

CANQ  
TR  
GE  
SM  
145

ETUDE COMPARATIVE EN LABORATOIRE  
DE MELANGES BITUMINEUX AVEC OU SANS  
MODIFICATION DU LIANT PAR L'ADDITION  
DE POLYMERES.

925719

6.2.4.3

bitume polymère

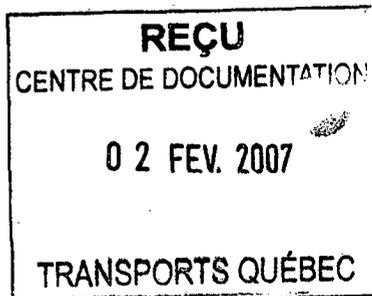
ETUDE COMPARATIVE EN LABORATOIRE DE MELANGES  
BITUMINEUX AVEC OU SANS MODIFICATION DU LIANT  
PAR L'ADDITION DE POLYMERES

Jean-Claude Moreux, chim. Ph.D.  
Responsable section mélanges bitumineux  
Laboratoire Central  
2700, rue Einstein  
Sainte-Foy, Québec  
GIP 3W8

Richard Langlois, ing. M.Sc.  
Chef Division Granulats et Revêtements Bitumineux  
Laboratoire Central  
2700, rue Einstein  
Sainte-Foy, Québec  
GIP 3W8

Remerciements: Les auteurs remercient M. Jean Huppé pour son importante contribution à ce travail, M. Jacques Samson pour sa collaboration technique et M. Denis Proteau pour la réalisation des figures et des tableaux qui illustrent ce texte.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS  
CENTRE DE DOCUMENTATION  
330, CHEMIN SAINTE-FOY  
6<sup>e</sup> ÉTAGE  
QUÉBEC (QUÉBEC)  
G1S 4X9



#### ABSTRACT

During the summer of 1987, the Quebec Ministry of Transportation placed a bituminous test overlay on the highway of the north shore of the St-Lawrence river, between Montreal and Quebec City. The test overlay consists in 5 sections: in the surface course of 4 sections, the asphalt cement was modified by addition of four different polymers, a the fifth section was made using the asphalt cement unmodified.

Two kinds of samples were used in the study:

- Marshall briquettes compacted from the mix coming out of the drum mix, from asphalt plant (laboratory samples)
- Cores taken from the test overlay during the fall of the following year (highway samples).

Basically, the only difference existing between the two kinds of samples was the type of compaction. Thus, the binder is the principal factor affecting the behavior of the mix.

The rutting susceptibility and transverse cracking susceptibility was estimated by performing the Marshall stability test, the brasilian test, the Hveem stability test, and the measurement of the apparent viscosity of the mix. The contribution of modified asphalt cements to the rutting and the cracking was estimated by performing thermal susceptibility measurements, chemical analysis, and the determination of the stiffness modulus at low and high temperatures determined by indirect method of McLeod (9).

The evaluation of the mixes done in this study shows that polymer modified cements trend to increase the quality of the mixes at the extreme temperatures of utilization.

#### RESUME

Au cours de l'été 1987, le Ministère des Transports du Québec, a effectué la pose d'une planche d'essai sur l'autoroute de la rive nord du St-Laurent entre Montréal et Québec. Cette planche comporte 5 sections: 4 sont constituées d'un revêtement dont les liants sont des bitumes polymères et une section est constituée par un revêtement conventionnel (section témoin).

A partir du mélange compacté en usine, directement à la sortie du poste de malaxage, et de carottes prélevées sur la chaussée de l'autoroute à l'automne de l'année suivante, on a entrepris l'étude en laboratoire de ces deux types d'échantillons.

Les échantillons de laboratoire diffèrent des échantillons de l'autoroute essentiellement par le mode de compactage. Ainsi, le liant contribue de façon prépondérante sinon unique, au comportement observé lors de l'exécution des essais.

Les susceptibilités à l'orniérage et à la fissuration ont été évaluées par les essais de stabilité Marshall, de stabilité Hveem, par l'essai brésilien et la mesure de la viscosité apparente des mélanges de laboratoire. La qualité des liants résiduels a été évaluée quant leur susceptibilité thermique, leur composition chimique et leur module de rigidité à basse température et à 60°C pour la méthode indirecte de McLeod (9).

Il ressort de cette étude que la présence de bitumes polymères dans les enrobés a tendance à améliorer leurs qualités aux températures extrêmes d'utilisation.

CANQ  
TR  
GE  
SM  
145

## 1.0 INTRODUCTION

Le bitume est un composé thermoplastique qui est très sensible à la température. Il présente aussi l'inconvénient de devenir mou et déformable à la chaleur, alors qu'il est dur et cassant au froid. ---

Dans un enrobé bitumineux, à basse température, le bitume aura tendance à se rompre sous l'action des charges de la circulation, et à provoquer des problèmes de fissuration au niveau du revêtement. Cette détérioration s'aggravera par la surimposition du phénomène de retrait thermique. A une température chaude, l'action des charges de la circulation aura tendance à produire dans le revêtement des déformations permanentes par fluage: c'est le phénomène d'orniérage. Entre ces deux extrêmes, le comportement du bitume convient bien aux usages auxquels on le destine en technologie routière.

La modification d'un liant par un additif doit normalement se traduire par une amélioration des propriétés de ce produit et de ses performances. La formulation d'un additif parfait est difficilement réalisable. En effet, un additif qui aurait pour effet de minimiser l'orniérage, par exemple, en augmentant la stabilité du revêtement, risque d'augmenter les possibilités de fissuration par une diminution de la flexibilité de la chaussée.

Théoriquement, un bon additif devrait contrôler orniérage et fissuration; s'il abaisse la susceptibilité thermique du liant, il devrait aussi pouvoir contrôler le vieillissement du liant et empêcher le désenrobage du mélange causé par le déplacement du bitume par l'eau. Enfin, un bon additif devrait être compatible avec tous les bitumes.

Les premiers additifs agissant favorablement aux températures extrêmes d'utilisation des bitumes ont été des polymères naturels: les latex. Plus récemment, des polymères synthétiques thermoplastiques (1) (2) (3) (4) ont élargi la panoplie de ces produits: les copolymères de styrène-butadiène, le styrène-butadiène-caoutchouc, les caoutchoucs butyles, le polychloroprène, les polyéthylènes, les co-polymères d'éthylène et d'acétate de vinyle (EVA), etc. Tous ont été utilisés et expérimentés sur la chaussée.

Les bitumes modifiés par ces élastomères résultent de la combinaison des deux constituants par simple mélange physique sous forme de dispersion, ou bien par polymérisation avec greffage chimique. La notion de compatibilité est importante, car tous les bitumes ne peuvent pas servir de base à tous les additifs. Un bitume-polymère est, en fait, un mélange biphasique composé par une phase polymère gonflée (1) par certaines huiles du bitume et une phase bitume contenant les autres constituants n'intervenant pas dans le gonflement. La compatibilité dépend de la structure physico-chimique de l'élastomère, de la composition chimique du bitume, et des conditions de préparation du bitume-polymère. Dans les cas de non compatibilité, on observera une séparation par décantation partielle du polymère.

Le Ministère des Transports, à la fin de l'été 1987, a mis en place sur l'autoroute de la rive nord (autoroute 40) une planche d'essai dont le revêtement a été divisé en plusieurs sections. Chaque section était constituée de bitumes modifiés par des élastomères. La figure 1, montre la localisation de cette planche d'essai: elle comporte cinq sections dont la longueur est de 1 km environ.

Il y a une section témoin ou aucun polymère n'a été ajouté au bitume et quatre sections dont les agents modifiants sont: un copolymère styrène-butadiène greffé chimiquement (Styrelf), deux sections avec un latex (Polysar et Ultrapave) et un copolymère styrène-butadiène (Kraton) en dispersion dans le bitume. Cet exposé comparera les propriétés de ces mélanges modifiés en utilisant des éprouvettes compactées à l'usine. On établira par rapport à un mélange conventionnel une comparaison avec les propriétés du revêtement posé sur l'autoroute.

## 2.0 MATERIELS ET METHODES

### 2.1 Caractéristiques des enrobés

Les enrobés qui recouvrent la planche d'essai sont localisés sur cinq sections qui diffèrent par la nature de l'ajout qui a été introduit dans le liant. Le revêtement conventionnel et les revêtements contenant des liants polymères servent de couche de roulement dont l'épaisseur moyenne est de 35 mm: ce revêtement a été posé après planage de la chaussée antérieure des sections A et B de la figure 1. Les détériorations observées sur la chaussée, à cet endroit, consistaient principalement en des problèmes de fissuration et d'ondulation du revêtement de surface. Un examen visuel de la chaussée nouvellement revêtue, au cours de l'automne 1988, a laissé voir quelques fissures, en nombre variable suivant les sections, mais aucune trace d'orniérage.

Le tableau 1, décrit les granulométries moyennes obtenues après le prélèvement en chantier des échantillons de contrôle et après compactage en usine des éprouvettes de laboratoire. Les deux analyses ont été faites à partir d'éprouvettes compactées suivant la méthode Marshall. Les éprouvettes de contrôle provenant du mélange échantillonné en chantier ont été fabriquées au laboratoire de contrôle et, les autres à l'usine (appelés ci-dessous éprouvettes de laboratoire). Les opérateurs et les instruments utilisés étaient différents dans ces deux cas.

Etant donné les facteurs de variabilité intervenant dans la confection des échantillons, on observe des différences dans les granulométries obtenues. La granulométrie caractérisant les éprouvettes de laboratoire traduit une fragmentation des granulats plus importante que celle ayant eu lieu au laboratoire de contrôle. L'écart par rapport aux exigences existant au niveau du tamis de 10 mm peut être attribué à une fragmentation plus sévère des granulats de gros calibre. Avec ces réserves, les deux granulométries sont suffisamment comparables pour l'étude qui est envisagée. Les valeurs des

pourcentages s'insèrent dans le fuseau des spécifications d'un enrobé de surface de type MB4, au sens du cahier des charges du Gouvernement du Québec. Les granulats utilisés sont constitués principalement de calcaire dur et, en moindre quantité, de calcaire schisteux; quant au sable il est granitique.

Les bitumes modifiés qui ont servi à la fabrication des enrobés de base appartiennent à la classe de pénétration 85-100. La teneur en bitume est comprise entre 5 et 6% par rapport à la masse de l'enrobé. La détermination exacte de la teneur en bitume est un problème difficile surtout dans le cas où l'élastomère forme un mélange biphasique avec un bitume compatible. L'extraction et la mesure de la teneur en bitume sont effectuées selon les normes NQ 2300-100 et NQ 2300-110. La mesure de la teneur en bitume est basée sur une méthode volumétrique qui ne fait pas de discrimination entre l'additif et le polymère, et celui-ci est donc compté comme du bitume.

Le trichloroéthylène extrait à peu près complètement les élastomères SBS (cas du liant Kraton) (5). L'extraction au trichloroéthylène des bitumes modifiés par des latex n'est pas aussi efficace: une certaine quantité d'élastomère reste fixée au niveau des granulats. Ce problème est particulièrement évident dans le cas du bitume de Polysar où là, d'importantes quantités de latex adhèrent aux particules fines du squelette minéral de l'enrobé. Il est possible que la dispersion du polymère dans le bitume soit en partie responsable de ce phénomène, et résulterait du mode de préparation du liant.

Des essais d'extraction ultérieurs, où du chloroforme, ou bien du tétrahydrofurane ont été utilisés comme solvants à la place du trichloroéthylène, montrent, que d'avantage de polymère se trouve entraîné, comme le prouve l'augmentation de la concentration apparente en bitume.

Le problème, cependant, ne se pose pas, pour l'extraction du polymère du Styrelf puisque l'additif greffé chimiquement au bitume est entraîné avec son support bitumineux. Du point de vue du contrôle de qualité de ces liants, le problème posé est important et exigerait la mise en oeuvre de techniques plus complexes.

## 2.2 Les polymères d'ajout

Dans les enrobés confectionnés avec des liants fabriqués en usine (Styrelf et Kraton) intervient un bitume différent de celui entrant dans la composition de la section témoin. Le bitume des sections constituées d'enrobés modifiés avec du latex est le même que celui posé sur la section témoin.

### 2.2.1 Bitume Styrelf

Ce produit est commercialisé par Bitumar. Il s'agit d'un bitume contenant un co-polymère styrène-butadiène (SBS) greffé chimiquement de façon irréversible sur la matrice du bitume au niveau des sites les plus réactifs. La préparation de ce liant est faite en usine et livré prêt pour usage immédiat.

