la formule approchée :

$$IP = \frac{20 (1-25A')}{1 + 50A'}$$
$$A' = \frac{\text{Log}_{\text{Pen}} (T_1) - \text{Log}_{\text{Pen}} (T_2)}{T_1 - T_2} \quad \text{Log}_{\text{Pen}} T_2 = \text{Log } 800$$

A' étant la susceptibilité thermique.

.../...

QUALITES	180/220	100/120	80/100	60/70	40/50	20/30
0°C	!	!	!	!	!	!
Point de ramollissement (bille et anneau)	! 34 à 43	! 39 à 48	! 41 à 51	! 43 à 56	! 47 à 60	! 52 à 65
Pénétration 1/10mm (25°C, 100g, 5s)	! 180-220	! 100-120	! 80-100	! 60-70	! 40-50	! 20-30
Densité à 25°C	! 1-1,007	! 1-1,07	! 1-1,1	! 1-1,1	! 1-1,1	! 1-1,1
Perte à la chaleur pendant 5H à 163°C	! < 2%	! < 2%	! < 2%	! < 1%	! < 1%	! > 1%
Pénétration résistante après perte de chaleur rapportée à la pénétration initiale	! > 70%	! > 70%	! > 70%	! > 70%	! > 70%	! > 70%
Point d'inflammabilité cleveland	! > 230°C	! > 230°C	! > 230°C	! > 230°C	! > 230°C	! > 230°C
Ductibilité à 25°C	! > 100	! > 100	! > 100	! > 80	! > 60	! > 25
Solubilité dans CS2	!	!	! > 99,5	!	!	!
Teneur en paraffine	!	!	! < 4,5 %	!	!	!

-TABLEAU I-



## 1.2. MATERIAUX UTILISES DANS LES CHAUSSEES.

### 1.2.1. GRANULATS.

Les granulats sont des matériaux grenus de provenance naturelle ou artificielle, destinés après adjonction d'un liant à la confection des bétons.

Qualités exigées : les fondations et bases sont maintenant presque généralement constituées par des granulats dits à granulométrie continue appelés graves; ces graves doivent :

- ne pas se fragmenter sous l'effet de la répétition des charges;
- ne pas évoluer par attrition au contact des grains;
- épanouir les charges en ayant, en place, un module d'élasticité élevé;
- avoir une stabilité propre qui évite le fluage sous l'effet des charges répétées;
- être insensible à l'eau;

Ces qualités sont issues de :

- la nature de la roche dont est issue la grave ;
- l'échelonnement granulométrique;
- le coefficient de frottement des grains entre-eux;
- la présence d'argile.

Il est certain qu'un granulats issu d'une roche ne fragmentera pas et ne produira pas de fins et il est certain qu'un béton sec compact sera rigide, épanouira les charges et n'offrira que peu d'occasions aux grains de bouger les uns par rapport aux autres.

Un matériau plein anguleux à fort frottement n'aura pas tendance à fluer au passage des roues, ce qui serait le cas pour les granulats ronds et lisses et ayant peu de contact les uns avec les autres. Il est aussi certain qu'un matériau ayant de l'argile dispersée autour des grains risque une fois humide de perdre toute stabilité.

Origine des graves : Les graves fréquemment utilisées sont d'origines très variables. Schématiquement, on peut classer les graves en :

- graves brutes naturelles : ce sont des matériaux alluvionnaires roulés utilisés tels quels.
- graves naturelles concassées : il s'agit en général de graves naturelles comportant à la fois des éléments fins et moyens non concassés et des éléments concassés provenant du concassage des galets les plus gros.
- graves entièrement concassées : il s'agit soit de la fraction grosse d'une grave naturelle qu'on concasse soit d'un matériau entièrement concassé provenant d'une carrière.

Granulométrie : Chaque pays a ses fuseaux granulométrique ; c'est à dire les courbes limites à l'intérieur desquelles doit se tenir la courbe du matériau qu'on veut utiliser.

En fait, il suffit de connaître :

- le calibre maximal convenable
- le pourcentage de fines (0,08 mm) convenable
- fines en proportion comprise entre 2 et 10%
- calibre maximal à 31,5mm pour la fondation et inférieur à 20mm pour les bases.

#### 1.2.1.1. Principaux essais sur les granulats :

-Essai DEVAL HUMIDE : La résistance à la fragmentation et à l'usure est généralement caractérisée par l'essai Deval-Humide. Cet essai consiste à introduire dans un cylindre de 20 cm de diamètre et 34 cm de longueur 50 pierres cassées et humidifiées pesant au total 5 Kg. Le cylindre effectue 10.000 révolutions à 30tr/min. autour d'un axe faisant un angle de 32° avec l'axe proprement dit du cylindre. Le coefficient Deval est égal à  $20.000/P$  ; avec P = masse en "g" des éléments inférieurs à 1.6mm, on exigera :

- pour les fondations un Deval supérieur à 5
- pour les bases un Deval supérieur à 7.

-Essai LOS-ANGELES : Caractérise la dureté du granulat. Cet essai consiste à placer dans un cylindre à axe horizontale de 70 cm de diamètre et 50 cm de longueur les granulats et des boules d'acier. On effectue 500 révolutions à 30tr./min. Le poids et la granulométrie du granulat sont prédéterminés en fonction du diamètre maximal du granulat ; après essai, les matériaux sont criblés au tamis de maille 1.68mm, le poids de la fraction passante est rapporté au poids de la prise d'essai. Ce rapport, multiplié par 100 est appelé "coefficient LOS ANGELES".

### 1.2.2. FILLERS.

Définition : Les fillers appelés encore fines sont des farines minérales utilisées comme l'élément de remplissage destiné à augmenter la compacité des mortiers et bétons bitumineux en particulier. La dimension des grains de filler est généralement comprise entre 5 et 80  $\mu$ .

#### 1.2.2.1. Rôle du filler dans les mélanges bitumineux :

Le filler confère certains propriétés au béton bitumineux parmi lesquelles on peut citer :

- il multiplie les points de contact entre les différents grains et augmente par conséquent la cohésion et la stabilité du béton.
- en réduisant l'épaisseur moyenne des films de liant, le filler permet de rendre la surface du revêtement moins sensible aux dérapages.
- il permet, lorsque le dosage est choisi correctement, la rigidification du liant sans nuire à la plasticité de l'enrobé. En effet, les coups de freins notamment provoquant la fusion du liant qui pourrait conduire à des accidents si le liant n'était pas fillerisé.
- il freine en période de chaleur le ressuage.
- il augmente la résistance au désenrobage à l'eau du béton bitumineux.
- il augmente également la résistance à la compression du béton bitumineux. Cette résistance dépend non seulement du pourcentage de filler incorporé dans l'ossature minérale mais aussi de sa nature.

### 1.3. ENROBES BITUMINEUX

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 du goudron donnant un "enrobé goudronneux".

Dans notre étude, on se limitera uniquement aux enrobés-bitumineux.

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

- 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 vides (donc le volume occupé par la phase gazeuse) comme l'une des caractéristiques importantes de l'enrobé.

L'emploi des enrobés bitumineux pour la construction ou le renforcement des chaussées s'est développée considérablement, depuis quelques années au fur et à mesure que la fabrication industrielle de ces matériaux permettrait à la fois d'améliorer leurs qualités et d'abaisser leur prix de revient.

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

- soit ouvert : si le pourcentage des vides est relativement 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 fine.

- 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 de maille maximales  $D_{20}$  ; on définit les catégories suivantes :

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

Qualités exigées d'un enrobé : Les qualités essentielles que doit avoir un enrobé sont :

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

L'insuffisance de stabilité se traduit par un fluage avec formation de dépression 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 des bétons bitumineux constitués de bitumes durs (du 40/50 par exemple) et de granulats durs et anguleux.

- la flexibilité : on entend par flexibilité l'aptitude à admettre sans fissuration, les déformations d'ensemble qui peuvent être imposées à la couche d'enrobé par la déflexion des couches inférieures. L'insuffisance de flexibilité se manifeste par des fissures du tapis. La flexibilité dépend en premier lieu par la ductibilité 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 sensibilité à l'eau : une bonne affinité entre le liant et les granulats accroît le cas échéant par des dopes, 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 de l'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, 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 vives au contact des pneumatiques.

Une bonne liaison doit exister entre la couche d'enrobé et les couches inférieures pour éviter des décollements éventuels. 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 tangentiels sont susceptibles de s'exercer (cas de fortes déclivités, virages etc...). Si la couche d'enrobé est épaisse (5 à 6 cm) l'enduit d'accrochage est généralement inutile.

Utilisation des enrobés : Les enrobés peuvent être utilisés soit en couche de surface, soit en couche de base. En couche de surface, sous forme de béton bitumineux de 5 à 12 cm d'épaisseur.

En couche de base sous forme de grave-bitume de 12 à 20 cm d'épaisseur, qui présente une résistance notable à la traction grâce à laquelle se produit une large répartition des contraintes dans les couches sous-jacentes. Cependant cet avantage comporte une contre-partie qui réside dans le fait d'une déformabilité excessive ; les couches inférieures conduisent inévitablement à la fissuration de la couche supérieure notamment lorsque celle-ci présente une rigidité importante qui la rend peu déformable.

Il est donc impératif de placer une couche d'enrobé sur un substratum peu déformable ; d'où le grand intérêt de procéder à des mesures de déflexions.

Il existe deux types d'enrobé bitumineux :

- le béton bitumineux : employé généralement en couche de surface ;
- la grave bitume : employé généralement en couche de base.

### 1.3.1. BETON BITUMINEUX

Les bétons bitumineux sont constitués d'un mélange de gravillons et de sable, de filler et de liant hydrocarboné (bitume). Les caractéristiques principales et communes à ces types de mélanges sont d'être constitués par un squelette minéral à granularité continue dans

laquelle les particules les plus petites remplissent les vides formés par les plus grosses aboutissant à une structure minérale dense avec une teneur en vides faible. Le liant bitumineux de consistance moyenne ou dure recouvre les particules d'un film de bitume fin et remplit partiellement les vides du squelette minéral.

La résistance mécanique de l'enrobé est due à la rigidité et au frottement interne de ce squelette minéral.

Classification : Selon la plus grande dimension du gros granulat et les proportions du gravillon, de sable et de filler, on peut classer les bétons bitumineux en béton bitumineux de texture grossière, moyenne et fine.

La composition moyenne de ces types de béton bitumineux sont est comprise généralement dans les limites suivantes :

Structure	Dimension Max.	Gravillon (%)	Sable (%)	Filler(%)	Bitume(%)
-Grossière	30 ÷ 15mm	80 ÷ 65	15 ÷ 30	2 ÷ 6	3 ÷ 5
-Moyenne	20 ÷ 10mm	65 ÷ 50	30 ÷ 45	4 ÷ 8	4 ÷ 6
-Fine	15 ÷ 10mm	50 ÷ 35	45 ÷ 60	6 ÷ 10	5 ÷ 7

- Les enrobés bitumineux de structure grossière s'emploient généralement pour les couches de bases des routes à trafic lourd. (grave)

- Les bétons bitumineux de structure moyenne sont employés le plus couramment pour les couches de roulement. (béton bitumineux)

- Les bétons bitumineux de structure fine s'emploient seulement comme couche de roulement. (béton bitumineux).

### 1.3.2. GRAVES-BITUMES

Les graves bitumes, moins richement dosés en liant que les bétons bitumineux, sont généralement destinées à la réalisation des assises de chaussées, couche de base et couche de fondation. Les graves bitumes doivent présenter essentiellement une résistance suffisante à la fatigue et à l'ornièrage.

-Grave : Une grave est un mélange, naturel ou non, à granularité continue, de caillou, de gravier et de sable (gros sable et sable fin) avec présence de particules plus fines.

-Dimension maximale : pour une grave 0/D, la dimension maximale des gros éléments sera normalement :

pour : - une couche de base  
- une couche de renforcement  $14\text{mm} \leq D \leq 20\text{mm}$   
- une couche de fondation de chaussée en béton

pour : - une couche de fondation de chaussée noire (souple) : D sera tel que :  
 $14\text{mm} \leq D \leq 31,5\text{mm}$ .

Les dimensions maximales relativement faibles permettent d'obtenir non seulement une bonne homogénéité en réduisant la ségrégation notamment au cours des opérations de fabrication et de mise en oeuvre, mais aussi un bon uni de la surface de la chaussée.

#### 1.3.2.1. Formulation :

- Principes de formulation : La méthode généralement employée pour la formulation des bétons bitumineux est la suivante :

- choix et appréciation de la qualité et de la nature des constituants ; granulats, filler et liants bitumineux, d'après le trafic, le climat et la nature de la couche de chaussée concernée.



- choix du type de béton bitumineux d'après la nature de la couche de chaussée pour laquelle il sera employé, et choix de la dimension maximale des granulats d'après l'épaisseur de la couche.

- dosage des granulats et du filler conformément aux spécifications granulométriques (Sétra - L.C.P.C.).

- choix de la teneur en liant bitumineux au moyen d'essais mécaniques.

Les liants généralement employés sont des bitumes de raffinerie ; de pénétration comprise entre 40 et 80 ; la tendance actuelle est d'employer un bitume aussi visqueux que possible compatible avec les conditions climatiques.

Une fois les constituants acceptés et après avoir choisi le type de béton bitumineux, on utilise généralement des fuseaux granulométriques pour fixer les proportions des granulats et du filler afin d'obtenir la granularité continue.

Ces fuseaux granulométriques conduisent à une compacité maximale tout en conservant une proportion suffisante de vides dans le squelette minéral pour permettre l'incorporation du liant.

- Essais mécaniques de formulation : Une fois la composition granulométrique des granulats et de filler déterminée, on définit une teneur en liant.

On emploie les essais mécaniques sur des éprouvettes de mélange avec des quantités croissantes du liant.

L'essai mécanique le plus employé est l'essai Marshall qui détermine la stabilité et le fluage avec différentes teneurs en liants et complété par l'analyse des vides et par la détermination de la relation stabilité/fluage et le module d'élasticité  $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ . On utilise un autre essai permettant d'évaluer la perte de résistance de l'enrobé sous l'action de l'eau : les essais d'immersion - compression Duriez.

1.3.2.2. Etude au laboratoire :

- Composition granulométrique :

- béton bitumineux : Pour chacun des bétons bitumineux 0/10 et 0/14 on définit une formule grenue et une formule semi-grenue par l'indication des pourcentages de refus aux tamis 2 et 6mm.

	Formule semi-grenue	Formule grenue
B.B. 0/10: tamis 6mm	25 à 35	35 à 45
tamis 2mm	55 à 70	60 à 75
B.B. 0/14: tamis 6mm	40 à 50	50 à 60
tamis 2mm	60 à 75	60 à 75

Les fourchettes données par le tableau définissent des fuseaux granulométriques suivant le type de béton bitumineux utilisé.

- Grave-bitume : Pour chacune des graves-bitumes 0/20 et 0/31,5, on définit une formule semi-grenue et une formule grenue pour l'indication du pourcentage de refus au tamis de 6, 2 et 0,6mm.

	Formule semi-grenue	Formule grenue
G.B.0/20 : tamis 6mm	40 à 55	50 à 65
tamis 2mm	60 à 75	65 à 80
tamis 0,6mm	71 à 84	75 à 86
G.B.0/31,5 tamis 6mm	50 à 60	60 à 70
tamis 2mm	65 à 80	70 à 85
tamis 0,6mm	75 à 86	78 à 89

Les fourchettes données dans ce tableau définissent des fuseaux granulométriques suivant le type de grave-bitume utilisée. .../...

- Teneur en filler : la teneur en filler, à retenir pour le chantier est définie à partir d'une étude au laboratoire ayant porté sur au moins trois teneurs en fillers. Ces teneurs en filler doivent être normalement à l'intérieur des fourchettes suivantes :

- pour le béton bitumineux : pour une couche de roulement.....5 à 9%  
pour une couche de liaison.....3 à 7%
- pour le grave-bitume : pour une couche de base.....6 à 9%  
pour une couche fondation.....3 à 7%

- Teneur en liant hydrocarboné : la teneur en liant hydrocarboné à retenir pour le chantier est celle définie à partir d'une étude au laboratoire. Pour chaque teneur en filler, l'étude doit porter sur au moins 3 teneurs en liants différents. La teneur en liant est déterminée, en pourcentage des poids des agrégats, par la formule :

$$T = K \sqrt[5]{\Sigma} \cdot a$$

où  $\Sigma$  représente la surface spécifique conventionnelle que l'on détermine par la formule suivante :

$$\Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 F \quad (m^2/Kg)$$

avec les proportions pondérales :

- G : des éléments supérieurs à 6mm
- S : des éléments compris entre 6 et 0,315mm
- s : des éléments compris entre 0,315 et 0,080mm
- F : des éléments inférieurs à 0,080mm (80 microns).

a = est un coefficient de correction destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats. Si cette masse volumique est égale à 2,65g/cm<sup>3</sup> alors a = 1, dans le cas contraire a devient égal à :  $a = \frac{2,65}{\text{masse volumique}}$ .

K = module de richesse

L'importance dépasse celle de la teneur en liant ; car c'est la richesse en liant qui commande la souplesse du revêtement ; sa faculté d'adaptation et d'autoréparation, de même que sa rigidité et son indéformabilité.

.../...

En effet, un module de richesse choisi trop faible peut donner un revêtement cassant et friable ; généralement non imperméable, par contre un module de richesse trop élevé donne un revêtement très souple, adaptable, autoréparable mais déformable et manquant de stabilité sous le trafic.

- pour un béton bitumineux : K prend les valeurs suivantes :  
3,45 ; 3,60 ; 3,75 ; 3,90.

- pour une grave-bitume : K prend les valeurs suivantes :  
pour une couche de fondation :  $K = 1,5 \div 2,2$   
pour une couche de base :  $K = 2,0 \div 2,5$

K peut être égal à 2,8 si le granulat est rugueux ou poreux.

- Nomenclature des essais relatifs à l'étude au laboratoire du béton bitumineux :

L'étude au laboratoire doit comprendre :

- .- la compacité LCPC
- .- la compacité Marshall
- .- la résistance à la compression à 18°C
- .- le rapport immersion/compression.

- Performances à obtenir et choix des formules (tableau récapitulatif) :

	COUCHE DE LIAISON	COUCHE DE ROULEMENT
Essai immersion/Compression		
-Compacité LCPC en %		
. minimale	90	91
. maximale	94	95
Résistance à la compression (Kg/cm <sup>2</sup> )		
. avec bitume 80/100	50	50
. avec bitume 60/70	60	60
. avec bitume 40/50	70	70
Rapport immersion/compression	0,75	0,75
Compacité Marshall(%)		
. maximale	95	96

L'existence d'une fourchette (avec minimum et maximum) pour la compacité "LCPC" et d'un plafond pour la compacité Marshall est justifiée par les considérations suivantes :

- pour de nombreuses raisons (résistance à la traction, module, résistance à la fatigue, imperméabilité, résistance à l'action gel etc...), il est nécessaire pour les bétons bitumineux, d'avoir une compacité suffisamment élevée.

- le trafic, surtout le trafic poids lourds, apporte un supplément de compactage dont d'ailleurs la valeur est mal connue ; en particulier pour les bétons bitumineux exposés dans ce chapitre.

- il importe, enfin que la compacité absolue en place de l'enrobé ne risque pas de dépasser 97% sous peine d'apparition de phénomènes d'instabilité.

- pour ces bétons bitumineux, la compacité obtenue sur chantier est normalement supérieure à la compacité "LCPC" s'approche parfois de la compacité Marshall. La compacité "LCPC" donne une approximation normalement par défaut de la compacité qui sera obtenue sur chantier.

- Nomenclature des essais relatifs au laboratoire

de la grave-bitume :

L'étude devra comprendre, au minimum, des essais d'immersion compression (dits essais Duriez "Dilatés") à 18°C et 50°C.

Actuellement seuls :

- la compacité LCPC (balance hydrostatique)
- la résistance à la compression à 18°C
- le rapport immersion-compression

sont utilisés pour fixer les performances à obtenir.

- Performances à obtenir et choix des formules

(Tableau récapitulatif) :

Pour grave-bitume 0/20 et 0/31,5 doivent normalement présenter dans l'étude de laboratoire les performances suivantes :

	COUCHE DE BASE		COUCHE DE FONDATION
Essai d'immersion-compression à 18°C Compacité LCPC en % Minimale Maximale	88		85
	96		96
Résistance à la compression (en bars)	Avec Ind. de concassage	Avec Ind. de concassage	
	85	85	
	avec bitume 60/70 avec bitume 40/50	50 60	40 50 30 40
Rapport immersion/compression	0,65		0,65

La composition granulométrique, la teneur en filler et la teneur en liant seront celles qui permettront le mieux de satisfaire aux conditions données par le tableau ci-dessus;

En cas d'hésitation on s'appuiera, pour le choix définitif, sur la considération suivante :

- pour obtenir simultanément la résistance à la fatigue et la résistance à l'orniérage ; il convient que la compacité, absolument nécessaire soit obtenue par une composition granulométrique adaptée (fort pourcentage de granulats avec une faible teneur en vide et en bitume).

#### 1.4. FATIGUE DES ENROBES BITUMINEUX

Les structures de chaussées routières sont soumises à un grand nombre de cycles de chargement ; ces dernières n'atteignent pas la charge qui provoquerait la rupture de la structure en une seule application, mais c'est leur répétition qui risque de provoquer la rupture, par le phénomène de fatigue.

Une seule couche de chaussée en enrobé bitumineux est soumise à des sollicitations de flexion provenant du passage des charges roulantes. Cette couche se comporte comme un matériau rigide tel qu'une poutre reposant sur deux appuis soumise à des effets de flexions. Cette flexion conduit à l'apparition de contraintes et de déformations en traction à la base de la couche.

Les enrobés bitumineux doivent donc résister à des sollicitations de fatigue en flexion.

L'influence des paramètres tel que le pourcentage de vide, la teneur en filler et la teneur en liant jouent un grand rôle dans le phénomène de fatigue vu que c'est à partir d'un type de formulation à un autre qu'on peut avoir la meilleure résistance c'est ce que nous verrons dans l'étude expérimentale.

Le caractère viscoélastique des matériaux hydrocarbonés a pour effet d'introduire entre la contrainte appliquée et l'allongement correspondant, un retard qui pour une sollicitation sinusoïdale peut être exprimé sous forme d'un angle de déphasage.

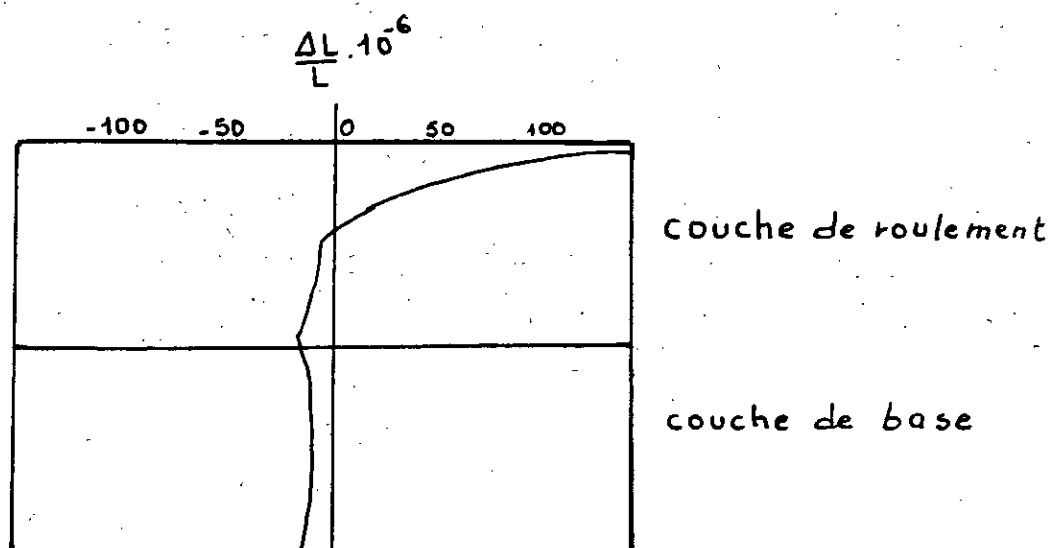
.../...

