

FORMULATION DES BETONS BITUMINEUX AU VU DE LA METHODE SUPERPAV (PROGRAMME SHRP)

AFECHKAR Mohamed – Chef de Service Recherche / CNER – DRCR

1. INTRODUCTION

"Superior Performing Asphalt Pavements", plus connu sous la dénomination SUPERPAVE, provient d'une importante recherche réalisée dans le cadre du programme américain intitulé "Strategic Highway Research Program" (SHRP).

En effet, le programme SHRP a débuté en 1987 lorsque le congrès américain a accordé un budget d'environ 150 M \$USA, pour une durée de cinq ans. L'objectif du SHRP était d'accroître la performance et la durabilité des routes, ainsi que de les rendre plus sécuritaires. Un tiers du budget du SHRP a été consacré au développement de nouvelles méthodes de caractérisation des liants bitumineux.

Le SUPERPAVE a été mis au point afin de fournir aux ingénieurs et aux entrepreneurs routiers les outils dont ils ont besoin pour concevoir des mélanges traités aux liants hydrocarbonés donnant un meilleur comportement des chaussées sous des températures extrêmes et sous un trafic intense et agressif.

La méthode de formulation SUPERPAVE est basée sur le concept de maniabilité lors de la pose ainsi que de la performance de l'enrobé dans le temps. Elle permet en outre d'anticiper le comportement d'un enrobé bitumineux sur la base de ses propriétés intrinsèques. En pratique, les performances recherchées sont :

- la résistance à l'orniérage,
- la résistance à la fissuration par fatigue,
- la résistance à la fissuration thermique,
- la résistance au désenrobage,...

De nouvelles procédures d'essais et des équipements de mesures ont été développées pour caractériser les liants bitumineux ainsi que les mélanges bitumineux :

- l'essai de cisaillement dynamique qui permet d'étudier les propriétés viscoélastiques des bitumes purs et modifiés et de déterminer le module complexe du bitume sous des températures moyennes et élevées ;
- l'essai de la poutre en flexion pour déterminer le module du liant à basse température ;
- L'essai de traction directe qui permet la mesure de la résistance à la traction des bitumes à basse température....

2. GRANDEURS RHEOLOGIQUES PRISES EN COMPTE PAR LES SPECIFICATIONS SHRP

a.Module et complaisance complexes :

Dans un essai, où le corps à étudier est soumis à une oscillation sinusoïdale à amplitude imposée de la déformation, on peut écrire en notation complexe :

$$\sigma^* = G^* \varepsilon^*$$

$$\sigma_0 e^{i\omega t + i\varphi} = G^* \varepsilon_0 e^{i\omega t}$$

Où

σ^* : la contrainte complexe d'amplitude σ_0 .

G^* : le module complexe vecteur de norme $|G^*|$ et d'angle φ .

ε^* : la déformation complexe d'amplitude ε_0 .

i : la racine de -1.

t : le temps,

ω : la pulsation avec $\omega = 2 \pi N$; N étant la fréquence.

On a donc :

$$G^* = |G^*| (\cos\varphi + i \sin\varphi)$$

$$G^* = G' + i G''$$

Où

G' : la partie réelle du module complexe,

G'' : la partie imaginaire du module complexe,

Avec

$$|G^*| = (G'^2 + G''^2)^{1/2}$$

$$\tan\varphi = G''/G'$$

b. Complaisance en fluage statique :

On aurait aussi pu écrire :

$$\varepsilon^* = J^* \sigma^*$$

$$J^* = 1/G^*$$

J^* étant la complaisance complexe vecteur de norme $|J^*|$ et d'angle φ .

On aurait alors :

$$J^* = (\varepsilon_0/\sigma_0) e^{-i\varphi} = |J^*| e^{-i\varphi}$$

$$J^* = |J^*| (\cos\varphi - i \sin\varphi) = J' - i J''$$

Où

J' : la partie réelle de la complaisance complexe,

J'' : la partie imaginaire de la complaisance complexe,

$$|J^*| = (J'^2 + J''^2)^{1/2}$$

$$\tan\varphi = J''/J'$$

$$J^* = 1/G^*$$

$$\text{Entraîne } |J^*| = 1/|G^*|$$

$$\text{Mais } J' = \cos\varphi / |G^*| \text{ donc } J' \# 1/G'$$

$$J'' = \sin\varphi / |G^*| \text{ donc } J'' \# 1/G''$$

3. SUPERIOR PERFORMING ASPHALT PAVEMENTS (SUPERPAVE)

Les nouvelles spécifications SUPERPAVE des liants constituent une approche originale et relativement distincte des dispositions en vigueur dans la plupart des pays. Les spécifications des liants basées sur leurs performances constituent le résultat essentiel de SUPERPAVE. Un objectif majeur de SUPERPAVE a été d'identifier et de valider dans la mesure du possible des propriétés directement reliées aux performances des liants qui sont les réponses aux contraintes issues du trafic et du climat, c'est-à-dire aux modes d'endommagement des chaussées comme l'orniérage, la fissuration thermique ou par fatigue.

a. Description des spécifications des liants :

Classification SUPERPAVE des bitumes (voir tableau vers la fin de la communication) :

Les spécifications SUPERPAVE des liants basées sur leurs performances sont présentées comme étant applicables à la fois aux bitumes purs et aux liants modifiés. Les spécifications sont basées sur le comportement rhéologique de liants, vieillis ou non, pour des conditions spécifiques de climat et de trafic. Donc, les grades de liants sont tout d'abord spécifiés par rapport aux températures de la chaussée, c'est-à-dire par rapport à un couple particulier de températures haute et basse. Les conditions de trafic sont relatives à une vitesse élevée des véhicules et un volume de trafic inférieur à 10^7 charges d'essieux standard de 8,2t.

Le grade du liant est basé sur le climat mais il est ajusté en fonction de deux facteurs dépendant du trafic :

- La vitesse des véhicules ;
- Le volume du trafic.
- Les conditions climatologiques sont caractérisées en termes de :
 - Température maximale de la chaussée pour les sept jours consécutifs les plus chauds ;
 - Température minimale de la chaussée pour la journée la plus froide.