#### 2.2.2 Bitume avec ajout de latex Polysar

Ce polymère est commercialisé par BASF (Polysar): il est constitué d'un latex (SBR) qui est ajouté au bitume directement au niveau du malaxage lors de la fabrication de l'enrobé. Les teneurs en polymère sont comprises entre 3 et 5% par rapport à la masse du liant.

#### 2.2.3 Bitume avec ajout de latex Ultrapave

Le polymère Ultrapave est un produit commercialisé par Textile Rubber and Chemical Co. Le latex est une émulsion qu'on introduit dans le bitume avant le malaxage au moment de la fabrication de l'enrobé. La teneur en polymère est située au voisinage de 3% par rapport à la masse du liant.

#### 2.2.4 Bitume avec polymère Kraton

Le polymère est un copolymère styrène-butadiène produit commercialement par la compagnie Shell. Le polymère est incorporé dans le bitume en usine. Cette opération a été effectuée par Sébec (St-Hyacinthe). La teneur en polymère est égale à 6% par rapport à la masse totale du liant.

### 2.3 Les éprouvettes d'essai

#### 2.3.1 Les éprouvettes d'essai en laboratoire

Les éprouvettes utilisées au cours de cette étude sont fabriquées à la centrale d'enrobage. Le matériel est prélevé à la sortie du malaxeur et compacté selon la méthode Marshall (NQ 2300-020). Le diamètre des éprouvettes est égale à 101,6 mm et leur hauteur est comprise entre 62 et 63 mm. Trois types d'éprouvette ont été fabriquées: une série compactée avec 20 coups de marteau sur chaque face, une seconde compactée avec 40 coups et une troisième compactée avec 60 coups.

#### 2.3.2 Eprouvettes carottées sur l'autoroute

Cinq carottes ont été prélevées sur chaque section de la planche d'essai. Les carottes originales, ayant un diamètre de 152 mm, ont été sciées au laboratoire de façon à obtenir des éprouvettes cylindriques verticales de 101,6 mm de diamètre.

### 2.4 Essais physiques pratiqués sur les éprouvettes

On a soumis à quatre essais physiques les éprouvettes de laboratoire et à deux essais les échantillons routiers. Les essais des éprouvettes de laboratoire ont été exécutés en double (sauf pour l'essai de viscosité des mélanges): sur un lot, l'essai est effectué sans trempage, et sur un second lot semblable, le même essai est effectué après trempage dans l'eau. Les deux lots d'éprouvettes ont des densités brutes et des pourcentages de vides moyens aussi proches que possible afin de pouvoir établir des comparaisons entre les résultats sans trempage et après trempage.

Les éprouvettes provenant des carottes prélevées sur la route n'ont pas été soumises à l'essai de trempage.

#### 2.4.1 Mode de trempage des éprouvettes

Les échantillons soumis à l'essai de trempage sont placés sous vide à une pression résiduelle de 4 kPa. On laisse séjourner les éprouvettes 30 minutes, puis on les immerge durant 60 minutes dans de l'eau portée à la température de 60°C, sans interrompre le vide. Les éprouvettes sont ensuite transférées, dans un bain d'eau à 60°C, sans les faire entrer en contact avec l'air; on les y laisse séjourner durant 24 h. Cet essai est une variante de l'essai de Lottman (6).

#### 2.4.2 Stabilité Marshall et déformation

L'essai est exécuté selon la norme NQ 2300-060 sur les trois groupes d'échantillons de laboratoire. Les éprouvettes provenant du revêtement routier n'ont pas été soumises à cet essai.

#### 2.4.3 Essai de traction indirecte (essai Brésilien)

L'essai est exécuté selon la norme ASTM C 496. On mesure la force de tension à la rupture de l'éprouvette. Cet essai est effectué à 0°C et la vitesse de chargement de la presse est ajustée à 50 mm par minute. Les échantillons de laboratoire compactés à 60 coups de marteau et les échantillons routiers ont été utilisés pour cet essai.

#### 2.4.4 Essai triaxial de HVEEM

L'essai a été exécuté selon la norme ASTM 1560 à 60°C. Le pourcentage de stabilité a été calculée pour les échantillons de laboratoire compactés à 60 coups de marteau et les échantillons routiers.

#### 2.4.5 Essai de densité brute et de densité maximale

Ces essais sont pratiqués selon les normes NQ 2300-040 (densité brute) et NQ 2300-045 pour la densité maximale: dans cette détermination, on utilise la méthode pycnométrique.

#### 2.4.6 Module d'élasticité (7)

En plus des paramètres physiques tirés directement des essais, les mélanges étudiés ont été caractérisés par le module d'élasticité combinant stabilité et déformation.

Le rapport de la contrainte sur la déformation relative de l'échantillon donne le module d'élasticité E (au sens d'Young). Si on tient compte des unités, et si on considère une éprouvette ayant un diamètre de 101,6 mm, on obtient:

$$E = 15,748 \text{ (stabilité/déformation)}$$

E sera exprimé en MPa, si la stabilité est exprimée en kN et la déformation en mm.

#### 2.4.7 Viscosité apparente des éprouvettes d'enrobé bitumineux

L'appareil utilisé a été conçu et construit au laboratoire. Après compactage l'échantillon est placé entre les mâchoires d'un appareil de mesure de la tension par traction indirecte. La charge statique est constituée de poids et elle est appliquée verticalement. La mesure de la déformation latérale de l'éprouvette est mesurée par des capteurs de déplacement (LVDT). Les mesures de déformation moyennes en fonction du temps sont enregistrées et traitées par un système d'acquisition de données.

La viscosité apparente du mélange est donnée par le rapport de la contrainte appliquée sur l'éprouvette sur sa vitesse de déformation relative. Pratiquement, on applique la formule:

$$\eta = (F/f.e) \Delta t$$

où

F = force statique appliquée (en N)  
e = épaisseur de l'éprouvette (en m)  
f = déformation latérale de l'éprouvette (en m)  
 $\Delta t$  = intervalle de temps correspondant à la déformation (en s)  
 $\eta$  = viscosité apparente en Pa.s.

#### 2.5 Bitumes récupérés des éprouvettes

Les bitumes originaux ne sont pas disponibles. Les essais seront donc pratiqués principalement sur les bitumes récupérés des éprouvettes.

##### 2.5.1 Récupération du bitume (8)

Le bitume des éprouvettes est extrait à froid par le trichloroéthylène. La solution de bitume est distillée sous vide partiel en atmosphère d'azote en utilisant un évaporateur rotatif Buchi (Modèle R-110).

Le volume de la solution est préalablement réduit sous une pression résiduelle de 200 mm de mercure à une température de 50°C. Quand le volume de la solution atteint 200 ml, environ, la température est élevée rapidement à 140°C et le courant d'azote est interrompu. La pression résiduelle doit s'abaisser progressivement en dessous de 10 mm de mercure, et on attend 15 minutes dans ces conditions. Le montage est alors purgé par un fort courant d'azote et le bitume, ainsi récupéré, est versé dans une boîte à essais.

##### 2.5.2 Essais effectués sur les bitumes récupérés

###### 2.5.2.1 Essais normalisés

A partir des bitumes récupérés un certain nombre d'essais ont été exécutés suivant des méthodes normalisées: l'essai de pénétration (ASTM D 5), l'essai de viscosité absolue à 60°C (ASTM D 2170), l'essai de viscosité cinématique à 135°C (ASTM D 2171).

Ces résultats ont permis de calculer le PVN (9) des produits récupérés afin d'apprécier leur susceptibilité thermique et de déterminer leur module de rigidité. Ces informations ont été complétées par la mesure de la pénétration en fonction de la température.

#### 2.5.2.2 Mesure de la viscosité en fonction de la température

Le comportement du bitume à basse température constitue une information importante en technologie routière. Il est difficile d'atteindre directement les valeurs de viscosité par des méthodes classiques. L'utilisation du rhéomètre de Schweyer (10) (11), qui mesure la viscosité par écoulement forcé à travers un capillaire, permet la mesure de la viscosité du bitume à des températures aussi basses que -15 à -20°C dans des conditions expérimentales acceptables.

#### 2.5.2.3 Analyse chimique des bitumes provenant des éprouvettes de laboratoire

##### 2.5.2.3.1 Appareillage

Les chromatographies liquides à haute performance (HPLC) sont réalisées sur un appareil Waters. Il est composé d'un injecteur rhéodyne (Waters, modèle 7125), d'une pompe (Waters, modèle 590) développant une pression de 3500 kPa, environ, pendant le passage de l'échantillon. Les détecteurs sont constitués d'un réfractomètre différentiel (Waters, modèle 410), et d'un spectrophotomètre (Waters, modèle 490E) utilisé à 254 nm.

La colonne de séparation (Energy-Analysis- NH<sub>2</sub>) contient une phase stationnaire constituée de silice de porosité égale à 10 µm sur laquelle sont greffés des radicaux d'aminopropylsilane.

Les données obtenues par ce système sont traitées sur ordinateur à l'aide du logiciel Maxima 820.

##### 2.5.5.3.2 Préparation de l'échantillon

La méthode utilisée s'inspire de celle décrite par Dark et Mc Gough (12) ainsi que par Théroux et collaborateurs (13).

Un échantillon de 150mg de bitume récupéré d'éprouvettes est extrait à la température ambiante pendant 2 heures en présence d'un volume d'heptane (qualité HPLC) cinquante fois plus grand. Les asphaltènes insolubles sont récupérés après filtration sur une membrane de porosité égale à 0.45 µm. Après lavage du précipité à l'heptane, les maltènes récupérés sont dissous dans une solution ayant un volume de 10 ml. On injecte alors 20µl de cette solution.

Les fractions séparées sur le chromatogramme sont quantifiées par rapport à un bitume (Esso, classe 85-100) pris comme référence.

### 3.0 RESULTATS ET DISCUSSION

Les enrobés qui ont été fabriqués pour la planche d'essai sont composés de granulats identiques et la granulométrie, pour les cinq sections, est la même. Pour les éprouvettes de laboratoire, on a utilisé le compactage Marshall qui a été fait à l'usine. On évite ainsi le réchauffage des mélanges au laboratoire qui pourrait durcir le bitume et affecter les valeurs de stabilité (14).

De cette façon, le comportement des échantillons obtenus tant à l'usine que sur la chaussée de l'autoroute ne devrait avoir pour effet que traduire l'influence des liants modifiés entrant dans la composition des mélanges.

#### 3.1 Stabilité et module d'élasticité des éprouvettes de laboratoire

La norme NQ 2300-900 exige que le pourcentage de vide comblé par le bitume (VCB) vise un maximum de 75% pour une route à grande circulation ou une autoroute. La figure 2 représente la relation existant entre le VCB et le degré de compactage (nombre de coups) des mélanges. On constate que la norme est satisfaite après l'application de 31 coups de compactage pour les mélanges polymères Kraton, Polysar et le mélange témoin, Ultrapave et Styrelf exigent respectivement 50 coups, et 60 coups de compactage. Quand cette condition est satisfaite le pourcentage de vide du mélange est voisin de 4% (figure 3).

On a rassemblé les tableaux 2, 3 et 4 l'ensemble de ces résultats. Ces tableaux contiennent la stabilité sans trempage et après trempage, le module d'élasticité, sans trempage et après trempage, ainsi que les pourcentages de vide. Chacune de ces données correspondent à la moyenne des résultats de 3 échantillons. Les figures 4 et 5 sont une illustration des données figurant dans les trois premiers tableaux.

##### 3.1.1 Résistance à l'action de l'eau

La résistance à l'eau, mesurée par le pourcentage de la perte de stabilité ou de module, est un essai de vieillissement accéléré et de durabilité, mais c'est aussi, indirectement, un test de désenrobage du mélange par déplacement du liant par l'eau et une mesure de l'adhésivité liant-granulats.

Les figures 6 et 7, représentent respectivement le pourcentage de perte en stabilité et en module en fonction du degré de compactage: on observe que cette perte augmente avec le nombre de coups de compactage, exception faite du mélange bitume-polymère Kraton.

Ces observations sont assez déconcertantes, car on conçoit mieux que l'action de l'eau soit plus dévastatrice sur un mélange peu compacté que sur un mélange compacté. Le paramètre de déformation est sans influence importante, car ce phénomène s'observe aussi pour le module. L'influence du liant peut être difficilement mis en cause, car le mélange témoin présente la même tendance.