### 1.4.1. COMPORTEMENT EN FATIGUE,

Le passage des véhicules sur la route provoque des sollicitations répétées dans divers couches de la structures de la chaussée. La fatigue est un phénomène qui consiste en la rupture du matériaux (dû à un grand nombre de sollicitations répétées). Les enrobés Bitumineux constituant le corps de la chaussée doivent résister aux divers efforts répétés engendrés par le trafic.

On distingue pour cela deux effets provoqués par les charges roulantes :

- Effet superficiel : ces effets entraînent des efforts de cisaillement localisés au niveau de l'aire de contact pneumatique et chaussée (voir Figure 1).
- Cisaillement radial : ce cas représente l'effet dû à la rigidité du pneumatique, il est du même ordre de grandeur que la pression du gonflage au bord de l'empreinte. Ce chargement existe même pour un véhicule au repos.
- Cisaillement uniaxial : ce cas représente les effets dus aux efforts horizontaux engendrés par un véhicule en mouvement (accélération, freinage, virages).

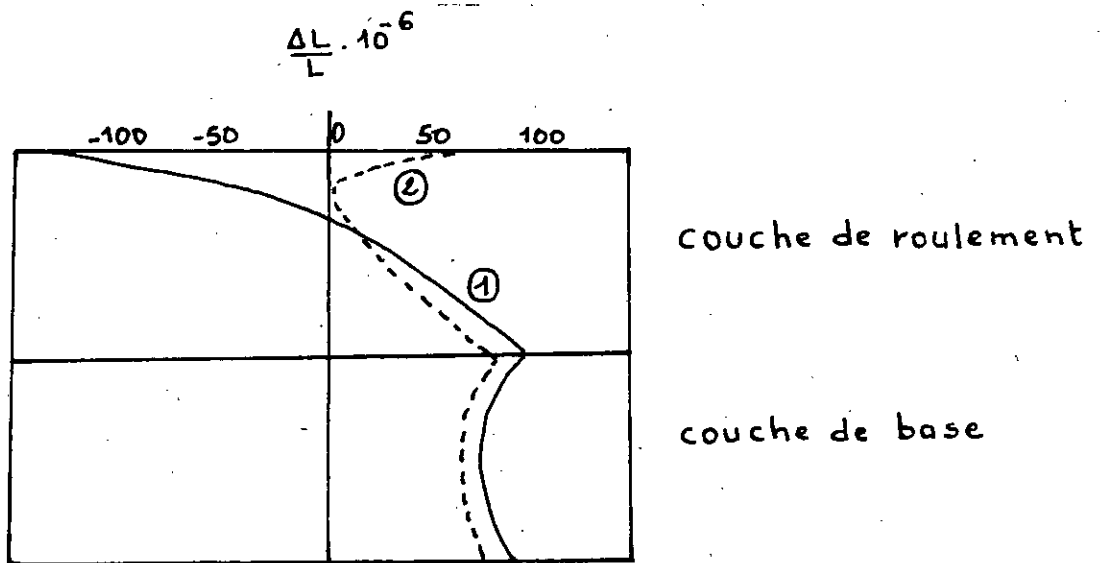


- Répartition des contraintes tangentielles (Fig.1)



- Les contraintes tangentielles sont très grandes au niveau supérieur de la chaussée. Ces dernières sont dues à l'accélération et au freinage des véhicules qui engendrent des efforts de cisaillement horizontaux. Ces contraintes tangentielles s'atténuent rapidement en profondeur et le moyen de les combattre réside dans une formulation adéquate des matériaux de la couche de roulement.

- Effet en profondeur : En règle générale, on s'intéresse particulièrement aux contraintes qui sont à l'origine des dégradations des chaussées, c'est à dire les contraintes verticales ou contraintes de traction à la base des couches. En effet, la rupture se produit soit par l'effet d'une traction excessive soit par compression verticale excessive qui provoque d'importants tassements dans le sol, provoquant une rupture de la couche de surface ou de base.



- Répartition des contraintes verticales

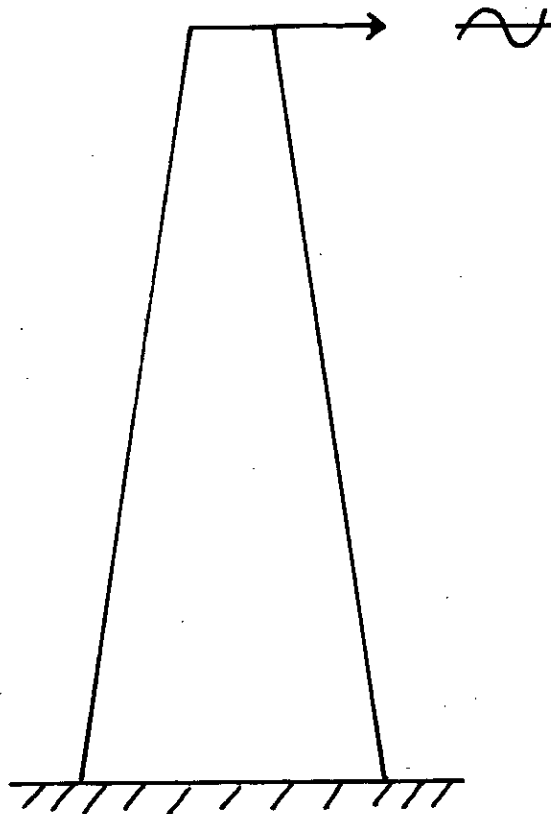
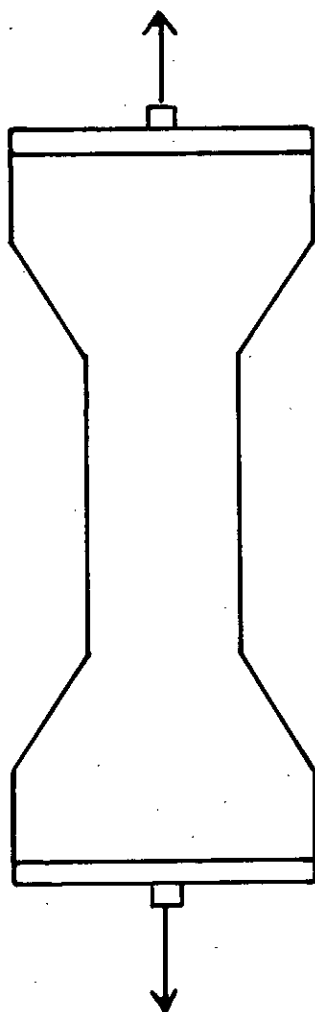
Sous un chargement, les contraintes verticales sont en compression à la surface et en traction en profondeur.

#### 1.4.2. LES ESSAIS DE FATIGUE SUR ENROBES BITUMINEUX.

On sait maintenant que dans la chaussée, les enrobés subissent des contraintes et des déformations complexes et aléatoires et qu'il est impossible de reconstituer en laboratoire les conditions de travail réelles des matériaux ; presque tous les essais en laboratoires sont conçus à partir de l'hypothèse de rupture par fatigue par des allongements horizontaux, avec des méthodes d'essais et des formes d'éprouvette diverses.

Nous représentons ici deux types d'essais :

- essais en flexion (flexion de poutre, de console)
- essais en traction/compression.



### 1.4.3. CARACTERISTIQUES MÉCANIQUES.

Les enrobés bitumineux sont des matériaux viscoélastiques dont la caractéristique la plus connue pour définir le comportement rhéologique est le module complexe; si on imposait par exemple une contrainte sinusoïdale de la forme  $\sigma = \sigma_m e^{i\omega t}$  avec  $\omega = 2\pi F$

$\sigma$  = amplitude de la contrainte

$\sigma$  = contrainte représentée en nombres complexes.

Il en résulterait une déformation sinusoïdale complexe :

$$\epsilon = \epsilon_m e^{i(\omega t - \theta)}$$

Le bitume ayant un caractère visqueux, cette déformation est déphasée d'un angle  $\theta$  par rapport à la contrainte appliquée.

Par analogie avec le module de Young =  $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$ , on définit le module complexe :

$$E_{i\omega}^* = \frac{\sigma^*}{\epsilon^*} = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} e^{i\theta} \quad (1).$$

Le module du module complexe est donc le module de rigidité  $E = \frac{\sigma_m}{\epsilon_m}$ ;

L'expression (1) peut s'écrire :  $E_{i\omega} = E_1 + iE_2$  avec :

$E_1$  : partie réelle du module en phase avec la contrainte et représente la partie récupérable et l'énergie emmagasinée.

$E_2$  : partie imaginaire représentant l'énergie perdue par frottement interne.

$\theta$  : angle de déphasage entre la contrainte et la déformation.  
La valeur de  $\theta$  donne une idée de la prédominance élastique ou visqueux du matériau.

.../...

Pour un matériau élastique  $\varnothing = 0$  le module est un nombre réel (module de Young).

La détermination des composants du module complexe à partir des résultats dont nous disposons nécessite la résolution théorique de l'équation du mouvement d'une poutre viscoélastique à profil trapézoïdal soumise à des vibrations forcées.

L'analyse approfondie de ce problème a été fait par HUET ; n'entrant pas dans les détails d'une telle étude, nous nous contenterons de mentionner ici les relations qu'elle permet d'établir :

$$E(i\omega) = \frac{\gamma F_0}{Z_0} e^{i\varnothing} + \mu M \omega^2$$

$$E_1(\omega) = \frac{\gamma F_0 \cos \varnothing}{Z_0} + \mu M \omega^2$$

$$E_2(\omega) = \frac{\gamma F_0}{Z_0} \sin \varnothing$$

- $F_0$  : Amplitude de la force appliquée
- $Z_0$  : Amplitude de la flèche correspondante
- $\varnothing$  : Angle de déphasage
- $\mu M$  : Masse équivalente de l'éprouvette  $u = 0,185$
- $\gamma$  : Facteur qui dépend des dimensions de l'éprouvette.

Pour une éprouvette trapézoïdale :

$$\gamma = \frac{12L^3}{b(h_0 - h)^3} H(a).$$

$L, h_0, h$  : hauteurs, grandes et petites base de l'éprouvette.

$$H(a) = \left(2 - \frac{h_1}{h_0}\right) \frac{h_1}{h_0} = \text{Log} \frac{h_1}{h_0} - \frac{3}{2}, \quad a \cong \frac{h_1}{h_0} \cong 0,40$$

La valeur du module absolue  $E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$

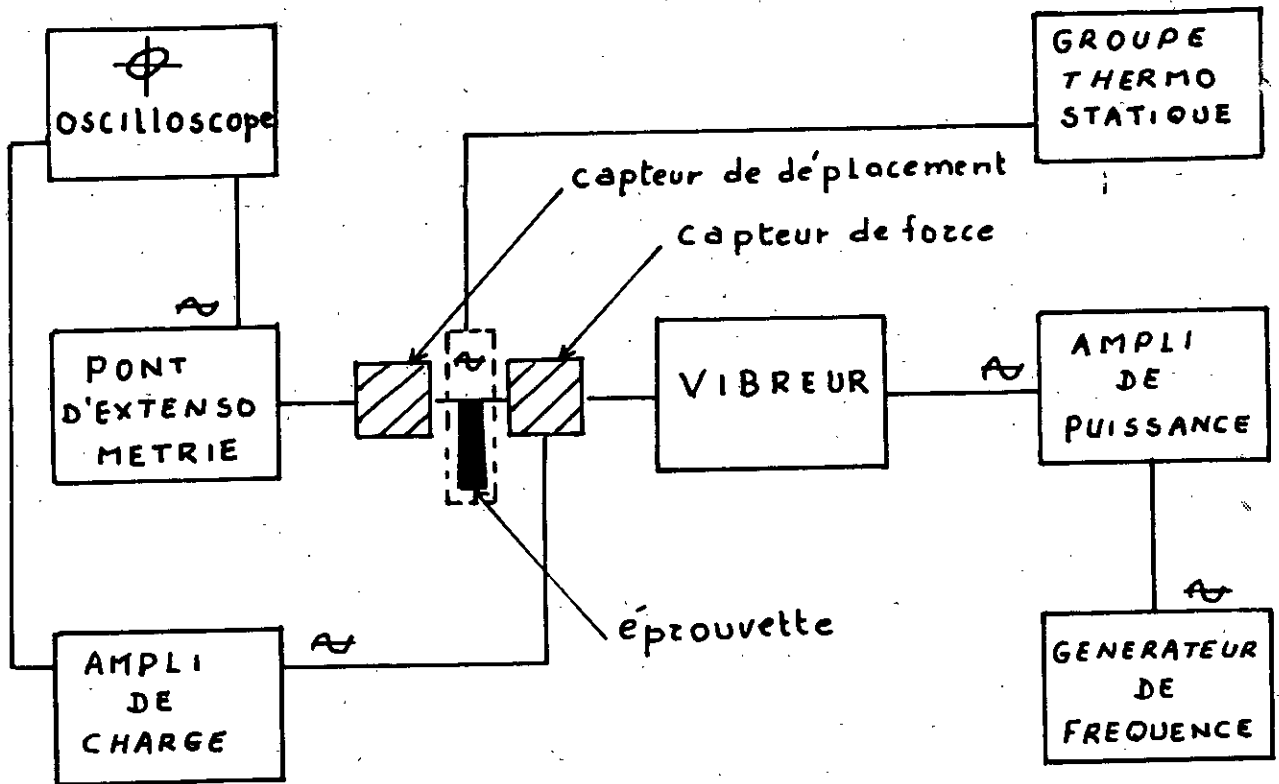
La valeur de l'angle de déphasage  $\varnothing = \text{Artg} \frac{E_2}{E_1}$

.../...

$$E = \gamma \left[ \left( \frac{F_0}{Z_0} \cos \varphi + \mu M \omega^2 \right)^2 + \left( \frac{F_0}{Z_0} \sin \varphi \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\varphi = \text{Arctg.} \frac{F_0 \sin \varphi}{F_0 \cos \varphi + \mu M Z_0 \omega^2}$$

- Appareillage : L'appareil de mesure pour ces essais est une chaîne de mesure du module complexe représentée ci-dessous :



L'existence d'une section préférentielle de rupture éloignée des encastremements, dans le cas d'une éprouvette console à profil trapézoïdal permet d'atteindre le stade de la rupture.

Ce module de fatigue a l'avantage de permettre une conclusion liée au comportement des enrobés ayant les mêmes conditions de températures et de fréquence.

Dans le cas de cette structure à profil trapézoïdal, la plus grande contrainte appliquée dans une section d'abscisse ( $x$ ) dépend de la force  $F$  ; elle peut être par un simple calcul de la résistance des matériaux sous la forme :

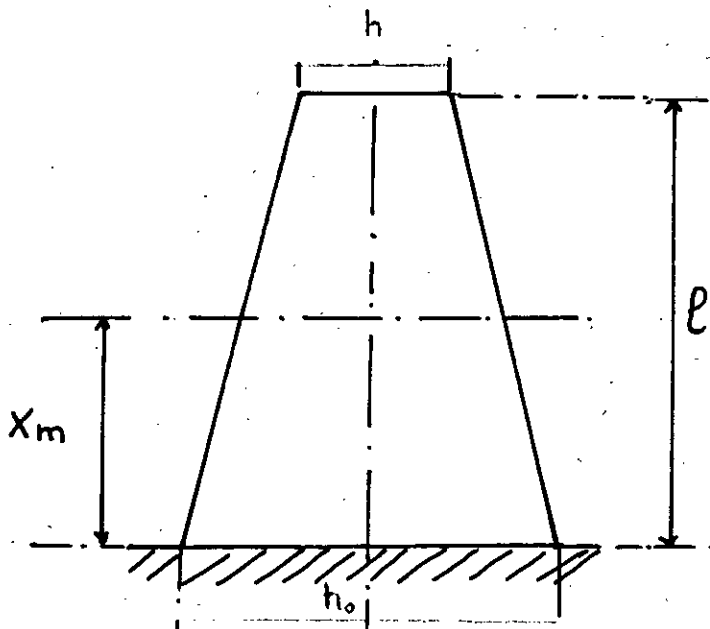
$$\sigma = \frac{6 \cdot F \cdot (1 - x)}{b \left( h_0 + \frac{h_1 - h_0}{l} x \right)^2}$$

Cette contrainte est maximale lorsque  $\frac{d\sigma}{dx} = 0$  ;

L'abscisse  $X_m$  du plan de rupture est  $X_m = l \left( \frac{h_1}{h_0 - h_1} \right)$ .

En prenant comme exemple une éprouvette de :

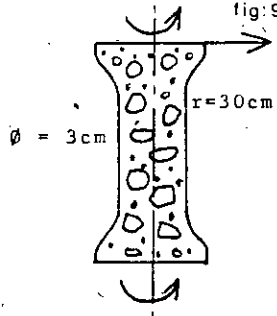
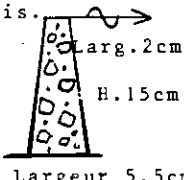
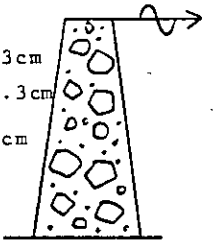
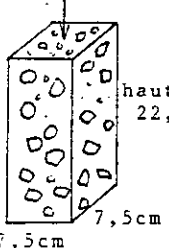
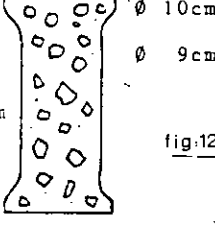
- $l = 25 \text{ cm}$
- $h_0 = 7,5$
- $h = 2,5$
- $b = 2,5$  d'épaisseur constante.
- donc  $X_m = 12,5$



Ci-dessous, tableau descriptif de quelques essais effectués dans des laboratoires étrangers.

..../...

T A B L E A U 11

<p>fig:9</p>  <p><math>\varnothing = 3\text{cm}</math> <math>r=30\text{cm}</math></p> <p>Eprouvette de longueur 10cm et de <math>\varnothing</math> 3cm</p>	<p>Flexion Rotative</p> <p>Flexion rotative à amplitude de contrainte constante de fréquence 1500 t/mn.</p> <p>Etude des paramètres fréquence et température</p> <p>Loi de fatigue</p> <p><math>\log \sigma = \log a - b \log N</math></p> <p><math>\log \epsilon_p = \log a' - b' \log N</math></p> <p>Critère de Déformation</p> <p>Utilisée également en torsion alternée à amplitude de déformation constante</p>	<p>L.N. Nijboer Shell Amsterdam 1954</p> <p>R.N.J. Saal P.S. Pell 1960 University of Nottingham</p> <p>P.S. Pell P.F. Mac Carthy R. Gardiner 1961</p> <p>Kennel C.F.R. France 1972</p>
<p>Structure pour couche de surface 2cm épais.</p>  <p>Larg. 2cm H. 15cm Largeur 5,5cm</p> <p>Les dimensions varient suivant les laboratoires</p>  <p>larg. 3cm épais. 3cm h. 50cm largeur 9cm</p> <p>Structure pour couche de base fig:10</p>	<p>Flexion de Console</p> <p>Force sinusoïdale d'amplitude constante de fréquence 50 Hz température <math>-10^\circ\text{C}</math> à <math>30^\circ\text{C}</math> fréquence 50 Hz contrainte 4 à 20 bars (déformation <math>10^{-5}</math> à <math>5.10^{-4}</math>)</p> <p>Loi de fatigue</p> <p><math>\log \sigma = \log a - b \log N</math></p> <p><math>\log \epsilon_p = \log a' - b' \log N</math></p> <p><math>\epsilon_p</math> amplitude en début de fatigue dans un essai à <math>\sigma</math> constante</p> <p>Fatigue Programmée</p> <p>Essais à amplitude de déformation constante à 30 Hz <math>10^{-4}</math> à <math>3.10^{-4}</math> t° <math>-10^\circ</math> à <math>20^\circ\text{C}</math></p> <p>Essai à amplitude de charge progressive de PROT</p> <p>loi <math>\log \epsilon = a - b \log N</math></p>	<p>Laboratoire de la Shell - France</p> <p>Lucas P. Bazin J. Saunier 1965</p> <p>Moreault Ugé 1970</p> <p>C.R.R. Bruxelles Belgique</p> <p>Verstraeten Cornil 1968</p> <p>L.C.P.C.</p> <p>Huet 1963 Doan 1967</p>
<p>Les ruptures à amplitude de charges progressives sont beaucoup moins dispersées.</p>		
<p>Eprouvette prismatique obtenue par sciage</p>  <p>hauteur 22,5cm 7,5cm</p> <p>fig:11</p>	<p>Traction-Compression alternée</p> <p>Force programmée contrôlée</p> <p>Fréquence de 0,001 à 30 Hz</p> <p>Température de <math>-10^\circ</math> à <math>30^\circ</math></p> <p>Loi de fatigue en <math>\sigma</math></p> <p>Gain en durée de vie lorsque les charges sont alternées avec des pauses de relaxation</p>	<p>K.D. Raithby 1970</p> <p>A.B. Sterling</p> <p>R.R.L. Grande Bretagne</p>
 <p><math>\varnothing</math> 10cm <math>\varnothing</math> 9cm 14cm</p> <p>fig:12</p> <p>éprouvette cylindrique obtenue par carottage et amincie à la meule</p>	<p>Sollicitations sinusoïdales contrainte ou déformation à amplitude contrôlée.</p> <p>Fréquence jusqu'à 50Hz</p> <p>Température <math>-10</math> à <math>30^\circ\text{C}</math></p> <p>Mise en évidence de l'influence du module de rigidité sur le comportement à déformation constante.</p>	<p>Valayer; Chomton</p> <p>Centre de Recherches Esso de Mont St-Aignan France 1968</p> <p>et plus récemment</p> <p>Kennel</p> <p>C.F.R. France</p>

#### 1.4.4. LOI DE FATIGUE.

La loi gouvernant le phénomène de fatigue par flexion alternée des mélanges hydrocarbonés peut s'écrire sous la forme :

$$N = K \left( \frac{1}{\epsilon} \right)^n$$

Cette loi est valable dans un domaine de charges comprises entre  $2.10^2$  et  $10^8$  cycles/secondes.

- N = nombres de cycles
- $\epsilon$  = déformation relative
- n = exposant dépendant de la teneur en bitume voisine de 6
- K = facteur global, fonction de tous les paramètres contrôlés ou non contrôlés.

#### 1.4.5. PRINCIPAUX PARAMETRES DE FORMULATION INFLUENCANT LE COMPORTEMENT.

- Pourcentage de vides : l'influence du pourcentage du vide sur le phénomène de fatigue est très complexe. Il présente un comportement différent d'un enrobé à un autre. En général, nous pouvons dire qu'une compacité élevée donc le pourcentage de vide faible conditionne non seulement le module de rigidité, mais aussi la résistance à la fatigue.

