

وزارة التربية الوطنية  
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT

*Genie Civil*

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Les modules complexes des  
encodés lumineux.*

Proposé par :

M<sup>r</sup> LARABI  
M<sup>me</sup> AIT MOKHTAR

Etudié par :

N. HADJEBAR  
A. MALOUM

Dirigé par

M<sup>r</sup> LARABI  
M<sup>me</sup> AIT MOKHTAR  
M<sup>r</sup> SILHANI

PROMOTION

*Juillet 1993*

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التربية الوطنية  
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT *Genie Civil*

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Les modules complexes des  
envelopes lumineuses.*

Proposé par :

*M<sup>r</sup> LAKAUI  
M<sup>r</sup> AIT MOKHTAR*

Etudié par :

*M. HADJEBAR  
A. MALOUM*

Dirigé par

*M<sup>r</sup> LAKAUI  
M<sup>r</sup> AIT MOKHTAR  
M<sup>r</sup> SILHAUI*

PROMOTION

*Juillet 1993*

E.N.P. 10, Avenue Hacem Badi El-Harrach - ALGER



## REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre vive gratitude à madame AIT-MOKHTAR et monsieur LARADI de l'USTHB pour la confiance qu'ils nous ont accordés et l'aide très précieuse qu'ils nous ont prodigués.

Nous remercions également monsieur SILHADI, qui nous a fait l'honneur d'analyser les différentes parties de notre mémoire et pour l'intérêt qu'il a manifesté pour notre travail.

Nous sommes très reconnaissants à monsieur T.ILLOUL pour les moyens qu'il a mis à notre disposition et sa contribution combien précieuse à l'élaboration de notre travail. Nous remercions également monsieur HIBOUCHE pour le mal qu'il s'est donné pour nous.

Nos remerciements s'adressent aussi au personnel de la bibliothèque et du périodique de l'Ecole Nationale Polytechnique, et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT : Génie-civil  
PROMOTEURS : Mme Aït-Mokhtar.K  
Mr Laradi.N  
Mr Silhadi.K  
ELEVES INGENIEURS : Melle Hadjebar.N  
Mr Maloum.A



الموضوع: المعامل المركب للمواد المركبة  
الملخص: إن الأساس النظري لتطبيقات التقدير المقترحة حايا، هو تحليل الإجهادات والتشوهات لنظام متعددة الطبقات الممثل لقارعة الطريق. وتطبيقهم يستلزم معرفة دقيقة للمفاييس المميزة لسلوك المواد المركبة لمختلف طبقات النظام الميكانيكي.

علما بأن المواد المتفجرة صفا، يمكن تمييزها كيميائيا بواسطة ثابتين: معامل بواسون\* ومعامل يونغ\*. فإن المواد المحتوية على الراوبلر الهيدروكربونية، بسبب إحتوائهم على الزفت الذي يمنع للخليط تصرفا زلجا متمنظا، لا يمكن تعريفها بنفس البساطة ومن هنا يعرف المعامل المركب للأغلفة الهيدروكربونية.

TITRE: Le module complexe des enrobés bitumineux

RESUME: Le fondement théorique des méthodes de dimensionnement actuellement proposées est l'analyse des contraintes et des déformations d'un système multicouche représentant la chaussée. Leur mise en pratique nécessite, entre autre, la connaissance précise des grandeurs caractérisant le comportement mécanique des matériaux constitutifs des différentes couches de ce système.

S'il est bien connu que les matériaux purement élastiques peuvent être caractérisés qualitativement par deux constantes, le module de Young et le coefficient de Poisson, les matériaux aux liants hydrocarbonés quant à eux, du fait de la présence du bitume qui confère au mélange obtenu un comportement viscoélastique ne peuvent être définis d'une manière aussi simple. D'où la définition du module complexe des enrobés bitumineux.

TITLE: Complex modulus of bituminous plump

ABSTRACT: The theoretical foundation of dimensionnement methods, suggested now, is the stresses and deformations analysis representing a multistrata system of the roadway. Their practices require a precise knowledge of grandeur characterizing mechanic behavior of the materials constituting the different strata of this system.

If it's known that the materials purely elastic can be characterized qualitatively with two constants, Young modulus and Poisson coefficient, as for the materials with hydrocarbon bonding contain bitumens which confire a visco-elastic behavior to the mixture. there by, they can't be defined with as a simple manner. So we introduce the complex modulus of bituminous plump.

## Table des Matières

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Chapitre 1 | INTRODUCTION   | 3  |
| 1.1        | HISTORIQUE ET EVOLUTION . . . . .  | 6  |
| Chapitre 2 | GENERALITES SUR LES BITUMES  | 9  |
| 2.1        | INTRODUCTION . . . . .   | 9  |
| 2.2        | TECHNIQUES DE RAFFINAGE DES BITUMES . . . . .                              | 9  |
| 2.2.1      | LA DISTILLATION . . . . .  | 10 |
| 2.2.2      | LE SOUFFLAGE . . . . .   | 11 |
| 2.2.3      | LA SEPARATION SELECTIVE PAR SOLVANT<br>(DESASPHALTAGE) . . . . .           | 12 |
| 2.2.4      | LE CRAQUAGE . . . . .  | 12 |
| 2.3        | COMPOSITION DES BITUMES . . . . .  | 12 |
| 2.3.1      | GROUPES GENERIQUES FONDAMENTAUX . . . . .                                  | 13 |
| 2.4        | DEFINITION DES BITUMES . . . . .   | 14 |
| 2.4.1      | DEFINITION . . . . .   | 14 |
| 2.4.2      | EMPLOI DES DIFFERENTS BITUMES . . . . .                                    | 15 |
| 2.4.3      | PROPRIETES DES BITUMES ET DE LEURS<br>DERIVES . . . . .                    | 16 |
| 2.4.3.1    | PROPRIETES PHYSIQUES . . . . .   | 16 |
| 2.4.3.2    | RESISTANCE A L'ATTAQUE CHIMIQUE . . . . .                                  | 16 |
| 2.5        | PRINCIPAUX ESSAIS DE LABORATOIRE POUR LE<br>CONTROLE DES BITUMES . . . . . | 17 |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 2.5.1                                       | INTRODUCTION . . . . .   | 17 |
| 2.5.2                                       | CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANIKES<br>DES BITUMES . . . . . | 18 |
| 2.5.2.1                                     | MESURE DE LA CONSISTANCE DU BITUME<br>. . . . .                  | 18 |
| 2.5.2.2                                     | POINT DE FRAAS . . . . .   | 20 |
| 2.5.2.3                                     | ESSAI DE POINT D'ECLAIR (POINT<br>D'INFLAMMABILITE) . . . . .    | 20 |
| 2.5.2.4                                     | TEMPERATURE DE RAMOLLISSEMENT (NFT<br>66008) . . . . .           | 21 |
| 2.5.2.5                                     | PENETRATION DES BITUMES . . . . .                                | 22 |
| 2.5.2.6                                     | VISCOSITE DES BITUMES . . . . .                                  | 26 |
| 2.5.2.7                                     | ESSAI DE POIDS SPECIFIQUES . . . . .                             | 28 |
| 2.5.2.8                                     | ESSAI DE PERTE DE MASSE AU<br>CHAUFFAGE . . . . .                | 28 |
| 2.5.2.9                                     | <b>ESSAI</b> DE DUCTILITE . . . . .                              | 29 |
| 2.6   | SPECIFICATIONS FRANCAISES SUR LES BITUMES . . . . .              | 29 |
| Chapitre 3 LES ENROBES BITUMINEUX . . . . . |  | 33 |
| 3.1   | INTRODUCTION . . . . .   | 33 |
| 3.2   | LES GRANULATS . . . . .  | 35 |
| 3.2.1                                       | LES QUALITES EXIGEEES . . . . .                                  | 35 |
| 3.2.2                                       | ORIGINE DES GRAVES . . . . .                                     | 36 |
| 3.2.2.1                                     | LES GRAVES BRUTES NATURELLES . . . . .                           | 36 |
| 3.2.2.2                                     | LES GRAVES NATURELLES CONCASSEES . . . . .                       | 36 |
| 3.2.2.3                                     | LES GRAVES ENTIEREMENT CONCASSEES<br>. . . . .                   | 36 |
| 3.2.3                                       | LA GRANULOMETRIE . . . . .                                       | 37 |

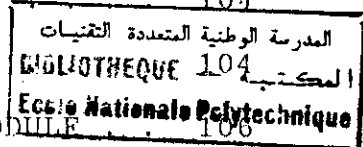
|         |   |    |
|---------|---|----|
| 3.2.4   | LA PROPRETE . . . . .   | 38 |
| 3.2.4.1 | LES PRINCIPAUX ESSAIS SUR LES<br>GRANULATS . . . . .              | 38 |
| 3.2.5   | LE FILLER . . . . .   | 40 |
| 3.3     | LES ENROBES BITUMINEUX . . . . .                                  | 40 |
| 3.3.1   | CLASSIFICATION DES ENROBES . . . . .                              | 41 |
| 3.3.1.1 | CLASSIFICATION SELON LE LIANT<br>UTILISE . . . . .                | 41 |
| 3.3.1.2 | CLASSIFICATION SELON LE CALIBRE<br>MAXIMALE DU GRANULAT . . . . . | 42 |
| 3.3.2   | QUALITES EXIGEEES D'UN ENROBE . . . . .                           | 42 |
| 3.3.3   | UTILISATION DES ENROBES BITUMINEUX . . . . .                      | 44 |
| 3.3.3.1 | BETON BITUMINEUX . . . . .  | 45 |
| 3.3.3.2 | GRAVE BITUME . . . . .  | 46 |
| 3.4     | ETUDE DE LA COMPOSITION . . . . .                                 | 47 |
| 3.4.1   | PRINCIPE DE FORMULATION . . . . .                                 | 47 |
| 3.4.2   | COMPOSITION GRANULOMETRIQUE . . . . .                             | 47 |
| 3.4.2.1 | BETON BITUMINEUX . . . . .  | 48 |
| 3.4.2.2 | GRAVE-BITUME . . . . .  | 48 |
| 3.4.3   | TENEUR EN FILLER . . . . .  | 49 |
| 3.4.4   | TENEUR EN LIANT . . . . .   | 50 |
| 3.4.4.1 | METHODE DU L.C.P.C . . . . .                                      | 50 |
| 3.4.4.2 | LA METHODE MARSHALL . . . . .                                     | 51 |
| 3.5     | LES ESSAIS SUR LES ENROBES BITUMINEUX . . . . .                   | 53 |
| 3.5.1   | CONSIDERATIONS GENERALES . . . . .                                | 53 |
| 3.5.2   | ESSAIS TRADITIONNELS . . . . .                                    | 54 |
| 3.5.2.1 | ESSAI MARSHALL . . . . .  | 54 |
| 3.5.2.2 | ESSAI DURIEZ . . . . .  | 54 |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| 3.5.3      | ESSAIS NOUVEAUX . . . . .  | 56 |
| 3.5.3.1    | ESSAI D'ORNIERAGE . . . . .  | 56 |
| 3.5.3.2    | ETUDE DE COMPACTAGE A LA PRESSE DE<br>CISAILLEMENT GIRATOIRE . . . . . | 56 |
| 3.5.4      | NOMENCLATURE DES ESSAIS RELATIFS AUX<br>ENROBES BITUMINEUX . . . . .   | 57 |
| 3.5.4.1    | LES BETONS BITUMINEUX . . . . .  | 57 |
| 3.5.4.2    | GRAVE-BITUME . . . . .   | 59 |
| Chapitre 4 | LA RHEOLOGIE . . . . .   | 61 |
| 4.1        | INTRODUCTION . . . . .   | 61 |
| 4.2        | LES DIFFERENTS COMPORTEMENTS RHEOLOGIQUES . . . . .                    | 63 |
| 4.2.1      | LES COMPORTEMENTS SIMPLES . . . . .                                    | 64 |
| 4.2.1.1    | ELASTICITE PARFAITE . . . . .  | 64 |
| 4.2.1.2    | LA VISCOSITE . . . . .   | 65 |
| 4.2.1.3    | LIQUIDE PARFAITEMENT VISQUEUX(liquide<br>newtonnien) . . . . .         | 66 |
| 4.2.1.4    | LA PLASTICITE . . . . .  | 67 |
| 4.2.1.5    | SOLIDES PARFAITEMENT PLASTIQUES<br>INELASTIQUES . . . . .              | 68 |
| 4.2.2      | LES COMPORTEMENTS COMPLEXES . . . . .                                  | 69 |
| 4.2.2.1    | SOLIDES ELASTIQUES PARFAITEMENT<br>PLASTIQUES . . . . .                | 69 |
| 4.2.2.2    | LES CORPS VISCOELASTIQUES . . . . .                                    | 70 |
| 4.2.2.3    | LA VISCOPLASTICITE . . . . .   | 74 |
| 4.2.2.4    | SOLIDES ELASTIQUES PARFAITEMENT<br>VISCOPLASTIQUES . . . . .           | 75 |
| 4.2.2.5    | AUTRES COMPORTEMENTS . . . . .   | 76 |



|            |  |     |
|------------|--|-----|
| 4.3        | LES MODELES RHEOLOGIQUE S  | 78  |
| 4.3.1      | MODELE RHEOLOGIQUE POUR LE COMPORTEMENT<br>VISCOELSTIQUE LINEAIRE . . . . .                | 79  |
| 4.3.1.1    | LE MATERIAU VISCOELASTIQUE LINEAIRE<br>NON VIEILLISSANT . . . . .                          | 79  |
| 4.3.2      | MODELE RHEOLOGIQUE POUR LE COMPORTEMENT<br>PLASTIQUE . . . . .                             | 80  |
| 4.3.3      | MODELE RHEOLOGIQUE POUR LES SOLIDES<br>ELASTIQUES PARFAITEMENT<br>VISCOPLASTIQUE . . . . . | 82  |
| Chapitre 5 | MODULE COMPLEXE  | 85  |
| 5.1        | INTRODUCTION . . . . .   | 85  |
| 5.2        | VARIATION DU MODULE DE RIGIDITE . . . . .  | 88  |
| 5.2.1      | ABAQUE DE VAN DER POEL . . . . .   | 88  |
| 5.2.2      | UTILISATION DE L'ABAQUE DE VAN DER<br>POEL . . . . .                                       | 90  |
| 5.3        | METHODE DE HEUKELOM ET KLOMP . . . . .   | 91  |
| 5.4        | METHODE DE SAUNIER . . . . .   | 93  |
| 5.5        | METHODE DE VERSTRAETEN . . . . .   | 95  |
| Chapitre 6 | METHODE DE FRANCKEN  | 97  |
| 6.1        | INTRODUCTION . . . . .   | 97  |
| 6.2        | PARAMETRES CARACTERISANT LES MELANGES . . . . .  | 97  |
| 6.3        | CALCUL DU MODULE COMPLEXE . . . . .  | 98  |
| 6.4        | PROPRIETES REMARQUABLES DU MODULE COMPLEXE DES<br>MELANGES HYDROCARBONES . . . . .         | 102 |
| 6.4.1      | LOI D'EQUIVALENCE FREQUENCE-<br>TEMPERATURE . . . . .                                      | 102 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 6.4.2   | REPRESENTATION DU MODULE COMPLEXE DANS LE<br>PLAN COLE-COLE . . . . .             | 101 |
| 6.5     | CHOIX D'UN MODELE RHEOLOGIQUE . . . . .   | 104 |
| 6.6     | DETERMINATION DES PARAMETRES DU MODULE . . . . .                                  | 106 |
| 6.6.1   | METHODE GRAPHIQUE . . . . .   | 106 |
| 6.6.2   | METHODE ANALYTIQUE . . . . .  | 107 |
| 6.6.2.1 | DETERMINATION DE L'ANGLE $\alpha$ ET DU<br>MODULE $E_{\omega}$ . . . . .          | 108 |
| 6.6.2.2 | CALCUL DES VALEURS APPROCHEES DE B ET<br>$\delta$ . . . . .                       | 108 |
| 6.6.2.3 | CALCUL DE LA COURBE . . . . .   | 111 |
| 6.6.2.4 | CALCUL DU PARAMETRE $\tau$ . . . . .  | 111 |
| 6.7     | RELATION ENTRE LES CARACTERISTIQUES DU MELANGE<br>ET LE MODULE COMPLEXE . . . . . | 112 |
| 6.7.1   | RELATION ENTRE $E_{\omega}$ ET LA COMPOSITION DU<br>MELANGE . . . . .             | 113 |
| 6.7.2   | RELATION ENTRE LE MODULE REDUIT ET LES<br>CARACTERISTIQUES DU BITUME . . . . .    | 115 |
| 6.8     | ETUDE COMPARATIVE DES DIFFERENTES<br>METHODES . . . . .                           | 120 |
| 6.8.1   | EXEMPLE . . . . .   | 120 |
| 6.9     | INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES DE<br>COMPOSITION . . . . .                   | 122 |
| 6.9.1   | INFLUENCE DU TYPE DE BITUME . . . . .   | 122 |
| 6.9.2   | INFLUENCE DE LA TENEUR EN BITUME . . . . .  | 123 |
| 6.9.3   | INFLUENCE DU RAPPORT FILLER/BITUME . . . . .                                      | 123 |
| 6.9.4   | INFLUENCE DU POURCENTAGE DE VIDES . . . . .                                       | 124 |
| 6.9.5   | INFLUENCE DES GRANULATS . . . . .   | 125 |



## 7. CONCLUSION

Annexe A

Annexe B



129

131

**CHAPITRE-1**

**INTRODUCTION**

## Chapitre 1

### INTRODUCTION

L'augmentation permanente en poids et en nombre de la circulation automobile nécessite une amélioration constante de la qualité des chaussées.

Les recherches sur les bitumes et les enrobés bitumineux ont commencé depuis très longtemps. C'est normal, puisque leur utilisation dans la construction et l'entretien des routes est, de très loin, le débouché principal du bitume et que le bitume continue à y tenir un rôle important, tout particulièrement, dans les couches de surface.

L'enrobé bitumineux, dont les rôles initiaux n'étaient que l'imperméabilisation et l'amélioration des qualités de surface, prend une place de plus en plus importante dans les structures routières.

Les recherches doivent donc permettre d'adapter les techniques d'utilisation du bitume à l'évolution des conditions de circulation, de la conception générale des chaussées, de la politique d'entretien et de renforcement et de conditions économiques.

Mais, il est bon, dans un domaine aussi complexe, de faire périodiquement le bilan des résultats obtenus, de les critiquer, de les comparer, pour tenter d'en faire la synthèse et d'aboutir à une véritable amélioration des connaissances plus globales.

En effet, plus le coût du bitume augmente plus il importe de ne pas le gaspiller et de l'utiliser intelligemment. A plus forte raison si apparaissent des craintes de voir, à moyen ou à long terme, se raréfier les approvisionnements.

Il importe donc de connaître les propriétés physico-chimiques des bitumes, d'optimiser les formules de composition et de dimensionner au mieux les différentes couches, grâce à une connaissance aussi complète que possible des propriétés de résistance à l'orniérage à la fatigue.

Dans ces conditions, il semble indispensable de disposer d'une méthode permettant de déterminer rationnellement l'épaisseur d'enrobé à mettre en oeuvre. En fait dans le cas des chaussées souples, il ne s'agit que d'une approximation commode. En effet les enrobés bitumineux sont des corps viscoélastiques et présentent par là même des propriétés mécaniques complexes.

A l'heure actuelle, dans le monde entier un certain nombre de mathématiciens et de physiciens essayent d'élaborer une théorie viscoélastique du calcul des chaussées. Pour qu'une telle théorie puisse être appliquée, il faut évidemment connaître les propriétés mécaniques des matériaux de base dans les conditions aussi proches que possible de celles de leur utilisation sur la

route. Là encore, de nombreuses recherches sont en cours à l'étranger.

L'enrobé bitumineux est un corps hétérogène, le bitume lui confère son caractère viscoélastique et la partie minérale est responsable de sa résistance.

D'autre part le mot enrobé bitumineux est suffisamment vague pour englober une grande variété de matériaux dont le comportement sera très différent pour une sollicitation donnée; C'est probablement la raison pour laquelle, malgré l'importance des moyens mis en oeuvre dans le monde entier, les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux sont encore mal connues.

Etant donné le coût très élevé des essais permettant le calcul du module complexe même dans les grands laboratoires dans le monde, et comme de tels laboratoires de recherches ne sont pas nombreux en Algérie, notre étude consistera en une recherche bibliographique qui permettra de calculer le module complexe par le biais des méthodes théoriques.

Cependant, il nous était nécessaire de faire appel à des méthodes expérimentales empiriques.

Le but de la présente étude est d'approfondir nos connaissances sur les différentes propriétés physico-chimiques des bitumes routiers. Nous allons donc consacrer une bonne partie de ce travail, pour parler de leurs caractéristiques mécaniques; Nous étudierons les différentes qualités exigées des

enrobés bitumineux et les éléments les constituants ainsi que les différentes méthodes de formulations existantes.

A travers un rappel sur les divers comportements et modèles rhéologiques, nous traiterons la rhéologie des matériaux. Nous exposerons ensuite les différentes méthodes calculant le module complexe et nous ferons une étude critique.

Nous avons pris le soin de détailler la méthode de FRANCKEN qui est basée sur le modèle biparabolique et le principe d'équivalence-température.

Un programme informatique a été élaboré pour le calcul du module complexe des enrobés bitumineux.

On termine, enfin, notre étude, par la comparaison des résultats avec ceux des différents auteurs et l'influence des divers paramètres de compositions sur la valeur du module complexe.

## 1.1 HISTORIQUE ET EVOLUTION

Depuis longtemps déjà, le bitume s'est imposé comme matériau de base dans la construction des routes et bâtiment. Dans le monde moderne, le bitume est obtenu par raffinage du pétrole brut. Dans l'antiquité, les grandes quantités de bitume qui



ont été utilisées dans une multitude de buts,provenaient de dépôts de surface dont une des formes était ce que l'on appelle des infiltrations causés par la fissuration de la roche de couverture de la nappe pétrolifère.Quand cela survenait la pression des gaz chassait le pétrole à la surface et il se formait graduellement un étang de bitume.L'exemple,peut-être le plus intéressant de cette formation de bitume,était situé dans la mer morte.

Périodiquement il apparaissait en sa surface de longues masses étroites de bitume que les pêcheurs qui les récoltaient,appelaient taureaux et veaux.

Nous relevons chez un écrivain ancien:"La venue de l'asphalte est annoncée vingt jours avant son arrivée,car tout autour du lac une odeur nauséabonde est portée par le vent... Le voisinage déjà inflammable et qui est envahi par une odeur désagréable,rend les riverains malades et ceux-ci meurent jeunes."

La source de ce bitume serait des infiltrations dans le fond de la mer.L'autre forme de dépôt était exposé à l'air.Les fractions les plus légères de l'huile qu'il contenait s'évaporaient,laissant le résidu non volatil,plus lourd dans la roche calcaire ou gréseuse.D'ou le terme : roche asphaltique.

En général ces roches asphaltiques contenaient moins de 20 % de bitume qui était extrait en chauffant la roche.Dans ce procédé,les particules grossières se déposaient,laissant les matières minérales plus fines en suspension.

La présence de ces matériaux fins dans les échantillons du bitume ancien est indication sûre qu'il provenait de roches asphaltiques. Bref, le bitume était ainsi connu des peuples de l'ancien temps, et au moins depuis cinq mille ans, ils l'utilisaient pour ses qualités de liant et de produits d'étanchéité.

Au cours des siècles suivants, il fût utilisé au moyen orient pour les puits, bassins et salle de bains. En fait, il était utilisé partout où le briquetage était exposé aux dégradations par la pluie ou le ruissellement des eaux. Il était également utilisé sur une grande échelle pour consolider et étancher les remblais des réseaux d'irrigation dont dépendaient la vie des peuples. Un grand nombre de ses ouvrages sont encore intacts aujourd'hui.

L'avènement de l'industrie pétrolière depuis 1860, conséquences du développement des méthodes de forage, a donné naissance à une nouvelle source abondante de bitume et de plus, par suite des développements des véhicules à moteurs, à une nouvelle demande importante de ce produit comme moyen de préserver les chaussées de l'effet destructeur des transports modernes.

# CHAPITRE-2

## LES BITUMES

## Chapitre 2

### GENERALITES SUR LES BITUMES

#### 2.1 INTRODUCTION

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

On distingue deux grandes classes:

-Les goudrons et brais de houille;

-Les bitumes naturels et brais de pétrole.

Les goudrons de houille proviennent de la distillation, en vase clos et en atmosphère non oxydante, de divers variétés de charbon notamment des charbons gras. Les brais de houille sont le résidu résineux des goudrons soumis à la distillation. Aux brais de houille correspondent les brais de pétrole les bitumes naturels. Les liants hydrocarbonés normalement utilisés sur les routes sont les goudrons et les bitumes.

Nous nous intéressons en particulier aux bitumes.

## 2.2 TECHNIQUES DE RAFFINAGE DES BITUMES

Pratiquement la totalité des bitumes utilisés à l'heure actuelle provient de la transformation du pétrole. Quatre grands procédés sont utilisés pour préparer les bitumes:

- La distillation;
- Le soufflage;
- La séparation sélective par solvant (desasphaltage);
- Le craquage.

### 2.2.1 LA DISTILLATION

C'est un procédé physique de séparation des constituants d'un mélange par leur point d'ébullition. Dans un mélange de plusieurs liquides de différents points d'ébullition, chaque composant a sa propre pression de vapeur et la pression totale est la somme des pressions partielles des composants. Le mélange bout quand la pression totale de vapeurs est égale à la pression qui s'exerce sur ce mélange.

On fait circuler le brut dans des échangeurs pour élever sa température puis on l'envoie dans un four ou, par passage dans un réseau serpentins, il est porté en un temps très court à une température de 320°C. Il passe ensuite dans une colonne de distillation dont la pression, tout au moins au bas de l'unité, est voisine de la pression atmosphérique.

La fraction retenue au fond du four dans laquelle se trouve le bitume est envoyée de nouveau dans une tour ou en un temps très court, elle est portée à 380°c, puis de là envoyée dans une tour dite sous vide dont la pression varie entre 0,1 bars au bas de l'unité et 0,03 bars en haut.

On obtient nécessairement en tête les distillats légers, puis les distillats moyens et lourds. En agissant sur différents paramètres, débit, vide, température, on obtient des bitumes plus au moins dur (cinq catégories).

On fabrique en général deux bitumes 180/220 et 20/30 qui sont stockés puis mélangés dans un proportionneur, ce qui donne les qualités intermédiaires 40/50, 60/70 et 80/100.

### 2.2.2 LE SOUFFLAGE

Il peut arriver que pour des raisons d'équilibre, des produits à faire sortir de la raffinerie, le fond de la colonne sous vide soit trop mou pour être considéré comme un bitume. On lui fait alors un traitement destiné à augmenter sa consistance. Ce procédé consiste à souffler légèrement une base obtenue après distillation sous vide, c'est à dire injecter de l'air dans la base portée à haute température et ceci jusqu'à obtention d'un bitume 180/220, puis en continuant et en utilisant éventuellement une base plus visqueuse jusqu'au bitume 20/30.

Le soufflage réduit la susceptibilité à la température et élimine en partie les paraffines.

### 2.2.3 LA SEPARATION SELECTIVE PAR SOLVANT (DESASPHALTAGE)

On peut aussi traiter le résidu par un solvant (propane ou butane) pour en extraire une fraction soluble dans le solvant qui servira de base à la fabrication de lubrifiants.

La fraction insoluble est le bitume de désasphaltage. Le rendement et la consistance du bitume obtenu dépendent de la température, de la pression, de la composition du solvant et de la nature du résidu.

Cette opération concentre les molécules de nature aromatique dans le bitume obtenu. Ceci explique la susceptibilité à la température assez élevée des bitumes de désasphaltage.

### 2.2.4 LE CRAQUAGE

Si on traite du résidu à des températures comprises entre 430°C et 500°C et sous pression, on obtient comme fraction lourde après distillation un bitume craqué dur (brais de pétrole) utilisable pour l'agglomération de fines de charbon.

### 2.3 COMPOSITION DES BITUMES

Les bitumes sont des mélanges très complexes d'hydrocarbures et de molécules hydrocarbonées contenant des proportions notables d'hétéroatomes (carbone: 80 - 85%;

Hydrogène:10 - 15%;Oxygène:2 - 3%) et des traces de soufre,azote

### 2.3.1 GROUPES GÉNÉRIQUES FONDAMENTAUX

Grâce à la combinaison de différentes méthodes de fractionnement, les bitumes sont souvent séparés en quatre grands groupes génériques obtenus de la façon suivante:

-Les asphaltènes sont séparés par précipitation à l'heptane normal(ou un autre solvant aliphatique saturé).

-Les maltènes sont soumis à une chromatographie liquide et séparées entre trois familles(saturés, aromatiques et résines).

Les propriétés principales de ses fractions sont les suivantes :

\* Les saturés: Cette famille est constituée de molécules principalement paraffiniques. Ces molécules peuvent cependant contenir des cycles naphthéniques.

Ce matériau est incolore ou légèrement jaunâtre. Il se comporte un peu comme une graisse ce qui indique qu'il est partiellement cristallisé.

\* Les aromatiques: Ce sont des huiles visqueuses de couleur brun sombre. Environ 30% des atomes de carbones font partie des structures aromatiques. Les carbones restant sont soit naphthéniques, soit paraffiniques.

\* LES aromatiques polaires(résines et asphaltènes): Le caractère polaire de ces composés est donné par des groupements contenant les atomes d'oxygène et d'azote. Les teneurs en oxygènes



et azote sont voisines de 1% alors que celle en soufre peut varier entre 3 et 8% .

-Les résines:Ce sont des solides noirs qui fondent par chauffage.Les résines sont solubles dans le n heptane.Leur teneur en motifs paraffiniques et naphtiniques est plus élevée et les structures plus petites et moins condensées.

-Les asphaltènes:Ce sont des composés polaires essentiellement aromatiques,ayant l'aspect d'un solide brun noire et friable.La proportion d'hétéroatomes dans les asphaltènes est très importante(5 - 6% de soufre;0,8 - 1% d'azote et d'oxygène).

## 2.4 DEFINITION DES BITUMES

### 2.4.1 DEFINITION

Le bitume est la fraction la plus anciennement connue et utilisée du pétrole.Le bitume est dérivé des mots latins PIXTUMEN ou GUITUMEN qui signifient produits qui ont un rapport à la poix ou qui donnent cette dernière sous forme de gouttelettes.

Le bitume est une substance visqueuse de couleur sombre parfois presque solide à la température ordinaire.Il est constitué par les hydrocarbures et leur dérivés,il est complètement soluble dans le sulfure de carbone.

Selon leurs caractéristiques physiques et leur composition, les bitumes sont repartis en quatre catégories comportant chacune plusieurs qualités. Les bitumes routiers proprement dits composent la première de ses catégories et sont répartis en cinq qualités fonction de leur pénétration:

-Bitume 180/220

-Bitume 80/100

-Bitume 60/70

-Bitume 40/50

-Bitume 20/30

## 2.4.2 EMPLOI DES DIFFERENTS BITUMES

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

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

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

particulièrement soignés destinés aux renforcements des chaussées.

### 2.4.3 PROPRIETES DES BITUMES ET DE LEURS DERIVES

#### 2.4.3.1 PROPRIETES PHYSIQUES

Les bitumes de pétrole sont de véritables matières thermoplastiques sous l'influence de la chaleur, ils se ramollissent, se liquéfient et deviennent suffisamment fluides pour être mis en oeuvre. Ils reprennent leur caractéristiques originales dès qu'ils se refroidissent. Leur densité (25°C/25°C) varie avec leur dureté (de 0,99 à 1,07).

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

L'étanchéité est donc l'une des qualités principales des bitumes, propriété pour laquelle ils étaient déjà recherchés depuis l'antiquité. Ils sont de bons isolants thermiques et leur résistance au vieillissement est très bonne.

#### 2.4.3.2 RESISTANCE A L'ATTAQUE CHIMIQUE

L'expérience a montré que les structures bitumineuses ne sont pas affectées par les solutions chimiques aux concentrations rencontrées dans les sols et les eaux souterraines. Chimiquement, les bitumes sont très peu réactifs. A température ordinaire, ils n'attaquent pas les corps avec lesquels ils sont mis en contact et ils sont solubles dans de nombreux solvants organiques.

### 2.5 PRINCIPAUX ESSAIS DE LABORATOIRE POUR LE CONTROLE DES BITUMES

#### 2.5.1 INTRODUCTION

L'emploi du bitume, tel quel ou comme liant de matériaux composites, est fondé sur ses propriétés mécaniques et sur la façon dont celles-ci changent avec la température. Le bitume chaud est un fluide qui adhère aux autres matériaux et qui ainsi peut-être appliqué sur d'autres substances, ou leur être mélangé. Après refroidissement à la température ambiante, il devient presque solide mais flexible. Aux très basses températures, il devient dur et fragile, ce qui limite son emploi.

On prépare de grandes quantités de bitume dont les propriétés mécaniques variées doivent répondre aux spécifications routières et industrielles.

Pour caractériser ces qualités et pour vérifier si un bitume donné répond aux spécifications d'une certaine qualité, différentes méthodes d'essais ont été mises au point. Au début, elles ne visaient qu'à mesurer une propriété mécanique arbitraire permettant de sélectionner les bitumes :

- Le point de FRAAS, dans le domaine fragile;
- La pénétration, dans le domaine quasi-solide;
- La température de ramollissement. Bille et Anneau, au début du domaine fluide.

## 2.5.2 CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANQUES DES BITUMES

### 2.5.2.1 MESURE DE LA CONSISTANCE DU BITUME

Les essais cités si-dessus tendent à caractériser la consistance du liant et son évolution en fonction de la température. Le bitume est :

- Un solide dur, fragile et cassant à basses températures et faible temps de charge. On est alors dans la zone dite élastique ou le bitume est, pour la plupart de ses applications, trop fragile pour résister sans casser aux sollicitations mécaniques;

-Un liquide fluide à haute température et long temps de charge, on est alors dans la zone fluide. Elle correspond aux températures de mise en oeuvre, c'est à dire à la fabrication, à la mise en place et au compactage des enrobés.

-Ni franchement liquide, ni franchement solide, pour des températures et des temps de charge moyens. On est alors dans la zone viscoélastique qui correspond aux températures de service des enrobés sur la chaussée.

Les zones extrêmes nous intéressent peu sur le plan pratique, car il n'est pas souhaitable pour un enrobé de subir ni des températures <sup>assez basses</sup> pour se trouver dans la zone fragile ni des températures assez élevées pour être dans la zone fluide de son liant.

On ~~s'efforcera~~ s'efforcera donc, d'une part, de définir les limites des zones de comportement, et d'autre part de caractériser la consistance de ses variations dans la zone médiane.

du point de vue technologique, le passage de la zone élastique à la zone médiane peut-être défini par la température de fragilité, celui de la zone médiane à la zone fluide par la température de ramollissement. La consistance dans la zone intermédiaire est caractérisée par la pénétration à diverses températures.

### 2.5.2.2 POINT DE FRAAS

Le point de fragilité FRAAS est la température à laquelle un film mince de bitume rompt sous l'effet d'une flexion, dans des conditions opératoires de fabrication et d'essai bien définies. En effet, un film de bitume de 0,5mm d'épaisseur, déposé sur une lame d'acier est soumis à des flexions répétées à température décroissante.

### 2.5.2.3 ESSAI DE POINT D'ECLAIR (POINT D'INFLAMMABILITE)

Le point d'inflammabilité consiste à déterminer la température à laquelle une quantité de bitume, chauffée selon des prescriptions spécifiées, dégage des gaz qui s'enflamment en un éclair au contact d'une flamme.

L'appareil CLEVELAND à coupe ouverte est largement utilisé tant pour les bitumes purs que pour les bitumes fluxés sauf pour le type à séchage rapide, pour lequel on emploie généralement l'appareil TAG à coupe ouverte. Il peut également être utilisé pour les bitumes fluxés à séchage moyen.

Cet essai ne donne rien de plus qu'une indication sur le danger d'incendie pendant le chauffage et la mise en oeuvre d'un produit bitumineux. Le point d'éclair minimum tel qu'il est donné par cet essai et la température de travail en toute sécurité, avec les précautions habituelles ne sont nullement

synonymes. Cet essai est parfois imposé par les douanes et les transporteurs.

#### 2.5.2.4 TEMPERATURE DE RAMOLLISSEMENT (NFT 66008)

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

Dans la méthode Bille et Anneau, une bille d'acier est placée sur un petit disque de bitume contenu dans un anneau de métal. L'ensemble est chauffé à vitesse constante. La température de ramollissement bille et anneau (TBA) est la température à laquelle la bille s'enfonce à travers le bitume et son poids imprime à l'échantillon une déformation verticale définie dans les conditions données de fabrication et d'essais.

La consistance au point de ramollissement TBA, peut donc s'exprimer en terme de pénétration à la fois par extrapolation linéaire de  $\log p_{en}$  en fonction de T, et par mesure directe à l'aide d'une aiguille très longue à la température TBA.

PFEIFFER et VAN DOORMAAL ont trouvé que la pénétration était voisine de 800 dixième de millimètre au point TBA.

On obtient l'équation :



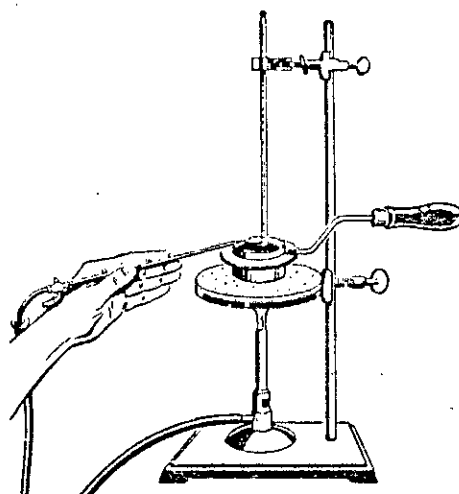


Figure 4 Détermination du point d'éclair avec l'appareil Cleveland à vase ouvert.

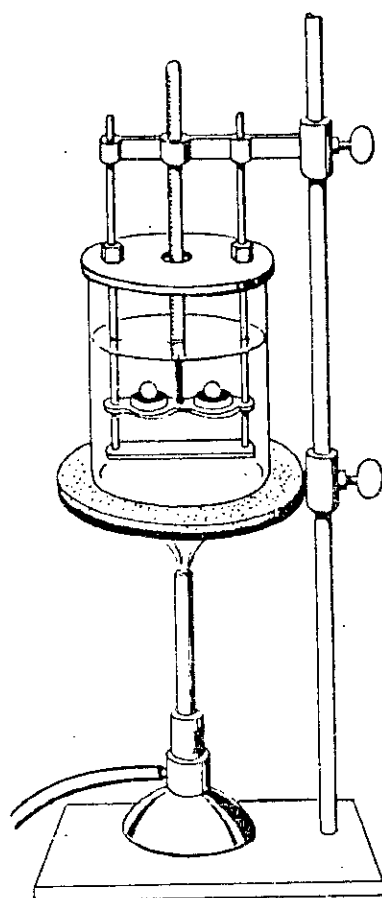


Figure 7 L'essai de point de ramollissement déterminé par la méthode bille et anneau.

$$\log(\text{Pen à } T) - \log 800$$

$$A = \frac{\log(\text{Pen à } T) - \log 800}{T - T_{DA}} \quad (1)$$

### 2.5.2.5 PENETRATION DES BITMES

(figure 3)

En 1889, BOWEN a mis au point la méthode d'essai par pénétration qui, à quelques modifications près est encore d'usage courant en raison de sa simplicité et de sa rapidité.

Une aiguille de forme normalisée, représentant une charge de 100g, s'enfonce pendant 5 s dans un échantillon de bitume. La mesure de la pénétration est exprimée en 1/10 de mm. Cette mesure doit être faite à une température bien déterminé.

La pénétration la plus couramment utilisée est celle mesurée à 25°C, qui est employée pour spécifier la qualité d'un bitume. A une température donnée, plus un bitume est dur plus sa pénétrabilité est faible. Elle varie :

#### - EN FONCTION DE LA CHARGE :

$$\log P = D \cdot \log M + E \quad (2)$$

P: Etant la pénétration;

M: Etant la mesure de la charge (gr);

D, E: constantes.

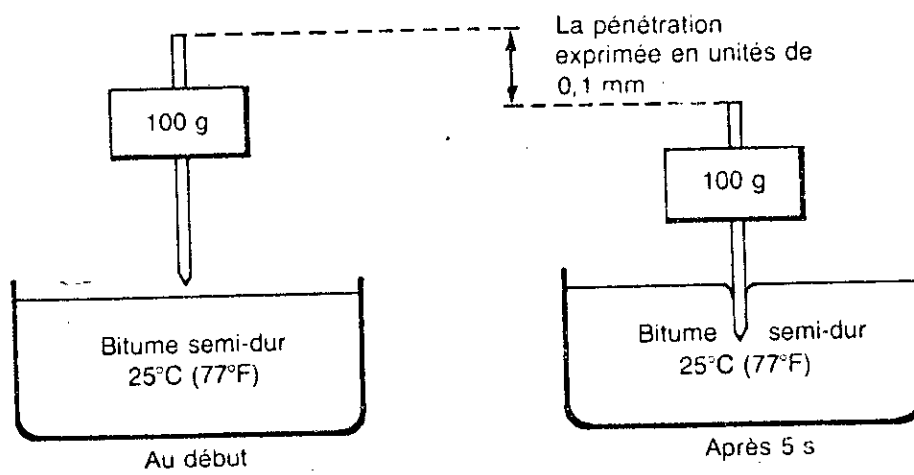


Figure 3 L'essai de pénétrabilité

-EN FONCTION DE LA TEMPERATURE: (figure 4)

A plus haute température, le bitume est plus mou et la pénétration plus forte. En 1936, PFEIFFER a montré l'existence d'une relation linéaire entre le logarithme de la pénétration et la température :

$$\log Pen = A.T + C \quad (3)$$

C: Etant une constante.