Le mode de trempage auquel ont été soumises les éprouvettes de laboratoire est sévère, si on considère que la saturation en eau des échantillons, sous vide, peut provoquer une expansion (15) du matériel. Cette sursaturation est donc capable d'affecter la structure des vides et induire un dommage permanent qui ne se produira pas dans des conditions normales.

Dans ce contexte, le mélange Kraton se comporte mieux que les autres enrobés, et cette propriété constitue un avantage pour ce mélange lui confèrent une stabilité et une résistance à l'action de l'eau supérieures à celle des autres mélanges.

### 3.1.2 Correction des valeurs de stabilité et de module d'élasticité

La teneur en vide des mélanges affecte la stabilité de façon directe. Il existe entre la stabilité et le pourcentage de vide une relation linéaire directe pour un mélange donné. (16) Si on trace pour chaque mélange une série de droites reliant stabilité et pourcentage de vide on obtient la figure 8. Si on veut des conditions optimales pour le VCB, on choisira, par interpolation, les valeurs de stabilité des mélanges pour une teneur en vide de 4%. La même démarche a été faite pour le module d'élasticité. Les données recueillies de cette façon permettent de dresser le tableau 5.

Après correction, l'examen des résultats du tableau 5 révèle que le mélange Kraton possède des valeurs de stabilité et de module supérieures à ceux des autres mélanges. Les résultats obtenus pour les autres mélanges sont peu différents et ils ne permettent pas une discrimination suffisante de leurs propriétés.

## 3.2 Essai de tension indirecte

### 3.2.1 Signification de l'essai

L'essai de tension indirecte à basse température et à vitesse de chargement rapide a déjà montré (17) que la force de tension des mélanges modifiés par des polymères est plus élevée que celle des mélanges témoins. Cette caractéristique peut être utilisée pour prédire une meilleure résistance à la fissuration causée par la circulation à basse température.

### 3.2.2 Mesure de la force de tension

Le tableau 6 contient les résultats obtenus par cette méthode. ST représente la force de tension mesurée à la rupture de l'échantillon. Les forces de tension mesurées sur les échantillons prélevés sur l'autoroute sont plus basses que celles mesurées sur les éprouvettes de laboratoire; cependant, les valeurs correspondantes sont en bon accord. Après trempage, on observe une perte importante de la force de tension initiale. Le meilleur comportement appartient au

mélange polymère Kraton. Ce résultat est prévisible, compte tenu de celui déjà obtenu lors de l'essai Marshall. Aucun des mélanges modifiés ne présente une force de tension notablement plus élevée que celle du témoin. Cette observation vaut pour les deux sortes d'échantillons (laboratoire et chantier).

### 3.2.3 Interpolation à 4% de vide

Afin de faciliter la comparaison des valeurs mesurées, celles-ci ont toutes été ramenées à un pourcentage de vide de 4% (tableau 7 et figure 9). Il est, maintenant, évident que tous les mélanges montrent une force de tension supérieure à celle du mélange témoin. La plus forte valeur est celle de Styrelf, les deux latex ont des valeurs intermédiaires. Kraton ne dépasse que peu celle du mélange témoin.

On peut donc conclure à la suite de cet essai que trois des mélanges modifiés auront une susceptibilité moindre à la fissuration sous l'action de la circulation à basse température. On se souviendra que c'était un des avantages recherchés lors de la pose de cette planche d'essai.

## 3.3 Essai Hveem

### 3.3.1 Signification de l'essai

L'essai Hveem est un essai triaxial dont la mesure peut permettre de prévoir l'importance relative d'une déformation permanente par déplacement latéral des granulats d'un mélange, mécanisme important dans l'installation de l'orniérage. Des stabilités élevées rendant les mélanges concernés moins orniérables.

### 3.3.2 Résultats expérimentaux

Pour les éprouvettes de laboratoire les stabilités des mélanges modifiés ne présentent pas de notables différences, sauf Ultrapave, qui a une stabilité inférieure à celle des autres mélanges modifiés. (Tableau 8).

On a corrigé (18) les valeurs de stabilité des carottes de l'autoroute pour les amener à une hauteur standard de 63,5 mm. Après correction, les stabilités des mélanges modifiés atteignent des valeurs extrêmement basses. Par contre, il est remarquable de constater que le mélange témoin possède une stabilité comparable à son homologue de laboratoire. La méthode de correction avait été établie à partir de mélanges conventionnels fabriqués en laboratoire. Il n'est donc pas impossible qu'avec des mélanges compactés en chantier cette procédure ne soit pas adéquate.

Les mélanges modifiés, mesurés à partir des éprouvettes de laboratoire, ont des stabilités voisines l'une de l'autre, et notablement plus élevées que celle du mélange témoin et celle du mélange Ultrapave. L'enrobé fabriqué avec le Kraton a la stabilité la plus élevée, devant Polysar et Styrelf. Les deux premiers satisfont à l'exigence de stabilité définie par Huber et Herman (19). Par contre, les exigences de vide de 4% ne sont pas satisfaites. Styrelf est le mélange qui se rapproche le plus de ces exigences, ce qui permet de lui attribuer la plus basse susceptibilité à l'orniérage.

### 3.4 Mesure de la viscosité des éprouvettes de laboratoire

La viscosité mesure la résistance au fluage de l'échantillon, c'est donc une mesure de sa capacité à résister à une sollicitation ayant, pour résultat, de le déformer. On peut donc prendre cet essai, comme un essai de susceptibilité à l'orniérage.

Les échantillons utilisés dans cet essai ont été préparés différemment de ceux précédemment étudiés. En effet, ici, l'enrobé a été prélevé sur le chantier et compacté au laboratoire. Les périodes de chauffage ont été réduites au minimum et tout le matériel a été traité de la même façon. Même si l'on doit s'attendre à un certain durcissement du bitume pendant la préparation des éprouvettes, les résultats seront comparables entre eux. Le tableau 9 résume les résultats obtenus dans ces conditions.

Les viscosités déterminées à 60°C diminuent considérablement par rapport à celles mesurées à 40°C. Le mélange modifié Kraton dépasse en viscosité les quatre autres échantillons aux deux températures de mesure et la viscosité perdue entre 40 et 60°C est celle qui est la plus faible.

Le mélange Polysar possède des propriétés rhéologiques qui le place derrière Kraton, mais assez loin, cependant.

Les mélanges témoins, Styrelf et Ultrapave atteignent à 60°C des valeurs de viscosité peut différentes. On observe cependant que la susceptibilité thermique du mélange Ultrapave est inférieure à celle des deux autres dont les comportements thermiques sont identiques.

Le comportement de Styrelf est en contradiction avec les résultats de l'essai Hveem. Cependant, ce phénomène peut trouver une explication dans le fait que, dans l'essai Hveem, on applique une force de compression sur l'échantillon, alors que dans la mesure de viscosité on met en jeu surtout des forces de tension auxquelles certains mélanges seraient plus sensibles. Cet essai permet aussi de constater que la perte de résistance au fluage est considérable entre 40 et 60°C pour tous les mélanges.

### 3.5 Rhéologie des bitumes récupérés des échantillons

Les bitumes récupérés des échantillons sont des bitumes vieillis par un malaxage en usine auquel il faut ajouter un vieillissement supplémentaire dans le revêtement de la chaussée pour les carottes.

L'extraction du bitume élastomère est une source de variabilité; la quantité de polymère extraite peut différer d'un échantillon à l'autre, sauf pour le témoin et le bitume Styrelf.

Les résultats suivants doivent donc être maniés avec une certaine prudence d'autant plus que les produits d'origine ne sont pas disponibles, à l'exception du bitume Styrelf dont un échantillon, parvenu au laboratoire, a pu être caractérisé.

Le tableau 10 résume les caractéristiques des bitumes récupérés des échantillons de mélanges. Le manque de matériel pour les carottes de l'autoroute n'a pas permis la réalisation de tous les essais.

Les pénétrations des bitumes récupérés se situent autour de cinquante avec quelques valeurs à soixante, trouvées pour les bitumes Styrelf A et Polysar E. Les grandeurs des pénétrations des échantillons E par rapport à celles des échantillons A sont variables: les modes de compactage étant très différents et le bitume n'étant pas soumis aux mêmes conditions, ce phénomène ne serait pas anormal.

Les valeurs des viscosités cinématiques sont en bon accord avec les valeurs des pénétrations sauf dans le cas de Kraton A. Une valeur voisine de  $3500 \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$  aurait été plus vraisemblable pour amener la valeur du PVN près de 1.90. En effet, pour chaque type de bitume E ou A, les valeurs du PVN sont très peu différentes. Comme le signale McLeod (20), le PVN constitue une sorte de "finger print" d'un bitume donné, peu importe son histoire.

L'intervalle de plasticité IP peut être considéré comme l'intervalle des températures de service où le bitume possède une consistance suffisante. En dehors de cette zone de températures, les risques d'orniérage et de fissuration sont augmentés. Les bitumes Kraton et Ultrapave ont les plages de plasticité les plus grandes, tandis que les trois autres bitumes ont des intervalles de grandeur approximativement voisins. Les températures de ramollissement du bitume A sont généralement plus basses que celles des bitumes E (exception: Styrelf).

Les huiles dont on tire les bitumes peuvent être des mélanges où interviennent des bruts d'origine canadienne, riches en composés saturés. Si c'est le cas, les points de ramollissement mesurés peuvent être erronés. On peut, cependant, les corriger graphiquement suivant l'abaque proposée par McLeod (9) (colonnes BAC et IPC du tableau 10). Cette correction élargit l'intervalle de plasticité du bitume Styrelf, mais elle retrécit celle des bitumes Ultrapave et Kraton, le bitume témoin et Polysar ne changeant pas. Kraton conserve encore, avec cette correction, la plage de plasticité la plus étendue.

L'indice de pénétrabilité (PI) a été calculé à partir des pentes  $d \log(\text{Pen})/dT$  extraites du tableau 11. Il a semblé plus juste d'utiliser ces données expérimentales que d'adopter l'hypothèse que la pénétration de tout bitume, à son point de ramollissement, atteint 800. Les valeurs obtenues sont toutes positives, mais faibles pour le Témoin E et le Styrelf A. Les valeurs calculées pour ces deux derniers bitumes sont celles de bitumes moyennement susceptibles à la température, tandis que les autres liants ont un P.I. nettement positif, caractéristique des liants modifiés par des élastomères, peu susceptibles à la température.

### 3.5.1 Susceptibilité thermique des bitumes récupérés

Les viscosités des bitumes récupérés à partir des éprouvettes de laboratoires ont été mesurées à l'aide du rhéomètre Schweyer entre  $-10^{\circ}\text{C}$  et  $25^{\circ}\text{C}$ . La valeur mesurée est  $\eta_j$  qui peut être défini (10) comme la viscosité apparente pour  $j = 100 \text{ W/m}^3$ . Ce paramètre est choisi pour réduire l'erreur provenant du calcul du taux de cisaillement à l'extérieur de l'intervalle des valeurs utilisées pour l'essai.

La figure 10 et le tableau 11 rassemblent les résultats obtenus avec cette technique. Dans l'intervalle de température où ont été faits les essais, la courbe représentative de la fonction  $\log \eta_j = f(T)$  est une droite. La pente de cette droite peut caractériser la susceptibilité thermique des bitumes-polymères de laboratoire. Les pentes  $d \log \eta_j / dT$  des liants sont placées dans la première colonne du tableau 12. Dans l'intervalle de température  $25, -10^{\circ}\text{C}$ , Kraton et Ultrapave sont les deux bitumes modifiés qui ont la plus basse susceptibilité thermique.

### 3.5.2 Relation pénétration-température

#### 3.5.2.1 Relation-pénétration-température des bitumes polymère des éprouvettes de laboratoire

La figure 11 et le tableau 11 contiennent les résultats obtenus. La pénétration a été mesurée à 4 températures comprises entre 0 et  $25^{\circ}$ . La charge sur l'aiguille à 100 g et le temps de pénétration de 5 secondes a toujours été égale.

La courbe représentative de la pénétration en fonction de la température:  $\log (\text{Pen}) = f(T^{\circ}\text{C})$  est une droite dont la pente  $d \log (\text{Pen}) / dT$  est aussi une mesure de la susceptibilité thermique. On sait que ces mesures, et celles discutées dans le paragraphe suivant, ont servi au calcul du PI figurant dans le Tableau 10.