- Teneur en bitume : La teneur en bitume a un caractère important vis à vis du comportement à la fatigue et du module complexe. Pour "pell, Saunier, Verstraten" en augmentant légèrement la teneur en liant, on augmente la résistance à la fatigue. Cependant, une augmentation de la teneur en liant au delà d'une certaine valeur entraîne une chute du module et des durées de vies.



- Dureté du bitume : La dureté d'un bitume a un effet caractéristique sur la loi de comportement en fatigue. Un bitume mou perd son endurance aux faibles déformations en acquérant un plus grand allongement limité à la rupture. Un bitume dur présente un aspect inverse ; l'enrobé est moins susceptible aux conditions de température et du temps et une meilleure endurance aux faibles déformations. Les enrobés durs paraissent nettement plus intéressants au point de vue comportement à la fatigue.

- Teneur en filler : Le premier rôle du filler est le remplissage du squelette minéral conduisant à une augmentation de la compacité et par conséquent les valeurs du module de rigidité.

- Granularité : La forme et la texture superficielle des granulats pourraient avoir une influence sur le phénomène de fatigue.

Les granulats anguleux ayant une surface rugueuse sont souvent difficiles à compacter et amène un faible module de rigidité et à une plus courte durée de vie ; cela est dû au pourcentage élevé de vide que provoque le mauvais compactage.

- Nature minéralogique : Les silico-calcaires s'apprêtent mieux aux mélanges.

## 1.5. DEFORMATIONS PERMANENTES

### 1.5.1. IMPORTANCE DU PROBLEME.

En Algérie, on accorde une grande importance à ce problème. A cause des hautes températures, des fortes pentes et du trafic très lourd, on a constaté ces dernières années des déformations plastiques des enrobés des couches supérieures de la chaussée qui sont dues à des effets soit statiques (soit dynamiques, des charges verticales transmises par les roues des véhicules.

L'effet des véhicules lourds en mouvement peut donner lieu à la formation de tôle ondulée ou de ce qui est le plus fréquent, à la création d'ornières. L'orniérage entraîne principalement deux effets défavorables à l'écoulement du trafic. D'une part les ornières constituent des zones d'accumulation de l'eau de pluie (qui augmente l'infiltration d'eau dans le corps de chaussée) et d'autre part rendent la conduite dangereuse.

En outre, ce processus de dégradation lorsqu'il a commencé ne manque pas d'évoluer rapidement ; comme cette déformation affecte la circulation, elle exige qu'on remette en état le revêtement, ce qui signifie des investissements et on sait combien il est difficile de trouver des fonds pour des problèmes imprévus.

#### 1.5.2. FACTEURS EXTERIEURS.

Compte tenu de leur caractéristiques dues à la nature thermo-plastique du liant, le comportement des mélanges hydrocarbonés est influencé non seulement par les sollicitations extérieures due à la circulation mais aussi par les conditions d'environnement :

- circulation (charge par essieu, pression de gonflage, les débits de la circulation, le temps et le mode de chargement).
- condition d'environnement : (température, régime des pluies).

Les matériaux composés à base de liants hydrocarbonés sont des corps noirs qui absorbent facilement la chaleur extérieure.

1.5.3. RESISTANCE A LA DEFORMATION PERMANENTE

Comme dans le cas des autres ouvrages de Génie Civil, l'examen des dégradations constatées après la mise en service commence par l'analyse des contraintes et des déformations en tenant compte de sollicitations, des propriétés mécaniques des matériaux, des facteurs climatiques et de leurs variations en fonction du temps.

En ce qui concerne l'apparition des déformations permanentes des revêtements hydrocarbonés sous l'action des charges répétées, on doit prendre en considération les propriétés et caractéristiques des mélanges hydrocarbonés.

Pour ces caractéristiques, trois propriétés sont à examiner :

Rigidité : la rigidité d'un enrobé hydrocarboné est le rapport entre la contrainte et la déformation qui dépend de la température et de la vitesse de chargement. On exprime la rigidité soit sous la forme d'un module de rigidité :

$$S(E_1 T) = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

ou sous la forme d'un module complexe  $E^* = E_1 + E_2 = E e^{i\theta}$

Comme en fatigue la détermination du module de rigidité est fonction de la fréquence de sollicitation et de la température T ; pour cela il suffit de connaître l'indice de pénétration du bitume et la température du point de ramollissement bille et anneau ; afin de pouvoir déterminer à partir de l'abaque de "Van-der-Poel" une valeur du module du liant.

Résistance à la déformation permanente : la déformation permanente d'un enrobé hydrocarboné est le résultat de son compactage par le trafic et de la déformation plastique.

La loi qui résulte de cette déformation est :

$$\epsilon_p = C \cdot N^b$$

- où = N.....nombre de cycles de chargement
- b.....exposant empirique
- c.....constante
- $\epsilon_p$ .....déformation permanente.

Les valeurs C et b dépendent des conditions de chargements et de la composition de l'enrobé.

Il semble que le module de rigidité joue un rôle important; l'augmentation de la fréquence et par conséquent du module de rigidité a pour conséquence une diminution du taux d'accroissement de la déformation permanente.

#### 1.5.4. ESSAIS DE FLUAGE.

##### 1.5.4.1. Essais traditionnels :

- Essais Marshall : l'essai Marshall utilisé au L.T.P.C. qui est employé pour la formulation des enrobés hydrocarbonés du type béton-bitumineux. Dans cet essai que nous décrirons plus en détail dans la partie expérimentale, il s'agit de déterminer :
  - les caractéristiques à la "rupture" de l'essai
    - .- la stabilité MARSHALL qui doit être supérieure à une valeur minimale qui est souvent fonction de la sévérité du trafic ( 1000 Kg).
    - .- le fluage MARSHALL qui doit être compris dans une certaine fourchette.
  - les caractéristiques de compacité des éprouvettes : la teneur en vides dans le béton hydrocarboné compacté selon MARSHALL doit être compris dans une certaine fourchette. Ces critères sont très importants, vu que pour une certaine teneur en vide, minimale  $< 3\%$  , la stabilité n'est plus assurée.

- Essai DURIEZ (L.C.P.C.) : Très utilisé au L.T.P.C., il a pour but de déterminer pour un compactage donné, les résistances en compression simple et diamétrale.

Pour prévoir la résistance aux déformations plastiques, on utilise essentiellement la résistance à la compression à 30°C, la comparaison avec la température de 18°C donne une indication de sensibilité à la température du matériau.

#### 1.5.4.2. Essais nouveaux :

- Essais triaxiaux en chargement répété : Cet essai met en évidence, l'influence des divers paramètres de sollicitations: durée d'application de la charge, température, temps de repos, contrainte verticale, contrainte latérale constante ou sinusoïdale.

- Essais d'ornièrage : Dans le but de compléter les essais classiques de formulation des enrobés bitumineux, (essais Duriez et essai Marshall) les laboratoires se sont intéressés à la mise au point d'un essai plus ou moins comparable aux conditions réelles de sollicitations sur chaussées. "GRIMAUX" et "HIERMNAUX" tentent de montrer comment cet ornièrage peut contribuer à la connaissance des propriétés telles que :

- la nature du liant (dureté, susceptibilité),
- l'angularité des granulats,
- dosage en mortier et rapport  $\frac{\text{fines}}{\text{bitumes}}$

#### 1.5.5. PRINCIPAUX PARAMETRES INFLUENCANT LA DEFORMATION.

##### - Teneur en liant :

On augmente la résistance à la déformation plastique en diminuant le pourcentage de liant.

Diminuer trop la teneur en liant conduirait à une durée de vie insuffisante par fatigue, pour cela on doit donc s'assurer qu'il n'y ait pas de compromis entre la durée de vie et la déformation permanente et ceci en tenant compte des autres caractéristiques de la formule.

##### - Teneur filler-bitume :

Le mélange filler-bitume tend à la rendre plus rigide à haute température.

##### - Teneur en vide :

La résistance aux déformations plastiques augmente lorsque la teneur en vides diminue.

Lorsque la teneur en vides d'un enrobé hydrocarboné atteint une valeur très faible (moins de 2%), le bitume remplit pratiquement une forte proportion de vide, ce qui fait diminuer la résistance à la déformation plastique.

- Granularité :

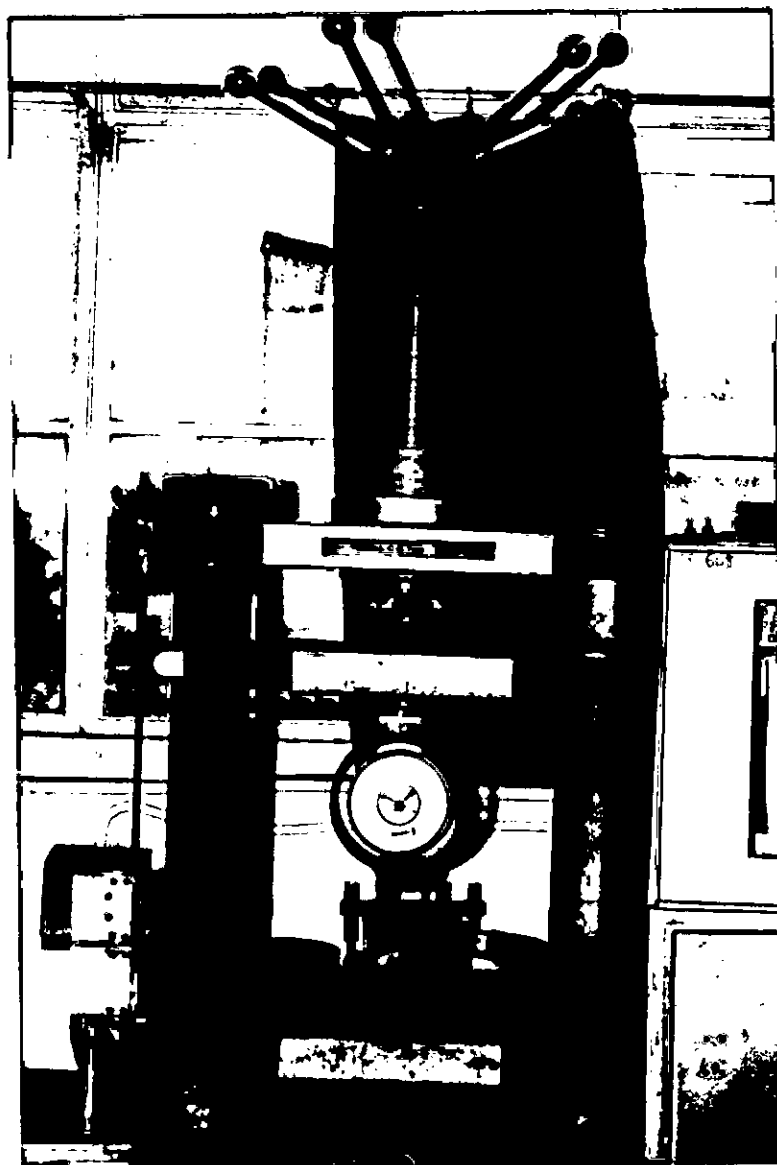
Une grande proportion de gravillons supérieurs à 2mm doit être suffisante au delà de 50% de pierres la résistance à la déformation augmente.

- Angularité :

Les gravillons doivent être constitués de matériaux concassés.

- Dureté du squelette minéral :

Le granulat pour sa part doit être suffisamment dur pour résister à la fragmentation qui modifie la granularité et son angularité et qui accélère l'apparition des teneurs en vides trop faibles.



Appareil de compression Marshall

## 2 EME PARTIE : ETUDE EXPERIMENTALE

## 2.1. ETUDE DE FORMULATIONS.

Les méthodes d'études de formulations des mélanges bitumineux se traduisent par des essais à effectuer, se rapportant à plusieurs caractéristiques du revêtement :

- la résistance aux déformations plastiques,
- la fissuration,
- sa compacité : liée à la composition granulométrique du squelette minéral, au procédé de compactage et à la forme des grains.
- sa stabilité : liée à la forme et à la nature des grains, du dosage en filler et en liant et à la nature de ce dernier. Elle dépend également de la température à laquelle s'effectue l'essai et de la vitesse avec laquelle est imposée la charge.
- son insensibilité à l'eau : qui dépend de deux facteurs principaux : l'adhésivité du liant aux granulats, la présence d'éléments argileux susceptibles de gonfler en présence d'eau.

Deux types d'essais normalisés sont pratiqués pour le choix de formules des mélanges bitumineux :

- l'essai DURIEZ,
- l'essai MARSHALL.

### 2.1.1. LA METHODE L.C.P.C. (ESSAI DURIEZ).

L'objet de l'essai DURIEZ ou essai compression-immersion est de caractériser des qualités de résistance mécanique (statique) et de résistance au désestrobage par l'eau des matériaux.

L'essai DURIEZ est appliqué essentiellement aux matériaux denses ou semi-denses dont les agrégats passent aux tamis de 20mm. Les éprouvettes cylindriques ( $\emptyset$  8mm) sont compactées préalablement sous pression de 120 bars maintenue pendant 5mn., l'écrasement de ces éprouvettes se fait à des température de 18°C.



Le même essai est fait sur la grave bitume qui représente l'essai "DURIEZ Dilaté" différent de l'essai "DURIEZ Normal" de par ses dimensions plus importantes des granulats donc qui nécessite des moules de  $\varnothing$  120 mm.

#### 2.1.1.1. Mesures effectuées :

- Densité apparente du matériau enrobé comprimé à  $120\text{Kg/cm}^2$ .
- Résistance à la compression à  $18^\circ\text{C}$  :
  - .- 8 jours après confection de l'éprouvette à sec.
  - .- 8 jours après confection de l'éprouvette et 7 jours d'immersion dans l'eau.
- Pourcentage d'affaissement :

Définition : 100 fois la diminution relative de la hauteur de l'éprouvette provoquée par la charge de l'écrasement.

  - .- le pourcentage d'affaissement est égal à  $100 \frac{H_i - H_f}{H_i}$
- Pourcentage d'imbibition :
  - .- après 1 heure sous vide et 2 heures dans l'eau.
  - .- après 2 jours d'immersion dans l'eau.
  - .- après 7 jours d'immersion dans l'eau.

Ce pourcentage se calcule à partir de la formule suivante :

$$100 \frac{P_h - P_o}{P_o}$$

- où  $P_o$  : poids de l'éprouvette avant immersion  
 $P_h$  : poids de l'éprouvette après immersion.

- Gonflement volumétrique après 2 jours.
- Gonflement volumétrique après 7 jours

Ce gonflement se calcule par la formule suivante :  $100 \frac{V_h - V_0}{V_0}$

où  $V_0$  : volume de l'éprouvette avant immersion  
 $V_h$  : volume de l'éprouvette après immersion.

- Compacité.
- Pourcentage des vides comblés par le bitume.

### 2.1.2. ESSAI MARSHALL.

L'essai MARSHALL est de beaucoup l'essai le plus employé pour la formulation des enrobés hydrocarbonés à granularité continue (du type béton bitumineux) ; c'est aussi l'essai principal de contrôle de fabrication sur chantier.

Dans cet essai les éprouvettes, préalablement compactées par damage, sont écrasées à 60°C en compression diamétrale à vitesse constante ( $V = 0,846\text{mm/s}$ ) ; l'éprouvette étant freinée par deux machoires.

La charge supportée par l'éprouvette au moment de la rupture est la stabilité Marshall ; la déformation verticale pour cette charge est le fluage Marshall.

Les critères utilisés le plus souvent pour assurer la résistance aux déformations plastiques sont les caractéristiques :

- à "la rupture" de l'essai :

- la stabilité Marshall, qui doit être supérieure à une valeur minimale qui est souvent fonction de la sévérité du trafic.

- le fluage Marshall, qui doit être compris dans une certaine fourchette.

On considère en outre comme critère le rapport stabilité sur fluage qui doit être supérieur à une valeur minimale, également en fonction du trafic.

- de compacité des éprouvettes :

La teneur en vides dans le béton hydrocarboné compacté selon "MARSHALL doit être comprise dans une certaine fourchette : dans certains pays s'ajoute un critère portant sur le pourcentage de vides dans le squelette minéral ; dans d'autres la proportion des vides du squelette minéral remplis par le bitume est limitée supérieurement.

Ces critères portant sur la teneur en vides sont justifiés par le fait que dans la plupart des pays on considère que dans un béton hydrocarboné, la stabilité n'est plus assurée lorsque les vides sont saturés par le bitume.

#### 2.1.2.1. Mesures effectuées :

- Densité apparente "da" de l'éprouvette. Epreuve où le bitume intervient Ph% et l'agrégat (100 -Pb)%.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$d_a = d_m \left(1 - \frac{P_b}{100}\right)$$

où  $d_m = \frac{100}{\frac{P_b}{D_b} + \frac{P_{a1}}{D_{a1}} + \frac{P_{a2}}{D_{a2}} + \frac{P_{a3}}{D_{a3}} + \dots}$  :  $d_m$  : densité vraie de l'éprouvette.

$D_b$  densité du bitume

$D_{a_i}$  densité de l'agrégat i.

$P_{a_i}$  pourcentage en poids de l'agrégat i.

$P_b$  pourcentage en poids du bitume.

- Stabilité Marshall qui correspond à la charge en Kg atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette.
- Déformation en 1/10mm (fluage)
- Compacité de l'éprouvette intéressante à connaître pour la comparer à celle de "DURIEZ".
- Pourcentage des vides comblés par le bitume qui est donné par la formule suivante :

$$R_b = 100 \frac{V_b}{V_a}$$

où  $V_b$  volume des vides occupé par le bitume  
 $V_a$  volume occupé par l'air et le bitume

### 2.1.3. APPLICATION.

Cette mesure comprend 3 formulations :

- une grave-bitume 0/20, au bitume de classe 40/50 destinée pour une couche de base ;
- un béton bitumineux 0/14 au bitume de classe 40/50 destiné pour une couche de roulement ;
- un béton bitumineux 0/14 au bitume 80/100 destiné aussi pour une couche de roulement.

Les résultats obtenus pour ces trois études sont les suivants :

2.1.3.1. Grave -bitume :

- Granulats 10/20
  - 5/10
  - 2/5
  - 0/2

- Liants : bitume dur de classe 40/50

L'étude comprend :

- l'identification des constituants (agrégats - bitume)
- l'essai d'immersion/compression dit "DURIEZ DILATE".

- Identification des constituants :

- Analyse granulométrique par voie humide :

- Fraction 10/20 :
  - passants au tamis 25 mm 100%
  - passants au tamis 20 mm 93,99%
  - passants au tamis 10 mm 9,85%

Ces valeurs peuvent caractériser un gravillon 10/20.

- Fraction 5/10 :
  - passants au tamis 12,5mm 100%
  - passants au tamis 10 mm 94,78%
  - passants au tamis 5 mm 8,73%

Ces valeurs peuvent caractériser un gravillon 5/10.

- Fraction 2/5 :
  - passants au tamis 6,3mm 100%
  - passants au tamis 5mm 93,82%
  - passants au tamis 2 mm 4,85%

Ces valeurs peuvent caractériser un sable 2/5.

- Fraction 0/2 :
  - passants au tamis 2mm 93,93%
  - passants au tamis 0,08mm 18,20% (teneur en fines)

Ces valeurs peuvent caractériser un sable 0/2.

.- Propreté :

L'estimation du degré de propreté du sable 0/2 a été faite à l'aide de l'essai de l'équivalent de sable (ES) et celui de l'indice de plasticité (IP).

- Equivalent de sable (ES) : L'équivalent de sable mesuré sur la fraction 0/2 a donné une valeur de 49,22%. Valeur correcte vis à vis de la directive "SETRA-LCPC" qui exige un "ES" supérieur à 35% pour un sable dont la teneur en fines est supérieure à 15%.

- Indice de plasticité (IP) : L'indice de plasticité (IP) mesuré sur la fraction 0,4mm du sable 0/2 a donné une valeur de 3,98. Valeur correcte vis à vis de la directive précitée qui exige un indice de plasticité (IP) non mesurable (inférieur à 6).

.- Dureté :

L'estimation du degré des gravillons a été faite à l'aide de l'essai "LOS ANGELES" et de l'essai "MICRO DEVAL HUMIDE" (M.D.H.).

- Los Angeles (L.A.) : La résistance des éléments à la fragmentation des éléments 10/20 et 5/10 mesurée par l'essai (L.A.) a donné une valeur moyenne de 17,88% (10/20 = 17,10% - 5/10 = 18,56%). Une valeur inférieure à 20% est exigée pour les aérodomes et les routes à trafic lourd et intense.

- Micro Deval Humide (M.D.H.) : La résistance des éléments à l'attrition des fractions 10/20 et 5/10 mesurée par l'essai (M.D.H.) a donné une valeur moyenne de 22,4 (10/20 = 21,2 - 5/10 = 23,6). Une valeur de 23 est exigée.

.- Aplatissement :

Le coefficient d'aplatissement des fractions 10/20 et 5/10 est respectivement de 11,67 et 17,79 (moyenne = 14,73). Valeur moyenne correcte dans la mesure où le pourcentage des éléments ne doit pas dépasser 20%.

.- Le liant :

Le liant utilisé est un bitume dur de la classe 40/50, ayant une pénétration de  $46^{1/10}$  mm et un point de ramollissement de  $56^{\circ}\text{C}$ .

Le pourcentage en liant a été calculé suivant la formule :

$$\% \text{ liant} = K \sqrt[5]{\Sigma} \cdot \alpha$$

où K = module de richesse (prenant les valeurs 2,15 - 2,30 - 2,45 - 2,60)

$\Sigma$  = surface spécifique exprimée en  $\text{m}^2/\text{Kg}$

$\alpha$  : = coefficient correcteur tenant compte de la masse volumique des granulats.

.- Reconstitution de mélange :

Le mélange granulométrique a été réalisé comme suit :

35% de 10/20

25% de 5/10

10% de 2/5

30% de 0/2

Il s'agit d'un mélange semi-grenu 0/20 dont le squelette granulométrique s'insère dans le fuseau de référence "SETRA-LCPC" préconisé pour couche de base.

Le mélange granulométrique obtenu a été testé en laboratoire pour quatre (04) teneurs en liant différent.

D'où quatre (04) formulations (A, B, C, D) ont été obtenues.

Les résultats obtenus à la suite des essais en laboratoire sont présentés en annexes et peuvent être commentés comme suit :

- les quatre formulations obtenues et testées ont donné dans l'ensemble de bons résultats soit en compacités ou en résistances à la compression.

Toutefois, la formulation "D" est à retenir vu les performances obtenues par celle-ci en :

- compacité
- résistance à la compression à sec et à  $18^{\circ}\text{C}$
- rapport d'immersion/compression.
- imbibition.

- Formulation "D" :
  - 35% de 10/20
  - 25% de 5/10
  - 10% de 2/5
  - 30% de 0/2
  
- 3,97% de bitume 40/50.

Performances obtenues par la formulation "D" :

DESIGNATION / ESSAI	PERFORMANCES EN LABORATOIRE	RECOMMANDATIONS " SETRA -LCPC "
-Compacité L.C.P.C. en %	92%	$88\% < C < 96\%$
-Résistance à la compression à sec à 18°C R en Kg/cm <sup>2</sup>	87,02 Kg/cm <sup>2</sup>	$R > 60 \text{ Kg/cm}^2$
-Rapport d'immersion/compression (7j.dans l'eau) à 18°C R'/R	0,68	$R'/R > 0,65$

Les détails approfondis sont regroupés dans l'annexe 1.