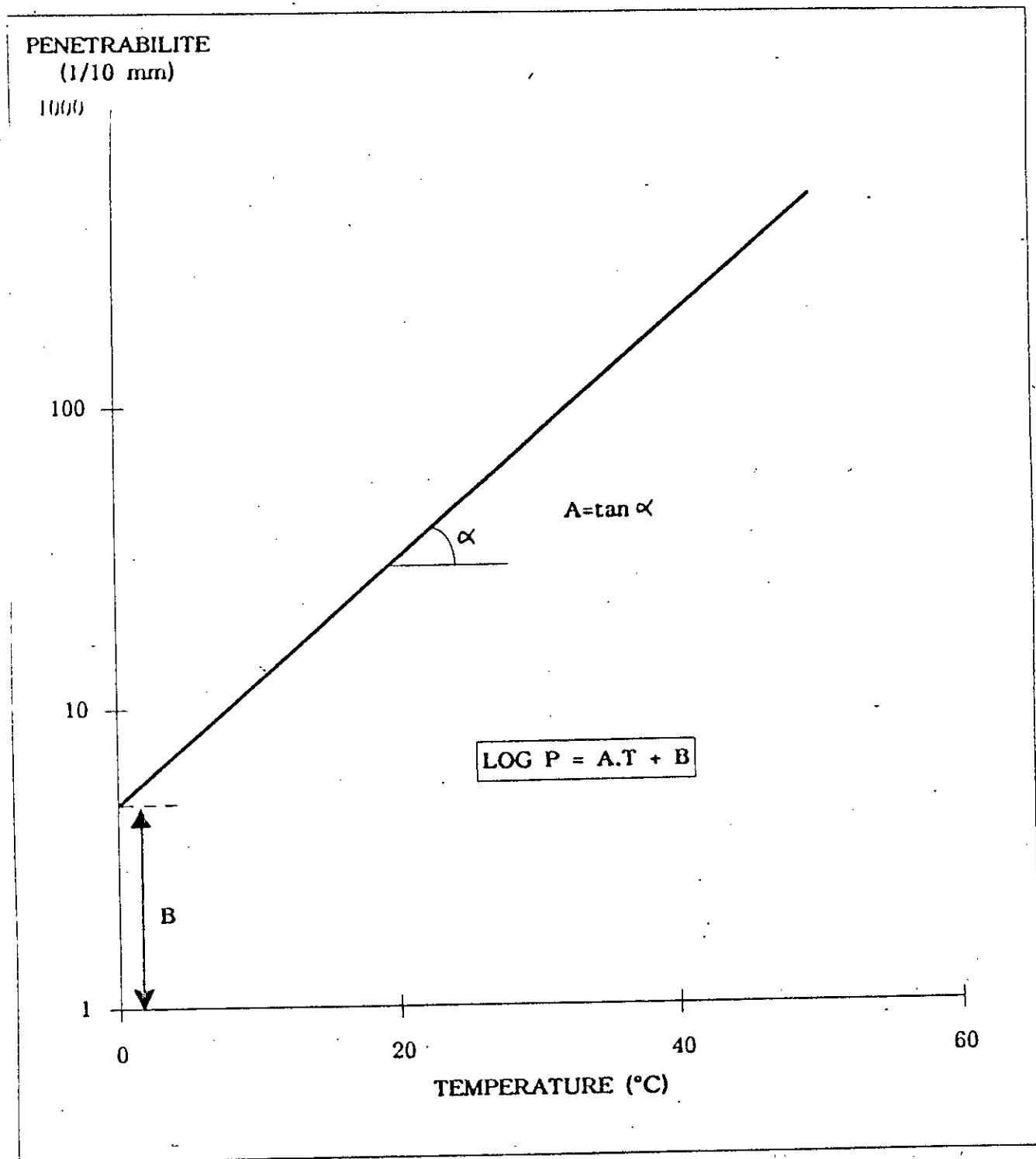
Le terme A représente la susceptibilité thermique. Sa valeur oscille entre 0,015 et 0,06. Ce qui montre l'existence de différences considérables des susceptibilités thermiques.

Il peut être calculé, soit à partir de la pente de la droite représentant la variation du logarithme de la pénétration en fonction de la température, soit à partir d'une pénétration à 25°C par exemple et de la température de ramollissement, en assimilant cette dernière à une température de pénétration de 800 dixième de mm.

Une température repère intéressante pour un bitume est celle pour laquelle sa pénétrabilité est de 800 dixième de mm. En effet l'expérience a montré que celle-ci est voisine de la température de ramollissement Bille et Ancau.

En règle générale, on ne définit pas la susceptibilité par le terme (A). PFEIFFER et VAN DOORMAAL ont préféré une expression de la susceptibilité thermique qui prenne une valeur voisine de zéro pour les bitumes routiers. La mesure de la variation de la consistance des bitumes est donnée par

Figure n° 4



RELATION ENTRE LA PENETRABILITE ET LA TEMPERATURE

l'indice de pénétrabilité (IP) dans le domaine où la pénétrabilité est mesurable.

Il est défini par la relation :

$$\frac{20 - IP}{10 + IP} = 50.A \quad (4)$$

ou encore :

$$IP = \frac{20 - 500.A}{1 + 50.A} \quad (5)$$

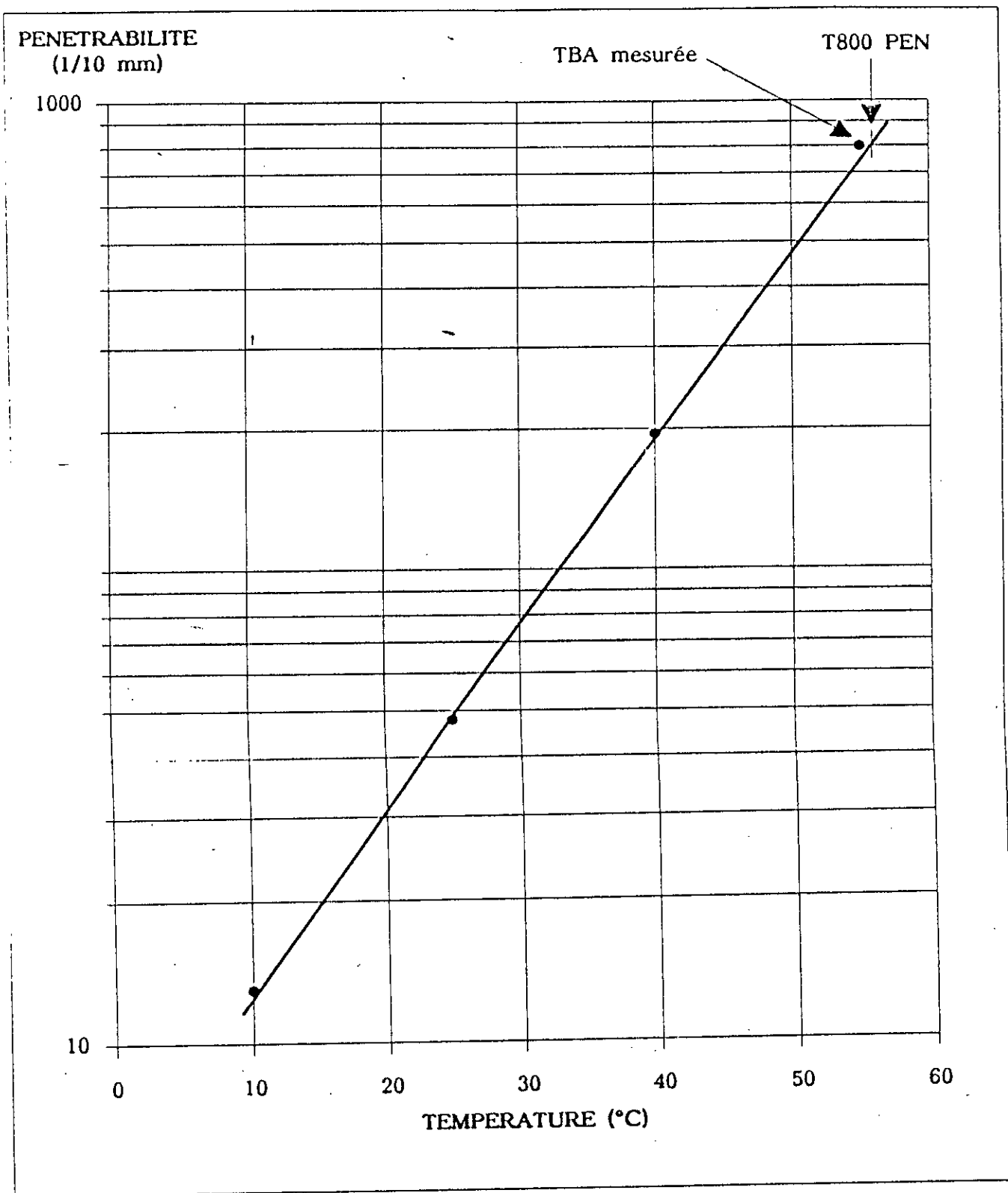
La valeur de l'indice de pénétration varie de (-3) pour les bitumes très susceptibles jusqu'à environ (+7) pour les moins susceptibles. L'IP est une fonction unique de A et de ce fait peut-être utilisé dans le même but. Leurs valeurs peuvent être calculées à partir de mesures de pénétration à deux températures T<sub>1</sub> et T<sub>2</sub> grâce à l'équation :

$$\frac{\log p_1 - \log p_2}{T_1 - T_2} = \frac{1}{50} \frac{20 - IP}{10 + IP} = A \quad (6)$$

P<sub>1</sub> : est la pénétration à la température T<sub>1</sub>

P<sub>2</sub> : est la pénétration à la température T<sub>2</sub>

Figure n° 5



*RELATION ENTRE LA PENETRABILITE ET LA TEMPERATURE  
POUR UN BITUME ROUTIER 40/50*

Si on admet que la température pour laquelle la pénétration est de 800 est voisine de la TBA alors l'équation(6) peut-être écrite:

$$\frac{\log 800 - \log P_{25}}{T_{BA} - 25} = \frac{1}{50} \frac{20 - IP}{10 + IP} = A \quad (7)$$

suivant le mode de calcul de A, on a:

-L'IP dit LCPC si A est déterminé à partir de plusieurs pénétrations.

-L'IP dit PFEIFFER si A est déterminé à partir de température de ramollissement et de la pénétration à 25°C.

Malheureusement ces deux valeurs ne coïncident que très rarement, la pénétration à la température de ramollissement étant le plus souvent différente de 800.

#### EN FONCTION DU TEMPS:

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

En 1936 ,SAAL établit que le logarithme de la pénétration est une fonction linéaire du logarithme du temps de charge t. Un exemple est donné par la figure N°6 ou sont représentées les courbes de cinq bitumes de qualités et d'origines différentes, mais ayant la même susceptibilité thermique A. Dans le domaine de t = 0,25 à t = 10s on a utilisé un pénétromètre enregistreur dans le domaine de 5 à 10 s un appareil ordinaire. On



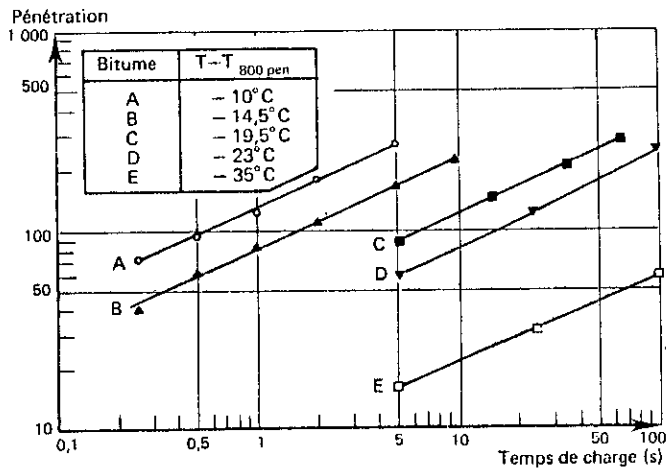


Fig. 6 - Pénétration en fonction du temps de charge pour des bitumes d'origines différentes, mais de même susceptibilité thermique :  $A = 0,046$ .

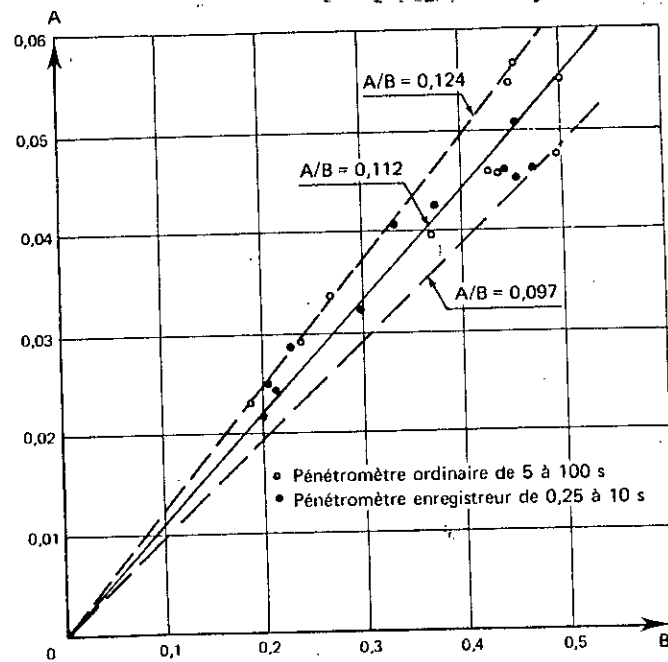


Fig. 7 - Relation entre les paramètres A et B dans l'équation  $\lg \text{pen} = AT + B \lg t + C$ .

peut observer que les courbes sont des droites ayant à peu près la même pente B, qui représente la susceptibilité cinétique. Cela a permis à SAAL de transformer l'équation (3) de la façon suivante:

$$\log Pen = A.T + B.\log t + C \quad (7)$$

A, B, C : étant des constantes déjà définies plus haut.

T : étant la température en °C.

t : étant <sup>le temps</sup> de l'application de la charge en seconde.

Des études supplémentaires sur des bitumes de susceptibilités thermiques différentes, montrèrent que la susceptibilité au temps est pratiquement proportionnelle à A. Des expériences récentes ont donné les résultats représentés sur la figure N°7, d'où l'on peut tirer la valeur moyenne du rapport.

$$\frac{A}{B} = 0,112 \quad (8)$$

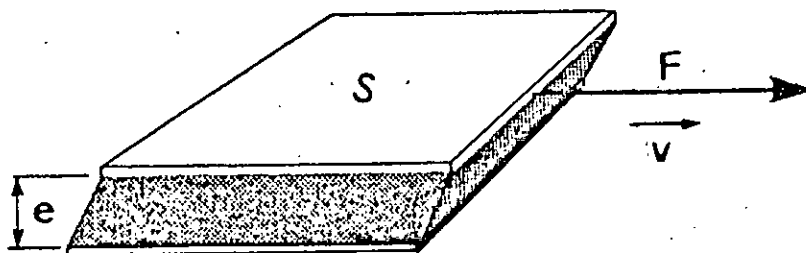
Les équations (1) et (8) donnent :

$$IP = \frac{20 - 56.B}{1 + 5,6.B} \quad (9)$$

Ce qui montre que l'indice de pénétration est aussi fonction univoque de la susceptibilité du temps de charge.

#### 2.5.2.6 VISCOSITE DES BITUMES

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



$\frac{F}{S}$  = CONTRAINTE DE CISAILLEMENT

$\frac{v}{e}$  = TAUX DE CISAILLEMENT

Figure 8. DEFINITION DE LA VISCOSITE

Soient deux plans de surfaces S situés à une distance d et se déplaçant parallèlement l'un par rapport à l'autre sous l'effet d'une force F à une vitesse V. (figure 8)

La viscosité dynamique ( $\mu$ ) est définie par la relation:

$$\frac{F}{S} = \mu \cdot \frac{V}{d}$$

$\frac{F}{S} = \tau$  est la contrainte de cisaillement exprimée en  $N/m^2$

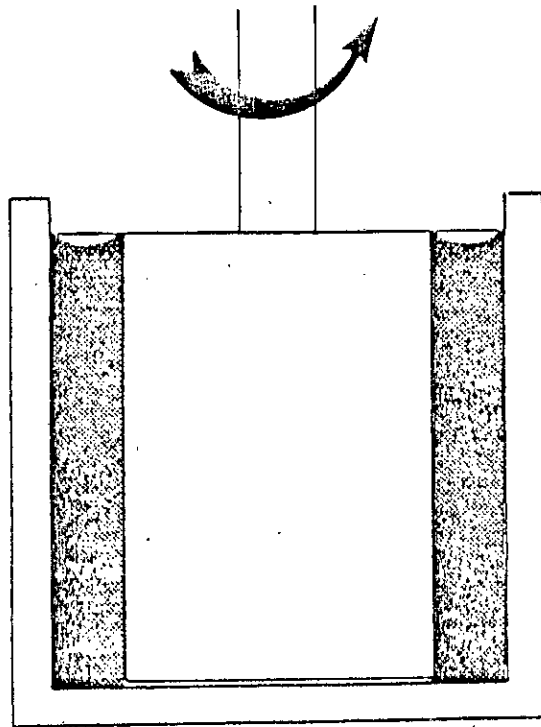
$\frac{V}{d} = \gamma$  est exprimée en  $s^{-1}$

#### -LES RHEOMETRE A PLAQUES PARALLELES :

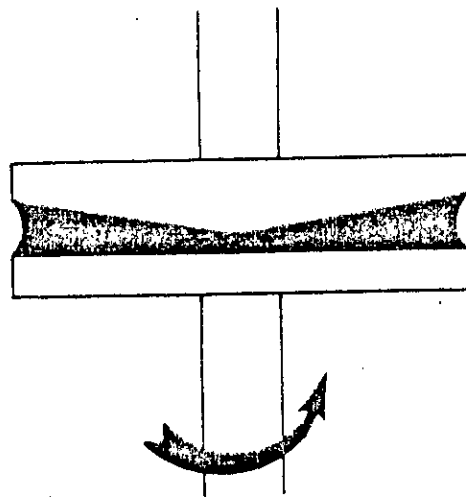
Ils comprennent essentiellement deux plaques séparées par un film de bitume d'épaisseur constante (comprise entre 3 et 10mm). L'une des plaques est maintenue dans une mâchoire fixe et l'autre dans une mâchoire mobile. Cette seconde plaque, sous l'action d'une force glisse sur la plaque fixe. Le film de bitume est ainsi soumis à une force de cisaillement et sa viscosité peut être déterminé grâce à la mesure simultanée de la force et de la vitesse de déplacement.

#### -LES APPAREILS A CYLINDRES COAXIAUX :

Le bitume est introduit dans l'entrefer séparant deux cylindres coaxiaux; L'un des cylindres est fixe l'autre tourne à



CYLINDRES COAXIAUX



CONE / PLATEAU

Figure 9. VISCOSIMETRES A TAUX DE CISAILLEMENT CONTROLE

vitesse connue. La valeur du couple exercé sur le bitume est liée à sa viscosité.

#### -LES APPAREILS CONE-PLATEAUX :

Le principe est sensiblement le même que dans les appareils précédents, mais le bitume est placé entre un cône et un plateau dont l'un est fixe et l'autre est mis en rotation.

Dans une autre catégorie, on retrouve des appareils qui mesurent des temps d'écoulement. Ils fournissent la viscosité cinématique. Ce sont :

- Les viscosimètres capillaires;
- Les viscosimètres à coupes.

#### 2.5.2.7 ESSAI DE POIDS SPECIFIQUES

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

#### 2.5.2.8 ESSAI DE PERTE DE MASSE AU CHAUFFAGE

Dans l'essai de chauffage un échantillon de 50g est placé dans un récipient normalisé et maintenu pendant 5 heures à 163°C dans une étuve. Le pourcentage perdu, en poids (dû plus à l'oxydation qu'à la volatilité) est alors mesuré.

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

On a peu ou pas de base pour considérer cet essai comme représentant les conditions d'altération sous l'effet des intempéries et des effets de la pratique. Les limites de spécifications qui y sont attachées ont cependant, été établies par une longue expérience comme capables d'être satisfaites par un bitume de qualité convenable.

#### ESSAI

#### 2.5.2.9 DE DUCTILITE

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

Les conditions usuelles de l'essai sont :

-Température du bain : 25°C

-Vitesse 5 cm/mn

La section de l'étranglement de l'éprouvette, avant l'essai est de 1cm<sup>2</sup>.

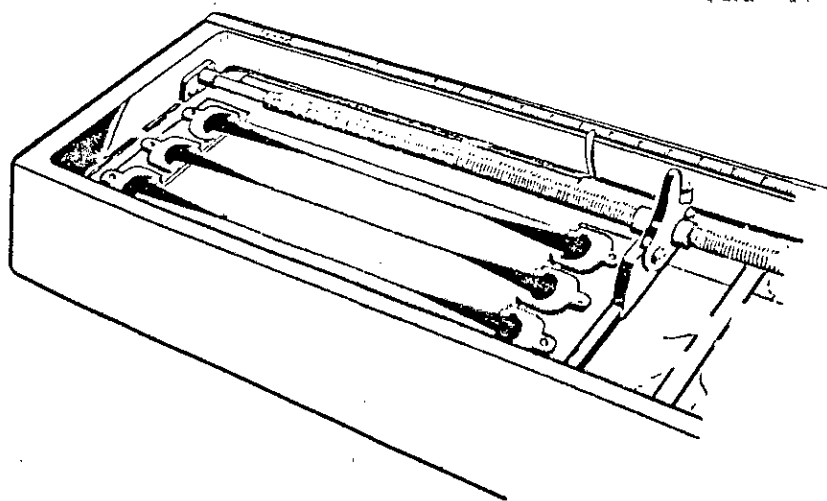


Figure 10. L'essai de ductilité.



## 2.6 SPECIFICATIONS FRANCAISES SUR LES BITUMES

Table 2.1: SPECIFICATIONS FRANCAISES SUR LES BITUMES

| QUALITE   | 180/220     | 80/100 | 60/70       | 40/50 | 20/30 |
|---|-------------|--------|-------------|-------|-------|
| Pénétration<br>à 25°C, 5s<br>(en 1/10mm)                  | 180-220     | 80-100 | 60-70       | 40-50 | 20-30 |
| Point de<br>ramollissement<br>bille et anneau<br>( en °C) | 34-43       | 41-51  | 43-56       | 47-60 | 52-68 |
| Densité à<br>25°C<br>(picnomètre)                         | 1,00 - 1,07 |        | 1,00 - 1,10 |       |       |
| Perte de masse<br>au chauffage<br>163°C, 5H (%)           | < 2         |        |             | < 1   |       |

Table 2.2: SPECIFICATIONS FRANCAISES SUR LES BITUMES

| QUALITE   | 180/220 | 80/100 | 60/70 | 40/50 | 20/30 |
|---|---------|--------|-------|-------|-------|
| % Penetrabilité<br>restante après<br>perte de masse<br>au chauffage/à<br>la pénétrabilité<br>initiale | >70     | >70    | >70   | >70   | >70   |
| Point d'éclaire<br>(appareil<br>Cleveland)en°C  | >230    | >230   | >230  | >250  | >250  |
| Ductilité à 25°C<br>(en cm)   | >100    | >100   | >80   | >60   | >25   |
| Solubilité dans<br>le tétrachloro-<br>éthylène(C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> )<br>(en %)             | 99,5    | 99,5   | 99,5  | 99,5  | 99,5  |
| Teneur en<br>paraffine<br>LCPC(en %)  | 4,5     | 4,5    | 4,5   | 4,5   | 4,5   |

# CHAPITRE-3

## LES ENROBES

### BITUMINEUX

## Chapitre 3

### LES ENROBES BITUMINEUX

#### 3.1 INTRODUCTION

Un béton bitumineux est un enrobé compact exécuté et mis en oeuvre à chaud; Il comprend une ossature granulaire composée de gros granulats, du sable, du fillers et un liant bitumineux d'agglutination choisi relativement dur à la température ambiante du lieu d'emploi.

Ces divers éléments constitutifs doivent être parfaitement homogénéisés et l'ensemble est mis en oeuvre par un compactage étudié.

L'ensemble mis en place, doit être stable dès que le refroidissement est opéré pour éviter l'amorée d'ondulation (cette notion de stabilité sera détaillée plus loin au cours de ce chapitre).

Cette stabilité, à laquelle doit se joindre la stabilité dans le temps, c'est à dire la résistance au vieillissement et à la déformation, est obtenu en jouant sur

différents facteurs de composition et de mise en place, dont les principaux sont les suivants :

- Stabilité des couches sous-jacentes;
- Une épaisseur appropriée du revêtement en rapport avec la dimension des gros granulats;
- Un échelonnement très étudié des différentes grosseurs des grains de l'ossature minérale à partir du plus gros jusqu'au plus fin;
- Un choix raisonné de la qualité des gravillons, sable et fillers (degré de dureté, homogénéité, et le degré d'adhérence);
- Un choix approprié à chaque cas du degré de dureté du bitume choisi dans les nuances durs ou demi-durs;
- Enfin la teneur en liant calculée sur la base de principes que nous énoncerons au cours de ce chapitre.

Au cours de cette partie, nous allons passer en revue tous ces facteurs ainsi que les qualités exigées d'eux.

## 3.2 LES GRANULATS

### 3.2.1 LES QUALITES EXIGEES

les couches de fondation et de base sont presque exclusivement constituées par des granulats dits à granulométrie continue appelés graves.

Ces graves doivent présenter les qualités suivantes :

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

Ces qualités dépendent de certains facteurs :

- La nature de la roche dont est issue la grave.
- L'échelloment granulométrique.
- Le coefficient de frottement des grains entre-eux.
- La présence d'argile.

Un granulat issu d'une roche dure ne se fragmentera pas ou très peu, et un matériau plein, anguleux et à fort frottement interne n'aura pas tendance à fluer au passage des roues, ce qui se produirait pour des granulats ronds et ayant peu de contact les uns avec les autres.

Enfin la présence d'argile autour des grains risque, une fois humide, de leur faire perdre toute stabilité.

### 3.2.2 ORIGINE DES GRAVES

Les graves employées sont d'origine très diverses. Les couches supérieures doivent présenter, à un degré élevé, les qualités précédentes.

D'une manière générale, on peut classer les graves en :

#### 3.2.2.1 LES GRAVES BRUTES NATURELLES

Ce sont des matériaux alluvionnaires roulés, utilisés tels quels si leur granulométrie convient ou après un écrêtement pour limiter le calibre maximal des grains.

#### 3.2.2.2 LES GRAVES NATURELLES CONCASSEES

Il s'agit de graves naturelles, comportant des éléments fins et moyens non concassés, et des éléments concassés provenant du concassage des galets les plus gros.

### 3.2.2.3 LES GRAVES ENTIEREMENT CONCASSÉES

Il s'agit soit de la fraction grosse d'une grave naturelle concassée, soit d'un matériau provenant d'une carrière.

### 3.2.3 LA GRANULOMETRIE

Chaque pays a ses propres recommandations en ce qui concerne les fuseaux granulométriques. Les fuseaux granulométriques sont des courbes limites à l'intérieur desquelles doit se tenir la courbe du matériau qu'on veut réaliser. En aucun cas ils doivent être considérés comme intangibles. En effet, il suffit de connaître pour un matériau donné :

- Le calibre maximal convenable.
- Le pourcentage de fines (0,08 mm) convenable.
- Deux points de la courbe.

Des règles pratiques simples seront les suivantes:

- $D \leq 31,5$  mm pour les fondations.
- $D \leq 20$  mm pour les bases.
- $2\% < \%(fines) < 10\%$ .
- Coefficient de courbure :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$$

$$1 < C_c < 3$$



Le calibre maximal est imposé pour éviter la ségrégation des granulats à la mise en oeuvre.

Pour avoir une grave assez compacte, un pourcentage de fines est nécessaire. Cependant il ne doit pas être excessif car les fines n'offrent pas une stabilité suffisante.

La courbure garantit, pour une granulométrie continue, une bonne compacité.

### 3.2.4 LA PROPETE

L'absence de fibres dangereuses est vérifiée par l'essai équivalent sable (E.S). On agite le passant à 5 mm avec une solution saline et on laisse décanter. Les fines dangereuses restent en suspension, et on caractérise la propreté par le coefficient (E.S), variant de 0 à 100.

#### 3.2.4.1 LES PRINCIPAUX ESSAIS SUR LES GRANULATS

La résistance à la fragmentation et à l'usure est généralement caractérisée par l'essai Deval humide. Dans un cylindre de 20cm de diamètre et 34cm de longueur, on introduit 50 pierres cassées et humidifiées de la roche en cause et pesant au total 5kg.

Le cylindre effectue 10 000 révolutions à 30 t/mn autour d'un axe faisant un angle de 32° avec l'axe proprement dit du cylindre.

Coef Deval =-----

P

P étant la masse en grammes des éléments inférieurs à 1,6 mm.

Deval > 5 pour les fondations.

Deval > 7 pour les bases.

#### -L'ESSAI LOS ANGELES

Il consiste à placer dans un cylindre à axe horizontal de 70cm de diamètre et 50cm de longueur, les granulats à essayer et des boules d'acier.

On effectue 500 révolutions à 30 tr/mn. 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 1,68mm de maille. Le poids de la fraction passante est rapportée au poids de la prise d'essai. Ce rapport multiplié par 100 est appelé coefficient LOS ANGELES.

### 3.2.5 LE FILLER

Les fillers appelés encore fines sont des farines minérales utilisées comme élément de remplissage.

Sans filler la compacité désirable du béton en place ne pourrait être obtenue. L'inconvénient réside aussi dans le fait qu'un bitume pur comme matière agglutinante d'interposition est beaucoup susceptible qu'un mastic constitué d'un liant et du filler. Le filler permet, lorsque le dosage est choisi correctement la rigidification de l'enrobé sans nuire à sa plasticité. Du plus, il multiplie les points de contact entre les différents grains et augmente par conséquent la cohésion, et freine en période de chaleur le ressuage.

### 3.3 LES ENROBES BITUMINEUX

Les enrobés bitumineux sont constitués d'une ossature granulométrique composés de gros granulats (gravillons), du sable (dans un assez large éventail de grosseurs), du filler et d'un liant bitumineux d'agglutination choisi relativement dur à la température ambiante du lieu d'emploi.

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

#### -PHASE SOLIDE :

Elle est constituée par la partie minérale et fournit à l'ensemble l'élasticité et la résistance au cisaillement.

#### -PHASE LIQUIDE :

Elle est constitué par le liant, elle contribue à la cohésion et confère au mélange le caractère visco-élastique.

#### -PHASE GAZEUSE :

Elle influence indirectement certaines propriétés physiques et mécaniques de l'enrobé. On mentionne dans la pratique le pourcentage de vides dans l'enrobé. La compacité accrue de l'ossature qui s'accommode fort bien d'un pourcentage de vides initial de l'ordre de 4 à 6% en moyenne, et c'est pratiquement le moyen le plus sûr de ne pas avoir forcé la teneur optimal en liant et d'échapper ainsi aux risques de ressuage en surface.

La présence de trois phases (au lieu de deux) dans le revêtement en place accroît la cohésion par le jeu des tensions interfaciales aux points d'intersection de ses trois phases.

### 3.3.1 CLASSIFICATION DES ENROBES

Le vocable enrobé désigne malheureusement toute une gamme de mélanges dont les caractéristiques sont très diverses, et la classification n'est pas toujours aisée.

### 3.3.1.1 CLASSIFICATION SELON LE LIANT UTILISE

La très grande majorité des enrobés hydrocarbonés est réalisée avec un bitume pur. Les enrobés sont réalisés à chaud (Les granulats étant chauffés au préalable dans un tambour).

Les enrobés à chaud sont divisés en trois catégories:

Catégorie D.C : (dense)

% (vides) < 8%

Catégorie S.C : (semi-dense)

8% < % (vides) < 12%

Catégorie O.C : (ouvert)

% (vides) > 12%

### 3.3.1.2 CLASSIFICATION SELON LE CALIBRE MAXIMALE DU GRANULAT

- Enrobé fin :  $D < 6,3\text{mm}$

D étant le calibre du plus gros granulats.

- Grave-bitume :  $d < 20\text{mm}$

d étant le calibre du plus fin granulats.

- BETON BITUMINEUX :

Dans le cas intermédiaire:  $6,3 < d < 20\text{mm}$  .

### 3.3.2 QUALITES EXIGEEES D'UN ENROBE

Qu'il s'agisse d'un enrobé réalisé à chaud ou à froid, la couche ainsi réalisée doit avoir un certain nombre de qualités :

-LA STABILITE : La stabilité est la résistance à la déformation permanente de la couche sous l'effet des charges statiques et dynamiques.

L'insuffisance de stabilité se traduit par fluage avec formation de dépression, d'orniére et d'ondulation.

La stabilité augmente avec l'angle de frottement interne des granulats, la dureté du liant et le compactage. Si bien que la tendance actuelle pour la chaussée à trafic lourd réside dans l'emploi des bétons bitumineux constitués de liants durs et de granulats durs et anguleux.

-LA FLEXIBILITE : On entend par flexibilité l'aptitude de l'enrobé bitumineux à admettre, sans fissuration, les déformations d'ensemble qui peuvent être imposées par la déflexion des couches inférieures.

L'insuffisance de flexibilité se manifeste par la fissuration du tapis. La flexibilité dépend au premier lieu de la ductilité du liant qui doit demeurer suffisante aux basses températures pendant toute la vie de l'enrobé.

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

-ABSENCE DE SENSIBILITE A L'EAU : Une bonne affinité entre les granulats et le liant accrue le cas échéant par des dopes, permet de résister au désenrobage des matériaux sous l'effet des eaux. Celle-ci peut d'autre part être altérée par la présence d'argile dans les granulats. Les argiles réduisent considérablement la stabilité des enrobés.

L'enrobé utilisé en couche de surface doit présenter des qualités particulières, telles que la résistance au poinçonnement et une bonne rugosité qui suppose que les granulats ne se polissent pas sous l'effet de la circulation.

Une bonne liaison entre la couche de roulement et la couche inférieure évite les décollements éventuels si la couche d'enrobé n'est pas épaisse ( < 5cm ).

Une couche d'accrochage peut s'avérer nécessaire si la couche inférieure est trop lisse ou si des contraintes tangentielles sont susceptibles de s'exercer (forte déclivité, virage, ...).

### 3.3.3 UTILISATION DES ENROBES BITUMINEUX

Les enrobés bitumineux peuvent être utilisés soit en couche de surface sous forme de béton bitumineux de 5 à 12cm

d'épaisseur, soit en couche de base sous forme de grave bitume de 12 à 20cm d'épaisseur. La couche de base en grave bitume présente une résistance notable à la traction à laquelle se produit une large répartition des charges dans les couches inférieures. Cependant elle présente une déformation excessive. Ceci est préjudiciable pour la couche supérieure et conduit nécessairement à sa satisfaction, surtout si cette dernière présente une grande rigidité.

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

Il existe deux types d'enrobés:

-Le béton bitumineux: Employé généralement pour les couches de surface.

-La grave-bitume: Employée généralement pour les couches de base.

#### 3.3.3.1 BETON BITUMINEUX

Ces types de mélanges sont constitués par un squelette minérale à granulométrie continue dans laquelle les particules les plus petites remplissent les vides formés par les plus grosses, formant ainsi une structure minérale dense avec une faible teneur en vides. Le bitume à résistance moyenne ou dure recouvre les particules par un film fin et remplit partiellement les vides.



-CLASSIFICATION : Selon la plus grande dimension du gros granulat et les proportions des différents constituants, on peut classer les bétons bitumineux en béton de texture grossière, moyenne et fine.

Table 3.1: classification selon la dimension du granulat

| Structure | Dim.Max<br>( mm ) | Gravillon<br>( % ) | Sable<br>( % ) | Filler<br>( % ) | Bitume<br>( % ) |
|-----------|-------------------|--------------------|----------------|-----------------|-----------------|
| Grossière | 30-15             | 80-65              | 15-30          | 2-6             | 3-5             |
| Moyenne   | 20-10             | 65-50              | 30-45          | 4-8             | 4-6             |
| Fine      | 15-10             | 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 moyennes sont employés plus couramment pour les couches de roulement (béton bitumineux).

-Les bétons bitumineux de structure fine s'emploient seulement en couche de roulement .

### 3.3.3.2 GRAVE BITUME

Les graves bitumes, moins dosées en bitume que les bétons bitumineux, sont destinées généralement à la réalisation de chaussées comme couches de base et couches de fondation.

Elles doivent présenter essentiellement une résistance à la fatigue et l'orniérage.

#### -DIMENSION MAXIMALE:

Pour une grave O/D, la dimension maximale des gros éléments sera :

- 14mm  $\leq$  D < 20mm pour
  - \* Une couche de base
  - \* Une couche de renforcement
  - \* Une couche de fondation de chaussée en béton.
- 14  $\leq$  D  $\leq$  31,5mm pour
  - une couche de fondation de chaussée noire(souple).

### 3.4 ETUDE DE LA COMPOSITION

#### 3.4.1 PRINCIPE DE FORMULATION

La méthode généralement employée pour la formulation des enrobés bitumineux est la suivante :

-Choix et appréciation de la qualité des granulats, filler et liant, le climat et la nature de la couche de chaussée à réaliser.

-Dosage des granulats et du filler.

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

Une fois les constituants choisis et leur pourcentages fixés, on réalise des éprouvettes qu'on soumet à des essais mécaniques, tels que l'essai Duriez et l'essai Marshall.

## 3.4.2 COMPOSITION

### GRANULOMETRIQUE

#### 3.4.2.1 BETON BITUMINEUX

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

Table 3.2: Formule grenue et semi-grenue des bétons bitumineux

| Béton bitumineux | Formule S.G (%) | Formule G (%) |
|------------------|-----------------|---------------|
| 0/10             | Tamis 6mm       | 35 - 45       |
|                  | Tamis 2mm       | 60 - 75       |
| 0/14             | Tamis 6mm       | 50 - 60       |
|                  | Tamis 2mm       | 60 - 75       |

#### 3.4.2.2 GRAVE-BITUME

Pour chacune des graves-bitumes 0/20 et 0/31,5 on définit une formule semi-grenue et une formule grenue par l'indication du pourcentage de refus aux tamis 0,6;2 et 6mm.

Table 3.3: Formules grenue et semi-grenue d'une grave bitume

|        | Grave-bitume | Formule S.G<br>(%) | Formule G<br>(%) |
|--------|--------------|--------------------|------------------|
| 0/20   | Tamis 6mm    | 40 - 55            | 50 - 65          |
|        | Tamis 2mm    | 60 - 75            | 65 - 80          |
|        | Tamis 0,6mm  | 71 - 84            | 75 - 86          |
| 0/31,5 | Tamis 6mm    | 50 - 60            | 60 - 70          |
|        | Tamis 2mm    | 65 - 80            | 70 - 85          |
|        | Tamis 0,6mm  | 75 - 86            | 78 - 89          |

### 3.4.3 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 filler.

Ces teneurs en filler doivent être normalement à l'intérieur des fourchettes suivantes :

-Pour les bétons bitumineux :

\*Couche de roulement.....5 à 9%

\*Couche de liaison.....3 à 7%

-Pour les graves-bitumes :

\*Couche de base.....6 à 9%

\*Couche de fondation.....3 à 7%

### 3.4.4 TENEUR EN LIANT

#### 3.4.4.1 METHODE DU L.C.P.C

Méthode généralement utilisée en France. Elle consiste à partir d'un granulats simple ou composé, entrant dans le réseau recommandé, à choisir une teneur en liant fonction de la surface spécifique calculée du granulats, et à soumettre ensuite le mélange compacté à l'essai de compression simple avant et après immersion.

On vérifie que le pourcentage des vides est convenable que la stabilité à sec est suffisante et que après immersion, la chute de résistance à la compression est faible.

La surface spécifique du squelette est calculée convenablement par la formule:

$$S = 0,17 G + 0,33 g + 2,30 s_1 + 12 s_2 + 135 f$$

G : % en poids d'éléments  $d > 10\text{mm}$

g : % en poids d'éléments  $5 < d < 10\text{mm}$

$s_1$  : % en poids d'éléments  $0,3 < d < 5\text{mm}$

$s_2$  : % en poids d'éléments  $0,08 < d < 0,3\text{mm}$

f : % en poids d'éléments  $d < 0,08\text{mm}$

S donnée directement en  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

Une formule simplifiée, utilisée pour un dégrossissable est proposée :

$$S = 2,5 + 1,3 f$$

f : Exprimée en (%) par apport au poids total du minéral.

Bien qu'il ne s'agisse pas d'une règle indiscutable, on peut choisir une teneur en liant égale à :

$$p = K (S)^{1/5}$$

P : dosage pondéral en liant en % d'agrégats secs.

S : Surface spécifique du granulat en m<sup>2</sup>/kg.

K : Coefficient de richesse ou module de richesse.

Les valeurs de K généralement adoptées sont :

K = 3,75 route très circulée;

K = 3,85 piste d'envol;

K = 4 route peu circulée;

K = 4,25 revêtement mince sur sous-couche déformable.

Le mélange ainsi défini est soumis aux essais préliminaires après calcul de la compacité. On en tire les trois renseignements suivants :

-La compacité;

-La stabilité à sec;

-La stabilité après immersion.

La composition du mélange sera corrigée selon les résultats de ces essais.

