

Détermination du module complexe des enrobés
au ministère des Transports du Québec



**MATÉRIAUX
ET INFRASTRUCTURES**



ÉTUDES ET RECHERCHES
EN TRANSPORT

**DÉTERMINATION DU MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS AU
MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC**

**Félix Doucet, ing. M. Sc. A.
Ministère des Transports du Québec**

et

**Bruno Auger, tech. spéc.
Ministère des Transports du Québec**

**Service des matériaux d'infrastructures
Direction du laboratoire des chaussées
Ministère des Transports du Québec**

Mai 2010

La présente étude a été réalisée et financée par le ministère des Transports du Québec.

Toute référence à une loi ou à un règlement n'est présentée qu'à titre informatif. Les textes officiels prévalent.

Collaborateurs

Denis St-Laurent, ing. M.Sc., Direction du laboratoire des chaussées, Ministère des transports du Québec

Michel Paradis, ing. M. Sc., Direction du laboratoire des chaussées, Ministère des transports du Québec

Gaétan Leclerc, chimiste M.Sc., Direction du laboratoire des chaussées, Ministère des transports du Québec

ISBN 978-2-550-59285-3 (version imprimée)

ISBN 978-2-550-59284-6 (PDF)

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2010

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives Canada, 2010

Soucieux de protéger l'environnement, le ministère des Transports du Québec favorise l'utilisation de papier fabriqué à partir de fibres recyclées pour la production de ses imprimés.

Imprimé sur du papier Rolland Enviro 100 contenant 100% de fibres recyclées postconsommation, certifié Éco-Logo, procédé sans chlore, FSC recyclé et fabriqué à partir d'énergie biogaz.



Titre et sous-titre du rapport		N° du rapport Transports Québec RTQ-10-01	
Détermination du module complexe des enrobés au Ministère des Transports du Québec		Date de publication du rapport (Année – Mois) 2010-08	
Titre du projet de recherche		N° du contrat (RRDD-AA-CCXX) S/O	N° de projet ou dossier S/O
Responsable de recherche Félix Doucet, ing. M.Sc.A.		Date du début de la recherche 2006-05	Date de fin de la recherche 2009-09
Auteur(s) du rapport Félix Doucet et Bruno Auger			
Chargé de projet, direction Félix Doucet, Direction du Laboratoire des Chaussées		Coût total de l'étude 250 000 \$	
Étude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme) Direction du Laboratoire des Chaussées Service des matériaux d'infrastructures 2700, rue Einstein Québec (Québec) G1P 3W8		Étude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme) <i>Préciser DER ou autre direction du MTQ</i> Direction du Laboratoire des Chaussées Service des matériaux d'infrastructures 2700, rue Einstein Québec (Québec) G1P 3W8	
Problématique Le ministère des Transports du Québec (MTQ) développe des méthodes d'essai pour la détermination du comportement mécanique des matériaux de chaussée en laboratoire. La détermination des propriétés mécaniques des matériaux (rigidité, résistance à l'endommagement) est nécessaire pour effectuer le dimensionnement des chaussées selon une approche mécaniste, comparativement aux méthodes de dimensionnement traditionnelles empiriques. Les méthodes de calcul mécanistes permettent de déterminer la distribution des contraintes et des déformations dans les chaussées afin d'évaluer leur durée de vie, ce qui permet d'optimiser l'utilisation des matériaux et les interventions sur le réseau routier.			
Objectifs Le MTQ a développé la méthode d'essai LC 26-700 pour la « Détermination du module complexe des enrobés ». Le développement de l'équipement de traction-compression directe utilisé pour effectuer les essais et le mode de préparation des échantillons sont présentés. Une étude de la répétabilité a également été réalisée, démontrant la qualité de l'essai et l'influence des vides interstitiels sur le module complexe des enrobés.			
Méthodologie Le module complexe de quinze enrobés du Québec, soit des enrobés ESG-10, ESG-14 et GB-20, formulés avec des bitumes PG 58-28, PG 58-34, PG 64-28, PG 64-34 et PG 70-28, a été déterminé afin de constituer une banque de données. Les modèles individuels et généraux déterminés sont comparés aux valeurs contenues dans la littérature. Le modèle de Huet-Sayegh est utilisé pour la modélisation du module complexe et le modèle de Witczak pour le module dynamique. L'influence du type de bitume sur la rhéologie de l'enrobé et de la granulométrie sur l'intensité du module complexe est démontrée.			
Résultats et recommandations Le MTQ dispose maintenant d'une méthode d'essai fiable et documentée pour la détermination du module complexe des enrobés. Une banque de données de module complexe pour des enrobés du Québec est également rendue disponible pour alimenter les expertises sur les matériaux et le dimensionnement des chaussées au Québec.			
Mots-clés Module complexe, module dynamique, angle de phase, courbe maîtresse, plan de Cole et Cole, espace de Black, essai de traction-compression directe, enrobé, bitume, chaussée, route, viscoélasticité, mécaniste.	Nombre de pages 151	Nombre de références bibliographiques 30	Langue du document x Français x Anglais Autre (spécifier) :

SOMMAIRE

Le ministère des Transports du Québec (MTQ) développe des méthodes d'essai pour la détermination du comportement mécanique des matériaux de chaussée en laboratoire. La détermination des propriétés mécaniques des matériaux (rigidité, résistance à l'endommagement) est nécessaire pour effectuer le dimensionnement des chaussées selon une approche mécaniste, comparativement aux méthodes de dimensionnement traditionnelles empiriques. Les méthodes de calcul mécanistes permettent de déterminer la distribution des contraintes et des déformations dans les chaussées afin d'évaluer leur durée de vie, ce qui permet d'optimiser l'utilisation des matériaux et les interventions sur le réseau routier.

Le MTQ a développé la méthode d'essai LC 26-700 pour la « Détermination du module complexe des enrobés ». Le développement de l'équipement de traction-compression directe utilisé pour effectuer les essais et le mode de préparation des échantillons sont présentés. Une étude de la répétabilité a également été réalisée, démontrant la qualité de l'essai et l'influence des vides interstitiels sur le module complexe des enrobés.

De plus, le module complexe de quinze enrobés du Québec, soit des enrobés ESG-10, ESG-14 et GB-20, formulés avec des bitumes PG 58-28, PG 58-34, PG 64-28, PG 64-34 et PG 70-28, a été déterminé afin de constituer une banque de données. Les modèles individuels et généraux déterminés sont comparés aux valeurs contenues dans la littérature. Le modèle de Huet-Sayegh est utilisé pour la modélisation du module complexe et le modèle de Witczak pour le module dynamique. L'influence du type de bitume sur la rhéologie de l'enrobé et de la granulométrie sur l'intensité du module complexe est démontrée.

Ainsi, le MTQ dispose maintenant d'une méthode d'essai fiable et documentée pour la détermination du module complexe des enrobés. Une banque de données de module complexe pour des enrobés du Québec est également rendue disponible pour alimenter les expertises sur les matériaux et le dimensionnement des chaussées au Québec.

TABLE DES MATIÈRES

1.	Introduction	17
2.	Théorie.....	19
2.1	Dimensionnement de chaussées	19
2.2	Module complexe	20
2.3	Méthodes d'essai	22
2.4	Représentation.....	25
2.5	Modélisation	30
3.	Essai de traction-compression directe	35
3.1	Équipement TCD	35
3.2	Vérification avec une éprouvette d'aluminium	38
3.3	Préparation des éprouvettes	40
3.4	Conditionnement des enrobés	45
4.	Étude de répétabilité	51
4.1	Méthodologie de l'étude	51
4.2	Répétabilité du module complexe	51
4.3	Répétabilité du module dynamique.....	54
5.	Résultats individuels	59
5.1	Matériaux étudiés.....	59
5.2	Résultats de module complexe	61
5.3	Résultats de module dynamique.....	67
6.	Modèles généraux	73
6.1	Modèles de module complexe	73
6.2	Modèles de module dynamique	81
6.3	Modèles de la littérature.....	86
7.	Conclusion	95
8.	Références	97

Annexe 1 : Module complexe des enrobés conditionnés une heure

Annexe 2 : Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Annexe 3 : Module complexe des enrobés de l'étude de répétabilité

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Méthodes d'essai normalisées pour la détermination du module complexe des enrobés	23
Tableau 2	Fréquences et nombres de cycles pour la détermination du module complexe au MTQ (LC 26-700)	25
Tableau 3	Températures et niveaux de déformation pour la détermination du module complexe au MTQ (LC 26-700)	25
Tableau 4	Module élastique et déphasage de la mesure de déformation d'une éprouvette d'aluminium à 20 °C en fonction de la fréquence	40
Tableau 5	Vides interstitiels d'éprouvettes de PCG d'enrobé GB-20 et d'éprouvettes carottées à l'intérieur	41
Tableau 6	Niveau de déformation en fonction de la température pour la détermination du module complexe des enrobés pour différents temps de conditionnement	46
Tableau 7	Vides interstitiels des éprouvettes d'enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 utilisées pour l'étude de répétabilité.....	51
Tableau 8	Coefficients de régression du modèle de module complexe de Huet-Sayegh à 10 °C d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 pour différents vides interstitiels.....	52
Tableau 9	Paramètres statistiques du modèle de module complexe de Huet-Sayegh à 10 °C d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 pour différents vides interstitiels	52
Tableau 10	Coefficients de régression du modèle de module dynamique de Witczak à 10 °C d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 pour différents vides interstitiels.....	55
Tableau 11	Paramètres statistiques du modèle de module dynamique de Witczak à 10 °C d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 pour différents vides interstitiels.....	55
Tableau 12	Granulométrie des enrobés	60
Tableau 13	Caractéristiques de formulation des enrobés	60
Tableau 14	Caractéristiques des bitumes.....	60
Tableau 15	Vides interstitiels moyens des éprouvettes d'enrobé.....	61
Tableau 16	Coefficients de régression des modèles de Huet-Sayegh de module complexe à 10 °C	62
Tableau 17	Paramètres statistiques des modèles de Huet-Sayegh de module complexe à 10 °C.....	62
Tableau 18	Module complexe des enrobés à 10 °C et 10 Hz	67

Tableau 19	Coefficients de régression des modèles de Witczak de module dynamique à 10 °C des enrobés	67
Tableau 20	Paramètres statistiques des modèles de Witczak de module dynamique à 10 °C des enrobés	68
Tableau 21	Module dynamique à 10 °C et 10 Hz des enrobés	70
Tableau 22	Coefficients de régression des modèles de Huet-Sayegh généraux de module complexe à 10 °C en fonction du type de bitume.....	79
Tableau 23	Paramètres statistiques des modèles de Huet-Sayegh généraux de module complexe à 10 °C en fonction du type de bitume	79
Tableau 24	Module complexe général des enrobés à 10 °C et 10 Hz	81
Tableau 25	Coefficients de régression des modèles de Witczak généraux de module dynamique à 10 °C en fonction du type de bitume	84
Tableau 26	Paramètres statistiques des modèles de Witczak généraux de module dynamique à 10 °C en fonction du type de bitume	84
Tableau 27	Module dynamique général à 10 Hz des enrobés en fonction du type de bitume	85
Tableau 28	Module dynamique typique des enrobés aux États-Unis (Yoder et Witczak, 1975; Huang, 1993)	86
Tableau 29	Valeurs minimales de module dynamique à 10 °C et 10 Hz spécifiées par les normes AFNOR pour différents types d'enrobés (Corté et Delorme, 2005).....	87
Tableau 30	Coefficients de régression pour la prédiction de la viscosité du bitume en fonction de la classe de performance du bitume (NCHRP 1-37A).....	88
Tableau 31	Module réversible des enrobés pour le logiciel CHAUSSÉE 2 (MTQ, 2006).....	92
Tableau 32	Module dynamique d'enrobés du Québec à l'aide d'un essai de flexion aux tiers points (Doucet et coll., 1999a, 1999b).....	92

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Sollicitation en traction et en compression des enrobés lors du passage des véhicules	19
Figure 2	Représentation du module complexe	20
Figure 3	Sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé	21
Figure 4	Charge et déplacement axial en traction-compression directe (LC 26-700) ..	24
Figure 5	Module complexe d'un enrobé dans le plan de Cole et Cole	26
Figure 6	Module complexe d'un enrobé dans l'espace de Black	26
Figure 7	Courbe maîtresse de module dynamique à 10 °C d'un enrobé	27
Figure 8	Courbe maîtresse d'angle de phase à 10 °C d'un enrobé	28
Figure 9	Courbes maîtresses de module complexe à 10 °C d'un enrobé	29
Figure 10	Facteurs de translation pour une température de référence de 10 °C d'un enrobé	29
Figure 11	Représentation du modèle analogique de Huet-Sayegh	30
Figure 12	Extrapolation du E_0 d'un enrobé dans le plan de Cole et Cole	32
Figure 13	Extrapolation du E_∞ d'un enrobé dans l'espace de Black	32
Figure 14	Photo de la presse hydraulique asservie et de l'enceinte à température contrôlée	35
Figure 15	Photo de l'essai de traction-compression directe	36
Figure 16	Écran de contrôle de l'essai de traction-compression directe	36
Figure 17	Schéma de l'équipement de traction-compression directe (LC 26-700)	37
Figure 18	Module élastique d'une éprouvette d'aluminium à 20 °C en fonction de la fréquence	39
Figure 19	Déphasage de la mesure de déformation d'une éprouvette d'aluminium à 20 °C en fonction de la fréquence	39
Figure 20	Compacteur de plaque à pneu roulant du MTQ	41
Figure 21	Vue en plan de la distribution des vides interstitiels dans une plaque d'enrobé GB-20 de 100 mm d'épaisseur (Doucet et Auger, 2007)	42
Figure 22	Carotteuse pour le carottage des éprouvettes	43
Figure 23	Banc de collage pour les plateaux de chargement	44
Figure 24	Banc de collage pour les plots d'ancrage	45
Figure 25	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-28 à différents temps de conditionnement	46

Figure 26	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 à différents temps de conditionnement	47
Figure 27	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 64-28 à différents temps de conditionnement	47
Figure 28	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 64-34 à différents temps de conditionnement	48
Figure 29	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 70-28 à différents temps de conditionnement	48
Figure 30	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'enrobés ESG-14 conditionnés pendant 1 heure avec différents bitumes.....	49
Figure 31	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'enrobés ESG-14 conditionnés pendant 4 heures avec différents bitumes.....	50
Figure 32	Module complexe dans le plan de Cole et Cole d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 à différents vides interstitiels.....	53
Figure 33	Module complexe dans l'espace de Black d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 à différents vides interstitiels.....	53
Figure 34	Courbes maîtresses de module complexe d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 à différents vides interstitiels.....	54
Figure 35	Module dynamique à 10 °C et 10 Hz en fonction des vides interstitiels d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34	56
Figure 36	Courbe maîtresse générale de module dynamique d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 à différents vides interstitiels	57
Figure 37	Courbe maîtresse de module dynamique général à 10 Hz incluant l'erreur de prédiction individuelle et générale.....	58
Figure 38	Granulométrie des enrobés	59
Figure 39	Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés ESG-10	63
Figure 40	Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés ESG-14	63
Figure 41	Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés GB-20	64
Figure 42	Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés ESG-10	65
Figure 43	Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés ESG-14	65
Figure 44	Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés GB-20	66
Figure 45	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés ESG-10 ..	69

Figure 46	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés ESG-14 ..	69
Figure 47	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés GB-20.....	70
Figure 48	Module dynamique à 10 °C et 10 Hz des enrobés selon le type de bitume en fonction de la granulométrie.....	71
Figure 49	Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés avec un bitume PG 58-28	73
Figure 50	Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés avec un bitume PG 58-34	74
Figure 51	Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés avec un bitume PG 64-28	74
Figure 52	Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés avec un bitume PG 64-34	75
Figure 53	Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés avec un bitume PG 70-28	75
Figure 54	Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés avec un bitume PG 58-28.....	76
Figure 55	Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés avec un bitume PG 58-34.....	77
Figure 56	Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés avec un bitume PG 64-28.....	77
Figure 57	Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés avec un bitume PG 64-34.....	78
Figure 58	Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés avec un bitume PG 70-28.....	78
Figure 59	Courbes générales de module complexe dans le plan de Cole et Cole en fonction du type de bitume.....	80
Figure 60	Courbes générales de module complexe dans l'espace de Black en fonction du type de bitume.....	80
Figure 61	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 58-28.....	81
Figure 62	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 58-34.....	82
Figure 63	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 64-28.....	82
Figure 64	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 64-34.....	83
Figure 65	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 70-28.....	83

Figure 66	Courbes maîtresses générales de module dynamique à 10 Hz selon le type de bitume	85
Figure 67	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 58-28 et prédiction avec le modèle MEPDG.....	89
Figure 68	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 58-34 et prédiction avec le modèle MEPDG.....	89
Figure 69	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 64-28 et prédiction avec le modèle MEPDG.....	90
Figure 70	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 64-34 et prédiction avec le modèle MEPDG.....	90
Figure 71	Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 70-28 et prédiction avec le modèle MEPDG.....	91
Figure 72	Courbe maîtresse moyenne de module dynamique des enrobés C-LTPP et générales du MTQ (Doucet et Doré, 2004).....	93

1. INTRODUCTION

Les chaussées sont des ouvrages d'apparence simple, dont le comportement mécanique des matériaux et les sollicitations par le climat et le trafic sont complexes. Ainsi, le dimensionnement des chaussées est généralement effectué de manière empirique, en raison de la difficulté à modéliser son comportement. Par ailleurs, l'approche empirique impose des limitations lors de l'optimisation du dimensionnement et des interventions, ainsi que de l'établissement de spécifications pour de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques, par exemple.

