

DETERMINATION DU MODULE DE RIGIDITE AU LABORATOIRE SUR DES ENROBES A MODULE ELEVE (EME)

Par : Mourad EL FADILI¹ / LPEE

INTRODUCTION

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

Cet engouement a été à l'origine d'un projet de recherche initié par des laboratoires à l'étranger, et suivi par le centre national des études routières (CNER) dans le cadre d'un travail de fin d'étude, sur l'amélioration des performances mécaniques des structures de chaussées moyennant des techniques afin d'aboutir progressivement à des données qui serviraient de base pour les différents intervenants.

I- MODULE COMPLEXE DES BETONS BITUMINEUX

Les enrobés bitumineux sont des matériaux viscoélastiques, leurs propriétés mécaniques dépendent de plusieurs facteurs tels que la température, la durée de la sollicitation qu'ils subissent et l'hétérogénéité du matériau qui complique en outre le problème.

-Hypothèse : Essais harmonique non transitoire

L'application d'une sollicitation sinusoïdale fait apparaître un retard de la déformation sur la contrainte.

$$\sigma^* = \sigma \cdot e^{i\omega t} \quad \text{Et} \quad \varepsilon^* = \varepsilon \cdot e^{i(\omega t - \varphi)}$$

Où σ et ε expriment l'amplitude des oscillations, ω la pulsation et i le symbole des imaginaires. Cette différence de phase φ , appelée angle de perte. Cet angle est nul pour le solide élastique de Hooke, atteint 90° pour le liquide de Newton. Pour les corps viscoélastiques, elle dépend de la fréquence.

Le rapport σ^* / ε^* conduit à définir le module complexe:

$$G^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma}{\varepsilon} e^{i\varphi} = G' + i G''$$

Le Module complexe peut encore se représenter par ses composantes: élastique (réelle) E_1 et visqueuse (imaginaire) E_2 :

$$E(i\omega) = |E| e^{i\varphi} = E_1 + i E_2$$

$$|E| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

$|E|$ est la valeur absolue du module complexe appelé module de rigidité.

¹ Ingénieur au Centre Expérimental des Grands Travaux (CEGT/LPEE)

La première de ces composantes (E) est la plus importante sur le plan pratique, la seconde (ϕ) par contre intervient dans l'interprétation fondamentale du comportement des matériaux, et permet notamment l'estimation du frottement interne et le calcul de l'énergie dissipée dans la matière.

II- ENROBES A MODULE ELEVE (EME) :

Le principe des EME repose sur deux idées pour augmenter notablement le module de rigidité et une meilleure tenue à la fatigue :

- le remplacement du bitume classique par un bitume dur 20/30 ou hyper dur 10/20.
- Par addition des produits industriels, comme : polyéthylène, fibres cellulosique, fibres de verre, fibres de roche, bitume additionné de glisonite (Asphalte naturel très dur)

EME obtenus par des additifs polymères :

L'additif polymère est un produit de recyclage des matériaux plastique, extrudé densifié. Il s'emploi directement au malaxage des enrobés. Le pourcentage à introduire dans les formules est compris entre 0.4% à 0.6% et jusqu'à 1% pour les zones particulières.

Propriétés de l'additif utilisé:

Propriétés	Valeur type
Densité (g/cm ³)	0.91 - 0.965
Point de fusion (°C)	140 - 150
Granulométrie (mm)	4
Charge (%)	<5%
Plastomères (%)	>95%

III- ETUDE EXPERIMENTALE SUR DES ENROBES ET DES ENROBES A MODULE ELEVE

En raison de l'influence essentielle de la température et les sollicitations sur le comportement de la chaussée à long terme, le choix des paramètres de formulation et de la qualité des composants est à mettre en relation avec l'importance des conditions climatiques et du trafic.

L'objectif des essais réalisés est de déterminer le module de rigidité des mélanges hydrocarbonés modifiés avec des ajouts polymères et non modifiés pour différentes valeurs de température et même fréquence.

Les caractéristiques d'identification des composants des formules retenues sont présentées dans le tableau suivant :

Caractéristiques d'identification des granulats et sable

Tamis (mm)	Tamisa en %									ES à 10 % fine	LA (%)	MDE (%)	CA (%)
	0.08	2	4	6,3	10	12,5	14	20	25				
F1 (0/10)	5.2	40	57	80	100	-	-	-	-	68 à 70	20 à 25	18 à 22	15 à 17
F1 (0/10) +0.6% polymère	5.2	40	57	80	100	-	-	-	-				
F2 (0/25)	5	33	43	50	64	72	76	90	100				

Le bitume utilisé est un 40/50, provenant de la Samir.

	K	α	g	S	s	f	Σ	TL	Masse volumique g/cm ³	Compacité %
F1 (0/10)	3.5	0.98	0.2114	0.6567	0.0905	0.0514	9.51	5.4%	2.32 à 2.38	93.5 à 97
F2(0/25)	2.25	0.98	0.5	0.351	0.099	0.05	8.81	3.8%	2.32 à 2.38	93.5 à 96
F1+0.6% de polymère (0/10)	3.5	0.98	0.2114	0.6567	0.0905	0.0514	9.51	5.4%	2.32 à 2.38	93.5 à 97

Composition et surfaces spécifiques et masses volumique des formules retenues

Où :