#### 3.4.4.2 LA METHODE MARSHALL

Cet essai se pratique sur des éprouvettes préparées avec différentes teneurs en liant. On choisira en général quatre ou cinq teneurs différentes. Pour chacune d'elles, on détermine :

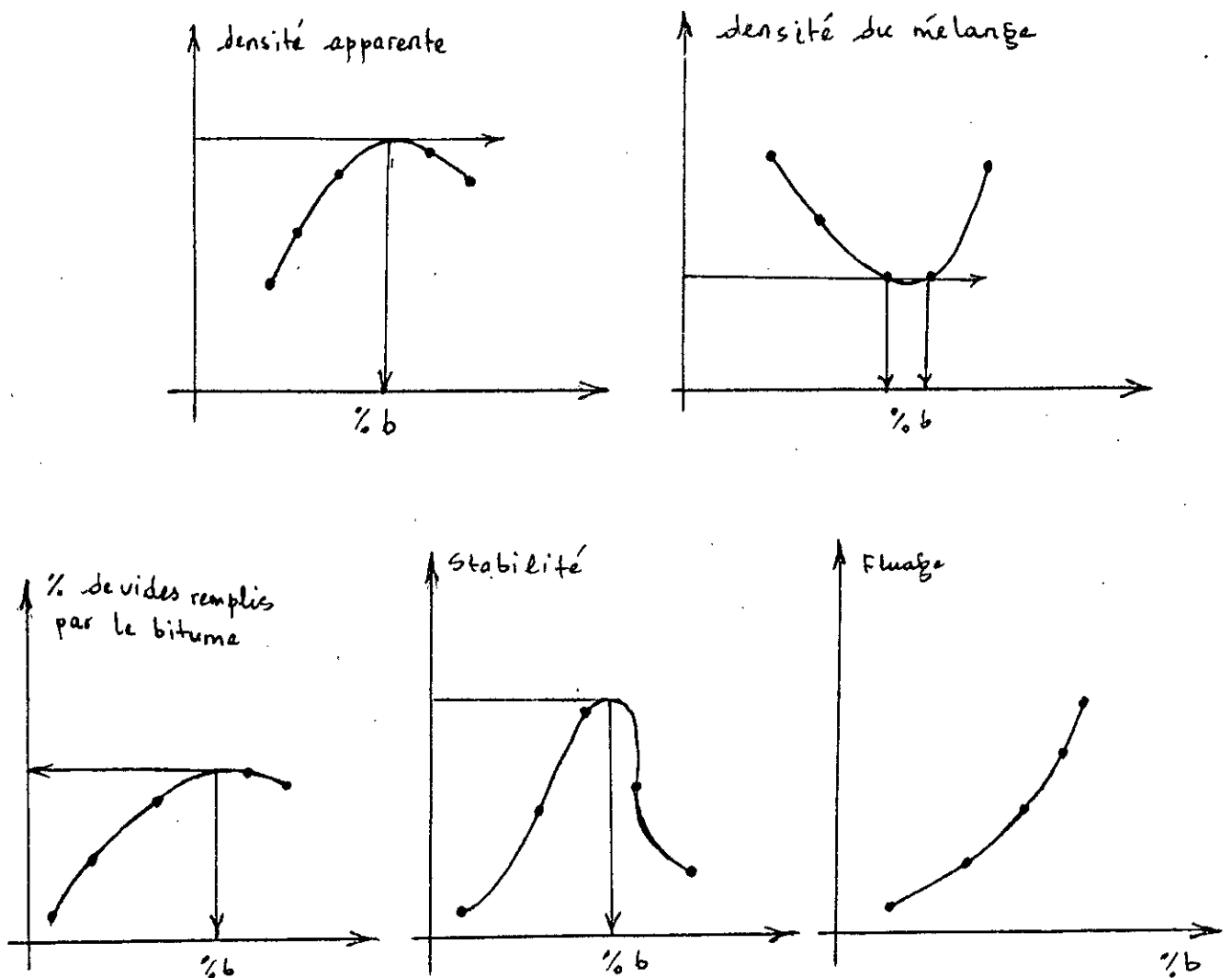


Figure 3.1: Variation des caractéristiques d'un enrobé en fonction de sa teneur en liant

- La stabilité ;
- L'écrasement diamétrale au moment de la rupture;
- Le pourcentage de vides;
- Le pourcentage de vides du granulat remplis par le bitume.

On reportera ensuite sur des graphes les courbes représentatives de la variation de ces caractéristiques en fonction de la teneur en bitume. Ces résultats permettront de choisir la teneur en bitume optimum.

### 3.5 LES ESSAIS SUR LES ENROBES BITUMINEUX

#### 3.5.1 CONSIDERATIONS GENERALES

Comme il est courant en génie-civil, l'emploi précède la règle, et tandis que s'ébauchent les recherches sur la rhéologie des hydrocarbonés des méthodes empiriques mais très simples permettent de définir des mélanges satisfaisant certaines exigences de la pratique.

La rhéologie des mélanges bitumineux était mal connue et surtout difficile à prévoir lorsqu'on est en présence des granulats d'une part, et du liant d'autre part.

Les essais usuels dénommés parfois les essais de routine n'ont guère évolué depuis plusieurs décades.

Seuls des perfectionnements sont intervenus pour les rendre plus reproductibles dans de bonnes conditions. Mais ils restent insuffisants pour caractériser le comportement ultérieure de la chaussée.

Quoi qu'il en soit, les essais en usage actuellement restent l'outil indispensable à l'étude et au contrôle des enrobés.



## 3.5.2 ESSAIS TRADITIONNELS

### 3.5.2.1 ESSAI MARSHALL

(figure 1 et 2)

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

On note l'effort maximum à la presse et la déformation diamétrale de l'éprouvette au moment de la rupture. La stabilité Marshall, donnée en Kg, est l'effort maximum et la déformation à ce stade est l'écrasement.

### 3.5.2.2 ESSAI DURIEZ

L'objet de l'essai Duriez est de caractériser les qualités de résistance mécaniques (statiques) et de résistance au désenrobage par l'eau des matériaux enrobés.

Dans le cas des matériaux enrobés classiques (granulométrie poussée jusqu'à 15 à 20 mm, gravillons anguleux en proportions assez grandes), les résultats de l'essai Duriez suffisent à eux seuls à caractériser convenablement la qualité du matériau.

Figure 1.

*L'essai Marshall de stabilité et de fluage.*

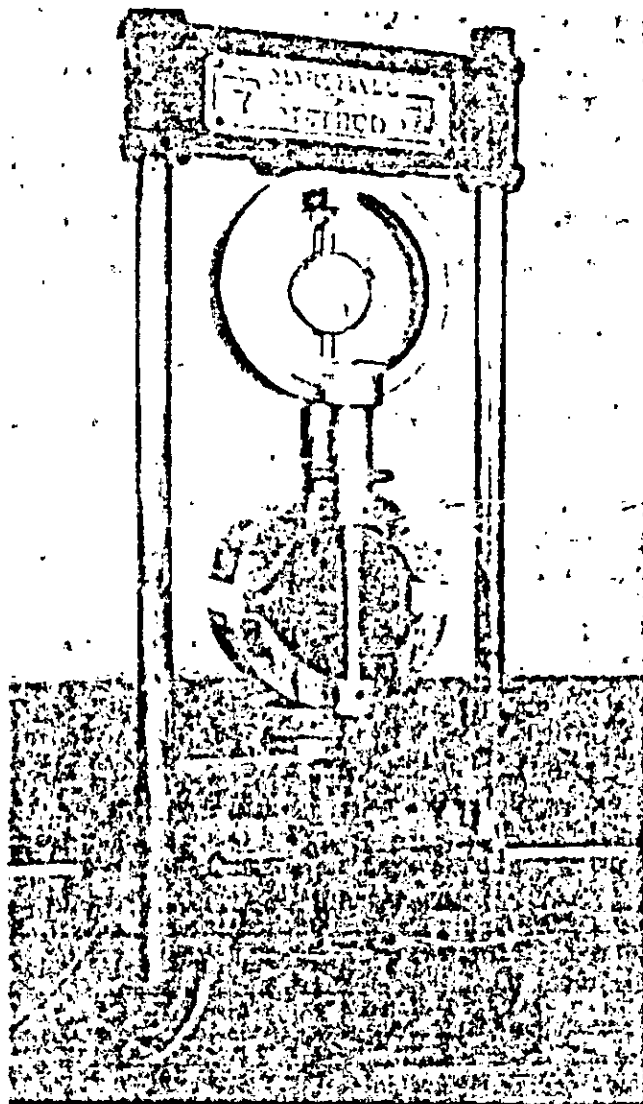
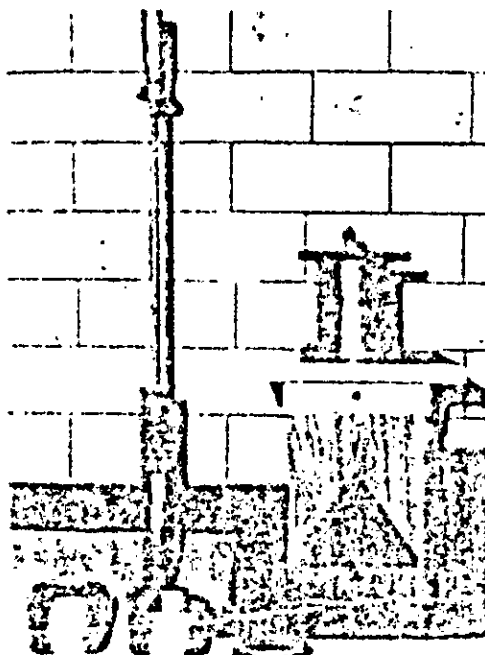


Figure 2.

*Le socle, le marteau et le moule utilisés pour la préparation des éprouvettes de l'essai Marshall.*



Dans d'autres cas, on pourra avoir avantage à les compléter par les résultats d'autres essais (par exemple, essai Hubbard-Field, pour les matériaux fins et l'essai Marshall pour les matériaux à base d'agrégats ronds ou très anguleux).

L'essai Duriez a le même objet que l'essai Marshall, dont il diffère cependant par deux caractéristiques importantes:

-Température de l'essai qui est de 18°C au lieu de 60°C de l'essai Marshall;

-Mode d'application de la contrainte, qui diamétrale dans l'essai Marshall et axial dans l'essai Duriez.

### 3.5.3 ESSAIS NOUVEAUX

#### 3.5.3.1 ESSAI D'ORNIERAGE

Compte tenu des préoccupations des spécialistes en matières de résistance aux déformations permanentes, le besoin dans les études de formulation d'un essai d'orniérage adapté à la prévision de ces phénomènes s'est fait sentir depuis les années soixante-dix.

A ce jour tous les laboratoires spécialisés dans les matériaux de chaussées à travers le monde sont équipés d'un orniéreur.

Quoiqu'il reste un essai lourd et contraignant. Il est surtout réservé à l'étude des nouvelles formulations.

Grimaux et Hiermnaux ont tenté de montrer comment cet appareil peut contribuer à la connaissance des propriétés telles que:

- La nature du liant(dureté,susceptibilité);
- L'angularité des granulats;
- Le dosage en mortier et rapport filler/bitume.

### 3.5.3.2 ETUDE DE COMPACTAGE A LA PRESSE DE CISAILLEMENT

#### GIRATOIRE

Destinée au départ à chercher uniquement un moyen de réaliser des éprouvettes d'échantillon homogènes,elle s'est avérée qu'elle pouvait fournir des informations très intéressantes sur la mise en place des enrobés.

Bien qu'assez récente,la P.C.G. a connu un essor très rapide qui s'explique aisément:

-Sa mise au point a coïncidé plus au moins avec les sérieux problèmes de la prévision de la maniabilité et de la compacité sur chantier.

-C'est un essai très rapide,donc pas très coûteux,qui ne demande pas un environnement de matériels important.

L'appareil soumis le matériau aux effets simultanés d'une force de compression statique et d'un pétrissage par cisaillement qui oriente les grains du squelette minéral.

Ce processus permet d'obtenir des compacités très élevées avec une attrition minimale.

Une relation liant le compactage par pneumatique et par la P.C.G a été établie, mais tâchée d'une certaine dispersion :

$$n_g = k.e.n_p$$

$n_g$  : Nombre de girations à l'essai P.C.G;

$n_p$  : Nombre de passes d'un compacteur quelconque dont l'efficacité est exprimée par un coefficient  $k$ ;

$k$  : 0,625 pour certains compacteurs à pneumatiques et peut atteindre 2,5 pour certains vibrants;

$e$  : Epaisseur de la couche.

$$4\text{cm} < e < 12\text{cm}$$

### 3.5.4 NOMENCLATURE DES ESSAIS RELATIFS AUX ENROBES BITUMINEUX

#### 3.5.4.1 LES BETONS BITUMINEUX

L'étude au laboratoire d'un béton bitumineux doit comprendre :

- La compacité L.C.P.C;

- La compacité Marshall;

- La résistance à la compression à 18°C;

- Le rapport immersion/compression.

Table 3.4: Performances recherchées

| ESSAIS                         | COUCHE<br>DE<br>LIAISON | COUCHE<br>DE<br>ROULEMENT |
|--------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| *Essai immersion/compression   |                         |                           |
| -Compacité L.C.P.C en %        |                         |                           |
| .Minimale                      | 90                      | 91                        |
| .Maximale                      | 94                      | 95                        |
| *Résistance à la compression   |                         |                           |
| en MPa avec :                  |                         |                           |
| -Un bitume 80/100              | 5,0                     | 6,0                       |
| -Un bitume 60/70               | 6,0                     | 6,0                       |
| -Un bitume 40/50               | 7,0                     | 7,0                       |
| *Rapport immersion/compression | 0,75                    | 0,75                      |
| *Compacité Marshall(Maximale)  | 95                      | 96                        |

### 3.5.4.2 GRAVE-BITUME

L'étude au laboratoire des graves-bitumes comprend :

- La compacité L.C.P.C;
- La résistance à la compression;
- Le rapport immersion/compression.

Les graves-bitumes 0/20 et 0/31,5mm doivent normalement présenter les performances citées dans le tableau suivant :

Table 3.5: Performances recherchées

| ESSAIS                                       | COUCHE<br>DE<br>BASE       | COUCHE<br>DE<br>FONDATION |
|--|----------------------------|---------------------------|
| *Essai d'immersion/compression<br>à 18°C.    |                            |                           |
| -Compression L.C.P.C en %                    |                            |                           |
| . Minimale                                   | 88                         | 85                        |
| . Maximale                                   | 96                         | 96                        |
| *Résistance à la compression<br>en MPa avec: | Indice de concassage<br>85 |                           |
| -Bitume 60/70                                | 5,0-4,0                    | 3,0                       |
| -Bitume 40/50                                | 6,0-5,0                    | 4,0                       |
| *Rapport immersion/compression               | 0,65                       | 0,65                      |

# CHAPITRE-4

## LA RHEOLOGIE



## Chapitre 4

### LA RHEOLOGIE

#### 4.1 INTRODUCTION

La rhéologie est une science qui s'intéresse aux comportements mécaniques des matériaux. La rhéologie des liants routiers est l'étude de leurs propriétés d'écoulement.

Cette étude est très vaste et très compliquée non seulement du fait que les liants routiers peuvent être considérés à des stades très variés de leurs états physiques, depuis les liquides visqueux tels que les goudrons ou les cut-backs encore des émulsions, jusqu'aux liants durs et cassants, en passant par les solides demi-mous.

Les méthodes utilisées pour étudier les propriétés rhéologiques relèvent de différentes considérations théoriques ou pratiques. On distingue, en effet, en générale la viscosité, la pénétration, le point de ramollissement bille et anneau, la mesure de la ductilité...etc

Rappelons tout d'abord quelques notions théoriques sur la déformation sous l'action des sollicitations. Si on soumet un

corps à une contrainte de cisaillement, il va naître une déformation qui peut être élastique ou se faire au contraire par écoulement.

Une première étude a donc fait apparaître deux types de matériaux: Les solides élastiques linéaires et les fluides visqueux newtonniens. Ils sont appelés corps idéaux.

Le solide élastique linéaire est un matériau idéal communément utilisé en calcul des structures. Il est supposé suivre la loi de Hooke, qui dans un état de contraintes uniaxiales prend la forme suivante :

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1)$$

E : module de Hooke (module élastique)

Pour une situation de cisaillement pure la loi de Hooke prend une expression similaire:

$$\tau = G \cdot \Gamma \quad (2)$$

G : module de cisaillement.

Pour un chargement plus générale, la théorie d'élasticité utilise la loi de Hooke généralisée :

$$\sigma_{ij} = \lambda \cdot \epsilon_{pp} \cdot \delta_{ij} + 2 \cdot \mu \cdot \epsilon_{ij} \quad (3)$$

$$i, j = 1, 2, 3$$

$\lambda$  et  $\mu$  : sont appelés coefficients de LAME.

Le fluide visqueux newtonien est utilisé dans de nombreuses situations de l'analyse des fluides visqueux. Il diffère d'un solide dans la mesure où il ne transmet pas l'effet

de cisaillement. L'équation constitutive pour de tels corps est la suivante :

$$\sigma = \eta \cdot \frac{d\epsilon}{dt} \quad (4)$$

Il n'ya aucune raison, cependant de penser que les matériaux sont séparés en deux catégories (solides élastiques linéaires et fluide visqueux newtoniens). En fait, ils ne sont que les extrémités d'un spectre de matériaux contenant les solides viscoélastiques, les solides viscoplastiques et les solides plastiques...etc

#### 4.2 LES DIFFERENTS COMPORTEMENTS RHEOLOGIQUES

L'étude des comportements mécaniques des matériaux est réalisée par l'intermédiaire d'essais simples parmi lesquels nous citerons l'essai de fluage et de relaxation .

##### -L'ESSAI DE FLUAGE : (Figure 1)

Pour définir complètement les comportements rhéologiques complexes les "rhéologues" préfèrent souvent utiliser les essais de fluages et de relaxation.

Dans un essai de fluage, le corps à étudier est soumis brusquement en traction ou en cisaillement à une contrainte ( $\sigma$  ou

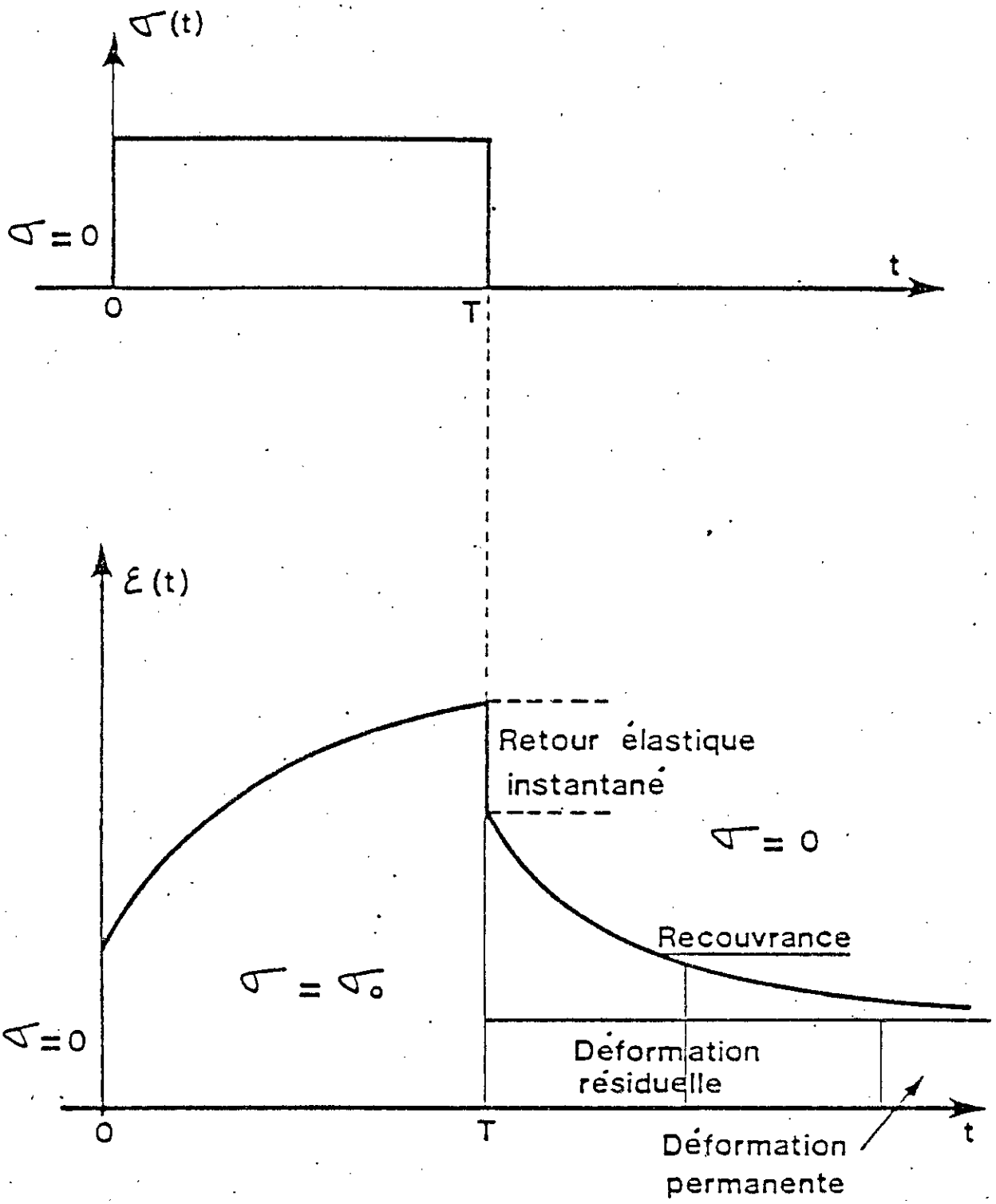


Figure 1. Courbe de fluage

r) qui est ensuite maintenue constante. La déformation subie par l'éprouvette est suivie à tout instant t. Après un certain temps la contrainte est annulée pour suivre la courbe de recouvrance du matériau.

#### -L'ESSAI DE RELAXATION : (Figure 2)

Dans un essai de relaxation, c'est la déformation qui est imposée rapidement à l'éprouvette puis maintenue constante. L'évolution de la contrainte dans l'éprouvette permet de tracer la courbe de relaxation.

Schématiquement, il y a trois comportements simples (élastique, visqueux et plastique) et d'autres comportements complexes qui résultent de la combinaison des comportements simples.

### 4.2.1 LES COMPORTEMENTS SIMPLES

#### 4.2.1.1 ELASTICITE PARFAITE

On dira qu'un matériau est élastique s'il ne conserve la mémoire que d'un seul état, l'état naturel ou non déformé. C'est-à-dire qu'une déformation est dite élastique lorsque sous l'action d'un effort déterminé, naît une déformation parfaitement définie, en outre lorsque l'effort vient à cesser, la déformation est entièrement récupérable et il y a retour à la forme primitive. Il existe donc une relation univoque entre la contrainte appliquée et la déformation résultante. (figure 3)

$$\sigma = E(\epsilon) \quad (5)$$

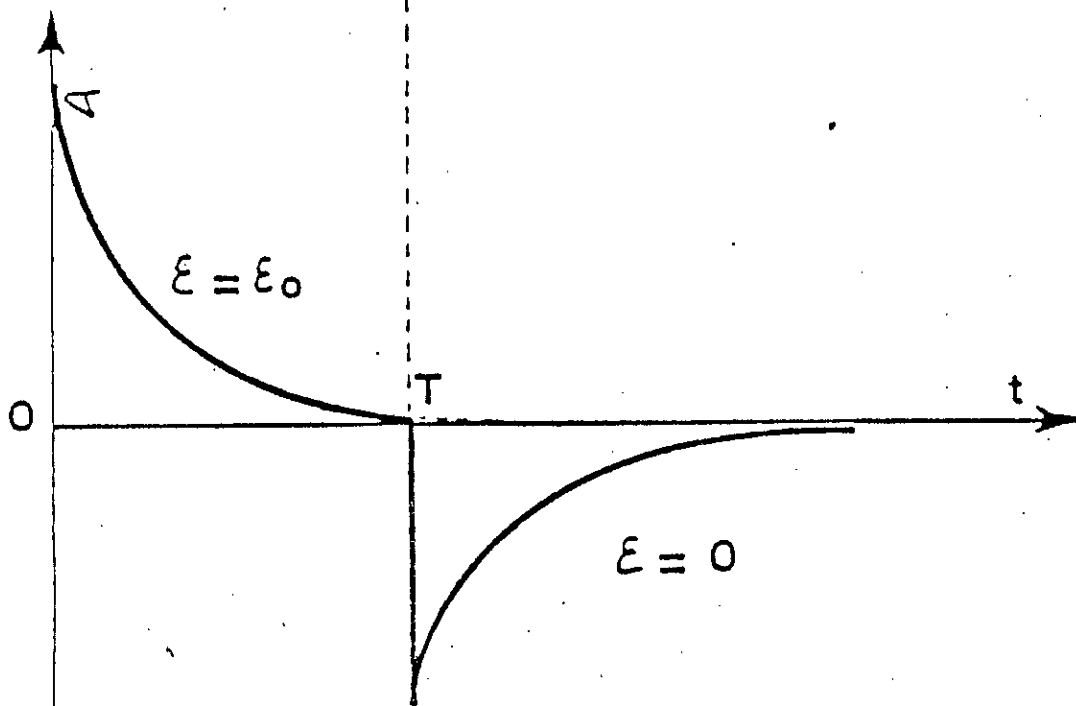
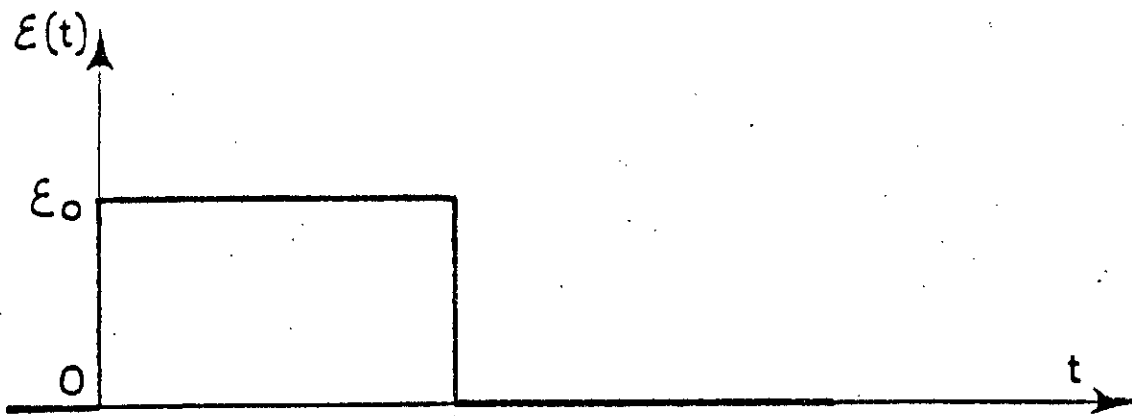
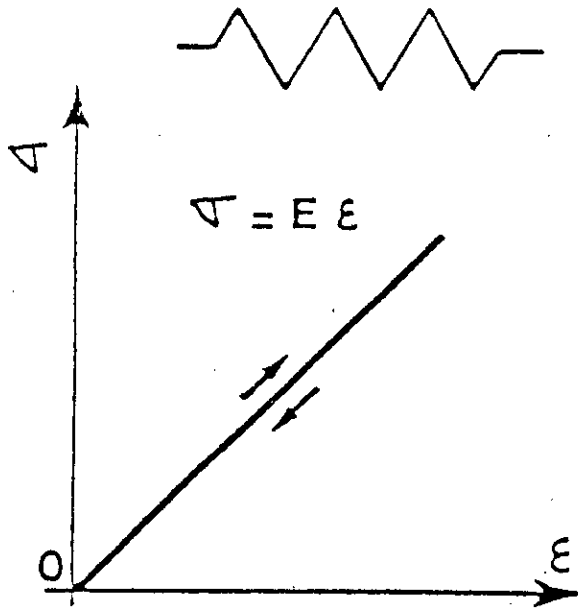


Figure 2 . Essai de relaxation

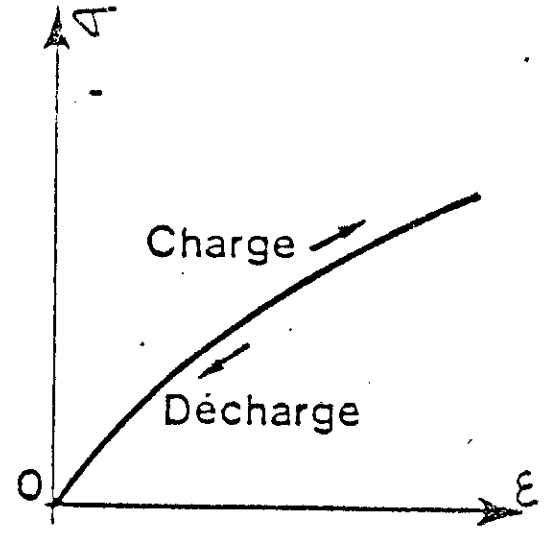
# ELASTICITE

Figure.3

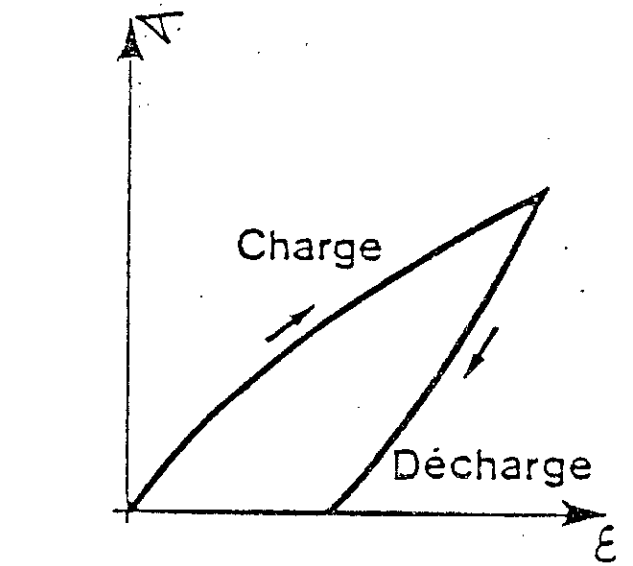
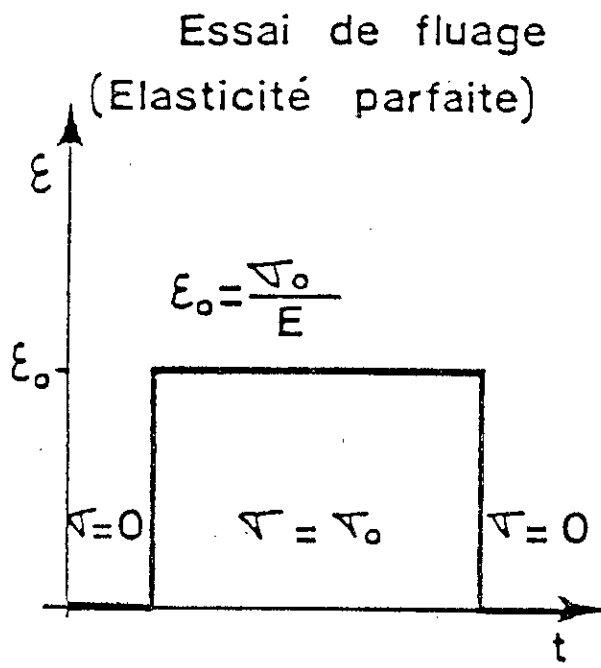
## ESSAI DE TRACTION OU COMPRESSION



Elasticité linéaire



Elasticité parfaite  
mais non-linéaire



Elasticité imparfaite  
(comportement  
viscoélastique)

On dit que la déformation élastique se fait suivant la loi de HOOKE lorsque la déformation acquise est proportionnelle à l'effort exercé. Les solides élastiques linéaires ou solides de HOOKE sont des cas particuliers des corps élastiques.

L'équation rhéologique pour de tels corps s'écrit:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (6)$$

Dans la réalité, peu de corps sont parfaitement élastiques et moins encore peu de corps obéissent réellement à la loi de HOOKE. Lorsque le corps n'est pas parfaitement élastique, il y a retour partiel seulement partiel vers la forme primitive lorsque l'effort vient à cesser.

#### 4.2.1.2 LA VISCOSITE

On entend par viscosité des solides, le fait que les contraintes dépendent des vitesses de déformation.

Pour étudier les corps se rapprochant de l'état liquide, on ne considère plus la déformation qui peut devenir très grande voire infinie mais on la remplace par la vitesse de déformation.

Pour déformer les liquides avec une vitesse  $d\epsilon/dt$ , il faut exercer sur eux une contrainte  $\sigma$ , pour certains d'entre eux il existe une relation biunivoque donnée par l'équation:

$$\sigma = \eta (d\epsilon/dt) \quad (7)$$

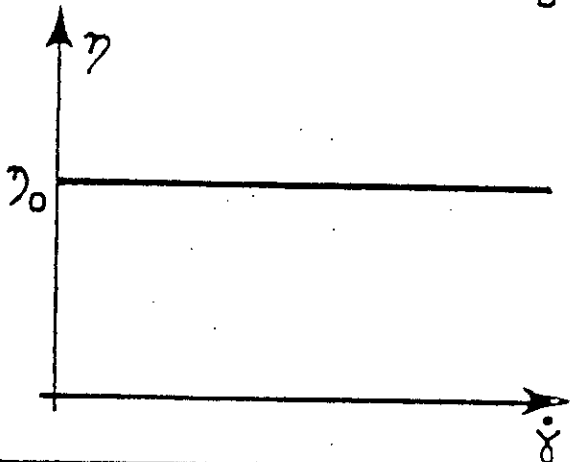
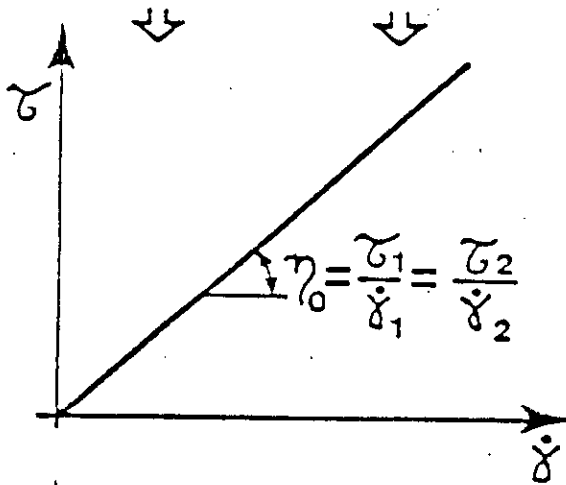
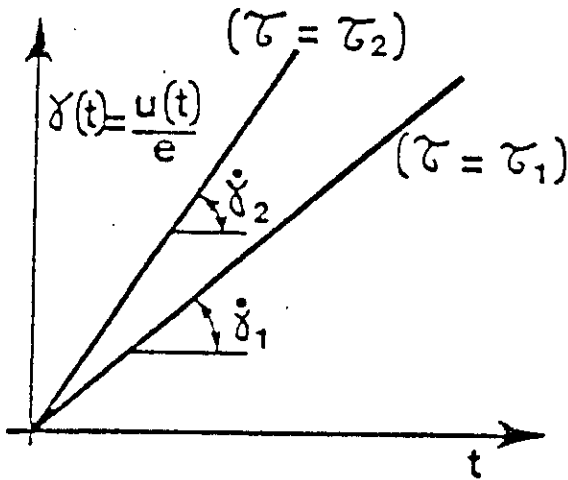
$\eta$  : Coefficient de viscosité.



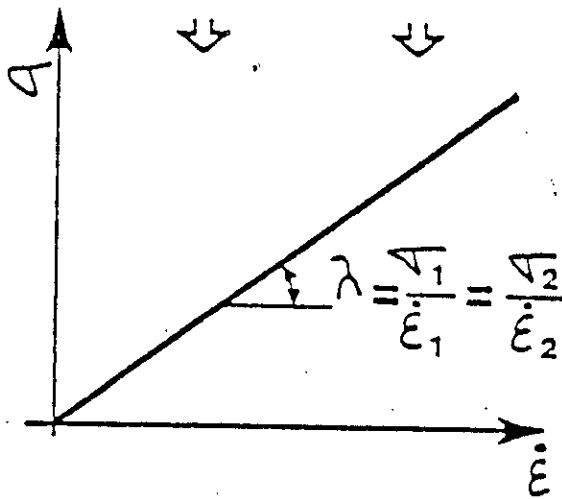
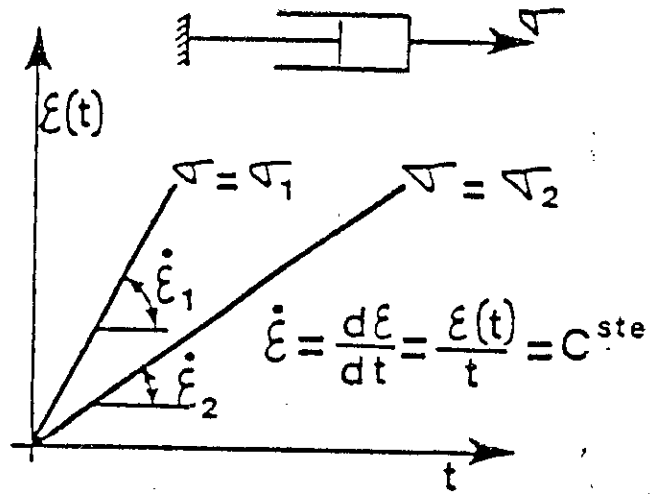
Figure .4 . VISCOSITE PARFAITE

ESSAI DE FLUAGE

EN CISAILLEMENT



EN TRACTION



$\lambda$  = Viscosité de TROUTON

Si le "liquide" est  
INCOMPRESSIBLE

et

ISOTROPE

$$\lambda = 3\eta$$

ECCOULEMENT NEWTONNIEN

Ce sont les liquides visqueux

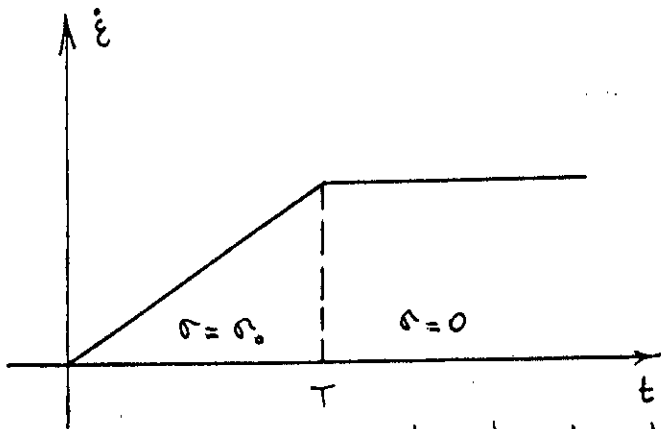


figure 5. courbe de relaxation

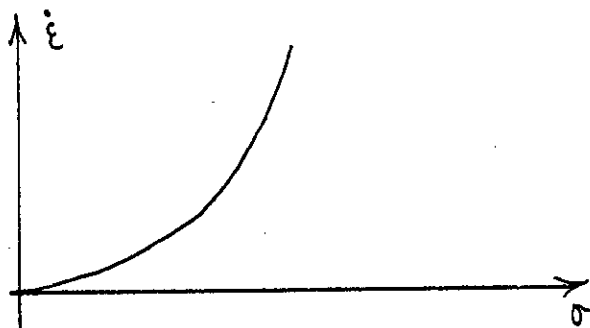


Figure 6. courbe  $\sigma - \dot{\epsilon}$

Leur courbe de fluage est une droite car  $\sigma$  étant fixée à sa valeur  $\sigma_0$ , la vitesse de déformation se trouve à son tour fixée. Après disparition de la contrainte, la déformation conserve la valeur qu'elle avait atteinte.

#### 4.2.1.3 LIQUIDE PARFAITEMENT VISQUEUX (liquide newtonnien)

L'écoulement purement visqueux peut être newtonien ou non. Un liquide newtonien ou normal est caractérisé par une relation de proportionnalité entre la contrainte et la vitesse de déformation.

$$\sigma = \mu \cdot d\epsilon/dt \quad (8)$$

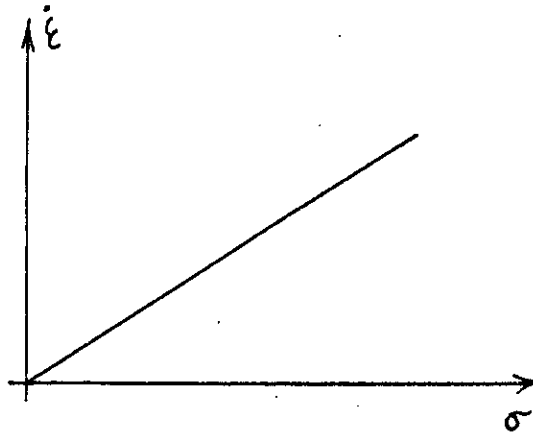


Figure 7. Courbe  $\sigma - \dot{\epsilon}$

Un liquide visqueux qui n'est pas newtonnien est dit anormal.

Les liants routiers, même lorsqu'ils peuvent être considérés, en pratique comme entièrement visqueux, n'ont pas en général un écoulement newtonien. Le plus souvent la vitesse de déformation n'est proportionnelle à la contrainte mais croît plus vite que cette dernière.

#### 4.2.1.4 LA PLASTICITE

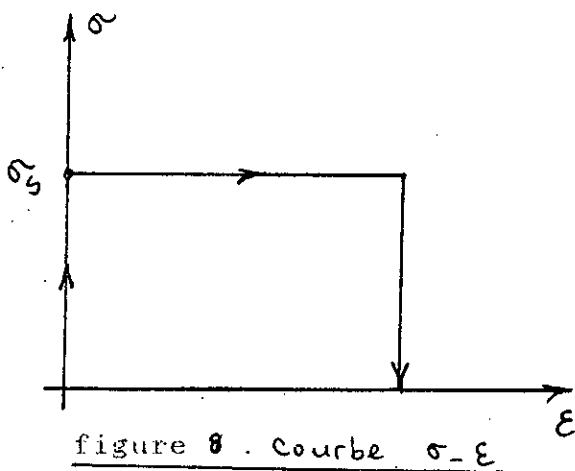
La plasticité est une extension de la théorie élastique qui permet d'introduire des déformations irréversibles. Dans l'écoulement plastique pur, la déformation n'est pas récupérable même partiellement (exactement comme dans le cas de la déformation visqueuse pure). La différence entre la déformation plastique pure

et la déformation visqueuse pure, est que la déformation visqueuse commence à prendre naissance aussitôt que la contrainte apparaît, tandis que la déformation plastique ne commence à prendre naissance que lorsque la contrainte a acquis une certaine valeur finie.

En résumé, ce type de comportement est caractérisé par l'existence d'un seuil de contrainte au-dessous duquel il n'y a pas de déformation, celle-ci gardera la valeur atteinte à la suppression de la contrainte.