Depuis plusieurs décennies, des chercheurs s'affairent à étudier, déterminer et modéliser le comportement mécanique des matériaux de chaussée dans le but d'effectuer le dimensionnement des chaussées selon une approche mécaniste. Ainsi, la détermination de la rigidité et de la résistance à l'endommagement des matériaux de chaussée en laboratoire permet de calculer la distribution des contraintes et des déformations dans la chaussée, afin de prédire la durée de vie de la route en fonction du climat et du trafic.

Le ministère des Transports du Québec (MTQ) désire tirer avantage des approches mécanistes de dimensionnement, afin d'optimiser les interventions sur le réseau et les spécifications sur les matériaux. Plusieurs méthodes d'essai sont actuellement en usage ou en développement au MTQ pour déterminer le comportement mécanique des matériaux de chaussée, telles que la détermination du module complexe et de la résistance à la fatigue des enrobés, ou la détermination du module réversible et de la résistance à la déformation permanente des matériaux granulaires (Doucet et St-Laurent, 2008).

Ce rapport présente l'état des connaissances du MTQ en ce qui concerne la détermination du module complexe des enrobés, ainsi que le développement de la méthode d'essai LC 26-700 « Détermination du module complexe des enrobés » et de modèles pour les enrobés du Québec. Un équipement de traction-compression directe (TCD) est utilisé pour effectuer les essais. Les modèles de Huet-Sayegh (1963, 1965) et de Witczak (1996, 2005) sont utilisés pour modéliser le module complexe et le module dynamique des enrobés.

Le rapport présente la théorie pertinente à l'essai, le développement de l'équipement TCD et de la méthode d'essai LC 26-700, de même qu'une étude de la répétabilité de l'essai. Les résultats obtenus pour trois types d'enrobés combinés à cinq classes de bitume du Québec sont également présentés, soit pour un total de 15 enrobés. Le développement de modèles généraux et une comparaison avec les valeurs rapportées dans la littérature sont également présentés.

2. THÉORIE

2.1 Dimensionnement de chaussées

Le dimensionnement des chaussées est généralement effectué de manière empirique (AASHTO, 1993; MTQ, 2006), mais il existe également des approches mécanistes (LCPC SETRA, 1994; NCHRP 1-37A). Ces méthodes nécessitent toutes, dans une certaine mesure, une évaluation du comportement mécanique des matériaux de chaussée, principalement de leur rigidité. De même, une part d'empirisme demeure nécessaire, particulièrement pour calibrer sur la route, les modèles d'endommagement déterminés en laboratoire.

La principale différence entre les deux approches est que les méthodes empiriques utilisent des relations développées à partir d'observations généralement faites sur le terrain, alors que les méthodes mécanistes utilisent les lois de comportement des matériaux, dont les paramètres d'ingénierie sont généralement déterminés en laboratoire. Les modèles de comportement mécanique permettent de calculer la distribution des contraintes et des déformations dans la chaussée selon la rigidité des matériaux, afin d'évaluer la durée de vie de la chaussée selon la résistance à l'endommagement des matériaux.

L'enrobé est le matériau utilisé comme revêtement pour les chaussées souples. La Figure 1 montre la sollicitation en traction et en compression des enrobés lors du passage des véhicules. L'enrobé étant un matériau constitué de granulats liés par le bitume, les couches d'enrobés sont soumises à des efforts de flexion lors du passage des véhicules. Ainsi, la partie supérieure de la couche est soumise à des contraintes en compression, alors que la partie inférieure de la couche est soumise à des contraintes en traction.

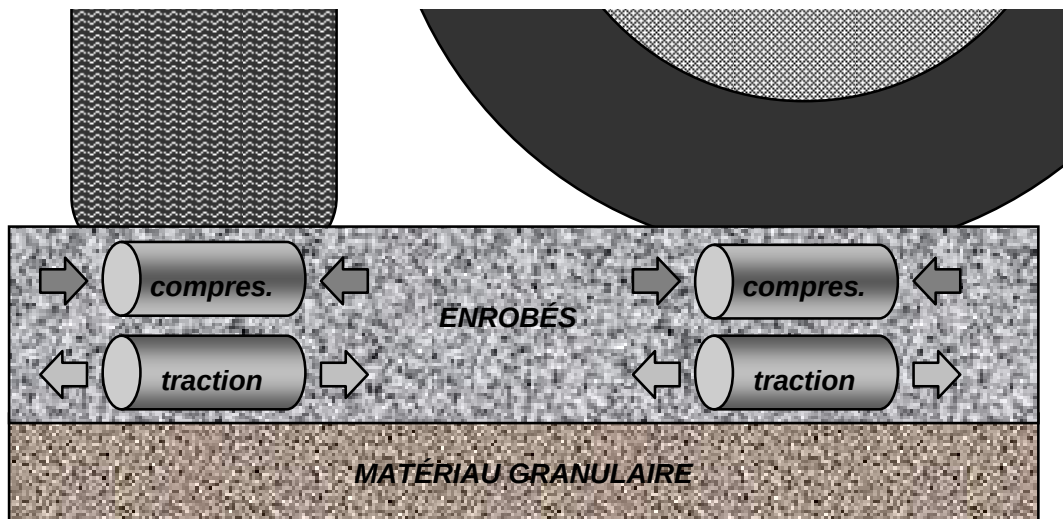


Figure 1 – Sollicitation en traction et en compression des enrobés lors du passage des véhicules

Par ailleurs, lors de l'approche et de l'éloignement des véhicules, le haut de la couche se retrouve en traction et le bas de la couche en compression, mais dans une moindre mesure. Les enrobés sont généralement posés en plusieurs couches qui doivent être collées pour que le transfert de charge en flexion entre les couches soit continu, afin d'obtenir une performance structurale optimale de la chaussée.

2.2 Module complexe

Le module complexe (E^*) est l'expression de la rigidité d'un matériau viscoélastique sous chargement cyclique, tel qu'un enrobé. La déformation d'un matériau viscoélastique dépend du temps de chargement et est différée dans le temps, contrairement à un matériau élastique dont la déformation est instantanée. De plus, l'enrobé est un matériau thermosensible, ce qui signifie que le E^* varie également en fonction de la température. Le E^* permet de généraliser des méthodes de résolution de problèmes mécaniques développées pour les matériaux élastiques aux matériaux viscoélastiques (Di Benedetto et coll., 2005).

Le E^* est un nombre complexe composé d'une partie réelle (E_1) et d'une partie imaginaire (E_2), tel que présenté à l'Équation 1. Le E^* peut également se décomposer en deux paramètres sous sa forme vectorielle, soit son module ($|E^*|$) (norme du vecteur) à l'Équation 2 et son argument (ϕ) (angle du vecteur) à l'Équation 3, tel que représenté dans le plan complexe de la Figure 2.

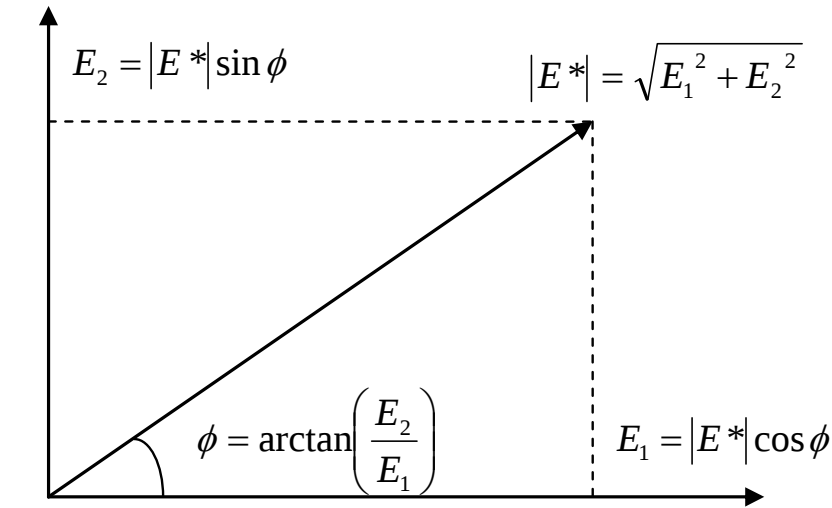


Figure 2 – Représentation du module complexe

Équation 1 : $E^* = E_1 + iE_2 = |E^*| \cos \phi + i|E^*| \sin \phi$

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

Équation 3 : $\phi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$

où E^* = module complexe (MPa),
 $|E^*|$ = module du module complexe (MPa),
 ϕ = argument du module complexe (rad),
 E_1 = partie réelle du module complexe (MPa),
 E_2 = partie imaginaire du module complexe (MPa),
 i = nombre imaginaire ($\sqrt{-1}$).

Le E^* d'un enrobé est déterminé à l'aide d'essais cycliques à petites déformations ($< 100 \mu\text{m/m}$), soit dans le domaine linéaire du comportement mécanique, où la rigidité de l'enrobé est indépendante de l'état de contrainte ou de déformation (Di Benedetto et coll., 2005). La Figure 3 montre un cycle de sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé.

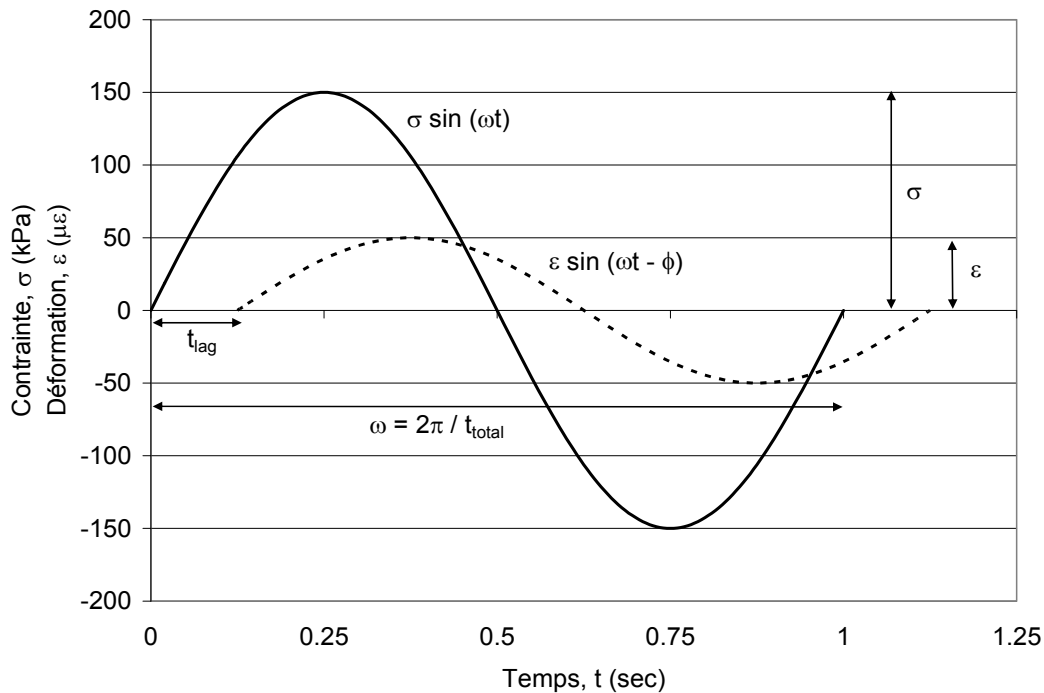


Figure 3 – Sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé

Sous sollicitation cyclique, le E^* est le rapport entre la contrainte cyclique et la déformation cyclique, tel que présenté à l'Équation 4. La déformation accuse un retard sur la contrainte, ce qui introduit un déphasage dans l'équation qui s'exprime alors sous forme de nombre complexe. Le $|E^*|$ de l'enrobé est nommé « module dynamique » en mécanique de chaussée, il est déterminé selon l'Équation 5. Le ϕ est nommé « angle de phase », il est déterminé selon l'Équation 6.

$$\text{Équation 4 : } E^* = \frac{\sigma \sin(\omega t)}{\varepsilon \sin(\omega t - \phi)} = |E^*| \cos \phi + i |E^*| \sin \phi$$

$$\text{Équation 5 : } |E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$$\text{Équation 6 : } \phi = \omega t_{lag}$$

où E^* = module complexe (MPa),
 $|E^*|$ = module dynamique (MPa),
 ϕ = angle de phase (rad),
 σ = contrainte (MPa),
 ε = déformation (m/m),
 ω = période (rad/s),
 t = temps de chargement (s),
 t_{lag} = temps de déphasage entre σ et ε (s).

Le $|E^*|$ est le rapport entre la contrainte totale (maximale) et la déformation totale (maximale), bien qu'elles ne se produisent pas en même temps. Le $|E^*|$ est une approximation du module élastique d'un matériau viscoélastique, qui peut être utilisée pour le dimensionnement des chaussées lorsque les lois de l'élasticité sont employées. Le ϕ représente le décalage dans le temps entre la contrainte et la déformation. Il varie de 0° pour un matériau purement élastique (réaction instantanée) à 90° pour un matériau purement visqueux. Le $|E^*|$ est nommé « module dynamique » en Amérique du Nord (AASHTO TP 62-07, ASTM D 3497-79) et « module de rigidité » en Europe (EN 12697-26). Le E^* est nécessaire pour décrire le comportement viscoélastique complet de l'enrobé.

2.3 Méthodes d'essai

Le E^* d'un enrobé est déterminé à différentes fréquences et températures, à petite déformation, afin de caractériser le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé. L'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), l'American Society for Testing and Materials (ASTM) et le Comité européen de normalisation (CEN) proposent différentes méthodes d'essai pour déterminer le E^* des enrobés. Ces méthodes d'essai sont présentées au Tableau 1, où des essais de traction ou de compression, directe ou indirecte, sont proposés, ainsi que des essais de flexion en différents points.

Tableau 1 – Méthodes d'essai normalisées pour la détermination du module complexe des enrobés

Norme	Méthode d'essai	Statut
AASHTO TP 62-07	Compression directe	Modifiée en 2007
ASTM D 3497-79	Compression directe	Ré-approuvée en 2003
ASTM D 4123-82	Traction indirecte	Retirée en 2003
EN 12697-26	Flexion en deux points	Éditée en 2004
	Flexion en trois points	
	Flexion en quatre points	
	Traction indirecte	
	Traction-compression directe	
	Traction directe	

Le MTQ a sélectionné l'essai de traction-compression directe (TCD) pour son type de chargement homogène, soit uniformément distribué dans l'éprouvette, ce qui permet de calculer l'état de contrainte et de déformation directement dans l'axe de sollicitation (Di Benedetto et coll., 2005). Dans le cas des essais de flexion et de traction indirecte, les contraintes et les déformations ne sont pas réparties uniformément dans l'éprouvette et sont déterminées de manière indirecte. La configuration de l'essai TCD permet également de déterminer la résistance à la fatigue (traction-compression), à la déformation permanente (compression) répétée ou à la fissuration thermique (traction) des enrobés (Doucet et Auger, 2007). La détermination directe de la contrainte et de la déformation pour l'essai TCD sont indiqués à l'Équation 7 et à l'Équation 8, ainsi que montrés à la Figure 4.

Équation 7 :
$$\sigma = \frac{4P}{\pi d^2}$$

Équation 8 :
$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h}$$

où σ = contrainte axiale (kPa),
 ε = déformation axiale (m/m),
P = charge axiale (kN),
d = diamètre de l'éprouvette (m),
 Δh = déplacement axial (m),
h = hauteur pour la mesure de Δh (100 mm) (m).

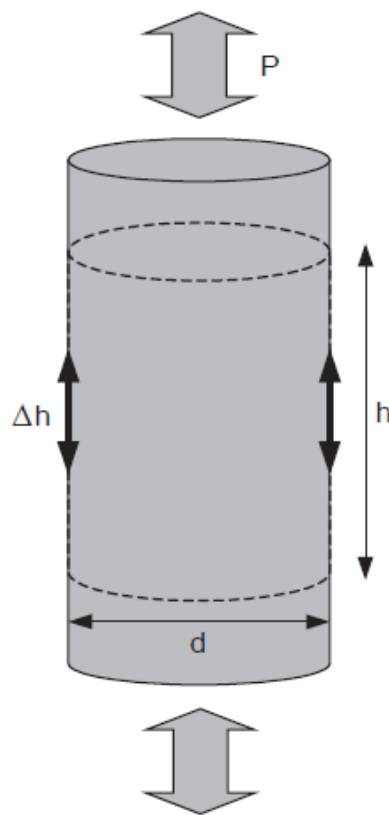


Figure 4 – Charge et déplacement axial en traction-compression directe (LC 26-700)

L'essai TCD est généralement effectué à déformation contrôlée, comparativement aux essais de compression directe où la contrainte est généralement ajustée pour obtenir la déformation désirée, ce qui complique l'exécution de l'essai. De plus, la hauteur de l'éprouvette est maintenue constante durant l'essai TCD, alors que l'éprouvette cumule de la déformation permanente durant l'essai de compression directe. L'essai TCD reproduit la sollicitation horizontale en traction et en compression alternées dans les enrobés en flexion (Figure 1), ce qui correspond au mécanisme d'endommagement par fatigue des enrobés. L'essai de compression directe reproduit la sollicitation verticale en compression répétée, ce qui correspond au mécanisme d'endommagement par déformation permanente.