La température maximale de la chaussée pour les sept jours consécutifs les plus chauds est la moyenne, sur au moins vingt ans, des températures maximales de la chaussée relatives aux sept jours consécutifs les plus chauds pour chaque année.

La température minimale de la chaussée pour la journée la plus froide est la moyenne, sur au moins vingt ans, des températures minimales de la chaussée relatives à la journée la plus froide pour chaque année.

La spécification d'un liant utilise la notation **PG x-y** où :

- PG signifie Performance Grade ;
- x est la température haute ;
- y est la température basse.

Le nombre de classes définies par la température haute est de 7. Chacune de ces classes est divisée en sous-classes, définies par la température basse, dont le nombre varie de 3 à 7 en fonction de la classe. Classes et sous-classes sont distantes de 6°C.

Donc, un liant dont le grade est **PG 64-28** doit atteindre les spécifications correspondant à une température haute inférieure à **64°C** et à une température basse supérieure à **-28°C**. Cependant, à cause des spécifications relatives à la fissuration par fatigue qui sont mesurées à une température intermédiaire, un liant ne satisfait pas systématiquement aux spécifications du grade dont la température haute est juste inférieure, c'est-à-dire un liant de grade **PG 64-28** ne vérifie pas systématiquement les spécifications du grade **PG 58-28**.

Au lieu de changer les niveaux de performances selon le grade, les spécifications font appel aux mêmes critères pour tous les grades, mais spécifient différentes températures pour lesquelles les critères doivent être remplis. Les spécifications des liants utilisent des tests sur des liants non vieillis, vieillis à court terme et à long terme. Elles visent à lutter contre :

- L'orniérage ;
- La fissuration par fatigue (due au trafic).
- La fissuration thermique.

Viscosité des bitumes : Viscosimètre Brookfield

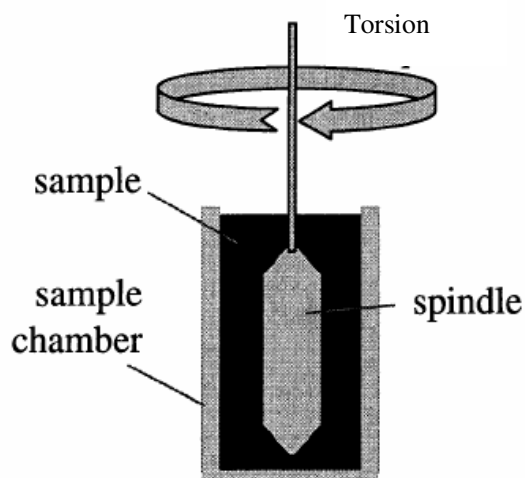
Aux températures d'enrobage et de compactage où les liants se comportent généralement comme des fluides newtoniens, le viscosimètre rotatif Brookfield a été choisi à la place du viscosimètre classique à tubes capillaires. L'appareil Brookfield a été retenu parce qu'il permet des taux de cisaillement contrôlés

qui sont plus proches de ceux observés pendant les opérations de pompage, enrobage, et compactage. On peut conduire des essais à différentes températures en utilisant le même échantillon. L'essai consiste à entraîner un mobile en rotation dans le bitume à caractériser. On mesure alors le couple de torsion à une température de 135 °C.

L'essai permet le contrôle de la viscosité des liants aux températures :

- d'application,
- d'enrobage.

Il permet de déterminer la température limite de pompabilité. La viscosité du liant ne doit pas dépasser 3Pa.s à une température de 135°C.



Viscosimètre

Brookfield

Vieillissements des liants

Les spécifications font appel à des traitements des liants pour simuler :

- Le vieillissement à court terme (pendant la construction de la chaussée) ;
- Le vieillissement à long terme (pendant les premières années de la durée de vie de la chaussée).

Le vieillissement à court terme est obtenu par le test RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) Le vieillissement à long terme est obtenu successivement par le RTFOT puis le PAV (Pressure Aging Vessel) (voir la communication sur le vieillissement des bitumes).

La perte en masse du liant ne doit pas dépasser 1%.

b. Tests mécaniques sur liants :

La rigidité des bitumes peut varier considérablement en fonction des conditions de température et de charge. Il en résulte qu'il est essentiel que les caractéristiques couvertes par les spécifications soient choisies pour un niveau de température et de charge spécifiques à l'environnement et aux contraintes du trafic. Pour des conditions de température moyennes ou basses, plus de la moitié de la résistance à la déformation peut résulter de la composante élastique (ou module de conservation) du module de rigidité du liant. La proportion relative des composantes élastique et visqueuse du module est caractérisée par l'angle de déphasage (δ) et trouve son importance dans l'orniérage, la tenue à la fatigue et la résistance à

la fissuration thermique. Il y a donc lieu d'en tenir compte dans des spécifications qui sont liées à des critères de performance.

Trois tests sont utilisés pour déterminer le grade des liants et sont à la base des spécifications :

- Rhéomètre à poutre fléchissante à trois points – Bending Beam Rheometer (BBR) ;
- Rhéomètre à cisaillement dynamique – Dynamic Shear Rheometer (DSR) ;
- Test de traction directe – Direct Tension Test (DTT).

Rhéomètre « poutre en flexion à trois points » :

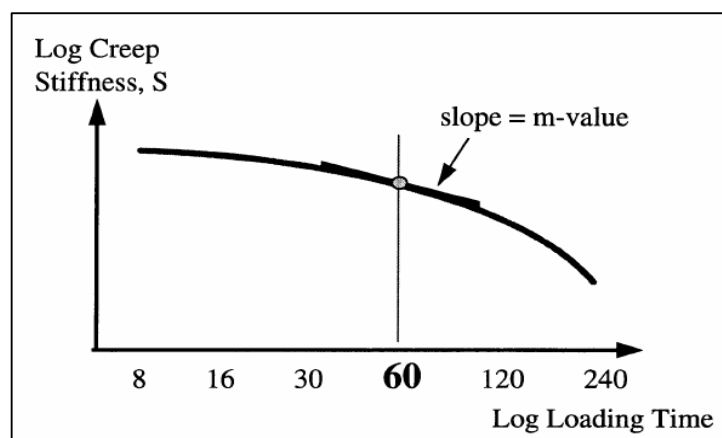
L'essai consiste à soumettre en flexion à 3 points un barreau de liant à basse température.