#### 4.2.1.5 SOLIDES PARFAITEMENT PLASTIQUES INELASTIQUES

Sous de faibles efforts, certains corps ne se déforment pas. Mais si la sollicitation augmente progressivement, le corps cédera brusquement à la valeur  $\sigma_c$  de la contrainte. Si la contrainte cesse de s'exercer la déformation conservera alors la valeur maximale qu'elle a atteint au cours de l'expérience. Ce sont les solides parfaitement plastiques inélastiques.



#### 4.2.2.2 LES CORPS VISCOELASTIQUE

Si on charge un élément élastique, la déformation augmentera avec la contrainte d'une manière continue. Après suppression de la charge, la déformation revient instantanément à son état initial. Quelque fois, une partie de la déformation revient à son état initial après un certain temps. On parlera alors d'élasticité retardée ou différée.

Si on charge maintenant un élément constitué d'un matériau viscoélastique et qu'on le décharge quelques instants après, la déformation ne revient pas à son état initial.

L'élément s'écoule comme un liquide très visqueux mais il montre une certaine élasticité dont une partie est retardée.

##### -COURBE DE FLUAGE :

L'écoulement visqueux se traduit par la présence d'une asymptote inclinée. La déformation augmente aussi longtemps que la contrainte s'exerce. Il subsistera une déformation permanente après disparition de la contrainte.

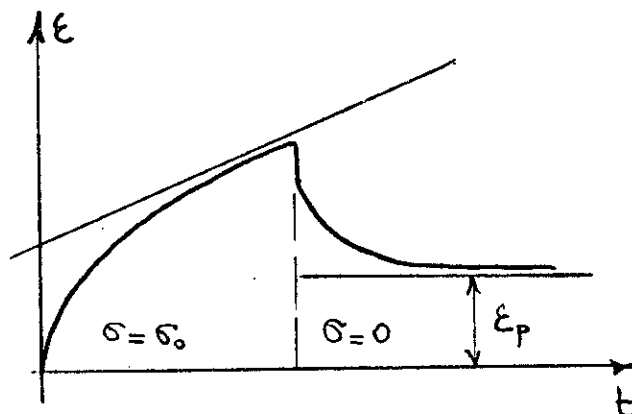


figure 10 - courbe de fluage.

-COURBE DE RELAXATION :

La courbe de relaxation tend vers l'axe des temps. La contrainte diminue de manière continue jusqu'à s'annuler.

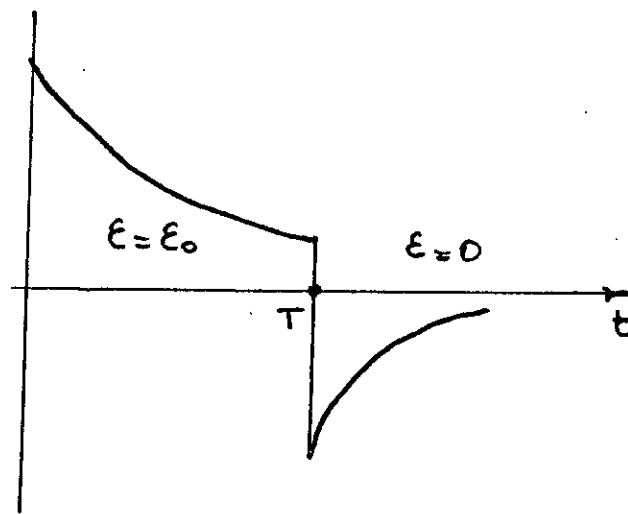
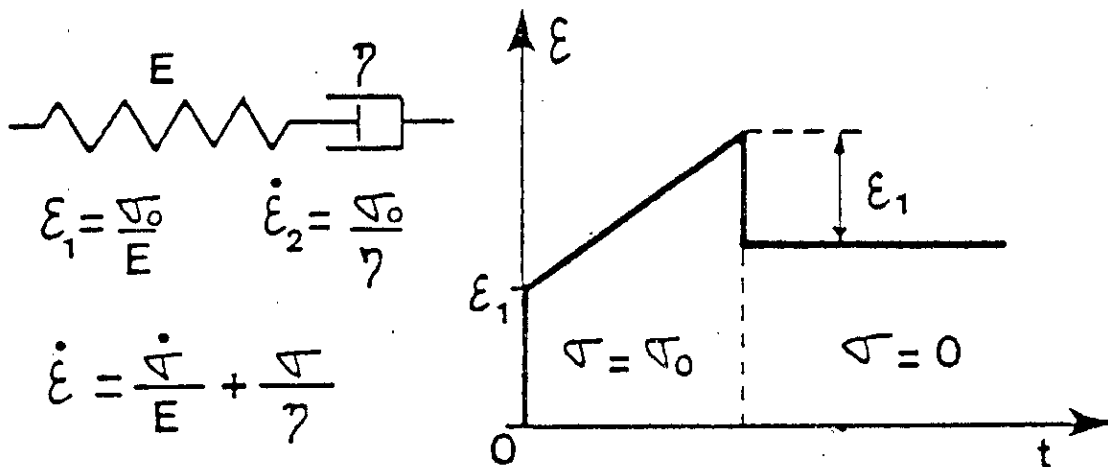


Figure 10. Courbe de relaxation.

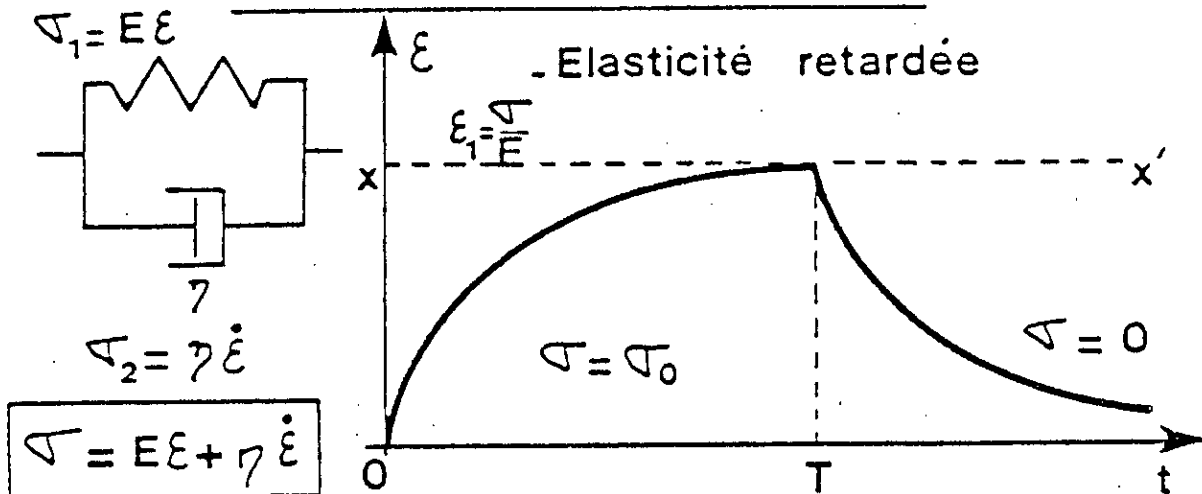
-EFFET DE LA VISCOELASTICITE :

Le comportement visqueux, en introduisant le paramètre temps, va se traduire de différentes manières. Un essai de traction simple réalisé sur un corps viscoélastique à différentes vitesses de sollicitation ne donnera pas la même courbe effort-déformation, les courbes de fluage auront l'allure donnée par la figure 10. Pour des corps plus simples (Maxwell ou Kelvin-Voigt), elles ont l'allure donnée par la figure 10. On parlera d'élasticité retardée ou différée par la viscosité. Un exemple très simple est donné par le corps de Kelvin-Voigt, qui sans l'amortisseur aurait une courbe de fluage se confondant avec l'asymptote XX' (figure 11). Le fait de mettre un amortisseur retarde la déformation qui tend finalement vers la valeur induite par le ressort mais après un temps théoriquement infini.

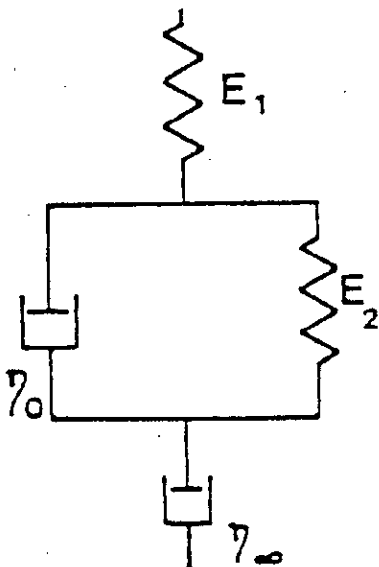
Figure 12. MODELE DE MAXWELL



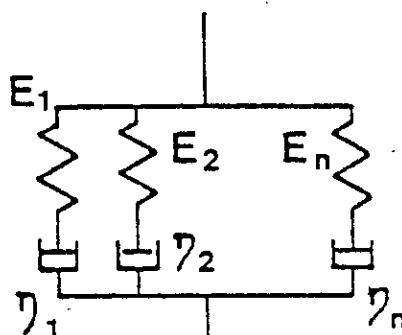
MODELE DE KELVIN-VOIGT



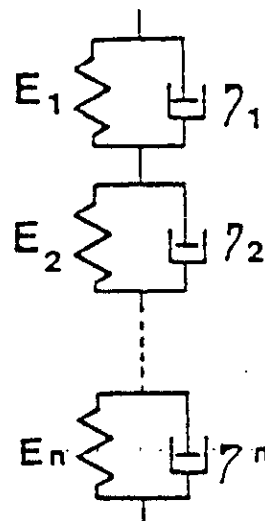
MODELE DE BURGERS



MODELE DE MAXWELL GENERALISE



MODELE DE KELVIN-VOIGT GENERALISE



Du fait de cette élasticité retardée, les corps viscoélastiques gardent à l'instant  $t_0$ , une trace des sollicitations subies avant ce temps  $t_0$ , même si ces sollicitations ont été annulées.

En effet, après un essai de fluage par exemple la recouvrance n'est totale qu'au bout d'un temps infini, même s'il n'y a pas de déformation permanente. Les sollicitations subies peu de temps avant  $t_0$  ont une importance relative plus grande que celles subies longtemps auparavant. On dit que les corps viscoélastiques sont doués d'une mémoire.

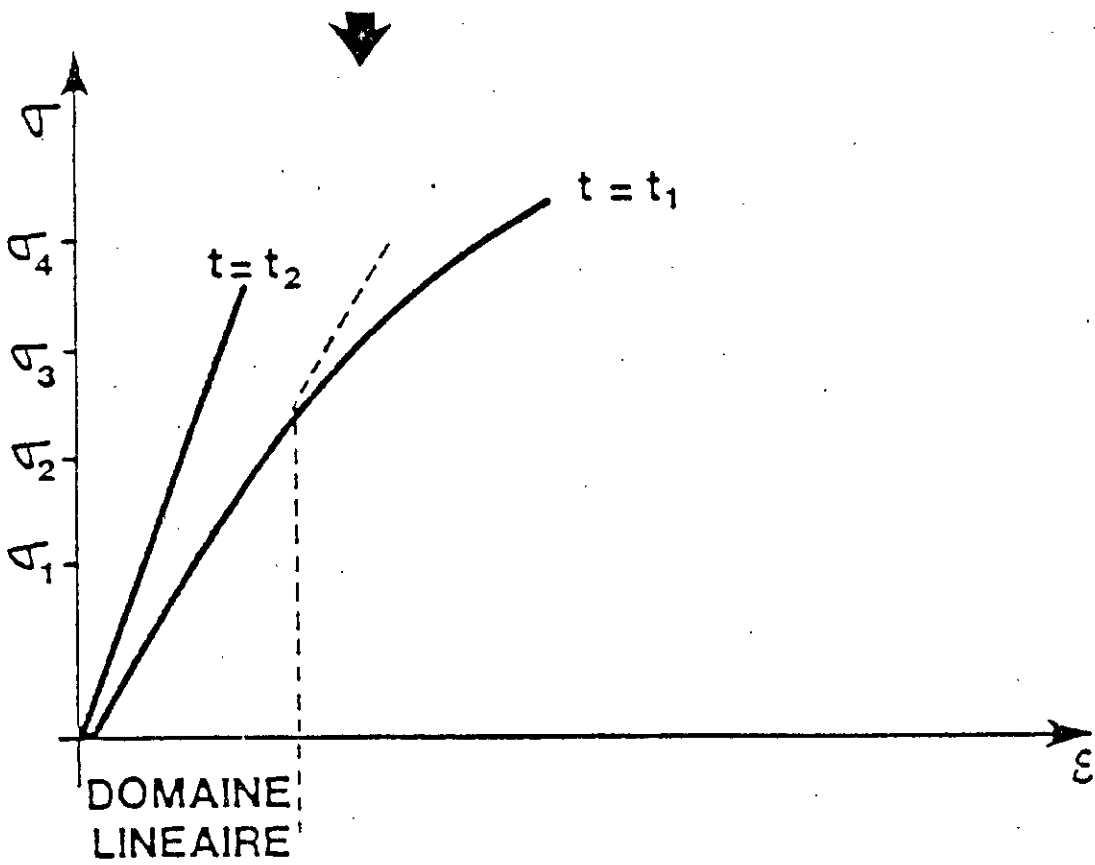
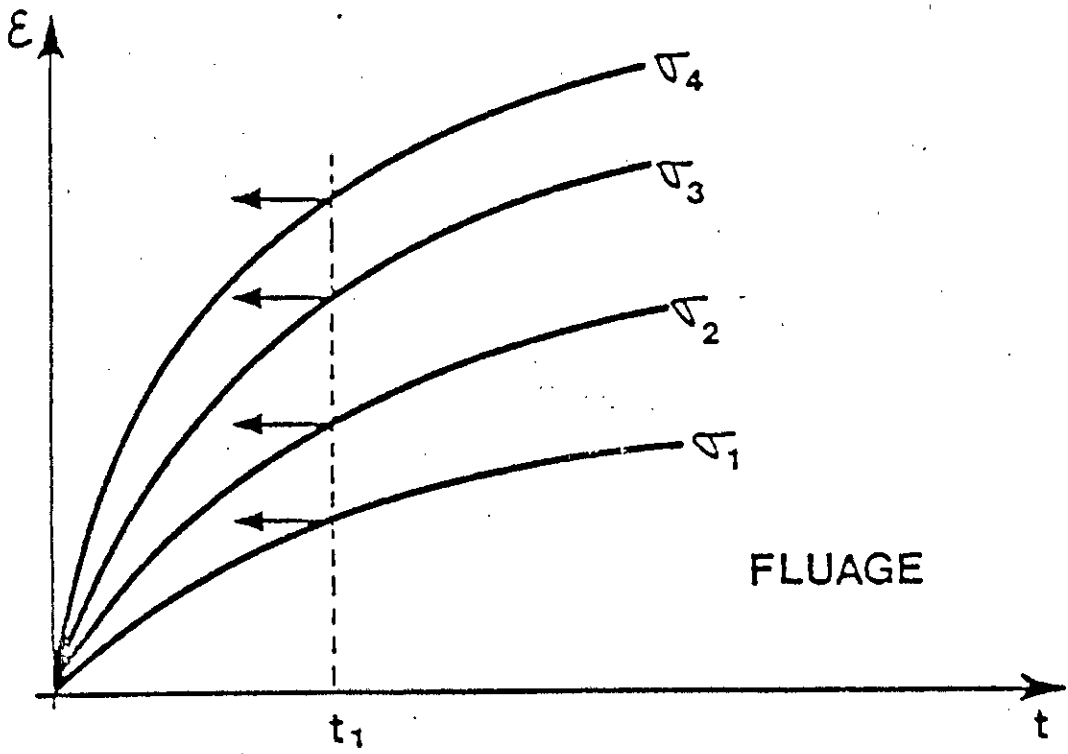


### -VISCOELASTICITE LINEAIRE ET NON LINEAIRE:

Des essais de fluage menés sur un corps viscoélastique à différents niveaux de contraintes donnent les courbes de la figure 13. Au temps  $t_1$  arbitraire, il est possible de relever les déformations  $\epsilon$  correspondant à chaque contrainte  $\sigma$  exercée. Les couples  $(\sigma, \epsilon)$  permettent de tracer la courbe contrainte déformation (figure 12). C'est sur celle-ci que le domaine de linéarité sera relevé pour le temps de charge  $t_1$  considéré.

Tout corps viscoélastique linéaire peut être décrit soit par un modèle de Maxwell généralisé ou un modèle de Kelvin-Voigt généralisé (figure 11). Son comportement peut donc être mis en équation.

Figure 13.



### 4.2.2.3 LA VISCOPLASTICITE

C'est la combinaison d'un comportement visqueux et plastique. Pour un corps viscoplastique (exemple du corps de Bingham de la figure 20), il y a superposition de la notion de seuil (plasticité) et de celle de temps (viscosité).

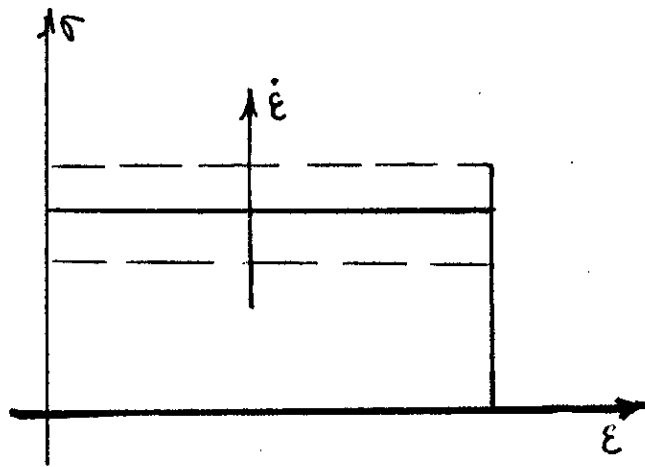


figure 14. courbe  $\sigma$ - $\epsilon$

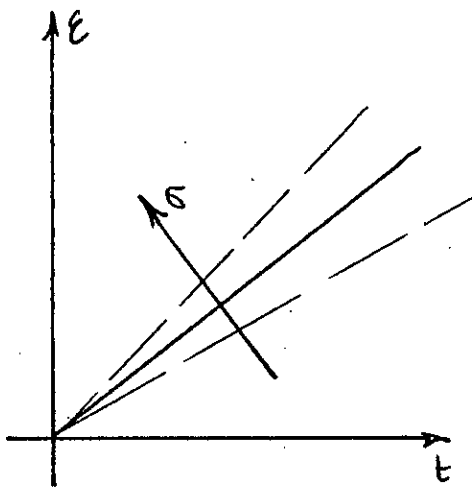


figure 15 courbe de fluage

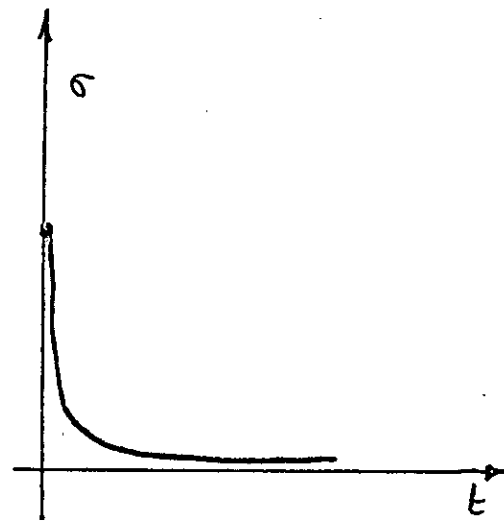


fig 16 courbe de relaxation

#### 4.2.2.4 SOLIDES ELASTIQUES PARFAITEMENT VISCOPLASTIQUES

Ce sont des corps qui présentent une viscoplasticité pour les faibles contraintes, puis au delà d'un certain seuil, présentent un écoulement irréversible en fonction de la vitesse de déformation.

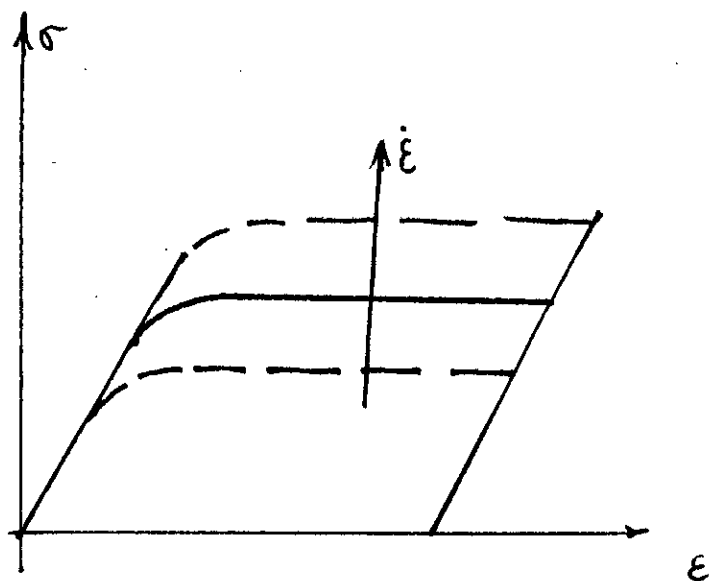


Figure 17. courbe  $\sigma$ - $\epsilon$

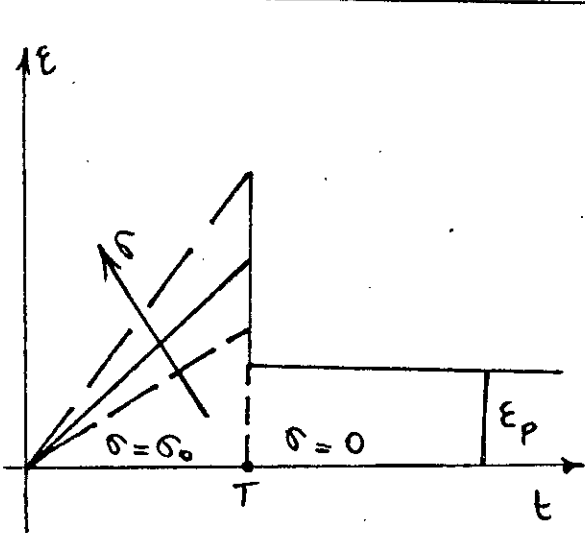


fig 18 courbe de fluage

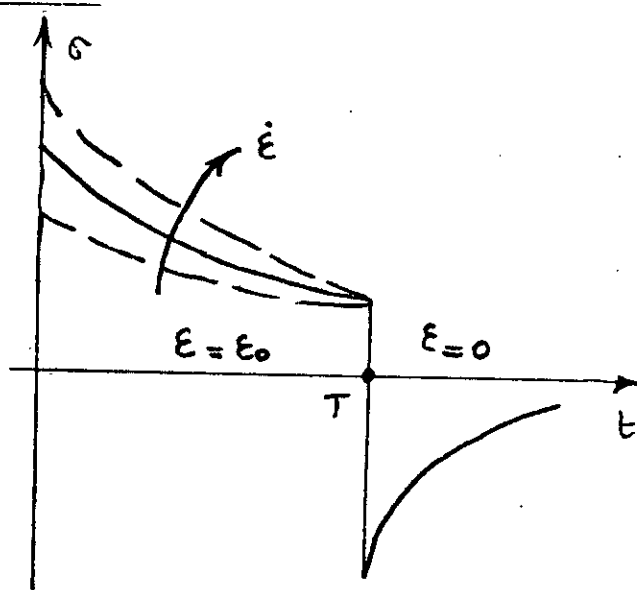
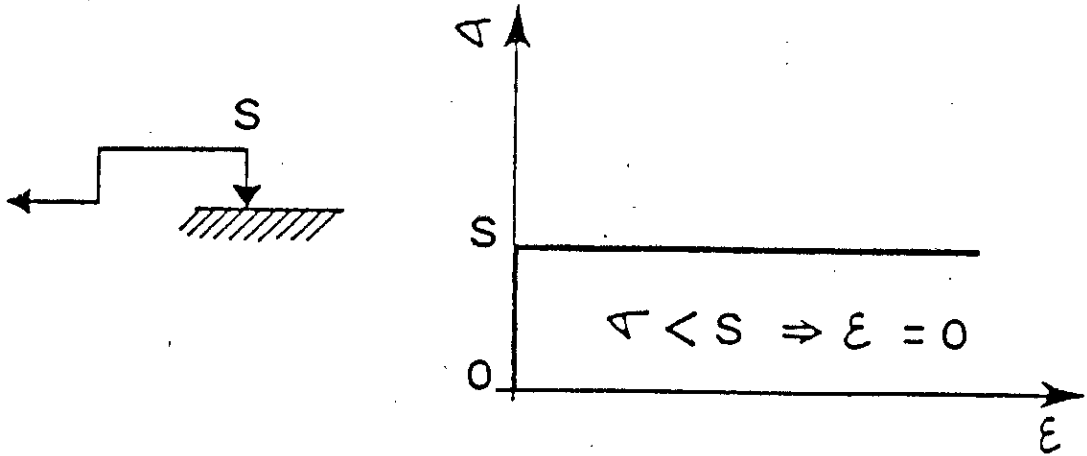
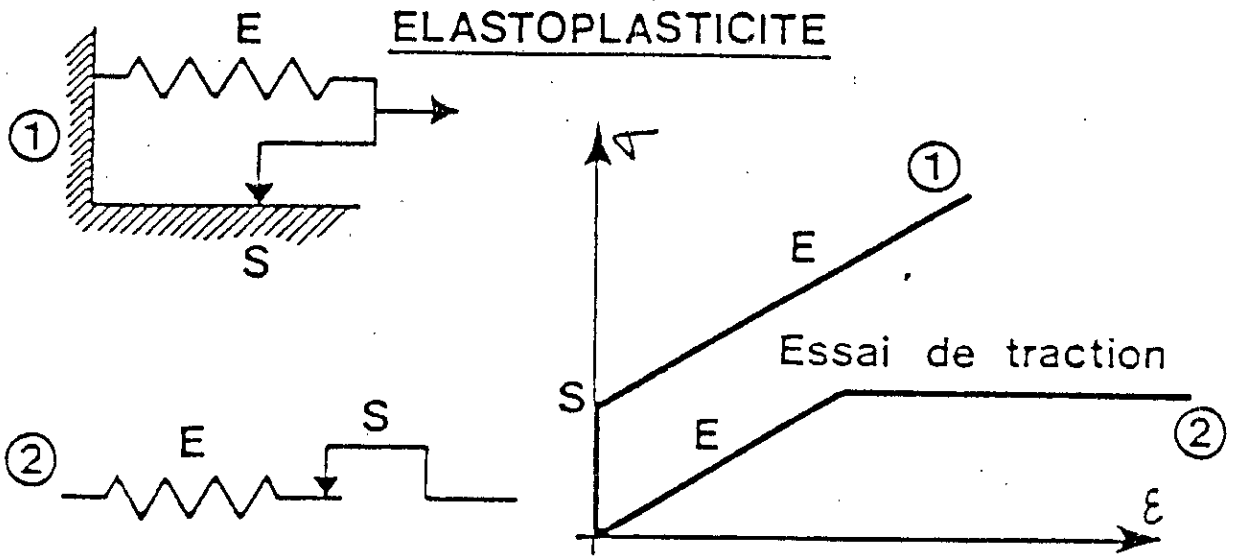


fig 19 courbe de relaxation

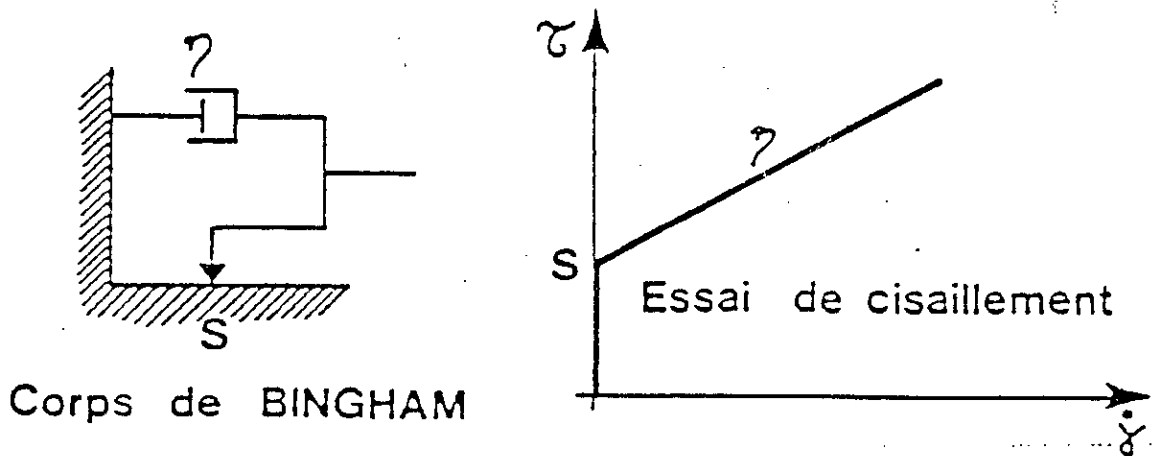
figure 20. PLASTICITE



ELASTOPLASTICITE



VISCOPLASTICITE



#### 4.2.2.5 AUTRES COMPORTEMENTS

A partir du rhéogramme contrainte-gradient de vitesse, il est souvent défini un certain nombre de comportements (figure 21).

##### -FLUIDE RHEOFLUIDISANT OU PSEUDOPLASTIQUE:

Comportement le plus répandu (c'est le cas du bitume) dans lequel la viscosité apparente décroît quand la vitesse de déformation augmente (figure 22) avec ou sans palier newtonien (comportement linéaire).

##### -FLUIDE RHEOEPAISSISSANT:

Comportement inverse du précédent, la viscosité apparente augmente au même temps que la vitesse de déformation. (figure 21 et 22)

##### -THIXOTROPIE: Il y a thixotropie si :

\*Après un long repos, une sollicitation ( $\sigma$  ou  $\epsilon$ ) étant brusquement appliquée puis maintenue fixe, la viscosité apparente est fonction décroissante de la durée d'écoulement.

\*Le corps retrouve son état initial après un repos assez long.

Les suspensions d'argile dans l'eau et les émulsions épaisses de bitume sont des corps thixotropes dans certaines conditions.

Figure. 21

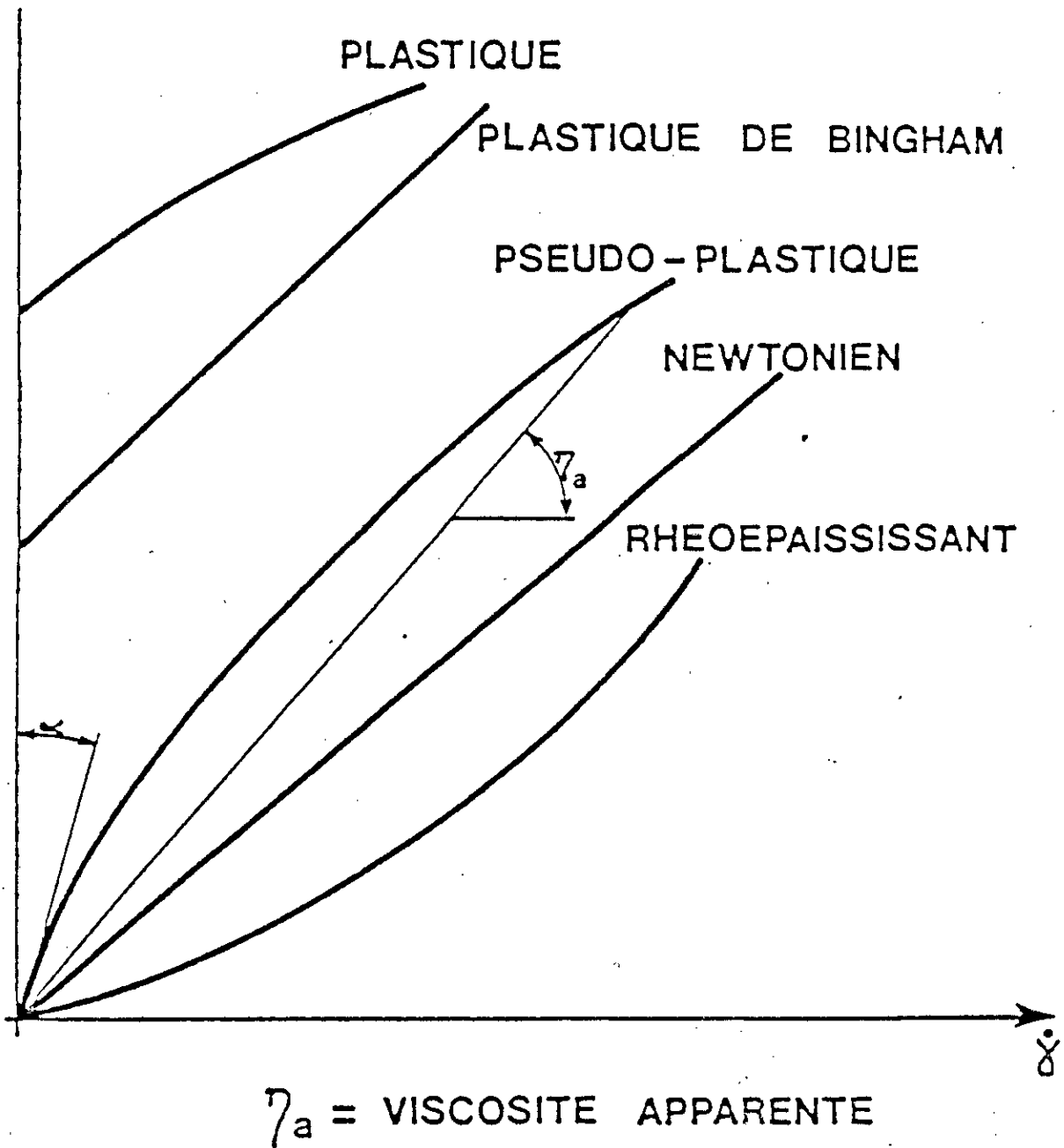
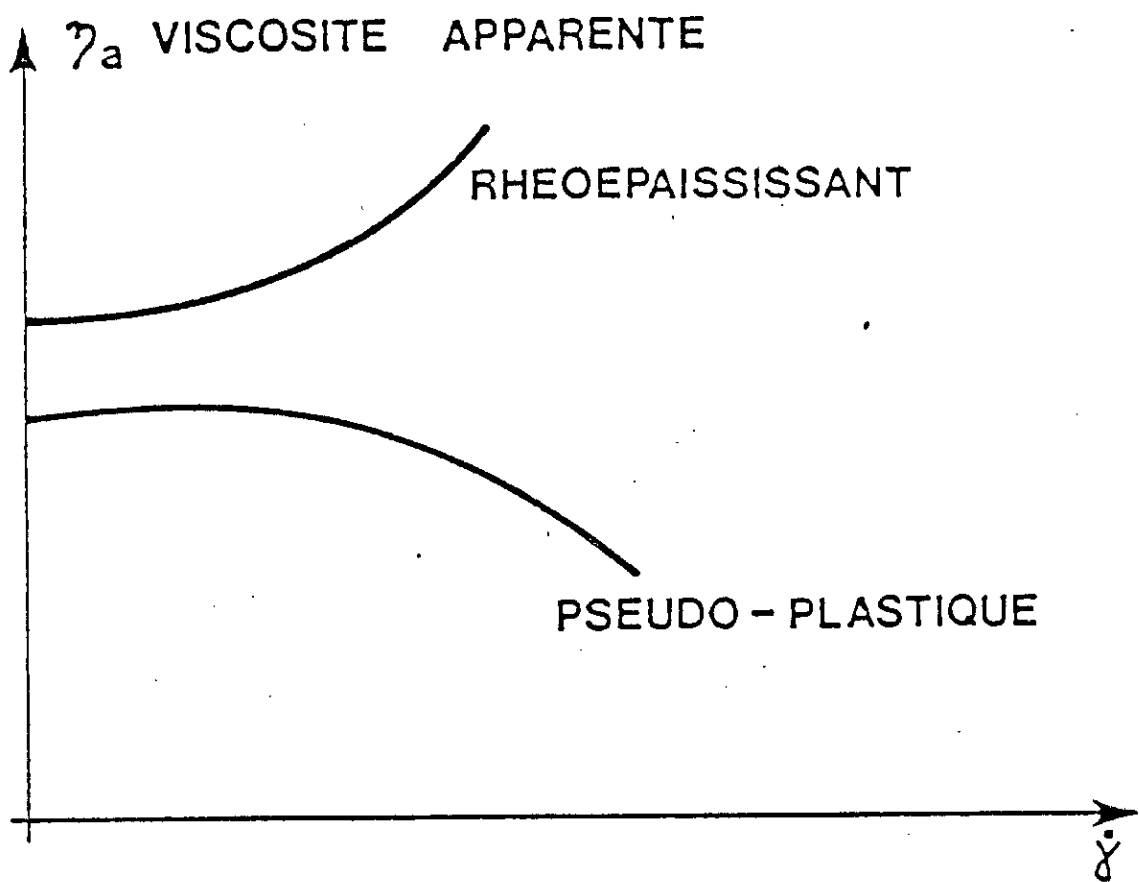


Figure 22.



COMPORTEMENT RHEOEPASSISSANT  
ET PSEUDO - PLASTIQUE



-RHEOPEXIE: C'est la situation opposée à la précédente et beaucoup plus rare. La viscosité apparente croît avec la durée d'application de la charge.

### 4.3 LES MODELES RHEOLOGIQUES

Comme support de la pensée dans la formulation de modèles de comportement uniaxial, On utilise souvent des modèles rhéologiques. L'intérêt de cette méthode est qu'elle conduit à la formulation de lois de comportement qui satisfont automatiquement les principes de la thermodynamique.

Un modèle rhéologique est un système mécanique dont le comportement est aussi proche que possible de celui du matériau qu'on veut étudier.

Il est évident, que pour représenter correctement le comportement d'un matériau donné, cela nécessite un modèle mécanique très complexe.

On est donc face à un compromis, entre une modélisation aussi fidèle que possible du comportement du matériau mais dont l'étude est fastidieuse et une modélisation "simpliste" dont l'étude est relativement plus facile.

C'est à l'ingénieur de savoir quel est le côté à sacrifier, la modélisation ou la résolution, selon la précision qu'il désire obtenir du comportent<sup>ment</sup> du matériau.

### 4.3.1 MODELE RHEOLOGIQUE POUR LE COMPORTEMENT VISCOELASTIQUE LINEAIRE

#### 4.3.1.1 LE MATERIAU VISCOELASTIQUE LINEAIRE NON VIEILLISSANT

Il est possible d'admettre, pour certains matériaux que le comportement est non vieillissant, cela veut dire que ses propriétés mécaniques n'évoluent pas avec le temps ou encore que son âge n'intervient pas.

Cette propriété se traduit mathématiquement par la propriété d'invariance par translation dans le temps: la réponse à l'instant  $t_0$ , est la même que la réponse à l'instant  $(t_0 + \tau)$  pour la même sollicitation à l'instant  $(t_0 + \tau)$ .

Les modèles viscoélastiques linéaires non vieillissants sont constitués à partir de deux modèles élémentaires représentés par:

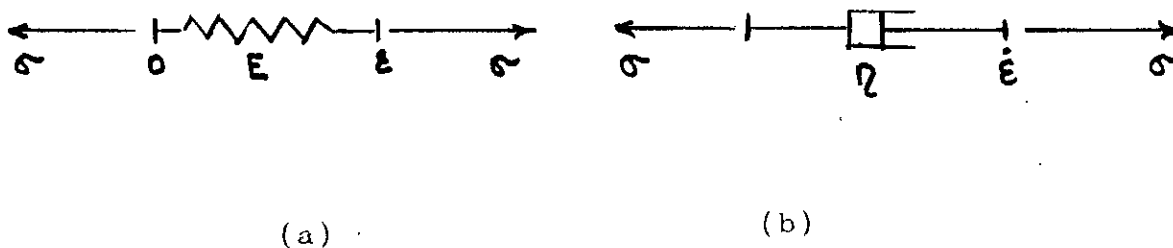


figure 23 - modèles viscoélastiques non vieillissants

élémentaires

a) élément élastique linéair (ressort);

b) élément visqueux linéaire (amortisseur);

$\sigma$  : la contrainte qui agit sur l'élément;

$\epsilon$  : la déformation de l'élément;

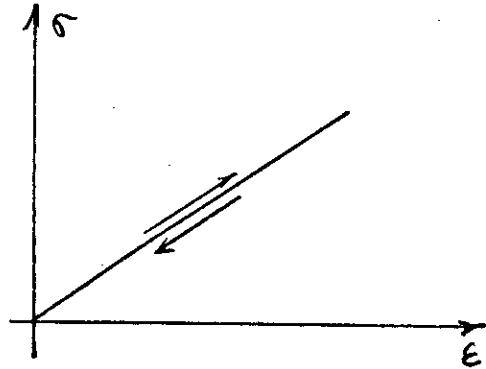
E : le module élastique de l'élément;

$\mu$  : coefficient de viscosité.

- ELEMENT ELASTIQUE LINEAIRE: Le modèle mécanique de tels corps est ressort de raideur E.

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

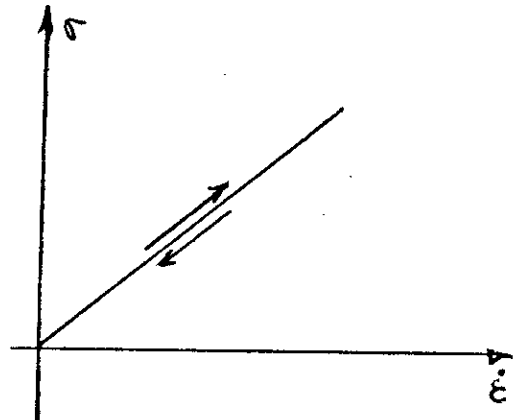
figure 24 - courbe  $\sigma - \epsilon$



- ELEMENT VISQUEUX LINEAIRE: Ce comportement est modélisé par un amortisseur.

$$\sigma = \mu \cdot d\epsilon / dt$$

figure 25 - courbe  $\sigma - \dot{\epsilon}$



### 4.3.2 MODELE RHEOLOGIQUE POUR LE COMPORTEMENT PLASTIQUE

La plasticité parfaite peut être représentée par un "patin" frottant.