Le MTQ détermine le E^* des enrobés à petites déformations par balayage de fréquences à différentes températures, selon la méthode d'essai LC 26-700 « Détermination du module complexe des enrobés », une adaptation des méthodes d'essai reconnues (AASHTO TP 62-07, ASTM D 3497-79, EN 12697-26). Le Tableau 2 présente, dans l'ordre, les fréquences couvertes par le balayage et le nombre de cycles appliqués à chaque fréquence. Le Tableau 3 présente les températures caractérisées, dans l'ordre, ainsi que le niveau de déformation appliqué à chaque température.

Tableau 2 – Fréquences et nombres de cycles pour la détermination du module complexe au MTQ (LC 26-700)

Fréquence (Hz)	10	3	1	0,3	0,1
Nombre de cycles	100	30	10	6	6

Tableau 3 – Températures et niveaux de déformation pour la détermination du module complexe au MTQ (LC 26-700)

Température (°C)	-20	-10	0	10	20	30	40
Déformation ($\mu\epsilon$)	30	40	50	50	50	50	50

Le E^* des enrobés est déterminé du $|E^*|$ le plus élevé au $|E^*|$ le plus faible, donc en diminuant la fréquence et en augmentant la température. Le nombre de cycles appliqué est le minimum pour obtenir une sollicitation stable sans endommager l'enrobé, et uniquement les cinq derniers cycles sont utilisés pour l'analyse. Le niveau de déformation est limité à 50 $\mu\text{m/m}$ afin de s'assurer que le E^* de l'enrobé est déterminé dans le domaine linéaire, même aux températures élevées.

2.4 Représentation

Les résultats de E^* peuvent être représentés dans le plan complexe de Cole et Cole ou dans l'espace de Black. La Figure 5 montre les résultats de E^* d'un enrobé déterminés à différentes fréquences et températures dans le plan complexe de Cole et Cole, où E_2 est représenté en fonction de E_1 . La Figure 6 montre les mêmes résultats de E^* dans l'espace de Black, où ϕ est fonction du logarithme de $|E^*|$. Le $|E^*|$ et le ϕ de l'enrobé sont illustrés sous forme polaire pour une température et une fréquence donnée dans le plan de Cole et Cole. L'espace de Black permet de visualiser le $|E^*|$ et le ϕ maximum de l'enrobé.

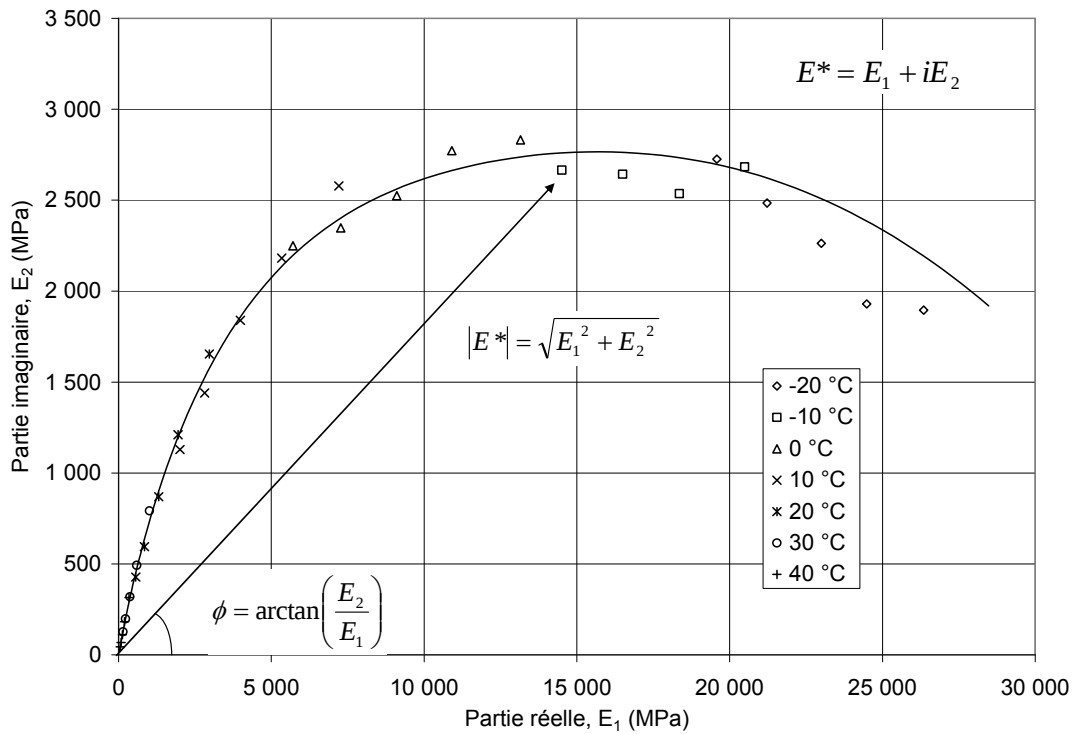


Figure 5 – Module complexe d'un enrobé dans le plan de Cole et Cole

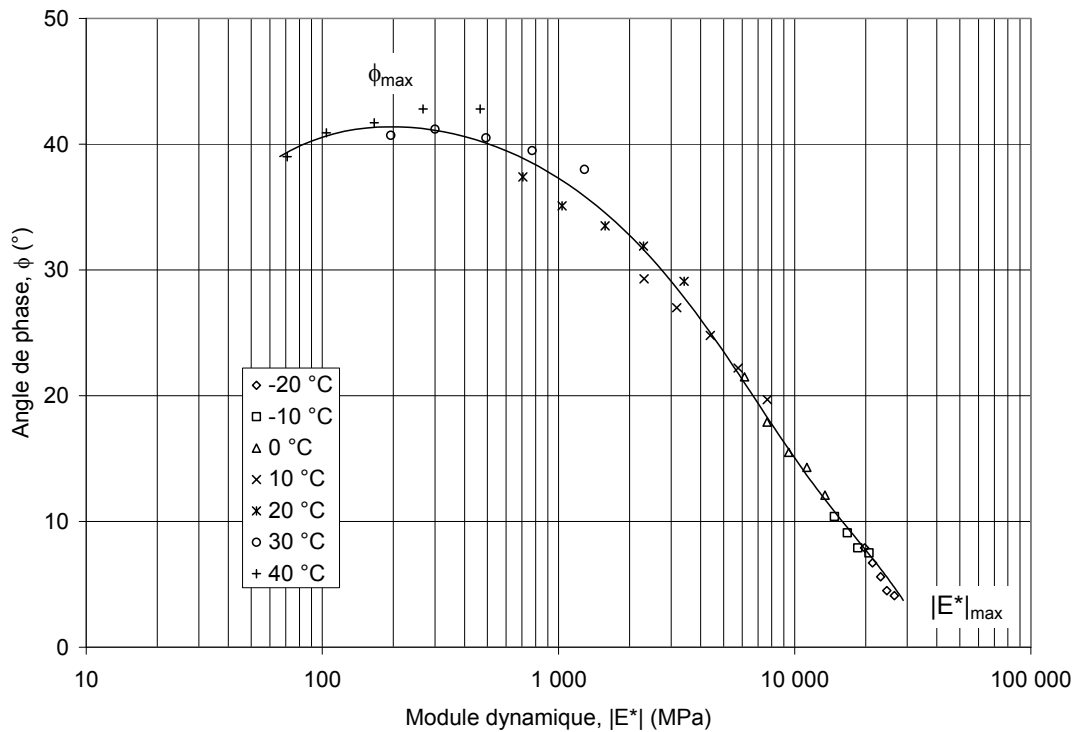


Figure 6 – Module complexe d'un enrobé dans l'espace de Black

La courbe de Black montre que le ϕ de l'enrobé augmente lorsque le $|E^*|$ diminue, ou lorsque le temps de chargement ou la température augmente. Par ailleurs, le ϕ diminue à de faibles valeurs de $|E^*|$ lorsque le comportement élastique des granulats devient significatif comparativement au comportement viscoélastique du bitume. La courbe de Black d'un bitume ne présente pas cette diminution caractéristique de ϕ observée pour les enrobés.

L'enrobé présente un comportement thermorhéologique simple lorsque les résultats de E^* se présentent sous la forme d'une courbe unique dans le plan de Cole et Cole et l'espace de Black, ce qui signifie que le principe d'équivalence temps-température est applicable. Le principe d'équivalence temps-température stipule qu'une même valeur de E^* peut être obtenue avec différents couples de fréquence et de température, ce qui permet de déterminer une fréquence équivalente (réduite) pour une température de référence.

Ainsi, les isothermes de $|E^*|$ et de ϕ peuvent être traduites par rapport à l'axe des fréquences, afin de se superposer sous forme d'une courbe maîtresse à une température de référence. La construction d'une courbe maîtresse pour une température de référence de 10 °C est présentée à la Figure 7 à partir des isothermes de $|E^*|$ et à la Figure 8 à partir des isothermes de ϕ . Les températures et les fréquences prescrites par les méthodes d'essai sont sélectionnées de manière à ce que les isothermes se chevauchent, afin de permettre la construction des courbes maîtresses.

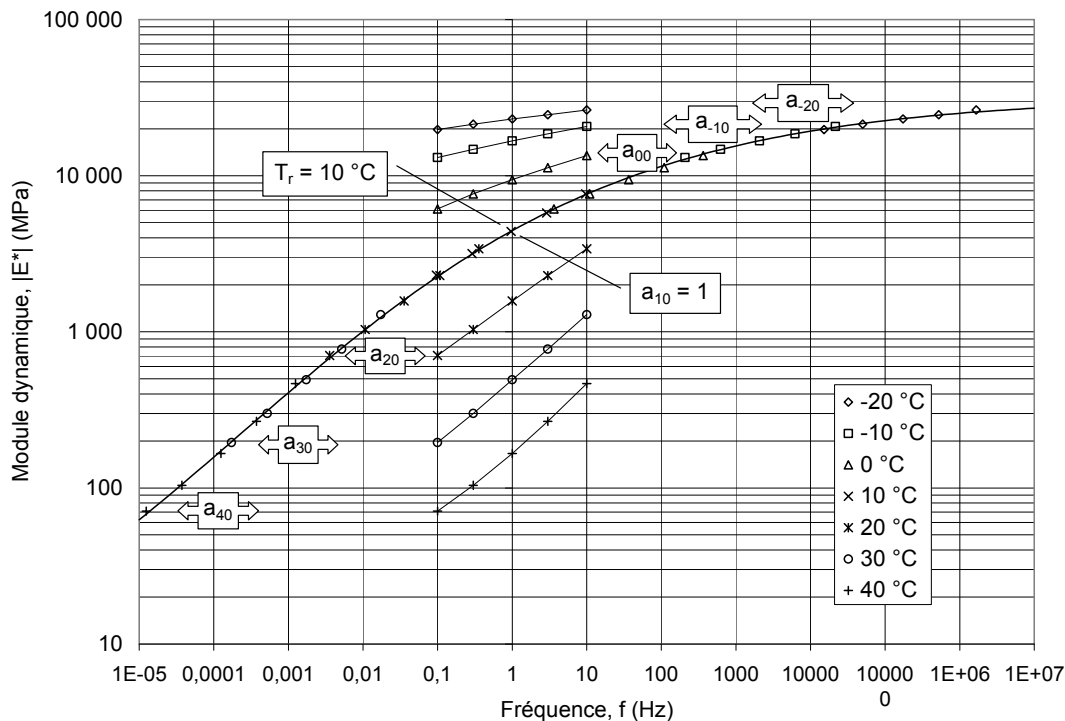


Figure 7 – Courbe maîtresse de module dynamique à 10 °C d'un enrobé

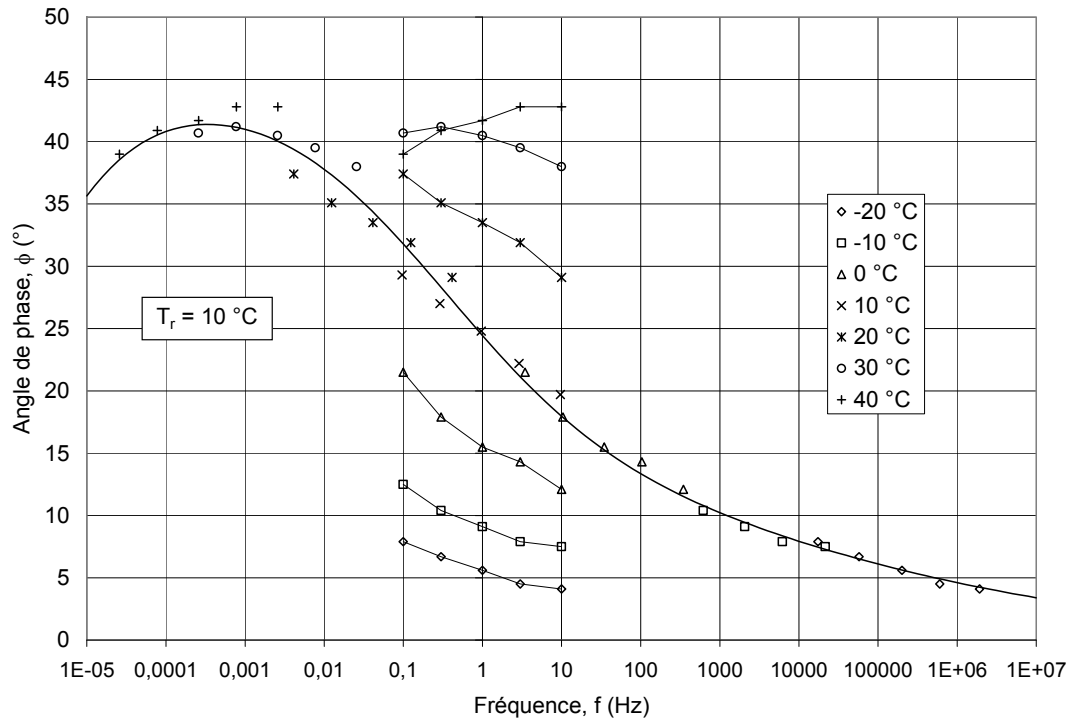


Figure 8 – Courbe maîtresse d’angle de phase à 10 °C d’un enrobé

De manière analogue, il est possible de représenter la partie réelle E_1 et la partie imaginaire E_2 du E^* sous forme de courbes maîtresses, comme le montre la Figure 9. La distribution de E_1 et de E_2 est uniformément répartie dans un plan bilogarithmique, contrairement au plan arithmétique de Cole et Cole.

Lors de la construction des courbes maîtresses, un facteur de translation (a_T) est déterminé pour chaque température, où le a_T de la température de référence est égal à 1 ($\log a_T = 0$). Une relation entre les a_T et la température est déterminée par la suite, tel que le montre la Figure 10. Cette relation est nécessaire pour prédire la valeur de E^* à une température autre que la température de référence.