#### 3.5.2.2 Pénétration-température des bitumes polymères de l'autoroute

La figure 12 et la dernière colonne du tableau 11 présentent les résultats qui ont été obtenus. L'intervalle de température où les mesures sont prises est compris entre 0 et  $30^{\circ}\text{C}$ . Cinq mesures ont été prises dans cet intervalle. Les autres conditions qui ont été utilisées pour les bitumes de laboratoire restent valables ici.

Le bitume Styrelf de l'autoroute possède la plus forte susceptibilité thermique, déjà observée pour le PI, puisque cette valeur a servi au calcul. Il semble que cet échantillon ait été l'objet d'une surchauffe au laboratoire, probablement au moment, où la carotte a été défaite avant l'extraction du bitume précédent la récupération.

### 3.5.3 Composition chimique des bitumes provenant des éprouvettes de laboratoire

La composition chimique des bitumes est présentée dans le tableau 12. Les proportions des quatre groupes de composés chimiques sont exprimés en pourcentage. Le rendement moyen total de ces analyses est très voisin de 90%, cependant, les valeurs de ce tableau ont été ramenées à 100%.

Un examen rapide du tableau montre que le pourcentage en asphaltènes de ces bitumes est très élevé. Ceci n'est pas absolument anormal, si on considère qu'il s'agit de bitumes vieillis par un malaxage. On a fait figurer, en regard de chaque bitume, leur coefficient d'instabilité colloïdale (21) calculé d'après leur composition chimique.

Ce coefficient est le rapport:

$$I_C = \frac{\text{Phase dispersée} + \text{phase de dispersion} - \text{phase dispersante}}{\text{Asphaltènes} + \text{saturés} + \text{aromatiques} + \text{résines}}$$

Les valeurs élevées des coefficients obtenus avec les bitumes étudiés sont caractéristiques de bitumes viscoélastiques. Plus cette valeur est élevée plus le bitume sera de type gel et plus sa stabilité colloïdale sera mauvaise. A l'extrême, il peut y avoir séparation de phases: ressuage d'huile et précipitation des asphaltènes. Le bitume possédant la plus forte instabilité colloïdale est le bitume témoin; les bitumes, relativement plus stables, sont Ultrapave et Kraton. Ce coefficient relie aussi la composition chimique à la durabilité du bitume et par voie de conséquence à celle du revêtement.

On peut prévoir ainsi une durabilité supérieure pour les bitumes Ultrapave et Kraton. Une meilleure confiance dans ces résultats pourraient être obtenue si la composition chimique avant malaxage avait été connue. Cette donnée aurait permis de faire une évaluation des mélanges en cours de vieillissement.

### 3.5.4 Module de rigidité des bitumes

Le module de rigidité des bitumes a été déterminé suivant la méthode McLeod (9), à partir de la mesure du PVN. Les résultats pour les bitumes de laboratoire et les bitumes routiers se trouvent dans le tableau 13. A basse température, plus la valeur du module de rigidité est élevée, plus grande sera la susceptibilité à la fissuration du mélange bitumineux (22). A haute température, plus la valeur du module de rigidité sera élevée, moins grande sera la susceptibilité à l'orniérage.

Le module de rigidité a été déterminé à basse température ( $-29^{\circ}\text{C}$ ) pour un temps de charge de 20000 s, correspondant à l'effet d'un refroidissement lent de la chaussée par un jour d'hiver particulièrement froid.

A haute température de service ( $60^{\circ}\text{C}$ ) le module de rigidité des bitumes a été déterminée pour un temps de chargement de 0.008 s, correspondant à la sollicitation créée sur la chaussée par un poids lourd roulant à 100 km/h.

Le bitume témoin présente une susceptibilité à la fissuration beaucoup plus élevée que celle des mélanges modifiés par les polymères. La susceptibilité à l'orniérage du mélange témoin est comparable aux valeurs des autres bitumes. C'est cependant, le bitume Polysar qui offre la susceptibilité à l'orniérage la plus basse de toutes aussi bien pour les éprouvettes de laboratoire que pour les carottes de l'autoroute.

Styrelf est le bitume qui offre le meilleur compromis pour la susceptibilité à la fissuration et à l'orniérage pour l'échantillon provenant de l'autoroute. Or, les valeurs des modules sur lesquels on s'appuie, ont été déterminées à partir de paramètres provenant de l'échantillon qui aurait été affecté par une surchauffe accidentelle au laboratoire. Face à cette éventualité, on peut admettre que les propriétés de cet échantillon correspondent aux qualités minimum prévisibles.

En seconde place, se trouve le bitume Kraton: ce bitume présente dans les 2 cas (laboratoire et autoroute) une susceptibilité à la fissuration assez faible, mais la susceptibilité à l'orniérage figure parmi les plus élevés de l'ensemble de ces échantillons.

#### 4. CONCLUSION

L'étude présente a été faite en prenant le liant comme seule variable d'un même système. Ce liant a été préalablement modifié par un élastomère et vieilli par un malaxage en usine. Les conclusions qu'on peut tirer de ce travail ne sont rigoureusement applicables qu'à la planche d'essai qui a été étudiée, et les performances des différents mélanges en présence sont celles qui ont été constatées à partir des mélanges fabriqués pour ce chantier et des carottes prélevées ensuite dans le revêtement après un peu plus d'un an de service.

Les bitumes Styrelf et Kraton ont été confectionnés à l'aide de bitumes compatibles avec des élastomères SBS. A la différence de Kraton, Styrelf est le seul bitume modifié ayant un élastomère fixé chimiquement à la matrice bitumineuse. Ces deux liants sont des mélanges biphasiques finement dispersés dans le bitume. Les latex ajoutés au bitume à la centrale d'enrobage forment une dispersion, favorisée par la dimension des particules de latex ( $1-2\ \mu\text{m}$ ). La stabilité de cette dispersion est douteuse et ne constitue pas un mélange biphasique. L'additif latex pourrait, jouer le

rôle " d'une armature" dans le bitume où il a été introduit, mais s'apparente plutôt à un filler d'usage spécial.

Les bitumes élastomères agissent favorablement au niveau des enrobés, sur un certain nombre de propriétés fondamentales: résistance au désenrobage, à l'orniérage, à la fissuration et aux problèmes de durabilité. L'influence du liant modifié sur ces propriétés peut être caractérisé de façon plus systématique sur les éprouvettes de laboratoire.

La susceptibilité à l'action du désenrobage par l'eau a été évaluée par les essais de trempage: le module d'élasticité le plus élevé conservé après trempage est celui du mélange Kraton. Kraton montre aussi une résistance extraordinaire à l'action de l'eau après saturation sous vide. En tension et en stabilité Hveem, les valeurs les plus élevées conservées après trempage sont celles de Polysar.

La susceptibilité à l'orniérage peut être caractérisée par la valeur du vide comblé par le bitume (VCB), le module d'élasticité, la stabilité Hveem, et la viscosité apparente. Le mélange Styrelf possède le VCB le plus bas, inférieur à la limite de 75%, mais le mélange Kraton garde le module d'élasticité, la stabilité Hveem et la valeur de la viscosité apparente les plus élevés.

La susceptibilité à la fissuration caractérisée par l'essai Brésilien et le module de rigidité s'accordent pour attribuer à Styrelf, globalement, une susceptibilité moindre que celle des autres mélanges.

D'autres paramètres influencent la durabilité des mélanges: la susceptibilité thermique pour laquelle Styrelf et Ultrapave ont les valeurs les plus basses. L'intervalle de plasticité qui définit la plage d'utilisation normale des mélanges bitumineux est élargie de façon notable pour les enrobés à liants modifiés, principalement dans le cas du mélange Kraton.

On constate, au terme de ce travail, qu'un enrobé contenant un liant modifié conserve après vieillissement des caractéristiques avantageuses qui lui permettent de surpasser les performances d'un mélange conventionnel dans les mêmes conditions. Ces caractéristiques sont d'importance variables dans les enrobés qui ont servi à cette étude. Le mélange Kraton est celui dont les performances sont les plus intéressantes, il est suivi par Styrelf, les deux mélanges modifiés par un latex viennent ensuite, les performances d'Ultrapave dépassant celles de Polysar.

La seconde position attribuée au mélange Styrelf est peut-être décevante, compte tenu des nombreuses conclusions d'études favorables à son égard. Cependant dans le cas de la planche d'essai étudiée ici, l'acheminement du liant Styrelf dans des conditions médiocres entre le lieu de production et le chantier n'ont pas permis d'obtenir ce produit dans ses conditions optimales.

D'une façon générale, on observe bien que la présence d'un liant modifié augmente de façon appréciable ses performances aux températures extrêmes d'utilisation.

## BIBLIOGRAPHIE

1. Y. Brion, B. Brûlé, Etude des mélanges bitumes-polymères. Composition, structure, propriétés. LCPC, Série PC6, 1986, Paris.
2. B. Brûlé, Liants modifiés par des polymères pour enduits et enrobés spéciaux, LCPC, Série PC5, 1986, Paris.
3. H.W., Muncy, G.N. King, G.N., Prudhomme, J.B., Polymer modification: Binder's effect on mix properties. AAPT, 1986, pp 519-539.
4. T.S. Shuler, J.H. Collins, Kirkpatrick, J.P., Polymer modified asphalt. Properties related to Asphalt concrete performance. ASTM-STP 941, pp 179-198.
5. D.W. Little, J.M., Button, R.M., While, E.K. Ensley, Y. Kim, J. Ahmed, Investigation of Asphalt Additives, Report No FHWA/RD-87/001, 1987, US Dpt of Transportation.
6. R.I., Lottman, Predicting Moisture Induced Pavage to Asphaltic Concrete. Transportation Research Board, Report 192, Ntl. Res. Council, Washington, D.C., 1978.
7. N.W. McLeod, Designing Standard Asphalt Mixtures for Greater Durability. Proc. 16th Annual Conference CTAA, Vol. XVI, 1971, pp. 53-71.
8. Méthode LC-MB-01 (Ministère des Transports du Québec) Récupération des bitumes en solution par évaporation rotative.
9. N.W. McLeod, Asphalt Cements: Pen-Vis Number and its Application to Moduli of Stiffness. J. of Testing and Evaluation 4 (1976) pp 275-282.
10. H.E. Scheywer, L.L. Smith, Fish, G.W., A Constant Stress Rheometer for Asphalt Cement. AAPT, 15 (1976) pp 138-144.
11. M. Tia, B.R., Ruth, Basic Rheology and Rheological Concepts Established by H.E. Schweyer. Asphalt rheology: relationship to mixture. ASTM-STP 941, (1987), pp 118-145.
12. W.A. Dark, R.R. Mc Gough, Use of Liquid Chromatography in the Characterization of Asphalts, J. of Chromatographic Science, 16 (1978) pp. 610-615.
13. G. Theroux, C.A. Bell, J.E. Nilson, D. Eakin, M. Shroeder, Experience with Corbett-Schwarbick. Procedure for Separation of Asphalt into Four Generic Fractions, Transportation Research Record, 1171, TRB, Washington, D.C., pp. 66-70.

14. J.C. Moreux, R. Langlois, A. Dion, Influence du chauffage sur les propriétés d'un mélange bitumineux, Proceedings of the CTAA, Vol. XXX1, 1986, Vancouver, pp 246-268.
15. J.S. Koplantz, D.E. Newcomb, Water Sensivity Test Methods for Asphalt Concrete Mixture. A laboratory Comparison, Transportation Research Record, 1171, T.R.B., Washington D.C.
16. J.A. Lefebvre., Effect of Compaction on the Density and Stability of Asphalt Paving Mixtures. Proceedings of the CTAA, Vol. XX, 1965, Québec, 1965.
17. S.H. Carpenter, T. Vandam, Laboratory Performance Comparison of Polymer - Asphalt and a Modified Asphalt Concrete Mixture. Transportation Res. Record 1115, TRB, Washington D.C. pp. 62-74.
18. R.A. Jimenez, B.M. Gallaway, A Study of Hveem Stability vs Specimen Height. Highway Research Board. Proc. of the 41st Annual Meeting. Ntl Research Council (1962) Washington D.C. pp. 188-194.
19. G.A. Huber, G.H. Heiman, Rutting of Asphalt Pavements in Saskatchewan: Mix Design Evaluation, Proceeding of CTAA, Vol. XXX11, 1987, Toronto, pp 152-176.
20. N.W. McLeod, The Design of Dense Graded Asphalt Concrete Pavements, Proceedings of the CTAA, Vol. XXX11, 1987, Toronto, pp 352-404.
21. C. Gaestel, R. Smadja, K.A. Laminan, Contribution à la connaissance des bitumes routiers, Revue Générale des routes et aérodrômes, 466 (1971) p. 85.
22. P.S. Kandhal, W.C. Koehler, Effect of Rheological Properties of Asphalt on Pavement Cracking. ASTM STP 941 (1987) pp 99-117.