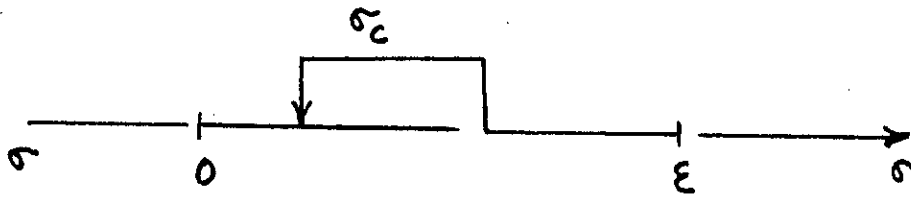


figure 26 - modèle rhéologique pour le comportement plastique

- $\sigma_c < \sigma < \sigma_c \implies \epsilon = 0$
- $\sigma > \sigma_c$  ou  $\sigma < -\sigma_c \implies \epsilon = 0$  ( $\epsilon$  augmente indéfiniment)

#### -MODELE RHEOLOGIQUE POUR L'ELASTOPLASTICITE:

(Modèle de SAINT-VENANT)

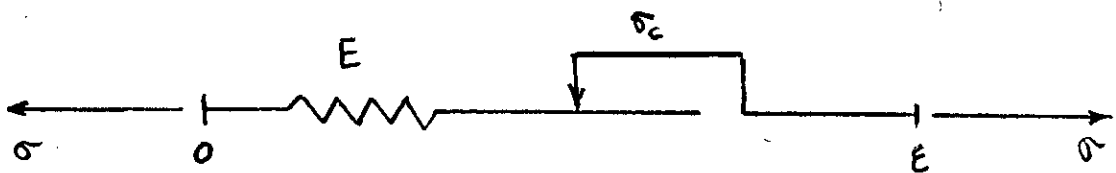


figure 27. modèle de St-Venant

-MODELE RHEOLOGIQUE POUR LA VISCOPLASTICITE:

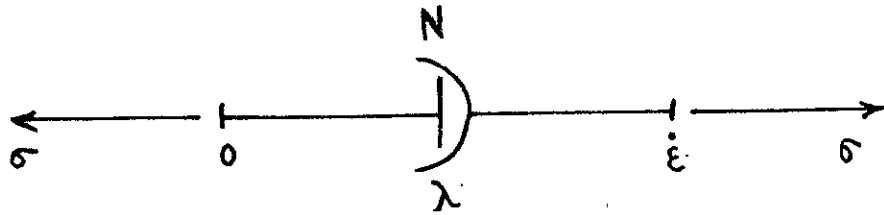


figure 28. modèle rhéologique pour la viscoplasticité

$$\sigma = \dots (d\epsilon/dt)^{1/N}$$

4.3.3 MODELE RHEOLOGIQUE POUR LES SOLIDES ELASTIQUES PARFAITEMENT VISCOPLASTIQUE

(MODELE DE BINGHAM-NORTON)

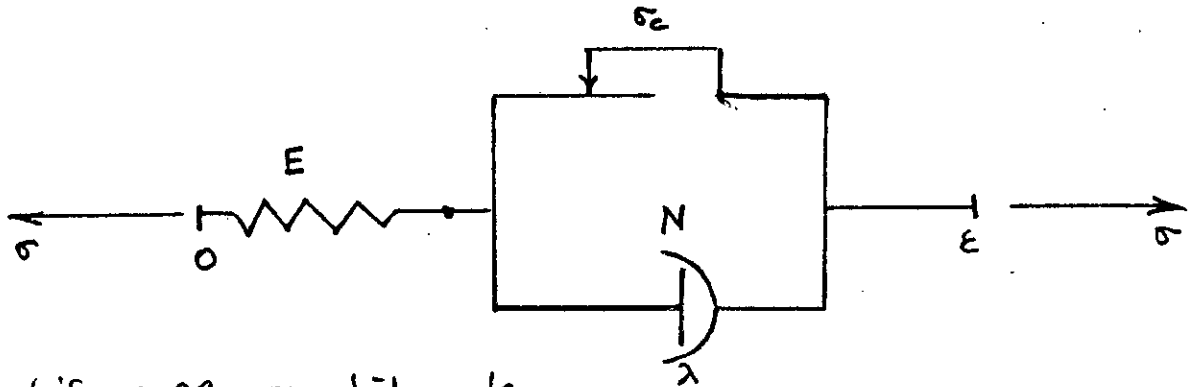


figure 29. modèle de Bingham - Norton

$$\sigma < \sigma_s \quad \implies \quad \sigma = E \cdot \epsilon$$

$$\sigma > \sigma_s \quad \implies \quad \epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p$$

$$\sigma = E \cdot \epsilon_e + \sigma_s + a \cdot (d\epsilon_p/dt)^{1/N}$$

CHAPITRE-5

MODULE

COMPLEXE

## Chapitre 5

### MODULE COMPLEXE

#### 5.1 INTRODUCTION

La connaissance des caractéristiques fondamentales (module de Young et coefficient de Poisson) et des lois de comportement (fatigue, fluage) des matériaux routiers est indispensable pour concevoir une méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées.

les enrobés bitumineux sont des corps viscoélastiques, leurs propriétés mécaniques dépendent de la durée de la sollicitation qu'ils subissent et de la température à laquelle celle-ci s'exerce. L'hétérogénéité du matériau complique en outre le problème.

Un solide élastique idéal, soumis à un effort, se déforme proportionnellement à l'amplitude de celui-ci.

Dans le cas particulier d'une sollicitation uniaxiale le rapport de l'effort ( $\sigma$ ) à la déformation relative en élongation ( $\epsilon$ ) est une constante. Dans le cas élastique ce rapport



appelé module de Young est notamment indépendant de la température et de la durée de l'application de la charge.

La présence du bitume confère un comportement viscoélastique et thermoplastique au mélange.

Lorsqu'on soumet un matériau viscoélastique tel que le bitume à un effort constant, une déformation visqueuse qui dépend de la durée d'application vient s'ajouter à la déformation élastique instantanée.

VAN DER POEL, étendant la notion de module de Young, a étudié dans le cas des bitumes les variations de ce rapport contrainte/déformation (appelé alors module de rigidité  $S_b$ ), avec la température et le temps de charge.

Si un effort non constant est appliqué à un matériau viscoélastique la déformation visqueuse sera en retard sur l'effort. Par exemple lorsqu'une contrainte sinusoïdale :

$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t)$  est appliquée à un élément de volume d'un tel matériau à la température  $T$ , il y a accommodation et la déformation relative résultante est également sinusoïdale.

Les deux signaux ont même fréquence mais ils sont déphasés; La déformation relative:

$\epsilon(t, T, \omega) = \epsilon_0(T, \omega) \cdot \sin[\omega t - \Phi(T, \omega)]$  est en retard par rapport à la contrainte.

On considérera pour ce qui suit, le module de rigidité des bitumes comme étant le rapport des amplitudes respectives de la contrainte et de la déformation relative:

$$S_b = \sigma_0 / \epsilon_0$$

Le déphasage  $\Phi$  est appelé angle de perte sa valeur donne une idée, de la prédominance du caractère visqueux ou élastique du matériau dans des conditions bien déterminées.

-Pour un corps élastique  $\Phi = 0$ ;

-Pour un corps visqueux  $\Phi = \pi/2$ .

Le module complexe d'un corps viscoélastique est le nombre complexe  $E^*$ , qui a pour module  $S_m$  et dont l'argument est égale à  $\Phi$ .

$$E^* = S_m \cdot e^{i\Phi} = S_m \cdot \cos\Phi + i S_m \cdot \sin\Phi$$

Cette notion de module complexe a été introduite pour généraliser les lois de la mécanique, en principe réservés aux seuls corps élastiques. Les mêmes formules peuvent alors être appliquées aux matériaux élastiques et viscoélastiques moyennant pour ces derniers, l'utilisation des nombres complexes.

Rappelons enfin que les parties réelles et imaginaires du module complexe,  $S_m \cos\Phi$  et  $S_m \sin\Phi$  sont souvent respectivement appelés modules de conservation et modules de perte.

Dans le cas particulier des mélanges bitumineux  $S$  et  $\Phi$  sont remplacés par  $S_b$  et  $\Phi_b$  d'une part et  $S_m$  et  $\Phi_m$  d'autre part.

## 5.2 VARIATION DU MODULE DE RIGIDITE

Pour un bitume donné, le module de rigidité dépend essentiellement de deux paramètres :

- La température;
- Le temps de charge.

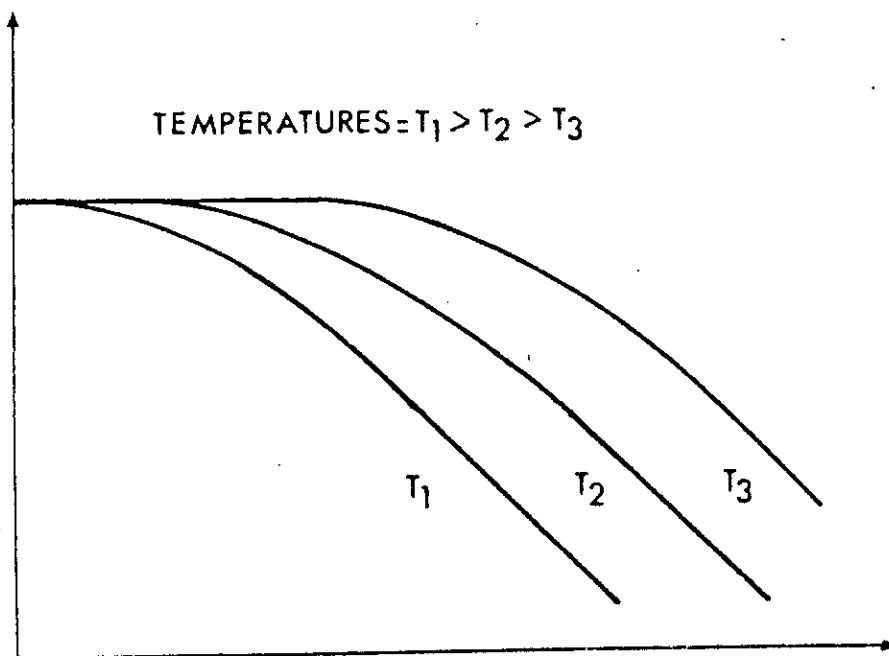
La figure N°1 représente la variation générale du module de rigidité d'un bitume en fonction du temps de charge et ceci pour diverses températures. On constate qu'aux basses températures, le module de rigidité est pratiquement indépendant du temps de charge si celui-ci reste faible.

Cela signifie que dans cette zone, le bitume a un comportement élastique. Par contre, si la température est élevée et le temps de charge important, on constate que le module de rigidité décroît et qu'il devient inversement proportionnel au temps. Le bitume présente alors un comportement visqueux.

### 5.2.1 ABAQUE DE VAN DER POEL

Le besoin d'une connaissance des propriétés des bitumes a rendu nécessaire la mise au point d'une méthode permettant leurs prévisions. Dans ce but, Van Der Poel a mis au point le nomogramme bien connu qui permet la prévision du module de rigidité d'un bitume  $S_b$ , pour n'importe quel couple fréquence-température à partir de la connaissance de deux de ses caractéristiques technologiques:

LOGARITHME DU MODULE DE RIGIDITE



LOGARITHME DU TEMPS D'APPLICATION  
DE LA CHARGE

figure 1.

VARIATION DU MODULE DE RIGIDITE AVEC LA TEMPERATURE ET LE TEMPS DE CHARGE

-L'indice de pénétration qui caractérise sa susceptibilité thermique;

-La température de ramollissement  $T_{BA}$  considérée par Van Der Poel comme une température d'équiviscosité.

Il a constaté que le module de rigidité pouvait être défini en fonction de trois grandeurs:

- 1-La consistance du bitume;
- 2-La susceptibilité thermique du bitume;
- 3-Le temps de charge pour lequel se fait la détermination du module de rigidité.

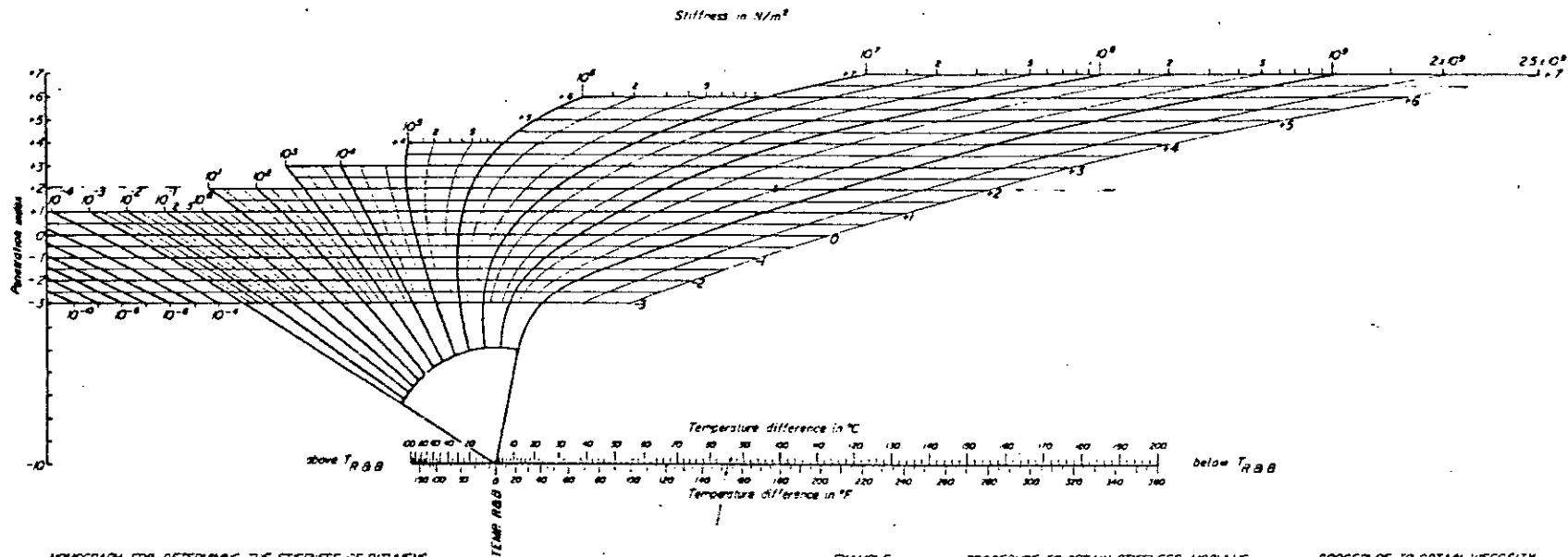
Ces trois grandeurs ont été associées avec les paramètres suivant:

1-La différence entre la température à laquelle est évalué le module de rigidité et la température pour laquelle la pénétration du bitume est de 800.

- 2-L'indice de pénétration du bitume;
- 3-La durée d'application de l'effort.

La variation du module de rigidité des bitumes en fonction de ces paramètres a été traduite sous forme d'un abaque d'utilisation très rapide (figure 2). Cet abaque n'est que la représentation simple de nombreux résultats expérimentaux. Il indique le comportement moyen d'une qualité donnée en fonction de sa dureté et de son indice de pénétration.

Le nomogramme constitue un instrument précieux dont le domaine d'utilisation ne se limite pas seulement à la technique



**NOMOGRAPH FOR DETERMINING THE STIFFNESS OF BITUMENS**

The stiffness (Young's modulus), defined as the ratio  $\sigma/\epsilon$  = stress/strain, is a function of time of loading (frequency), temperature difference with R.B.B. point, and P.I. At low temperatures and/or high frequencies the stiffness of all bitumens asymptotes to a limit of approx.  $3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ .

**EXAMPLE**

R.B.B. = 75 °C  
 P.I. = +20  
 Temp. = -11 °C  
 Freq. = 10 c/s  
 UNITS 1 newton/m<sup>2</sup> = 10 dynes/cm<sup>2</sup> = 1.02 x 10<sup>-3</sup> kg/cm<sup>2</sup> = 1.45 x 10<sup>-6</sup> lbs/in<sup>2</sup>

**PROCEDURE TO OBTAIN STIFFNESS MODULUS**

Connect 10 c/s point on scale A (see key) with 95° (75+11) point on scale B. Intersection with +20 P.I. line gives  $5 \times 10^8 \text{ N/m}^2$

**PROCEDURE TO OBTAIN VISCOSITY**

Connect viscosity point on lower scale with temperature point. Figure reading gives viscosity in N sec/m<sup>2</sup>. 1 newton sec/m<sup>2</sup> = 10 poises

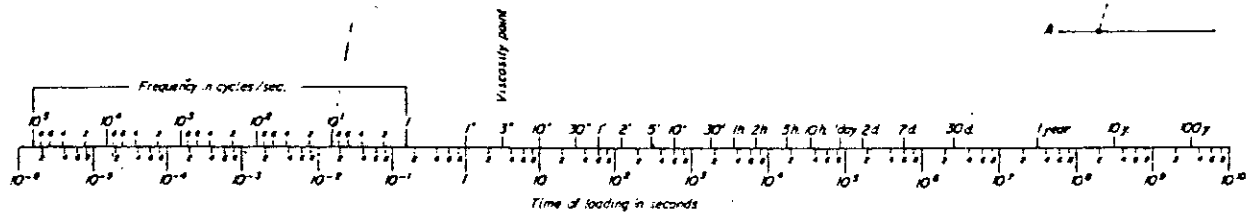


Fig. 2

Nomogramme pour la détermination du module de rigidité des bitumes (d'après Van der Poel - réf. 2)

routière. Il ne faut cependant pas perdre de vue qu'il est le reflet de résultats expérimentaux, comportant une dispersion non négligeable et que les grandeurs utilisés pour caractériser le bitume sont elles aussi entachées d'une erreur importante. Cela a pour conséquences que le résultat fourni par ce procédé doit être considéré plutôt comme un ordre de grandeur que comme une valeur précise. Van Der Poel estime lui-même que la valeur trouvée à l'aide de son nomogramme peut différer de la valeur réelle d'un facteur 2. Cette précision est en général bien suffisante pour les besoins de l'ingénieur, mais dans l'hypothèse où une précision plus grande serait souhaitée il est alors nécessaire de faire appel à la mesure réelle.

### 5.2.2 UTILISATION DE L'ABAQUE DE VAN DER POEL

Il convient de préciser que le module de rigidité est une variable réduite très pratique pour représenter les variations des propriétés rhéologiques des matériaux bitumineux dans leur ensemble en fonction des caractéristiques du bitume qui entre dans leur composition, de la température et de temps de charge.

Il existe, en effet, des abaques reliant les caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux au module de rigidité du bitume.

### 5.3 METHODE DE HEUKELOM ET KLOMP

A la suite des nouveaux essais portant sur des mélanges hydrocarbonés, Van Der Poel est arrivé à la conclusion que le module de rigidité du bitume et de la concentration volumique des granulats  $C_v$  :

$$C_v = \frac{V_g}{V_g + V_b} = \frac{\text{Volume des granulats}}{\text{Volume (granulats + bitume)}}$$

Ces résultats repris par Heukelom et Klomp ont conduit à exprimer le module de rigidité d'un mélange sous la forme suivante:

$$|E^*| = S_b \left( 1 + \frac{2,5}{n} \cdot \frac{C_v}{1 - C_v} \right)^n$$

$$n = 0,83 \cdot \log\left(\frac{4 \cdot 10^4}{S_b}\right)$$

$$(S_b) = \text{MPa}$$



Il apparaît immédiatement que le procédé permet de prévoir le module de rigidité d'une très grande variété de compositions.

Il est apparu, au cours des essais que la nature des granulats et leurs courbes granulométriques n'influencent que très faiblement le module. Dès lors, le paramètre  $C_v$  permet à lui seul de caractériser l'influence des granulats. Il importe toutefois de faire une très grande réserve.

Les essais qui ont conduit à ces conclusions ont été effectués sur des mélanges possédant un pourcentage de vides toujours voisin de 3. Or ce facteur influence fortement la valeur du module.

Pour palier à cette lacune, Fijn Van Draat et Sommer ont corrigé la concentration volumique  $C_v$  en tenant compte du pourcentage de vides.

$$C_v' = \frac{C_v}{\left(1 + \frac{(v - 3)}{100}\right)}$$

Malheureusement, les auteurs n'ont donné aucun argument pour appuyer leur proposition. Il est indispensable que la preuve expérimentale d'une dépendance de ce type soit faite avant de l'introduire dans la pratique.

#### 5.4 METHODE DE SAUNIER

Saunier a axé son travail sur l'influence de la nature du bitume et du squelette minéral. Il a comparé entre elles différentes compositions d'enrobés ( $v\% = 4$  et  $8\%$ ), et en portant le module de rigidité en fonction du module de rigidité du bitume, il arrive à la conclusion que l'ensemble des résultats se situe sur la même courbe.

Il constate que la valeur maximale du module (obtenu aux basses températures et aux fréquences élevées), n'est pas influencée par le type du bitume.

Au cours de la deuxième série d'essais, il compare entre eux des enrobés dont les pourcentages de vides varient de  $4\%$  à  $26\%$ . Il arrive à la conclusion qu'une augmentation du pourcentage de vides a pour effet de décaler les courbes vers les faibles valeurs du module de rigidité des enrobés.

L'ensemble des résultats ainsi obtenus, conduit à la conclusion qu'il est possible de prévoir le module de rigidité d'un enrobé avec une bonne approximation, si on connaît:

- le type du bitume utilisé;
- Les conditions de température du temps de charge ;
- Le pourcentage de vides.

Les deux méthodes sont en désaccord sur le dernier point. La première (Heukelom et Klomp) tient compte de la concentration volumique des granulats  $C_v$ , la deuxième (Saunier) du pourcentage de vides ( $C_v$  varie de 0,66 à 0,83).

La méthode de Saunier n'est pas représentable analytiquement, et à partir de certaines valeurs du module du bitume (basses températures, hautes fréquences), le module de rigidité du mélange ne peut être obtenu qu'à partir d'interpolations assez téméraires.

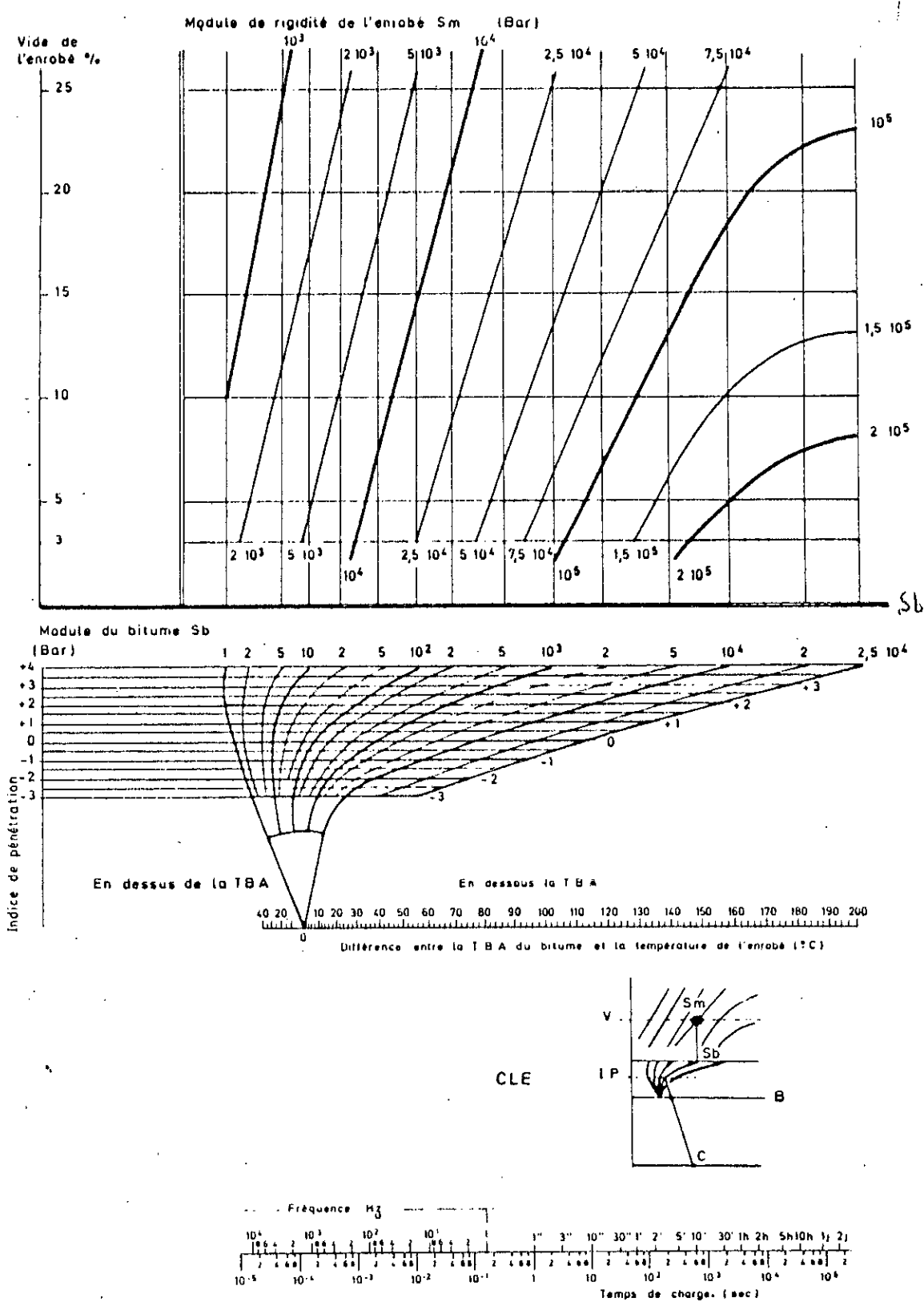


Figure 3  
 Abaque pour la détermination du module de rigidité  $S_m$  des enrobés bitumineux (d'après J. Saunier - réf. 8)

## 5.5 METHODE DE VERSTRAETEN

Verstraeten a mis au point un graphe liant le rapport  $|E^*|/V_g$  et le produit  $S_b \cdot \Gamma$ .

$\Gamma$  est un facteur qui dépend de la pénétration du bitume.

L'influence des granulats est introduite par le facteur  $V_g$ . Comme  $V_g = C_v (100 - v)$ , ce facteur tient compte des deux paramètres  $C_v$  et  $v$ .

Malgré une dispersion relativement importante des points expérimentaux, cette relation <sup>permet</sup> l'estimation du module d'un mélange, connaissant sa composition et le module du bitume tiré du nomogramme de Van Der Poel.

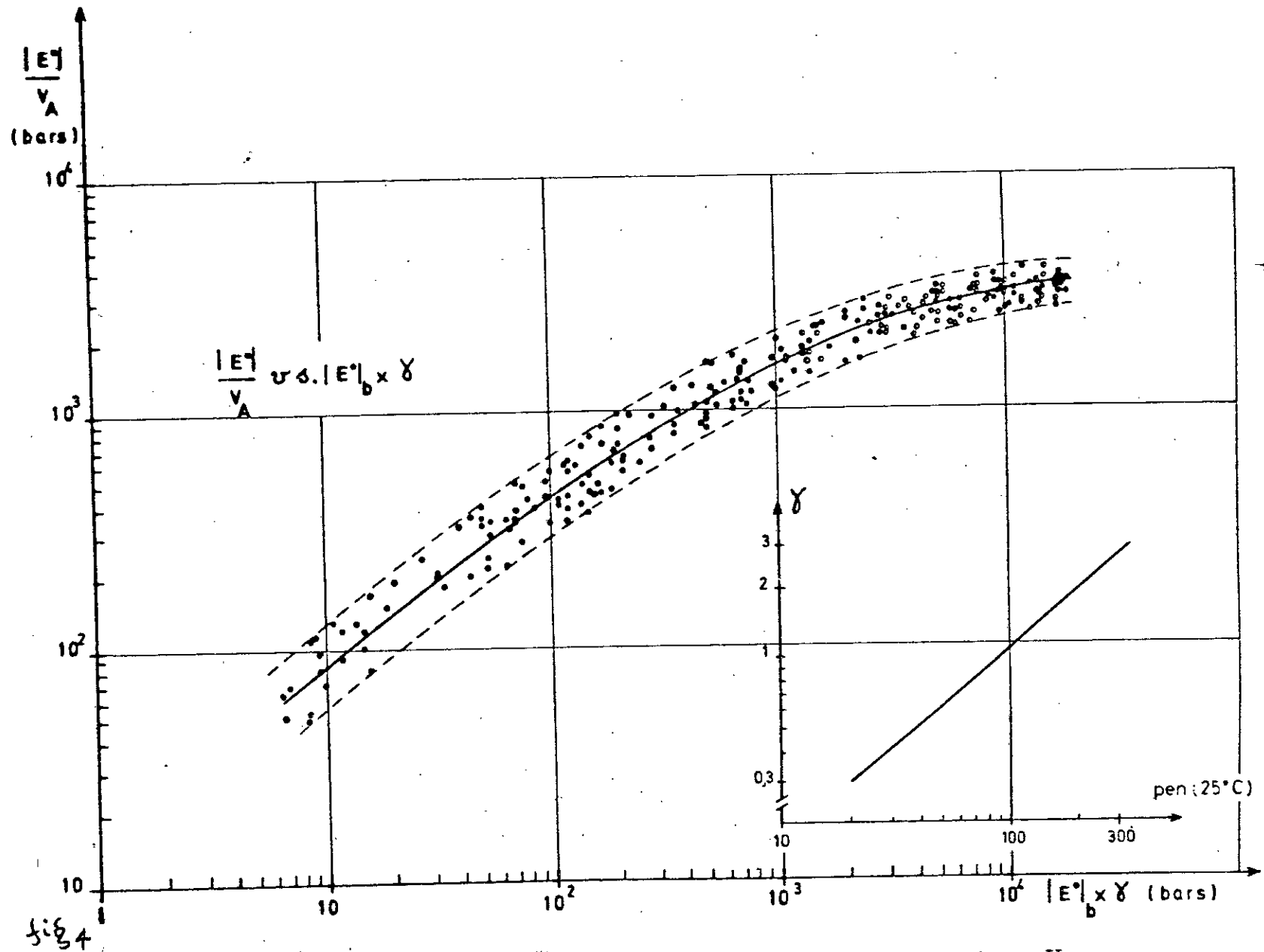


fig 4  
 Variation du rapport du module de rigidité  $|E^*|$  et de la teneur volumique en agrégats  $V_A$  en fonction du produit du module du bitume  $S_b$  par un facteur  $\gamma$  dépendant de la pénétration du bitume (d'après J. Verstraeten - réf. 6)

# CHAPITRE 6

METHODE

DE

FRANCKEN

## Chapitre 6

### METHODE DE FRANCKEN

#### 6.1 INTRODUCTION

Francken propose le calcul du module complexe à partir de la composition volumique du mélange, la pénétration et la susceptibilité du bitume

#### 6.2 PARAMETRES CARACTERISANT LES MELANGES

Les paramètres des mélanges étudiés dans le cadre du travail de Francken sont :

- P : Teneur pondérale en pierres dans le squelette minéral.
- T : Teneur pondérale en sable dans le squelette minéral.
- F : Teneur pondérale en filler dans le squelette minéral.
- L : Teneur pondérale en bitume ajouté au squelette minéral.
- v : Pourcentage de vides dans le mélange compacté.
- V<sub>l</sub> : Teneur volumique en bitume dans le mélange compacté.



L'essai nous permet d'obtenir à chaque couple fréquence-température, les grandeurs suivantes :

-F<sub>0</sub> : Amplitude de la force appliquée.

-f<sub>0</sub> : Amplitude de la flèche résultante de l'application de la charge .

-ψ : Angle de déphasage entre la force et la flèche.

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

Equation de la ligne élastique.

$$E I_z \frac{d^2 f}{dx^2} = F \cdot (1-x) \quad (3)$$

Equation d'équilibre :

$$M \frac{d^2 f}{dt^2} + \mu \frac{df}{dt} + Kf = F_v \quad (4)$$

M : Masse de l'éprouvette;

μ : Constante visqueuse de l'éprouvette;

K : Constante élastique de l'éprouvette;

f : déplacement au sommet de l'éprouvette.

$$F = F_v - M \cdot \frac{d^2 f}{dt^2} = (F_v \cdot e^{i\omega t} + M \cdot \omega^2 \cdot f_0) \cdot e^{i\omega t} \quad (5)$$

$$F_v = F_{v0} e^{i(\omega t - \Psi)} \quad (6)$$

$$f = f_0 e^{i\omega t}$$

Les couples de valeurs caractérisant le module complexe  $E(i\omega)$  sont ses parties réelle  $E_1$  et imaginaire  $E_2$  données par les relations :

$$E_1(\omega) = \frac{1}{\gamma} \left[ \frac{F_0}{f_0} \cos\Psi + a.M.\omega^2 \right] \quad (7)$$

$$E_2(\omega) = \frac{1}{\gamma} \left[ \frac{F_0}{f_0} \sin\Psi \right] \quad (8)$$

soit sa valeur absolue  $|E^*|$  et son angle de phase  $\Phi$ :

$$|E^*| = \frac{1}{\gamma} \left[ \left( \frac{F_0}{f_0} \cos\Psi + a.M.\omega^2 \right)^2 + \left( \frac{F_0}{f_0} \sin\Psi \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$\Phi = \arctg \left[ \frac{F_0 \cdot \sin\Psi}{F_0 \cdot \cos\Psi + a.M.f_0.\omega^2} \right] \quad (10)$$

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{b.(h_1 - h_2)^3}{12.L^3.R(\rho_1)} \quad (11)$$

$$a = \frac{2}{(1 - \rho_1^2).R^2(\rho_1)} \int_0^1 \rho.R^2(\rho).d\rho$$

$$z = \frac{L - l}{L}$$

Avec  $\Omega = \frac{z}{l}$  et  $\Omega_1 = \frac{z}{L}$

$$\text{et } R(\Omega) = -\log \Omega + \Omega \cdot \left( 1 - \frac{\Omega_1}{2} \right) - 1 + \Omega_1 - \frac{\Omega_1}{2 \cdot \Omega}$$

Les paramètres géométriques des éprouvettes utilisées ici sont les suivantes:

- | L = 52,5 cm
- | l = 35 cm
- | b = 3 cm
- | h1 = 9 cm
- | h2 = 3 cm

L'introduction de ces données dans la formule (11) donne :

- |  $\frac{1}{\delta} = 166,52$
- | a = 0,1206

## 6.4 PROPRIETES REMARQUABLES DU MODULE COMPLEXE DES MELANGES HYDROCARBONES

### 6.4.1 LOI D'EQUIVALENCE FREQUENCE-TEMPERATURE

Les corps viscoélastiques linéaires ont en général un comportement qui dépend de la température. Les modules sont donc fonction, non seulement de la fréquence, mais aussi de la température.

Si on trace dans le plan complexe les courbes représentatives des modules complexes à température constante on pourrait s'attendre à ce que, à priori les différentes isothermes forment une famille de courbes occupant tout ou une partie du quart de plan où le module est défini. Or l'expérience montre que, dans la plus part des cas, ces matériaux obéissent à une loi de réciprocité entre la fréquence et la température.

Cette propriété se traduit dans le plan complexe, par le fait que toutes les isothermes se recouvrent, pour former une courbe unique, globalement indépendante de la fréquence et de la température.

Lorsque la fréquence ou la température, ou les deux varient, le point relatif du module complexe se déplace mais

reste toujours sur la courbe globale ainsi défini. Cette propriété conduit à des simplifications analytiques considérables.

L'existence de cette propriété impose que la fonction  $E^*(i\omega\tau)$  qui est une fonction de deux variables se réduit à une fonction :  $E^* = E^* [i\omega\tau(T)]$  d'une seule variable.

Lorsqu'on veut savoir si un matériau viscoélastique présente ou non cette propriété de réciprocity fréquence-température, la représentation dans le plan complexe constitue donc un critère très commode. En conclusion il est possible à partir des résultats obtenus à différentes fréquences et températures de construire une courbe unique  $\left\{ \log|E^*|, \log f \right\}$  correspondant à une température  $T_s$  (température de référence) choisie arbitrairement.

Cette courbe unique appelée courbe maîtresse se construit en opérant dans une échelle logarithmique des translations parallèles à l'axe des fréquences dont les amplitudes dépendent de la température attachée à chaque point expérimental.

IL a été montré que ces translations reviennent à multiplier chaque fréquence par un facteur ( $a_r$ ) calculable à partir d'une équation du type :

$$a_r(T, T_s) = \exp H/R (1/T - 1/T_s) \quad (12)$$

ou  $T$  : est la température en °K.

$T_s$  : est la température de référence en °K.

$R$  : La constante universelle des gaz parfaits.

$H$  : une énergie apparente d'activation voisine de  
50 Kcal/mole

### 6.4.2 REPRESENTATION DU MODULE COMPLEXE DANS LE PLAN COLE-COLE

Le module complexe  $E^*(iw)$  et la complaisance complexe  $J^*(iw)$  sont des fonctions complexes de la variable  $iw$  :

$$\begin{aligned} | E^*(iw) &= E_1(w) + iE_2(w) = | E^*(iw) | e^{i\theta} \\ | J^*(iw) &= J_1(w) + iJ_2(w) = | J^*(iw) | e^{-i\theta} \end{aligned} \quad (13)$$

Lorsque  $w$  varie de 0 à l'infini (C'est-à-dire lorsque  $P$  décrit le demi axe imaginaire pur positif)  $E^*$  et  $J^*$  décrivent deux courbes  $E_2 = E_2(E_1)$  et  $J_2 = J_2(J_1)$  dans le plan complexe.

Chacune de ces courbes constitue la représentation dans le plan complexe arithmétique du module ou la complaisance complexe. Ce plan est appelé aussi espace de côlc-côle.

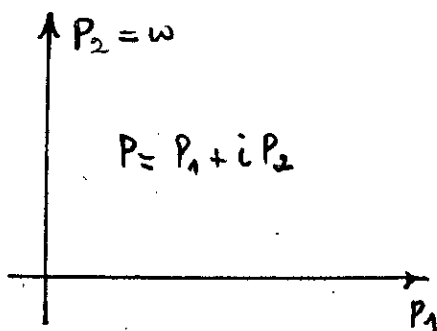
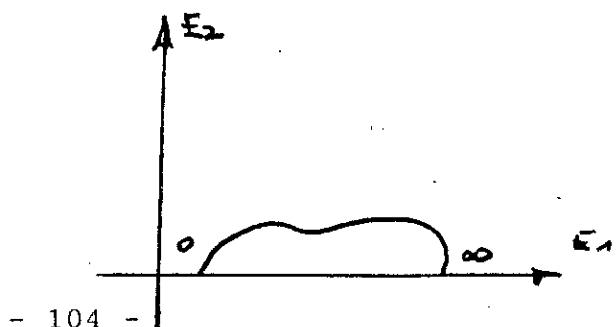


fig 2



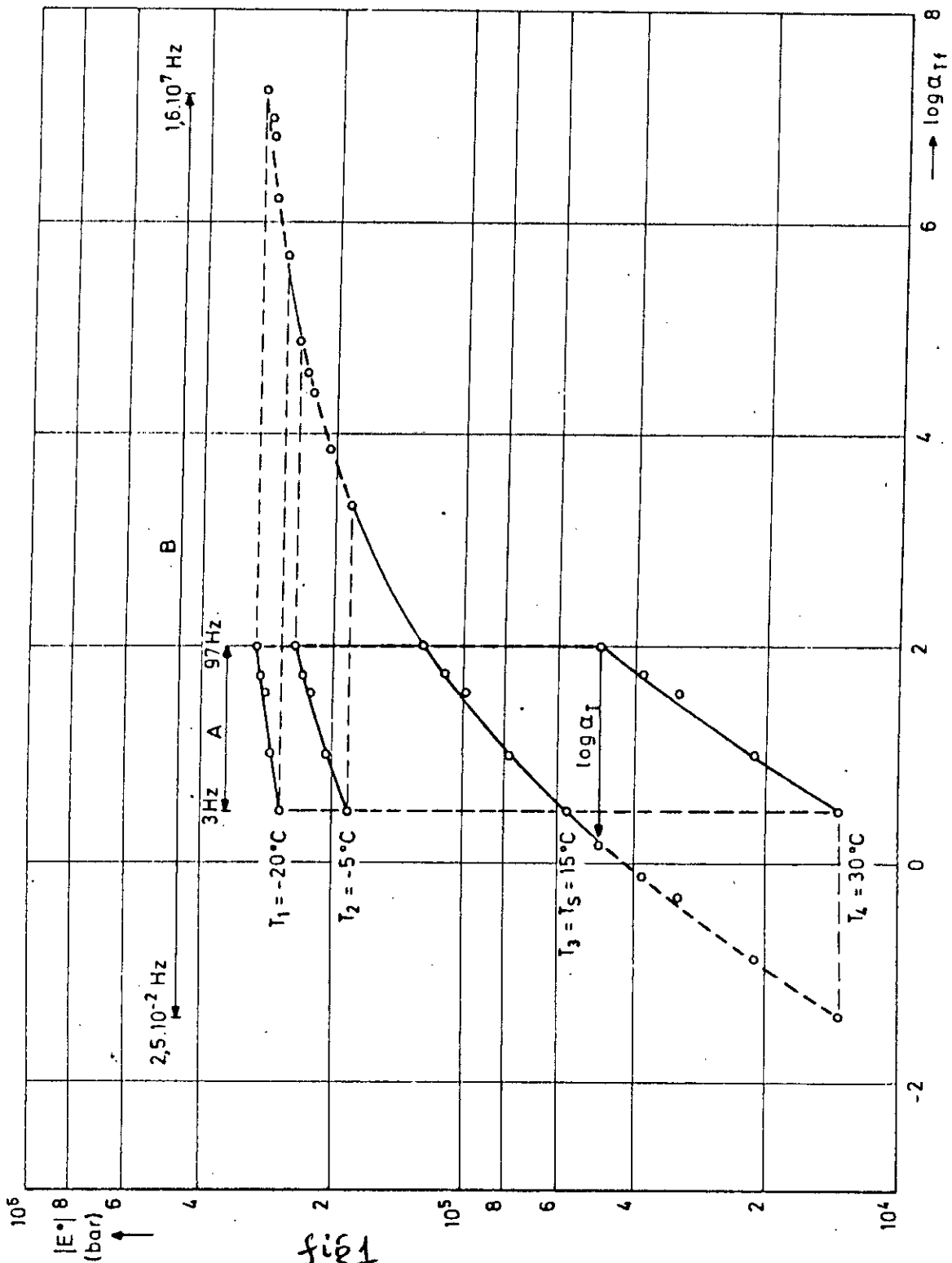


fig 1

Courbe maîtresse du module de rigidité  $|E^*|$  d'un mélange obtenue par application du principe d'équivalence entre la fréquence  $f$  et la température  $T$ .