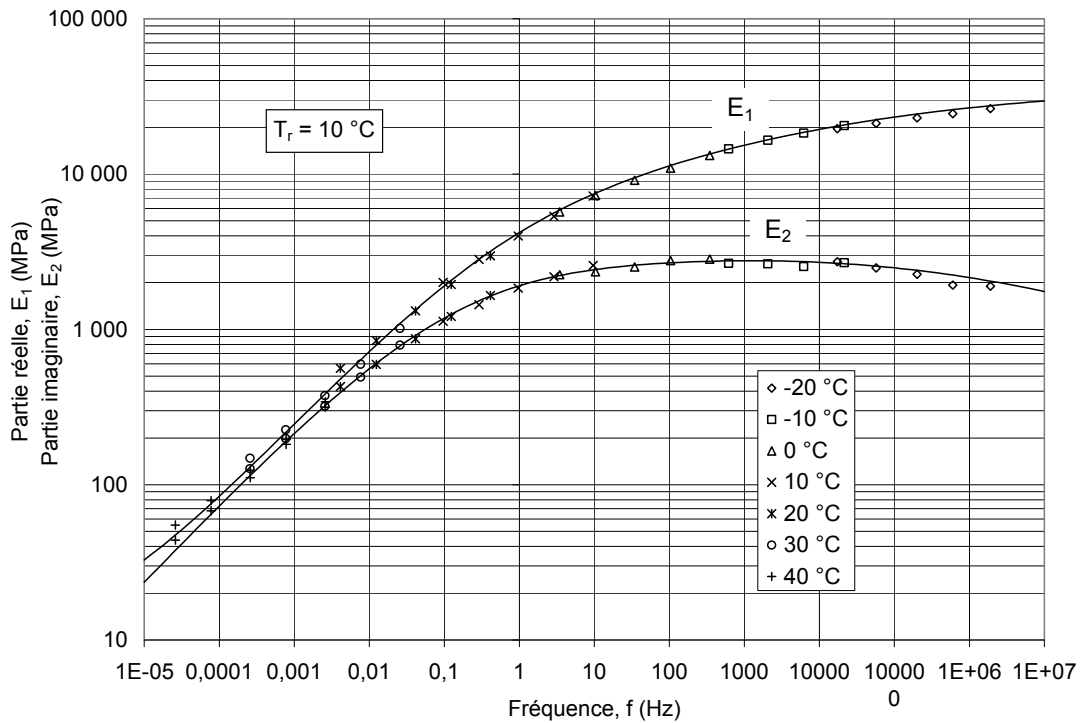


Figure 9 – Courbes maîtresses de module complexe à 10 °C d'un enrobé

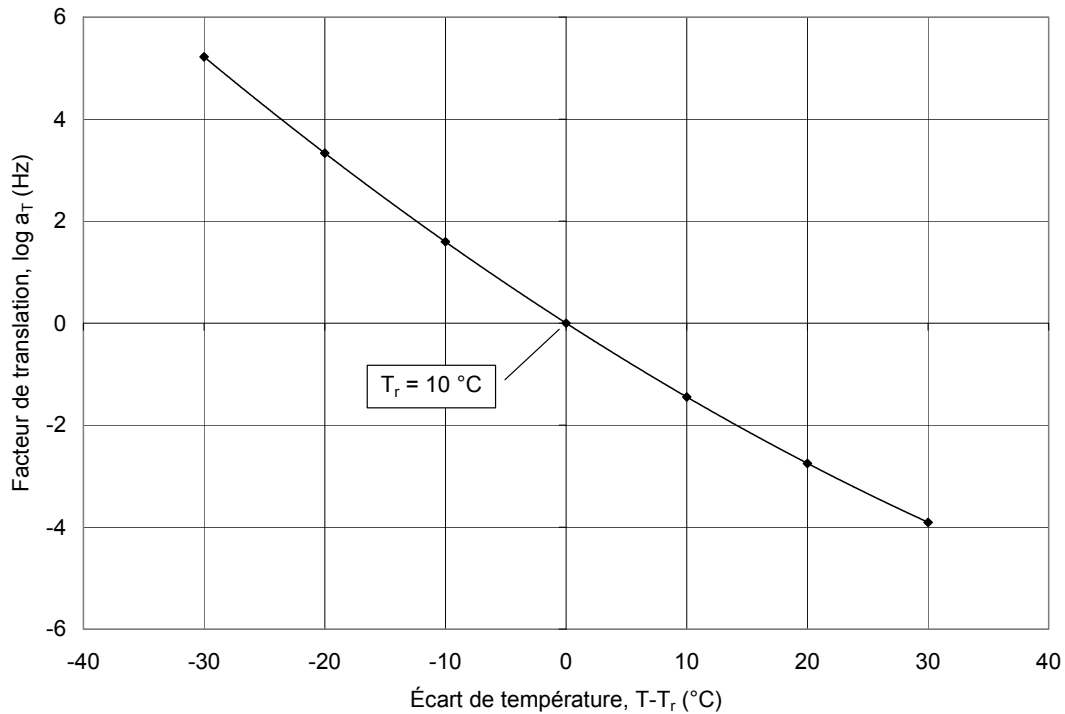


Figure 10 – Facteurs de translation pour une température de référence de 10 °C d'un enrobé

2.5 Modélisation

Le E^* d'un enrobé peut être modélisé en utilisant le modèle analogique de Huet-Sayegh présenté à l'Équation 9 (Huet, 1963; Sayegh, 1965). Les coefficients de régression du modèle sont associés à des comportements mécaniques simples tels que des ressorts (E_0 , E_∞) et des amortisseurs paraboliques (k , h), comme l'illustre la Figure 11. Le modèle est fonction de la pulsation (ω) (fréquence) et du temps caractéristique (τ) qui est ajusté pour une température de référence selon le principe d'équivalence temps-température présenté à l'Équation 10. Le MTQ utilise la relation quadratique indiquée à l'Équation 11 pour décrire la relation entre le $\log a_T$ et la température.

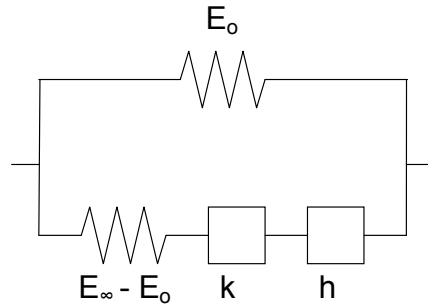


Figure 11 – Représentation du modèle analogique de Huet-Sayegh

Équation 9 :
$$E^* = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$$

Équation 10 :
$$\tau = a_T \cdot \tau_0 \Leftrightarrow \log \tau = \log \tau_0 + \log a_T$$

Équation 11 :
$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

où E^* = module complexe (MPa),
 τ = temps de relaxation (s),
 a_T = facteur de translation (MPa),
 i = nombre imaginaire ($\sqrt{-1}$),
 ω = pulsation ($2\pi f$) (rad/s),
 T = température ($^{\circ}\text{C}$),
 T_r = température de référence (10°C),
 E_0 , E_∞ , δ , k , h , τ_0 , a_1 , a_2 = coefficients de régression.

Le MTQ détermine les coefficients de régression du modèle de Huet-Sayegh par la méthode des moindres carrés, en maximisant le coefficient de détermination (R^2) de la prédiction de $\log E_1$ et $\log E_2$. L'erreur de prédiction est déterminée pour les valeurs logarithmiques puisque les deux composantes du E^* se distribuent plus uniformément sur une échelle logarithmique (Figure 9). Les valeurs de E_1 et de E_2 sont déterminées selon l'Équation 12 et l'Équation 13.

Équation 12 :
$$E_1 = E_o + \frac{D_1}{D_1^2 + D_2^2}$$

Équation 13 :
$$E_2 = \frac{D_2}{D_1^2 + D_2^2}$$

où
$$D_1 = \frac{1 + \delta(\omega\tau)^{-k} \cos\left(k \frac{\pi}{2}\right) + (\omega\tau)^{-h} \cos\left(h \frac{\pi}{2}\right)}{E_\infty - E_o}$$

$$D_2 = \frac{\delta(\omega\tau)^{-k} \sin\left(k \frac{\pi}{2}\right) + (\omega\tau)^{-h} \sin\left(h \frac{\pi}{2}\right)}{E_\infty - E_o}$$

Le MTQ détermine également le E_o du modèle par extrapolation dans le plan de Cole et Cole à partir des valeurs de E_1 et de E_2 à 30 °C et 0,1 Hz en diminuant, tel que l'indique la Figure 12. Le E_∞ est extrapolé dans l'espace de Black à partir des valeurs de $|E^*|$ à 0 °C et 1 Hz en augmentant, tel que le montre la Figure 13.

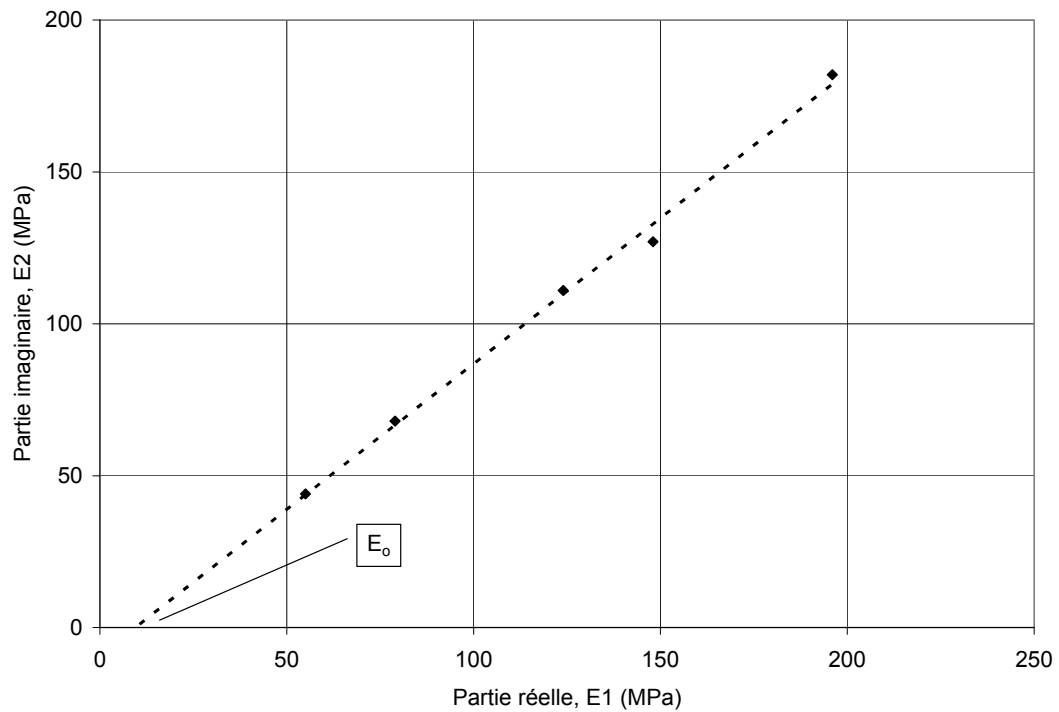


Figure 12 – Extrapolation du E_0 d'un enrobé dans le plan de Cole et Cole

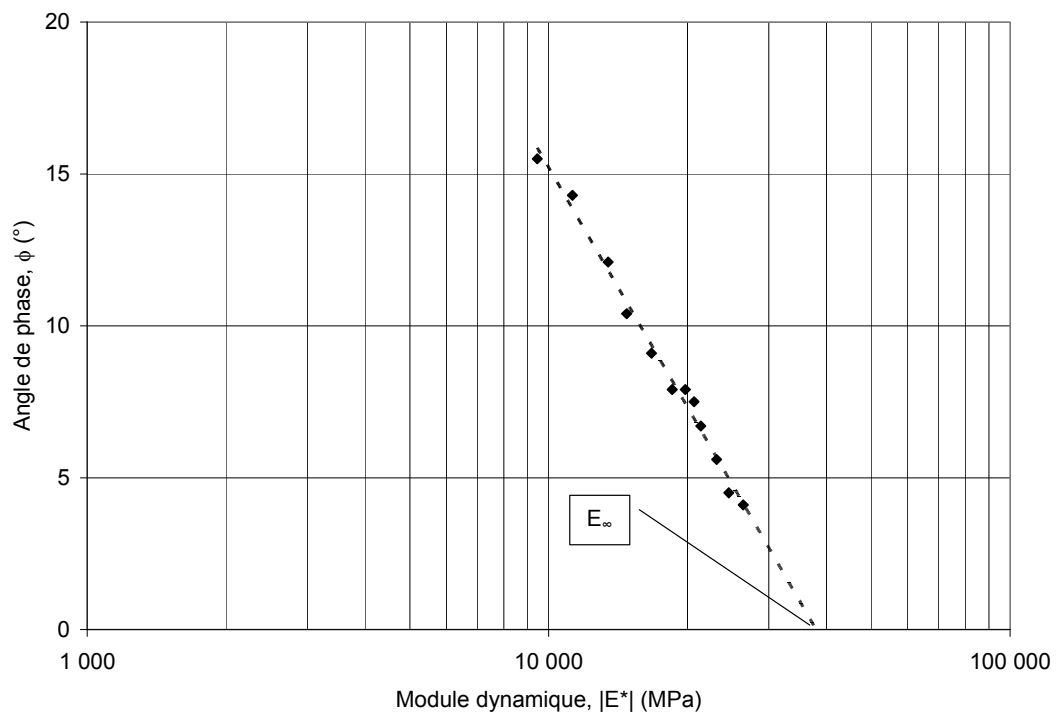


Figure 13 – Extrapolation du E_∞ d'un enrobé dans l'espace de Black

La courbe maîtresse de $|E^*|$ peut également être modélisée en utilisant le modèle de Witczak présenté à l'Équation 14 (Witczak et Fonseca, 1996; Witczak, 2005). Il s'agit du modèle retenu pour le dimensionnement des chaussées par le *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) (NCHRP 1-37A). Ce modèle de forme sigmoïdale varie entre le $\log |E^*|_{\min} (\delta)$ et le $\log |E^*|_{\max} (\delta + \alpha)$ de l'enrobé selon deux paramètres de forme (β , γ), en fonction de la fréquence réduite (f_r) déterminée selon le principe d'équivalence temps-température indiqué à l'Équation 15. Le MTQ utilise la même relation quadratique présentée à l'Équation 16 pour modéliser l'influence de la température.

Équation 14 :
$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \gamma \log f_r)}}$$

Équation 15 :
$$f_r = a_T \cdot f \Leftrightarrow \log f_r = \log f + \log a_T$$

Équation 16 :
$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

où $|E^*|$ = module dynamique (MPa),
 f_r = fréquence réduite (Hz),
 f = fréquence (Hz),
 a_T = facteur de translation (Hz),
 T = température (°C),
 T_r = température de référence (10 °C),
 $\delta, \alpha, \beta, \gamma, a_1, a_2$ = coefficients de régression

Le MTQ détermine les coefficients de régression du modèle de Witczak par la méthode des moindres carrés, en minimisant l'erreur moyenne de la prédiction (RMSE) de $\log |E^*|$. Le modèle de Witczak et le modèle de Huet-Sayegh sont de forme similaire et donnent une prédiction de $|E^*|$ similaire, mais le modèle de Witczak ne prédit pas le E^* de l'enrobé (Doucet, 2006). Ainsi, le modèle de Witczak se limite à l'analyse élastique des chaussées, alors que le modèle de Huet-Sayegh est nécessaire à l'analyse viscoélastique et peut être utilisé en élasticité.

3. ESSAI DE TRACTION-COMPRESSION DIRECTE

3.1 Équipement TCD

Le MTQ a acquis en 1995 une presse hydraulique asservie CS 7800 de 100 kN de la compagnie James Cox and Sons, incluant une enceinte à température contrôlée de -20 °C à 80 °C, pour déterminer le module complexe et la résistance à la fatigue des enrobés à l'aide d'un essai de flexion de poutre en quatre points (Doucet et coll., 1999a, 1999b; Doucet, 2000). En 2005, l'équipement a été remis à neuf à l'interne suite à un bris majeur, en remplaçant l'ensemble des composantes électroniques, en programmant un nouveau logiciel de contrôle, d'acquisition et d'analyse en langage LabVIEW, et en modifiant le système de contrôle de la température (Doucet et Auger, 2007). De plus, la méthode d'essai a été modifiée pour un essai de traction-compression directe (TCD). La Figure 14 montre une photo d'ensemble de l'équipement, la Figure 15 une photo de l'essai TCD et la Figure 16 une image de l'écran de contrôle LabVIEW.