.../...



2.1.3.2. Béton bitumineux : au bitume 40/50 et 80/100 :

- Granulats 8/15

3/8

0/3

- Liants : bitume dur de classe 40/50

bitume moux de classe 80/100

L'étude comprend :

- l'identification des constituants (agrégats - bitume)
- l'essai d'immersion/compression dit "ESSAI DURIEZ NORMAL"
- l'essai MARSHALL (50 coups par face).

- Identification des constituants :

.- Analyse granulométrique par voie humide :

- Fraction 8/15 : - passants au tamis 16mm 100%
- passants au tamis 12,5mm 98,62%
- passants au tamis 10mm 67,47%
- passants au tamis 8mm 5,06%

Ces valeurs peuvent caractériser un gravillon 8/15.

- Fraction 3/8 : - passants au tamis 8mm 100%
- passants au tamis 6,3mm 99,70%
- passants au tamis 5mm 83,40%

Ces valeurs peuvent caractériser un gravillon 3/8.

- Fraction 0/3 : - passants au tamis 6,3mm 100%
- passants au tamis 5mm 98,50%
- passants au tamis 2mm 93,10%
- passants au tamis 0,400 mm 47,20%
- passants au tamis 0,080mm 24,50%

Ces valeurs peuvent caractériser un sable 0/3.

.../...

.- Liant :

Les bitumes utilisés sont le 80/100 et le 40/50 ayant respectivement 45°C et 56°C comme point de ramollissement et 95 1/10° mm et 46 1/10° mm de pénétration.

Le pourcentage en liant a été calculé suivant la formule suivante :

$$\% \text{ Liant} = K \sqrt[5]{\Sigma} \cdot \alpha$$

où

- K : Module de richesse (prenant les valeurs : 3,45, 3,60, 3,75, 3,90)
- $\Sigma$  : Surface spécifique exprimée en m<sup>2</sup>/Kg
- $\alpha$  : Coefficient correcteur tenant compte de la masse volumique des agrégats.

.- Reconstitution du mélange :

- Le mélange granulométrique a été réalisé comme suit :

- 40% de 8/15
- 35% de 3/8
- 25% de 0/3.

- Il s'agit d'un mélange semi-grenu 0/14 dont le squelette granulométrique s'insère dans le fuseau "SETRA-LCPC" préconisé pour une couche de roulement pour un béton-bitumineux.

- Le mélange granulométrique obtenu a été testé en laboratoire pour (04) quatre teneurs en liant différentes au bitume 40/50 et 80/100. d'où quatre (04) formulations (A,B,C,D) ont été obtenues pour deux bitumes différents c'est à dire huit (08) formulations.

- Les résultats obtenus à la suite des essais en laboratoire sont présentés en annexes et peuvent être commentés comme suit :

.- les quatre formulations obtenues avec un bitume 40/50 ont été testés au laboratoire et ont donné dans l'ensemble de bons résultats soit en compacités ou en résistance à la compression.

.../...

Toutefois, la formulation "C" est à retenir, vu les performances obtenues par celle-ci en :

- compacité
- résistance à la compression à sec et à 18°C
- rapport d'immersion/compression
- affaissement
- imbibition
- stabilité MARSHALL.

FORMULATION "C" :

- 40% de 8/15
- 35% de 3/8
- 25% de 0/3
- 6,23% de bitume 40/50.

Performances obtenues sur la formulation "C" :

DESIGNATION : ESSAIS	PERFORMANCES EN LABORATOIRE	DIRECTIVES "SETRA-LCPC"
-Compacité LCPC en %	97,08 %	91% < C < 95%
-Résistance à la compression à sec <sup>2</sup> et à 18°C : R en Kg/cm <sup>2</sup>	103,33 Kg/cm <sup>2</sup>	R > 70,00 Kg/cm <sup>2</sup>
-Rapport d'immersion/compression (7 jours dans l'eau) à 18°C R'/R	0,88	$\frac{R'}{R} > 0,75$
-Compacité MARSHALL	97,92%	96% maximale

Les détails plus approfondis sont portés dans l'annexe II.

.../...

.- les quatres formulations obtenues avec un bitume 80/100 ont été testées au laboratoire et ont donné dans l'ensemble de bons résultats, soit en compacité ou en résistances mécaniques.

Toutefois, la formulation "A" est à retenir vu les performances obtenues par celle-ci en :

- compacité
- résistance à la compression à sec à 18°C
- rapport d'immersion/compression
- affaissement
- imbibition
- stabilité MARSHALL.

FORMULATION "A" :

- 40% de 8/15
- 35% de 3/8
- 25% de 0/3
- % de bitume 80/100

Performances obtenues sur la formulation "A" :

DESIGNATION/ESSAIS	PERFORMANCES AU LABO- RATOIRE	DIRECTIVES "SETRA-LCPC"
- Compacité LCPC en %	97,51%	91% < C < 95%
- Résistance à la compression à sec et à 18°C en Kg/cm <sup>2</sup>	70,00 Kg/cm <sup>2</sup>	R > 70,00 Kg/cm <sup>2</sup>
- Rapport d'immersion compression (7 jours dans l'eau) à 18°C. R'/R	1,00	R'/R > 0,75
- Compacité MARSHALL	96,27 %	96% au max.

Les détails plus approfondis sont portés dans l'annexe II.

.../...

### 2.1.4. CALCUL DU MODULE ELASTIQUE EN FAIBLE DEFORMATION.

Les essais traditionnels tels que les essais DURIEZ et MARSHALL conservent leur utilité en raison de leur simplicité, leur rapidité d'exécution.

Parrallèlement aux préoccupations sur la stabilité, les besoins en matière de dimensionnement des chaussées ont fait ressentir, la nécessité d'un approfondissement des connaissances sur les propriétés mécaniques des enrobés. Pour cela, nous nous sommes proposés deux études aux laboratoires avec les moyens qui existe au LTPE, la relation contrainte-déformation en faible déformation.

La première étude aura comme but de déterminer le module dit élastique pour de faibles déformation de l'ordre de  $10^{-6}$  et cela par l'auscultation dynamique (essai non destructif).

La seconde se rapportera sur l'étude du module pour une grande plage de déformation.

L'auscultation dynamique est généralement utiliser pour le contrôle des ossatures en béton armé, pour prévoir la résistance à la compression du béton.

Dans notre cas, on pourra l'utiliser pour mesurer la vitesse de propagation d'une onde à travers un corps supposé élastique linéaire isotrope qui est déterminé par la théorie d'élasticité.

En écrivant les équations d'équilibres du corps, auxquelles est rajouté la loi de comportement :

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}$$

par hypothèse on a  $G = \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$  et  $\lambda = \frac{E\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}$

$\nu$  = coefficient de poisson

G = module de déformation transversale

E = module de déformation longitudinale

$\gamma$  = poids volumique

g = accélération de la pesanteur.

$$\rho = \frac{\gamma}{g}$$

.../...

La vitesse de propagation :

1- Onde transversale  $V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$

2- Onde longitudinale  $V_p = \sqrt{\frac{K}{\rho}}$

$$K = \lambda + 2\mu$$

$$\text{donc } \rho V_p^2 = \lambda + 2\mu = \frac{E \nu}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} + 2 \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$$\rho V_p^2 = \frac{E(1 - \nu)}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)} \Rightarrow E = \rho V_p^2 \cdot \frac{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}{(1 - \nu)}$$

En prenant  $\nu = 0,40 \div 0,45$  pour les enrobés hydrocarbonés

$$E = 0,263 \rho V_p^2$$

On peut aussi déterminer  $G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = E \cdot \frac{1}{2,9}$

#### 2.1.4.1. Description de l'appareillage :

- oscilloscope
- émetteur : qui émet les ultra-sons, excité par le courant électrique.
- récepteur piezoélectrique.
- l'oscilloscope comprend un écran qui nous renseigne sur les signaux des calibrages (échelle de temps, de distance, balayage vertical et horizontal)
- la fréquence est de 3 KHZ
- les vitesses de propagation dans les enrobés sont de l'ordre de 3000 m/s

2.1.4.2. Préparation des éprouvettes :

Les éprouvettes sont du type béton bitumineux de 90 mm de hauteur et de 80 mm de diamètre, étudiées sur 4 formulations différentes en bitume avec deux types de 40/50 et 80/100.

Les compositions sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 : Enrobé avec un bitume 40/50

	A	B	C	D
Gravillons 8/15	40	40	40	40
3/8	35	35	35	35
0/3	25	25	25	25
Teneur en bitume 40/50				
80/100	5,73	5,98	6,23	6,48

2.1.4.3. Résultats de l'essai :

D'après la figure 1, l'augmentation de la teneur en bitume ( 5,73 à 6,48) ou de la densité entraînent le module initial vers les grandes valeurs, mais il existe un maximum de module pour une teneur en bitume qu'il suffit de déterminer.

Les résultats sont donnés sous forme de tableaux et de tracés ainsi que les performances obtenues avec l'essai DURIEZ.

Tableau 1 : Béton bitumineux 40/50

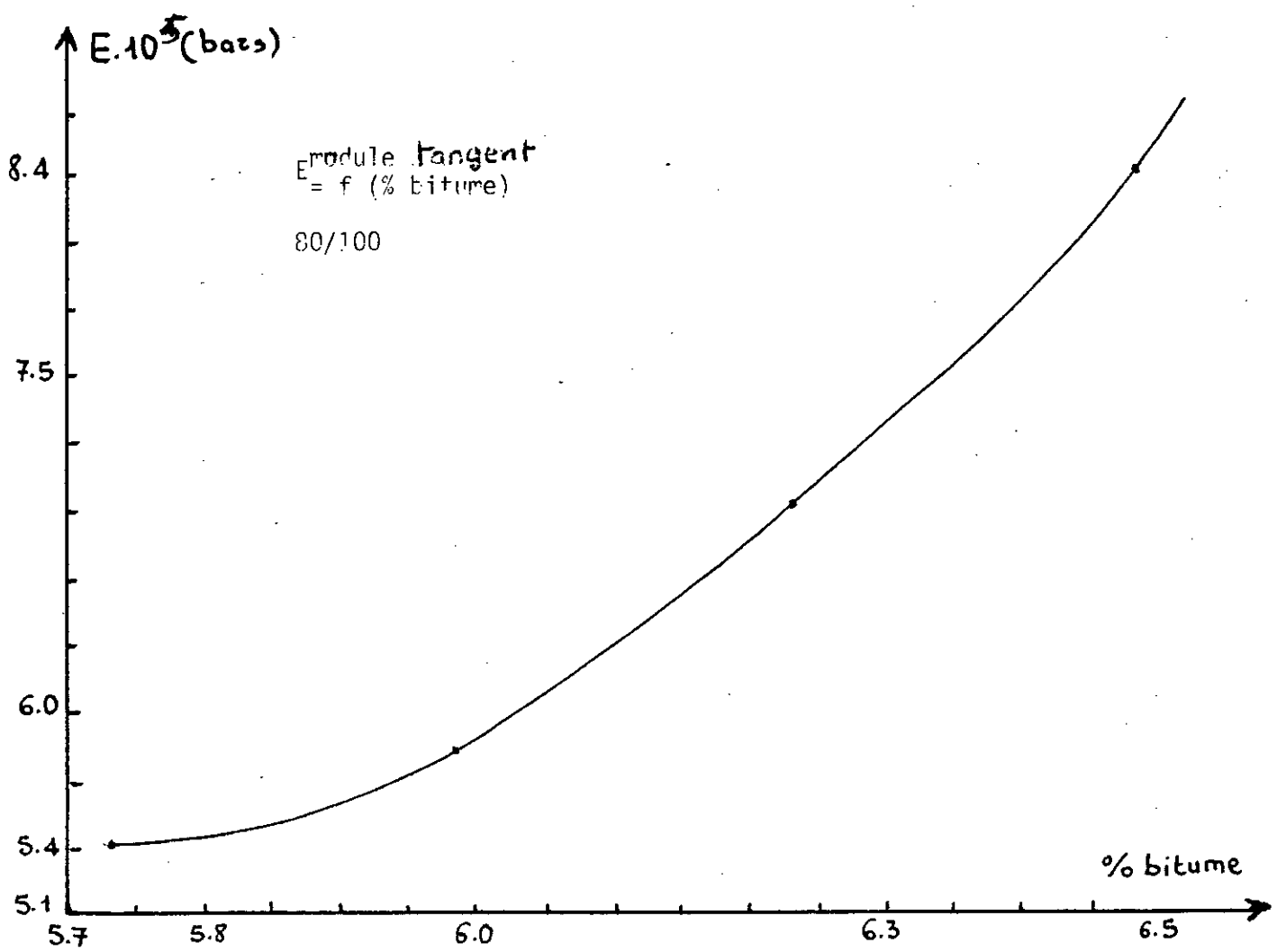
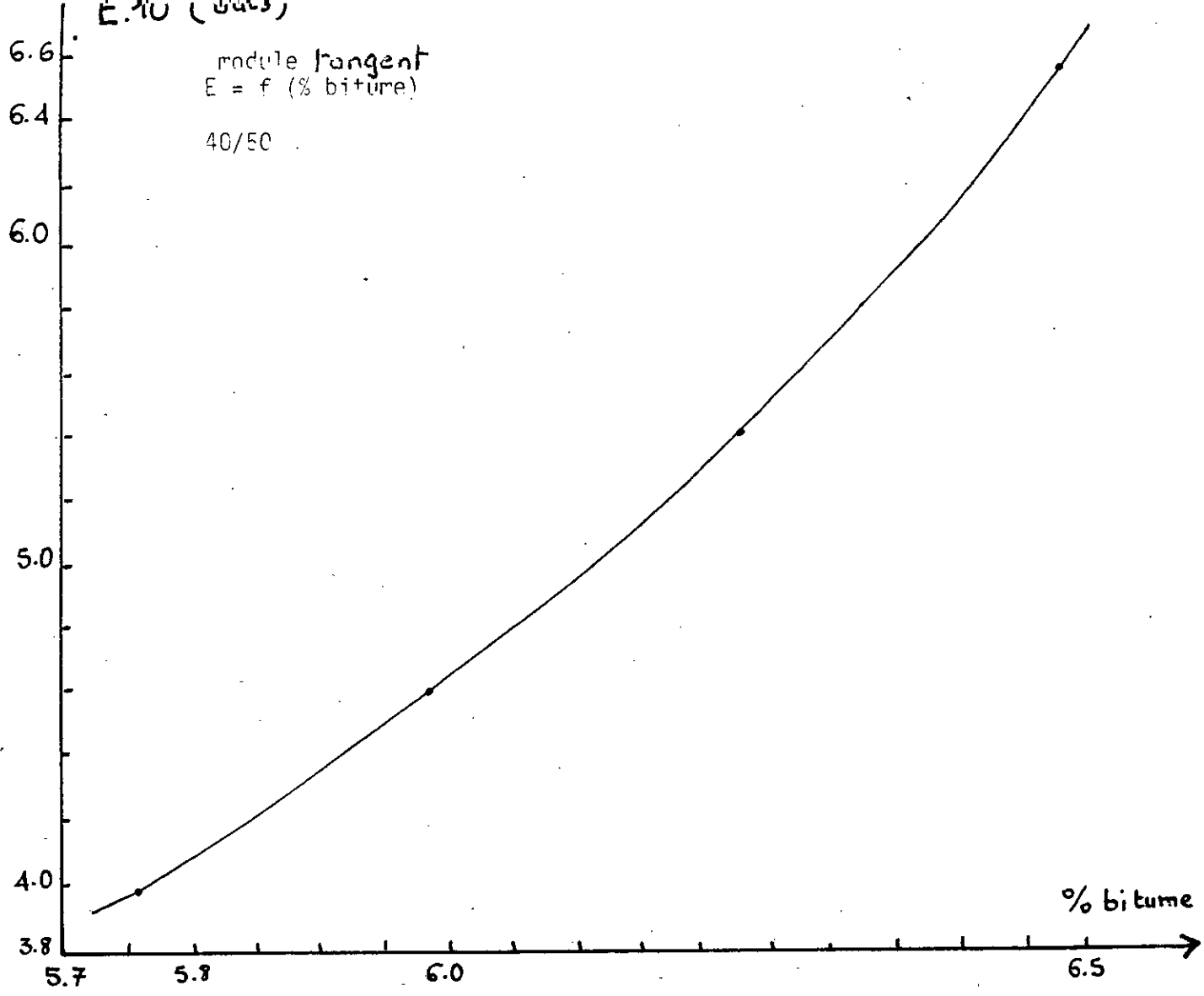
Compacité hydrostatique	96,68	97,08	97,08	97,49
Résistances Duriez à 18°C (bars)	85,33	82,33	103,3	88
Vitesse $10^6 \text{ m}^2/\text{S}^2$	6,63	7,76	8,96	10,85
Masse volumique $\text{Kg}/\text{m}^3$	2259	2279	2306	2308
Module E : $10^5 \text{ Kg}/\text{cm}^2$	3,94	4,6	5,43	6,5

Tableau 2 : Béton bitumineux 80/100

Compacité hydrostatique	97,51	97,92	97,92	98,33
Résistances DURIEZ à 18°C	70,00	44,00	67,67	67,50
Masse volumique	2310	2315	2325	2334
Module E : $10^5 \text{ Kg}/\text{cm}^2$	5,40	5,82	6,90	8,38
Vitesse $10^6 \text{ m}^2/\text{S}^2$	8,90	9,56	11,28	13,65

.../...

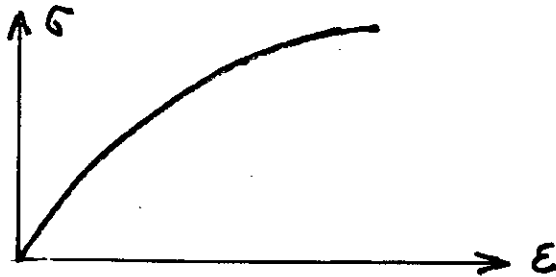




2.1.5. LOI DE COMPORTEMENT EN ESSAI DE COMPRESSION

Après avoir déterminé le module sur les essais non destructifs à l'auscultation dynamique pour des faibles déformation ( $10^{-6}$ ) sur un corps supposé élastique linéaire, nous avons défini un autre mode de sollicitation qu'il serait intéressant de faire passer en pratique tel que l'essai de compression sous presse triaxial.

Le but de cet essai est de trouver une loi de comportement, on adopte pour cela différentes vitesses de déformation contrôlés on se fixe les déformations comme on s'est fixé trois vitesses (250  $\mu$ /S, 80  $\mu$ /S, 20  $\mu$ /S). On effectue les essais sur une large plage de déformation ( $10^{-2}$  à  $10^{-4}$ ) pour déterminer la variation du module secant (contrainte-déformation)



Modelisation :

1- Loi hyperbolique/élastoplasticité (sol)

$$\sigma = \frac{E}{b + cE}$$

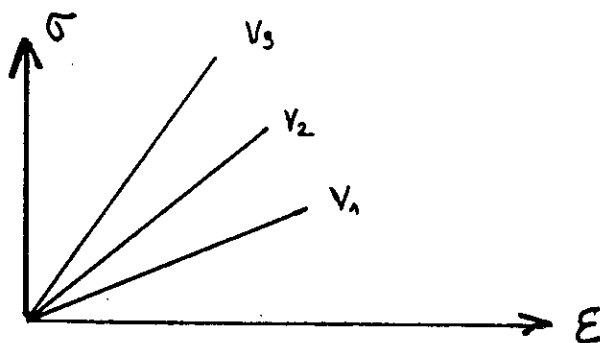
b, c : dépendant des caractéristiques du matériau

L'équation du comportement élasto-plastique qui en découle quand

$E \rightarrow E_r$  on a  $\sigma = \sigma_r$

$$\sigma = \frac{E E_i}{1 + E \frac{E_i}{\sigma_r}}$$

2- Comportement viscoélastique (béton bitumineux)



$$v_3 > v_2 > v_1$$

.../...

#### 2.1.5.1. Description de l'appareillage :

- Presse triaxial comportant :
- anneau dynamométrique  $K = 2,37$
  - comparateur pour les déplacements vertical et transversal.
  - comparateur pour les déplacements longitudinal
  - comparateur de mesure de force
  - socle.

#### 2.1.5.2. Préparation des éprouvettes :

Il s'agit de bétons bitumineux semi-grenu dont la formule granulométrique est la même que pour celle de l'auscultation dynamique (se rapporte au tableau défini dans la partie de l'auscultation). Cependant, les essais ont été exécutés à  $17^{\circ}\text{C}$  avec quatre vitesses de déformations différentes ( $250 \mu/\text{s}$ ,  $80 \mu/\text{s}$ ,  $20 \mu/\text{s}$ ) et de quatre teneurs en bitume (5,73, 5,98, 6,23, 6,48) de type 40/50 et 80/100.

#### 2.1.5.3. Présentation des résultats :

Afin de traduire le comportement rhéologique des enrobés, les résultats peuvent être présentés sous forme de tracés de la contrainte en fonction de la déformation.

- Effet de la vitesse de déformation : l'influence de ce paramètre a été étudié sur 3 variantes de formule ( $2,50 \mu/\text{mn}$ ,  $80 \mu/\text{mn}$ ,  $20 \mu/\text{mn}$ ).

A partir des courbes, on déduit que le module secant augmente avec la vitesse de déformation par le fait du caractère viscoélastique. Pour une même déformation, la contrainte est d'autant plus grande que la vitesse de déformation augmente (fig.1)

- Teneur en bitume : D'après la figure (2), on constate que la dépendance visco-élastique de l'enrobé contenant 6,48% de bitume est plus prononcée que celle de l'enrobé à 5,73% pour la même température pour une même contrainte ; pour une même vitesse de déformation, la déformation est plus grande pour une teneur de 6,48%.

- Effet du type de bitume : Deux variantes 40/50 et 80/100. La nature du bitume influe aussi sur le module, dans la gamme des vitesses de déformation différentes 250  $\mu$ /mn et 80  $\mu$ /mn. A même température et à une même granulométrie et la teneur en liant le module secant bitume 40/50 est plus grand que le module 80/100. (pour une même contrainte la déformation est plus grande pour le bitume 40/50). (fig.3, 4).

Les tableaux de mesure sont portés en Annexe 3.

#### 2.1.6. CONCLUSION GENERALE.

Les essais de compression a l'appareil triaxial ont montré un comportement linéaire pour une plage de déformation ( $10^{-2}$  à  $10^{-4}$ ) la linéarité de la relation contrainte-déformation est influencée par la vitesse, nous déduisons pour cela que le comportement est visco-linéaire.

