

Courbes maîtresses de module dynamique pour le Québec

Contexte

Le module complexe (E^*) des enrobés est déterminé en laboratoire à l'aide d'un essai de traction-compression directe [Info DLC, vol. 17, n° 2]. Une banque de données de module dynamique ($|E^*|$) a été déterminée à l'aide de cet essai pour des enrobés typiquement utilisés au Québec [Info DLC, vol. 16, n° 4].

Les résultats de $|E^*|$ sont modélisés en fonction de la température et de la fréquence de sollicitation sous forme de courbes maîtresses. Les courbes maîtresses générales obtenues pour les enrobés types sont présentées et comparées aux valeurs que l'on trouve dans la littérature. Le développement complet des modèles est présenté dans un rapport de recherche publié dans la collection Études et recherches en transport [Doucet et Auger 2010].

Courbes maîtresses générales de module dynamique

Puisque la forme de la courbe maîtresse de $|E^*|$ est principalement fonction du type de bitume, les courbes sont généralisées par type de bitume en combinant les résultats d'un enrobé ESG-10, ESG-14 et GB-20 formulés avec le même bitume. La figure 1 présente les courbes maîtresses de $|E^*|$ généralisées pour les bitumes les plus utilisés au Québec. Ces courbes représentent approximativement le comportement d'un enrobé ESG-14.

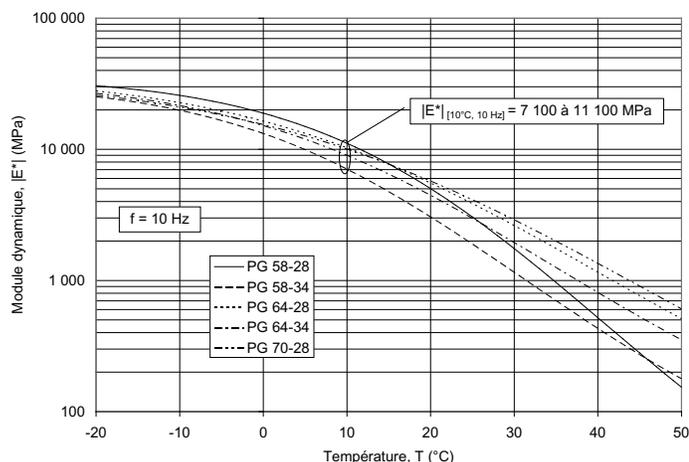


Figure 1 – Courbes maîtresses générales de module dynamique à 10 Hz selon le type de bitume

Le tableau 1 présente les paramètres de régression des courbes maîtresses générales de $|E^*|$ présentées à la figure 1. L'erreur moyenne (RMSE) de la prédiction du $\log |E^*|$ des modèles généraux est de 0,050, le coefficient de détermination (R^2) moyen

est de 0,99 et le nombre de points de mesure (n) moyen est de 306. L'excellente valeur de R^2 indique que le modèle représente bien les résultats.

Tableau 1 – Paramètres de régression des courbes maîtresses générales de module dynamique

Bitume	Coefficients de régression, $\log E^* $ (MPa)						RMSE	R^2	n
	δ	α	β	γ	a_1	a_2			
PG 58-28	-0,422	4,97	-1,76	-0,422	-0,149	6,46E-4	0,039	1,00	308
PG 58-34	0,215	4,29	-1,32	-0,398	-0,146	7,95E-4	0,050	1,00	308
PG 64-28	-0,072	4,63	-1,68	-0,324	-0,151	6,88E-4	0,049	0,99	314
PG 64-34	0,636	3,90	-1,38	-0,369	-0,147	6,56E-4	0,074	0,99	304
PG 70-28	-0,220	4,77	-1,76	-0,283	-0,158	5,94E-4	0,040	0,99	298

Le tableau 2 présente les valeurs de $|E^*|$ à 10 Hz pour différentes températures. Le $|E^*|$ moyen à 10 °C et 10 Hz est de 9 500 MPa avec un écart type de 1 600 MPa, ce qui donne un aperçu du $|E^*|$ d'un enrobé en général et de l'influence du type de bitume sur cette valeur.