K, module de richesse

Σ : surface spécifique conventionnelle en m²/Kg,

$$100\Sigma = 0.20g + 2.2S + 12s + 135f$$

La teneur en liant (% bitume) = $K \sqrt[5]{\Sigma} \alpha$

avec les proportions pondérales :

g : % des éléments supérieurs à 6mm

S : % des éléments compris entre 6 et 0.315mm

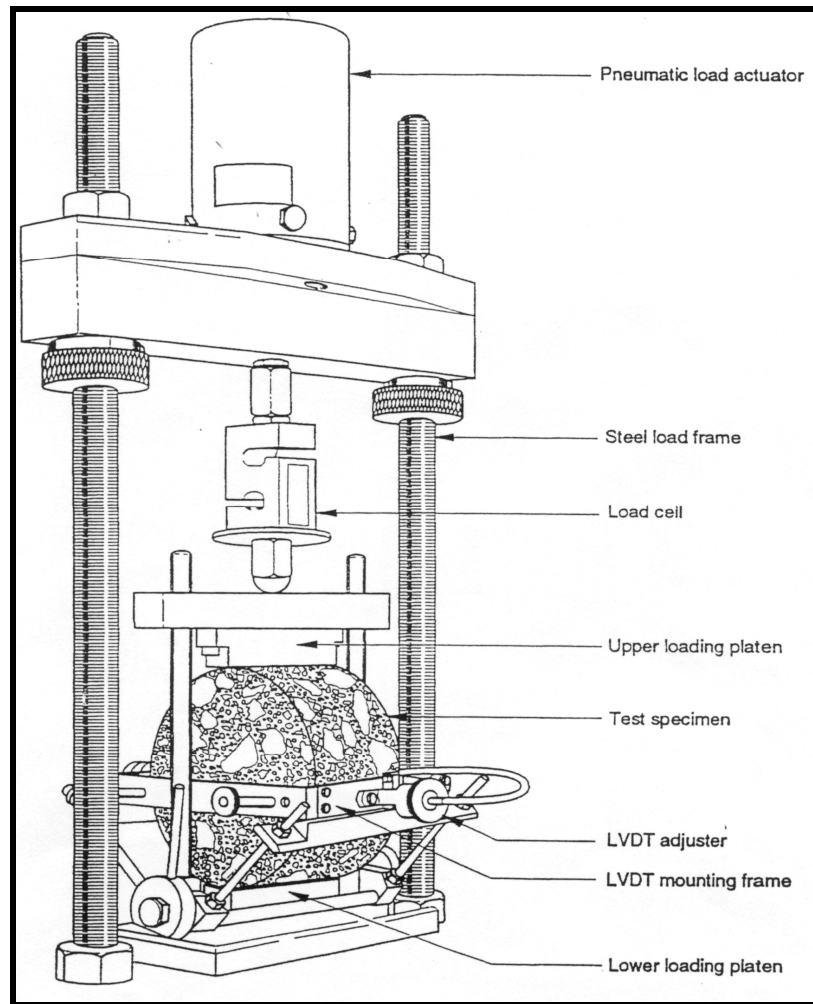
s : % des éléments compris entre 0.315 et 0.08mm

f : % des éléments inférieurs à 0.08mm

α : coefficient correcteur, destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats. Si cette masse volumique est égale 2.65 g/cm³, $\alpha=1$. Sinon $\alpha=2.65/\text{masse volumique des granulats}$.

1-Matériel d'essais

Le dispositif utilisé pour la détermination de module de rigidité est schématisé dans la figure ci-après.



Appareil pour essai de module de rigidité

2-Formule de calcul de E :

La détermination des composantes du module complexe à partir des résultats dont nous disposons nécessite la résolution théorique de l'équation du mouvement d'une éprouvette viscoélastique à profil cylindrique soumise à des pulsations.

Pour le cas des matériaux viscoélastiques et thermoplastiques, soumis à des vibrations forcées, nous nous contenterons de mentionner les relations entre les grandeurs mesurées et les grandeurs recherchées selon Huet[12] et Cornil [13].

Les couples des valeurs caractérisant le module complexe $E^*(i\omega)$ sont sa partie réelle E_1 et sa partie imaginaire E_2 données par les relations :

$$E_1(\omega) = \gamma \left(\frac{F_0}{f_0} \cos \psi + \frac{\mu}{10^6} \omega^2 \right)$$

$$E_2(\omega) = \gamma \left(\frac{F_0}{f_0} \sin \psi \right)$$

Sa valeur absolue $|E^*|$ et son angle de phase φ sont donnés par :

$$|E^*| = \gamma \left[\left(\frac{F_0}{f_0} \cos \psi + \frac{\mu}{10^6} \omega^2 \right)^2 + \left(\frac{F_0}{f_0} \sin \psi \right)^2 \right]^{1/2} \quad (A)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \left(\frac{F_0 \sin \psi}{F_0 \cos \psi + \frac{\mu}{10^6} f_0 \omega^2} \right)$$

où :

F_0 : l'amplitude de la force appliquée

f_0 : l'amplitude de déplacement résultant de l'application de la force F_0 .

ψ : l'angle de déphasage entre la force et le déplacement.

ω : la pulsation

γ et μ sont des coefficients qui dépendent des dimensions de l'éprouvette.

L'expression du module de rigidité en appliquant la formule (A) est:

$$E_m = \frac{L.(v+0.27)}{D.T}$$

Avec :

L : Force verticale appliquée exprimée en N.

D : Amplitude du déplacement horizontal en mm.

T : L'épaisseur de l'éprouvette en mm.

v : Coefficient de Poisson (généralement égal à 0.35 à 20°).

Le module sera ajusté par la formule suivante :

$$E' = [1 - A(0.6 - K)] \cdot \frac{E}{[1 + B.(T_1 - T)]}$$

Avec :

E' : module ajusté

A : donné par **$0.322(\log_{10} E - 1.82)$**

B : donné par **$-0.115 + 9.10^{-6} E$**

K : coefficient caractérisant la forme de la surface chargée.