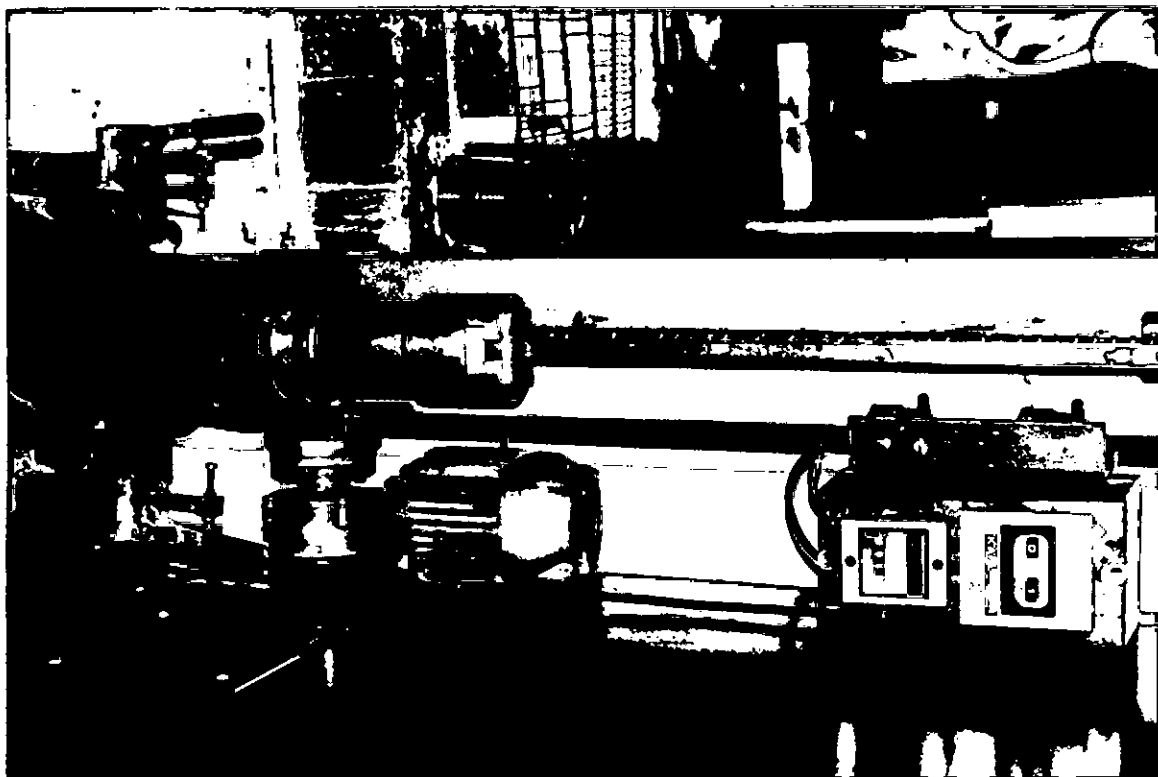
Le module E dépend du niveau de déformation, l'auscultation dynamique nous donne le module pour des faibles déformations de l'ordre de  $10^{-6}$ , l'essai DURIEZ la déformation est de l'ordre de  $10^{-2}$  et pour la presse triaxial, la déformation varie de  $10^{-2}$  à  $10^{-4}$  (grande déformation).

En comparant les différents essais, on peut dire que la résistance de déformation par compression à 18°C qui sont de l'ordre de 80 kg/cm<sup>2</sup> pour des vitesses de déformation rapide 1mm/s.

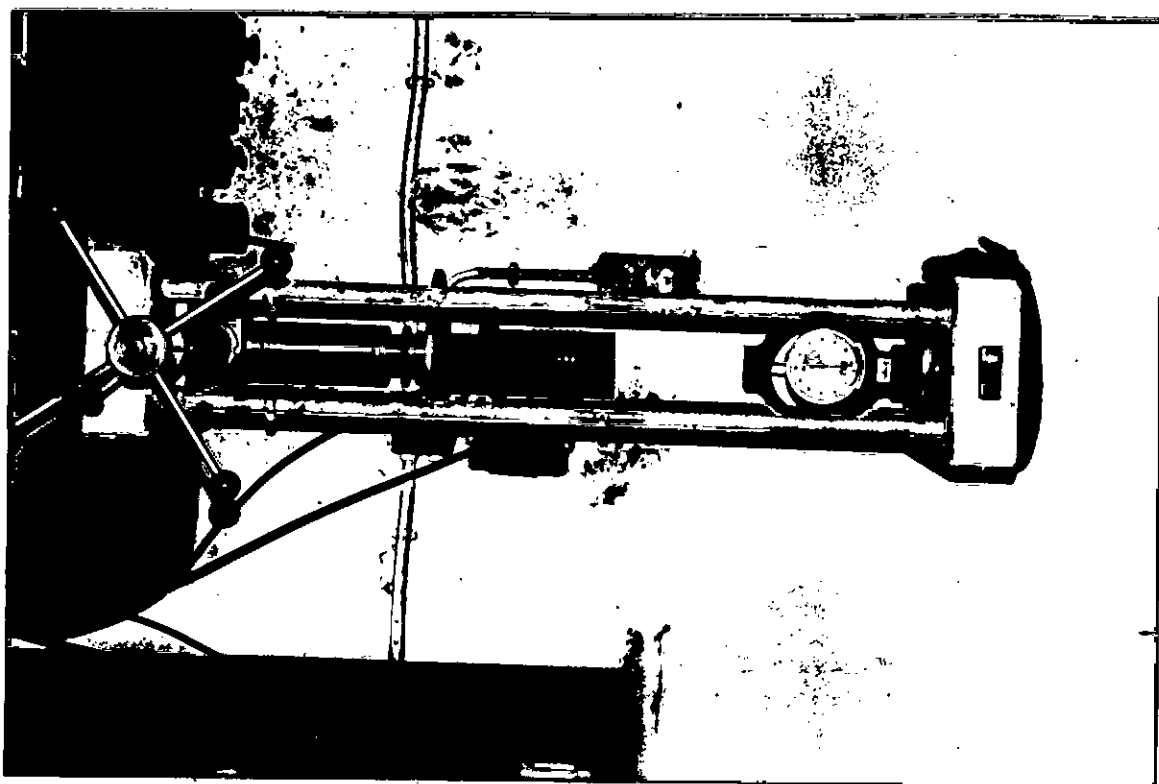
..../...

Les résistances à la déformation sont encore de l'ordre de  $40 \text{ Kg/cm}^2$  pour des vitesses de déformation  $1 \text{ u/mm}$ .

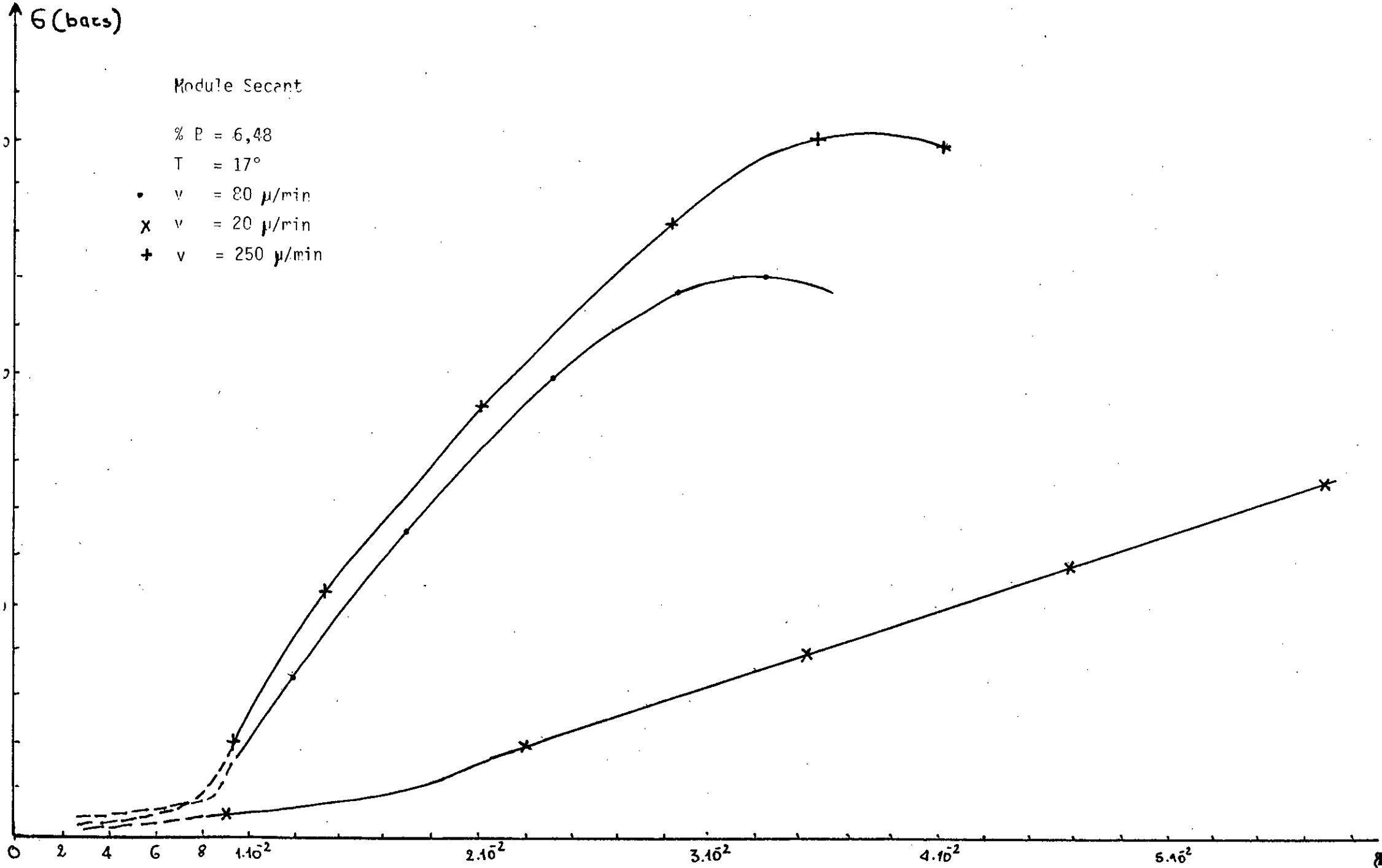
Les résistances vont en décroissant au fur et à mesure que la vitesse à la déformation par compression diminue.

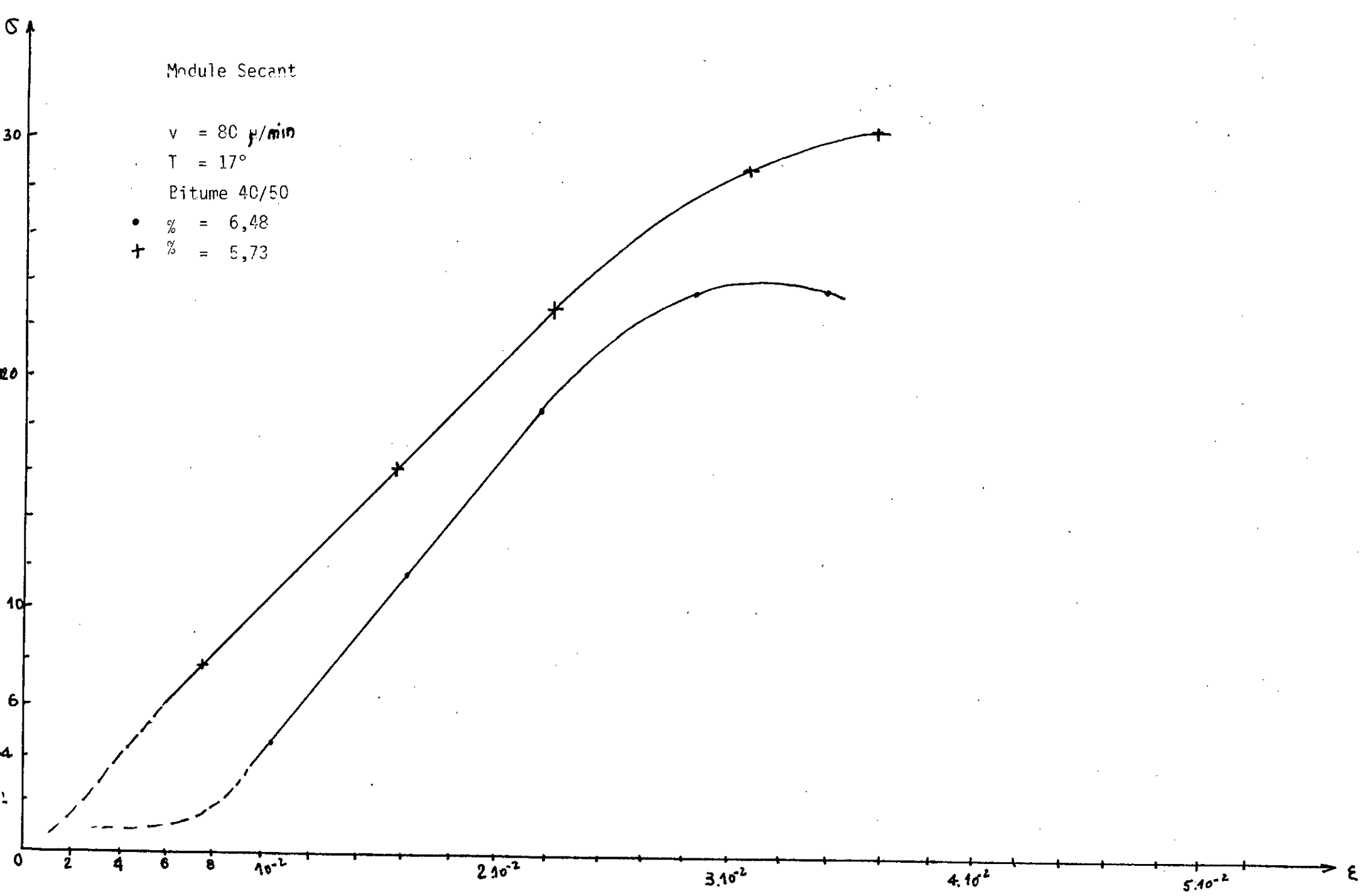


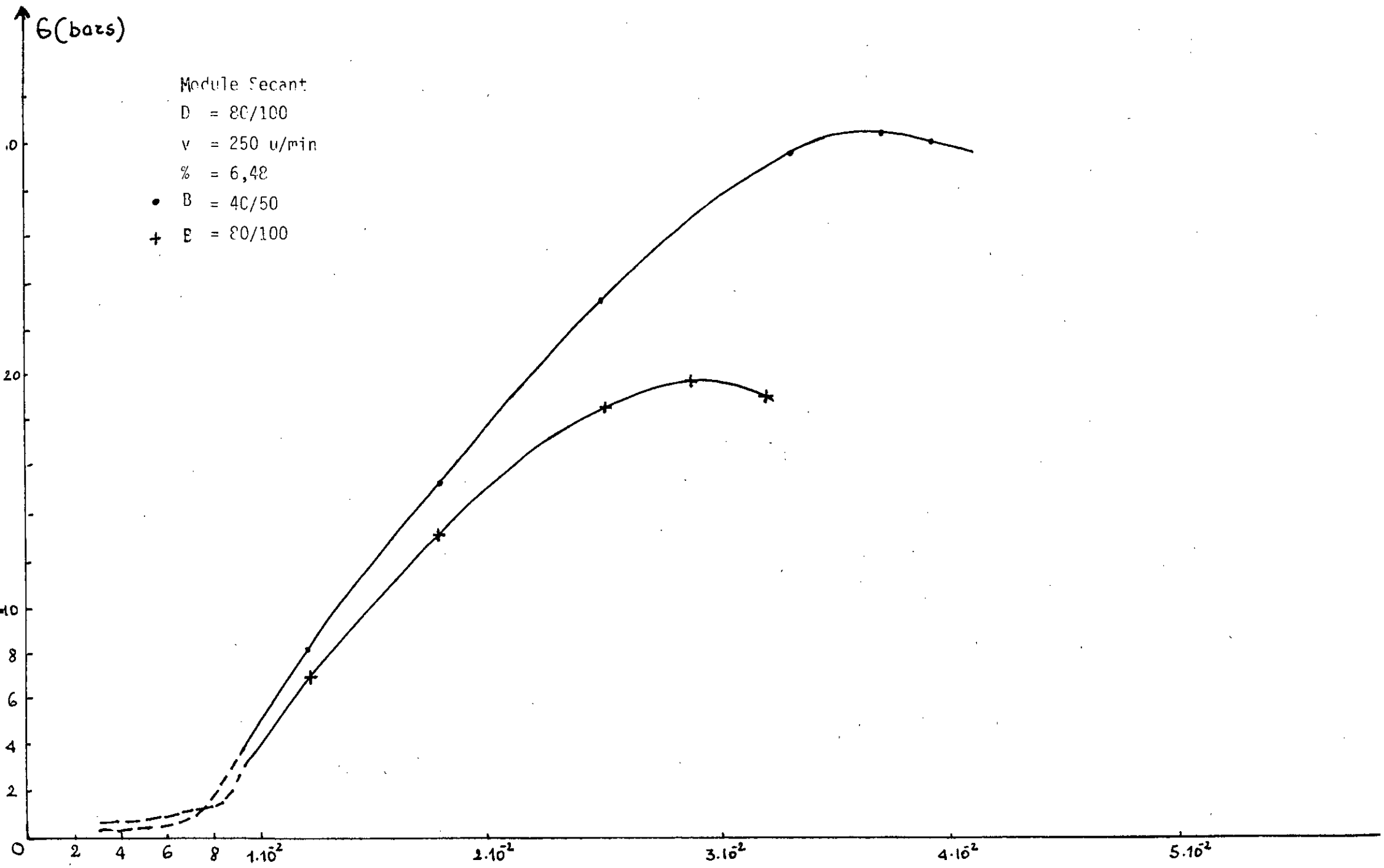
Compacteur Marshall



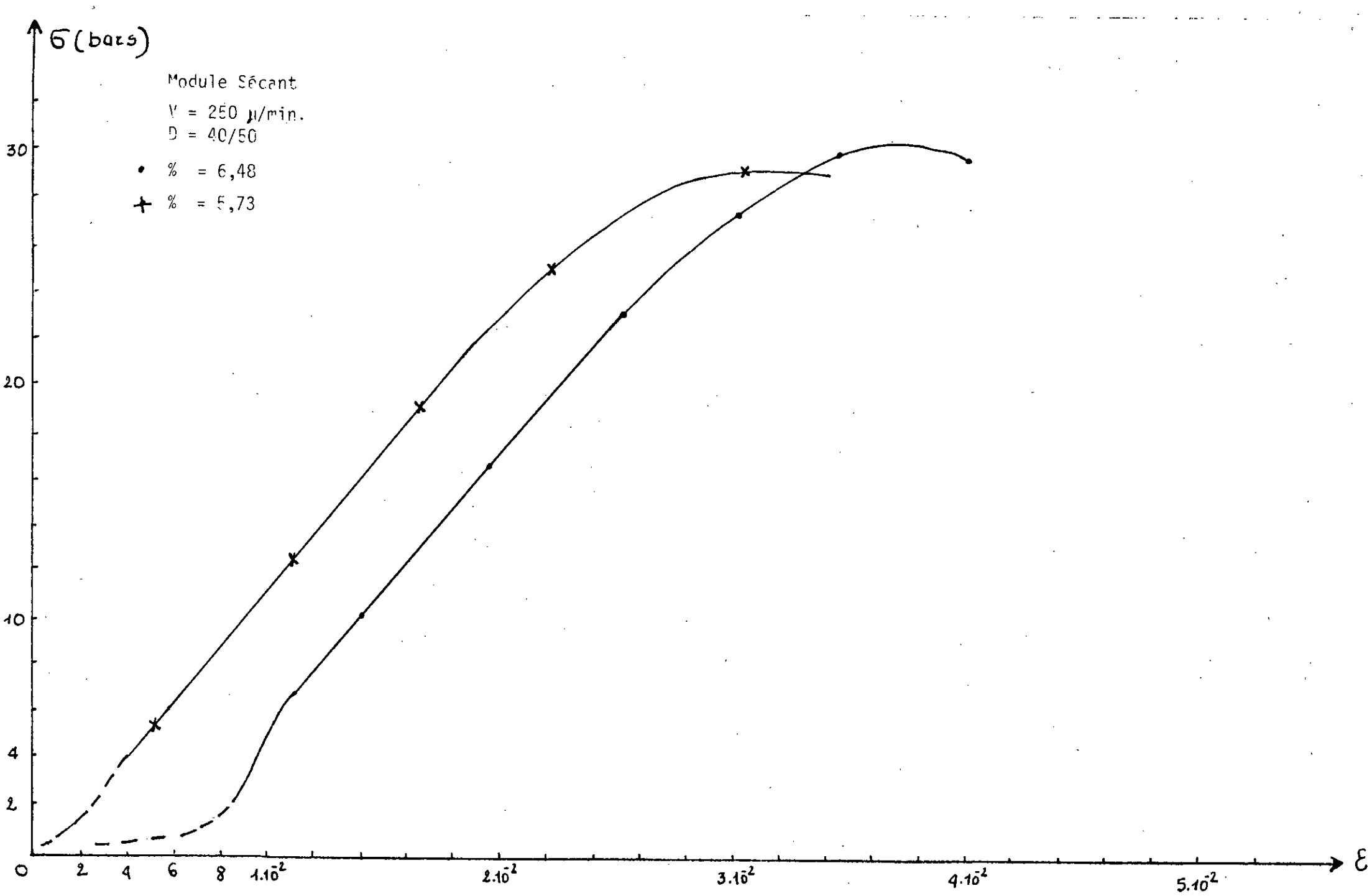
Compacteur Durig.











III EME PARTIE :

METHODE DE RESOLUTION DU MODULE COMPLEXE DES MELANGES BITUMINEUX

### 3.1. GENERALITES.

La connaissance des caractéristiques (module de déformation) et les lois du comportement (fatigue, fluage) des matériaux routiers est indispensable pour concevoir une méthode de dimensionnement des chaussées.

La détermination du module complexe d'un bitume, comme nous l'avons signalé dans la partie théorique, nécessite un appareillage coûteux et du personnel qualifié pour cela plusieurs méthodes ont été proposées pour calculer le module complexe.

La méthode la plus utilisée et la plus rapide a été obtenue au laboratoire Shell Amsterdam à partir des grandeurs facilement calculable tel que :

- le module de rigidité du bitume obtenu à partir du monogramme de Van Der Poel.

- le pourcentage du granulat Vg, le pourcentage du bitume, le pourcentage de vide contenu dans le mélange.

Cette méthode est une méthode approchée qui donne une sécurité maximale

Calcul du module de rigidité de bitume :

- pour déterminer le module de rigidité du bitume à partir du monogramme de Van Der Poel, il faudrait connaître :

- . la température à laquelle a lieu la sollicitation,
- . le temps pendant lequel l'effort est appliqué,
- . les caractéristiques du bitume réellement présent

dans le mélange d'où A' et IP.

Indice de pénétrabilité IP =  $\frac{20 (1 - 25 A')}{1 + 50 A'}$  pour le calcul de A'.

Il faut connaître la température T 800pen (à laquelle la pénétration du bitume serait de 800 1/10mm) celle-ci est extrapolée par prolongation de la droite logarithmique de la pénétration fonction de la température. Elle est en général assez voisine du point de ramollissement bille et anneau qui peut être prise.

$$A' = \frac{\text{Log pen } (T1) - \text{Log } 800 (t2)}{T1 - T2} \quad \text{Pen/x}$$

.../...

De toutes ces données on peut calculer à partir du monogramme de Van Der Poel, le module de rigidité  $S_b$ .

Calcul du module de rigidité de l'enrobé bitumineux  $S_m$  :

A partir des connaissances des grandeurs déjà calculé c'est à dire le module de rigidité du bitume, les volumes des granulats, du bitume et de l'air on peut calculer le module de l'enrobé à partir du programme module.