TABLEAU 1 - GRANULOMÉTRIE MOYENNE DES MÉLANGES POLYMERES

Tamis (mm)	% Passant		Exigences
	Contrôle (autouroute)	Éprouvettes (laboratoire)	
12.500	100	100	80 - 100
10.000	94	96	70 - 90
5.000	53	55	50 - 70
2.500	44	46	38 - 63
1.250	41	43	-----
0.630	36	37	18 - 42
0.315	23	25	11 - 31
0.160	10	11	5 - 21
0.080	3.3	3.7	2 - 6

TABLEAU 2 - STABILITÉ ET MODULE D'ÉLASTICITÉ  
 ( Compactage à 20 coups )

	STABILITÉ			MODULE E					VCB %
	S.T. (kN)	A.T. (kN)	Perte %	VIDE (%)		S.T. (MPa)	A.T. (MPa)	Perte %	
				S.T.	A.T.				
MB4	4.91	3.96	19	6.05	5.35	27.43	17.73	34	66
Styrelf	4.08	3.63	11	7.12	6.96	14.32	14.18	1	62
Polysar	5.89	5.55	6	5.00	5.10	22.80	19.70	14	71
Ultrapave	4.52	4.54	0	7.25	7.12	19.15	15.50	18	62
Kraton	8.91	6.96	22	4.78	4.24	39.60	23.70	40	72

Notes : S.T. = Sans Trempage  
 A.T. = Après Trempage

TABLEAU 3 - STABILITÉ ET MODULE D'ÉLASTICITÉ  
( Compactage à 40 coups )

	STABILITÉ			MODULE E					
	S.T. (kN)	A.T. (kN)	Perte %	VIDE (%)		S.T. (MPa)	A.T. (MPa)	Perte %	VCB %
				S.T.	A.T.				
MB4	9.16	7.44	19	2.68	2.66	45.47	27.23	40	82
Styrelf	6.39	5.36	16	5.47	5.42	28.90	21.70	25	69
Polysar	9.06	8.13	10	3.37	3.41	43.30	33.60	22	78
Ultrapave	8.55	4.05	53	4.75	4.97	31.60	11.10	65	72
Kraton	11.08	9.31	16	3.69	3.86	50.40	33.80	33	77

Notes : S.T. = Sans Trempage  
A.T. = Après Trempage

TABLEAU 4 - STABILITÉ ET MODULE D'ÉLASTICITÉ  
( Compactage à 60 coups )

	STABILITÉ			VIDE (%)		MODULE E			VCB %
	S.T. (kN)	A.T. (kN)	Perte %	S.T.	A.T.	S.T. (MPa)	A.T. (MPa)	Perte %	
MB4	12.93	9.69	25	2.22	2.22	64.84	38.63	41	85
styrelf	8.60	6.75	22	4.28	4.28	41.63	27.26	35	74
Polysar	11.00	5.05	54	2.95	2.81	57.40	14.30	75	81
Ultrapave	10.52	5.05	30	3.41	3.70	49.40	23.70	52	78
Kraton	11.96	10.49	12	3.17	3.13	57.20	37.20	35	80

Notes : S.T. = Sans Trempage  
A.T. = Après Trempage

TABLEAU 5 - STABILITÉ ET MODULE D'ÉLASTICITÉ  
CORRIGÉES POUR 4% DE VIDE.

	STABILITÉ			MODULE E		
	S.T. (kN)	A.T. (kN)	Perte %	S.T. (MPa)	A.T. (MPa)	Perte %
MB4	9.56	6.18	35	43.07	25.98	40
Styrelf	8.97	7.05	21	43.81	28.63	35
Polysar	8.11	7.25	11	34.15	27.30	35
Ultrapave	9.52	7.05	26	41.91	21.10	50
Kraton	10.42	8.16	22	46.92	28.70	61

Notes : S.T. = Sans Trempage  
A.T. = Après Trempage

TABLEAU 6 - ESSAIS DE TENSION INDIRECTE

	ÉPROUVETTES DE LABORATOIRE (60 CPS)					CAROTTES DE L'AUTOROUTE	
	Sans trempage		Après trempage		Perte de ST (%)	ST (MPa)	Vide (%)
	ST (MPa)	Vide (%)	ST (MPa)	Vide (%)			
MB4	3.47	2.20	1.68	2.19	52	3.14	2.46
Styrelf	3.59	4.37	1.52	4.38	58	3.95	3.10
Polysar	3.45	2.78	2.12	2.12	39	3.29	3.61
Ultrapave	3.56	3.72	1.89	3.72	47	3.09	4.17
Kraton	2.73	3.31	2.00	3.28	27	2.20	4.78

Note : ST = force de tension

TABLEAU 7 - ESSAIS DE TENSION CORRIGÉS  
POUR 4% DE VIDE

	ÉPROUVETTES DE LABORATOIRE			CAROTTE D'AUTOROUTE
	SANS TREMPAGE ST (MPa)	APRES TREMPAGE ST (MPa)	PERTE (ST) (%)	ST (MPa)
MB4	2.48	1.05	58	2.15
Styrelf	3.63	1.60	56	3.29
Polysar	3.33	1.88	44	3.15
Ultrapave	3.41	1.86	45	3.15
Kraton	2.60	1.33	49	2.80

Note : ST = force de tension

TABLEAU 8 - ESSAIS HVEEM

	ÉPROUVETTES DE LABORATOIRE					CAROTTES AUTOROUTE		
	ESSAIS SANS TREMPAGE		ESSAIS APRES TREMPAGE			SH	SH	
	SH	Vides	SH	Vides	Perte	(h=35mm)	Vides	(h=63.5mm)
T	27	1.99%	22	2.43%	15%	52	2.1%	29
S	36	4.06%	21	4.98%	42%	35	2.9%	14
P	37	2.38%	26	2.68%	30%	39	2.5%	18
U	27	2.58%	21	3.11%	43%	39	2.8%	17
K	39	2.79%	21	3.15%	46%	32	3.3%	10

Notes : SH = Stabilité Hveem (%)  
 T = Témoin MB4  
 S = Styrelf  
 P = Polysar  
 U = Ultrapave  
 K = Kraton

**TABLEAU 9 - VISCOSITÉ DES ÉPROUVETTES DE MÉLANGE**

**COMPACTÉES EN LABORATOIRE**

(charge = 268 N)

	Température		
	40°C (E-9 Pa.s)	60°C (E-9 Pa.s)	Perte à 60°C %
Témoin MB4	69	2	97
Styrelf	68	2	97
Polysar	91	11	88
Ultrapave	71	5	93
Kraton	139	54	61

TABLEAU 10 - CARACTÉRISATION DES BITUMES RÉCUPÉRÉS DES ÉCHANTILLONS

	Pen	$\eta$	$\nu$	BA	BAC	F	IP	IPC	PVN	PI
	(10 <sup>-1</sup> mm)	(Pa.s)	(mm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	-	-
Témoin E	54	695	617	56.5	55	-7.7	64.2	63	-0.28	0.53
Témoin A	56	-	589	50.3	53	-	-	-	-0.30	2.77
Styrelf E	52	1711	1277	47.8	57	-12.3	62.1	69	+0.68	3.33
Styrelf A	60	-	1080	53.1	55	-	-	-	+0.62	0.91
Styrelf O	96	397	708	56.5	50	-	-	-	+0.60	-
Polysar E	60	1687	1557	57.0	57	- 6.0	63.0	63	+1.13	1.32
Polysar A	49	-	1889	55.9	60	-	-	-	+1.14	3.33
Ultrapave E	53	4464	2910	67.0	64	- 7.0	74.0	71	+1.83	2.77
Ultrapave A	55	-	2869	56.1	64	-	-	-	+1.86	2.77
Kraton E	52	-	3147	73.0	64	-13.7	86.7	79	+1.91	2.77
Kraton A	43	-	3070	70.1	64	-	-	-	+1.77	2.77

NOTES: Les lettres E, A et O identifient l'origine du bitume: E= éprouvettes de laboratoire, A = carottes de l'autoroute; O = bitume Styrelf d'origine.

PEN = pénétration (25°C, 100 g, 5s;  $\eta$  = viscosité absolue à 60°C;  
 $\nu$  = viscosité cinématique à 135°C; BA = point de ramollissement;  
 BAC = point de ramollissement corrigé; F = point de fragilité de Fraas;  
 IP = intervalle de plasticité; IPC = intervalle de plasticité corrigé  
 (valeurs arrondies); PVN = penetration-viscosity number; PI = indice  
 de pénétrabilité calculé à partir de:  

$$\text{dlog (Pen)/dT} = (1/50) (20 + \text{P.I.}) / (10 + \text{P.I.})$$

**TABLEAU 12 - COMPARAISON CHIMIQUE DES BITUMES RÉCUPÉRÉS  
DES ÉPROUVETTES DE LABORATOIRE.**

	ASPHALTENES SATURÉS	AROMATIQUES	RÉSINES	INSTABILITÉ COLOIDALE	
TÉMOIN	28	10	42	20	4.0
STYRELF	25	13	41	21	3.8
POLYSAR	28	12	39	21	3.8
ULTRAPAVE	24	13	40	23	3.3
KRATON	26	13	38	23	3.3

**TABLEAU 13 - MODULES DE RIGIDITÉ DES BITUMES RÉCUPÉRÉS  
DES ÉCHANTILLONS**

	(a)		(b)	
	LAB.	AUTOR.	LAB.	AUTOR.
TÉMOIN	85	50	0.15	0.10
STYRELF	23	12	0.14	0.12
POLYSAR	13	20	0.16	0.20
ULTRAPAVE	18	18	0.12	0.12
KRATON	14	14	0.10	0.10

Notes : (a) Temps de chargement 20000s  
Température : -29°C

(b) Temps de chargement 0.008s  
Température : 60°C

TABLEAU 11 - SUSCEPTIBILITÉ THERMIQUE DES BITUMES

	ÉPROUVETTES-LABORATOIRE		AUTOROUTE
	$d(\log \eta_j / dT)$	$d(\text{Pen})/dT$	$d(\text{Pen})/dT$
MB4	0.122	0.037	0.027
Styrelf	0.105	0.025	0.035
Polysar	0.102	0.033	0.025
Ultrapave	0.063	0.027	0.027
Kraton	0.090	0.027	0.027