- La charge est de 100 g.
- Le temps de charge varie de 0 à 4 min.
- On enregistre la déflexion en fonction du temps, ce qui permet le calcul de **S** (module de flexion) et de **m** (susceptibilité au temps de charge qui est la pente de la tangente à la courbe $\log S=f(t)$ à 60 secondes).

$$S(t) = \frac{PL^3}{4bh^3D(t)}$$

P : force (100g)
L : longueur de la poutre de liant 102mm
b : largeur (12.5mm)
h : épaisseur (6.25mm)
D(t) : déformation

Le rhéomètre à poutre en flexion (Bending Beam Rheometer BBR), a été conçu spécifiquement pour les mesures à basses températures à partir desquelles le module du liant dépasse 30MPa. De par sa conception, le rhéomètre BBR autorise des mesures de rigidité allant jusqu'à 3GPa. Cette amplitude dépasse les possibilités des rhéomètres à cisaillement dynamique (Dynamic Shear Rheometer DSR) qui fonctionnent suivant un régime oscillatoire avec une géométrie à plateaux parallèles. De plus, le BBR se prête à des mesures de fluage suivant un processus de charge en traction/compression qui est représentatif de la fissuration à basse température. L'essai est conduit sur un liant vieilli sur RTFOT et PAV.



**Relation entre le logarithme du module au fluage et de la pente m
avec le temps de chargement par le BBR**

Les spécifications demandées pour un liant soumis au BBR est de : $S \leq 300 \text{ MPa}$ et $m \geq 0.3$ sur le résidu RTFOT+PAV.

Rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR) :

Les rhéomètres à cisaillement dynamique (DSR) sont utilisés depuis longtemps pour caractériser les propriétés viscoélastiques des bitumes purs et modifiés. Dans la méthode d'essai du SHRP, un système à plateaux parallèles est utilisé :

- des plateaux de 25 mm de diamètre avec une épaisseur de liant de 1 mm, pour des essais à la température maximum prévue lors de la conception de la chaussée, et pour des modules complexes se situant dans un intervalle de 1,0 à 2,2 kPa,
- des plateaux de 8 mm de diamètre avec une épaisseur de liant de 2 mm, pour des essais à la température moyenne de la chaussée et pour des modules complexes se situant à environ 5,0 MPa.

L'essai est conduit à 1,6 Hz (10rad/s) et le niveau de déformation est déterminé en fonction de la valeur du module du liant afin d'obtenir une réponse linéaire. En mesurant le couple (contrainte) nécessaire pour faire osciller les plateaux et en mesurant la déviation angulaire des plateaux (déformation), le module complexe de cisaillement peut être mesuré.

Le DSR permet d'obtenir des mesures dans un intervalle allant des températures moyennes aux températures élevées de la chaussée. Les données obtenues pour chaque essai comprennent le module complexe G^* , et l'angle de déphasage δ . A la température maximum de la chaussée (T_{max}), le paramètre $G^*/\sin\delta$ est utilisé comme critère de spécification, et à un niveau de température intermédiaire (T_{int}), le paramètre $G^*\sin\delta$ est utilisé aussi comme critère de spécification.

La température intermédiaire est la moyenne des températures haute et basse augmentée de 4°C.

Les spécifications auxquelles il faut se référer sont :

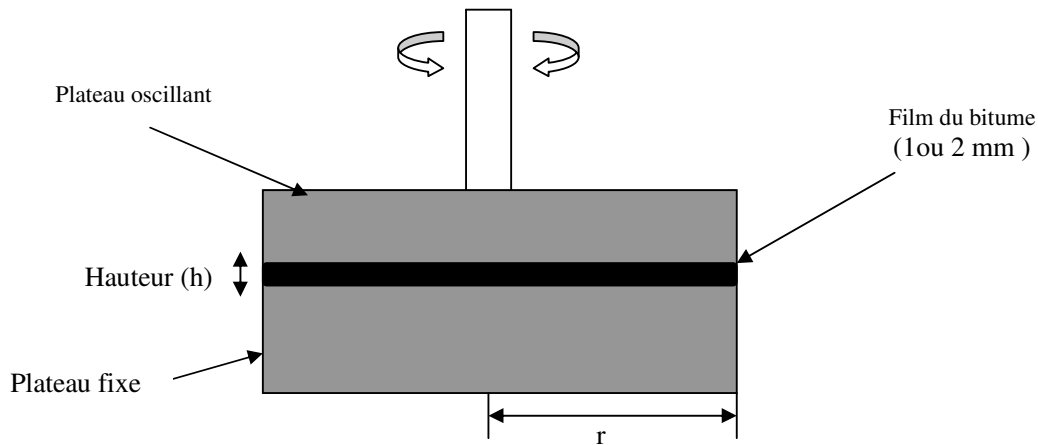
Orniérage :

- $G^* / \sin \delta \geq 1 \text{ KPa}$ (liant frais)
- $G^* / \sin \delta \geq 2.2 \text{ KPa}$ (Résidu RTFOT)

Fatigue :

- $G^*.\sin \delta \leq 5 \text{ MPa}$ (Résidu RTFOT+PAV)

Moment de torsion (T)
Angle de rotation (θ)



**Film du bitume pris en sandwich entre
les deux plateaux du DSR**

Le DSR est utilisé pour caractériser le comportement visqueux et élastique du bitume par la mesure du module complexe de cisaillement (G^*) et l'angle de phase (δ).