T : température ciblée

T_1 : température réelle de l'éprouvette

E : module calculé

(D'après le texte informatif du catalogue de l'appareil de mesure)

IV- RESULTATS DES ESSAIS :

Les résultats des essais de module à différentes températures des formules F1, F2 et F1 modifiée, sont consignés dans le tableau suivant :

	F1			F2			F1 modifié avec 0.6% de polymère		
T °C	E (MPa)		E moyen	E (MPa)		E moyen	E (MPa)		E moyen
	Mesuré	Ajusté		Mesuré	Ajusté		Mesuré	Ajusté	
-10	*	*	*	26505	32240	33086.5	*	*	*
	*	*		27748	33933		*	*	
0	17967	21423	20570.5	24095	29164	29134	25773	31258	29562
	16399	19718		24045	29104		23058	27866	
10	12924	13418	14177	15638	16490	17637	13916	16646	18760
	14483	14936		17799	18783		19797	20874	
20	6558	6655	6857	*	*	9367	12690	13272	12488.5
	9288	9367		6958	7059		11408	11705	
30	2151	2198	2198	2305	2360	2287	6442	6526	10408.5
	1698	1734		2166	2214		9014	9112	
40	532	541	634.5	782	798	779.5	3122	3188	2835.5
	715	728		746	761		2433	2483	

V- ETUDE ANALYTIQUE DES RESULTATS DE MODULE OBTENUS AVEC LES METHODES DE PREVISION DU MODULE DE RIGIDITE :

L'objectif de cette étude est d'évaluer la fiabilité de notre méthode d'essai, on comparant nos résultats avec des résultats obtenus par des méthodes de prévision de module.

1-Méthode de prévision de Heukelom et Klomp (Laboratoire Shell)

A la suite des essais portant sur des mélanges hydrocarbonés, Van der Poel est arrivé à la conclusion que le module de rigidité du mélange dépend en ordre principal du module de bitume et de la concentration volumique en granulats C_v exprimée comme suit :

$$C_v = \frac{V_g}{V_g + V_b}$$

Avec :

V_g : volume des granulats.

V_b : Volume du bitume .

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

$$|E^*| = S_b \left[1 + \frac{2.5}{n} \times \frac{C_v}{1 - C_v} \right]^n$$

Avec $n = 0.83 \cdot \log\left(\frac{4 \times 10^4}{S_b}\right)$

Où

S_b est le module de rigidité du bitume tiré du nomogramme de Van der Poel (en MN/m²), figure 5.

On voit immédiatement que ce procédé permet de prévoir les modules d'une très grande variété de compositions. Il apparaît au cours des essais que la nature des granulats et leur courbe granulométrique n'influencent que faiblement le module; dès lors le paramètre C_v permet à lui seul de caractériser l'influence des granulats.

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

Pour pallier à cette lacune, Fijn Van Draat et Sommer proposent de remplacer la concentration volumique des granulats par une valeur corrigée en fonction du pourcentage de vides v :

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

NB : Ces auteurs ne donnent aucun argument à l'appui de cette proposition; il nous paraît indispensable que la preuve expérimentale d'une dépendance de ce type soit faite avant de l'introduire dans la pratique [5].

2-Méthode de Saunier :

Saunier [6] a axé son plan d'expérience sur l'étude de l'influence respective du liant et du squelette minéral. Il attribue les variations du module complexe d'un enrobé avec la température et la fréquence à l'effet du bitume qu'il renferme.

Ayant comparé entre elles diverses formulations d'enrobés caractérisées par des pourcentages de vides compris entre 4% et 8% et portant leur module de rigidité en fonction de celui du bitume, il arrive à la conclusion qu'à la dispersion des mesures près, l'ensemble des résultats se situe sur une même courbe. Il constate également que la valeur maximale du module de rigidité, obtenue aux basses températures, n'est pas influencée par le type de bitume utilisé.

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

L'ensemble des résultats ainsi obtenus conduit à la conclusion qu'il est possible de prévoir avec une bonne approximation les valeurs du module d'un enrobé correctement dosé en liant si l'on connaît :

- Le type du bitume utilisé.
- Les conditions de température et de fréquence.
- Le pourcentage en vide.

3-Méthode de Verstraeten (Laboratoire CRR) : [7]

Cette dernière méthode est fondée sur une partie des données expérimentales. L'analyse des premiers résultats fait apparaître une relation simple entre le rapport $|E^*|/V_g$ et le produit $S_b \cdot \gamma$ où γ est un facteur qui dépend de la pénétration du bitume.

La courbe, de la figure 1, illustre cette relation. Comme $C_g = C_v(100-v)$, ce facteur tient compte des deux paramètres C_v et v malgré la dispersion relativement importante des points expérimentaux cette relation permet d'estimer pour les mélanges routiers entrant dans la catégorie considérée, le module d'un mélange connaissant sa composition et le module S_b tiré du nomogramme de Van der Poel (Figure 3).