Programme module :

1- Calcul du module de l'enrobé pour un module de bitume de  $3 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$   
 $\text{Log} (S_m \cdot 3 \cdot 10^9) = 10,82 - 1,342 (100 - V_g) / (V_g + V_b) = A$

2- Calcul du module de l'enrobé pour un module du bitume de  $10^8 \text{ N/m}^2$   
 $\text{Log} (S_m \cdot 10^8) = 8,0 + 5,68 \cdot 10^{-3} V_g + 2,135 \cdot 10^{-4} V_g^2 = B$

3- Calcul de la pente de la courbe  $\text{Log} (\text{module de l'enrobé}) = f(\text{module du bitume})$ .

- pour un module de bitume  $S_b$  compris entre  $10^7$  et  $10^8 \text{ N/m}^2$   
 pente  $(10^7, 10^8) = 0,6 \text{ Log} \left( \frac{1,37 V_b^2 - 1}{1,33 V_b - 1} \right) = N$

- pour un module du bitume  $S_b$  compris entre  $10^8$  et  $10^9 \text{ N/m}^2$   
 pente  $(10^8, 10^9) = \frac{1,12 (A - B)}{\text{Lg } 30} = M$

4- Calcul du module de l'enrobé pour un module de bitume donné :

- pour un module de bitume  $10^7 < S_b < 10^9 \text{ N/m}^2$   
 $L = \text{Log } S_m = \frac{M + N}{2} (\text{Log } S_b - 8) + \frac{M - N}{2} (\text{Log } S_b - 8) + B$

- pour un module de bitume  $10^9 < S_b < 3 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$   
 $L = \text{Log } S_m = B + M + (A - B - M) (\text{Log } S_b - 9) / \text{Log } 3$

5- Calcul de l'angle de phase  $\varphi_m$  pour  $V_b \leq 40$

$$\varphi_m = 16,36 V_b^{0,352} \exp \frac{\text{Log} \left( \frac{S_b}{5 \cdot 10^6} \right)}{\text{Log} \left( \frac{S_b}{2 \cdot 10^9} \right)} \cdot 0,974 V_b^{-0,172}$$

.../...

3.2. APPLICATION

Grave bitume 40/50 destinée pour une couche de base (voir composition granulométrique page 45).

Béton bitumineux 40/50 destinée pour une couche de roulement (voir composition page 49).

Les caractéristiques du bitume sont données dans le tableau ci-dessous ainsi que le module de rigidité du bitume, calculé à partir du monogramme de Van Der Poel.

	GRAVE BITUME 40/50	BETON BITUME 40/50	B.BITUMINEUX 80/100
Pénétration à T = 25°C	46	46	96
Température bille/anneau = T800	56	56	46
A'	0,040	0,040	0,044
IP	0	0	-0,6
T = 0°	$4 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$
T = 10°	$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$
T = 18°	$1 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^7$
T = 30	$4 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^6$ exclus

Le monogramme de VAN DER POEL est représenté dans le graphique suivant :

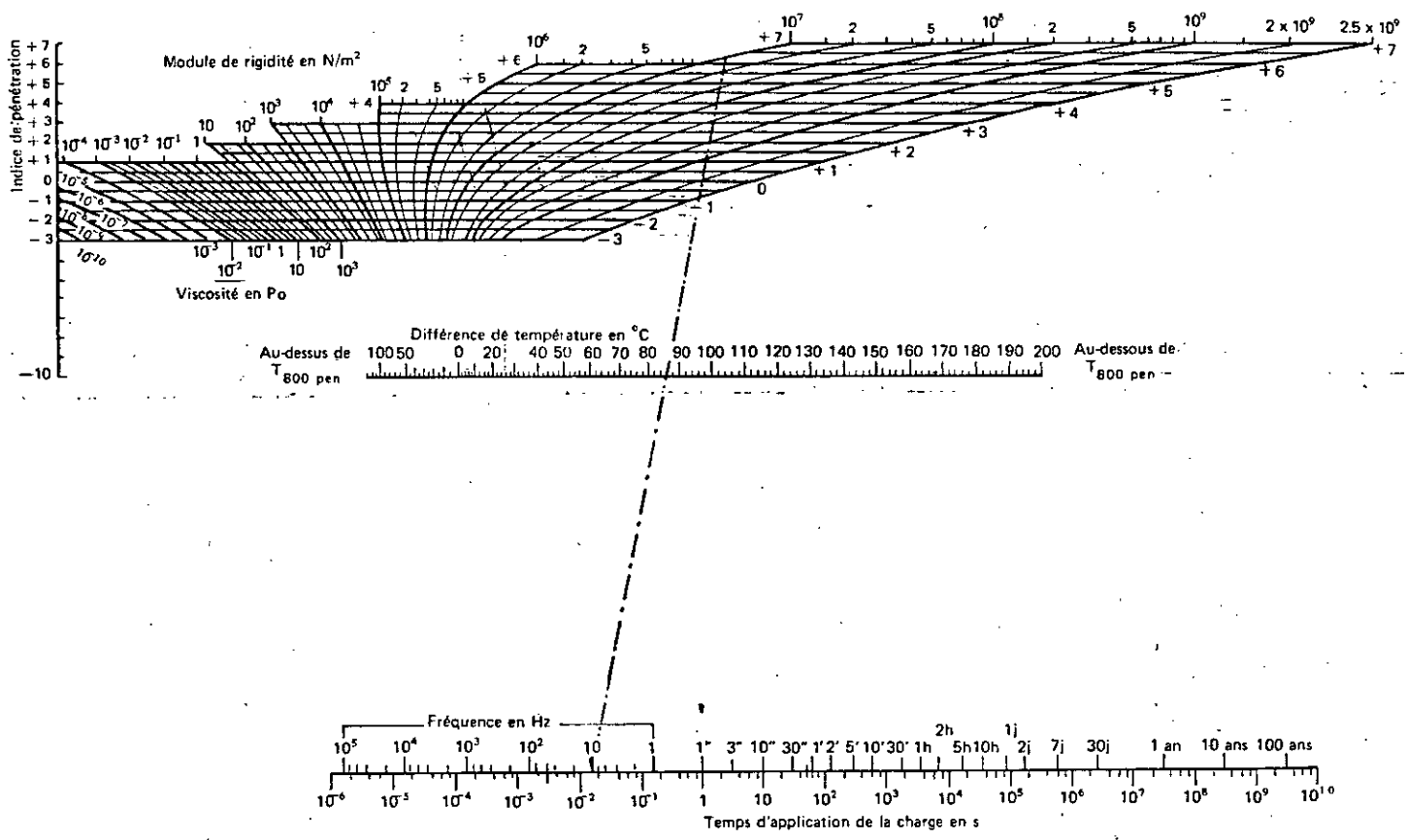


Fig. 1 - Abaque de van der Poel : détermination du module de rigidité des bitumes.

Connaissant le module du bitume  $S_b$  ainsi que les volumes des granulats, bitumes, vide), nous pouvons calculer le module ( $S_m$ ) de rigidité de l'enrobé à partir du programme module. Nous présentons ce calcul sur micro-ordinateur.

Le programme ainsi que les résultats sont donnés en Annexe IV.

### 3.3. CONCLUSION

Les résultats obtenus mettent en évidence, le rôle prépondérant joué par les paramètres suivants :

- la température,
- le temps de charge,
- la dureté et susceptibilité thermique du bitume,
- les pourcentages en volume des granulats, du bitume et de l'ai dans le mélange.

Il semble que les autres paramètres ne jouent qu'un rôle secondaire; tout au moins lorsqué le liant est suffisamment rigide.

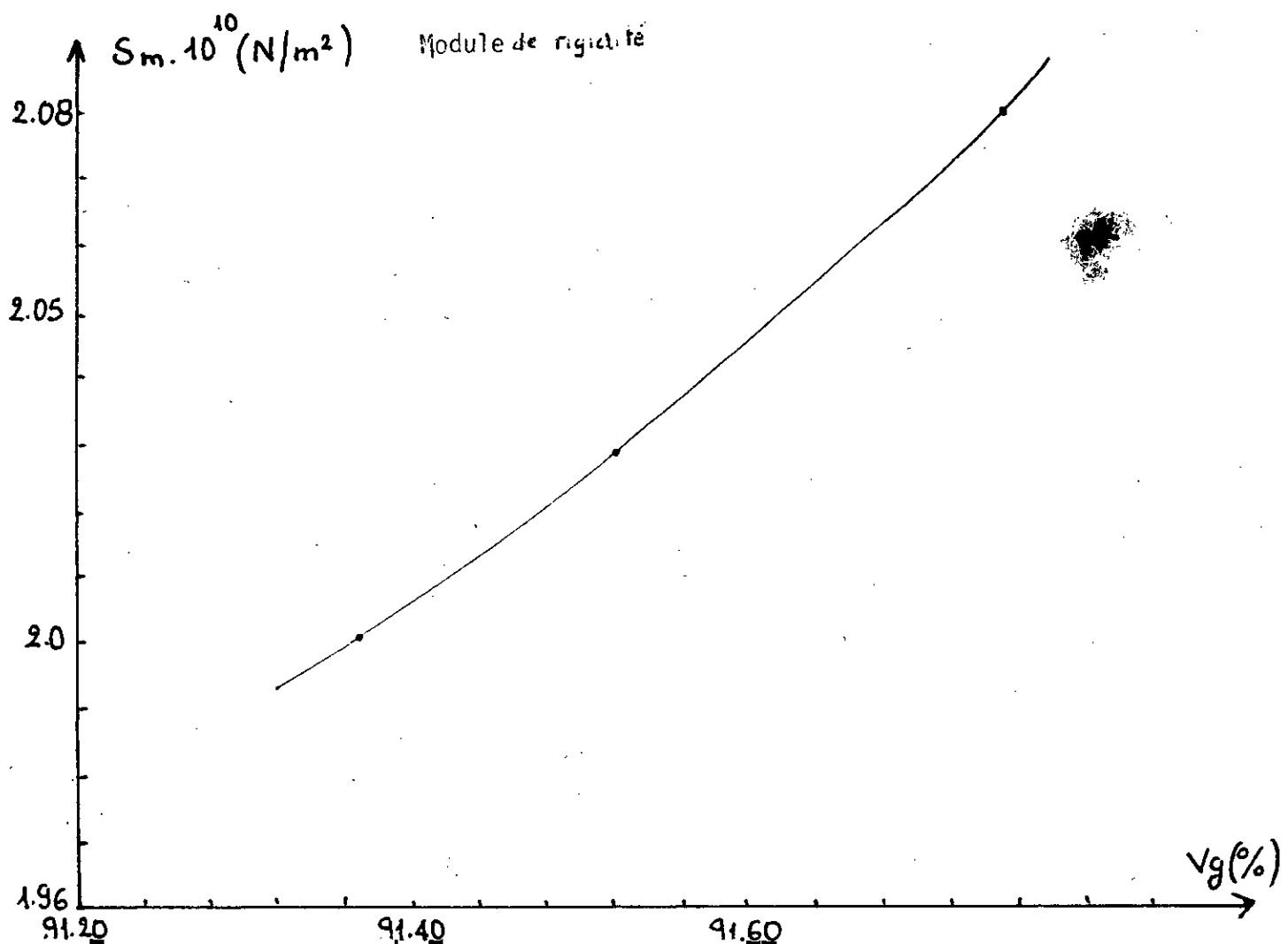
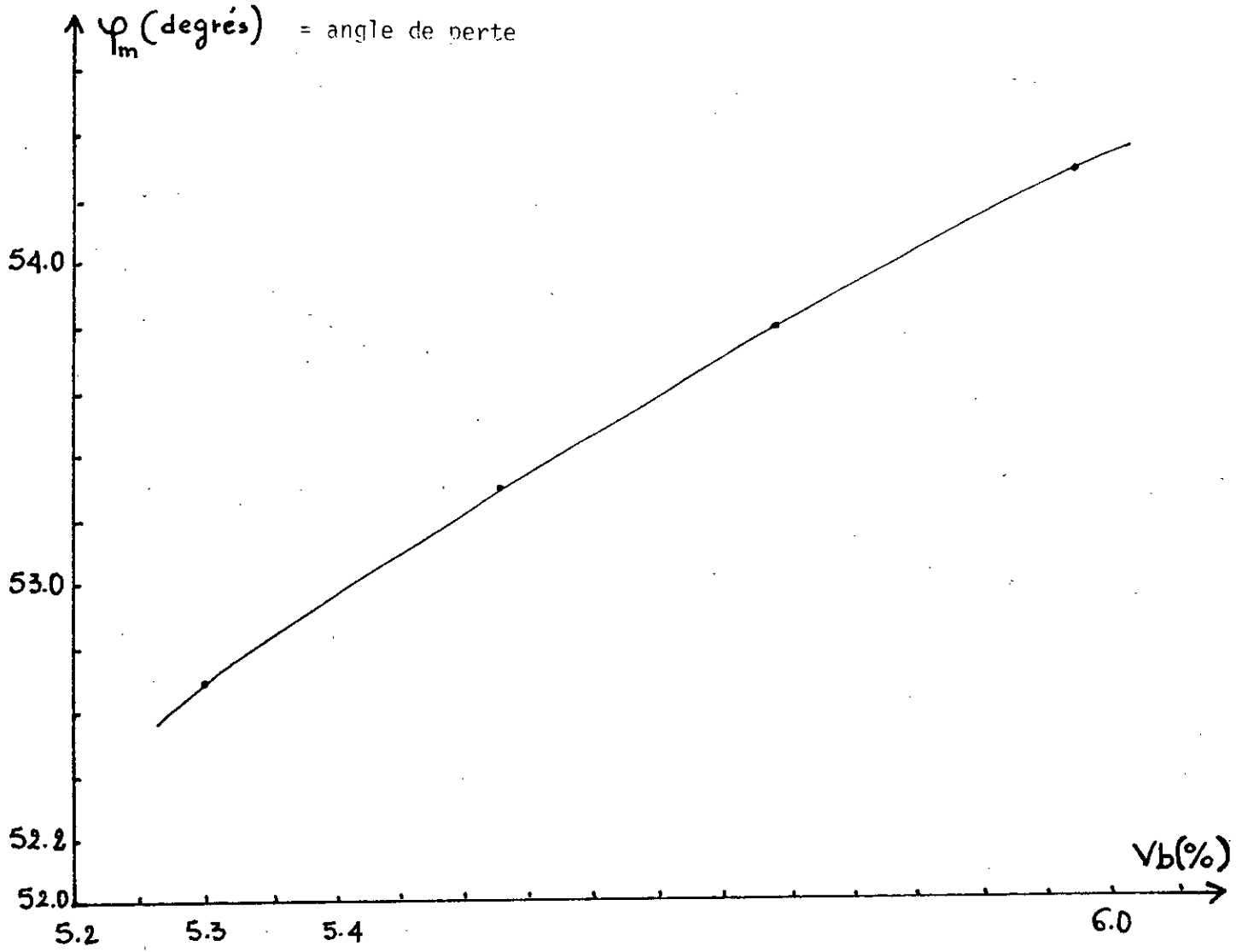
On doit s'attendre à ce que le granulat prenne plus d'importance pour des sollicitations où le bitume à un comportement à prédominance visqueux.

L'interprétation de ces résultats font apparaître que pour un module de bitume  $S_b$  donné, l'angle de perte du mélange est d'autant plus grand que le pourcentage en volume du bitume est important. Car c'est le liant bitumineux qui confère à l'enrobé son caractère visco-élastique.

.../...

On a aussi remarqué que le module  $S_m$  pour  $1.10^7 < S_b < 10^8$  dépendait essentiellement du pourcentage en volume occupé par les granulats  $V_g$  ; le module de rigidité  $S_m$  est d'autant plus grand que les granulats sont enchevêtrés les uns dans les autres.





## BIBLIOGRAPHIE

DURIEZ : "Nouveau traité de Matériau de construction". Tome III. DUNOD.

VAN DER POEL: "Time and temperature effects on the deformations of bitumeus"

VESTRAETEN J.: "Loi de fatigue en flexion répétée de mélanges bitumineux".  
-Bulletin de liaison-.

FRANCKEN L. : "Module complexe des mélanges bitumineux. Influence des  
caractéristiques des bitumes et la composition du mélange.

BULLETIN DE LIAISON DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES : "Bitume et  
enrobés bitumineux".

O.C.D.E. : Recherches routières "Résistance à la déformation pratique d'une  
chaussée souple.

---

Annexe 1

ANNEXE 1 - I. GRANULOMETRIE DES MATERIAUX

10/20 - 2/5  
5/10 - 0/2

=====				
COMPLEMENT A 100 DES REFUS CUMULES				
TAMIS	10/20	5/10	2/5	0/2
en mm				
-----				
25	100			
20	93,99			
16	65,09			
12,5	35,63	100		
10	9,85	94,78		
8	2,00	67,58		
6,3	1,05	33,38	100	
5	0,83	8,73	93,82	100
2	0,80	2,78	04,85	93,93
1	0,80	2,38	1,45	67,47
0,400	0,79	2,16	1,22	43,67
0,200	0,77	2,02	1,19	31,13
0,100	0,69	1,80	1,15	22,00
0,080	0,65	1,65	1,08	18,20
=====				

L. T. P. C.

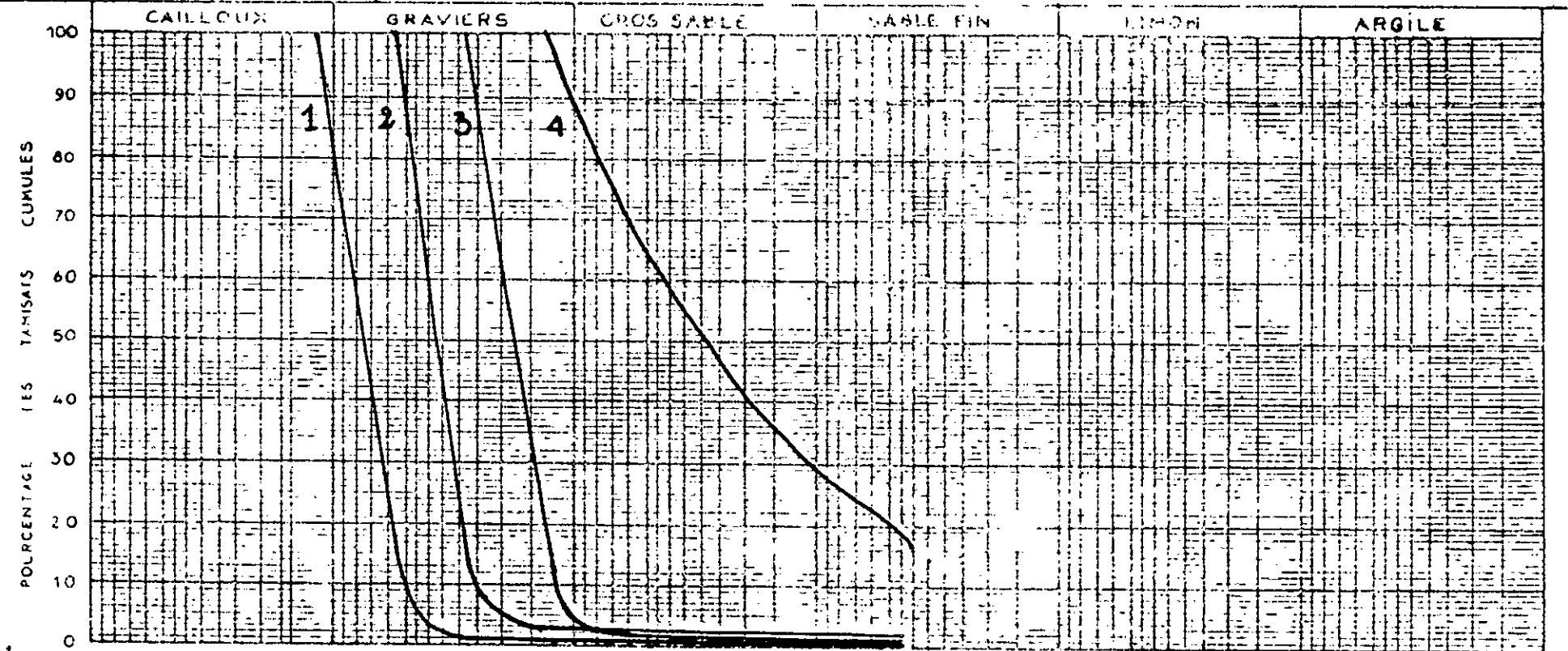
HUSSEIN-DEY — Alger

DÉSIGNATION  
DES  
ÉCHANTILLONS

N° 1 - 10/20 — 3 - 2/5  
N° 2 - 5/10 — 4 - 0/2  
N°

DOSSIER

S6 et S7 ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE



mm	200	100	80	50	20	10	5	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063	0.032	0.016	0.008	0.004	0.002	0.001	0.075	0.063	0.05	0.04	0.03	0.02	0.015	0.01	0.0075	0.005	0.00375	0.0025
MODULE		100	63	40	25	12.5	6.3	2.5	1.25	0.5																					

	%	S.B. LIMITES D'ATTERBERG			S.S.
		V.L.	V.P.	V.R.	
Ech. - 1 -	0.65%				
Ech. - 2 -	1.65%				
Ech. - 3 -	1.08%				
	18.20%				

ANNEXE 1 - II. MELANGE GRAVE-BITUME  
(0/20 SEMI-GRENU)

10/20 - 35%      2/5 - 10%  
5/10 - 25%      0/2 - 30%

TAMIS en mm	!COMPLEMENT A 100 DES REFUS CUMULES)
20	97,90
16	87,78
12,5	77,47
10	67,15
8	57,60
6,3	48,72
5	41,85
2	29,65
1	21,27
0,400	14,04
0,200	10,24
0,100	7,41
0,080	6,20

# FUSEAU "SETRA-LCPC" Pour Grave-bitume semi-Grenue 0/20

L. T. P. C.

HUSSEIN-DEY — Alger

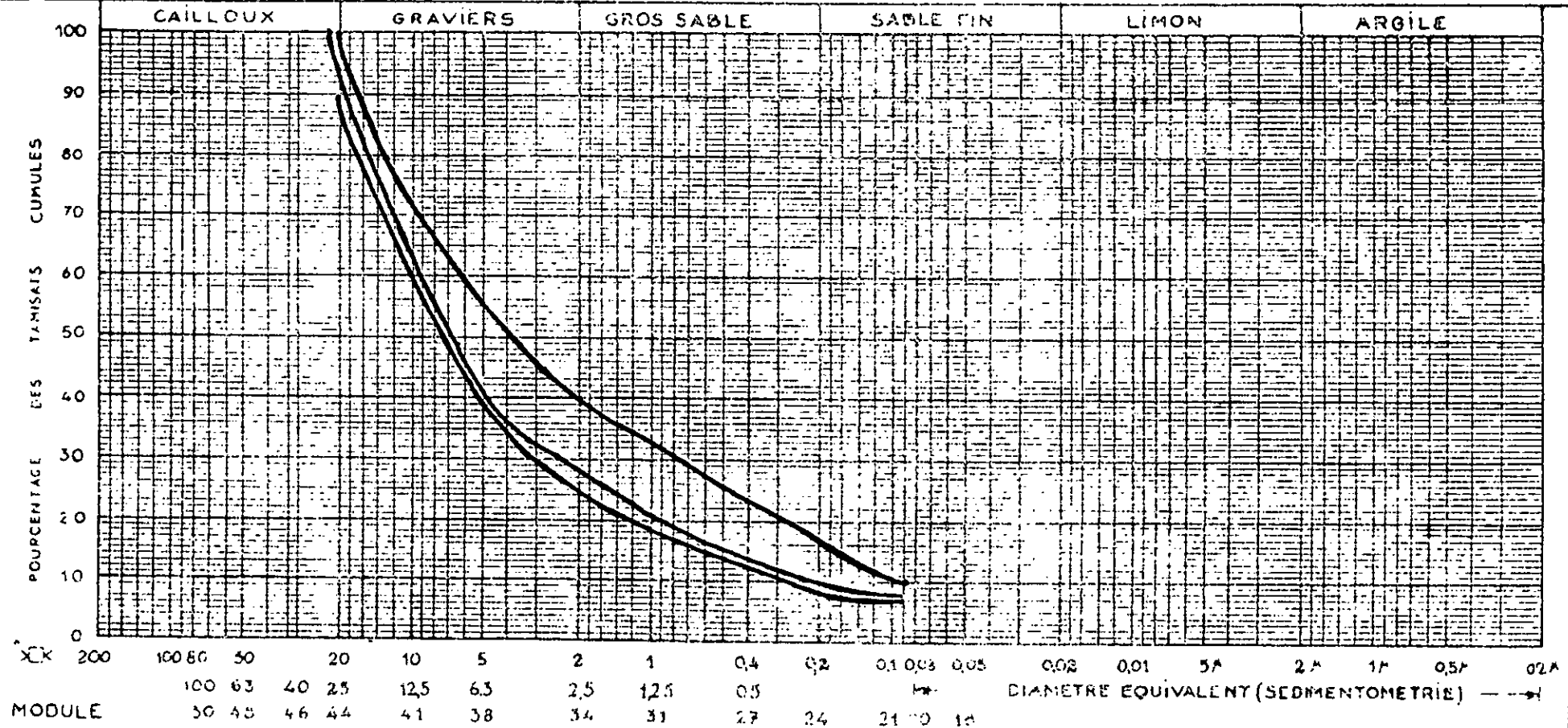
— Courbe de mélange —

DÉSIGNATION  
DES  
ECHANTILLONS

N° 10/20 = 35% — 2/5 = 10%  
N° 5/10 = 25% — 0/2 = 30%  
N°

DOSSIER

S.6 et S.7 ANALYSE GRANULOMETRIQUE



	%	S.B. LIMITES D'ATTERBERG			9.70 E.6
		W.L.	W.P.	W.R.	
Ech.	6.20%				
Ech.					
Ech.					