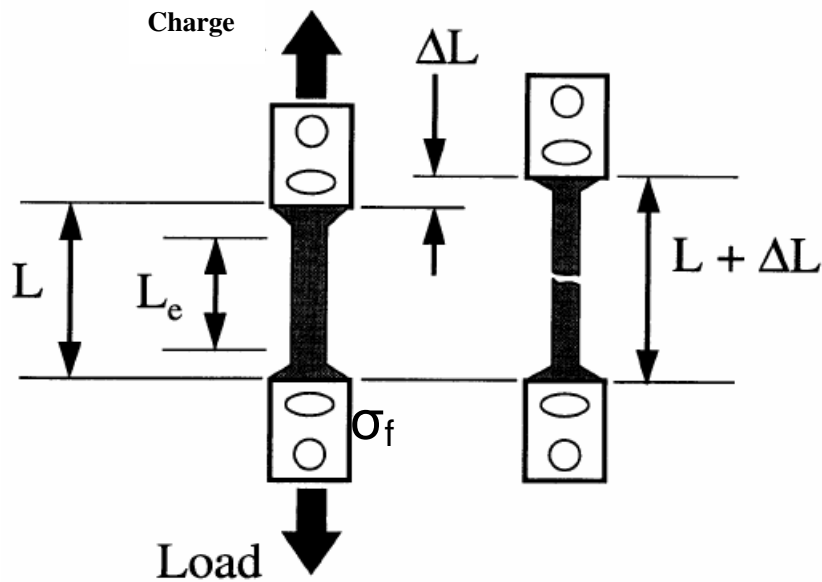
Essai de traction directe (DTT):

Dans une spécification vraiment liée à des critères de performance fondés sur les propriétés fondamentales des matériaux, les propriétés de tenue à la fatigue et à la rupture doivent faire partie des spécifications.

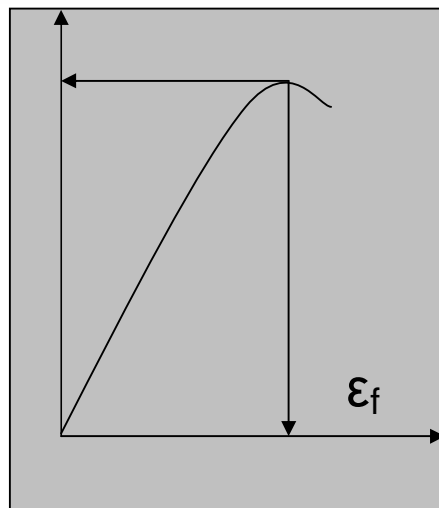
L'essai de traction directe, a été mis au point pour permettre la mesure de la résistance à la traction des bitumes à basse température. Le test est valide dans des zones de température où la déformation nécessaire à la rupture se situe dans un intervalle de moins de 1% jusqu'à environ 10%. Dans cet intervalle, les bitumes évoluent rapidement d'une rupture fragile à une rupture ductile. Une rigidité au fluage plus importante ($300 \text{ MPa} < S < 600 \text{ MPa}$ et $m > 0.300$) est permise par la spécification pourvu qu'une élongation minimale à la rupture soit satisfaite.

La spécification est :

- La valeur de l'élongation à la rupture du liant après RTFOT et PAV doit dépasser 1% à la température basse augmentée de 10°C et à 1mm/min.



$$\text{failure strain } (\epsilon_f) = \frac{\text{change in length } (\Delta L)}{\text{effective gauge length } (L_e)}$$



$\Delta L / L_e \geq 1 \% \text{ sur (Résidu RTFOT+PAV)}$

4. **SPÉCIFICATIONS SUPERPAVE POUR LES ENROBÉS BITUMINEUX**

La méthode de formulation SUPERPAVE est basée sur le concept de maniabilité lors de la pose ainsi que de la performance de l'enrobé dans le temps.

Le système permet en outre d'anticiper le comportement d'un enrobé bitumineux sur la base de ses propriétés intrinsèques. En pratique, les performances recherchées sont :

- la résistance à l'orniérage,
- la résistance à la fissuration par fatigue
- la résistance à la fissuration thermique.

De nouvelles procédures d'essais et des équipements de mesures ont été développées pour prédire la performance des enrobés:

- l'essai de cisaillement "Superpave Shear Tester"
- l'essai de tension indirecte, "Indirect Tensile Tester"

SUPERPAVE comporte trois niveaux de formulation. En pratique, SUPERPAVE fixe pour les agrégats, pour le bitume, pour les enrobés, des critères adaptés à une classe température minimale (- 46°C à -10°C) et à une classe de température maximale (46°C à 82°C) de service, tout en considérant le volume de trafic que la chaussée devra supporter. Le trafic est subdivisé en trois catégories:

- moins de 100 camions/jour sur 20 ans;
- jusqu'à 1000 camions/jour sur 20 ans;
- plus de 1000 camions/jour sur 20 ans.

Le premier niveau de formulation sert à établir les proportions des composants bitumes et granulats sélectionnés en fonction des critères SUPERPAVE en utilisant une méthode volumétrique théorique. Trois granulométries de départ sont d'abord choisies. L'étude de maniabilité cherche la proportion optimale de bitume pouvant être introduite dans le squelette granulaire de l'enrobé. Une presse à cisaillement giratoire est utilisée pour fabriquer des échantillons d'enrobés dont les caractéristiques volumétriques doivent par la suite être déterminées. La granulométrie retenue est celle qui respecte le mieux les exigences de SUPERPAVE.

Pour le deuxième et troisième niveau du système on ajoute des essais supplémentaires de résistance à la déformation, de résistance à la fatigue et de la résistance à la fissuration à basse température.

Six propriétés des enrobés bitumineux ont été identifiées comme déterminant leur comportement dans la chaussée :

- La résistance à la fatigue,
- La résistance à l'orniérage,
- La résistance à la fissuration à basse température,
- La tendance au vieillissement à court terme (durcissement à l'enrobage) et à long terme (vieillissement sur place),
- La sensibilité à l'eau.

L'objectif est de définir un essai par propriété, puis de constituer en les combinant une méthode de formulation.