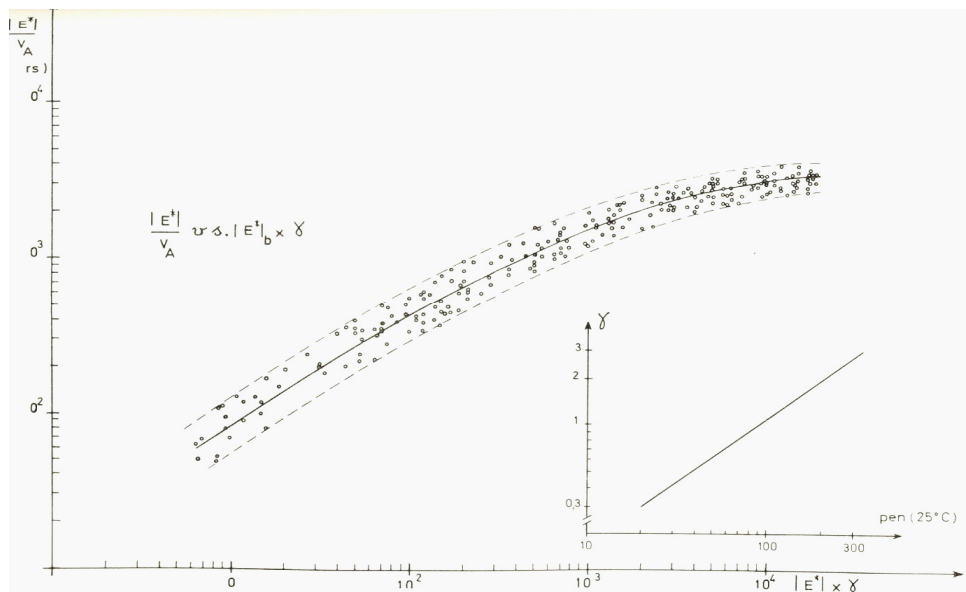


Figure 1 – Relation entre le rapport $|E^*|/V_g$ et le produit $S_b \cdot \gamma$. [7]

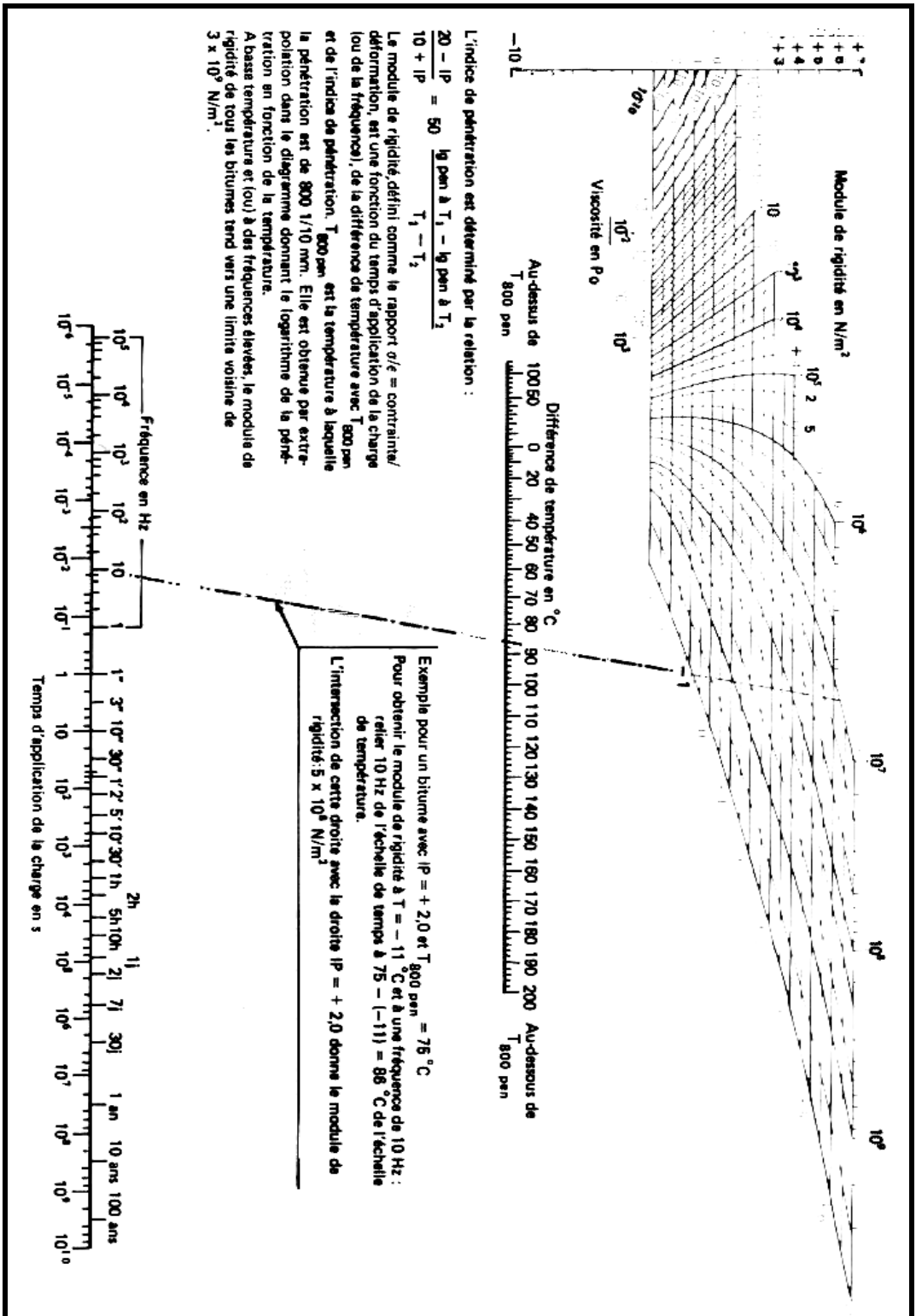


Figure 3. Nomogramme de Van Der Poel. [5]

VI- COMPARAISON DES RESULTATS DE LABORATOIRE AVEC LES RESULTATS DES METHODES DE PREVISION DU MODULE :

Les valeurs du module de rigidité pour EB calculées par les différentes méthodes de prévision décrites précédemment et celles des résultats du laboratoire sont représentées dans le tableau 16.

Résultats de prévision du module et d'essais de EB

T °C	Module de rigidité E (MPa)			
	Laboratoire	Heukelom	Saunier	Verstraeten
-10	33000	28740	22000	24750
0	20570,5	20990	18000	21450
10	14177	14820	13500	16500
30	2198	3010	3500	7420

N.B: Les mélanges choisis par ces auteurs sont caractérisés par la composition suivante: ([5]-[6])-(7())

- 6% bitume 40/50 (pen25=49).
- Compacité de 96%.