FIG 1 - LOCALISATION DE LA PLANCHE D'ESSAI



FIG 2 - % DE VIDES COMBLE PAR LE BITUME  
 EN FONCTION DU NB. COUPS DE COMPACTAGE

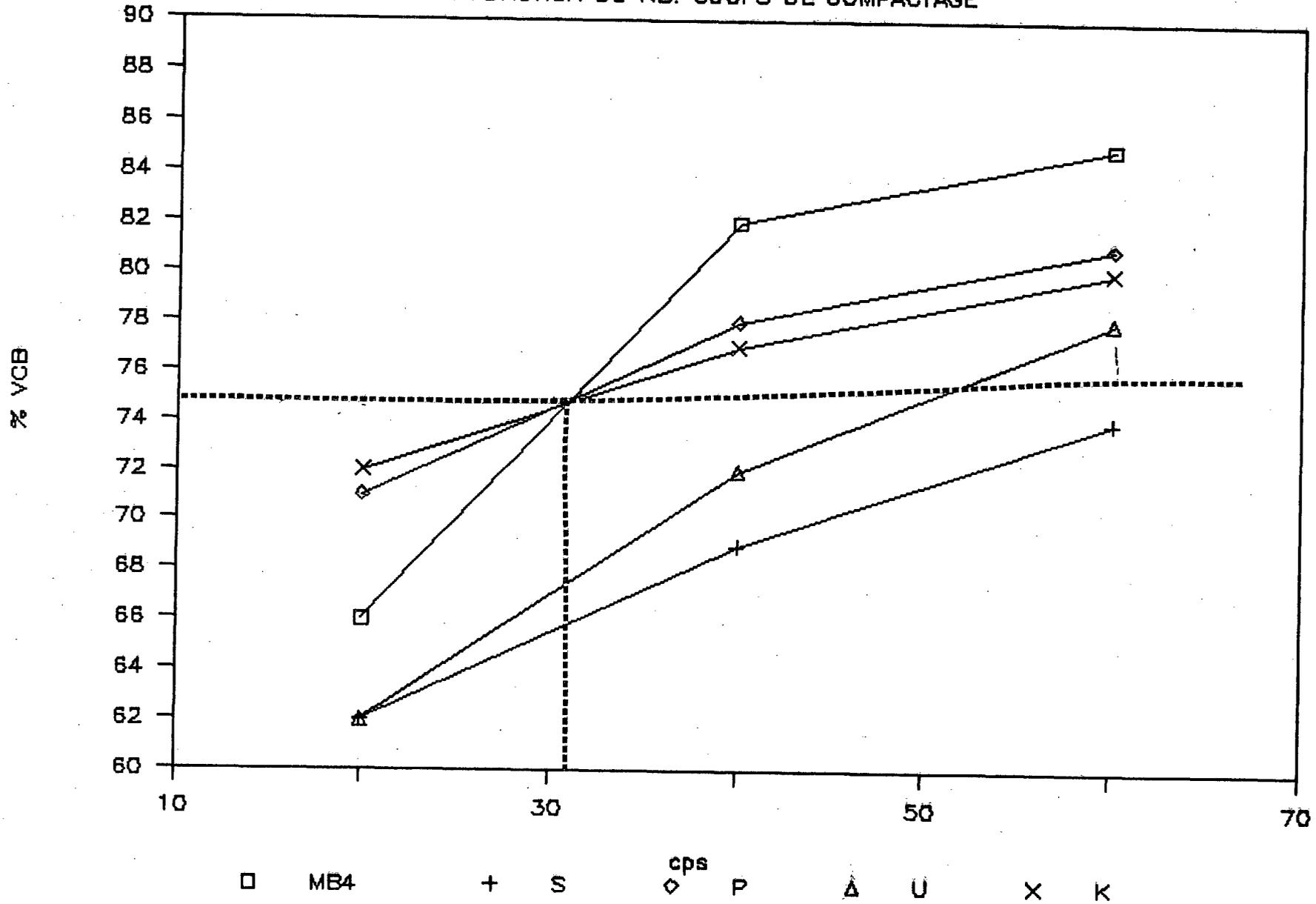


FIG 3 - % DE VIDES EN FONCTION DU  
NOMBRE DE COUPS DE COMPACTAGE

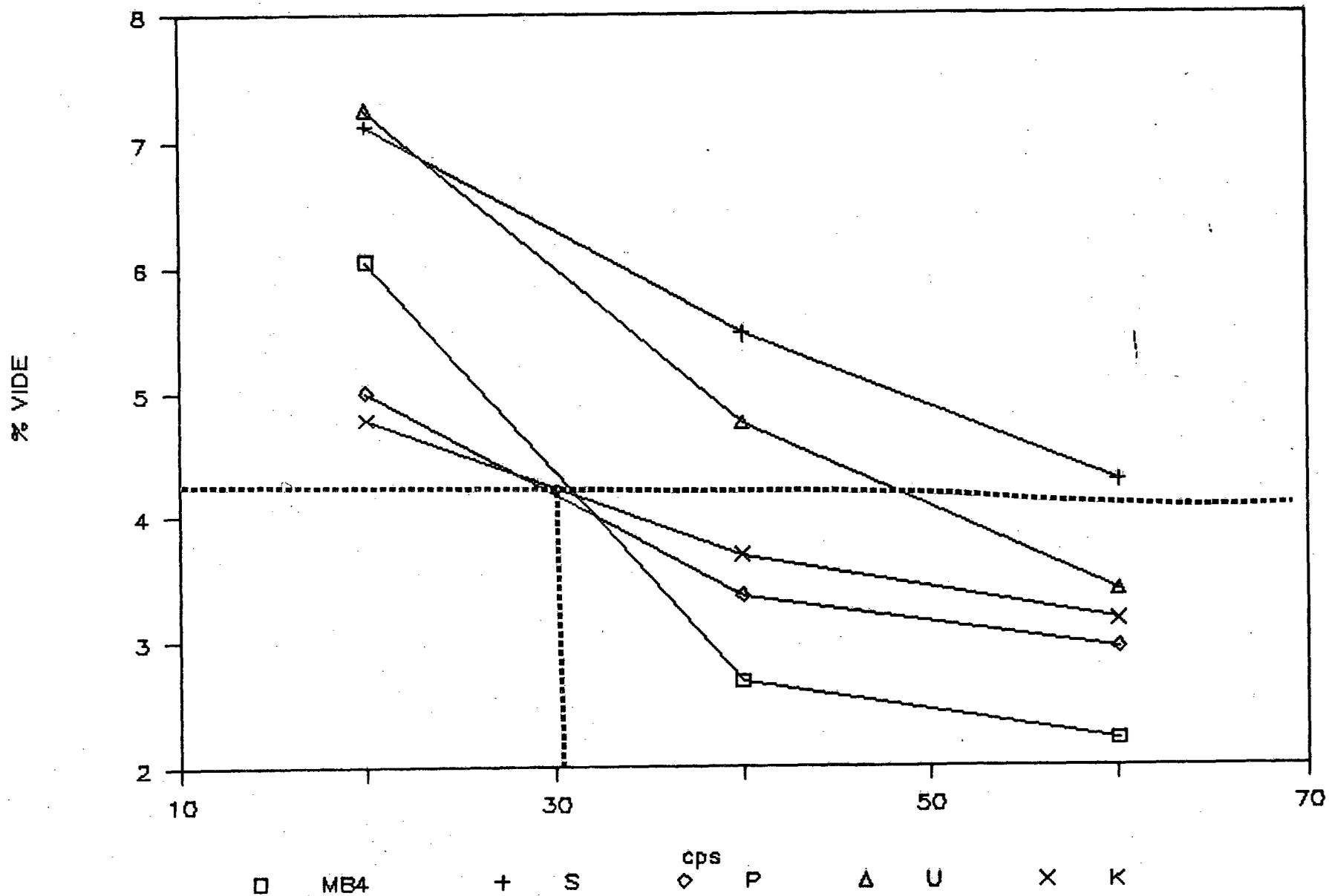


FIG 4 — STABILITES ET TREMPAGES DES  
ECHANTILLONS DE LABORATOIRE

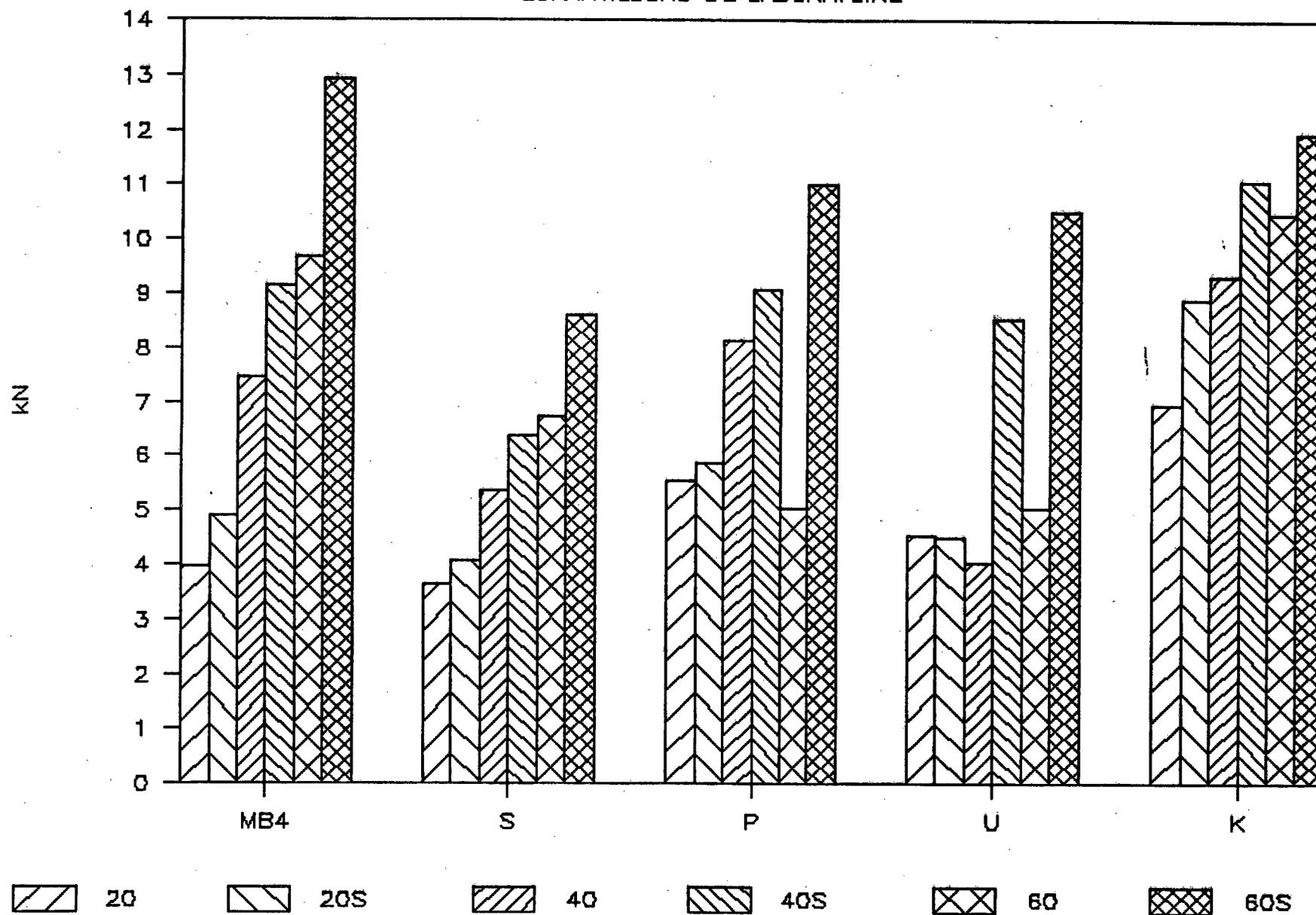


FIG 5 — MODULE D'ELASTICITE  
SANS ET APRES TREMPAGE