Les critères de choix entre les essais candidats sont :

- La sensibilité aux paramètres de composition,
- La capacité à simuler les conditions de sollicitation de la réalité,
- La facilité d'utilisation dans la pratique,
- La possibilité d'être utilisés sur des éprouvettes d'enrobés préalablement vieillis ou soumises à l'action de l'eau.

Ensuite on entame l'étude systématique de l'effet des caractéristiques des bitumes et des granulats sur les six propriétés identifiées, et par là sur le comportement des chaussées bitumineuses.

i. Essai de fatigue :

Pour les essais de fatigue, le choix s'est circonscrit entre la fatigue en flexion et la fatigue en compression diamétrale.

Bien que faisant l'objet d'un programme d'essai assez complet, l'essai de fatigue en compression diamétrale répétée a été écarté du choix final car on a constaté qu'à 20°C et même à 0°C la rupture sous chargement répété se produit par deux mécanismes très différents :

- la fatigue (non seulement par traction dans le plan diamétral mais aussi par cisaillement) ,
- la déformation permanente, qui est très importante par suite des fortes concentrations de contrainte, répétées toujours en compression, sous les bandes de chargement ;

Au bout de quelques temps on ne contrôle plus l'état de contrainte dans l'éprouvette qui, d'ailleurs, est toujours très complexe.

Le choix s'est donc porté vers les essais de fatigue en flexion. Il fallait encore choisir entre les essais de fatigue dits « rapides », sous sollicitation sinusoïdale, sans période de repos, à force ou à flèche constante, très pratiqués en Europe, et les essais de fatigue dits « lents », à chargements en impulsion séparés par des périodes de repos, tels que pratiqués dès l'origine à l'université de Berkeley.

Les résultats obtenus au LCPC, montrant que dans des essais rapides il se produit un échauffement localisé de l'éprouvette par dissipation d'énergie due à la viscosité, qui modifie sa raideur. Cependant, l'importance reconnue des phénomènes d'autoréparation pendant les périodes de repos a poussé l'équipe de Berkeley à retenir les essais de fatigue en impulsion.

Il s'agit d'essais de flexion en quatre points de barreaux parallélépipédiques, avec un chargement de 1/10 s et une période de repos de 9/10 s. Le chargement consiste en une impulsion de charge constante ou de flèche constante, puis l'éprouvette est ramenée de façon forcée à sa position initiale.

L'inconvénient de ces essais est leur grande durée si l'on veut obtenir la rupture pour un nombre de cycles de chargement semblable à celui rencontré dans la réalité.

Les réflexions de Berkeley portent sur la possibilité de caractériser l'enrobé par son comportement à un faible nombre de cycles de chargement, correspondant à une durée d'essai d'une à deux heures, par une approche énergétique.

ii. Essai de déformation permanente :

Le choix de l'essai s'est circonscrit entre les essais de fluage statique (en compression uniaxiale, en cisaillement, ou sous chargement triaxial) et les essais de cisaillement sous chargement répété. Les essais sous charge roulante (catégorie dans laquelle peut être classé l'essai à l'ornièreur LCPC) ont été réservés à la phase de validation par simulation, sous forme d'essais sur structure de chaussées en semi vraie grandeur. La critique faite aux essais tels que l'essai à l'ornièreur est qu'ils ne permettent pas la détermination d'une grandeur fondamentale intrinsèque au matériau.

Les essais de fluage statique ont été écartés car on a constaté qu'ils ne permettent pas de mettre en évidence les améliorations de résistance aux déformations permanentes résultant non pas de l'emploi d'un squelette granulométrique frottant ou d'un liant conservant une consistance forte aux températures élevées mais d'un caractère élastique du liant (tel qu'on l'obtient par sa modification par un élastomère thermoplastique).

Un essai assez complexe a finalement été retenu, dans lequel une éprouvette cylindrique maintenue à une température pouvant aller jusqu'à 60°C est soumise simultanément à un cisaillement répété (dans un seul sens) perpendiculairement à son axe et à une compression répétée parallèlement à son axe, ces deux sollicitations répétées étant en phase, et à une pression de confinement constante.

Les sollicitations répétées consistent en impulsions séparées par des périodes de repos, chaque cycle de chargement durant une seconde, comme dans l'essai de fatigue. On mesure les déformations permanentes horizontale et verticale résultant de l'application de ces forces.

L'essai est actuellement poursuivi pendant dix heures, mais on cherche à modifier le temps de chargement pour essayer de réduire la durée de l'essai à une heure. Le travail consiste actuellement à définir une série d'états de contrainte à appliquer, à déterminer quelle est la grandeur la plus caractéristique de la résistance à déformations permanentes d'un enrobé. La déformation permanente en cisaillement paraît la plus

significative, la mesure de la déformation axiale mettant en évidence des phénomènes de dilatance si la pression de confinement est faible.

iii. Essai de fissuration thermique :

L'essai retenu est un essai de fissuration par retrait thermique, du type de celui mis au point il y a de nombreuses années par M. Dacchi au LCPC pour les matériaux d'assises traités aux liants hydrauliques et développé, il y a quelques années pour les enrobés bitumineux par le professeur Arand en Allemagne. On cherche à travers cet essai à connaître la température basse entraînant la fissuration. Les températures de fissuration sont très basses dans un tel essai (-20 à -30 °C), qui correspond aux risques de fissuration observés dans des climats très froids.

iv. Essai de vieillissement à court et à long terme :

Les recherches ont montré que dans le vieillissement, qu'il soit à court ou à long terme, le facteur granulats était important : il est donc justifié qu'à côté des essais de vieillissement sur bitume on recherche des essais sur enrobés.

Pour le durcissement à l'enrobage (vieillissement à court terme), le choix a porté entre un essai de « malaxage » prolongé (dans le matériel RTFOT) pendant six heures à 135 et 163°C, et un essai de chauffage prolongé à l'étuve, aux mêmes températures pendant huit heures, d'un enrobé à l'état lâche. Après ce traitement, l'enrobé est compacté et l'on détermine une caractéristique mécanique que l'on compare à celle d'éprouvettes fabriquées dans les conditions habituelles. Dans la phase actuelle de la recherche, cette caractéristique mécanique est le module réversible déterminé en compression diamétrale. L'essai de malaxage prolongé est beaucoup plus sévère, et c'est l'essai de chauffage prolongé qui a été retenu.