Tableau 2 – Module dynamique général à 10 Hz des enrobés en fonction du type de bitume

Bitume	Module dynamique, $ E^* $ (MPa)							
	-20 °C	-10 °C	0 °C	10 °C	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C
PG 58-28	30 500	25 800	18 900	11 100	5 000	1 800	520	150
PG 58-34	25 200	19 900	13 200	7 100	3 100	1 200	430	180
PG 64-28	27 900	22 700	16 400	10 300	5 500	2 600	1 160	510
PG 64-34	26 800	21 600	15 200	9 000	4 500	1 900	810	350
PG 70-28	25 900	21 000	15 500	10 000	5 700	2 900	1 350	610
Moyenne	27 300	22 200	15 800	9 500	4 800	2 100	850	360
Écart type	2 100	2 300	2 100	1 600	1 100	700	400	200

Le RMSE moyen des modèles généraux étant de 0,050, l'erreur de prédiction moyenne de la valeur de $|E^*|$ de 9 500 MPa est de 1 200 MPa, ce qui représente 75 % de l'écart type entre les différents types de bitume (1 600 MPa). Ainsi, la granulométrie et les vides des enrobés sont également des paramètres d'influence importants. Le RMSE peut être ajouté ou soustrait aux modèles pour évaluer l'incidence de ces paramètres.

Modules dynamiques de la littérature

Les courbes maîtresses générales de $|E^*|$ obtenues sont comparées aux valeurs généralement admises dans la littérature afin d'évaluer l'écart entre les enrobés du Québec et d'ailleurs. Le tableau 3 présente les valeurs de $|E^*|$ typiques pour les enrobés aux États-Unis comparativement aux valeurs moyennes du Québec pour différentes températures et fréquences. Les valeurs semblent comparables.

Le tableau 4 présente le $|E^*|$ minimal spécifié pour les différents enrobés en France à 15 °C et 10 Hz (AFNOR) comparativement aux valeurs prédites par le modèle général avec un bitume PG 70-28, soit le bitume le plus dur utilisé au Québec. Le RMSE

du modèle (0,040) est ajouté à la prédiction pour les enrobés de base GB et soustrait pour les enrobés de surface BBSG et BBME, afin de tenir compte de l'influence de la granulométrie. Le $|E^*|$ des enrobés en France est plus élevé que celui des enrobés du Québec puisque les bitumes utilisés en France sont plus durs.

Tableau 3 – Module dynamique typique des enrobés aux États-Unis

Température	Fréquence	Module dynamique, $ E^* $ (MPa)		
		$ E^* _{USA}$	$ E^* _{MTQ}$	$ E^* _{USA} / E^* _{MTQ}$
4 °C	16 Hz	12 400	14 000	0,89
	4 Hz	11 000	11 600	0,95
	1 Hz	8 300	9 200	0,90
21 °C	16 Hz	4 800	4 900	0,98
	4 Hz	3 500	3 500	1,00
	1 Hz	2 100	2 300	0,91
38 °C	16 Hz	1 100	1 200	0,92
	4 Hz	690	740	0,93
	1 Hz	480	450	1,07

Tableau 4 – Module dynamique minimal à 15 °C et 10 Hz pour les enrobés en France

Enrobés AFNOR	Module dynamique, $ E^* _{15°C, 10 Hz}$ (MPa)		
	$ E^* _{AFNOR}$	$ E^* _{MTQ}$	$ E^* _{AFNOR} / E^* _{MTQ}$
GB classe 2, 3	9 000	8 500	1,05
GB classe 4	11 000	8 500	1,29
EME	14 000	7 700	1,82
BBSG classe 1	5 500	7 000	0,79
BBSG classe 2, 3	7 000	7 000	1,00
BBME classe 1	9 000	7 000	1,29
BBME classe 2, 3	12 000	7 000	1,71