$\Sigma \text{ en m}^2/\text{Kg} = 8,3854$



SERVICE LIANTS ET ENROBES

Dossier N° .....

			F O R M U L E			
Nature des constituants			A	B	C	D
10/20			35%	35%	35%	35%
5/10			25%	25%	25%	25%
2/5			10%	10%	10%	10%
0/2			30%	30%	30%	30%
bitume 40/50			3.28%	3.51%	3.74%	3.97%
Densité apparente	Par les mesures		—	—	—	—
	Par le bal. hydro.		2.27	2.28	2.29	2.30
Résistance à la compression à 18°C en Kg/cm <sup>2</sup> pour une vitesse de déformation de 1 mm/sec	Après 24h à sec	r	—	—	—	—
	Après 8j à sec	R	80.38	80.74	83.33	87.02
	Après 8j dont 7 d'immersion	R'	44.99	44.99	51.62	58.99
% D'affaissement de l'éprouvette soumise à la compres.	après 24 h		—	—	—	—
	après 8j à sec		1.15	1.42	1.39	1.56
% d'imbibition	Après 2 heures		2.76	2.83	2.68	2.64
	Après 2 jours		3.18	3.11	2.93	2.81
	Après 7 jours		3.82	3.89	3.57	3.48
Gonflement volumétrique	Après 2 heures		—	—	—	—
	Après 2 jours		0.65	0.59	0.67	0.60
	Après 7 jours		0.98	1.02	0.89	1.12
Rapport de compression R' / R immersion			0.56	0.56	0.62	0.68
compacité			90.08%	90.48%	91.24%	92.00%
% de vides remplés par le bitume			41.58%	43.98%	48.41%	51.80%
Surface spécifique en m <sup>2</sup> / Kg			8.3854	8.3854	8.3854	8.3854
Module Duriez de richesse en liant K =			2.15	2.30	2.45	2.60

Annexe 2

ANNEXE 2 - I. GRANULOMETRIE DES MATERIAUX

COMPLEMENT A 100 DES REFUS CUMULES			
TAMIS en mm	8/15	3/8	0/3
16,00	100		
12,50	98,62		
10,00	67,47		
8,00	5,06	100	
6,30	2,84	99,70	100
5,00	2,81	83,40	98,50
2,00	2,37	4,00	93,10
1,00	2,25	3,40	68,20
0,40	2,12	3,20	47,20
0,20	2,03	3,00	36,10
0,10	1,91	2,70	28,50
0,08	1,81	2,50	24,50

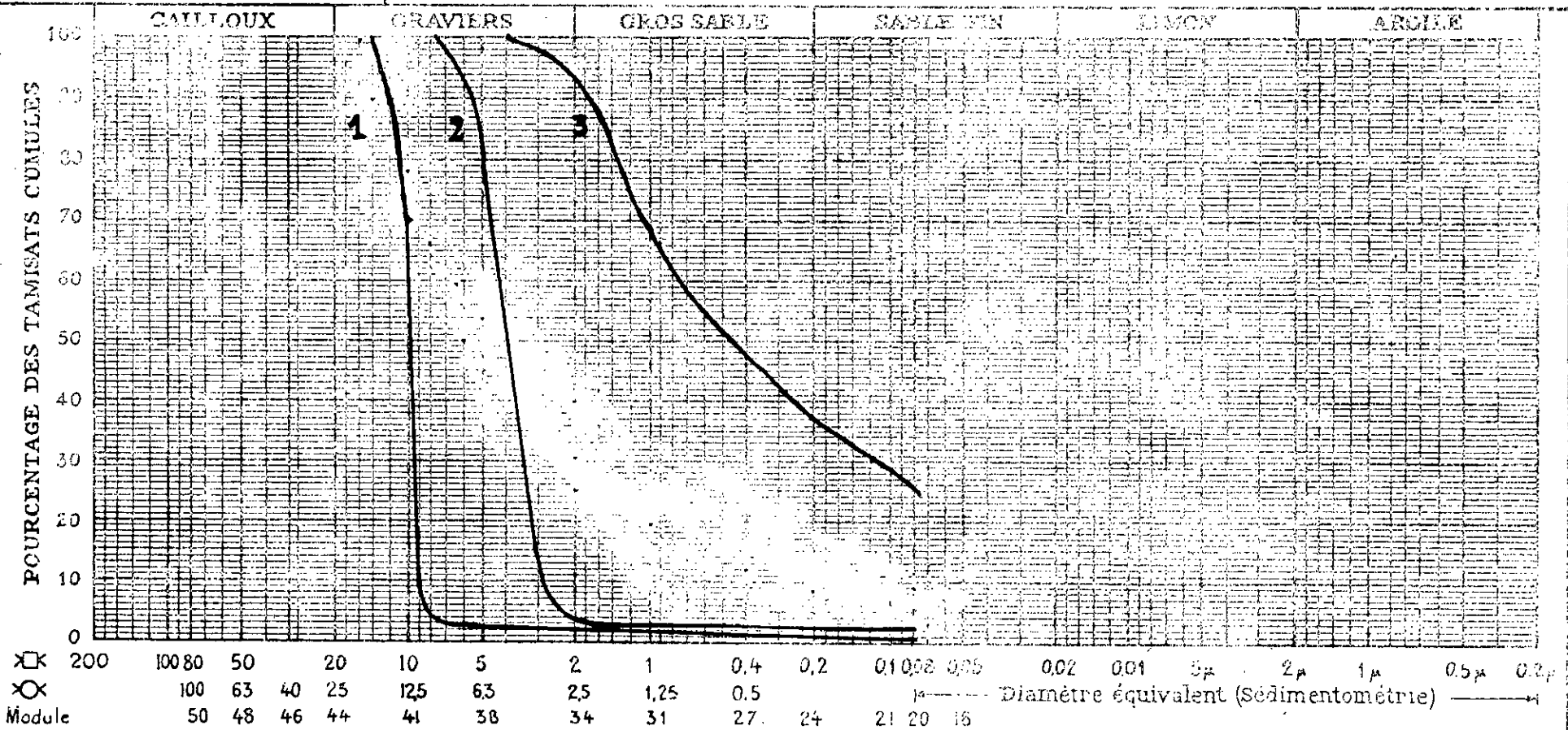
# L. N. T. P. B.

Désignation  
des  
échantillons

N° 1-8/15 - 3-0/3  
N°  
N° 2-3/8

DOSSIER :

S. 6 ET S. 7 - ANALYSE GRANULOMETRIQUE



	%	S. 8 LIMITES D'ATTERBERG			S. 20 E. S.
		L. I.	I. F.	L. R.	
Ech. 1	1.81%				
Ech. 2	2.50%				
Ech. 3	24.50%				

ANNEXE 2 II. MELANGE BETON BITUMINEUX 0/14  
(SEMI-GRENUÉ)

- 40 % de 8/15
- 35 % de 3/8
- 25 % de 0/3

=====	
(	! )
( TAMIS	! COMPLEMENT A 100 DES REFUS CUMULES )
( en mm	! )
(	! )
(	! )
( 16	! 100 )
( 12,5	! 99,45 )
( 10	! 86,99 )
( 8	! 62,02 )
( 6,3	! 61,04 )
( 5	! 54,54 )
( 2	! 25,28 )
( 1	! 19,14 )
( 0,4	! 13,77 )
( 0,2	! 10,89 )
( 0,1	! 8,83 )
( 0,08	! 7,74 )
(	! )
=====	

L. T. P. C.

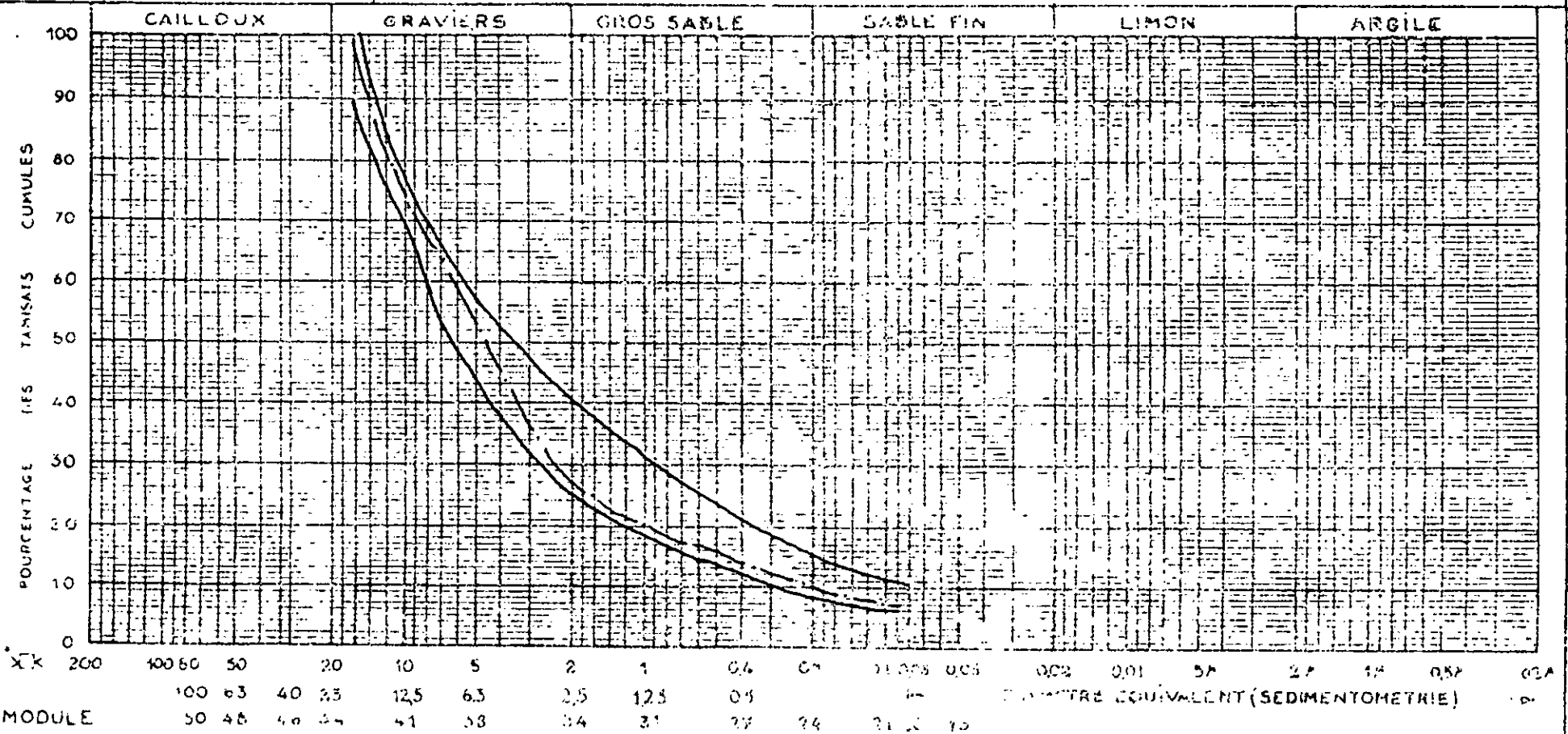
HUSSEIN-DEY — Alger

- Courbe de mélange -

DÉSIGNATION DES ECHANTILLONS } N° 8/15 = 40% - 0/3 = 25%  
 N° 3/8 = 35%

DOSSIER

Sé 157 ANALYSE GRANULOMETRIQUE



	%	S.F. LIMITES D'ATTERBERG			S
		W.L.	W.P.	W.R.	
Ech.	7.74%				
Ech.					
Ech.					

Surface spécifique  $\Sigma = 11.99 \text{ m}^2/\text{kg}$ .

## SERVICE LIANTS ET ENROBES

Dossier N° .....

## FORMULE

Nature des constituants		A	B	C	D
8/15		40%	40%	40%	40%
3/8		35%	35%	35%	35%
0/3		25%	25%	25%	25%
Liant: 40/50		5.73%	5.98%	6.23%	6.48%
Densité apparente	Par les mesures	-	-	-	-
	Par le bal. hydro.	2.33	2.33	2.33	2.33
Résistance à la compression à 18°C en Kg/cm <sup>2</sup> pour une vitesse de déformation de 1 mm/sec	Après 24h à sec	r	-	-	-
	Après 8j à sec	R	85.33	82.33	103.33
	Après 8j dont 7 d'immersion	R'	66.00	67.00	90.67
% D'affaissement de l'éprouvette soumise à la compres.	après 24 h	-	-	-	-
	après 8j à sec	2.76	2.94	2.75	2.93
% d'imbibition	Après 2 heures	1.78	1.40	1.07	1.06
	Après 2 jours	2.78	2.57	2.04	2.25
	Après 7 jours	2.94	2.57	2.07	2.25
Gonflement volumétrique	Après 2 heures	-	-	-	-
	Après 2 jours	0.66	0.59	0.34	0.38
	Après 7 jours	1.10	0.96	0.71	0.65
Rapport de compression R' / R immersion		0.77	0.81	0.88	0.75
compacité		96.68%	97.08%	97.08%	97.49%
% de vides comblés par le bitume		79.29%	81.68%	83.58%	84.70%
Surface spécifique en m <sup>2</sup> /Kg		11.99	11.99	11.99	11.99
Module Duriez de Richesse en liant K =		3.45	3.60	3.75	3.90

L. T. P. C.

- PROCES VERBAL D'ESSAIS DE STABILITE DURIEZ avec 80/100

SERVICE LIANTS ET ENROBES

Dossier N° .....

		F O R M U L E			
Nature des constituants		A	B	C	D
8/15 CARRIERE - ECAYA. B.E.O		40%	40%	40%	40%
3/8 " " "		35%	35%	35%	35%
0/3 " " "		25%	25%	25%	25%
Liant: 80/100		5.73%	5.98%	6.23%	6.48%
Densité apparente	Par les mesures				
	Par le bal. hydro.	2.35	2.35	2.35	2.35
Résistance à la compression à 18°C en Kg/cm <sup>2</sup> pour une vitesse de déformation de 1 mm/sec	Après 24h à sec	r			
	Après 8j à sec	R	70.00	44.00	67.67
	Après 8j dont 7 d'immersion	R'	70.00	41.33	61.33
% D'affaissement de l'éprouvette soumise à la compres.	après 24 h	3.15	2.39	2.86	2.73
	après 8j à sec				
% d'imbibition	Après 2 heures	1.03	1.60	0.94	1.04
	Après 2 jours	1.38	1.67	1.24	1.24
	Après 7 jours	2.02	2.54	1.64	1.65
Gonflement volumétrique	Après 2 heures	0.00	0.00	0.00	0.00
	Après 2 jours	0.28	0.20	0.20	0.20
	Après 7 jours	0.42	0.58	0.34	0.47
Rapport de compression R' / R immersion		1.00	0.95	0.91	0.94
compacité		97.51%	97.52%	97.92%	98.33%
% de vides comblés par le bitume		83.69%	86.38%	86.71%	89.33%
Surface spécifique en m <sup>2</sup> / Kg		11.99	11.99	11.99	11.99
Module de déform. en liant K =		3.45	3.60	3.75	3.90



--O--  
SERVICE CHIMIE

PROCES VERBAL D'ESSAIS DE STABILITE MARSHALL

avec 40/50

Dossier n° :

50 coups

Nature des Constituants	FORMULE							
	A		B		C		D	
8/15	40%		40%		40%		40%	
3/8	35%		35%		35%		35%	
0/3	25%		25%		25%		25%	
Liant: 40/50	5.73%		5.98%		6.23%		6.48%	
Densité apparente des éprouvettes	2.33		2.34		2.35		2.35	
Déformation en 1/10 mm	44		45		43		40	
Stabilité en Kg à 60°C	715		893		918		1006	
Compacité calculée	96.68%		97.50%		97.92%		98.32%	
Proportions des vides comblés par le bitume	79.29%		84.03%		86.71%		89.27%	
Surface spécifique conventionnelle en m <sup>2</sup> /Kg	11.99		11.99		11.99		11.99	
Module Duriez Richesse en liant K =	3.45		3.60		3.75		3.90	

--O--  
SERVICE CHIMIE

PROCES VERBAL D'ESSAIS DE STABILITE MARSHALL

avec 80/100

à 50 coups

Dossier n° :

Nature des Constituants	FORMULE							
	A		B		C		D	
8/15	40%		40%		40%		40%	
3/8	35%		35%		35%		35%	
0/3	25%		25%		25%		25%	
Liant 80/100	5.73%		5.98%		6.23%		6.48%	
Densité apparente des éprouvettes	2.32		2.35		2.36		2.36	
Déformation en 1/10 mm	39		35		41		33	
Stabilité en Kg à 60°C	924		863		854		874	
Compacité calculée	96.27%		97.92%		98.33%		98.74%	
Proportions des vides comblés par le bitume	77.27%		86.38%		89.06%		91.74%	
Surface spécifique conventionnelle en m <sup>2</sup> /Kg	11.99		11.99		11.99		11.99	
Module Duriez Richesse en liant K =	3.45		3.60		3.75		3.90	

Annexe 3

EPROUVETTE D : 40/50  
 ANNEAU DYNAMOMETRIQUE : 2,37  
 CAPACITE 3600 Kg

V : 250  $\mu$  / min.  
 % bit : 6,48

1/ COMPAREUR TRANSVERSALE 1/100mm  
 2/ COMPAREUR LONGITUDINAL 1/100mm  
 TEMPERATURE: 17°C

Ho : 87mm  
 DIAMETRE : 80mm  
 S : 50,24 cm<sup>2</sup>

=====					
( DEFORMATION LONGITUDINALE	!	FORCE	!	FORCE	!
( (L.A.) ! Dh/h	!	LA	!	Kg	!
( _____ !	!	_____	!	_____	!
( _____	!	_____	!	_____	!
=====					
( 250	!	2,87.10 <sup>-3</sup>	!	9,5	!
( 500	!	5,74.10 <sup>-3</sup>	!	15	!
( 750	!	8,62.10 <sup>-3</sup>	!	42	!
( 1000	!	1,15.10 <sup>-2</sup>	!	165	!
( 1250	!	1,44.10 <sup>-2</sup>	!	237	!
( 1500	!	1,72.10 <sup>-2</sup>	!	305	!
( 1750	!	2,01.10 <sup>-2</sup>	!	375	!
( 2000	!	2,30.10 <sup>-2</sup>	!	444	!
( 2250	!	2,59.10 <sup>-2</sup>	!	507	!
( 2500	!	2,87.10 <sup>-2</sup>	!	562	!
( 2750	!	3,16.10 <sup>-2</sup>	!	605	!
( 3000	!	3,45.10 <sup>-2</sup>	!	634	!
( 3250	!	3,74.10 <sup>-2</sup>	!	640	!
( 3500	!	4,02.10 <sup>-2</sup>	!	627	!
( 3750	!	4,31.10 <sup>-2</sup>	!	590	!
(	!		!		!
=====					

EPROUVETTE D : 40/50

ANNEAU DYNAMOMETRIQUE : 2,37

CAPACITE 3600 Kg

1/ COMPAREUR TRANSVERSALE 1/100mm

2/ COMPAREUR LONGITUDINAL 1/100mm

TEMPERATURE:17°C

Ho :87mm

DIAMETRE :80mm

S :50,24 cm<sup>2</sup>

v : 80 μ / min.