Pour le vieillissement à long terme, le chauffage à l'étuve d'une éprouvette compactée est considéré comme ne répondant pas à la question car le mécanisme du vieillissement à température élevée est différent de celui du vieillissement aux températures de service.

L'essai doit donc être fait aux températures de service. L'idée d'accélérer le vieillissement par augmentation de la pression d'oxygène, en faisant séjourner l'éprouvette dans un récipient sous forte pression, a dû être abandonnée car cette dernière se fissure lors de son retour à la pression atmosphérique et on n'observe donc pas d'augmentation de module.

L'essai retenu est un essai consistant à forcer un courant d'oxygène à travers une éprouvette d'enrobé placée dans une cellule triaxiale à 60°C, on constate une augmentation de module de 80% en sept jours. On étudie la possibilité de réduire la durée de l'essai en augmentant légèrement la température.

v. Essai de sensibilité à l'eau :

Il s'agit ici de déterminer la capacité d'un enrobé à résister au désenrobage causé par l'action de l'eau et c'est d'ailleurs l'objet de l'essai français Duriez.

5. LA METHODE DE FORMULATION DES ENROBES (AAMAS : ASPHALT AGREGATE MIXTURES ANALYSIS SYSTEM) :

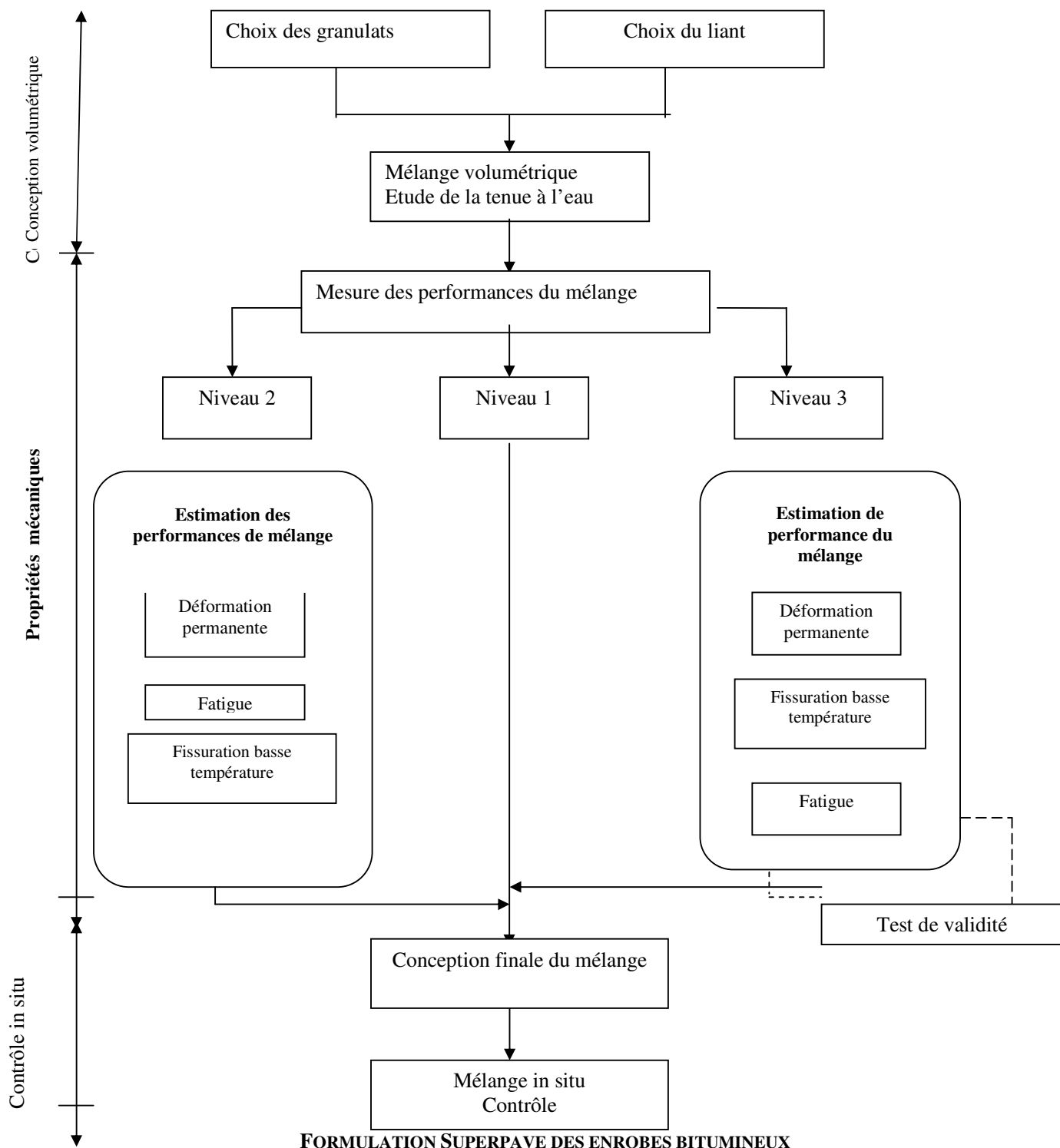
Les essais mis au point sont combinés de la façon suivante pour constituer une méthode de formulation des enrobés :

- Les composants, granulats et liant, sont choisis en fonction de certaines règles.
- Une première phase de la formulation consiste à étudier la composition volumétrique de diverses compositions, notamment la quantité de vides des granulats, après compactage Marshall. Cette phase comporte également l'étude de la tenue à l'eau.

- Dans la seconde phase, sur un premier choix de formules, sont déterminées la résistance à la fatigue, la résistance aux déformations permanentes, et éventuellement la résistance à la fissuration à basse température. La résistance à la fatigue associée au module permet de procéder au dimensionnement en épaisseur. La seconde phase permet le choix de la formule de chantier.
- Le contrôle comporte à la fois la vérification de la composition par un essai de désenrobage.