A- Domaine de fréquences couvert par l'expérience

B- Domaine de fréquences couvert par la courbe maîtresse

## 6.5 CHOIX D'UN MODELE RHEOLOGIQUE

La représentation du module complexe dans le plan côle-côle facilite la recherche d'un modèle rhéologique adéquat.

La courbe obtenue de cette manière peut être identifier dans un catalogue de représentation graphiques de modèles rhéologiques par la simple comparaison visuelle des courbes caractéristiques relatives à ses divers modèles.

La courbe caractéristique des mélanges hydrocarbonés est semblable à celle d'un modèle biparabolique série, illustrée schématiquement sur la figure (3).

La courbe décrivant la relation entre les parties réelle et imaginaire du module complexe peut être représentée par une expression analytique de la forme :

$$E^*(i\omega) = \frac{E_{\infty}}{1 + \delta \cdot (i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (14)$$

ou :

$\omega$  : Est la pulsation ;

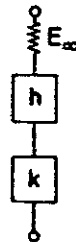
$\tau$  : EST un paramètre d'un temps, que l'on peut considérer comme un temps de retardation;



X

C.R.R.\_G.C.W.\_Dim 7.185/1

Modèle rhéologique



$$\begin{cases} E_\infty = 3.31 \cdot 10^5 \text{ bar} \\ k = .193 \\ h = .546 \\ \delta = 1.88 \end{cases}$$

$$E^*(i\omega) = \frac{E_\infty}{1 + \delta (i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$$

$$\begin{cases} k = \frac{2A}{\pi} \\ h = \frac{2B}{\pi} \end{cases}$$

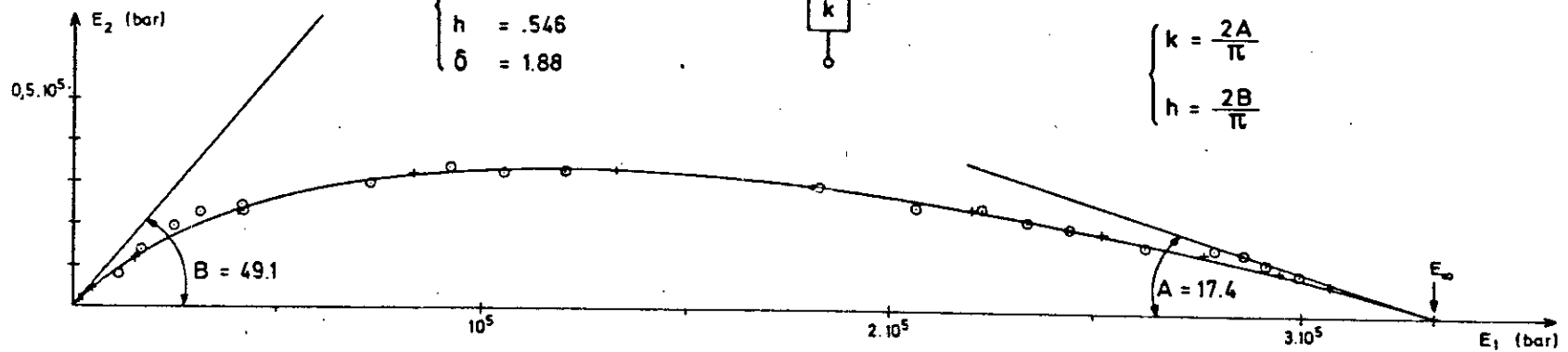


fig 3

MELANGE N° P17

Représentation du module complexe  $E^*(i\omega)$  d'un enrobé dans le plan complexe (plan de Cole et Cole)

$h, k, \delta$  : sont des paramètres servant à définir les éléments paraboliques du modèle. (Pour le bitume pur et ses enrobés on aura toujours  $1 > h > k > 0$ ).

$E_m$  : Est le module instantané du modèle.

La méthode adoptée ici pour l'étude comparative des mélanges consiste à déterminer les quatre paramètres caractéristiques de chacun d'eux, en vue d'en tirer les corrélations significatives avec les paramètres de composition. Ceci permettra ultérieurement l'établissement d'une méthode prévisionnelle du module complexe.

## 6.6 DETERMINATION DES PARAMETRES DU MODULE

### 6.6.1 METHODE GRAPHIQUE

Cette méthode a été décrite par C.Huet et P.Cornil et a été appliquée pour la détermination des paramètres  $h, k$  et  $\delta$  de chaque mélange. Cette méthode consiste à rechercher la valeur des angles  $A$  et  $B$  en construisant les tangentes à la courbe côte-côte à l'origine et en  $E_m$ , son point d'intersection avec l'axe des abscisses.

Connaissant  $A$  et  $B$ , les paramètres  $h$  et  $k$  peuvent alors être calculés à partir des relations :

$$\begin{array}{l}
 \text{2.B} \\
 | \quad h = \text{-----} \\
 | \quad \quad \quad \pi \\
 | \\
 | \quad \quad \quad \text{2.A} \\
 | \quad k = \text{-----} \\
 | \quad \quad \quad \pi
 \end{array}
 \tag{15}$$

A et B exprimés en radians.

Enfin  $\delta$  est obtenue par une construction graphique qui revient à exiger que la courbe théorique passe au voisinage des points expérimentaux pour  $w_1 = 1$ .

Cette méthode laisse une large part à l'arbitrage, ce qui conduit à des résultats assez discordants lorsqu'un même mélange été soumis à l'interprétation de diverses personnes.

Ces inconvénients sont surmontés grâce à une méthode purement analytique permettant le calcul par ordinateur des quatres paramètres caractéristiques du mélange.

### 6.6.2 METHODE ANALYTIQUE

Chaque mélange est caractérisé par un ensemble de vingt couples de valeurs  $E_1$  et  $E_2$  donnés par l'expérience. Le problème se résume à faire passer le plus près possible des points expérimentaux une courbe répondant à l'équation (14).

### 6.6.2.1 DETERMINATION DE L'ANGLE A ET DU MODULE $E_{\infty}$

A l'exclusion des points expérimentaux les plus proches de l'origine, la courbe peut se comparer à un arc de parabole tournant sa concavité vers le bas. L'équation de cette parabole peut être recherchée par la méthode des moindres carrés.

$E_{\infty}$  est obtenue en recherchant le point d'intersection de cette parabole avec l'axe des abscisses et A est donné par la pente de la tangente à la parabole en ce point.

### 6.6.2.2 CALCUL DES VALEURS APPROCHEES DE B ET $\delta$

Le problème consiste à rechercher la valeur qu'il faut attribuer à B pour que la courbe passe par un point expérimental obtenu à haute température et basse fréquence. Comme ce point se trouve près de l'origine, des valeurs relativement faibles du paramètre  $\omega\tau$  lui correspondent.

Comme  $l > h > k > 0$ , on peut montrer que pour les faibles valeurs de  $\omega\tau$  l'équation (14) se réduit à celle d'un modèle parabolique simple (Modèle de côte-côte liquide):

$$E_{\infty} \\ E(i\omega) = \frac{E_{\infty}}{1 + (i\omega\tau)^{-h}} \quad (16)$$

Dans ce cas, une valeur approchée de B peut être explicitée :

$$B_0 = \arctg\left(\frac{\sin\varphi}{\cos\varphi - |R^*|}\right) \quad (17)$$

$$\text{ou } |R^*| = \frac{|E^*|}{E_\infty}$$

La détermination plus précise de B requiert une connaissance au moins approchée du paramètre  $\delta$ . Ceci peut s'obtenir en supposant que la courbe passe par le point de coordonnées :  $E_1 = 0,3.E_\infty$  et  $E_2 = 0,1.E_\infty$ .

(toutes les courbes expérimentales passent par ce point).

En introduisant ces valeurs dans l'équation (14), on obtient la valeur approchée:

$$\delta_0 = \left( \frac{\cos B_0 \cdot (\text{tg} B_0 - \text{tg} A)}{1 - 2 \cdot \text{tg} A} \right)^{A/B_0} \cdot \frac{2 \cdot \text{tg} B_0 - 1}{\cos A \cdot (\text{tg} B_0 - \text{tg} A)} \quad (18)$$

-CALCUL DE R: En séparant la partie réelle et la partie imaginaire du module complexe, on peut montrer que B doit vérifier l'équation:

$$\frac{\delta \cdot (\omega\tau)^{-k} \cdot \sin A + (\omega\tau)^{-h} \cdot \sin B}{E_\infty} = \frac{\sin \Phi}{|E^*|} = \frac{R_2}{|R^*|^2} \quad (19)$$

$$\text{ou } R_2 = \frac{E_2}{E_\infty}$$

la variable  $\omega\tau$  peut être éliminée à partir de la relation suivante, tirée de l'équation (14) :

$$w\tau = \left( \frac{R_2 - R_1 \cdot \text{tg}A + |R^*|^2 \cdot \text{tg}A}{|R^*|^2 \cdot \cos B \cdot (\text{tg}B - \text{tg}A)} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (20)$$

En introduisant les valeurs expérimentales de  $R_1$  et  $R_2$  et  $|E^*|$  dans le système d'équation (18) et (19) et considérant  $B$  comme inconnue, on trouvera une valeur plus exacte de  $B$ . La recherche de cette racine se fait par approximations successives en utilisant  $B_0$  comme valeur initiale.

Ce procédé est répété pour trois points situés le <sup>plus</sup> près de l'origine. Trois valeurs distinctes sont alors obtenues pour  $B$ , dont la moyenne est adoptée comme valeur représentative.

-CALCUL DE  $\delta$ :  $\delta$  peut être obtenu en cherchant la valeur qui doit lui être attribuée pour que le maximum de la courbe théorique coïncide avec la plus grande valeur trouvée expérimentalement pour la partie imaginaire du module complexe réduit  $R_2$ . Ceci peut se résumer par la condition suivante:

$$\begin{array}{|l} | \\ | \\ | \\ | \\ | \\ | \\ | \end{array} \begin{array}{l} R_2(w\tau, \delta) = R_{2 \max} \\ \\ dR_2(w\tau, \delta) \\ \hline d(w\tau) \end{array} = 0 \quad (21)$$

Ce système d'équations doit également être résolu par approximations successives en utilisant  $\delta_0$  et la valeur obtenu pour  $w\tau$  dans l'équation (19) comme valeurs initiales.

### 6.6.2.3 CALCUL DE LA COURBE

Une fois tous les paramètres  $A, k, B, h, \delta$  et  $E_\infty$  sont déterminés, le modèle est complètement défini. La courbe théorique du modèle sera calculée pour une suite de valeurs de  $\omega\tau$  comprises entre  $10^{-4}$  et  $10^7$  à partir des équations tirés de (14):

$$E_1(\omega) = \frac{E_\infty \left[ 1 + \delta(\omega\tau)^{-k} \cos A + (\omega\tau)^{-h} \cos B \right]}{D} \quad (22)$$

$$E_2(\omega) = \frac{E_\infty \left[ \delta(\omega\tau)^{-k} \sin A + (\omega\tau)^{-h} \sin B \right]}{D}$$

Avec ,  $D = 1 + 2\delta(\omega\tau)^{-k} \cos A + \delta^2(\omega\tau)^{-2k} + 2(\omega\tau)^{-h} \cos B + 2\delta(\omega\tau)^{-(k+h)} \cos(A-B) + (\omega\tau)^{-2h}$  (23)

### 6.6.2.4 CALCUL DU PARAMETRE $\tau$

Etant donné l'intérêt que peut présenter une connaissance approfondie du modèle rhéologique, il est intéressant de rechercher le lien qui pourrait exister entre le paramètre  $\tau$  précédemment défini et la température associée à chaque point expérimental. Théoriquement, le modèle biparabolique suppose le paramètre  $\tau$  indépendant de la fréquence et ne peut être fonction que de la température.

Pour trouver  $\tau$ , il suffit de rechercher pour quelle valeur de cette variable l'expression théorique de la valeur absolue du module complexe réduit devient égale à la valeur  $|R^*|_{exp}$  mesurée, ceci implique la condition suivante:

$$|R^*|_{exp} = 1 / D^{\frac{1}{2}} \quad (24)$$

Ce calcul s'effectue par approximations successives en adoptant pour  $w$  la valeur initiale tirée de l'équation (19).

## 6.7. RELATION ENTRE LES CARACTERISTIQUES DU MELANGE ET LE MODULE COMPLEXE

Grâce à l'utilisation du principe d'équivalence fréquence-température, on peut reconstituer pour chaque mélange étudié, une courbe maîtresse donnant le module de rigidité  $|E^*|$  en fonction d'une fréquence réduite :

$$f_R = \alpha \tau \cdot f = f \cdot \exp 2,51 \cdot 10^4 \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_s} \right) \quad (25)$$

Etant donné que le module est une fonction continûment croissante de  $f_R$  admettant une limite supérieure  $E_\infty$  (pour une composition donnée) sous la forme :

$$|E^*|(f_R) = E_\infty \cdot R^*(f_R) \quad (26)$$

ou  $R^*$  est un module réduit variant entre 0 et 1.



Le premier de ces facteurs ( $E_{\infty}$ ) dépend principalement de la composition du mélange, tandis que le second ( $R^*(f_R)$ ) est une fonction de la fréquence réduite dont la forme dépend des caractéristiques du bitume.

#### 6.7.1 RELATION ENTRE $E_{\infty}$ ET LA COMPOSITION DU MELANGE

On peut voir sur la figure 11 que le module  $E_{\infty}$  du mélange n'est atteint que pour les fréquences très élevées. Sa valeur pourrait donc être déterminée expérimentalement. Ce module ne présente pas de partie imaginaire, dès lors il est clair que le matériau possède un comportement purement élastique. Dans de telles conditions, il est généralement admis que tous les bitumes possèdent <sup>à peu près</sup> le même module ( $E_{\infty} \approx 3.10^4$  bar). On peut donc supposer que la valeur du module  $E_{\infty}$  d'un mélange ne dépend plus que de la composition.

En vue d'étendre nos conclusions à un choix plus large de compositions, nous ferons usage de résultats expérimentaux provenant des travaux de VAN DER POEL, BAZIN et SAUNIER, HARLIN et UGE ET C. HUET. En dehors des auteurs cités ici, nous n'avons pas pu trouvé dans la littérature d'autres résultats suffisamment complets pour que la valeur du module  $E_{\infty}$  puisse être déduite avec une précision suffisante.

Les courbes représentant la variation du module de ces mélanges en fonction de la température sont données à la figure (4). Nous utiliserons comme paramètre caractérisant la

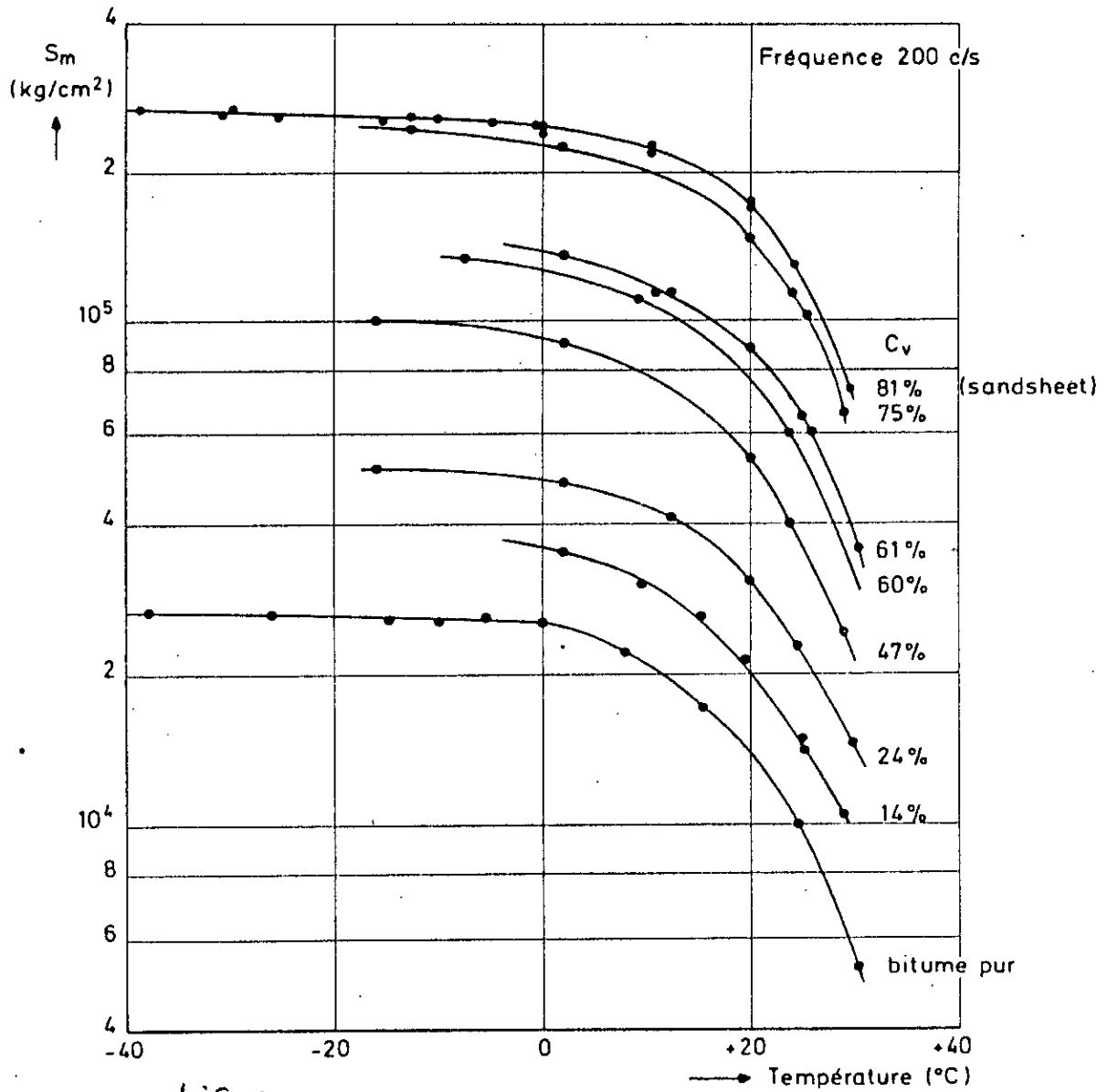


fig 4

Modules de rigidité de différents mélanges contenant le même bitume (d'après Van der Poel - 1 )

composition <sup>du mélange</sup> Le rapport R entre la teneur volumique en agrégats et la teneur volumique en liant du mélange :

$$R = \frac{V_A}{V_L} \quad (28)$$

- R est un paramètre ne dépendant que de la quantité des différents matériaux mis en oeuvre;

- v (% de vides) est un paramètre dépendant que de la granulométrie du squelette minéral, du mode de compactage et de la teneur en liant.

Les résultats expérimentaux dont nous disposons nous permettent d'isoler le rôle de chacun de ces paramètres. Si nous portons les modules  $E_0$  pour les sept mélanges (VDP) et les autres valeurs disponibles pour  $v \approx 3\%$  en fonction de R dans un diagramme bilogarithmique (figure 5), nous constatons que le module  $E_0$  peut être prévu à partir de la relation suivante :

$$\left| \begin{array}{l} E_0(R) = 1,2 \cdot 10^5 \cdot (R)^{0,55} \\ \text{pour } v=3\% \end{array} \right. \quad (29)$$

D'autre part, la relation entre le pourcentage de vides et le module de rigidité  $|E^*|$  a été étudié par Bazin et Saunier. La figure 15 tirée de cette étude montre que pour des conditions de température et de fréquence fixées, et pour autant que le rapport R ne varie pas trop, la relation entre le module  $|E^*|$  et le pourcentage de vides v peut être donné par une expression de la forme:

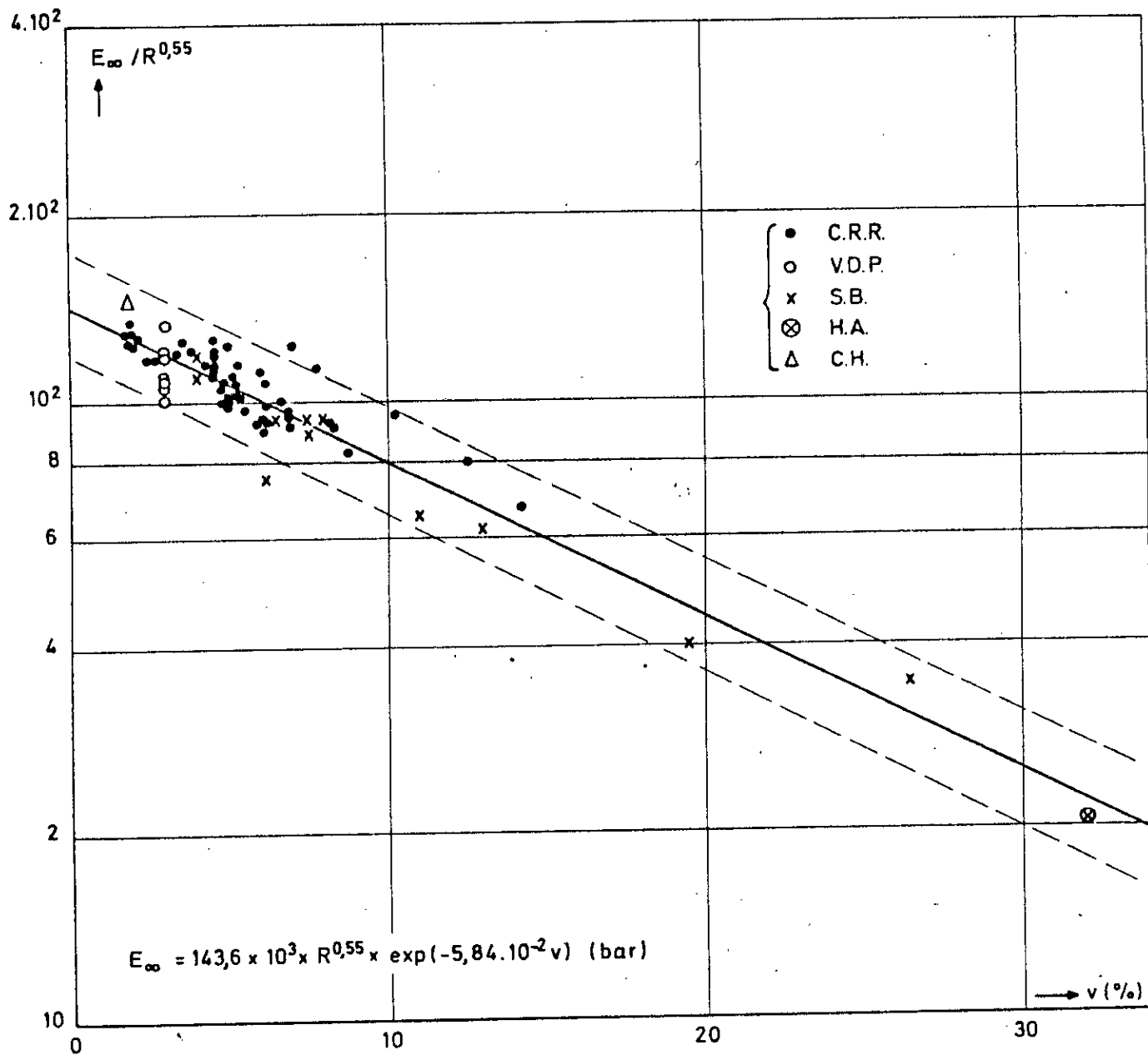


fig 5.

Relation entre le module  $E_{\infty}$  et la composition volumique des mélanges.

$$|E^*|(v) = |E^*|(v=0) \cdot \exp(-C \cdot v) \quad (30)$$

Avec  $C = 5,8 \cdot 10^{-2}$

Comme la constante C ne semble dépendre ni de la température ni de la fréquence, cette expression doit rester valable lorsque  $|E^*|$  tend vers  $E_{\infty}$ .

Etant donné que chacune de ses formules exprime l'influence de l'un ou l'autre des paramètres R et v, on peut supposer qu'une expression plus générale de la forme :

$$E_{\infty} = Cste \cdot R^{0,55} \cdot \exp(-cv) \quad (31)$$

pourrait tenir compte de leur influence simultanée.

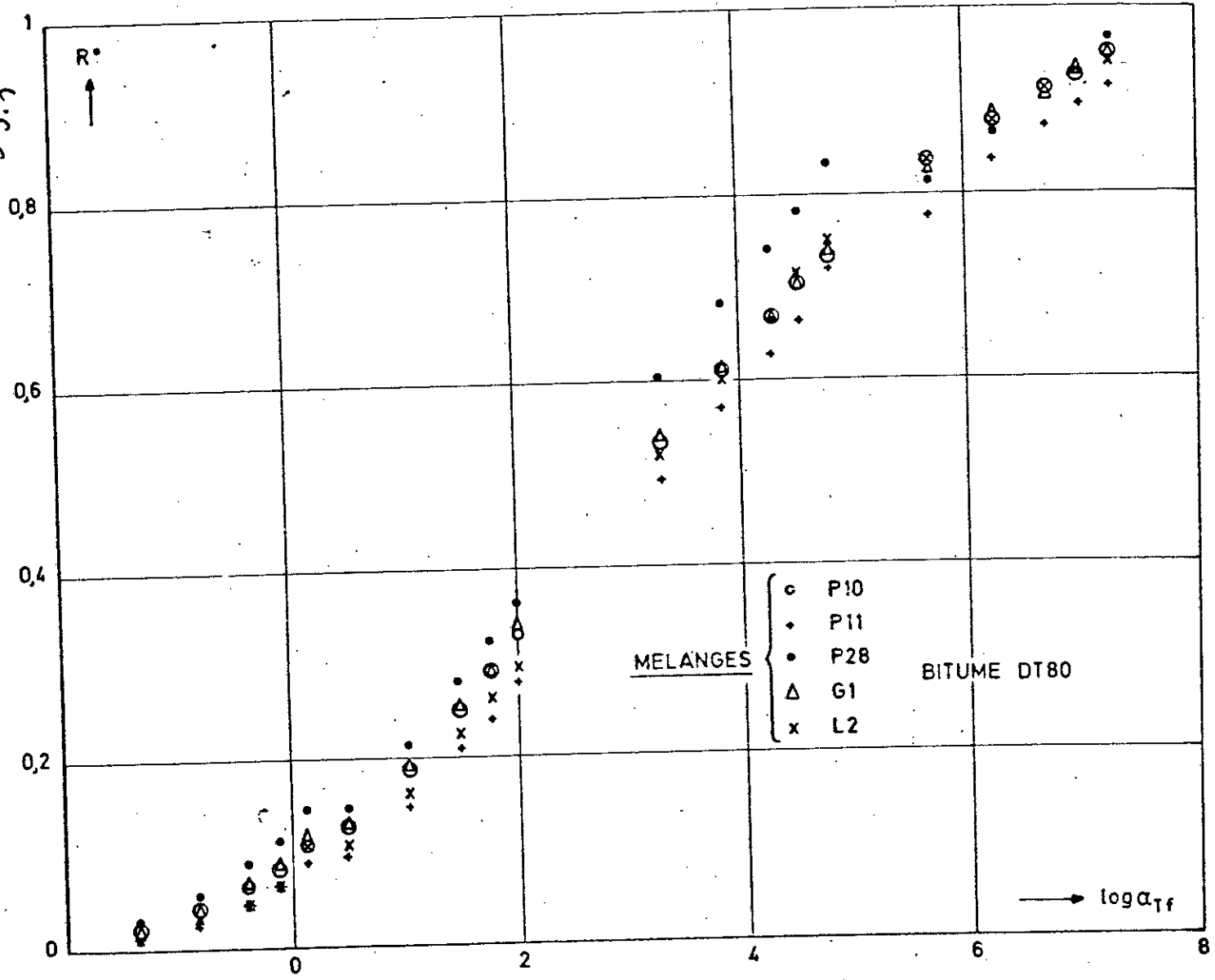
### 6.7.2 RELATION ENTRE LE MODULE REDUIT ET LES CARACTERISTIQUES DU BITUME

L'examen des courbes obtenues en portant le module réduit en fonction du logarithme de la fréquence réduite conduit aux conclusions suivantes :

-A la dispersion des mesures près, les modules réduits  $|R^*|$  de tous les mélanges renfermant un même bitume s'alignent suivant une même courbe.

Cette conclusion est illustrée à la figure (6) qui représente les courbes de variation du module réduit de quatre

fig 6  
 Courbes de variation du module réduit  $R^*$  pour différents mélanges contenant le même bitume



compositions contenant le même et se distinguant les unes des autres par leurs courbes granulométriques, la nature des pierres et le pourcentage de vides.

-L'allure de ces courbes dépend des caractéristiques du bitume incorporé au mélange. Cette conclusion est illustrée par la figure (7) qui représente les courbes de variation du module réduit de deux compositions identiques renfermant des bitumes distincts.

La prévision du module de rigidité  $|E^*|$  est donc possible si l'on peut définir la courbe du module réduit  $R^*(f_R)$  à partir des caractéristiques du liant.

Dans ce but, on se propose de mettre le module réduit d'un mélange sous forme d'une fonction de la variable  $X = \log f_R$  admettant comme paramètres certaines caractéristiques du liant. Il est malheureusement impossible de trouver une formulation qui soit à la fois faible et applicable dans tout le domaine de variation de la variable  $X$ .

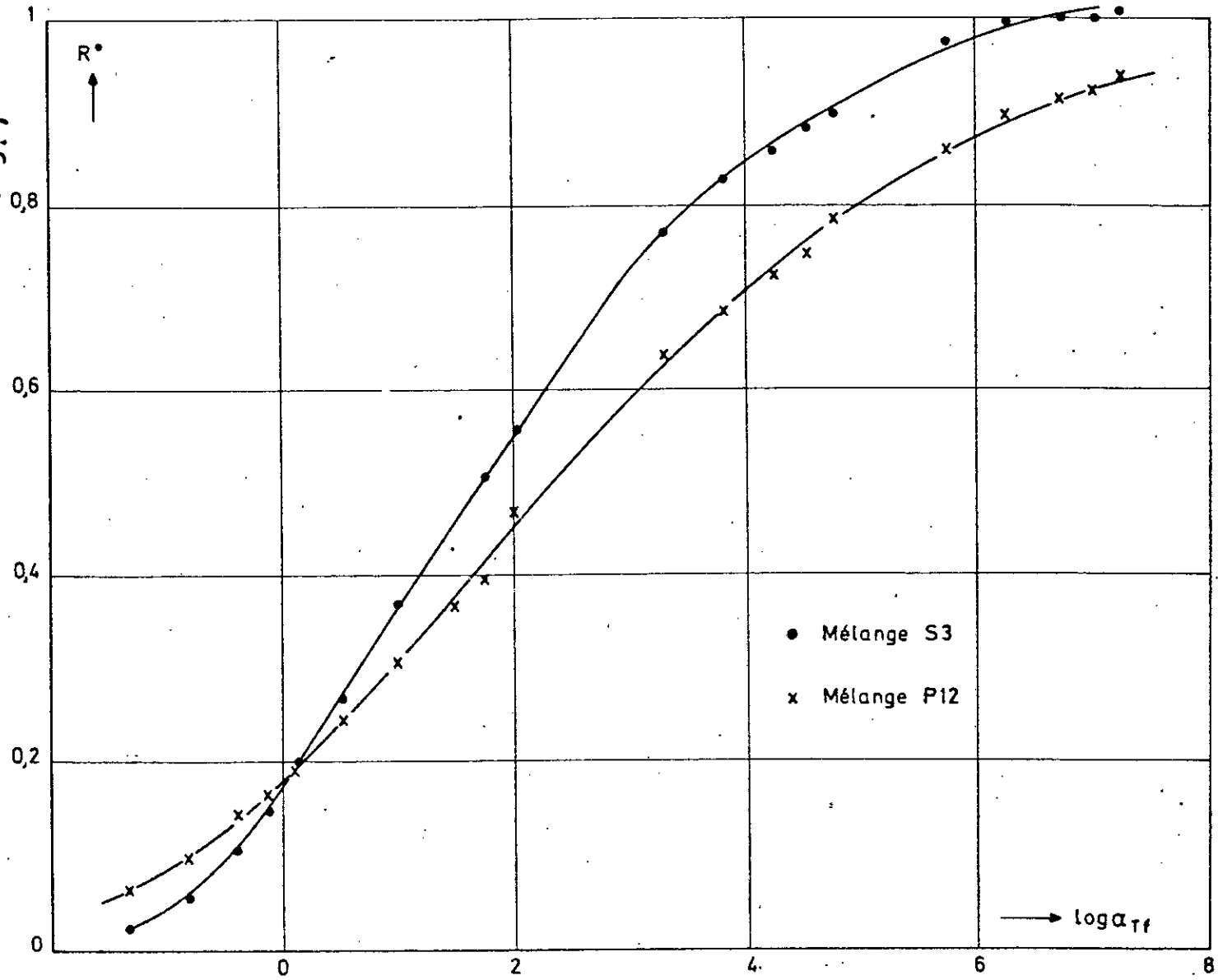
Cette question a été résolue en décomposant la courbe en trois parties :

-Module réduit pour  $X < X_L$ :

Dans la gamme des températures élevées les basses fréquences, le module réduit peut être approché par une expression parabolique de la forme:

$$\log R^* = K + H \cdot \log a \cdot f = K + H \cdot X$$

fig 7  
Courbes de variation du module réduit  $R^*$  pour deux compositions  
identiques contenant des bitumes  
différents.





En particulier, il est possible de déterminer le module réduit  $R^*_{pen}$  d'un mélange pour des conditions de température et de durée de sollicitation équivalentes à celles de l'essai de pénétration ( $T=25^\circ C, t=0,4s$ ).

$$R^*(X) = R^*_{pen} \cdot \exp\left(-\frac{X}{0,4343}\right) \cdot (X + 1,672)$$

Avec  $R^*_{pen} = 6,55 \cdot pen^{-1,313}$

$$H = -9,27 \cdot 10^{-2} + 1,352 \cdot B'$$

$B'$  : Susceptibilité du bitume au temps de charge .

-Module réduit pour  $X_L < X < X_s$ :

La courbe de variation du module réduit suit la loi exponentielle décrite par la formule jusqu'à la limite  $X = X_L$ .

Au delà de cette valeur, son comportement devient linéaire :

$$R^*(X) = R^*(X_L) + P(X - X_L)$$

La pente de cette expression est en relation avec la susceptibilité au temps de charge.

$$P = 6,28 \cdot 10^{-2} + 0,219 \cdot B'$$

On cherche la valeur de  $X$  pour laquelle l'expression devient égale à  $P$ .

$$X_L = \frac{1}{H} \cdot \log\left(\frac{0,4343P}{R^*_{pen}}\right) - 1,672$$

P

$$R^*(X) = 0,4343 \frac{P}{H} + P(X - XL)$$

H

-Module réduit pour  $X > X_s$ :

Pour  $R^* > 0,75$ , le module tend asymptotiquement vers 1. Ce comportement peut être représenté par une fonction de la forme:

$$R^*(X) = 1 - C_1 \exp(-(X - X_s)C_2)$$

De la condition  $R(XL) = 0,75$  on tire :

$$X_s = XL - \frac{0,4343}{H} + \frac{0,75}{P}$$

Avec :

$$C_1 = 0,25 \quad \text{et} \quad C_2 = \frac{P}{0,25}$$

D'où :

$$R(X) = 1 - 0,25 \cdot \exp \left( - \frac{P(X - X_s)}{0,25} \right)$$

Le module de rigidité du bitume est un paramètre important permettant de décrire les variations de la résistance à la rupture du bitume seul, et celle du module de rigidité et la résistance des enrobés bitumineux.

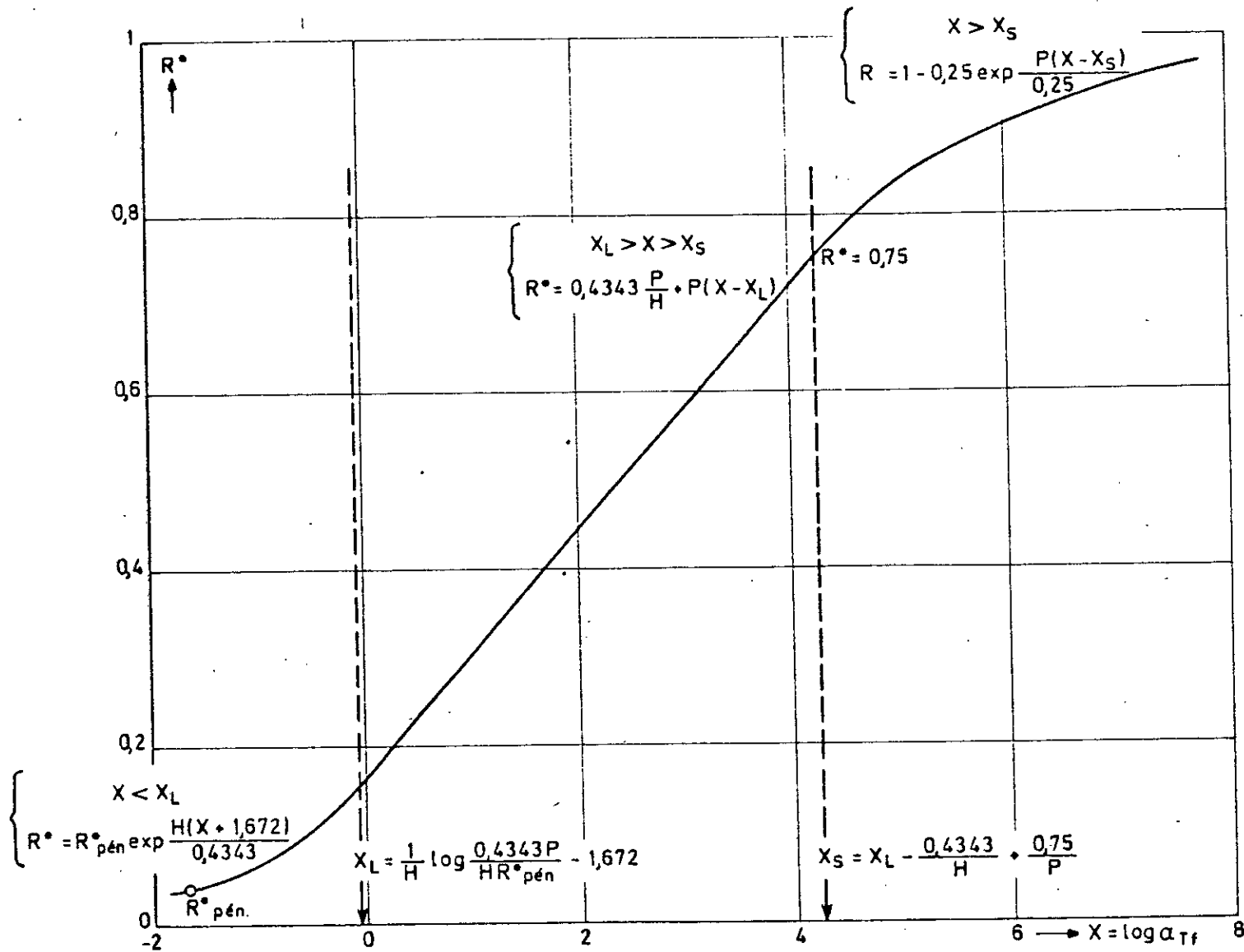


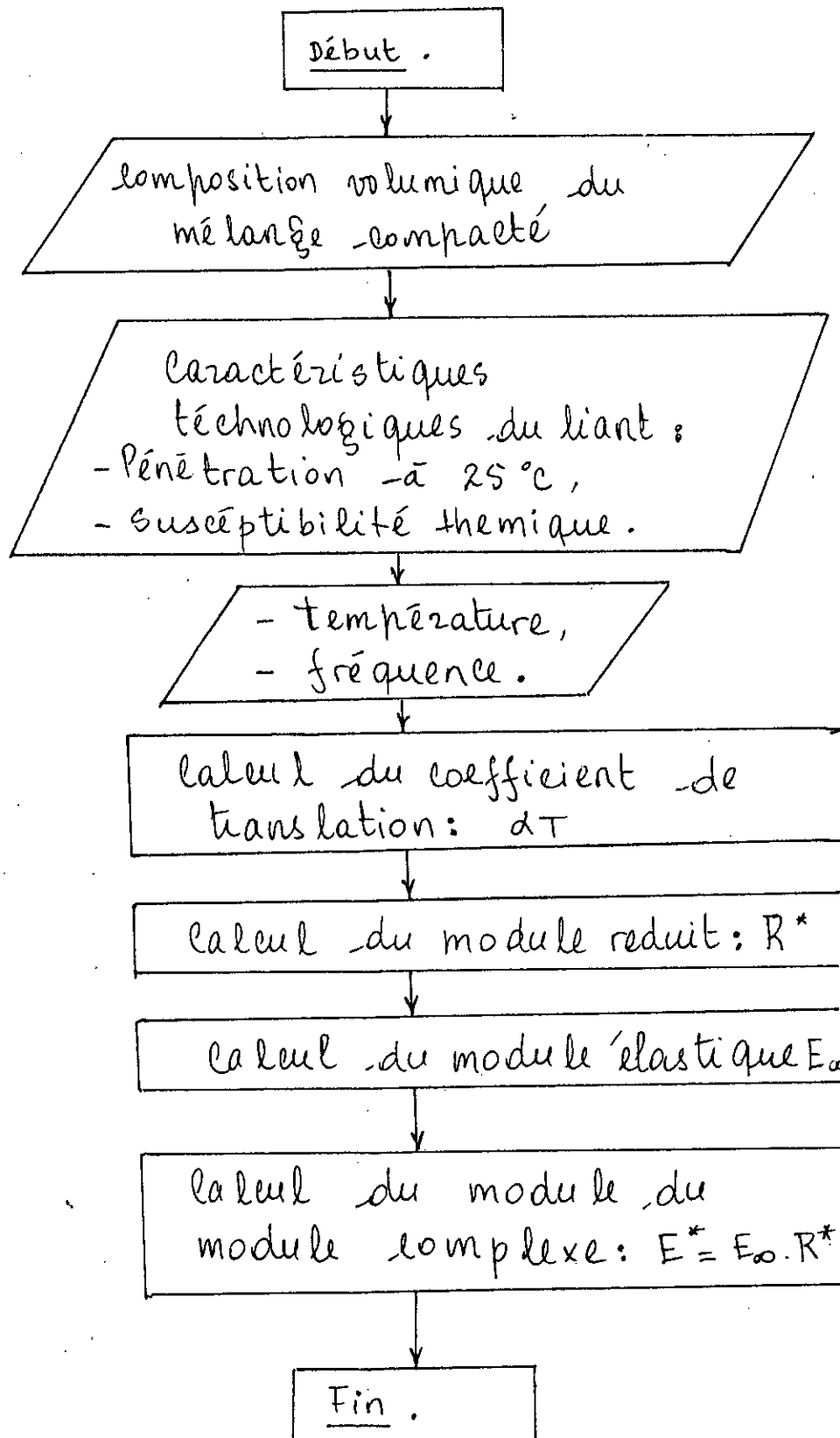
fig 8

Représentation schématique de la méthode de calcul du module réduit  $R^*$

C'est ainsi que le module de rigidité permet de regrouper les effets combinés du temps de charge, de la température et du type du bitume.