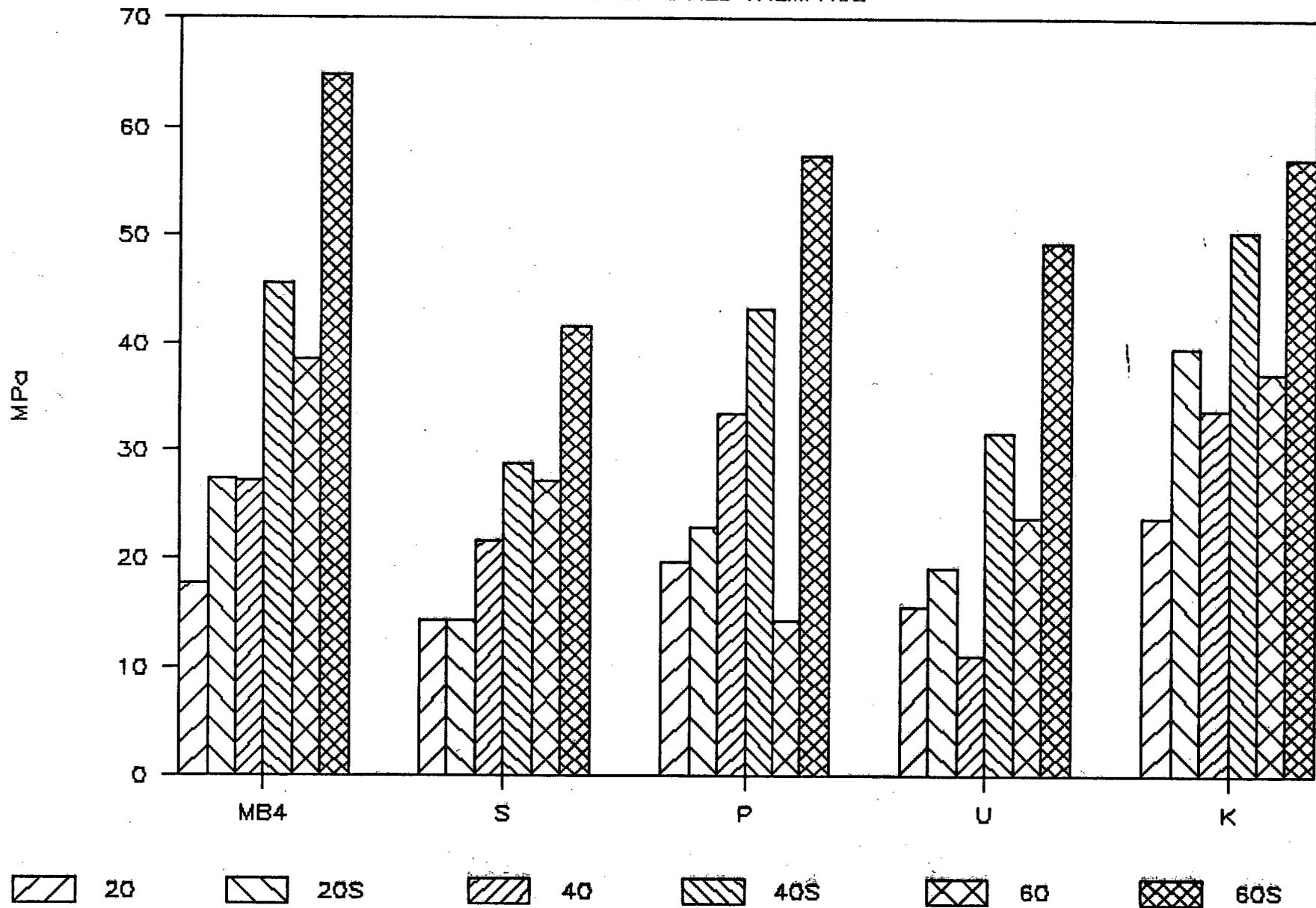
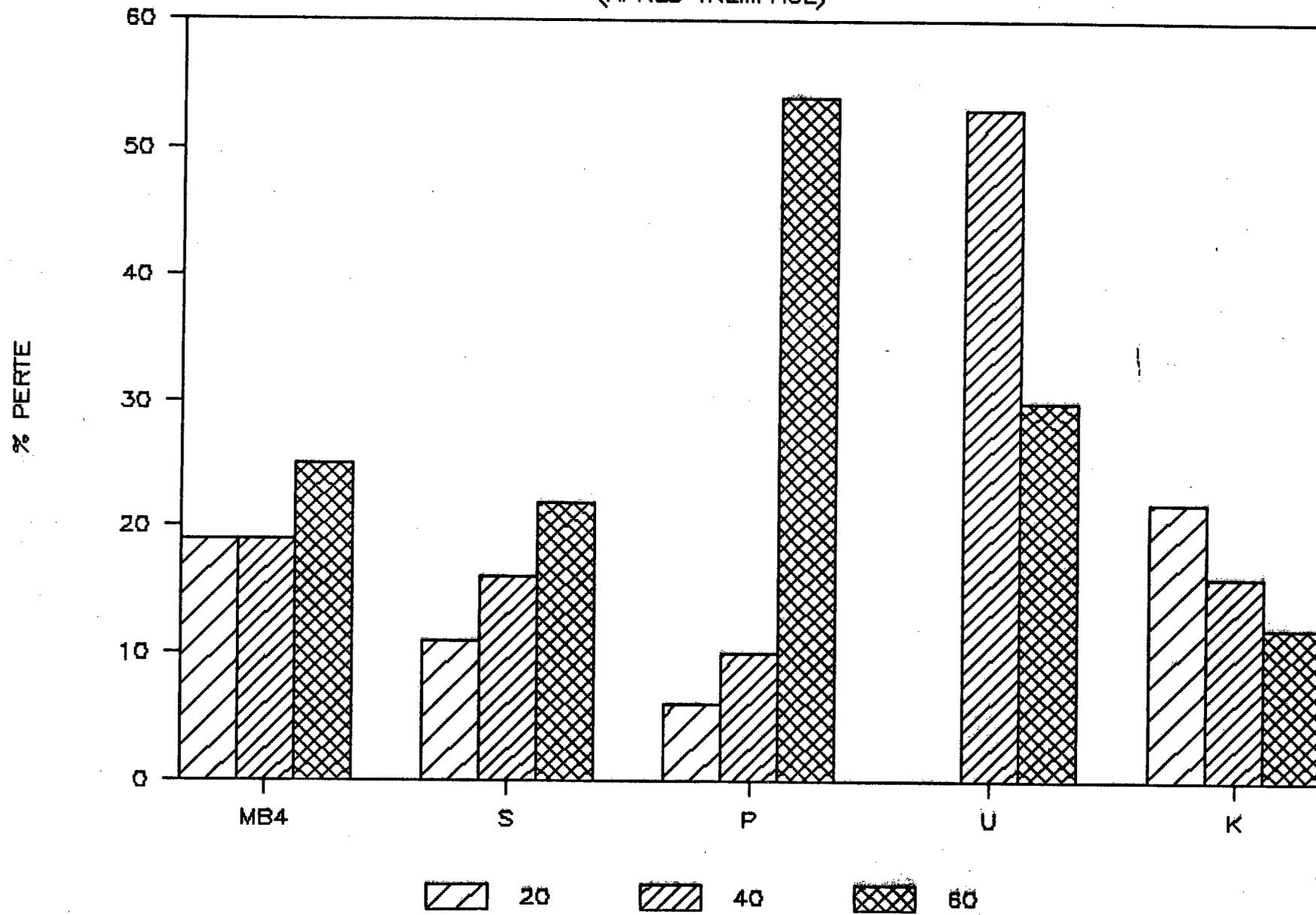


FIG 6 - % DE PERTE DE STABILITE  
(APRES TREMPAGE)



# FIG 8 - INTERPOLATION DES STABILITES

(4% DE VIDE)

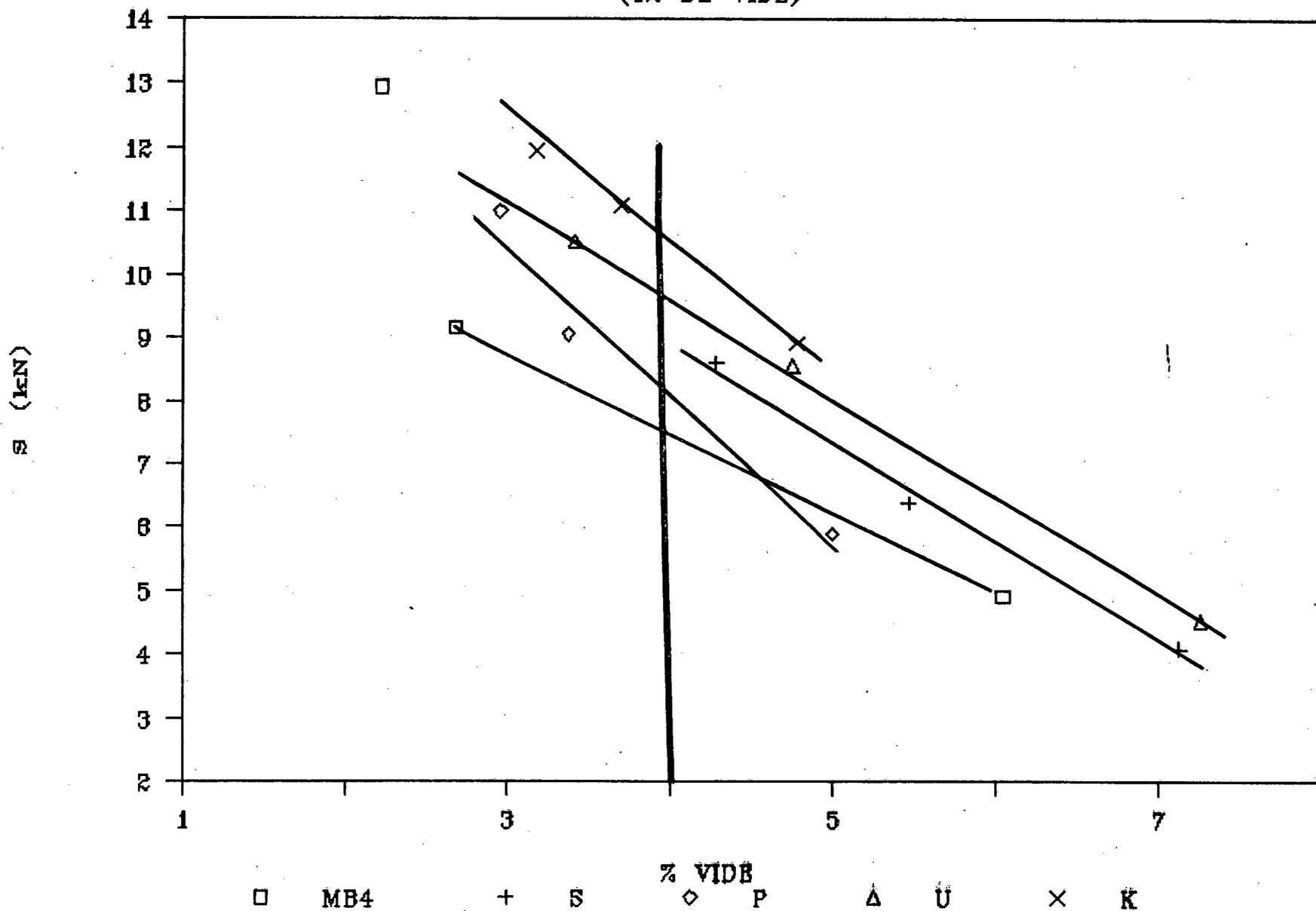


FIG 9 - TENSION INDIRECTE VIDE=4%

ECHANTILLONS LABORATOIRE ET AUTOROUTE

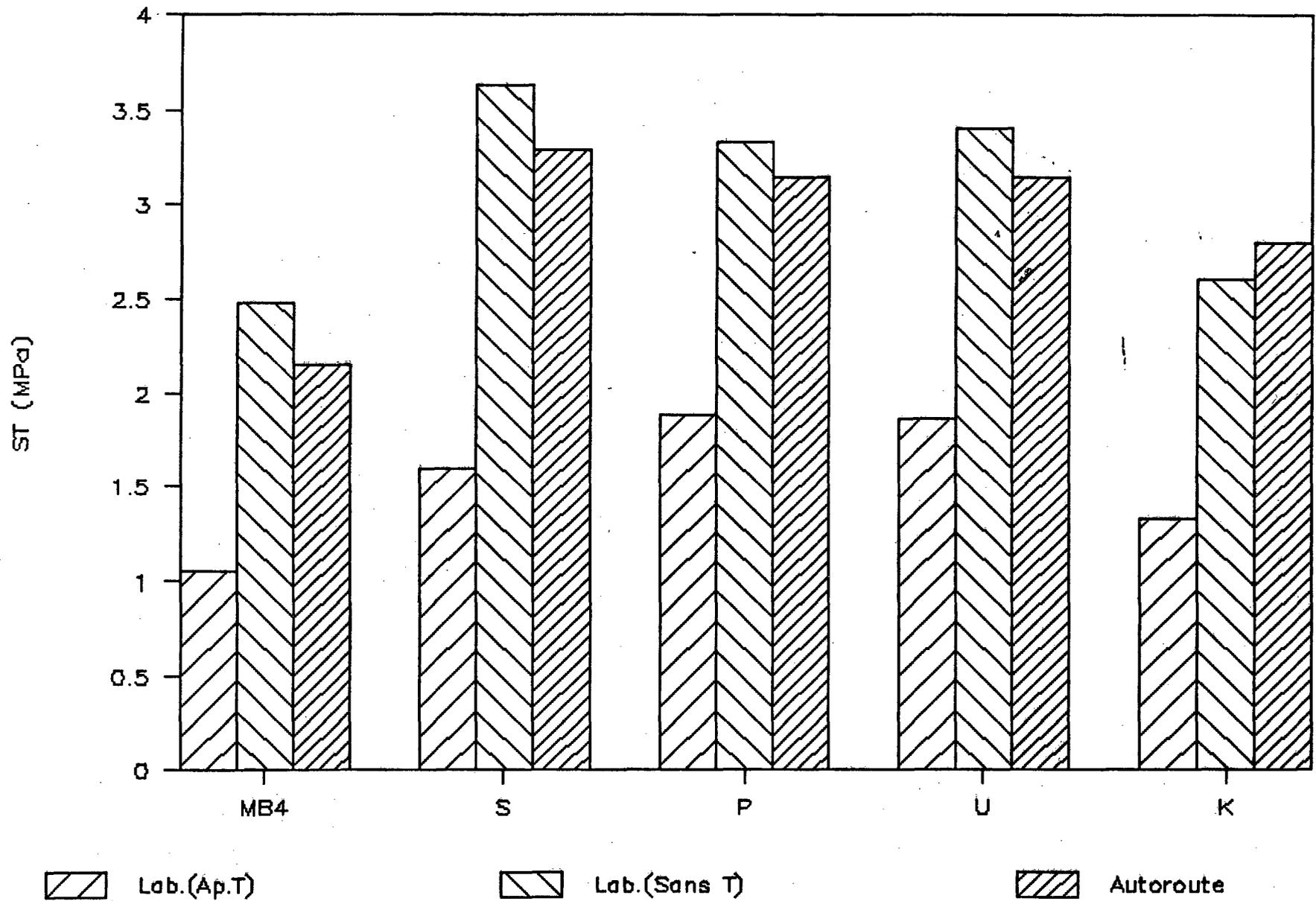


FIG 10 - VARIATION DE LA VISCOSITÉ APPARENTE  $\eta_j$   
DES BITUMES EN FONCTION DE LA TEMPÉRATURE.