La figure 2 présente les courbes maîtresses de $|E^*|$ des enrobés avec un bitume PG 58-34 pour une fréquence de 10 Hz comparativement aux courbes maîtresses prédites avec le modèle du Guide de dimensionnement des chaussées mécaniste-empirique américain (MEPDG). Les valeurs du modèle MEPDG sont similaires jusqu'à 20 °C pour les enrobés avec un bitume PG 58-L (figure 2), jusqu'à 30 °C avec un bitume PG 64-L et jusqu'à 40 °C avec un bitume PG 70-L. La granulométrie influence peu le modèle du MEPDG.

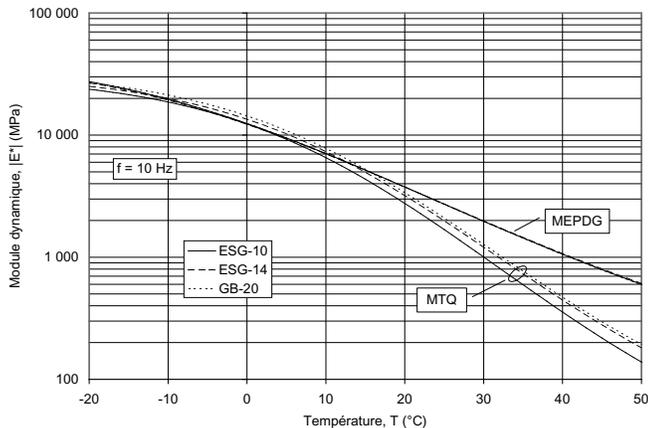


Figure 2 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 58-34 et prédiction avec le modèle du MEPDG

Le tableau 5 présente les valeurs de module réversible (M_r) utilisées par le logiciel CHAUSSÉE 2 pour le dimensionnement des chaussées au MTQ comparativement aux valeurs de $|E^*|$ moyens obtenus à 10 Hz. Les $|E^*|$ déterminés en laboratoire sont plus élevés que les M_r de CHAUSSÉE 2 déterminés de manière empirique. Ainsi, les valeurs de $|E^*|$ ne doivent pas être utilisées avec ce logiciel étalonné à partir de valeurs plus faibles.

Tableau 5 – Module réversible des enrobés pour le logiciel CHAUSSÉE 2

Enrobé	Température	M_r	$ E^* _{10 Hz}$	$M_r / E^* $
BB	Zone nord : 17,3 °C	3 580	5 830	0,61
	Zone sud : 20,5 °C	2 890	4 580	0,63
BB HRO	Zone nord : 17,3 °C	4 140	5 830	0,71
	Zone sud : 20,5 °C	3 590	4 580	0,78
BB BAF	Zone nord : 17,3 °C	4 640	5 830	0,80
	Zone sud : 20,5 °C	4 020	4 580	0,88

Conclusion

Une méthode d'essai a été élaborée au MTQ pour déterminer le module complexe des enrobés. Une banque de données a également été constituée. Les valeurs obtenues sont comparables aux valeurs généralement admises dans la littérature.

Ainsi, le développement de la méthodologie pour la détermination du module complexe des enrobés est considéré comme achevé. Cette méthodologie est donc maintenant disponible pour effectuer les expertises sur les enrobés et le dimensionnement des chaussées au Québec.

Références

DOUCET F., et B. AUGER (2010). *Détermination du module complexe des enrobés au ministère des Transports du Québec – Matériaux et infrastructures*, coll. Études et recherches en transport, ministère des Transports du Québec, Québec, 152 p.

RESPONSABLES :

Félix Doucet, ing., M. Sc. A.
Service des matériaux d'infrastructures

Bruno Auger, tech. spéc.
Service des matériaux d'infrastructures

DIRECTEUR :

Guy Tremblay
Guy Tremblay, ing.
Direction du laboratoire des chaussées