Figure 14 – Photo de la presse hydraulique asservie et de l'enceinte à température contrôlée

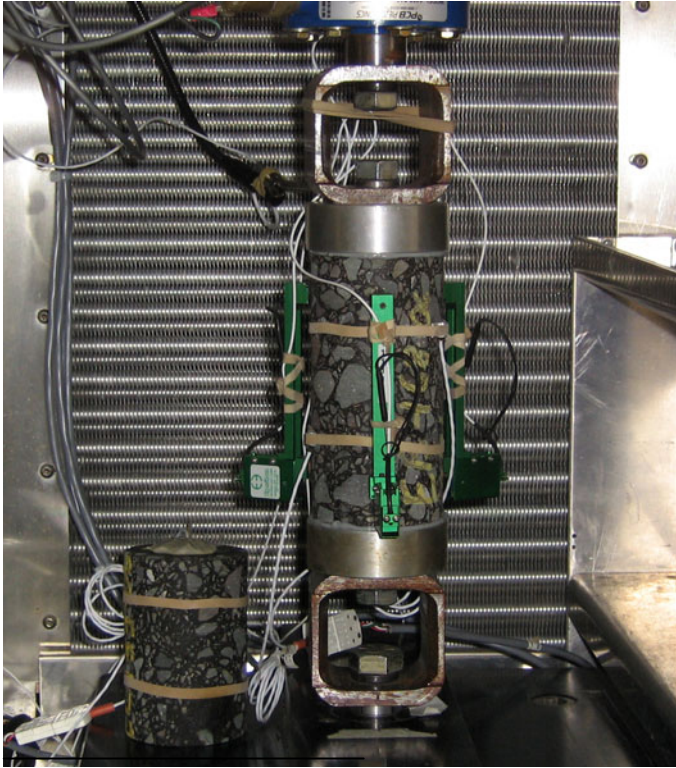


Figure 15 – Photo de l'essai de traction-compression directe

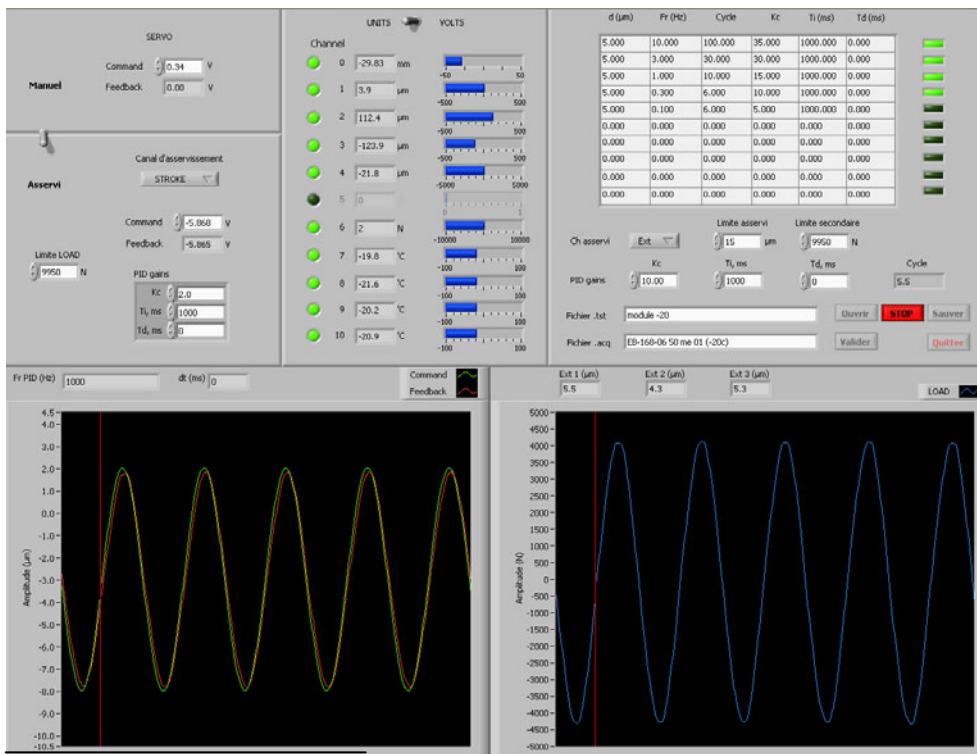


Figure 16 – Écran de contrôle de l'essai de traction-compression directe

La méthode d'essai LC 26-700 utilise un équipement TCD dont un schéma est présenté à la Figure 17. Un plateau de chargement en aluminium est collé, avec du ciment époxy, à chaque extrémité d'une éprouvette d'enrobé de 75 mm de diamètre par 150 mm de hauteur.

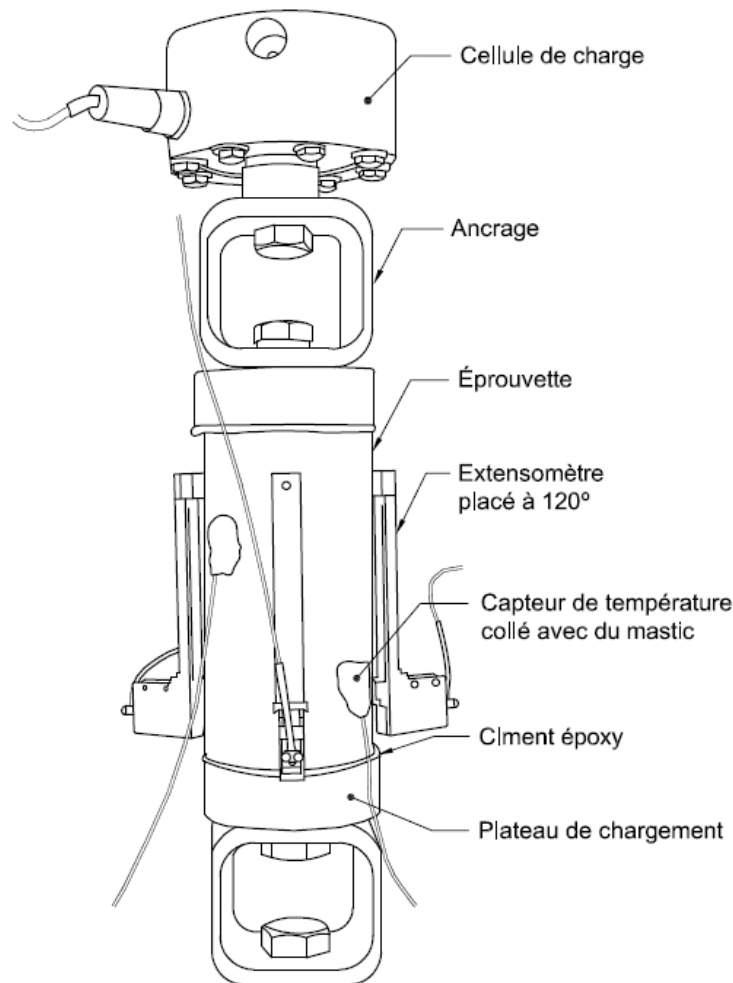


Figure 17 – Schéma de l'équipement de traction-compression directe (LC 26-700)

Les déplacements sont mesurés à l'aide de trois extensomètres de 100 mm, d'une course de $\pm 0,5$ mm et d'une précision de $0,5 \mu\text{m}$. Les extensomètres aimantés sont installés à 120° sur le deux tiers central de l'éprouvette (100 mm), avec des plots en acier collés. Les extensomètres sont régulièrement calibrés à l'aide d'un micromètre certifié. Le coefficient de variation entre les trois amplitudes de déplacement (déformation) mesurées lors des essais doit être inférieur à 20 %, sauf à basse température où le niveau de déformation est diminué pour tenir compte de la rigidité plus élevée de l'enrobé et de la capacité de la cellule de charge.

La force est mesurée à l'aide d'une cellule de charge d'une capacité de $\pm 4\,450\text{ N}$ et d'une précision de 2 N ($0,05\%$), qui relie le plateau de chargement supérieur au piston de la presse hydraulique. La cellule de charge est régulièrement calibrée à l'aide d'une cellule de charge certifiée. Une amplitude minimale de $\pm 10\text{ N}$ est nécessaire pour obtenir une lecture de force acceptable.

La température est mesurée à l'aide de trois sondes de température d'une plage minimale de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ et d'une précision de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, dont deux des sondes sont installées sur l'éprouvette à l'aide de mastic ou d'élastiques, et la troisième est installée à l'intérieur d'une éprouvette témoin. Les sondes de température sont régulièrement calibrées à l'aide de sondes certifiées. L'écart de température entre les trois sondes ne doit pas excéder $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ au cours de l'essai.

3.2 Vérification avec une éprouvette d'aluminium

Une vérification générale du fonctionnement de l'équipement a été effectuée à l'aide d'une éprouvette d'aluminium, soit un matériau élastique dont le module élastique est considéré comme constant et l'angle de phase de 0° , à l'intérieur des plages de fréquence et de température couvertes par la méthode LC 26-700. L'éprouvette a 25 mm de diamètre et 150 mm de hauteur, afin que l'aire de chargement soit environ dix fois plus petite qu'une éprouvette d'enrobé, puisque le module élastique de l'aluminium est environ dix fois plus élevé.

L'éprouvette d'aluminium a été installée cinq fois dans l'appareil pour déterminer son module élastique et le déphasage de la mesure de déformation par balayage de fréquence entre 10 Hz et $0,1\text{ Hz}$ à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, avec un niveau de déformation de $50\text{ }\mu\text{m/m}$. À chaque installation, l'éprouvette a été caractérisée 5 fois pour un total de 25 essais. La Figure 18 et la Figure 19 montrent respectivement le module élastique et le déphasage de la mesure de déformation en fonction de la fréquence pour chaque installation, incluant la moyenne et l'écart type des 25 lectures. Cette vérification devrait être effectuée au moins annuellement, afin de s'assurer du bon fonctionnement de l'équipement.

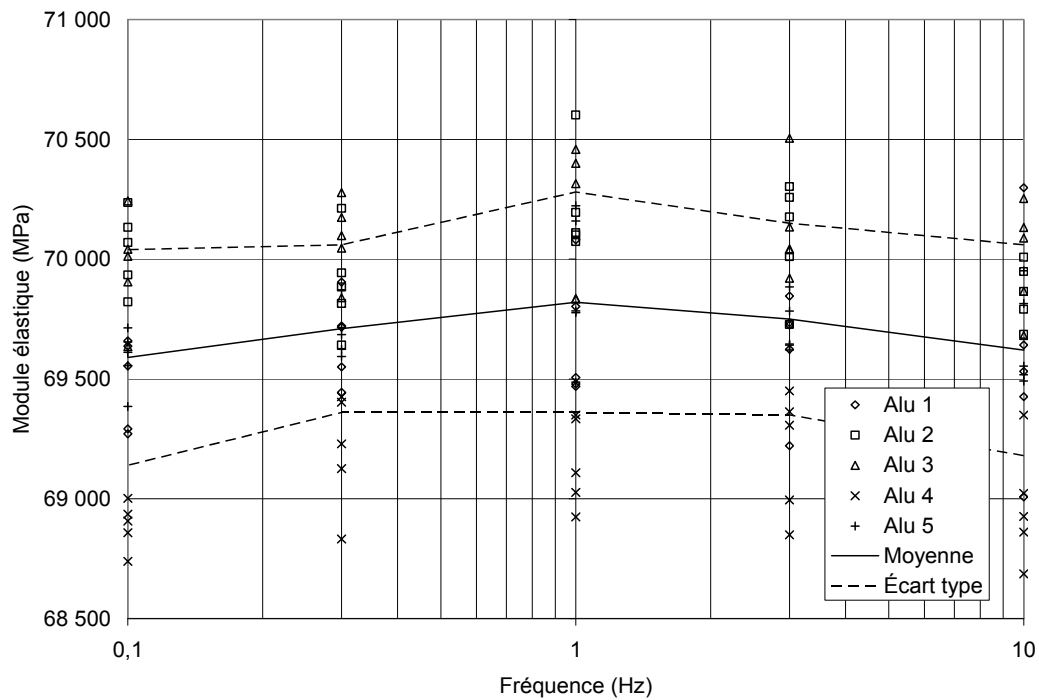


Figure 18 – Module élastique d'une éprouvette d'aluminium à 20 °C en fonction de la fréquence

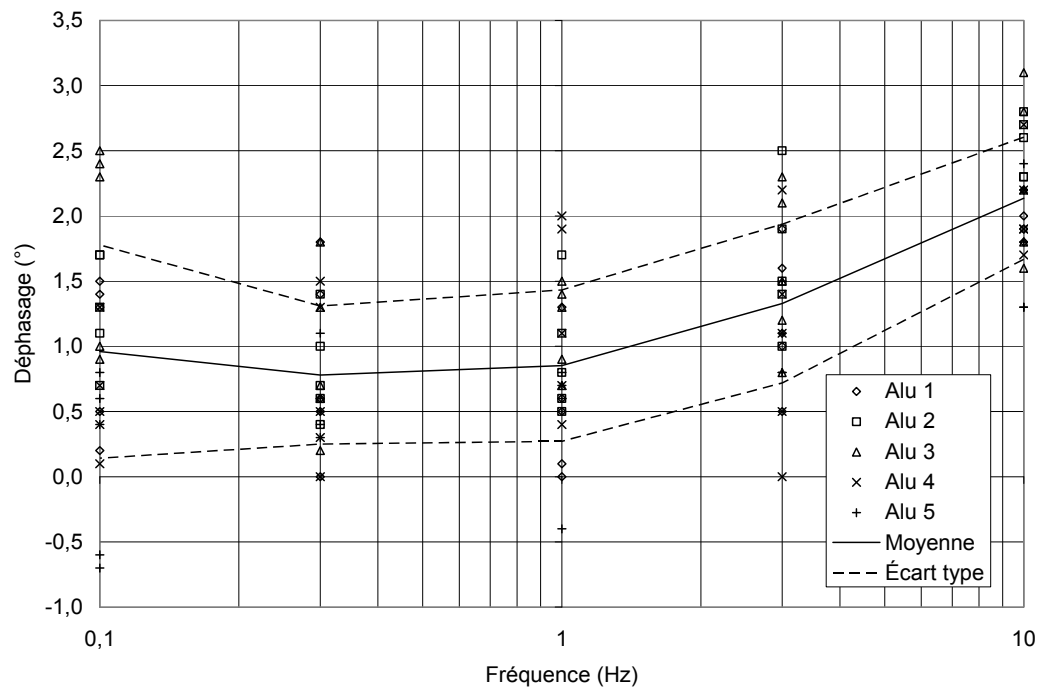


Figure 19 – Déphasage de la mesure de déformation d'une éprouvette d'aluminium à 20 °C en fonction de la fréquence

La moyenne et l'écart type du module élastique de l'éprouvette d'aluminium et du déphasage de la mesure de déformation sont indiqués au Tableau 4 en fonction de la fréquence. Les résultats confirment que l'éprouvette d'aluminium présente un comportement élastique avec un module élastique constant de 69 700 MPa et un faible écart type de 420 MPa. Par ailleurs, un déphasage de la mesure de déformation de 1,2° est observé en moyenne, avec un écart type de 0,8°.

Tableau 4 – Module élastique et déphasage de la mesure de déformation d'une éprouvette d'aluminium à 20 °C en fonction de la fréquence

Fréquence	Module élastique (MPa)			Déphasage (°)		
	Moyenne	Écart type	Nombre	Moyenne	Écart type	Nombre
10 Hz	69 620	440	25	2,1	0,5	25
3 Hz	69 750	400	25	1,3	0,6	25
1 Hz	69 820	460	25	0,9	0,6	25
0,3 Hz	69 710	350	25	0,8	0,5	25
0,1 Hz	69 590	450	25	1,0	0,8	25
Moyenne	69 700	420	125	1,2	0,8	125

Ainsi, l'équipement donne une lecture stable du module élastique de l'éprouvette d'aluminium, mais présente un déphasage dans la mesure de sa déformation. Ainsi, le déphasage moyen mesuré avec l'éprouvette d'aluminium à chaque fréquence est soustrait de la valeur de ϕ déterminée lors des essais de E^* sur les enrobés, afin de corriger le déphasage attribué à l'équipement. Par ailleurs, l'écart type du déphasage de la mesure de déformation indique que les résultats de ϕ pour les enrobés seront malgré tout variables.

3.3 Préparation des éprouvettes

Les méthodes d'essai AASHTO TP 62-07 et ASTM D 3497-79 prescrivent l'utilisation de la presse à cisaillement giratoire (PCG) pour la préparation des éprouvettes utilisées pour la détermination du E^* des enrobés. Une étude de la distribution des vides interstitiels à l'intérieur d'éprouvettes préparées à l'aide de la PCG du MTQ montre que les vides ne sont pas distribués uniformément (Doucet et Auger, 2007).

Des éprouvettes d'enrobé GB-20 de 150 mm de diamètre sur 135 mm de hauteur ont été préparées à 5, 6 et 7 % de vides interstitiels à l'aide de la PCG, tel que présenté au Tableau 5 (LC 26-003). Le carottage d'une éprouvette de 75 mm de diamètre au centre des éprouvettes de la PCG montre que les vides varient de 1,8 à 2,9 % sur toute la hauteur et de 0,3 à 1,3 % dans la section centrale de 100 mm, section sur laquelle le E^* est déterminé. La variation des vides interstitiels dans les éprouvettes est jugée inacceptable.

Tableau 5 – Vides interstitiels d'éprouvettes de PCG d'enrobé GB-20 et d'éprouvettes carottées à l'intérieur

Éprouvettes	Diamètre (mm)	Hauteur (mm)	Vides interstitiels V_i (%)		
PCG	150	135	5,0	6,0	7,0
Carotte	75	135	1,8	2,9	2,8
Carotte coupée	75	100	0,3	1,0	1,3

Par ailleurs, la méthode d'essai EN 12697-26 prescrit l'utilisation d'un compacteur de plaque ou giratoire pour la préparation des éprouvettes pour l'essai TCD. Une étude des vides interstitiels de deux plaques d'enrobé GB-20 de 100 mm d'épaisseur, préparées à l'aide du compacteur de plaque à pneu roulant du MTQ montré à la Figure 20 (LC 26-400), indique que la distribution des vides est uniforme au centre de la plaque. En effet, les plaques préparées à 5 % de vides présentent une section centrale uniforme à 3 % de vides, tel que déterminé par des carottages horizontaux et verticaux de 75 mm de diamètre, dont le volume des vides moyen est indiqué par les zones pointillées à la Figure 21. Chaque zone pointillée représente la moyenne de deux carottages, les cercles pointillés les carottages verticaux et les rectangles pointillés les carottages horizontaux.