Par conséquent, il est considéré comme une variable très importante et sa valeur doit être déterminée avec la plus grande précision possible.

Pour faciliter une telle détermination, un programme de calcul sur ordinateur a été développé. L'organigramme et le listing de ce programme sont donnés dans l'annexe A.



## 6.8 ETUDE COMPARATIVE DES DIFFERENTES METHODES

### 6.8.1 EXEMPLE

Le cas concret que nous avons choisi d'étudier est un enrobé dont les modules de rigidité ont été mesurés en flexion alternée par H.MOREAUD. IL est caractérisé par la composition suivante:

- 33 % quartzite 5/15;
- 30 % porphyre concassé 2/5;
- 32 % sable de seine;
- 5 % filler calcaire;
- 6 ppc bitume 40/50 ( $Pen_{25} = 49$  ,  $T_{AB} = 53,5^{\circ}C$ );
- 4 % de vides.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Table 6.1: valeurs du module donnés par les différentes méthodes

| T<br>°C | F<br>Hz | Saunnier<br>graphique | Heukelom<br>calculée | Verstraeten<br>graphique | Moreaud<br>mesurée | Francken<br>calculée | Prog  |
|---------|---------|-----------------------|----------------------|--------------------------|--------------------|----------------------|-------|
| 30      | 5       | 11                    | 9,3                  | 12,4                     | 15,0               | 18,7                 | 21,9  |
| 30      | 50      | 35                    | 30,1                 | 74,2                     | 42,3               | 44,3                 | 53,2  |
| 10      | 5       | 80                    | 80,7                 | 99,0                     | 78,2               | 110,0                | 124,8 |
| 10      | 50      | 125                   | 148,2                | 165,0                    | 125,7              | 152,8                | 178,7 |
| 0       | 5       | 140                   | 160,5                | 161,5                    | 125,5              | 170,5                | 188,4 |
| 0       | 50      | 180                   | 209,9                | 214,5                    | 173,7              | 213,2                | 221,5 |

On constate que les valeurs calculées à partir de l'abaque de SAUNIER sont les plus proches des valeurs expérimentales et que toutes les autres méthodes donnent des valeurs nettement supérieures.

Nous attribuons cela au fait que la méthode de SAUNIER a été élaborée sur la base de résultats expérimentaux issus de l'appareillage utilisé par H. MOREAUD, les écarts observés entre les différentes méthodes de détermination du module pourrait être liés aux erreurs systématiques existant entre les méthodes de mesure adoptées.

Il est intéressant de noter que la méthode de calcul de HEUKELOM, la méthode graphique de J. VERSTRAETEN et la méthode de calcul proposée ici sont en bon accord dans une large gamme de températures et fréquences. Accord qui se maintient à des températures encore plus basses où la méthode graphique de SAUNIER devient inutilisable.

Pour conclure, on peut constater que les ordres de grandeur obtenus par ces procédés sont assez voisins malgré certaines différences systématiques apparemment liées aux procédés expérimentaux adoptés dans chaque cas.

## 6.9 INFLUENCE DES DIFFERENTS PARAMETRES DE COMPOSITION

### 6.9.1 INFLUENCE DU TYPE DE BITUME

Les variations du module complexe d'un enrobé bitumineux avec la température et les temps de charge sont attribuées en majeure partie au bitume.

La dureté du bitume utilisé et sa susceptibilité à la température influencent grandement la valeur du module complexe de l'enrobé.

A titre d'exemple la figure ( ) montre les variations du module de rigidité de trois enrobés denses avec la température. Elle met en évidence l'importance du rôle joué par le bitume dans l'enrobé. L'emploi d'un bitume plus dur et de même susceptibilité à la température a pour effet de decaller la courbe donnant les variations du module de rigidité vers les hautes température.

Cependant, la valeur maximale du module de rigidité de l'enrobé n'est pas influencée par le type de bitume utilisé.

D'un autre côté, il semble qu'il y'ait une corrélation étroite ente l'angle de phase et la susceptibilité du module.



L'étude du rôle du rapport filler/bitume, toutes choses égales par ailleurs, est impossible. La courbe granulométrique et le pourcentage de vides varient au même temps.

D'une façon plus générale, l'augmentation de ce rapport à pourcentage de bitume constante demande un enrobage plus énergique, et entraîne tant que l'enrobage complet est compatible avec la teneur en filler atteinte un accroissement de la rigidité de l'enrobé.

Cet accroissement du module de rigidité résulte d'une diminution du pourcentage de vides ainsi qu'une rigidification de mastic, dont la température Bille et Anneau est plus élevée.

#### 6.9.4 INFLUENCE DU POURCENTAGE DE VIDES

Il est très difficile de synthétiser l'influence du squelette granulaire ( rapport filler/bitume, forme des granulats) car ces facteurs sont liés entre-eux. Ils influencent cependant tous le pourcentage de vides de l'enrobé.

Dans le cas générale, on peut remarquer qu'à dans des conditions de température et de temps de charge identiques, le module de rigidité de l'enrobé à pourcentage de vides élevé (sable-bitume, sand asphalt) sont nettement plus faible que celui d'enrobés plus compacts fabriqués du même bitume.

Les figures ( ) et ( ) représentent les résultats obtenus sur des enrobés dont le pourcentage de vides varie de 4%

à 26% .On constate qu'une augmentation du pourcentage de vides a pour effet de décaler les courbes vers les faibles valeurs du module.

Par contre, la teneur en vides ne semble pas avoir d'influence sur la valeur de l'angle de phase.

### 6.9.5 INFLUENCE DES GRANULATS

(ANGULARITE, GRANULARITE, NATURE MINÉRALOGIQUE)

Des variations sensibles des valeurs du module et des résistances sont constatées en changeant les granulats ou la courbe granulométrique utilisée. Les modifications de la courbe granulométrique entraînent essentiellement une variation de la compacité et de l'épaisseur du film du bitume entre les granulats.

Cette variation correspond à une amélioration des performances et une augmentation du module lorsque la compacité croît. Des fortes compacités sont obtenues avec des fortes teneurs en fines et une énergie de compactage suffisante.

La nature minéralogique des agrégats influence essentiellement sur le mode de rupture lors du concassage et leur forme ainsi que sur leur adhésivité avec les bitumes.

# CONCLUSION

## CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons tenté de faire la synthèse des nombreuses recherches sur le module complexe des enrobés bitumineux.

Cette grandeur est indispensable pour l'application des théories modernes de dimensionnement des chaussées souples, en particuliers des systèmes multicouches.

Etant donné que la détermination de la valeur du module complexe est impossible à l'heure actuelle dans nos laboratoires, nous avons suggéré sa prévision par une méthode purement analytique.

En fait, l'analyse par FRANCKEN du module de rigidité d'un certain nombre de mélanges bitumineux, a conduit à la mise au point d'une méthode prévisionnelle de cette grandeur.

Elle nécessite d'une part la connaissance des paramètres de composition (teneur volumique en agrégat et en liant, pourcentage de vides), et d'autre part deux caractéristiques technologiques du bitume utilisé (pénétration à 25°C et la susceptibilité thermique).

La méthode est applicable à toutes les compositions bitumineuses généralement utilisées dans la construction routière.

Ainsi, un programme informatique a été mis au point pour faciliter son calcul. Il est intéressant d'envisager l'incorporation d'un tel programme dans un logiciel de dimensionnement des chaussées.

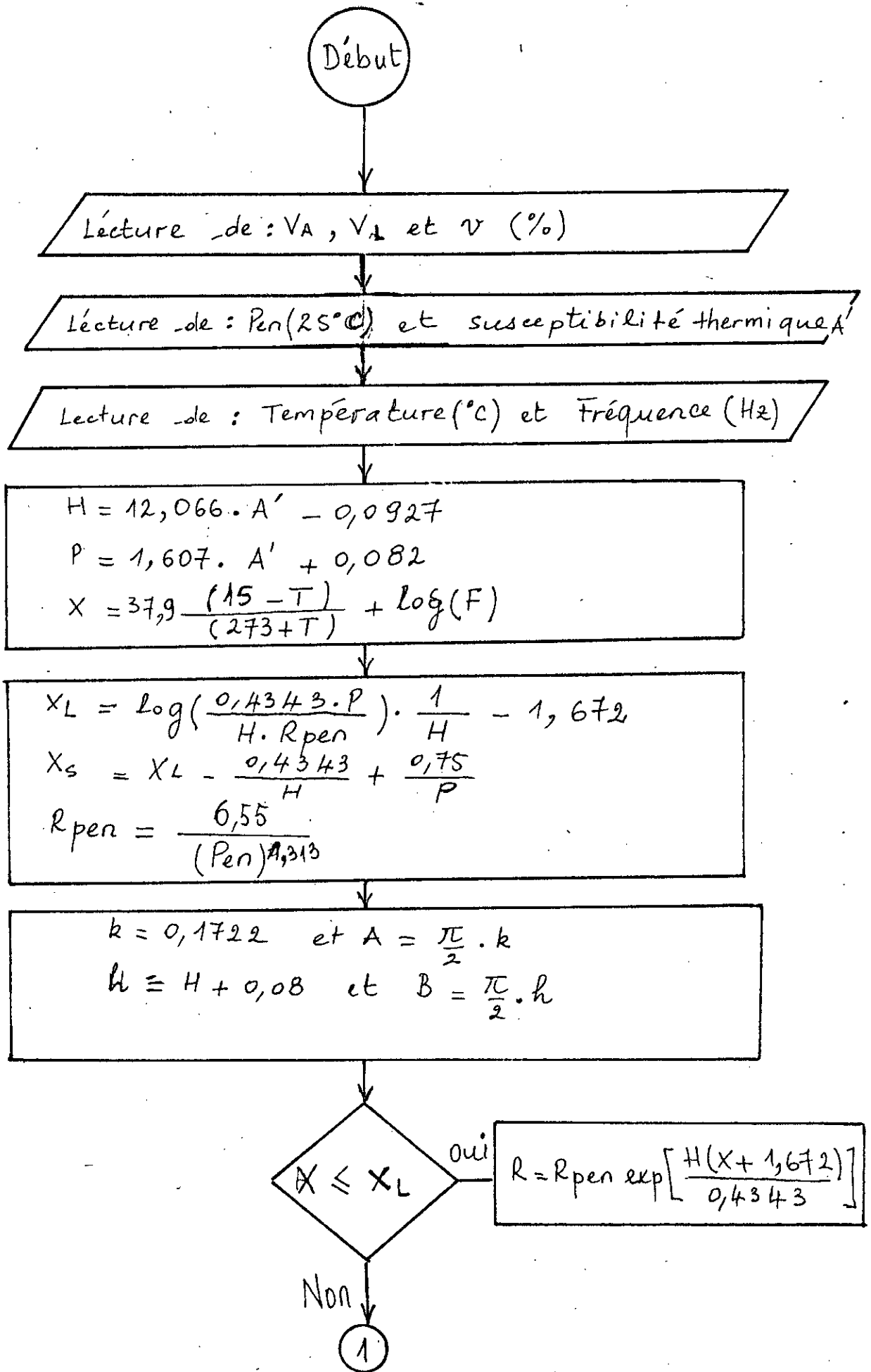
# ANNEXES

Annexe A

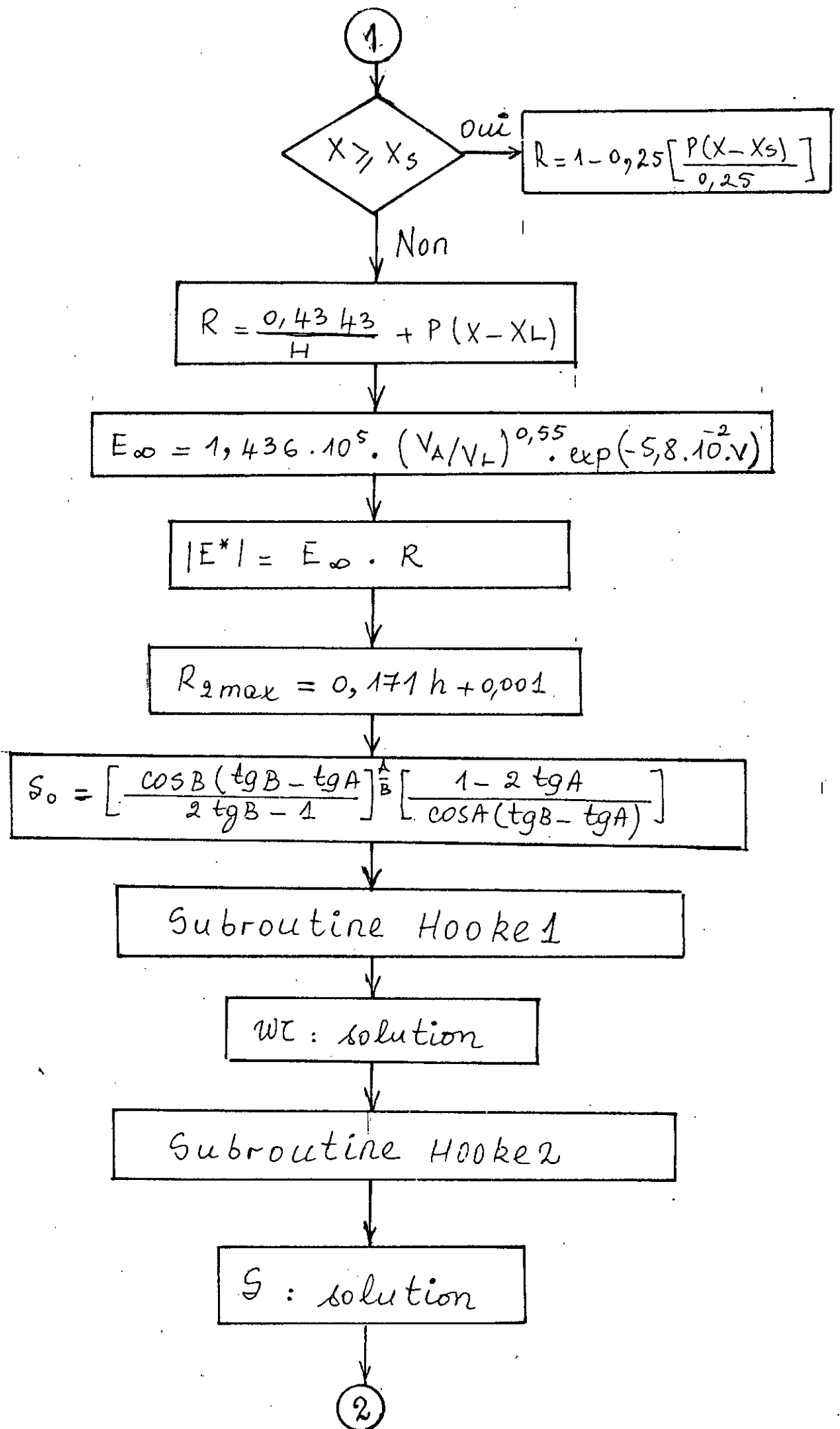
### Tableau des variables

| Nom        | Type    | Nature | Observations                |
|------------|---------|--------|-----------------------------|
| $V_A$      | entrée  | réel   | teneur volumique en agrégat |
| $V_L$      | entrée  | réel   | teneur volumique en liant   |
| $V$        | entrée  | réel   | pourcentage de vides        |
| $E_\infty$ | sortie  | réel   | module élastique            |
| $H$        | interne | réel   |                             |
| $P$        | interne | réel   |                             |
| $X$        | interne | réel   | log de la fréquence réduite |
| $X_L$      | interne | réel   |                             |
| $X_S$      | interne | réel   |                             |
| $R$        | sortie  | réel   | module réduit               |
| $E$        | sortie  | réel   | module du module complexe   |





Organigramme.



2

Calcul de  $R_1(\omega\tau, \delta)$ .

Calcul de  $R_2(\omega\tau, \delta)$

$$E_1 = E_\infty \cdot R_1$$
$$E_2 = E_\infty \cdot R_2$$
$$\varphi = \arctg\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$$

Fin

```

C*****
C      PROGRAMME CALCULANT
C      LE      MODULE
C      LA PARTIE REELLE
C      LA PARTIE IMAGINAIRE
C      L'ARGUMENT DU MODULE COMPLEXE
C*****

```

```

PROGRAM REEL
REAL MRC,P,H,RPEN,XA,XL,XS,S,R,T,F
DIMENSION X(5),Y(5),EPS(2),RK(2),Q(2),QQ(2),W(2)
COMMON/BL1/ N1,N2
COMMON/BL2/ A,B,K,PH,R2MAX

```

```

C
WRITE(*,*)'DONNER LA TENEUR VOLUMIQUE DES AGREGATS'
READ(*,*)VA
WRITE(*,*)'DONNER LA TENEUR VOLUMIQUE DU LIANT'
READ(*,*)VL
WRITE(*,*)'DONNER LE POURCENTAGE DES VIDES'
READ(*,*)PV
WRITE(*,*)'DONNER LA PENETRATION DU BITUME'
READ(*,*)PEN
WRITE(*,*)'DONNER LA SUSCEPTIBILITE DU BITUME'
READ(*,*)S
11 WRITE(*,*)'DONNER LA TEMPERATURE DE L EPROUVETTE'
READ(*,*)T
WRITE(*,*)'DONNER LA FREQUENCE DU CHARGEMENT'
READ(*,*)F
EINF=1.436E05*(VA/VL)**0.55*EXP(-5.84E-02*PV)
PRINT*,'EINF=',EINF
XA=37.9*(15-T)/(T+273)+LOG10(F)
PRINT*,'XA=',XA
H=11.267*S-0.0927
PRINT*,'H=',H
P=1.83*S+0.0628
PRINT*,'P=',P
RPEN=6.55/(PEN**1.313)
XL=LOG10((0.4343*P)/(H*RPEN))/H-1.672
PRINT*,'XL=',XL
XS=XL-0.4343/H+0.75/P
PRINT*,'XS=',XS
IF(XA.LE.XL) THEN
R=RPEN*EXP(H*(XA+1.672)/0.4343)
ELSEIF(XA.GE.XS)THEN
R=1-0.25*EXP(P*(XA-XS)/0.25)
ELSE
R=0.4343*P/H+P*(XA-XL)
ENDIF
PRINT*,'R=',R
E=EINF*R
WRITE(*,*)'LE MODULE DU MODULE COMPLEXE,E='
WRITE(*,*)E
K=0.1722
A=0.27
PH=H+0.08
B=3.14*PH/2.
R2MAX=0.171*PH+0.001
PRINT*,'R2MAX=',R2MAX
C
N1=6
WRITE(*,*)'MODE D IMPRESSION DES RESULTATS

```

```

WRITE(6,*)'
1***OUI'
READ(*,*)IPRINT
WRITE(6,*)'ENTRER LE NOMBRE DE VARIABLES'
READ(*,*)NSTAGE
WRITE(6,*)'LE NOMBRE D ITERATION MAX'
READ(*,*)ITMAX
WRITE(6,*)'VALEURS DU PAS POUR CHACUNE DES VARIABLES'
READ(*,*)(EPS(JJ),JJ=1,NSTAGE)

```

C

```

DELTA=(COS(B)*(TAN(B)-TAN(A))/(1-2*TAN(A))**(A/B)*(2*TAN(B)-1)/
$(COS(A)*(TAN(B)-TAN(A))))
PRINT*, 'DELTA=', DELTA
RK(1)=0.01
CALL HOOKE1(RK, EPS, NSTAGE, ITMAX, NKAT, EPSY, AMDA, BETA, QD, Q, QQ, W,
$IPRINT, DELTA, R)
WTAU=RK(1)
PRINT*, 'WTAU=', RK(1)
RK(1)=DELTA
CALL HOOKE2(RK, EPS, NSTAGE, ITMAX, NKAT, EPSY, AMDA, BETA, QD, Q, QQ, W,
$IPRINT, WTAU, R2MAX)
DELTA=RK(1)
PRINT*, 'DELTA=', RK(1)
D=1+2*DELTA*COS(A)/WTAU**K+DELTA**2/WTAU**(2*K)+2*COS(B)/WTAU
$**PH+2*DELTA*COS(A-B)/WTAU**(PH+K)+1/WTAU**(2*PH)
ER=EINF*(1+DELTA*COS(A)/WTAU**K+COS(B)/WTAU**PH)/D
EI=EINF*(DELTA*SIN(A)/WTAU**K+SIN(B)/WTAU**PH)/D
FI=ATAN(EI/ER)
PRINT*, 'ER=', ER
PRINT*, 'EI=', EI
PRINT*, 'FI=', FI
WRITE(*,*)'VOULEZ-VOUS REFAIRE UN AUTRE CALCUL'
WRITE(*,*)' 1***OUI
WRITE(*,*)' 0***NON
READ(*,*)REPENS
IF(REPENS.EQ.1)GOTO 11
STOP
END

```

C

```

*****
SUBROUTINE HOOKE1(RK, EPS, NSTAGE, MAXK, NKAT, EPSY, AMDA, BETA, QD,
$Q, QQ, W, IPRINT, delta, R)
*****

```

C

```

DIMENSION RK(2), EPS(2), Q(2), QQ(2), W(2)
COMMON/BL1/ N1, N0

```

```

WRITE(6,*)'FACTEUR POUR L AUGMENTATION DU PAS INITIAL'
WRITE(6,*)'EN GENERAL AMDA >=1'
READ(*,*)AMDA
WRITE(6,*)'FACTEUR POUR LA REDUCTION DU PAS INITIAL'
WRITE(6,*)'EN GENERAL 0<BETA<1'
READ(*,*)BETA
WRITE(6,*)'TOLERANCE A SATISFAIRE POUR L ARRET DES CALCULS'
READ(*,*)EPSY
WRITE(6,001)

```

001 FORMAT(10X, 'PROCEDURE D OPTIMISATION HOOKE ET JEEVES')

```

WRITE(6,002)AMDA, BETA, MAXK

```

002 FORMAT(/, /, 'PARAMETRES', /, 2X, 'AMDA=', F5.2, 4X, 'BETA=',  
\$F5.2, 4X, 'ITMAX=', I4)

```

WRITE(6,003)NSTAGE

```

003 FORMAT(/, 2X, 'NOMBRE DE VARIABLES =', I2)

```

WRITE(6,004)

```

004 FORMAT(/, 2X, 'GRANDEUR INITIALE DU PAS')

```

DO 6 I=1, NSTAGE

```

```

WRITE(6,005)I, EPS(I)

```

005 FORMAT(/, 2X, 'EPS(', I2, ')=' , E16.8)

6 CONTINUE

```

WRITE(6,007)EPSY

```

```

C
KFLAG=0
DO 601 I=1,NSTAGE
Q(I)=RK(I)
W(I)=0.0
601 CONTINUE
KK1=0
70 KCOUNT=0
WBEST=W(NSTAGE)
CALL FUNC1(SUM,RK,NSTAGE,delta,R)
kk1=kk1+1
BO=SUM
IF(KK1.EQ.1) QD=SUM
IF(KK1.EQ.1) GOTO 201
IF(BO.GT.QD) KFLAG=1
IF(BO.LT.QD) QD=BO

```

C  
C  
C  
\*\*\*\*\*  
ETABLISSEMENT DU RESEAU DE RECHERCHE  
\*\*\*\*\*

```

201 DO 55 I=1,NSTAGE
QQ(I)=RK(I)
TSRK=RK(I)
RK(I)=RK(I)+EPS(I)
CALL FUNC1(SUM,RK,NSTAGE,delta,R)
KK1=KK1+1
W(I)=SUM
IF(W(I).LT.QD) GOTO 58
RK(I)=RK(I)-2.0*EPS(I)
CALL FUNC1(SUM,RK,NSTAGE,delta,R)
KK1=KK1+1
W(I)=SUM
IF(W(I).LT.QD) GOTO 58
RK(I)=TSRK
IF(I.EQ.1) GOTO 513
W(I)=W(I-1)
GOTO 613
513 W(I)=BO
613 CONTINUE
KCOUNT=KCOUNT+1
GOTO 55
58 QD=W(I)
QQ(I)=RK(I)
55 CONTINUE
IF(IPRINT)60,65,60
60 WRITE(6,100)KK1

```

C  
C  
C  
C  
C  
\*\*\*\*\*  
ENREGISTRER VALEUR DE FONCTION ET LIEU  
\*\*\*\*\*

```

65 WRITE(6,102)
WRITE(6,207)(RK(I),I=1,NSTAGE),QD
IF(KK1.GT.MAXK)GOTO 94
IF(QD.LE.EPSY) GOTO 94

```

C  
C  
C  
C  
C  
\*\*\*\*\*  
SI REUSSITE DANS UNE DIRECTION AUGMENTER LE PAS  
\*\*\*\*\*

```

C IF(KCOUNT.GE.NSTAGE)GOTO 28
DO 26 I=1,NSTAGE
RK(I)=RK(I)+AMDA*(RK(I)-Q(I))
26 CONTINUE
DO 25 I=1,NSTAGE
O(I)=OO(I)

```

```

CONTINUE
GOTO 70
*****
C SI ECHEC DANS TOUTES LES DIRECTIONS REDUIRE LA GRANDEUR DU PAS
C *****
28 IF(KFLAG.EQ.1)GOTO 202
GOTO 204
202 KFLAG=0
204 DO 80 I=1,NSTAGE
EPS(I)=EPS(I)*BETA
80 CONTINUE
IF(1PRINT)85,70,85
85 GOTO 70
94 WRITE(6,460)(EPS(I),I=1,NSTAGE)
WRITE(6,461)(RK(I),I=1,NSTAGE)
WRITE(6,462)QD
DO 104 I=1,NSTAGE
104 WRTE(6,103)I,RK(I)
WRITE(6,100)KK1
100 FORMAT(/,2X,'NOMBRE EVALUATION FONCTION =',I8,2X,'FOIS')
102 FORMAT(1X,'FIN DE CHAQUE RESEAU DE RECHERCHE'/)
103 FORMAT(/,2X,'LA VALEUR FINALE DE X(',I2,')=',E16.8)
207 FORMAT(1X,'VARIABLES ET SUMN',3X,9E12.4//)
465 FORMAT(10X,'SUM',3X,E14.5)
460 FORMAT(1X,' LES EPS FINAUX SONT',2F20.8/)
461 FORMAT(1X,' LES RK FINAUX SONT',5F20.8/)
462 FORMAT(/,/,1X,'LE MAXIMUM DE LA FONCTION EST=',F20.8/)

RETURN
END
*****
C SUBROUTINE HOOKE2(RK, EPS, NSTAGE, MAXK, NKAT, EPSY, AMDA, BETA, QD,
C SQ, QQ, W, IPRINT, wtau, R2MAX)
C *****
DIMENSION RK(2), EPS(2), Q(2), QQ(2), W(2)
COMMON/BL1/ N1, N0

C WRITE(6,1001)
1001 FORMAT(10X,'PROCEDURE D OPTIMISATION HOOKE ET JEEVES')
WRITE(6,1002)AMDA, BETA, MAXK
1002 FORMAT(/, 'PARAMETRES' /, 2X, 'AMDA=', F5.2, 4X, 'BETA=',
$F5.2, 4X, 'ITMAX=', 14)
WRITE(6,1003)NSTAGE
1003 FORMAT(/, 2X, 'NOMBRE DE VARIABLES =', I2)
WRITE(6,1004)
1004 FORMAT(/, 2X, 'GRANDEUR INITIALE DU PAS')
DO 16 I=1, NSTAGE
WRITE(6,1005)I, EPS(I)
1005 FORMAT(/, 2X, 'EPS(', I2, ')=', E16.8)
16 CONTINUE
WRITE(6,1007)EPSY
1007 FORMAT(/, 2X, 'TOLERANCE A SATISFATRE POUR ARRET DES CALCULS', E16.8)
KFLAG=0
DO 161 I=1, NSTAGE
Q(I)=RK(I)
W(I)=0.0
161 CONTINUE
KK1=0
170 KCOUNT=0
WBEST=W(NSTAGE)
CALL FUNC2(SUM, RK, NSTAGE, wtau)
kk1=kk1+1
BO=SUM
IF(KK1.EQ.1) QD=SUM
IF(KK1.EQ.1) GOTO 1201
IF(BO.LT.QD) KFLAG=1
IF(BO.GT.QD) QD=BO
*****
C ETABLISSEMENT DU RESEAU DE RECHERCHE
C *****

```

```

C      GOTO 70
C      *****
C      ST ECHEC DANS TOUTES LES DIRECTIONS REDUIRE LA GRANDEUR DU PAS
C      *****
28     IF(KFLAG.EQ.1)GOTO 202
      GOTO 204
202    KFLAG=0
204    DO 80 I=1,NSTAGE
      EPS(I)=EPS(I)*BETA
80     CONTINUE
      IF(IPRINT)85,70,85
85     GOTO 70
94     WRITE(6,460)(EPS(I),I=1,NSTAGE)
      WRITE(6,461)(RK(I),I=1,NSTAGE)
      WRITE(6,462)QD
      DO 104 I=1,NSTAGE
104    WRITE(6,103)I,RK(I)
      WRITE(6,100)KK1
100    FORMAT(//,2X,'NOMBRE EVALUATION FONCTION =',18,2X,'FOIS')
102    FORMAT(1X,'FIN DE CHAQUE RESEAU DE RECHERCHE')
103    FORMAT(//,2X,'LA VALEUR FINALE DE X(',12,')=',E16.8)
207    FORMAT(1X,'VARIABLES ET SUMN',3X,9E12.4//)
465    FORMAT(10X,'SUM',3X,E14.5)
460    FORMAT(1X,' LES EPS FINAUX SONT',2F20.8//)
461    FORMAT(1X,' LES RK FINAUX SONT',5F20.8//)
462    FORMAT(//,1X,'LE MAXIMUM DE LA FONCTION EST=',F20.8//)

      RETURN
      END
C      *****
C      SUBROUTINE HOOKE2(RK, EPS, NSTAGE, MAXK, NKAT, EPSY, AMDA, BETA, QD,
C      SQ, QQ, W, IPRINT, wtau, R2MAX)
C      *****
      DIMENSION RK(2), EPS(2), Q(2), QQ(2), W(2)
      COMMON/BL1/ N1, N0

C      WRITE(6,1001)
1001   FORMAT(10X,'PROCEDURE D OPTIMISATION HOOKE ET JEEVES')
      WRITE(6,1002)AMDA, BETA, MAXK
1002   FORMAT(//, 'PARAMETRES', //, 2X, 'AMDA=', F5.2, 4X, 'BETA=',
      $F5.2, 4X, 'ITMAX=', I4)
      WRITE(6,1003)NSTAGE
1003   FORMAT(/, 2X, 'NOMBRE DE VARIABLES =', I2)
      WRITE(6,1004)
1004   FORMAT(/, 2X, 'GRANDEUR INITIALE DU PAS')
      DO 16 I=1, NSTAGE
      WRITE(6,1005)I, EPS(I)
1005   FORMAT(/, 2X, 'EPS(', I2, ')=', E16.8)
16     CONTINUE
      WRITE(6,1007)EPSY
1007   FORMAT(/, 2X, 'TOLERANCE A SATISFAIRE POUR ARRÊT DES CALCULS', E16.8)
      KFLAG=0
      DO 161 I=1, NSTAGE
      Q(I)=RK(I)
      W(I)=0.0
161    CONTINUE
      KK1=0
170    KCOUNT=0
      WBEST=W(NSTAGE)
      CALL FUNC2(SUM, RK, NSTAGE, wtau)
      KK1=KK1+1
      BO=SUM
      IF(KK1.EQ.1) QD=SUM
      IF(KK1.EQ.1) GOTO 1201
      IF(BO.LT.QD) KFLAG=1
      IF(BO.GT.QD) QD=BO
C      *****
C      ETABLISSEMENT DU RESEAU DE RECHERCHE
C      *****
1201   DO 155 I=1, NSTAGE
      QQ(I)=RK(I)
      TSRK=RK(I)
      RK(I)=RK(I)+EPS(I)
      CALL FUNC2(SUM, RK, NSTAGE, wtau)
      KK1=KK1+1
      W(I)=SUM
      IF(W(I).LT.QD) GOTO 158
      RK(I)=RK(I)-2.0*EPS(I)
      CALL FUNC2(SUM, RK, NSTAGE, wtau)
      KK1=KK1+1
      W(I)=SUM
      IF(W(I).LT.QD) GOTO 158
      RK(I)=TSRK
      IF(I.EQ.1) GOTO 1513
      W(I)=W(I)-1)

```



```

WRITE(6,1402)QD
DO 1104 I=1,NSTAGE
1104 WRITE(6,1103)I,RK(I)
WRITE(6,1100)KK1
1100 FORMAT(/,2X,'NOMBRE EVALUATION FONCTION =',I8,2X,'FOIS')
1102 FORMAT(1X,'FIN DE CHAQUE RESEAU DE RECHERCHE')
1103 FORMAT(/,2X,'LA VALEUR FINALE DE X(',I2,')=',E16.8)
1207 FORMAT(1X,'VARIABLES ET SUMN',3X,9E12.4//)
1465 FORMAT(10X,'SUM',3X,E14.5)
1460 FORMAT(1X,' LES EPS FINAUX SONT',2F20.8 /)
1461 FORMAT(1X,' LES RK FINAUX SONT',5F20.8/)
1462 FORMAT(/,1X,'LE MAXIMUM DE LA FONCTION EST=' ,F20.8/)
RETURN
END

```

C  
C  
C  
C

```

*****
SUBROUTINE FUNC1(SUM,RK,N,delta,R)
*****

```

```

REAL X1,X2
DIMENSION RK(N)
COMMON/BL2/ A,B,K,PH,R2MAX
X1=DELTA
X2=RK(1)
PRINT*,'x1=',x1
PRINT*,'x2=',x2
PRINT*,'a=',a
PRINT*,'b=',b
PRINT*,'R=',R
D=1+2*X1*COS(A)/X2**K+X1**2/X2**(2*K)+2*COS(B)/X2
$**PH+2*X1*COS(A-B)/X2**(PH+K)+1/X2**(2*PH)
PRINT*,'D=',D
SUM=(R-1/SQRT(D))**2
PRINT*,'SUM=',SUM
RETURN
END

```

C  
C  
C  
C

```

*****
SUBROUTINE FUNC2(SUM,RK,N,wtau)
*****

```

```

REAL X1,X2
DIMENSION RK(N)
COMMON/BL2/ A,B,K,PH,R2MAX
X1=RK(1)
X2=WTAU
PRINT*,'x1=',x1
PRINT*,'x2=',x2
PRINT*,'a=',a
PRINT*,'b=',b
C=X1*SIN(A)/X2**K+SIN(B)/X2**PH
D=1+2*X1*COS(A)/X2**K+X1**2/X2**(2*K)+2*COS(B)/X2
$**PH+2*X1*COS(A-B)/X2**(PH+K)+1/X2**(2*PH)
DYC=-K*X1*SIN(A)/X2**(K+1)-PH*SIN(B)/X2**(PH+1)
DYD=2.*COS(A)/X2**K+2.*X1/X2**(2*K)+2*COS(A-B)/X2
$**(PH+K)
PRINT*,'C=',C
PRINT*,'D=',D
SUM=(C/D-R2MAX)**2+((DYC*D-DYD*C)/D**2)**2
RETURN
END

```

## Annexe B

### 1.-REPRESENTATION DES MODULES ET COMPLAISANCES COMPLEXES DANS LE PLAN COMPLEXE ARITHMITIQUE:

#### 1.1-DEFINITIONS ET RAPPELS:

##### 1.1.1-DEFINITION DU MODULE ET LA COMPLAISANCE COMPLEXE

Si  $f$  et  $r$  sont les fonctions fluage et relaxation d'un corps viscoélastique linéaire, les modules et complaisance opérationnels sont par définition les transformées de CARSON:

$$f^*(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt \quad A.1$$

$$r^*(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} r(t) dt \quad A.2$$

ou  $p = x + iy$  est une variable complexe

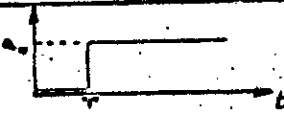


Etant les transformées de CARSON, ces fonctions sont holomorphes dans le domaine où la transformation est définie.

##### 1.1.2-PROPRIETES GENERALES:


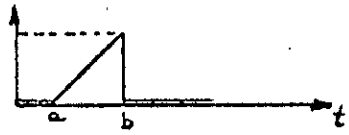
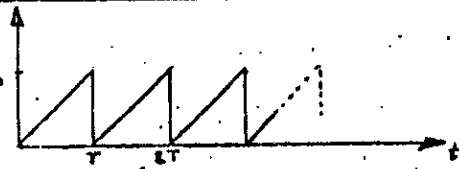
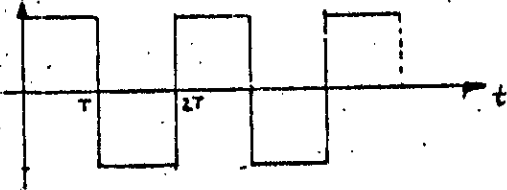
La transformée  $h^*$  représente indifféremment  $f^*$  ou  $r^*$ , dans ce qui va suivre.

TABLE DES PRINCIPALES CORRESPONDANCES DES  
 TRANSFORMEES DE CARSON A 1 VARIABLE ( $\mathcal{C}_1$ )

| PROPRIETE                  | FONCTION ORIGINALE   | FONCTION TRANSFORMEE.                                       |
|----------------------------|--|---|
| Notation                   | $f(t)$   | $f^* = \mathcal{C}_1 [f(t)]$                                |
| Définition                 | $f(t)$   | $f^*(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt$                |
| Linéarité                  | $a_1 f_1 + a_2 f_2$  | $a_1 f_1^* + a_2 f_2^* \quad \forall a_1, a_2 = \text{Cte}$ |
| Dérivation                 | $\frac{d}{dt} f(t)$  | $p[f^*(p) - f(0)]$<br>soit $pf^*(p)$ si $f(0) = 0$          |
| Intégration                | $\int_0^t f(t) dt$   | $\frac{1}{p} f^*(p)$  |
| Convolution                | $\int_0^t f(t-\tau)g(\tau) d\tau = \int_0^t f(\tau)g(t-\tau) dt$ | $\frac{1}{p} f^*(p)g^*(p)$                                  |
| Convolution dérivée        | $\frac{d}{dt} \int_0^t f(t-\tau)g(\tau) dt$                      | $f^*(p)g^*(p)$  |
| Retard<br>(ou translation) | $f(t-T)$<br>avec $f=0 \quad \forall t < 0$                       | $e^{-pT} f^*(p)$  |
| Constante                  | $a_0$  | $a_0$   |
| Temps                      | $t$  | $p^{-1}$  |

| PROPRIETE                               | FONCTION ORIGINALE  | FONCTION TRANSFORMEE  |
|---|---|---|
| Fonction puissance (ou parabolique)     | $t^n$ ( $n > 0$ entier)<br>$t^n$ ( $n > 0$ entier ou non)<br>( $\Gamma$ fonction d'Euler de 1ère espèce)                  | $n! p^{-n}$<br>$\Gamma(n+1)p^{-n} \quad \text{Re}(p) > 0$   |
| Exponentielle                           | $e^{-\frac{t}{\tau}}$   | $\frac{p\tau}{1+p\tau} \quad \left[ \text{Re}(p) > -\text{Re}\left(\frac{1}{\tau}\right) \right]$ |
|   | $1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$   | $\frac{1}{1+p\tau} \quad \left[ \text{idem} \right]$  |
|   | $\frac{t}{\tau_1} e^{-\frac{t}{\tau_2}}$  | $\frac{\tau_2}{\tau_1} \frac{p\tau_2}{(1+p\tau_2)^2} \quad \left[ \text{idem} \right]$            |
| Sinus                                   | $\sin \omega t$   | $\frac{\omega p}{p^2 + \omega^2}$   |
| Cosinus                                 | $\cos \omega t$   | $\frac{p}{p^2 + \omega^2}$  |
| Sinus hyperbolique                      | $\text{sh } at$   | $\frac{ap}{p^2 - a^2}$  |
| Cosinus hyperbolique                    | $\text{ch } at$   | $\frac{p}{p^2 - a^2}$   |
| Logarithme népérien                     | $\text{Int}$  | $-\ln(1,781072...p)$  |
| Constante retardée (ou échelon retardé) | $a_0 Y(t-\tau)$                       | $a_0 e^{-p\tau}$  |
| Créneau                                 | $a_0 [1 - Y(t-\tau)]$                 | $a_0 [1 - e^{-p\tau}]$  |
| Escalier                                | $a_0 \sum_{n=1}^{\infty} Y(t-n\tau)$  | $a_0 \frac{e^{-p\tau}}{1 - e^{-p\tau}} \quad \left[ \text{Re}(p) > 0 \right]$                     |

.../...

| PROPRIETE                    | FONCTION ORIGINALE  | FONCTION TRANSFORMEE  |
|------------------------------|---|---|
| Créneaux successifs          | $a_0 \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n Y(t-nt) \right]$           | $a_0 \frac{1}{1 + e^{-pT}}$                                     |
| Dent de scie                 |  $(t-a) [Y(t-a) - Y(t-b)]$   | $\frac{1}{p} (e^{-ap} - e^{-bp})$                               |
| Scie                         |  $\sum_{n=0}^{\infty} (t-nT) \{ Y(t-nt) - Y[t-(n+1)T] \}$             | $a_0 \left[ \frac{1}{pT} - \frac{e^{-pT}}{1 - e^{-pT}} \right]$ |
| Créneaux alternés successifs |  $2a_0 \left[ 1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n Y(t-nT) \right] - a_0$ | $a_0 \frac{1 - e^{-pT}}{1 + e^{-pT}}$                           |

---:---:---:---:---

La partie imaginaire et la partie réelle de  $h^*(iw)$  se correspondent par une transformation de Hilbert .