La comparaison est faite à partir des représentations graphiques des résultats de chaque méthode et de celle des résultats du laboratoire :

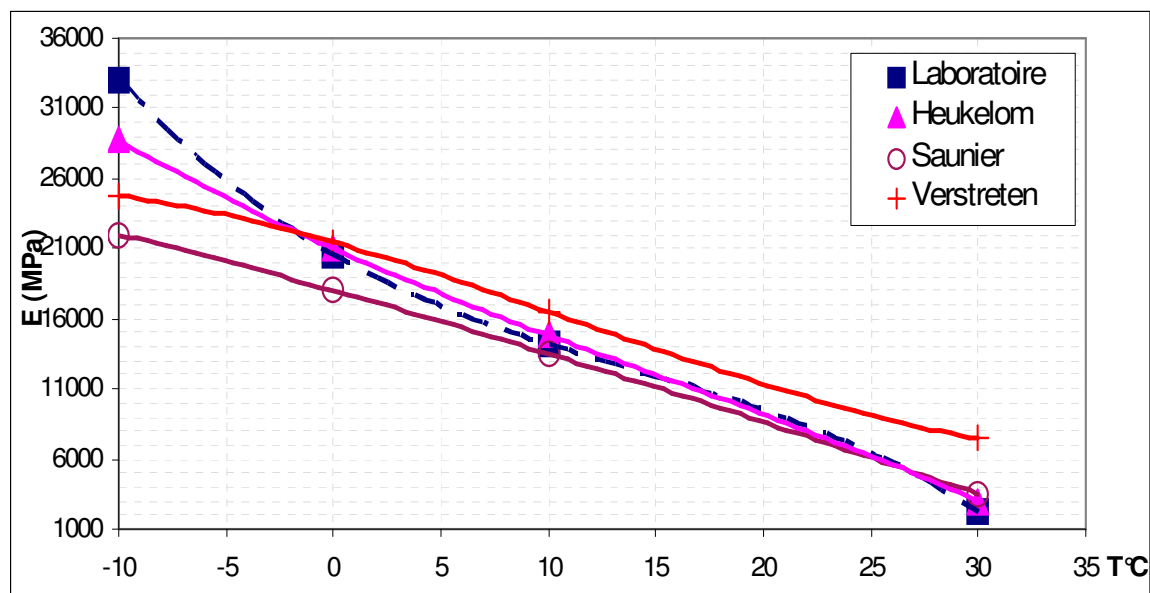


Figure 4. Comparaison des résultats du laboratoire avec les résultats des différentes méthodes de prévision du module de rigidité.

Remarques :

Les résultats de la méthode de Heukelom représentent une bonne approximation du cas réel obtenu au laboratoire. La courbe de Heukelom coïncide avec nos résultats sur une large gamme de température. Tandis que la courbe de Saunier diverge pour les basses températures et converge pour les hautes températures, par contre la courbe de Verstraeten converge vers la courbe du laboratoire pour les basses températures et diverge pour les hautes températures.

Commentaire et analyse des résultats de module des mélanges modifié et non modifié :

L'ajustement des deux courbes (EB non modifié et EB modifié) est représenté dans la figure suivante :

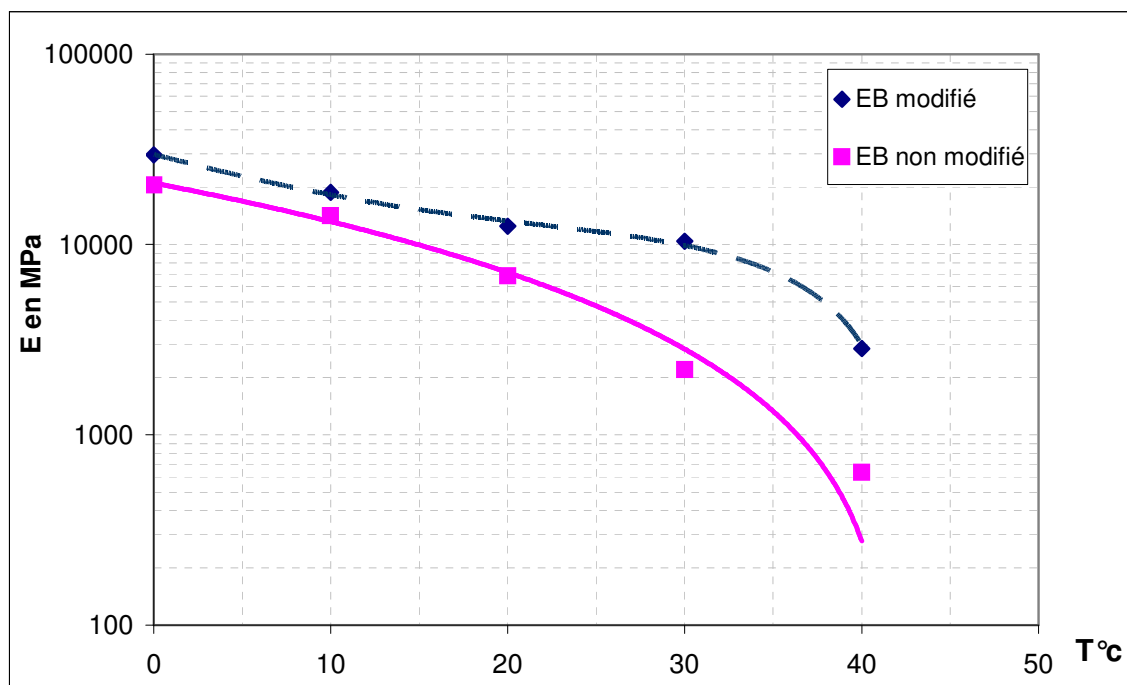


Figure 5. Comparaison des courbes ajustées de l'EB non modifié et EB modifié.