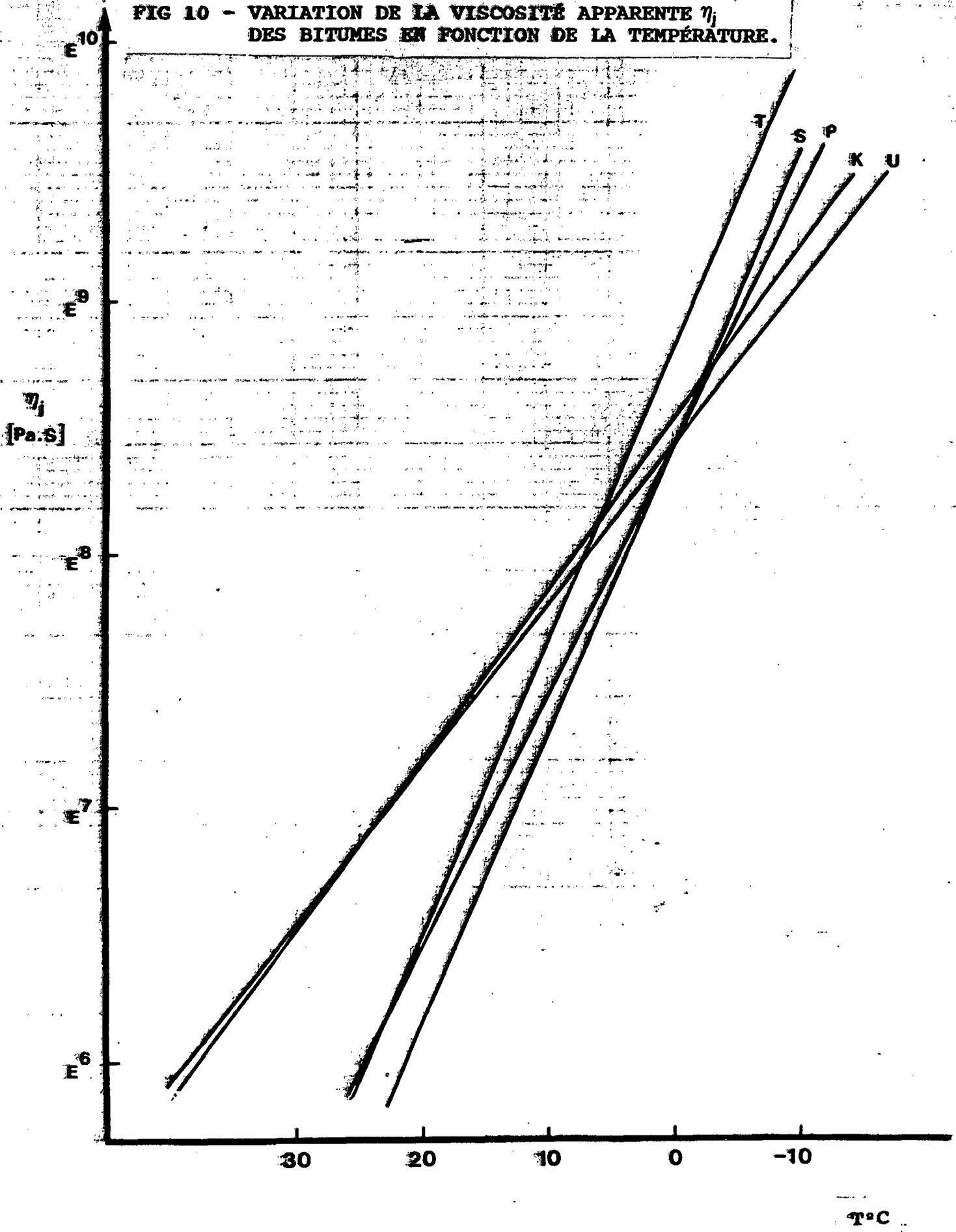


FIG 11 - RELATION PÉNÉTRATION - TEMPÉRATURE  
(ÉPROUVETTES DE LABORATOIRE)

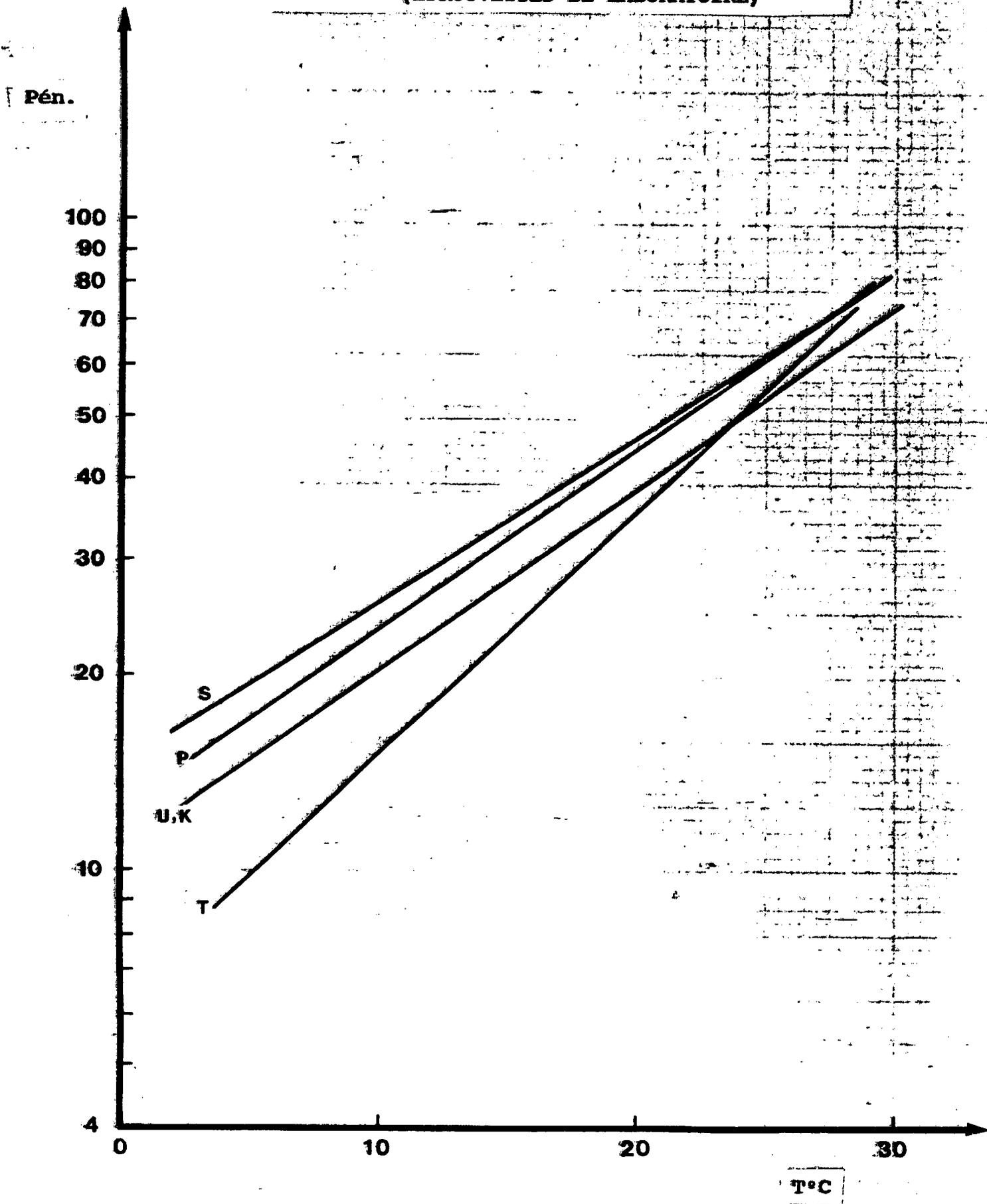
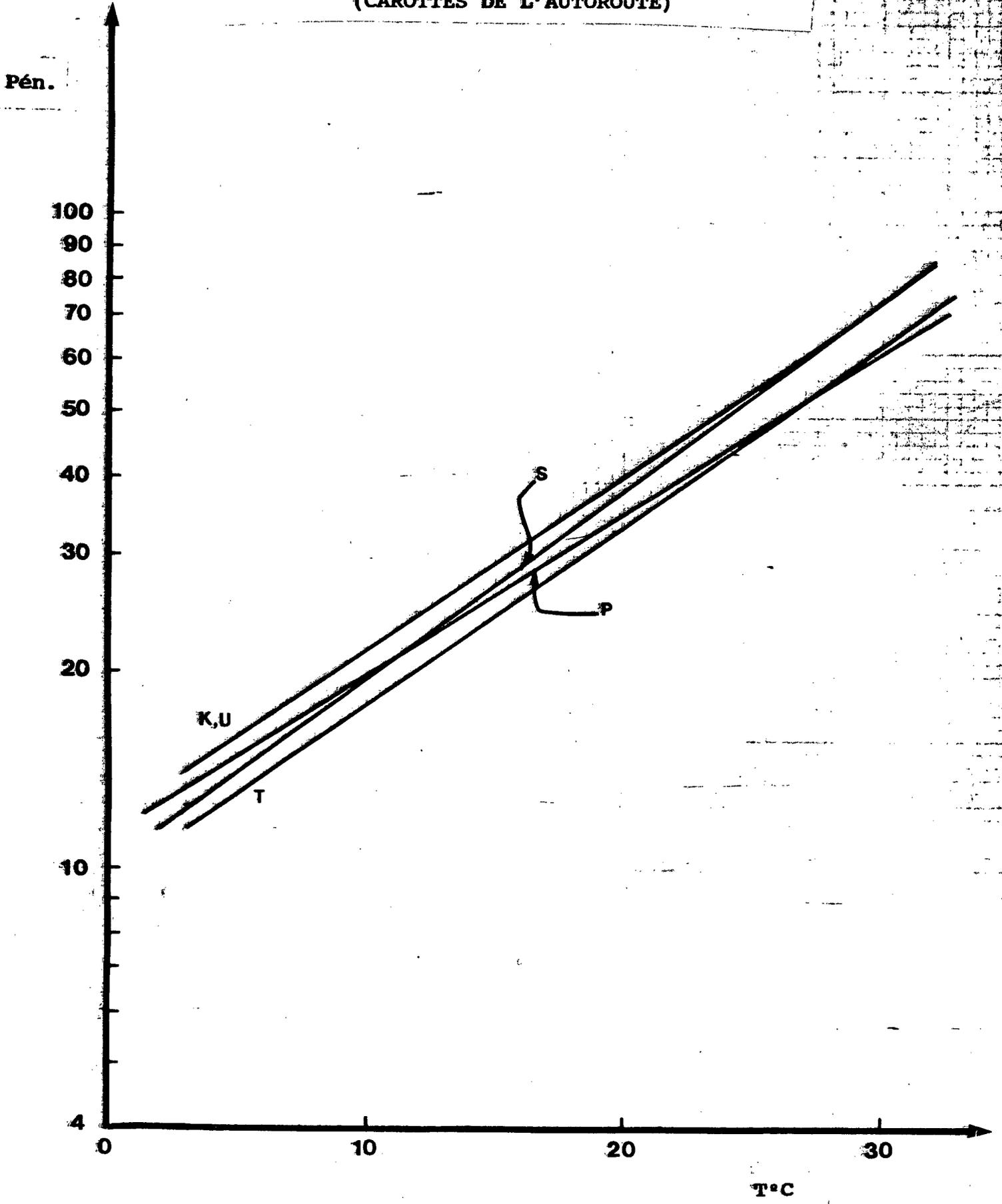


FIG 12 - RELATION PÉNÉTRATION - TEMPÉRATURE  
(CAROTTES DE L'AUTOROUTE)



MINISTÈRE DES TRANSPORTS



QTR A 231 451