Figure 20 – Compacteur de plaque à pneu roulant du MTQ

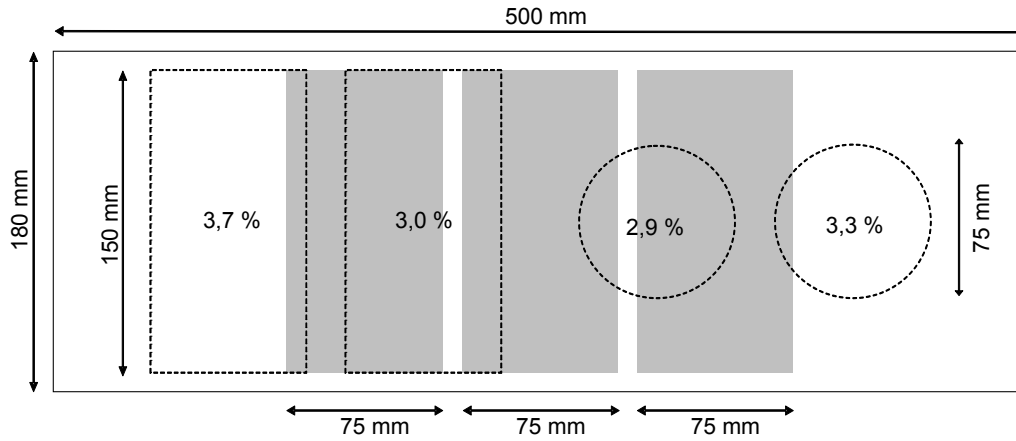


Figure 21 – Vue en plan de la distribution des vides interstitiels dans une plaque d'enrobé GB-20 de 100 mm d'épaisseur (Doucet et Auger, 2007)

Ainsi, l'utilisation du compacteur de plaque selon la méthode d'essai LC 26-400 est retenue comme méthode de préparation des éprouvettes pour la détermination de E^* à l'aide de l'essai TCD. Trois éprouvettes de 75 mm de diamètre sur 150 mm de longueur sont carottées côte à côte, transversalement au centre de la plaque, tel que l'illustrent les trois zones grisées à la Figure 21. Le ratio de la longueur sur le diamètre des éprouvettes est de 2, ce qui respecte le ratio minimal de 1,8 prescrit par la méthode d'essai EN 12697-26. De plus, le carottage est effectué transversalement au plan de compactage, ce qui correspond à l'orientation où la sollicitation en traction de l'enrobé est maximale sur la route. La carotteuse utilisée par le MTQ pour le carottage des éprouvettes est montrée à la Figure 22.



Figure 22 – Carotteuse pour le carottage des éprouvettes

Les éprouvettes sont entreposées pendant au moins deux semaines, et au plus deux mois, à la température et à l'humidité ambiantes avant la détermination de E^* , conformément à la méthode d'essai EN 12697-26. Par ailleurs, la méthode d'essai AASHTO TP 62 prescrit que les éprouvettes doivent être caractérisées au plus deux jours après leur préparation, sinon elles doivent être recouvertes d'une pellicule plastique pour un maximum de deux semaines afin d'éviter leur vieillissement. Pour une question de répétabilité et de logistique, il est jugé préférable d'attendre deux semaines avant d'effectuer les essais, afin d'uniformiser le vieillissement des éprouvettes et de permettre la détermination de la densité brute, le collage des plateaux de chargement et la détermination du E^* sur plusieurs jours.

La densité brute des éprouvettes est déterminée conformément à la méthode LC 26-040, afin de déterminer leur teneur en vides interstitiels en fonction de la densité maximale de l'enrobé. Si la densité maximale est inconnue, elle est déterminée à partir des mêmes éprouvettes suite à la détermination du E^* selon la méthode LC 26-045. Les plateaux de chargement sont collés avec du ciment époxy à l'aide du banc de collage montré à la Figure 23, spécifiquement développé pour assurer un collage des plateaux perpendiculaire et centré par rapport à l'axe de chargement. Les plots d'ancrage pour les extensomètres sont collés à l'aide d'un autre banc de collage montré à la Figure 24, afin d'assurer une mesure dans l'axe longitudinal de l'éprouvette sur une distance exacte de 100 mm.



Figure 23 – Banc de collage pour les plateaux de chargement



Figure 24 – Banc de collage pour les plots d'ancrage

3.4 Conditionnement des enrobés

La méthode d'essai LC 26-400 pour la préparation des plaques d'enrobé à l'aide du compacteur à pneu roulant prescrit de remettre l'enrobé malaxé à l'étuve une heure à la température de compactage, avant de compacter une plaque de 100 mm (LC 26-400). Par ailleurs, la méthode d'essai AASHTO R 30-02 sur le conditionnement des enrobés en laboratoire prescrit une remise à l'étuve de quatre heures avant le compactage pour la détermination de comportement mécanique des enrobés, en brassant à toutes les heures l'enrobé étendu uniformément sur une épaisseur de 25 à 50 mm (AASHTO R 30-02). Le conditionnement de quatre heures simule la production de l'enrobé en usine, le transport et la mise en œuvre. Le conditionnement d'une heure est utilisé pour le contrôle des enrobés à l'essai d'orniérage, afin de reproduire le chauffage des boîtes d'enrobé refroidies.

Le E^* d'un enrobé ESG-14 contenant différents bitumes a été déterminé avec un conditionnement d'une heure et de quatre heures à la température de compactage, afin d'évaluer l'influence du conditionnement et de déterminer le temps de conditionnement approprié pour la préparation des éprouvettes. La rigidité des enrobés conditionnés pendant une heure étant plus faible que celle des enrobés conditionnés durant quatre heures, la déformation appliquée à partir de 20 °C a été augmentée pour obtenir une sollicitation adéquate, tel qu'indiqué au Tableau 6. Les rapports d'essai de E^* sont disponibles aux annexes 1 et 2.

Tableau 6 – Niveau de déformation en fonction de la température pour la détermination du module complexe des enrobés pour différents temps de conditionnement

Temps de conditionnement	Niveaux de déformation, ε ($\mu\varepsilon$)			
	-20 et -10 °C	0 et 10 °C	20 et 30 °C	40 et 50 °C
1 heure	30	50	70	100
4 heures	30	50	50	50

Les courbes maîtresses de $|E^*|$ des enrobés ESG-14 avec une heure et quatre heures de conditionnement sont montrées de la Figure 25 à la Figure 29 pour différents bitumes, en fonction de la température pour une fréquence de référence de 10 Hz. L'influence du temps de conditionnement augmente avec la température dans un plan bilogarithmique. L'écart de $|E^*|$ est perceptible à partir de 0 °C pour les bitumes PG 58 et de -10 °C pour les bitumes PG 64 et 70. L'écart de $|E^*|$ à 50 °C est environ du double pour les bitumes PG 58 et du triple pour les bitumes PG 64 et 70. L'écart de $|E^*|$ à 10 °C est d'environ 1 000 MPa pour les bitumes PG 58-28 et PG 58-34, de 2 000 MPa pour le bitume PG 64-28, de 3 000 MPa pour le bitume PG 70-28 et de 4 000 MPa pour le bitume PG 64-34, ce qui est un écart très significatif pour le dimensionnement des chaussées.

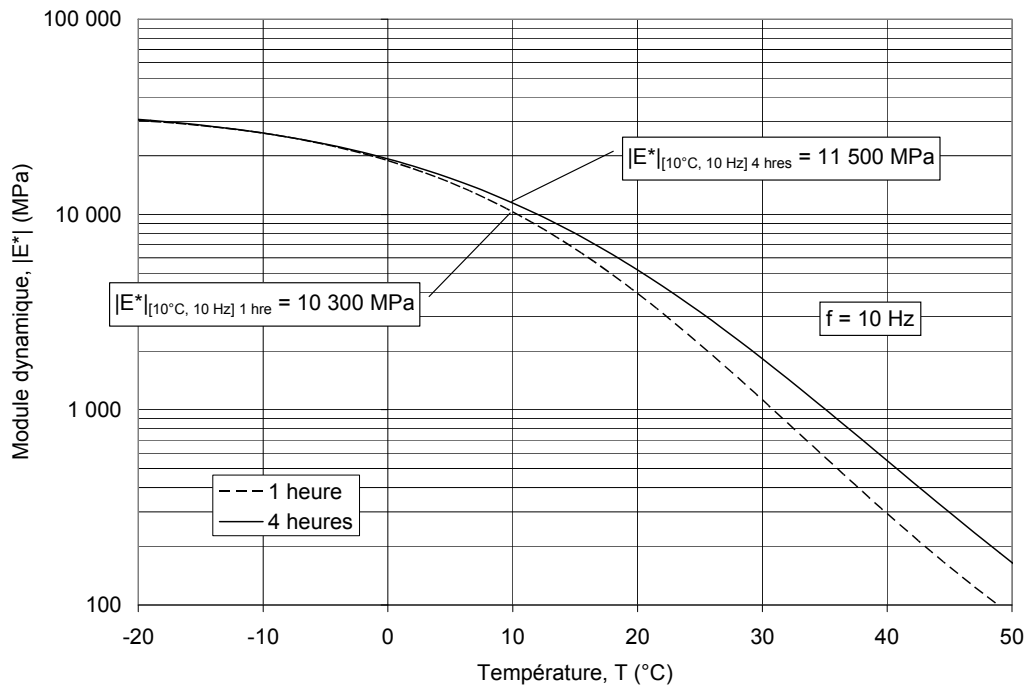


Figure 25 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-28 à différents temps de conditionnement

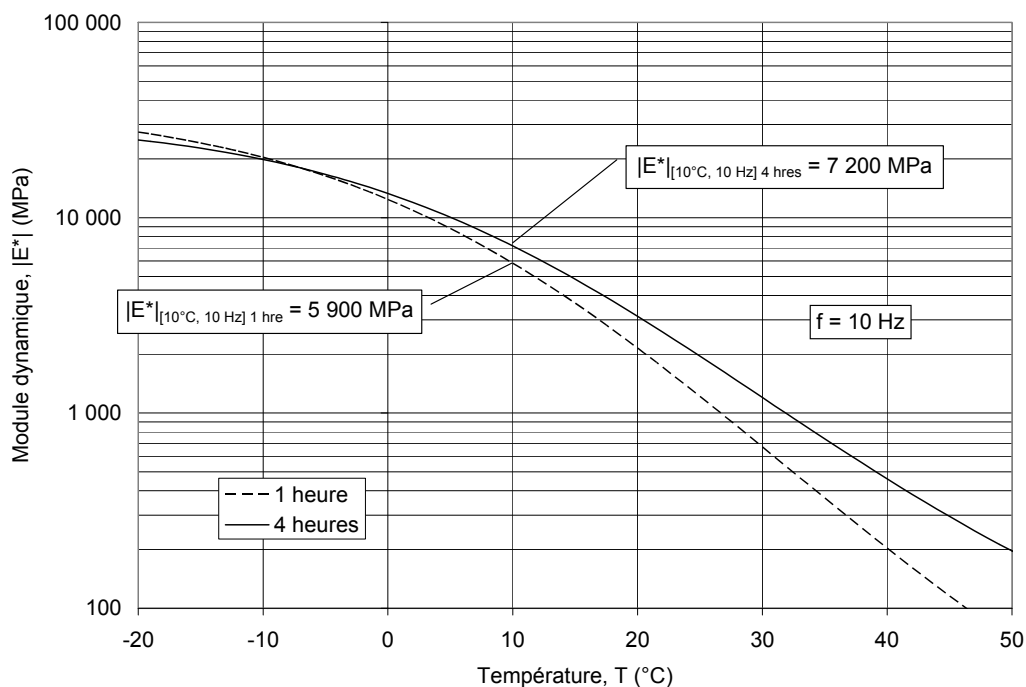


Figure 26 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 à différents temps de conditionnement

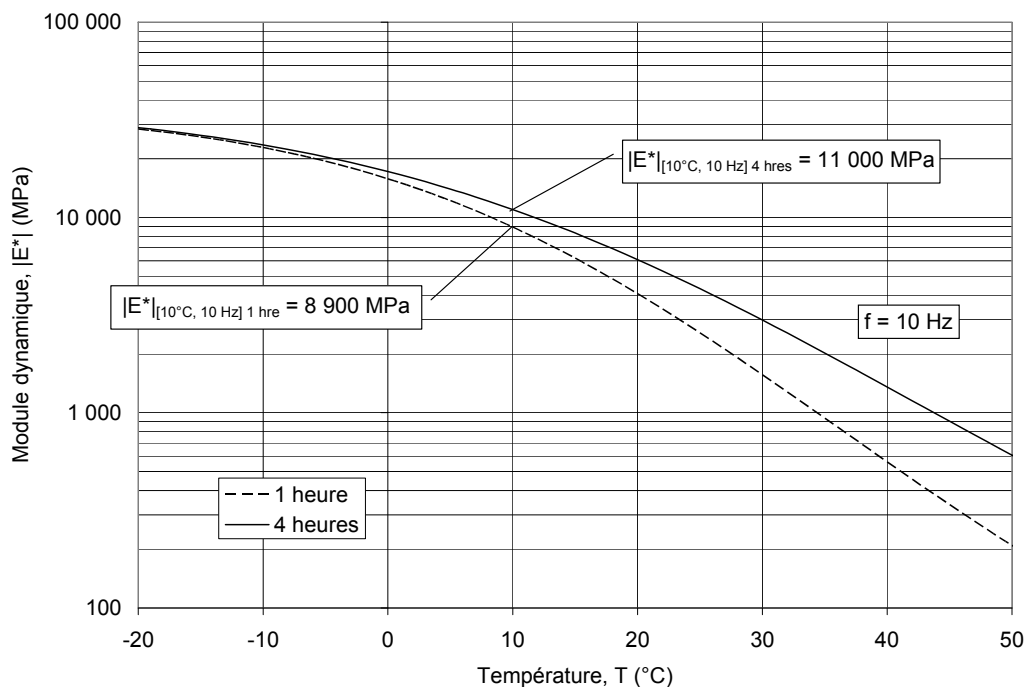


Figure 27 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 64-28 à différents temps de conditionnement

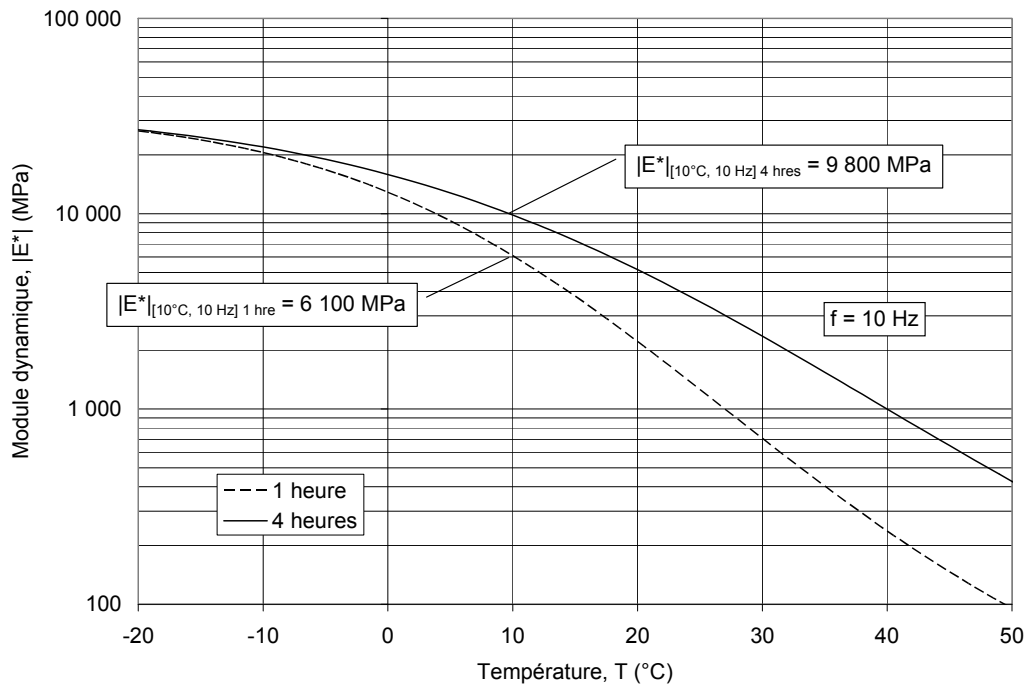


Figure 28 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 64-34 à différents temps de conditionnement

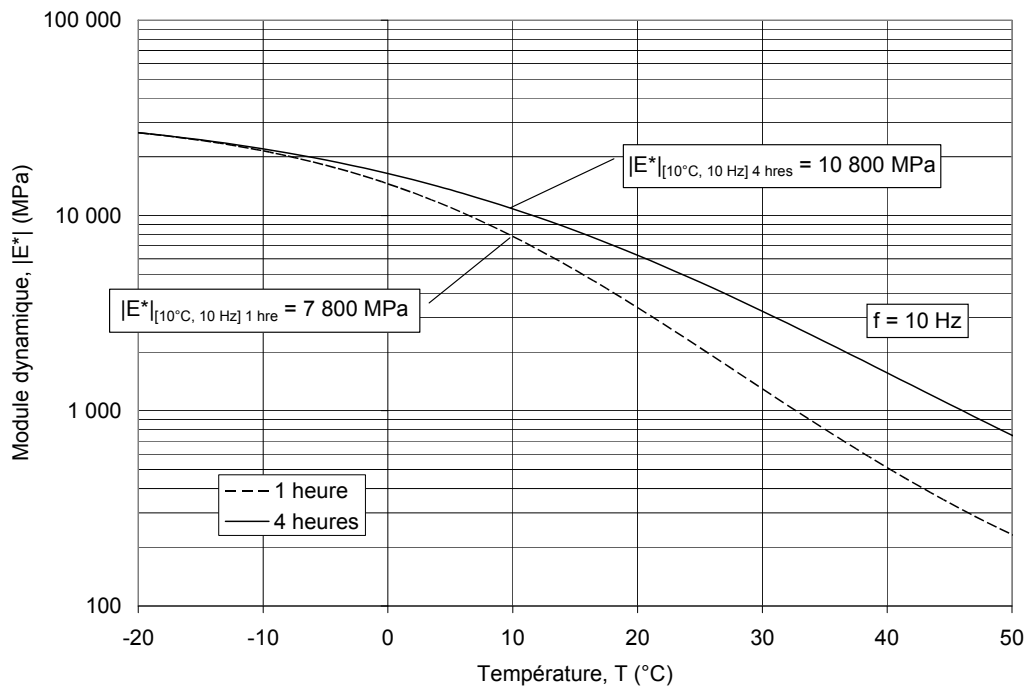


Figure 29 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 70-28 à différents temps de conditionnement

Le temps de conditionnement influence également le classement des enrobés, tel que le montre la Figure 30 pour un conditionnement d'une heure et la Figure 31, pour un conditionnement de quatre heures. L'influence du temps de conditionnement est particulièrement évidente pour l'enrobé avec un bitume PG 64-34, qui se retrouve avec les bitumes PG 58-28 et 58-34 à température élevée pour un conditionnement d'une heure, alors qu'il se classe avec le bitume homologue PG 64-28 pour un conditionnement de quatre heures. L'enrobé avec un bitume PG 70-28 se démarque également davantage à température élevée avec un conditionnement de quatre heures.