Pour un enrobé non modifié, il y a une forte diminution du module avec la température. Ainsi, on remarque qu'une augmentation de la température de 10 °C entre (25 °C et 35 °C) implique une perte de rigidité de 2/3.

Pour un enrobé modifié la perte de rigidité est de 1/2, alors un gain de 20 à 30% par rapport à un enrobé non modifié.

Pour les températures au-delà de 35 °C, le gain de rigidité de l'enrobé modifié dépasse 70% par rapport à l'enrobé non modifié.

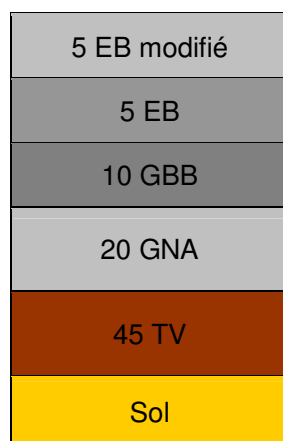
Les fortes valeurs sont enregistrées pour les températures inférieures à 10 °C.

Les conditions chaudes et froides doivent être prises en compte et les conditions chaudes sont considérablement plus extrêmes. A cet effet, nous proposons les enrobés modifiés comme solution pour minimiser la déformation permanente en conditions sévères de température.

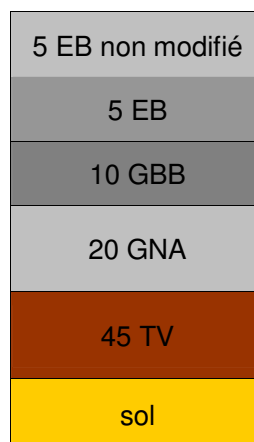
VII- ETUDE DE CAS : L'utilisation des additifs polymères pour optimiser les structures dans le dimensionnement :

L'utilisation des enrobés modifiée est un moyen efficace pour augmenter la rigidité et permet d'avoir une meilleure résistance à la fatigue et à l'orniérage. Cette nouvelle technique permet de minimiser

L'épaisseur des couches qui suit illustre cet aspect. Les structures de chaussées sur lesquelles on va travailler sont schématisées sur la figure suivante :



couches. Dans ce cadre, l'étude économique aspect. Les structures de chaussées sur lesquelles on va travailler sont schématisées sur la figure



1- Hypothèses de calcul :

Cette chaussée a été dimensionnée pour un trafic journalier de 10000 v/j, le poids lourd est de 35% de (PTL>1.5 T), une largeur de 7 m, un taux d'accroissement de 5%, le trafic est considéré comme équilibré dans les deux sens, une agressivité de A=0.180 en essieux de 13T et une durée de vie de 15 an.

$$N=365.T_j.PL.V_c.A.\left[\frac{(1+i)^n-1}{i}\right].1=2.5\ 10^6$$

La droite de fatigue a permis de déterminer une déformation horizontale initiale admissible correspondante à ce trafic pour les enrobés bitumineux qui est égale à $\epsilon_t=1.65.10^{-4}$ et de $\epsilon_t=1.17.10^{-4}$ pour les graves bitumes.

Les graves non traitées, le tout-venant et le sol ont une déformation initiale verticale admissible de $\epsilon_z=5.47.10^{-4}$.

Les modules de rigidité des EB et des GBB sont tirés des résultats des essais, celui des GNA est de 5000 bars, les TV ont un Module de 3500 bars et le sol 300 bars.

2- Solution de base : structure en EB non modifié

Structure :

Tableau

Valeurs de déformations et contraintes admissibles pour différentes couches

	Epaisseur h_i	Module E_i (bars)	Déformation ϵ_t	Déformation ϵ_z
--	-----------------	----------------------	--------------------------	--------------------------

EB1	5	65000	$1.65.10^{-4}$	-
EB2	5	50000	$1.65.10^{-4}$	-
GBB	10	75000	$1.17.10^{-4}$	-
GNA	20	5000	-	$5.47.10^{-4}$
TV	45	3500	-	$5.47.10^{-4}$
sol	-	300	-	$5.47.10^{-4}$

La structure est vérifiée par le calcul vis-à-vis de deux critères :

1. la rupture par fatigue à la base des couches bitumineuses
2. l'orniérage du support

Les interfaces sont considérées collées.

Le dimensionnement à l'aide du logiciel ALIZE, nous donne les résultats figurés dans l'annexe A1. Les limites admissibles sont supérieures aux résultats ALIZE, la structure est donc correctement dimensionnée.

3- Dimensionnement de la variante en EB modifié (5 cm)

Structure :

Tableau

Valeurs de déformations et contraintes admissibles pour différentes couches

	Epaisseur h_i	Module E_i (bars)	Déformation ε_t	Déformation ε_z
EB1modifié	5	115000	$1.65.10^{-4}$	-
EB2	5	50000	$1.65.10^{-4}$	-
GBB	10	75000	$1.17.10^{-4}$	-
GNA	20	5000	-	$5.47.10^{-4}$
TV	45	3500	-	$5.47.10^{-4}$
sol	-	300	-	$5.47.10^{-4}$

Les hypothèses de calcul retenues sont les mêmes que celle de la solution de base :

Les limites admissibles sont supérieures aux résultats ALIZE, la structure est donc correctement dimensionnée (A2).