La philosophie de cette méthode de formulation est la suivante :

- ❖ Etude, dans une première phase de la compactabilité.
- ❖ Etude séparée, par plusieurs niveaux d'essais, de propriétés de l'enrobé liées à son comportement dans la chaussée.



i. Premier niveau de formulation :

Ce premier niveau Inclut les étapes suivantes :

- Choisir le grade du liant,
- Choisir l'origine et les propriétés des granulats,
- Mesurer la compactabilité des liants et des granulats,
- Déterminer la conception de la structure des granulats,
- Déterminer la teneur en liant,
- Evaluer la résistance à l'eau.

ii. 2ème et 3ème niveau de formulation :

La conception des enrobés pour le niveau 2 semble être la plus prédominante. Elle intéresse les projets routiers dont le trafic est supérieur à 10^6 mais inférieur à 10^7 essieux équivalents de 8.2t.

Pour la conception du mélange du niveau 2, Superpave utilise la méthode volumétrique du niveau 1 et optimise cette conception en tenant compte de la déformation permanente, de la fatigue et de la fissuration à basse température.

Le cisaillement répété à hauteur constante, le cisaillement simple à hauteur constante, le champ de fréquences à hauteur constante et les essais de traction indirecte sont conduits pour prévoir la déformation permanente et les fissurations de fatigue. Le fluage suite à la traction indirecte à basse température ainsi que la traction indirecte à basse température, sont employés pour prévoir la fissuration à basse température.

Les prévisions de la déformation permanente dépendent des résultats de deux essais : champ de fréquence à hauteur constante, et cisaillement simple à hauteur constante ; Ces essais sont conduits à une température effective pour la déformation permanente. Les prévisions des fissurations par fatigue exigent trois essais : champ de fréquence à hauteur constante, cisaillement simple à hauteur constante, et la traction indirecte, tous conduits à une température effective pour la fatigue.

La température effective pour la déformation permanente, est définie comme étant l'unique température d'essai pour laquelle, le taux de déformation permanente produite serait équivalent à celui mesuré en considérant chaque saison tout au long de l'année.

De même pour la température effective pour la fatigue,. Les températures effectives pour la déformation permanente et la fatigue sont calculées à partir des données historiques de la température pour l'emplacement de projet.

Il convient à signaler que le système Superpave ne prévoit pas les fissurations par fatigue et celles produites à basse température pour des mélanges destinés au revêtement.

La conception des enrobés pour le niveau 3 est semblable à celle du niveau 2, mais utilise un ensemble plus complet de propriétés de performance des mélange et rapporte des prévisions plus fiables pour les différents modes de ruine des chaussées.

Pour une caractérisation complète des propriétés des enrobés adaptée au niveau 3, deux essais supplémentaires sont ajoutés à ceux déjà cités pour le niveau 2. Les essais exigés pour le niveau des 3 sont les suivants :

- Cisaillement répété à contrainte constante,
- Champs de fréquences à hauteur constante,
- Cisaillement simple à hauteur constante,
- Déformation uniaxiale (essai facultatif),
- Etat hydrostatique de contrainte (essai facultatif),
- Résistance à la traction indirecte,

- Fluage à la traction indirecte.

L'essai volumétrique (état hydrostatique de contrainte), la déformation uniaxiale et le cisaillement simple à hauteur constante sont employés pour caractériser le comportement élastique non linéaire du squelette granulaire, et sont liés à la déformation permanente du mélange.

iii. Prévion de la performance :

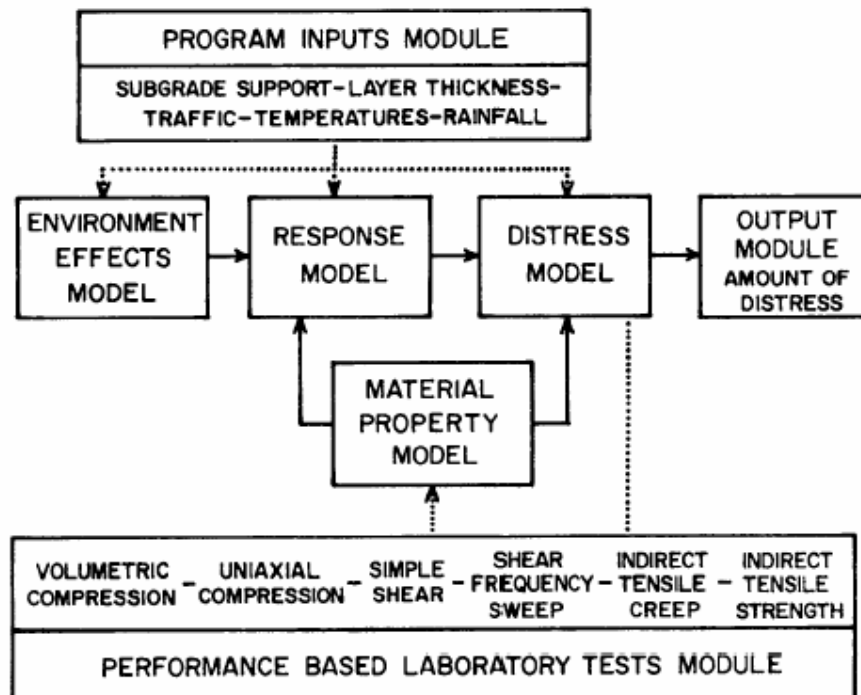
Des modèles de performance des chaussées qui prévoient le développement de la déformation permanente, les fissurations de fatigue ainsi que la fissuration à basse température avec le temps ont été élaborés et sont inclus dans le logiciel de Superpave.

Un modèle de performance de chaussée peut évaluer ou concevoir un enrobé bitumineux de façon à réduire une déformation spécifique ou bien une combinaison de déformations. Il comporte 4 parties :

- modèle des propriétés matériaux,
- modèle d'effets environnementaux,
- modèle de réponse de la chaussée,
- modèle des déformations de la chaussée.