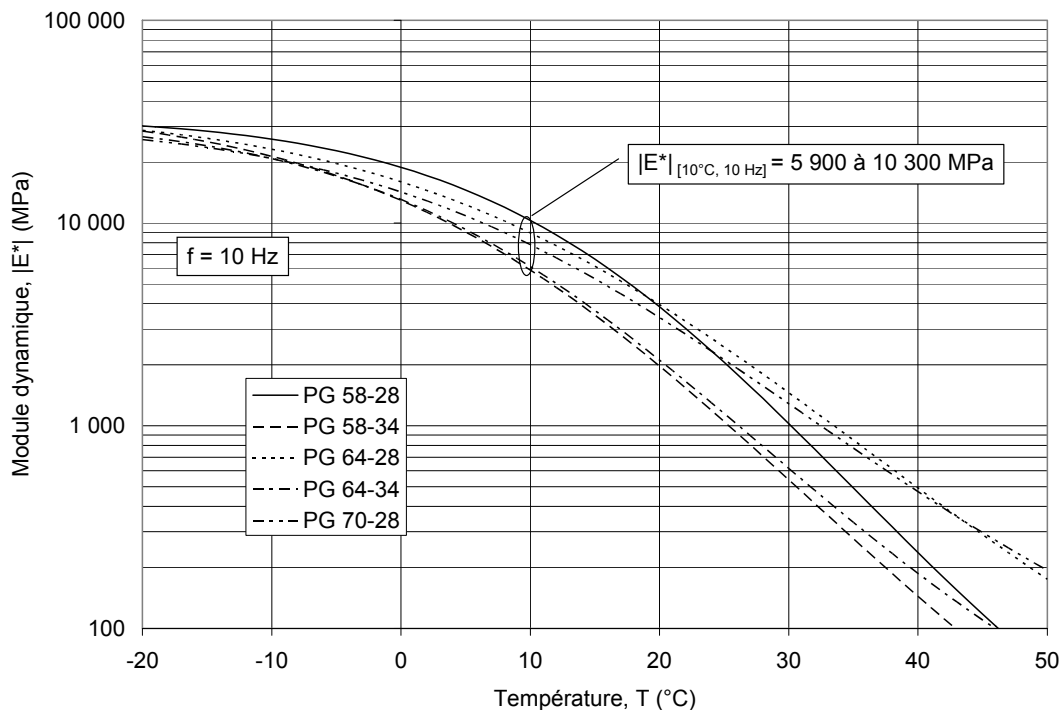


Figure 30 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'enrobés ESG-14 conditionnés pendant 1 heure avec différents bitumes

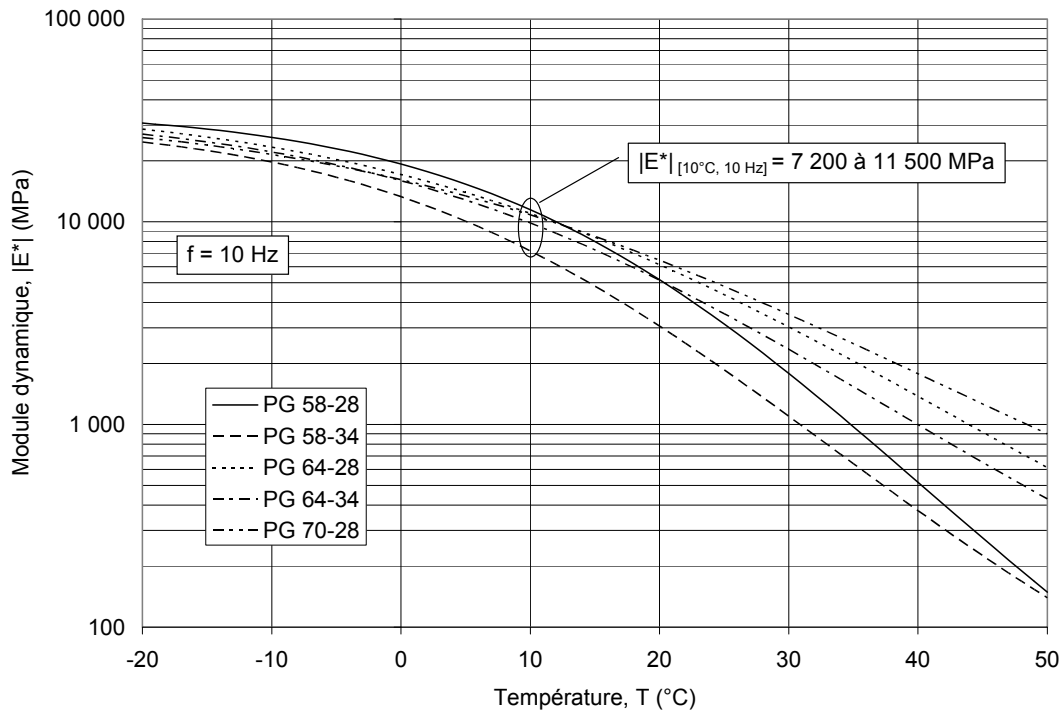


Figure 31 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz d'enrobés ESG-14 conditionnés pendant 4 heures avec différents bitumes

Ainsi, le conditionnement de quatre heures s'avère nécessaire afin de correspondre au classement PG des bitumes (Norme 4101), principalement en ce qui concerne la température élevée de caractérisation (T_e) de la classification PG, qui simule un vieillissement à court terme du bitume à l'aide d'un étuvage accéléré en couche mince (RTFOT). Le classement indiqué par la température basse (T_b) de la classification PG correspond moins à la détermination de $|E^*|$, puisque le T_b est déterminé à la suite d'un vieillissement à long terme à l'aide d'une bombe de vieillissement sous pression (PAV), ce qui représente plusieurs années d'utilisation de la route. De plus, les valeurs de $|E^*|$ à haute température semblent plus réalistes suite à un conditionnement de quatre heures, ce qui sera confirmé à la section 6.3 sur les modèles de la littérature. Le conditionnement de quatre heures est donc retenu pour la méthode LC 26-700.

4. ÉTUDE DE RÉPÉTABILITÉ

4.1 Méthodologie de l'étude

Sept plaques d'enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 ont été fabriquées, afin d'évaluer la répétabilité de la détermination de E^* selon la méthode LC 26-700 à partir de 21 éprouvettes. L'enrobé ESG-14 présente une granulométrie entre la granulométrie d'un enrobé de grosseur nominale maximale de 10 et 20 mm. Le bitume PG 58-34 compte pour 55 % de la consommation du bitume au Québec en 2008 (MTQ, 2009). La variabilité de la préparation des plaques a nécessité la fabrication de sept plaques, afin d'obtenir une plage de vides interstitiels uniformément distribués pour l'étude, tel que présenté au Tableau 7. Les rapports d'essai de E^* sont disponibles à l'Annexe 3.

Tableau 7 – Vides interstitiels des éprouvettes d'enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 utilisées pour l'étude de répétabilité

Plaque	Vides interstitiels, V_i (%)							Général
	1	2	3	4	5	6	7	
Éprouvette 1	4,0	5,5	4,7	5,6	4,2	4,7	5,1	-
Éprouvette 2	3,9	5,4	4,3	5,6	4,1	4,5	4,7	-
Éprouvette 3	3,8	5,5	4,5	5,5	3,9	4,5	5,0	-
Moyenne	3,9	5,5	4,5	5,6	4,1	4,6	4,9	4,7
Écart type	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,6
Nombre	3	3	3	3	3	3	3	21

Les plaques sont présentées en ordre de fabrication, la plaque 1 étant celle utilisée pour l'étude de conditionnement et les autres ayant été préparées par paires. Les paires de plaques 2 et 3 ainsi que 4 et 5 présentent des vides différents, alors que les plaques 6 et 7 présentent des vides similaires, près de la moyenne. Les vides moyens des éprouvettes sont de 4,7 % avec un écart type de 0,6 %. L'écart type pour trois éprouvettes provenant de la même plaque est en moyenne de 0,15 %, soit quatre fois plus faible. L'éprouvette 2 correspond au centre de la plaque et présente des vides similaires aux éprouvettes 1 et 3.

4.2 Répétabilité du module complexe

Les coefficients de régression du modèle de E^* de Huet-Sayegh (Équation 9) à une température de référence de 10 °C sont présentés au Tableau 8 pour chaque enrobé identifié par ses vides interstitiels moyens. Les modèles sont déterminés pour chaque enrobé à partir des résultats combinés des trois éprouvettes provenant d'une plaque. Un modèle général est également déterminé pour les sept enrobés combinés (21 éprouvettes).

Le coefficient de détermination des modèles (R^2), l'erreur moyenne de la prédiction (RMSE) et le nombre de données utilisées (n) sont indiqués au Tableau 9. Le RMSE du $\log E_1$ et $\log E_2$ des modèles individuels sont en moyenne de 0,033 et 0,028 respectivement, alors que le RMSE du $\log E_1$ et $\log E_2$ du modèle général sont de 0,069 et 0,054, ce qui correspond au double de l'erreur et semble attribuable à l'influence des vides sur le E^* de l'enrobé.

Tableau 8 – Coefficients de régression du modèle de module complexe de Huet-Sayegh à 10 °C d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 pour différents vides interstitiels

Vides	Coefficients de régression, E^* (MPa)							
	E_0	E_∞	δ	k	h	τ_0	a_1	a_2
3,9 %	8,2	37 000	2,568	0,163	0,479	8,31E-3	-0,142	8,61E-4
4,1 %	14,3	37 200	2,374	0,167	0,478	9,07E-3	-0,140	6,89E-4
4,5 %	8,8	36 200	2,173	0,162	0,463	4,56E-3	-0,135	6,78E-4
4,6 %	6,4	37 000	2,507	0,162	0,475	1,20E-2	-0,145	7,09E-4
4,9 %	12,3	36 600	2,459	0,167	0,491	9,04E-3	-0,144	8,49E-4
5,5 %	11,5	34 100	2,434	0,170	0,489	3,72E-3	-0,134	6,91E-4
5,6 %	1,0	33 300	2,006	0,163	0,465	4,18E-3	-0,136	6,20E-4
Général	7,7	36 000	2,353	0,166	0,477	6,54E-3	-0,140	7,27E-4

Tableau 9 – Paramètres statistiques du modèle de module complexe de Huet-Sayegh à 10 °C d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 pour différents vides interstitiels

Vides	Paramètres statistiques, E^* (MPa)				
	$RMSE_{\log E_1}$	$R^2_{\log E_1}$	$RMSE_{\log E_2}$	$R^2_{\log E_2}$	n
3,9 %	0,029	1,00	0,033	1,00	100
4,1 %	0,033	1,00	0,027	1,00	100
4,5 %	0,038	1,00	0,022	1,00	100
4,6 %	0,031	1,00	0,025	1,00	104
4,9 %	0,033	1,00	0,031	1,00	105
5,5 %	0,028	1,00	0,030	1,00	100
5,6 %	0,042	1,00	0,029	1,00	105
Général	0,069	1,00	0,054	0,99	714

La Figure 32 présente les résultats de E^* dans le plan de Cole et Cole et le modèle de prédiction général, ce qui permet de constater que l'erreur de prédiction est plus grande pour les valeurs de E_1 élevées dans un plan arithmétique. La Figure 33 présente les résultats de E^* et le modèle général dans l'espace de Black, ce qui montre que l'erreur de prédiction est plus grande pour les valeurs de $|E^*|$ faibles dans un plan logarithmique. La Figure 34 montre que l'erreur de prédiction est uniformément répartie pour le $\log E_1$ et le $\log E_2$ en fonction de la fréquence, ce qui justifie l'utilisation du $\log E_1$ et du $\log E_2$ pour la détermination des coefficients de régression du modèle de Huet-Sayegh. Par ailleurs, les différents paramètres se présentent sous la forme d'une courbe unique, ce qui indique que le principe d'équivalence temps-température est respecté.

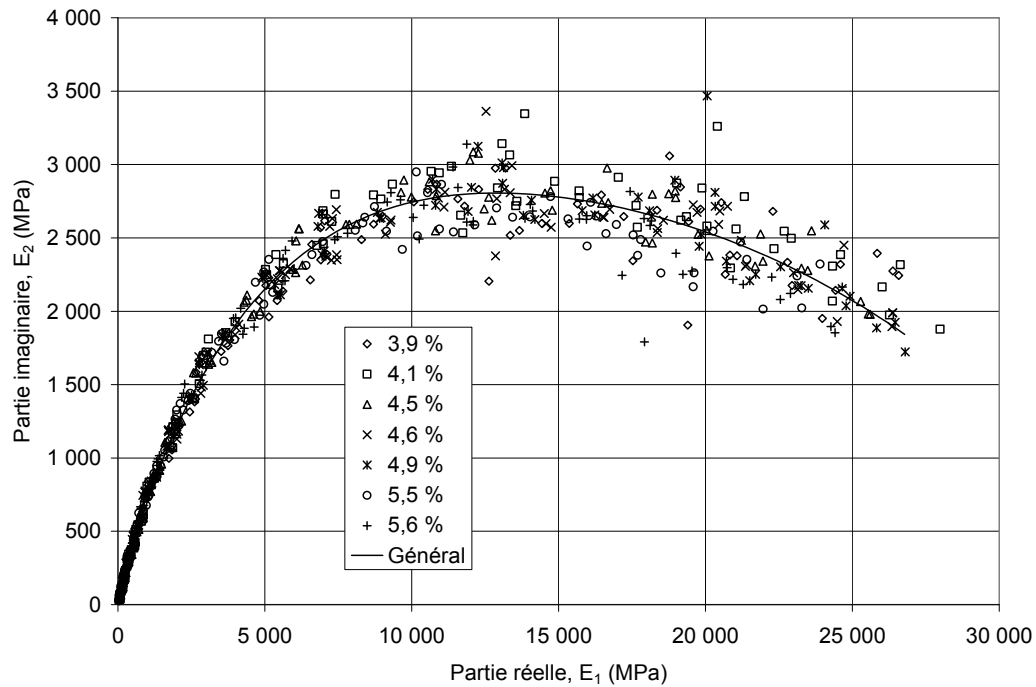


Figure 32 – Module complexe dans le plan de Cole et Cole d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 à différents vides interstitiels