La comparaison des deux structures décrites précédemment nous a permis d'estimer une durée de vie plus longue pour la structure modifiée. Sur le plan économique, la structure modifiée sera plus rentable si on diminue son épaisseur, par exemple on prend une épaisseur de 3 cm, on aura des déformations qui sont inférieurs à celles admissibles :

4- Dimensionnement de la variante en EB modifié (3 cm)

Structure :

Tableau

Valeurs de déformations et contraintes admissibles pour différentes couches

	Epaisseur h_i	Module E_i (bars)	Déformation ϵ_t	Déformation ϵ_z
EB1modifié	3cm	115000	$1.65.10^{-4}$	-
EB2	5	50000	$1.65.10^{-4}$	-
GBB	10	75000	$1.17.10^{-4}$	-
GNA	20	5000	-	$5.47.10^{-4}$
TV	45	3500	-	$5.47.10^{-4}$
sol	-	300	-	$5.47.10^{-4}$

Les hypothèses de calcul retenues sont les mêmes que celle de la solution de base :

Les limites admissibles sont supérieures aux résultats ALIZE, la structure est donc correctement dimensionnée (A3).

CONCLUSION :

L'utilisation d'un enrobé à module élevé obtenu par ajout d'un additif polymère, est un moyen efficace sur le plan technique puisqu'il nous a permis d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la chaussée dans des conditions extrêmes de température, et sur le plan financier puisqu'il nous a permis d'optimiser la structure en diminuant l'épaisseur de la couche d'enrobé.

ANNEXE A 1

STRUCTURE NON MODIFIEE 5cm

POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE

A SOUS UNE ROUE SIMPLE

B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE

C AU CENTRE DU JUMELAGE

A= 12.500 D= 37.500 Q= 6.620

NOMBRE DE COUCHES 6

```

*****
      *      *      *      *      *      *
*  Z  *      * EPSILONT * SIGMAT * EPSILONZ * SIGMAZ *
*****
* .00*      * .990E-04B* .128E+02B* -.693E-04C* .662E+01A*
*      *      *      *      *      *
*      * E= 65000. *      *      *      *
*      * NU= .35 *      *      *      *
*      * H1= 5.00 *      *      *      *
* 5.00*      * .368E-04C* .581E+01B* -.485E-04C* .608E+01B*
*-----*--- COLLE---*-----*-----*-----*
* 5.00*      * .368E-04C* .522E+01B* -.474E-04C* .608E+01B*
*      *      *      *      *      *
*      * E= 50000. *      *      *      *
*      * NU= .35 *      *      *      *
*      * H2= 5.00 *      *      *      *
* 10.00*      * -.602E-05A* .215E+01B* -.379E-05C* .425E+01B*
*-----*--- COLLE---*-----*-----*-----*
* 10.00*      * -.602E-05A* .208E+01B* -.732E-05C* .425E+01B*
*      *      *      *      *      *
*      * E= 75000. *      *      *      *
*      * NU= .35 *      *      *      *
*      * H3= 10.00 *      *      *      *
* 20.00*      * -.860E-04C* -.848E+01B* .848E-04B* .962E+00B*
*-----*--- COLLE---*-----*-----*-----*
* 20.00*      * -.860E-04C* -.372E-02C* .185E-03B* .962E+00B*
*      *      *      *      *      *
*      * E= 5000. *      *      *      *
*      * NU= .40 *      *      *      *
*      * H4= 20.00 *      *      *      *

```

```

* 40.00*      * -.793E-04C* -.323E+00C* .135E-03C* .441E+00C*
      *-----*--- COLLE---*-----*-----*-----*
* 40.00*      * -.793E-04C* -.138E+00C* .152E-03C* .441E+00C*
      *      * E= 3500. *      *      *      *
      *      * NU= .40 *      *      *      *
      *      * H5= 45.00 *      *      *      *
* 85.00*      * -.965E-04C* -.507E+00C* .134E-03C* .695E-01C*
      *-----*--- COLLE---*-----*-----*
* 85.00*      * -.965E-04C* -.107E-02C* .233E-03C* .695E-01C*
      *      * E= 300. *      *      *      *
      *      * NU= .40 *      *      *      *
      *      * H6=INFINI *      *      *      *
      *      *      *      *      *
*****
      * D *      55.79MM/100      *      R*D      *
* R *      702.56M      *      39193.71M*MM/100      *
*****

```

MODULES ET CONTRAINTES EN BARS

ANNEXE A2

STRUCTURE MODIFIEE 5cm

POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE

A SOUS UNE ROUE SIMPLE

B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE

C AU CENTRE DU JUMELAGE

A= 12.500 D= 37.500 Q= 6.620

NOMBRE DE COUCHES 6

```

*****
      *      *      *      *      *      *
*  Z  *      * EPSILON T * SIGMA T * EPSILON Z * SIGMA Z *
*****
*  .00*      * .820E-04B* .171E+02B* -.528E-04C* .662E+01A*
      *      * E=115000. *      *      *      *
      *      * NU= .35 *      *      *      *
      *      * H1= 5.00 *      *      *      *
*  5.00*      * -.161E-06A* .502E+01C* -.339E-04C* .592E+01B*
      *-----* COLLE---*-----*-----*-----*
*  5.00*      * -.161E-06A* .390E+01B* -.302E-04C* .592E+01B*
      *      * E= 50000. *      *      *      *
      *      * NU= .35 *      *      *      *
      *      * H2= 5.00 *      *      *      *
* 10.00*      * -.114E-04A* .139E+01B* .610E-04A* .399E+01B*
      *-----* COLLE---*-----*-----*-----*
* 10.00*      * -.114E-04A* .101E+01B* .448E-04A* .399E+01B*
      *      * E= 75000. *      *      *      *
      *      * NU= .35 *      *      *      *
      *      * H3= 10.00 *      *      *      *
* 20.00*      * -.837E-04C* -.829E+01B* .823E-04B* .873E+00B*
      *-----* COLLE---*-----*-----*-----*
* 20.00*      * -.837E-04C* -.497E-01C* .174E-03B* .873E+00B*
      *      * E= 5000. *      *      *      *
      *      * NU= .40 *      *      *      *
      *      * H4= 20.00 *      *      *      *
* 40.00*      * -.743E-04C* -.316E+00C* .125E-03C* .397E+00C*