% bit : 6,48

( (L.A.) !	Dh/h	! FORCE LA	! FORCE Kg	! bars	)
( 250 !	2,87.10 <sup>-3</sup>	! 13	! 30,81	! 0,613	)
( 500 !	5,74.10 <sup>-3</sup>	! 17	! 40,29	! 0,802	)
( 750 !	8,62.10 <sup>-3</sup>	! 33	! 78,21	! 1,56	)
( 1000 !	1,15.10 <sup>-2</sup>	! 135	! 319,95	! 6,37	)
( 1250 !	1,44.10 <sup>-2</sup>	! 202	! 478,74	! 9,53	)
( 1500 !	1,72.10 <sup>-2</sup>	! 274	! 649,38	! 12,92	)
( 1750 !	2,01.10 <sup>-2</sup>	! 335	! 793,95	! 15,80	)
( 2000 !	2,23.10 <sup>-2</sup>	! 406	! 962,22	! 19,15	)
( 2250 !	2,59.10 <sup>-2</sup>	! 454	! 1075,98	! 21,42	)
( 2250 !	2,87.10 <sup>-2</sup>	! 491	! 1163,67	! 23,16	)
( 2750 !	3,16.10 <sup>-2</sup>	! 508	! 1203,96	! 23,96	)
( 2800 !	3,22.10 <sup>-2</sup>	! 508	! 1203,96	! 23,96	)
( 3000 !	3,45.10 <sup>-2</sup>	! 503	! 1192,11	! 23,73	)
( !	!	!	!	!	)

EPROUVETTE D : 40/50  
 ANNEAU DYNAMOMETRIQUE : 0,46  
 CAPACITE 900 Kg

VITESSE : 20  $\mu$  / min  
 & Bit 6,48

1/ COMPAREUR TRANSVERSALE 1/100mm  
 2/ COMPAREUR LONGITUDINAL 1/100mm

TEMPERATURE : 17°C

Ho : 87,5mm

DIAMETRE : 80 mm

S : 50,24 cm<sub>2</sub>

( (L.A.) )	Dh/h	FORCE LA	FORCE Kg	FORCE bars
( 235 )	2,686.10 <sup>-3</sup>	22,5	10,35	0,206
( 530 )	6,057.10 <sup>-3</sup>	89	40,94	0,815
( 800 )	9,14.10 <sup>-3</sup>	104	47,84	0,952
( 1000 )	1,143.10 <sup>-2</sup>	123	56,58	1,126
( 1200 )	1,371.10 <sup>-2</sup>	146	67,16	1,337
( 1400 )	1,6.10 <sup>-2</sup>	85	85,1	1,694
( 1600 )	1,83.10 <sup>-2</sup>	265	121,9	2,406
( 1800 )	2,057.10 <sup>-2</sup>	366	168,36	3,351
( 2000 )	2,28.10 <sup>-2</sup>	455	209,3	4,166
( 2230 )	2,55.10 <sup>-2</sup>	546	251,16	4,999
( 2400 )	2,74.10 <sup>-2</sup>	613	281,98	5,613
( 2600 )	2,97.10 <sup>-2</sup>	635	292,1	5,814
( 2800 )	3,2.10 <sup>-2</sup>	792	364,32	7,252
( 3000 )	3,43.10 <sup>-2</sup>	870	400,2	7,966
( 3200 )	3,66.10 <sup>-2</sup>	950	437	8,70
( 3400 )	3,88.10 <sup>-2</sup>	1032	474,72	9,45
( 3600 )	4,11.10 <sup>-2</sup>	1110	510,6	10,16
( 3800 )	4,34.10 <sup>-2</sup>	1191	547,86	10,90
( 4000 )	4,57.10 <sup>-2</sup>	1271	584,66	11,64
( 4200 )	4,8.10 <sup>-2</sup>	1349	620,54	12,35
( 4400 )	5,03.10 <sup>-2</sup>	1424	655,04	13,04
( 4600 )	5,26.10 <sup>-2</sup>	1500	690	13,73
( 4800 )	5,48.10 <sup>-2</sup>	1574	724,04	14,41
( 5000 )	5,71.10 <sup>-2</sup>	1640	754,4	15,02

EPROUVETTE D : 40/50  
 ANNEAU DYNAMOMETRIQUE : 2,37

V : 250  $\mu$  / min.  
 8 bit : 5,73

CAPACITE 3600 Kg

1/ COMPAREUR TRANSVERSALE 1/100mm

2/ COMPAREUR LONGITUDINAL 1/100mm

TEMPERATURE: 17°C

Ho : 90mm

DIAMETRE : 80mm

S : 50,24 cm<sup>2</sup>

=====									
( DEFORMATION LONGITUDINALE	!	FORCE	!	FORCE	!	)			
( (L.A.) !	Dh/h	!	LA	!	Kg	!	bars	)	
-----									
( 20	!	2,22.10 <sup>-4</sup>	!	3	!	7,11	!	0,14	)
( 50	!	5,5.10 <sup>-4</sup>	!	6,5	!	15,40	!	0,31	)
( 90	!	1.10 <sup>-3</sup>	!	11	!	26,07	!	0,52	)
( 100	!	1,1.10 <sup>-3</sup>	!	13	!	30,81	!	0,61	)
( 200	!	2,22.10 <sup>-3</sup>	!	29	!	68,73	!	1,37	)
( 250	!	2,77.10 <sup>-3</sup>	!	40	!	94,8	!	1,89	)
( 500	!	5,55.10 <sup>-3</sup>	!	130	!	308,1	!	6,13	)
( 750	!	8,3.10 <sup>-3</sup>	!	199	!	471,63	!	9,39	)
( 1000	!	1,1.10 <sup>-2</sup>	!	269	!	637,53	!	12,69	)
( 1250	!	1,38.10 <sup>-2</sup>	!	337	!	798,69	!	15,90	)
( 1500	!	1,66.10 <sup>-2</sup>	!	409	!	969,33	!	19,29	)
( 1750	!	1,94.10 <sup>-2</sup>	!	477	!	1130,49	!	22,50	)
( 2000	!	2,22.10 <sup>-2</sup>	!	534	!	1265,58	!	25,20	)
( 2250	!	2,5.10 <sup>-2</sup>	!	579	!	1372,23	!	27,31	)
( 2500	!	2,77.10 <sup>-2</sup>	!	609	!	1443,33	!	28,73	)
( 2750	!	3,05.10 <sup>-2</sup>	!	619	!	1467,03	!	29,20	)
( 2800	!	3,11.10 <sup>-2</sup>	!	619	!	1467,03	!	29,20	)
( 3000	!	3,33.10 <sup>-2</sup>	!	613	!	1467,03	!	29,20	)
(	!		!		!		!		)
=====									

EPROUVETTE D : 40/50

ANNEAU DYNAMOMETRIQUE : 2,37

CAPACITE 3600 Kg

1/ COMPAREUR TRANSVERSALE 1/100mm

2/ COMPAREUR LONGITUDINAL 1/100mm

TEMPERATURE:17°C

Ho :80mm

DIAMETRE :80mm

S :50,24 cm<sup>2</sup>

V :80 μ / min.

% bit : 5,73

( (L.A.) )	Dh/h	FORCE LA	FORCE Kg	bars
( 20 )	$2,5 \cdot 10^{-4}$	3	7,11	0,14
( 50 )	$6,25 \cdot 10^{-4}$	9	21,33	0,42
( 80 )	$1 \cdot 10^{-3}$	14	33,18	0,66
( 100 )	$1,25 \cdot 10^{-3}$	17,5	41,48	0,83
( 250 )	$3,12 \cdot 10^{-3}$	45	106,65	2,12
( 500 )	$6,25 \cdot 10^{-3}$	142	336,54	6,70
( 750 )	$9,38 \cdot 10^{-3}$	209	495,33	9,86
( 1000 )	$1,25 \cdot 10^{-2}$	278	658,86	13,11
( 1250 )	$1,56 \cdot 10^{-2}$	342	810,54	16,13
( 1500 )	$1,87 \cdot 10^{-2}$	409	969,33	19,30
( 1750 )	$2,18 \cdot 10^{-2}$	473	1121,01	22,31
( 2000 )	$2,5 \cdot 10^{-2}$	527	1248,99	24,86
( 2250 )	$2,81 \cdot 10^{-2}$	573	1358,01	27,03
( 2500 )	$3,12 \cdot 10^{-2}$	609	1443,33	28,73
( 2750 )	$3,44 \cdot 10^{-2}$	631	1495,47	29,76
( 2800 )	$3,5 \cdot 10^{-2}$	651	1542,87	30,71
( 3000 )	$3,75 \cdot 10^{-2}$	649	1538,13	-
( )				



EPROUVETTE D : 80/100  
 ANNEAU DYNAMOMETRIQUE : 2,37

V : 250  $\mu$  / min.  
 % bit : 6,48

CAPACITE 3600 Kg  
 1/ COMPAREUR TRANSVERSALE 1/100mm  
 2/ COMPAREUR LONGITUDINAL 1/100mm

TEMPERATURE: 17°C

Ho : 86mm

DIAMETRE : 80mm

S : 50,24 cm<sup>2</sup>

=====									
( DEFORMATION LONGITUDINALE	!	FORCE	!	FORCE	!	)			
( (L.A.) ! Dh/h	!	LA	!	Kg	!	bars			
(	!	!	!	!	!	)			
( 250	!	2,90.10 <sup>-3</sup>	!	15	!	35,55	!	0,71	)
( 500	!	5,81.10 <sup>-3</sup>	!	20	!	47,4	!	0,94	)
( 750	!	8,72.10 <sup>-3</sup>	!	38	!	90,06	!	1,79	)
( 1000	!	1,16.10 <sup>-2</sup>	!	139	!	329,43	!	6,56	)
( 1250	!	1,45.10 <sup>-2</sup>	!	207	!	490,59	!	9,76	)
( 1500	!	1,74.10 <sup>-2</sup>	!	265	!	628,05	!	12,50	)
( 1750	!	2,03.10 <sup>-2</sup>	!	325	!	770,25	!	15,33	)
( 2000	!	2,32.10 <sup>-2</sup>	!	372	!	881,64	!	17,55	)
( 2250	!	2,62.10 <sup>-2</sup>	!	405	!	959,85	!	19,10	)
( 2500	!	2,91.10 <sup>-2</sup>	!	415	!	983,55	!	19,58	)
( 2750	!	3,20.10 <sup>-2</sup>	!	400	!	948,0	!	18,87	)
( 3000	!	3,49.10 <sup>-2</sup>	!	300	!	853,2	!	16,98	)
( 3250	!	3,78.10 <sup>-2</sup>	!	320	!	758,4	!	15,1	)
(									)
=====									

EPROUVETTE D : 80/100  
 ANNEAU DYNAMOMETRIQUE : 2,37  
 CAPACITE 3600 Kg

V : 80  $\mu$  / min.  
 % bit : 6,48

1/ COMPAREUR TRANSVERSALE 1/100mm  
 2/ COMPAREUR LONGITUDINAL 1/100mm

TEMPERATURE: 17°C

Ho : 86mm  
 DIAMETRE : 80mm  
 S : 50,24 cm<sup>2</sup>

=====									
( DEFORMATION LONGITUDINALE	!	FORCE	!	FORCE	!				
( (L.A.) ! Dh/h	!	LA	!	Kg	!				
					bars				
=====									
( 20	!	2,31.10 <sup>-4</sup>	!	2	!	4,74	!	0,094	)
( 50	!	5,78.10 <sup>-4</sup>	!	7,5	!	17,78	!	0,35	)
( 70	!	8,1.10 <sup>-4</sup>	!	11	!	26,07	!	0,52	)
( 100	!	1,16.10 <sup>-3</sup>	!	15	!	35,55	!	0,71	)
( 250	!	2,89.10 <sup>-3</sup>	!	40	!	95	!	1,89	)
( 500	!	5,78.10 <sup>-3</sup>	!	119	!	282	!	5,61	)
( 750	!	8,67.10 <sup>-3</sup>	!	182	!	431,34	!	8,59	)
( 1000	!	1,16.10 <sup>-2</sup>	!	262	!	620,54	!	12,36	)
( 1250	!	1,44.10 <sup>-2</sup>	!	298	!	706,26	!	14,06	)
( 1500	!	1,73.10 <sup>-2</sup>	!	366	!	867,42	!	17,26	)
( 1750	!	2,02.10 <sup>-2</sup>	!	378	!	895,86	!	17,83	)
( 2000	!	2,31.10 <sup>-2</sup>	!	393,8	!	933,31	!	18,58	)
( 2100	!	2,43.10 <sup>-2</sup>	!	393	!	931,41	!	18,54	)
( 2250	!	2,60.10 <sup>-2</sup>	!	383	!	907,71	!	18,07	)
(	!		!		!		!		)
=====									

EPROUVETTE D : 80/100

V : 250  $\mu$  / min.

ANNEAU DYNAMOMETRIQUE : 2,37

% bit : 5,73

CAPACITE 3600 Kg

1/ COMPAREUR TRANSVERSALE 1/100mm

2/ COMPAREUR LONGITUDINAL 1/100mm

TEMPERATURE: 17°C

Ho : 85mm

DIAMETRE : 80mm

S : 50,24 cm<sup>2</sup>

( DEFORMATION LONGITUDINALE	!	FORCE	!	FORCE	!		)		
( (L.A.) ! Dh/h	!	LA	!	Kg	!	bars	)		
(	!		!		!		)		
( 20	!	$2,35 \cdot 10^{-4}$	!	3	!	7,11	!	0,14	)
( 50	!	$5,88 \cdot 10^{-4}$	!	7,5	!	17,78	!	5,35	)
( 70	!	$8,23 \cdot 10^{-4}$	!	10	!	23,7	!	0,47	)
( 100	!	$1,18 \cdot 10^{-3}$	!	15	!	35,55	!	0,71	)
( 200	!	$2,35 \cdot 10^{-3}$	!	32	!	75,84	!	1,51	)
( 250	!	$2,94 \cdot 10^{-3}$	!	40	!	94,8	!	1,89	)
( 500	!	$5,88 \cdot 10^{-3}$	!	118	!	279,66	!	5,57	)
( 750	!	$8,82 \cdot 10^{-3}$	!	182	!	431,34	!	8,58	)
( 1000	!	$1,18 \cdot 10^{-2}$	!	245	!	580,65	!	11,56	)
( 1250	!	$1,47 \cdot 10^{-2}$	!	305	!	722,85	!	14,39	)
( 1500	!	$1,76 \cdot 10^{-2}$	!	362	!	857,94	!	17,08	)
( 1750	!	$2,06 \cdot 10^{-2}$	!	415	!	983,55	!	19,58	)
( 2000	!	$2,35 \cdot 10^{-2}$	!	459	!	1087,83	!	21,65	)
( 2250	!	$2,65 \cdot 10^{-2}$	!	489	!	1158,93	!	23,07	)
( 2500	!	$2,94 \cdot 10^{-2}$	!	504	!	1194,48	!	23,77	)
( 2750	!	$3,23 \cdot 10^{-2}$	!	505,8	!	1198,74	!	23,86	)
( 3000	!	$3,53 \cdot 10^{-2}$	!	504	!	1194,48	!	23,77	)
(	!		!		!		!		)

EPROUVETTE D : 80/100

V : 80  $\mu$  / min.

ANNEAU DYNAMOMETRIQUE : 2,37

% bit : 5,73

CAPACITE 3600 Kg

1/ COMPAREUR TRANSVERSALE 1/100mm

2/ COMPAREUR LONGITUDINAL 1/100mm

TEMPERATURE: 17°C

Ho : 85mm

DIAMETRE : 80mm

S : 50,24 cm<sup>2</sup>

( DEFORMATION LONGITUDINALE	!	FORCE	!	FORCE	!		)
( (L.A.) ! Dh/h	!	LA	!	Kg	!	bars	)
( _____ ! _____	!	_____	!	_____	!	_____	)
( 20 ! 2,35.10 <sup>-2</sup>	!	3	!	7,11	!	0,74	)
( 50 ! 5,88.10 <sup>-2</sup>	!	6	!	14,22	!	0,28	)
( 70 ! 8,23.10 <sup>-2</sup>	!	8,5	!	20,15	!	0,40	)
( 100 ! 1,17.10 <sup>-3</sup>	!	12	!	28,44	!	0,57	)
( 250 ! 2,94.10 <sup>-3</sup>	!	35	!	82,95	!	1,65	)
( 500 ! 5,88.10 <sup>-3</sup>	!	115	!	272,55	!	5,42	)
( 750 ! 8,82.10 <sup>-3</sup>	!	179	!	424,23	!	8,44	)
( 1000 ! 1,17.10 <sup>-2</sup>	!	244	!	578,28	!	11,51	)
( 1250 ! 1,47.10 <sup>-2</sup>	!	305	!	722,85	!	14,39	)
( 1500 ! 1,76.10 <sup>-2</sup>	!	362	!	857,94	!	17,08	)
( 1750 ! 2,06.10 <sup>-2</sup>	!	409	!	969,33	!	19,29	)
( 2000 ! 2,35.10 <sup>-2</sup>	!	437	!	1035,69	!	20,61	)
( 2350 ! 2,76.10 <sup>-2</sup>	!	470	!	1042,8	!	20,76	)
( 2400 ! 2,82.10 <sup>-2</sup>	!	439	!	1040,43	!	20,71	)
( 2500 ! 2,94.10 <sup>-2</sup>	!	432	!	1023,84	!	20,38	)
( !	!	!	!	!	!	!	)

Annexe 4

```

10 !          REN
20 !          INDENT 10,5
30 !          RE-STORE "ANTRI"
40 !          DIM Sb(20),Vg(20),Vb(20),V(20)
50 ! INTRODUCTION DES DONNEES
60 !          PRINTER IS 0
70          INPUT "Module du bitume Sb=";Sb
80          INPUT "Volume du granulat Vg=";Vg
90          INPUT "Volume du bitume Vb=";Vb
100         INPUT "Volume du vide V=";V
110 ! CALCUL DU MODULE DE L'ENROBE POUR 3^(9)A=
120         A=10.62-1.342*(100-Vg)/(Vg+Vb)
130         PRINT "A=";A
140 ! CALCUL DE L'ENROBE POUR 10^(8)
150         B=8.0+5.68*10^(-3)*Vg+2.135*10^(-4)*Vg^2
160         PRINT "B=";B
170 ! CALCUL DE LA PENTE
180         IF (Sb<10^7) OR (Sb>10^9) THEN Fin
190         N=.6*LG((1.37*Vb^2-1)/(1.33*Vb-1))
200         PRINT "N=";N
210         M=1.12*(A-B)/LGT(30)
220         PRINT "M=";M
230 ! CALCUL DU MODULE DE L'ENROBE POUR UN MODULE DONNE
240         IF (10^7<=Sb)<=10^9 THEN
250             GOTO Alpha
260         ELSE
270             GOTO Beta
280         END IF
290 Alpha:L1=(M+N)/2*(LGT(Sb)-8.0)+(M-N/2)*(LGT(Sb)-8.0)+B
300         PRINT "L1=";L1
310 ! CALCUL DU MODULE DE L'ENROBE
320         Sm1=10^L1
330         PRINT "Sm1=";Sm1
340         GOTO Teta
350 Beta:IF (10^9<=Sb)<=3*10^9 THEN
360             GOTO Alpha1
370         ELSE
380             GOTO Beta1
390         END IF
400 Alpha1:L2=B+M+(A-B-M)*(LGT(Sb)-9)/LGT(3)
410         PRINT "L2=";L2
420 ! CALCUL DU MODULE DE L'ENROBE
430         Sm2=10^L2
440         PRINT "Sm2=";Sm2
450         GOTO Teta
460 Beta1:GOTO Fin
470 Teta: ! CALCUL DE L'ANGLE DE PHASE
480         IF Vb<=40 THEN GOTO Alpha2
490 Alpha2:U=LGT(Sb/5*10^6)
500         V=LGT(Sb/2*10^9)
510         W=EXP(U+.974*Vb^(-.172)/V)
520         Phi=16.36*Vb^.352*W
530         PRINT "Phi=";Phi
540 Fin: END

```

FORMULATION D'UNE GRAVE PITOME

T = 18°C

CARAC.	Sb (N/m <sup>2</sup> ) (10 <sup>-8</sup> )	Vg (%)	Vb (%)	V (%)	Sm (N/m <sup>2</sup> ) (10 <sup>-10</sup> )	Phi (°)
FORMULE						
A	1.0	86.96	3.12	9.92	1.28	46.21
B	1.0	87.16	3.32	9.52	1.31	46.91
C	1.0	87.70	3.54	8.76	1.38	47.65
D	1.0	88.25	3.75	8.00	1.46	48.37

T = 10°C

CARAC.	Sb (N/m <sup>2</sup> ) (10 <sup>-8</sup> )	Vg (%)	Vb (%)	V (%)	Sm (N/m <sup>2</sup> ) (10 <sup>-10</sup> )	Phi (°)
FORMULE						
A	2.0	86.96	3.12	9.92	1.92	45.34
B	2.0	87.16	3.32	9.52	1.96	47.05
C	2.0	87.70	3.54	8.76	2.05	47.75
D	2.0	88.25	3.75	8.00	2.13	48.47

T = 0°C

CARAC.	Sb (N/m <sup>2</sup> ) (10 <sup>-8</sup> )	Vg (%)	Vb (%)	V (%)	Sm (N/m <sup>2</sup> ) (10 <sup>-10</sup> )	Phi (°)
FORMULE						
A	4.0	86.96	3.12	9.92	2.90	46.47
B	4.0	87.16	3.32	9.52	2.93	47.18
C	4.0	87.70	3.54	8.76	3.03	47.92
D	4.0	88.25	3.75	8.00	3.13	48.60

T = 30°C

CARAC.	Sb(N/m2)	Vg(%)	Vb(%)	V(%)	Sm(N/m2)	Phi (°)
FORMULE	(10.7)				(10.10)	
A	4.0	91.37	5.31	3.32	1.32	52.51
B	4.0	91.55	5.53	2.92	1.35	53.05
C	4.0	91.75	5.74	2.51	1.39	52.55
D	4.0	91.52	5.97	2.51	1.34	54.09

T = 18°C

CARAC.	Sb(N/m2)	Vg(%)	Vb(%)	V(%)	Sm(N/m2)	Phi (°)
FORMULE	(10.8)				(10.10)	
A	1.0	91.37	5.31	3.32	2.00	52.70
B	1.0	91.55	5.53	2.92	2.04	53.24
C	1.0	91.75	5.74	2.51	2.08	52.75
D	1.0	91.52	5.97	2.51	2.03	54.29

T = 10°C

CARAC.	Sb(N/m2)	Vg(%)	Vb(%)	V(%)	Sm(N/m2)	Phi (°)
FORMULE	(10.8)				(10.10)	
A	2.0	91.37	5.31	3.32	2.74	52.84
B	2.0	91.55	5.53	2.92	2.78	53.29
C	2.0	91.75	5.74	2.51	2.72	52.89
D	2.0	91.52	5.97	2.51	2.77	54.43

T = 0°C

CARAC.	Sb(N/m2)	Vg(%)	Vb(%)	V(%)	Sm(N/m2)	Phi (°)
FORMULE	(10.8)				(10.10)	
A	4.0	91.37	5.31	3.32	3.75	52.97
B	4.0	91.55	5.53	2.92	3.79	53.52
C	4.0	91.75	5.74	2.51	3.84	54.02
D	4.0	91.52	5.97	2.51	3.78	54.56



T=0°

FORMULATION D'UN BETON BITUMINEUX 80/100

T=0°c

CARAC.	Sb(N/m²)	Vg(%)	Vb(%)	V(%)	Sm(N/m²)	Phi (°)
FORMULE	(10 <sup>-8</sup> )				(10 <sup>-10</sup> )	
A	2.0	92.09	5.42	2.49	2.90	53.12
B	2.0	92.28	5.64	2.08	2.94	53.65
C	2.0	92.06	5.86	2.08	2.89	54.17
D	2.0	92.24	6.09	1.67	2.74	54.70

T=10°

T=10°c

CARAC.	Sb(N/m²)	Vg(%)	Vb(%)	V(%)	Sm(N/m²)	Phi (°)
FORMULE	(10 <sup>-8</sup> )				(10 <sup>-10</sup> )	
A	1.0	92.09	5.42	2.49	2.15	52.97
B	1.0	92.28	5.64	2.08	2.19	53.51
C	1.0	92.06	5.86	2.08	2.15	54.03
D	1.0	92.24	6.09	1.67	2.19	54.56

T=18°

T=18°c

CARAC.	Sb(N/m²)	Vg(%)	Vb(%)	V(%)	Sm(N/m²)	Phi (°)
FORMULE	(10 <sup>-8</sup> )				(10 <sup>-10</sup> )	
A	2.0	92.09	5.42	2.49	1.08	52.63
B	2.0	92.28	5.64	2.08	1.11	53.16
C	2.0	92.06	5.86	2.08	1.07	53.69
D	2.0	92.24	6.09	1.67	1.10	54.21