Le programme de caractérisation des mélanges bitumineux calcule les propriétés élastiques non linéaires, viscoélastiques, plastiques et à la rupture d'un enrobé à partir des essais de performance.

Les propriétés sont utilisées dans le modèle de réponse de la chaussée pour prévoir le comportement d'un mélange soumis au trafic et aux charges environnementales. Certaines de ces propriétés des matériaux sont également employées dans le modèle de déformations de la chaussée. Le programme de réponse, qui est un programme en éléments finis, calcule les contraintes et les déformations dans l'enrobé bitumineux suite au trafic et aux conditions environnementales. Le programme de déformations de la chaussée calcule la déformation permanente dans le temps à partir des propriétés du mélange et des déformations appropriées (dus au trafic et aux charges environnementales).



SCHEMA RELATIF AU MODELE DE PREDICTION DES PERFORMANCES SUPERPAVE

6. CONCLUSION

A première vue, les spécifications américaines proposées par le SHRP et les spécifications françaises semblent très différentes car :

- Les spécifications américaines sont essentiellement basées sur le module déterminé sous sollicitations sinusoïdales ou à partir de la fonction fluage,
- Les spécifications françaises reposent principalement sur la température de ramollissement,
- Les spécifications américaines prennent en compte l'évolution in situ en la simulant par le PAV. Néanmoins, un examen plus approfondi permet de montrer que :
 - Le fil conducteur est le même, car il tend à mieux définir le liant de base, à se prémunir contre l'orniérage et les diverses formes de fissuration,
- La lutte contre l'orniérage est la première préoccupation dans les deux cas, ce qui entraîne, d'une part, la même largeur de classe (6°C) pour les bitumes purs et, d'autre part, la définition d'une consistance minimum après RTFOT. Elle se traduit par un module minimal aux USA et par une température de ramollissement minimale en France,
- La lutte contre les diverses formes de fissuration n'est pas oubliée et entraîne une la définition d'une consistance maximale. Elle se traduit par deux modules maximaux après PAV aux USA et, en France, par un accroissement maximal de la température de ramollissement tenant compte d'une évolution in situ estimée à partir des récupérations de liant effectuées sur chantier. Les français ont préféré limiter l'accroissement de la

température de ramollissement plutôt que limiter sa valeur afin de conserver une certaine homogénéité du vieillissement à l'intérieur d'une catégorie.

Toutefois, une comparaison globale des deux systèmes de spécifications peut se résumer comme suit :

Les spécifications françaises ont l'avantage de n'utiliser que du matériel simple, peu coûteux et ne nécessitant pas de personnel très spécialisé. Par contre, elles présentent plusieurs inconvénients :

- ☐ Les consistances ne sont appréciées qu'indirectement par les pénétrations et les températures de ramollissement. L'interprétation des résultats implique donc l'existence de relations biunivoques entre ces données technologiques et les propriétés rhéologiques intrinsèques des matériaux. Elle suppose également l'acquisition d'une « culture générale » permettant de les expliciter et de les exploiter. Cela explique, en grande partie, les difficultés rencontrées pour établir des spécifications sur les liants modifiés,
- ☐ L'évolution in situ n'est prise en compte que de façon indirecte et arbitraire.

Les spécifications américaines, inversement, présentent l'avantage de mesurer directement les propriétés rhéologiques intrinsèques des matériaux, mais :

- ☐ Elles nécessitent l'utilisation de matériel plus complexe, plus coûteux et du personnel plus spécialisé,
- ☐ Leur pertinence n'est pas encore vraiment établie, en particulier en ce qui concerne l'adéquation au comportement sur chantier.

A long terme on peut penser que la nécessité d'harmoniser les spécifications des liants, qu'ils soient modifiés ou non, pourrait amener à choisir des caractéristiques intrinsèques et donc à se rapprocher de l'esprit des spécifications SHRP.

Classification SUPERPAVE des bitumes

Classe de comportement	PG 46			PG 52							PG 58					PG 64						PG 70						PG 76					PG 82					
	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34	
Moyenne des 7-jours, Température maximale ^(a) pour le dimensionnement, °C	46			52							58					64						70						76					82					
Température intermédiaire pour le dimensionnement, °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	26	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28	
Température minimale ^(a) pour le dimensionnement, °C	-34	-40	-46	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-46	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-40	-10	-16	-22	-28	-34	-10	-16	-22	-28	-34	
Bitume original																																						
Température du point d'inflammabilité, T48: Minimum, °C	230																																					
Viscosité, >=3.00 Pa.s ASTMD4402: ^(b) , Température d'essai °C	135																																					
Cisaillement annulaire TP5 : ^(c) G*/sinδ>=1.00 KPa, @ 1.6 Hz, Température d'essai °C	46			52							58					64						70						76					82					
Après RTFOT (T240) ou TFOT (T179)																																						
Perte maximale de masse en %	1.00																																					
Cisaillement annulaire TP5 : G*/sinδ>=2.20 KPa, @ 1.6 Hz, Température d'essai °C	46			52							58					64						70						76					82					
Après RTFOT (T240) et PAV (PP1)																																						
Température pour PAV °C ^(c)	90			90							100					100						100(110)						100(110)					100(110)					
Cisaillement annulaire TP5 : G*/sinδ<=5.00 MPa, @ 1.6 Hz, Température d'essai °C	10	7	4	25	22	19	16	13	10	7	25	22	19	16	13	31	28	25	22	19	16	34	31	28	25	22	19	37	34	31	28	25	40	37	34	31	28	
Durcissement physique ^(e)	Rapport																																					
Module de rigidité TP1 @ 60s : ^(f) S<=300 Mpa, m-value >= 0.300, Température d'essai °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24	
Allongement à la rupture>=1.00% ^(f) , TP3 @ 1mm/min, Température d'essai °C	-24	-30	-36	0	-6	-12	-18	-24	-30	-36	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	-30	0	-6	-12	-18	-24	0	-6	-12	-18	-24	