```

```

*-----*--- COLLE-----*-----*-----*-----*
* 40.00*      * -.743E-04C* -.142E+00C* .141E-03C* .397E+00C*
      *      * E= 3500. *      *      *      *      *
      *      * NU= .40 *      *      *      *      *
      *      * H5= 45.00 *      *      *      *      *
* 85.00*      * -.895E-04C* -.470E+00C* .124E-03C* .645E-01C*
*-----*--- COLLE-----*-----*-----*-----*
* 85.00*      * -.895E-04C* -.102E-02C* .216E-03C* .645E-01C*
      *      * E= 300. *      *      *      *      *
      *      * NU= .40 *      *      *      *      *
      *      * H6=INFINI *      *      *      *      *
      *      *      *      *      *      *      *
*****
* D *      53.71MM/100      * R*D      *
* R *      744.03M      * 39962.77M*MM/100 *
*****

```

MODULES ET CONTRAINTES EN BARS

ANNEXE A3

STRUCTURE MODIFIEE 3cm

POSITION DE LA VALEUR MAXIMALE POUR UN JUMELAGE

A SOUS UNE ROUE SIMPLE

B SOUS UNE DES ROUES DU JUMELAGE

C AU CENTRE DU JUMELAGE

A= 12.500 D= 37.500 Q= 6.620

NOMBRE DE COUCHES 6

```

*****
      *      *      *      *      *      *
*  Z  *      * EPSILONT * SIGMAT * EPSILONZ * SIGMAZ *
*****
* .00*      * .899E-04C* .183E+02B* -.631E-04C* .662E+01A*
      *      * E=115000. *      *      *      *      *
      *      * NU= .35 *      *      *      *      *
      *      * H1= 3.00 *      *      *      *      *
* 3.00*      * .460E-04C* .995E+01B* -.538E-04C* .642E+01B*
      *-----*--- COLLE---*-----*-----*-----*
* 3.00*      * .460E-04C* .628E+01B* -.531E-04C* .642E+01B*
      *      * E= 50000. *      *      *      *      *
      *      * NU= .35 *      *      *      *      *
      *      * H2= 5.00 *      *      *      *      *
* 8.00*      * -.358E-05A* .262E+01B* -.948E-05C* .471E+01B*
      *-----*--- COLLE---*-----*-----*-----*
* 8.00*      * -.358E-05A* .266E+01B* -.121E-04C* .471E+01B*
      *      * E= 75000. *      *      *      *      *
      *      * NU= .35 *      *      *      *      *
      *      * H3= 10.00 *      *      *      *      *
* 18.00*      * -.923E-04B* -.921E+01B* .922E-04B* .105E+01B*
      *-----*--- COLLE---*-----*-----*-----*
* 18.00*      * -.923E-04B* -.378E-02C* .201E-03B* .105E+01B*
      *      * E= 5000. *      *      *      *      *
      *      * NU= .40 *      *      *      *      *
      *      * H4= 20.00 *      *      *      *      *

```

```

* 38.00*      * -.836E-04C* -.337E+00C* .141E-03C* .466E+00C*
      *-----*--- COLLE---*-----*-----*-----*
* 38.00*      * -.836E-04C* -.143E+00C* .160E-03C* .466E+00C*
      *      * E= 3500. *      *      *      *
      *      * NU= .40 *      *      *      *
      *      * H5= 45.00 *      *      *      *
* 83.00*      * -.995E-04C* -.522E+00C* .138E-03C* .712E-01C*
      *-----*--- COLLE---*-----*-----*
* 83.00*      * -.995E-04C* -.138E-02C* .239E-03C* .712E-01C*
      *      * E= 300. *      *      *      *
      *      * NU= .40 *      *      *      *
      *      * H6=INFINI *      *      *      *
      *      *      *      *      *
*****
      * D *      56.62MM/100      *      R*D      *
* R *      650.25M      *      36819.38M*MM/100 *
*****

```

MODULES ET CONTRAINTES EN BARS

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : Directives SETRA – Septembre 1972.
- [2] : Cahier des prescriptions communes applicables aux travaux routiers courants – fascicule N° :5 , cahier N° : 4 et 5.
- [3] : Directive des matériaux traités à chaud : Direction des routes et de la circulation routière.
- [4] : Encyclopédie UNIVERSALIS 5.
- [5] : HEUKELOM W., KLOMP A.J.G, Road design and dynamic loading, Proc . Assoc. Asphalt paving technol., 33, 1964, p. 92.
- [6] : SAUNIER J., Module complexe des enrobés bitumineux : évaluation du module de rigidité à partir de paramètres facilement accessible, RGRA, 421, 1967, p. 51.
- [7] : VERSTRAETEN J, Comportement en flexion répétée des mélanges bitumineux – Module et loi de fatigue, Rapp .rech . CRR Bruxelles, 156, 1971.
- [8] : Norme AFNOR 1995.
- [9] : Bulletin de liaison des LCPC S. SOLIMAN, T.H. DOAN, Spécial V, décembre 1977.
- [10] : Shell technique et utilisation.
- [11] : Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées n° 70 ; 1974.
- [12] : Huet. C., Représentation de module et complaisances complexes arithmétique et logarithmique. Crope fr Rgéole tome 1-5, Nov 1967 p 237.
- [13] : Cornil P. détermination du module de rigidité et Essais de fatigue en flexion sur éprouvettes de matériaux hydrocarbonés encastrées à une extrémité Rapp rech., CRR Bruxelles, 1968.
- [14] : Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Spécial V, Décembre 1977,
R.LINDER, Paris, Page 261, Formule 27.