$h^*(p)$  étant une transformée de Carson, et si  $p$  est la partie imaginaire conjuguée de  $p$  alors :

$$h^*(\bar{p}) = \overline{h^*(p)} \quad A.3$$

Quand  $p=iw$  alors  $h_1$  et  $h_2$  peuvent se mettre sous la forme suivante:

$$h_1 = h(\infty) - \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{h_2(s)}{s^2 - w^2} s \, ds \quad A.4$$

$$h_2 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{h_1(s) - h(\infty)}{s^2 - w^2} w \, ds \quad A.5$$

ou les intégrales sont des parties principales au sens de Cauchy.

### 1.2-APPLICATION AUX MODELES RHEOLOGIQUES USUELS:

Les propriétés générales de l'espace de Cole et Cole se révèlent d'un intérêt tout particulier lorsqu'on l'applique à la description des modèles rhéologiques.

En effet, les courbes obtenues pour les modèles élémentaires sont des courbes simples, et les règles de regroupement permettent de fixer l'allure des courbes représentatives des modèles plus compliqués.

#### 1.2.1-MODELES MECANIQUES:

Dans l'espace  $s$  et  $\omega$ , un ressort est représenté par un point sur l'axe réel, et un amortisseur par un demi axe imaginaire pur supérieur.

Le module du modèle de Voigt ( $V=R//A$ ) est donc représenté par le même demi-axe imaginaire supérieur décalé de  $R$  sur l'axe des abscisses.

Sa complaisance est représenté par le demi cercle inverse de cette demi droite ( qui passe par 0).

### 1.2.2-MODELES PARABOLIQUES ET DERIVES:

Ce sont des modèles dont le constituant élémentaire est le corps à fluage parabolique; dont la fonction fluage est de la forme :

$$f(t) = \frac{1}{\Gamma(k+1)} \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^k \quad A.6$$

$$\text{ou} \quad 0 \leq k \leq 1$$

Le module complexe d'un tel modèle est donné par :

$$E^*(i\omega\tau) = (\omega\tau)^k e^{\frac{ik\pi}{2}} \quad A.7$$

Il contient comme cas particulier :

- le ressort pur, pour  $K=0$ ;
- l'amortisseur newtonien, pour  $K=1$ .

TABLEAU I -- (Figures)


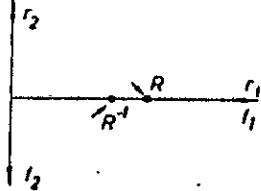
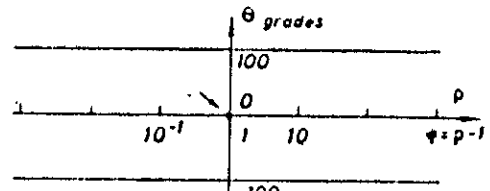
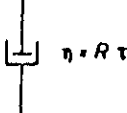
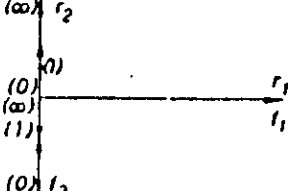
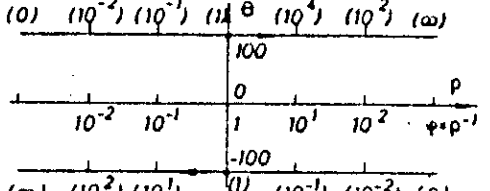
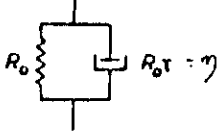
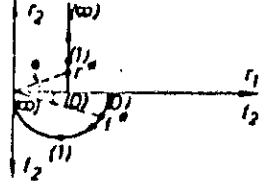
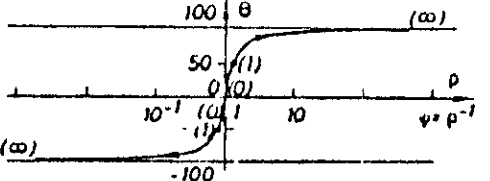
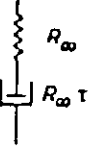
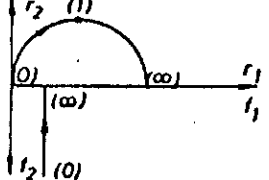
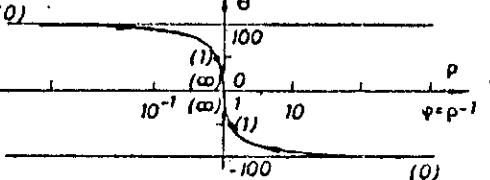
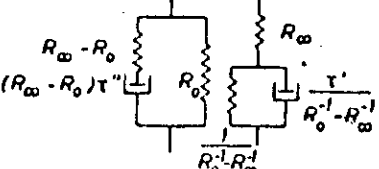
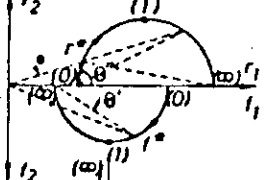
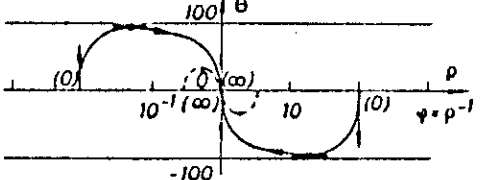
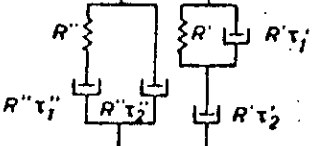
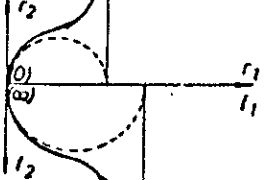
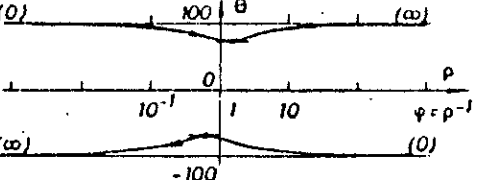
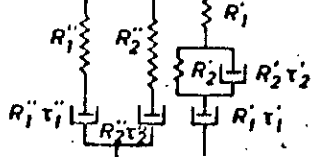
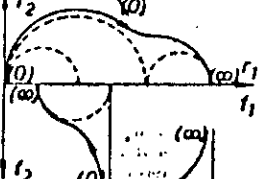
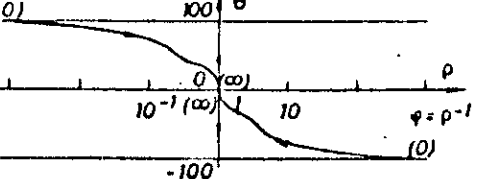
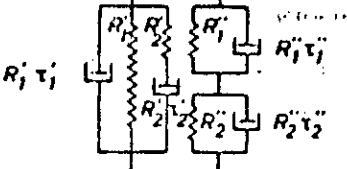
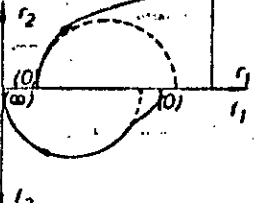
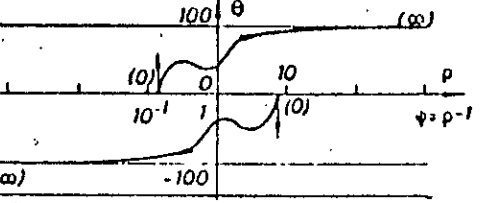
| Idéogramme  | Espace de Cole et Cole  | Espace de Black   |
|---|---|---|
| <p>a)</p>    |    |    |
| <p>b)</p>    |    |    |
| <p>c)</p>    |    |    |
| <p>d)</p>   |   |   |
| <p>e)</p>  |  |  |
| <p>f)</p>  |  |  |
| <p>g)</p>  |  |  |
| <p>h)</p>  |  |  |



TABLEAU II - (Figures)


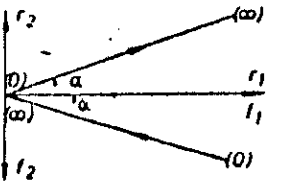
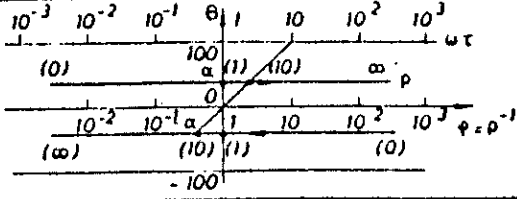
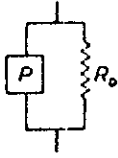
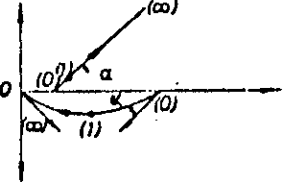
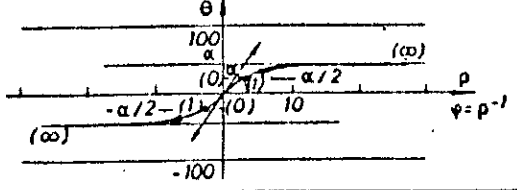

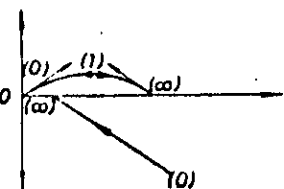
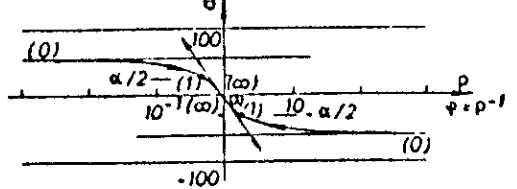
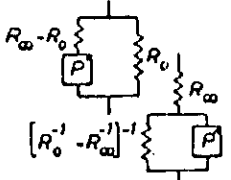
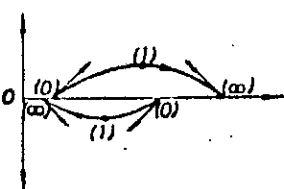
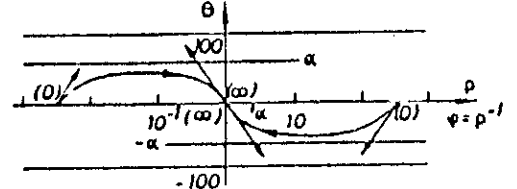
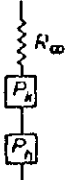
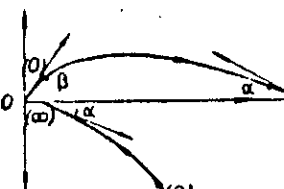
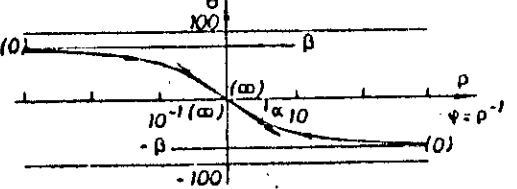
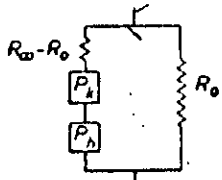
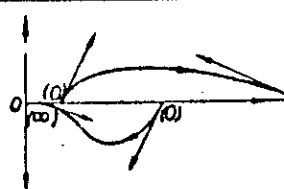
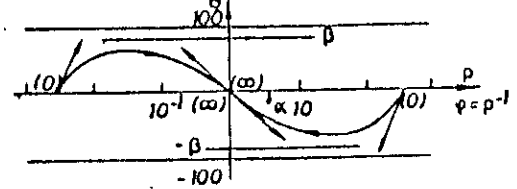
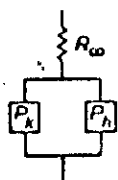
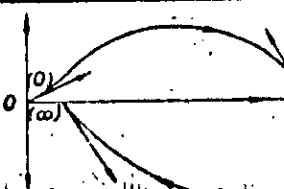
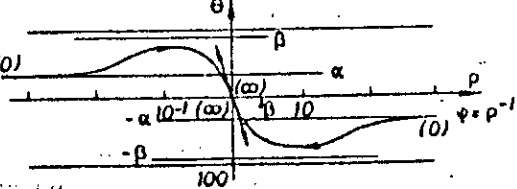
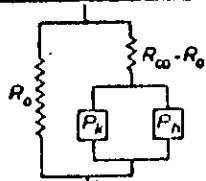
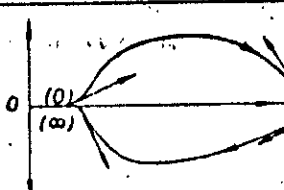
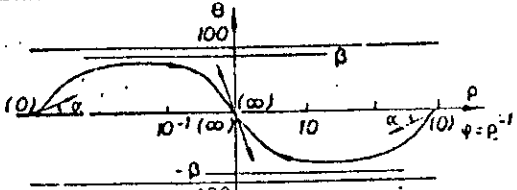
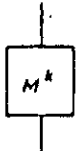
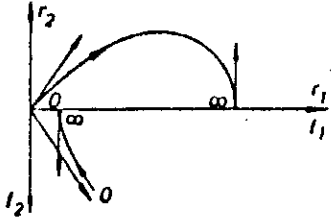
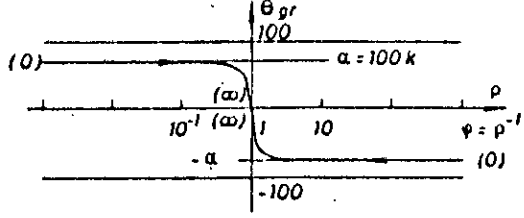

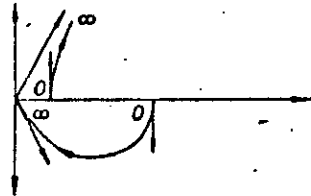
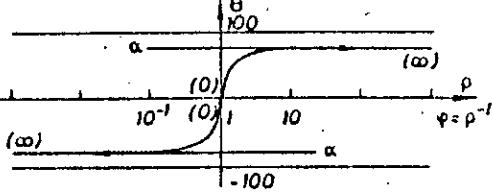
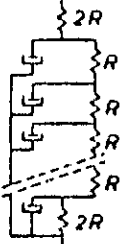
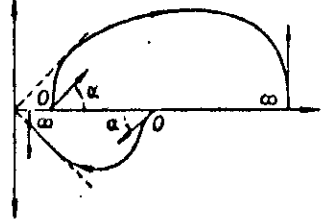
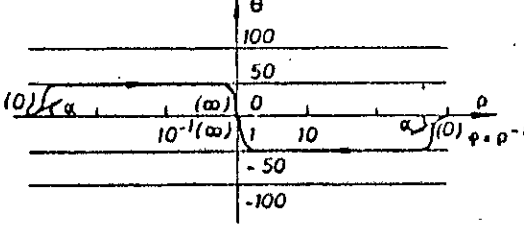
| Idéogramme  | Espace de Cole et Cole  | Espace de Bode  |
|---|---|---|
| <p>a)</p>    |    |    |
| <p>b)</p>    |    |    |
| <p>c)</p>    |    |    |
| <p>d)</p>   |   |   |
| <p>e)</p>  |  |  |
| <p>f)</p>  |  |  |
| <p>g)</p>  |  |  |
| <p>h)</p>  |  |  |

TABLEAU III --- (Figures)

| Idéogramme   | Espace de Cole et Cole  | Espace de Black   |
|--|---|---|
| <p>a)</p>             |  |   |
| <p>b)</p>             |  |  |
| <p>c)</p>  <p>(N)</p> |  |  |

Il en résulte que les groupements série et parallèle de modèles de ce type contiennent comme cas particuliers des groupements série et parallèles de modèles mécaniques.

Le groupement en série des modèles paraboliques a pour module :

$$E^*(i\omega\tau) = \sum_{j=1}^n (i\omega\tau)^{-k_j} \quad A.8$$

$$0 < k_j < 1$$

Le comportement à l'origine ( $\omega=0$ ) est commandé par l'élément correspondant à  $k_j$  maximal, et le comportement à l'infini ( $\omega=\infty$ ) est commandé par l'élément correspondant à  $k_j$  minimal.

Au contraire, le groupement en parallèle de modèles paraboliques de degrés différents a pour module :

$$E^*(i\omega\tau) = \sum_{j=1}^n (i\omega\tau)^{k_j} \quad A.9$$

$$0 < k_j \leq 1$$

Il en résulte que le comportement à l'origine est commandé par l'élément correspondant à  $k_j$  minimal, et le comportement à l'infini est commandé par l'élément correspondant à  $k_j$  maximal.

## 2.-DETERMINATION DES DIFFERENTES FONCTIONS CARACTERISTIQUES:

Les différentes fonctions caractéristiques ( module et complaisance complexes, fonctions fluage et relaxation, spectre

fluage et relaxation) sont liés entre elles par des relations mathématiques, faisant intervenir la transformation de Fourier, de Laplace ou l'intégrale de Stieltjes.

Théoriquement, la connaissance de l'une de ces fonctions permet de déterminer toutes les autres.

En général, ces calculs ne sont pas faciles à effectuer même lorsqu'on connaît l'expression analytique de la fonction.

On a recours, par conséquent, à des méthodes d'approximations sur des valeurs expérimentales.

### 2.1.- DETERMINATION DU SPECTRE DE RELAXATION ET DE RETARDATION:

Le module complexe et ses composantes sont liés au spectre par les relations suivantes:

$$E_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\tau) \cdot \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} d\tau \quad A.10$$

$$E_2(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\tau) \cdot \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} d\tau \quad A.11$$

$$E^*(i\omega) = i\omega \int_0^{\infty} e^{i\omega t} dt \int_0^{\infty} H(\tau) e^{-\tau/t} dt \quad A.12$$

L'expression (A.12) se transforme grâce à une étude analytique faite par FUOSS et KIRKWOOD, sur les diélectriques et adaptée par GROSS pour les corps viscoélastiques en une expression analytique de la forme :

$$H(\tau) \Big|_{\tau=\frac{1}{\omega}} = \frac{1}{\pi} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} [E^*(-\omega \pm i\epsilon)] \quad A.13$$

Ce calcul est encore très compliqué. La méthode de seconde approximation est due à FERRY et COLE. En admettant que  $H(\tau)$  peut se mettre sous la forme  $A \cdot \tau^{-m}$  dans un petit intervalle de  $\tau$   $|m| < 1$ , FERRY trouve pour, l'expression du spectre :

$$H(\tau) \Big|_{\tau = \frac{1}{\omega}} = A E_1 \cdot \frac{d \log E_1}{d \log \omega} \quad A.14$$

ou ;

$$H(\tau) \Big|_{\tau = \frac{1}{\omega}} = B E_2 \left\{ 1 - \frac{d \log E_2}{d \log \omega} \right\} \quad A.15$$

$$\text{ou } A = \frac{(2-m)}{2 \Gamma(2 - \frac{m}{2}) \cdot \Gamma(1 + \frac{m}{2})} \quad A.16$$

$$B = \frac{(1+|m|)}{2 \Gamma(\frac{3}{2} - \frac{|m|}{2}) \cdot \Gamma(\frac{3}{2} + \frac{|m|}{2})} \quad A.17$$

Avec ;

-  $m$  : est le coefficient angulaire de la tangente à la courbe  $\log H(\tau) = f(\log(\tau))$  obtenue par une première approximation (la première approximation s'obtient en faisant  $A=B=1$  dans les expressions (A.14) et (A.15) ;

-  $\Gamma$  : est la fonction d'EULER.

Un calcul approché, dû à MIMOMYA et FERRY, des expressions (A.14) et (A.15) permet de calculer  $H(\tau)$  à partir de  $E_1$  et  $E_2$  :

$$H(\tau) = \frac{E_1(a\omega) - E_1(\frac{\omega}{a})}{2 \log a} - \frac{a^2}{(a^2-1)^2} \cdot \frac{E_1(a^2\omega) - E_1(\frac{\omega}{a}) - 2E_1(a\omega) - 2E_2(\frac{\omega}{a})}{2 \log a} \quad A.18$$

et

$$H(\tau) = \frac{2}{\pi} \left\{ E_2(\omega) - \frac{a}{(a-1)^2} (E_2(a\omega) + E_2(\frac{\omega}{a}) - 2E_2(\omega)) \right\} \Big|_{\substack{1=\tau \\ \omega}} \quad A.19$$

Au moyen d'une approximation due à FERRY, le spectre de retardation peut être à celui de relaxation et aux composantes du module par la relation :

$$L(\tau) = \frac{H(\tau)}{\left\{ E_1\left(\frac{1}{\tau}\right) - E_2\left(\frac{1}{\tau}\right) + 1,37 H(\tau) \right\}^2} + \pi^2 H^*(\tau) \quad \text{A.20}$$

La figure (2) rend compte de ce calcul.

## 2.2.- DETERMINATION DE LA FONCTION RELAXATION ET FLUAGE:

La fonction de relaxation  $R(t)$  est liée aux fonctions  $H(\tau)$  et  $E^*(i\omega)$  par la relation suivante :

On sait que l'image de la fonction fluage est l'inverse de l'image de celle de la relaxation dans la transformation de CARSON.

Dans le cas où la fonction fluage ou celle de la relaxation peuvent se mettre sous la forme  $A.t^m$  ( $|m| < 1$ ), cela se traduit par la relation :

$$E_1(\omega) - R(t) \Big|_{t=\frac{1}{\omega}} = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} - e^{-\frac{1}{\omega \tau}} \right] H(\tau) d\tau \quad \text{A.21}$$

Il suffit donc de calculer numériquement  $F(t)$  à partir de  $R(t)$  ou inversement.

Il est possible de déterminer l'expression exacte de la fonction fluage à partir de l'expression analytique de la

complaisance, si l'on peut trouver l'originale de l'expression de la complaisance ou on remplace  $(i\omega)$  par  $p$ .

L'expression de la complaisance pour un modèle biparabolique s'écrit :

$$J^*(i\omega) = \frac{1 + S(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}{E_{\infty}} \quad A.22$$

D'où ;

$$F(p) = \frac{1 + Ap^{-k} + Bp^{-h}}{E_{\infty}} \quad A.23$$

L'originale de cette expression sera calculée par la formule d'inversion de MELLIN-FOURIER.

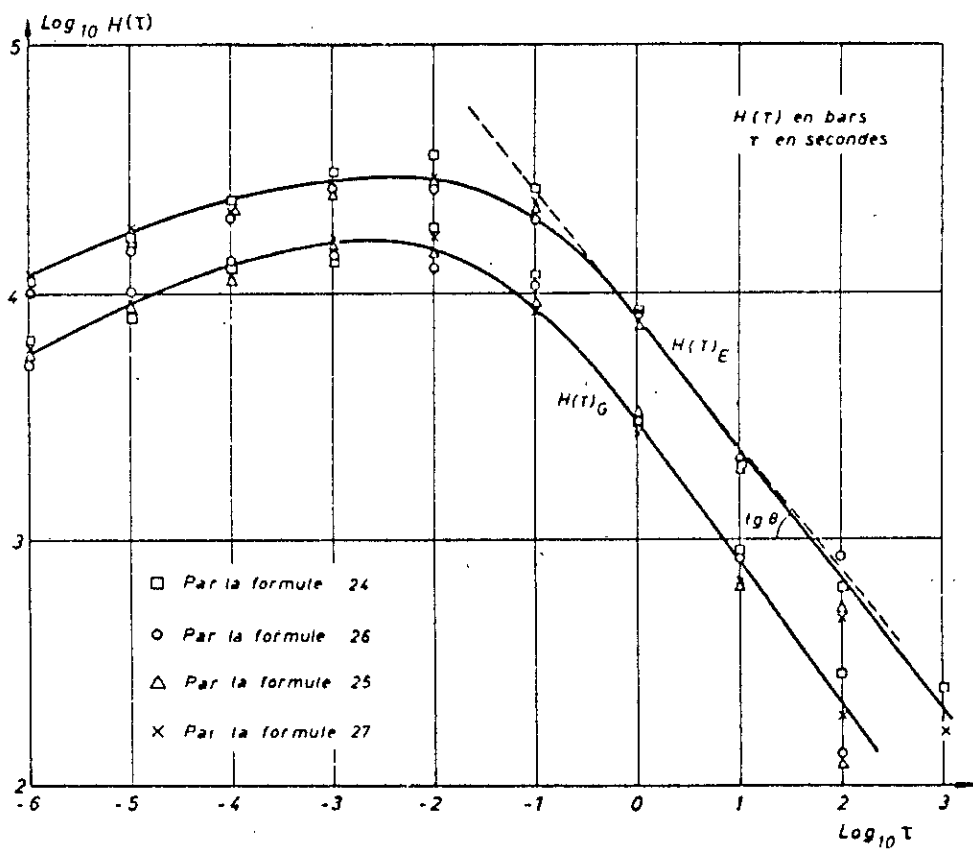


Fig. 4. Spectres de relaxation à  $T_c = -15^\circ C$  obtenus à partir des essais dynamiques par les formules (24), (25), (26), (27) Béton Le Mans

NOTA. - En pointillés, la droite de pente  $-\frac{1}{2}$  correspondant à la théorie de Bousc



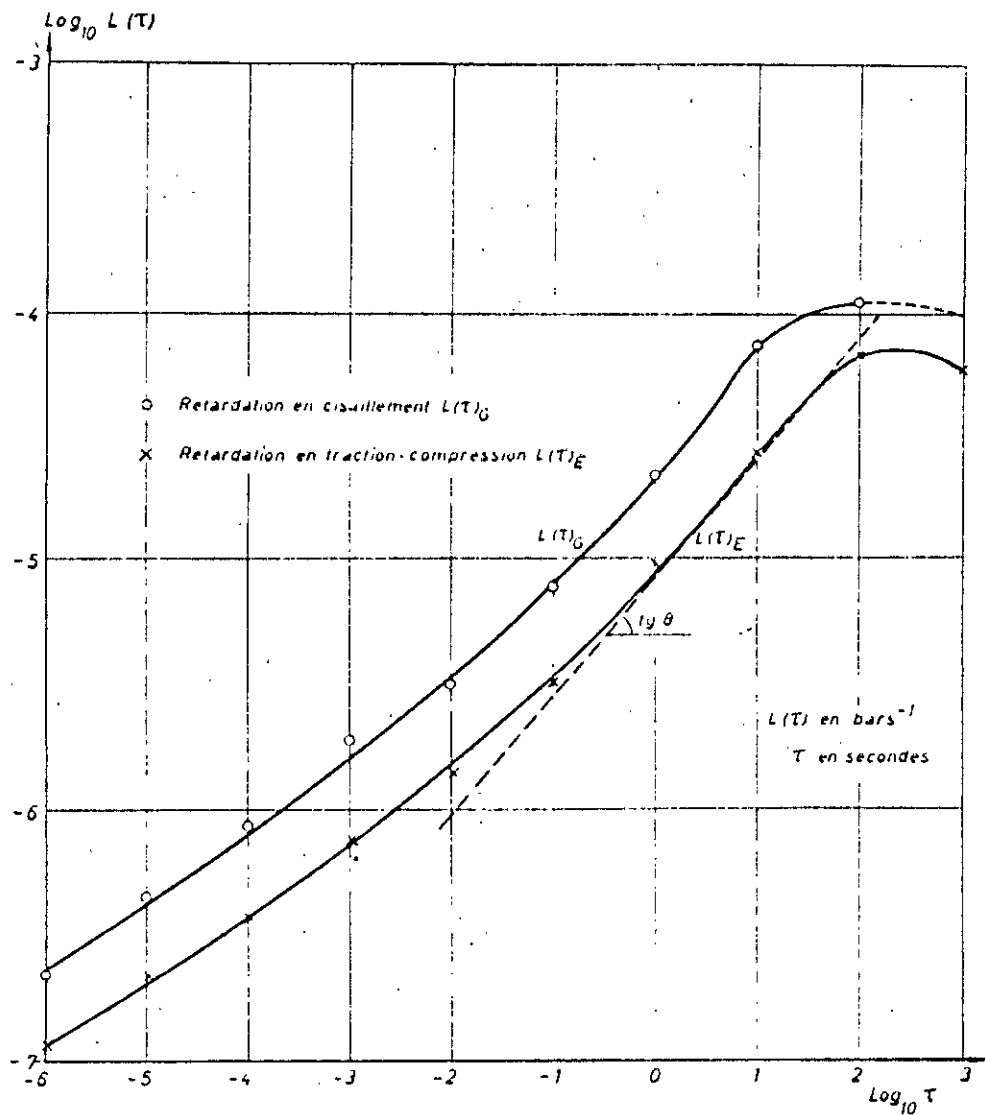


Fig. 2. — Spectres de retardation à  $T_s = 15^\circ \text{C}$  obtenus à partir des essais dynamiques par la formule (20)  
Béton Le Mans

Nota. — En pointillés, la droite de pente  $\frac{1}{2}$  correspondant à la théorie de Rouse

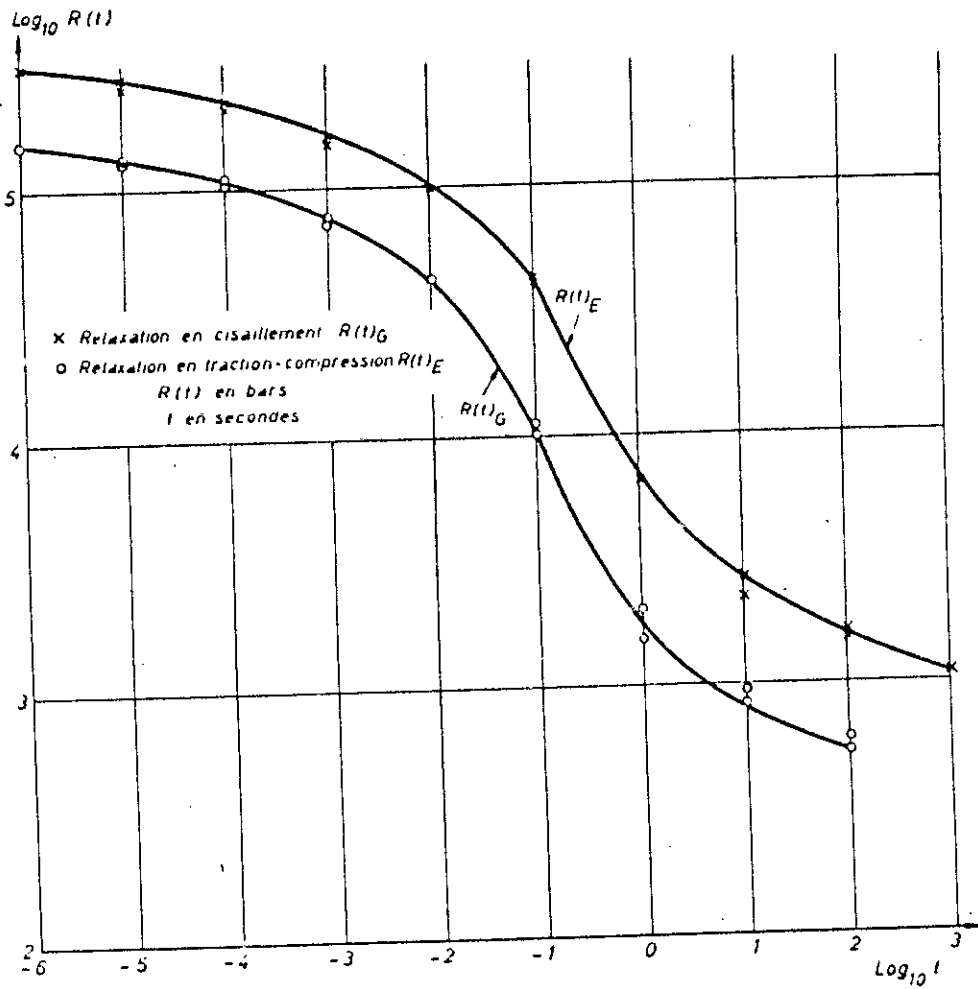


Fig. 3. Fonctions de retardation à  $T_s = 15^\circ\text{C}$  obtenues à partir des essais dynamiques par les formules (32) et (33)   
 A. Béton Le Mans

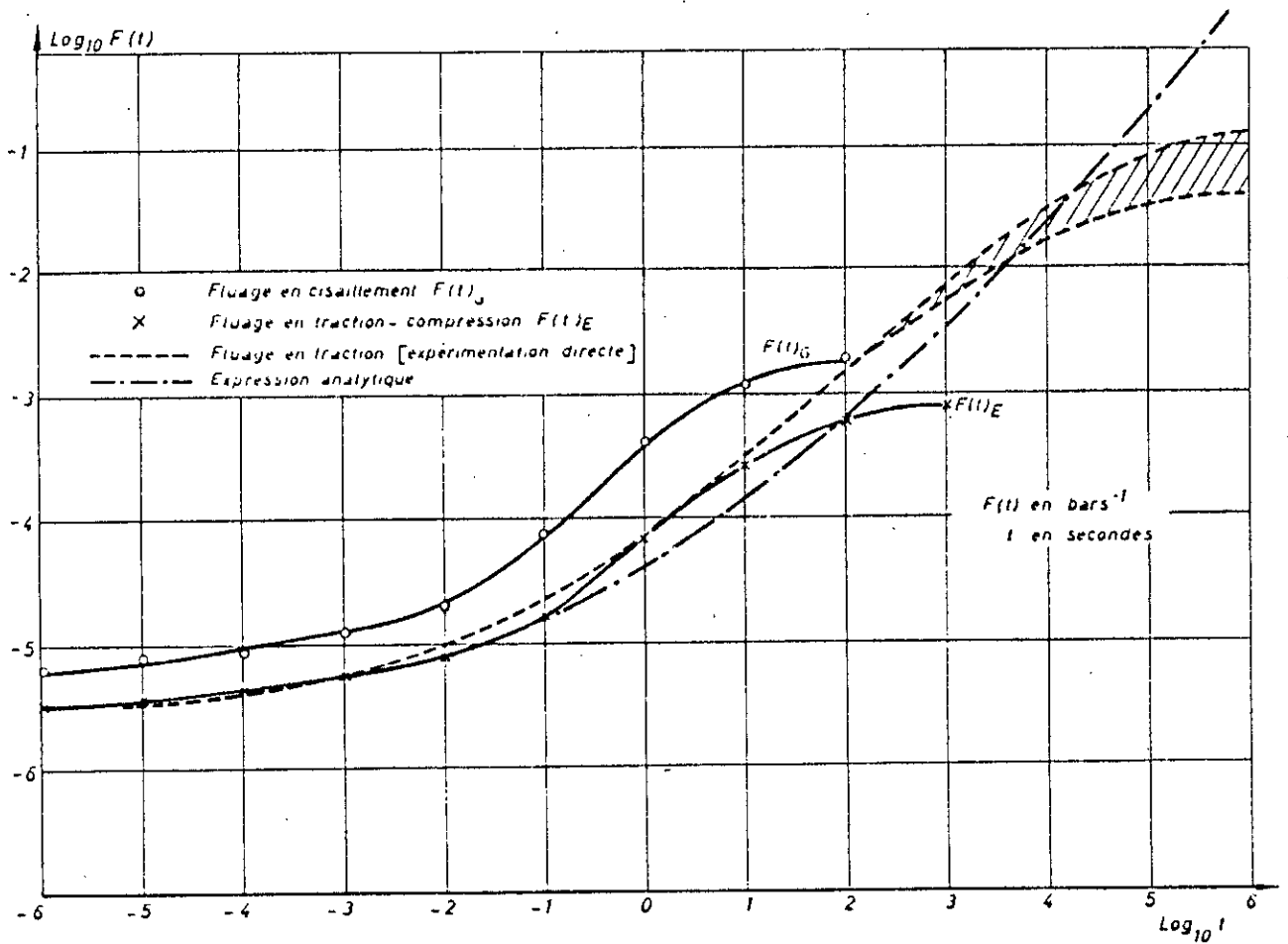


Fig. 4. - Fonctions de fluage à  $T_a = 15^\circ \text{C}$  obtenues à partir des essais dynamiques par la formule (34)  
 Béton Le Mans

## BIBLIOGRAPHIE

1-ANTRI, B. et BENDJOUADI, M-S. Comportement mécanique des enrobés hydrocarbonés dans une chaussée. Thèse d'ingénieur d'état: ECOLE NATIONALA POLYTECHNIQUE, 1987.

2-BAROUX, R. MONEROS, P. ET PERES, P. Fabrication des enrobés. Analyse des paramètres de réglage et de conception des des centrales sur les qualités des enrobés. Bull. liaison labo. p. et ch., 1991, N° 173, p. 27-44.

3-BALLIE, M. DELORME, J-P. MOUTIER, F. ET HIERNAUX, R. Formulation des enrobés. Formulation des essais à la preese de cisaillement giratoire. Bull. liaison labo. p. et ch., 1990, N° 170, p. 13-21

4-BONNOT, J. et PEREZ, F. Matériaux bitumineux spéciaux. Bull. liaison labo. p. et ch., 1986, N° 144, p. 65-89.

5-BRULE, B. Bitumes et normalisation. Bull. liaison labo. p. et ch., 1987, N° 148, p. 61-69.

6-CORNIL, P. Détermination du module complexe et essais de fatigue en flexion alternée des éprouvettes de matériaux hydrocarbonés encastrées à une extrémité. Rapp. rech., CRR Bruxelles, 1968.

7-DAEVE, F. Manuel de rhéologie des géomatériaux. Presse de l'école Nationale des ponts et chaussées, Paris, 1987, 397 p.

8-DURIEZ, M. Les revêtements noirs et les divers enrobés. Revue générale de routes et aérodromes, 1969, N° 439, p. 71-77.

9-DURIEZ, M. et ARRAMBIDE, J. Nouveau traité de matériaux de construction. Tome 3. Dunod. Paris, 1962, 1531 p.

10-FRANCKEN, L. Module complexe des enrobés bitumineux. Bull. liaison labo. p. et ch., 1975, Spécial 5, p. 181-198.

11-GRIMAU, J-P. Vers une nouvelle méthodologie d'étude des enrobés bitumineux. Bull. liaison labo. p. et ch., 1979, N° 104, p. 21-31

12-HEUKELOM, W. Abaque expérimentale décrivant le comportement mécanique des bitumes en fonction de la température. Revue générale de routes et aérodromes, 1970, N° 454, p. 64-70

13-HEUKELOM, W. Une méthode améliorée de caractérisation des bitumes par leurs propriétés mécaniques. Bull. liaison labo. p. et ch., 1975, N° 76, p. 55-64

14-HILLS, J-F. et HAEUKELOM, W. Module et coefficient de Poisson des enrobés bitumineux. Revue générale de routes et aérodromes, 1968, N° 448, p. 118-127

15-HUET, C. Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés. Thèse de Docteur-ingénieur: Université de Paris 6, 1977

16-MALLOUK, J-G. Les enrobés bitumineux. Tome 1. Modulo, 1982. 221 p.

17-MALLOUK, J-G. les enrobés bitumineux. Tome 2. Modulo, 1982.  
207 p.

18-MOREAUD, H. Module complexe des enrobés à grosse granulométrie et des systèmes multicouches. Revue générale de routes et aérodrômes, 1970, N° 453, p. 68-78

19-MOUTIER, F. Bitumes et enrobés bitumineux, étude statique de l'effet de la composition des enrobés bitumineux sur leur comportement en fatigue et leur module complexe. Bull. liaison labo. p. et ch., 1991, N° 172, p. 33-43

20-PIAU, J-M. Modélisation thermomécanique du comportement des enrobés bitumineux. Bull. liaison labo. p. et ch., 1989, N° 163, p. 41-54

21-PREVOST, E. Le bitume: construction, caractéristiques, fabrication, transport et aspects économiques. Revue générale de routes et aérodrômes, 1977, N° 536

22-RAMOND, J. PASTOR, M. et BRULE, B. Relation entre le comportement rhéologique des bitumes routiers et leurs caractérisation par chromatographies sur gel perméable. Bull. liaison labo. p. et ch., 1986, N° 142, p. 113-118

23-SAUNIER, J. Contribution à l'étude des propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux. Thèse de Doctorat: Faculté des sciences de l'université de Paris, 1968

24-SAYEGH,G.Variation des modules de quelques bitumes purs et bétons bitumineux.Cah. group. fr. rhéol.,Tome 1-2,Avril 1966, p.51

25-SAYEGH,G.Détermination des propriétés viscoélastiques des bétons bitumineux par vibrations longitudinales.Cah. group. fr. rhéol.,Tome 2, janvier 1969,107 p.

26-UGE,P. GEST,G. GRAVOIS,A. et BONNAURE,F. Module complexe des enrobés bitumineux:Nouvelle méthode de calcul.Bull liaison labo. p. et ch.,spécial 5,1975,P.141-156

27-VAN DER POEL,C.On the rheology of concentrated dispersion.Rheol. acta. band 1,N°2-3,1958,198 p.

28-VERSTRAETEN,J.Loi de fatigue en flexion des mélanges bitumineux.Bull. liaison labo. p. et ch.,1970,N°74,p.141-156

29-RAYMOND,P. et SUCH,C.Bitumes et bitumes modifiés: Relations structures,propriétés,composition.Bull. liaison labo. p. et ch.,1990,N°168,p.65-87