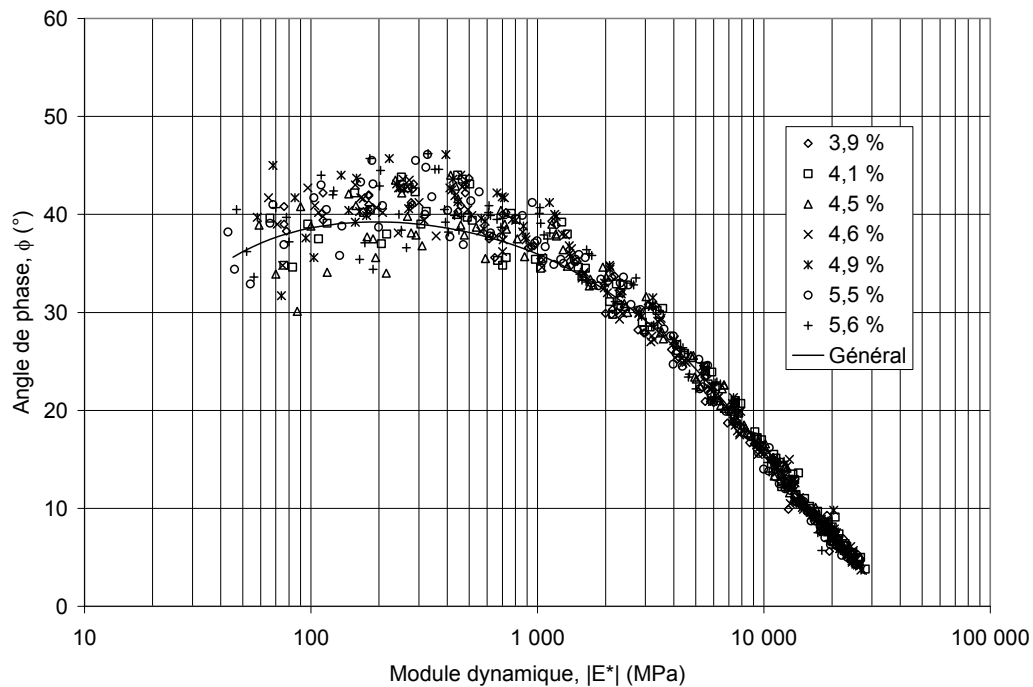


Figure 33 – Module complexe dans l'espace de Black d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 à différents vides interstitiels

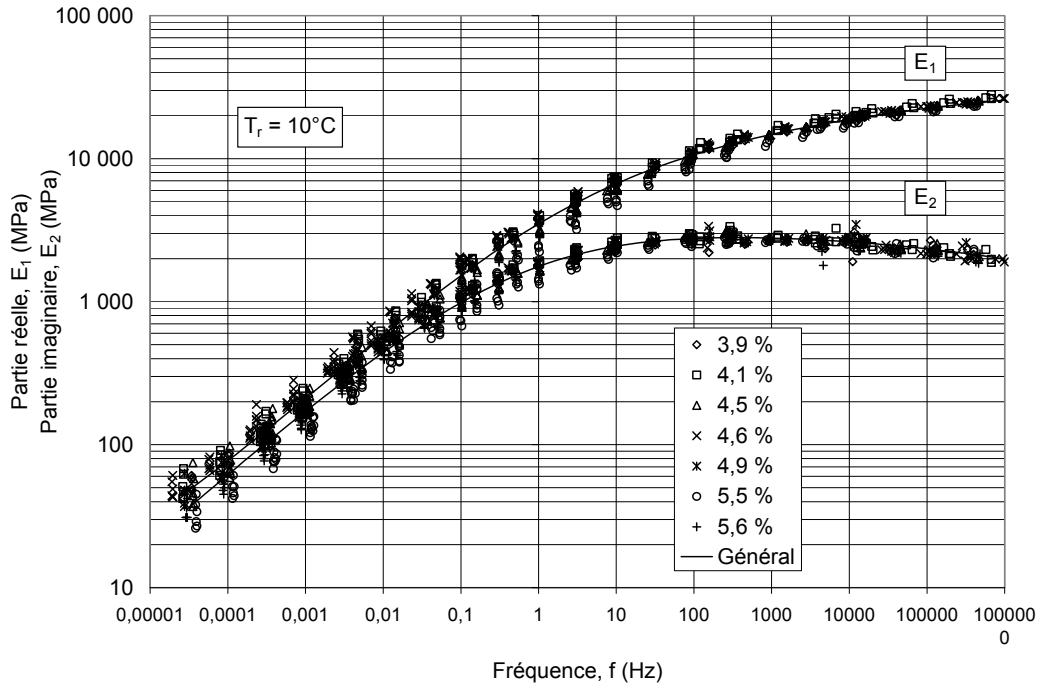


Figure 34 – Courbes maîtresses de module complexe d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 à différents vides interstitiels

Les essais ont également été effectués à 50 °C, mais les résultats n'ont pas été retenus pour la modélisation puisque leur variabilité était trop importante. De plus, le balayage de fréquence à 40 °C couvre les valeurs de $|E^*|$ à 50 °C pour 1, 3 et 10 Hz et à 60 °C pour 10 Hz, selon le principe d'équivalence temps-température, ce qui constitue une plage de $|E^*|$ suffisante pour l'analyse des chaussées.

4.3 Répétabilité du module dynamique

Les coefficients de régression du modèle de $|E^*|$ de Witczak (Équation 14) sont présentés au Tableau 10 pour chaque enrobé (3 éprouvettes) et de manière générale (21 éprouvettes), à une température de référence de 10 °C. Les paramètres statistiques (R^2 , RMSE, n) de chaque modèle sont indiqués au Tableau 11.

Tableau 10 – Coefficients de régression du modèle de module dynamique de Witczak à 10 °C d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 pour différents vides interstitiels

Vides	Coefficients de régression, $\log E^* $ (MPa)					
	δ	α	β	γ	a_1	a_2
3,9 %	0,399	4,092	-1,295	-0,399	-0,148	8,23E-4
4,1 %	0,310	4,237	-1,290	-0,382	-0,144	5,60E-4
4,5 %	0,396	4,145	-1,172	-0,385	-0,139	6,03E-4
4,6 %	0,098	4,429	-1,408	-0,374	-0,150	6,13E-4
4,9 %	0,540	3,952	-1,252	-0,423	-0,147	7,19E-4
5,5 %	0,147	4,374	-1,141	-0,383	-0,139	6,21E-4
5,6 %	0,157	4,375	-1,204	-0,379	-0,142	5,80E-4
Général	0,299	4,223	-1,248	-0,389	-0,144	6,32E-4

Tableau 11 – Paramètres statistiques du modèle de module dynamique de Witczak à 10 °C d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 pour différents vides interstitiels

Vides	Paramètres statistiques, $\log E^* $ (MPa)		
	RMSE	R^2	n
3,9 %	0,017	1,00	100
4,1 %	0,020	1,00	100
4,5 %	0,023	1,00	100
4,6 %	0,017	1,00	104
4,9 %	0,018	1,00	105
5,5 %	0,024	1,00	100
5,6 %	0,025	1,00	105
Général	0,061	0,99	714

Le RMSE moyen du $\log |E^*|$ pour chaque enrobé est de 0,020, soit environ trois fois plus faible que le RMSE général de 0,061, ce qui indique que les vides influencent le $|E^*|$ de l'enrobé. L'influence des vides sur le $|E^*|$ à 10 °C et 10 Hz est présenté à la Figure 35. Le R^2 de la relation entre les vides et le $|E^*|$ est de 0,52, ce qui indique que la variation de $|E^*|$ de l'enrobé n'est pas uniquement expliquée par la variation des vides, mais que la variabilité de l'essai doit également être prise en compte.

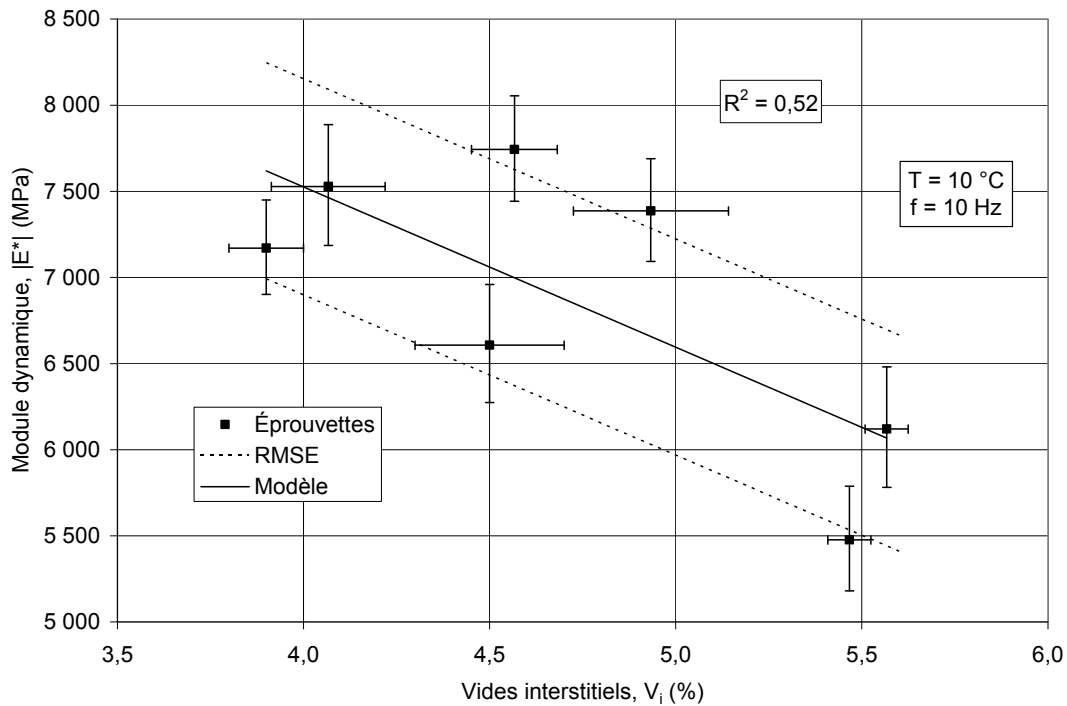


Figure 35 – Module dynamique à 10 °C et 10 Hz en fonction des vides interstitiels d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34

La Figure 36 présente les résultats de $|E^*|$ obtenus pour les différents vides interstitiels, ainsi que le modèle général avec son RMSE. La variabilité des résultats augmente sur une échelle logarithmique lorsque la valeur de $|E^*|$ diminue, ce qui signifie que le RMSE général (moyen) surestime l'erreur de prédiction des valeurs de $|E^*|$ élevées et sous-estime l'erreur pour les valeurs de $|E^*|$ faibles. Ainsi, le RMSE général est plus représentatif de l'erreur de prédiction des valeurs de $|E^*|$ intermédiaires, soit entre 0 et 20 °C. Par ailleurs, le RMSE des modèles individuels est constant en fonction de la fréquence, ce qui indique que la variabilité des essais est constante, mais que l'influence des vides augmente lorsque le $|E^*|$ diminue.

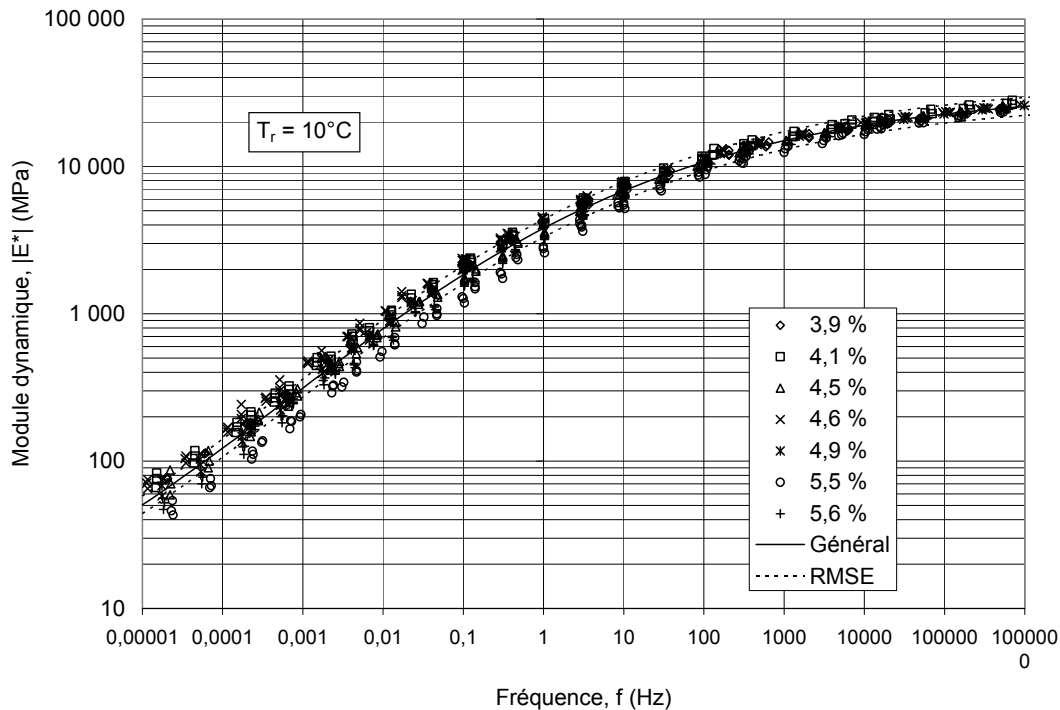


Figure 36 – Courbe maîtresse générale de module dynamique d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34 à différents vides interstitiels

La courbe maîtresse générale de $|E^*|$ est montrée à la Figure 37 en fonction de la température pour une fréquence de 10 Hz, ainsi que le RMSE moyen des modèles individuels (0,020) et le RMSE général (0,061) appliqués au modèle général. La figure montre l'influence d'une variation des vides de l'enrobé de 0,15 % (individuel) et 0,6 % (général) sur l'erreur moyenne de prédiction de $|E^*|$ d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58-34.

Ainsi, en première approximation, un RMSE de 0,061 pourrait être utilisé au lieu d'un RMSE de 0,020, si les vides de l'enrobé varient de 0,6 % sur la route au lieu de 0,15 % en laboratoire. De même, une correction de la valeur de $\log |E^*|$ de 0,061 pourrait être appliquée pour estimer l'influence des vides de l'enrobé sur la route, si un écart de 0,6 % est observé avec l'enrobé caractérisé en laboratoire.

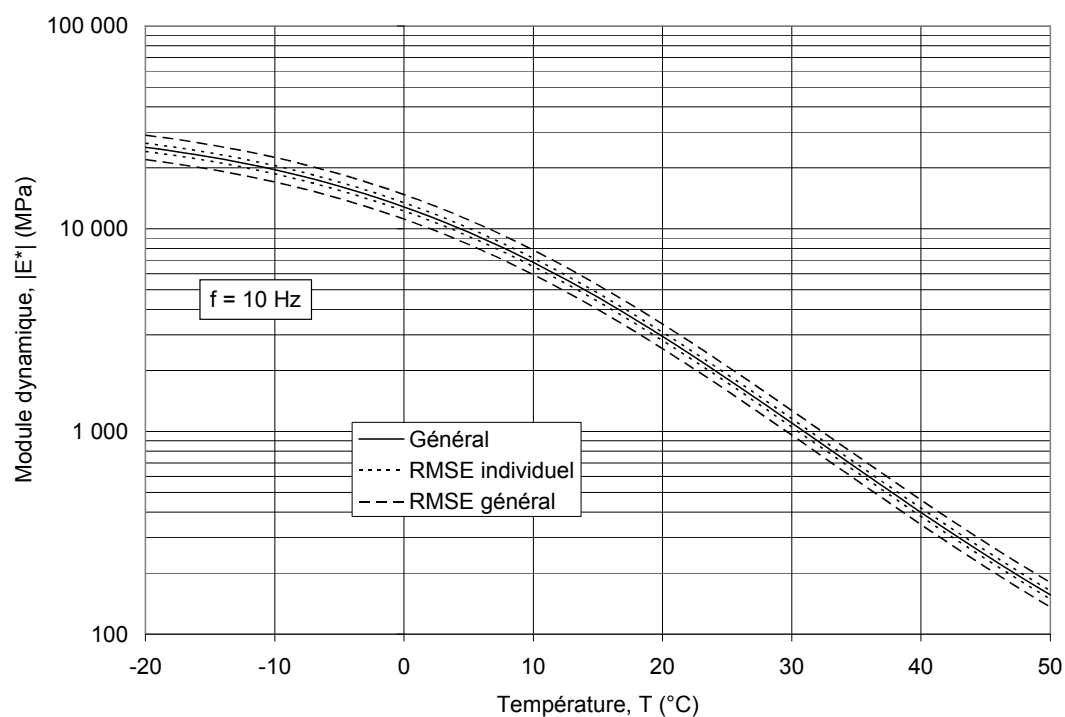


Figure 37 – Courbe maîtresse de module dynamique général à 10 Hz incluant l'erreur de prédiction individuelle et générale

5. RÉSULTATS INDIVIDUELS

5.1 Matériaux étudiés

Le E^* de trois enrobés formulés avec cinq bitumes différents a été déterminé, afin d'étudier l'influence de la granulométrie de l'enrobé et de la classe de performance du bitume. Les résultats serviront également de données de référence pour les expertises et le dimensionnement des chaussées. Les enrobés étudiés sont un enrobé de surface ESG-10, un enrobé utilisé en couche de base ou en couche unique ESG-14 et un enrobé de base GB-20. Les bitumes étudiés sont un PG 58-28, PG 58-34, PG 64-28, PG 64-34 et PG 70-28.

La granulométrie des enrobés est présentée au Tableau 12 et à la Figure 38, où la granulométrie des enrobés ESG-10 et ESG-14 sont similaires, alors que la granulométrie de l'enrobé GB-20 se distingue avec de plus grosses particules. Les caractéristiques volumétriques des enrobés, la formulation à l'aide de la PCG, ainsi que le contrôle effectué à l'aide de l'orniéreur sont présentés au Tableau 13. Les enrobés sont formulés avec un granulat basaltique provenant d'une carrière.

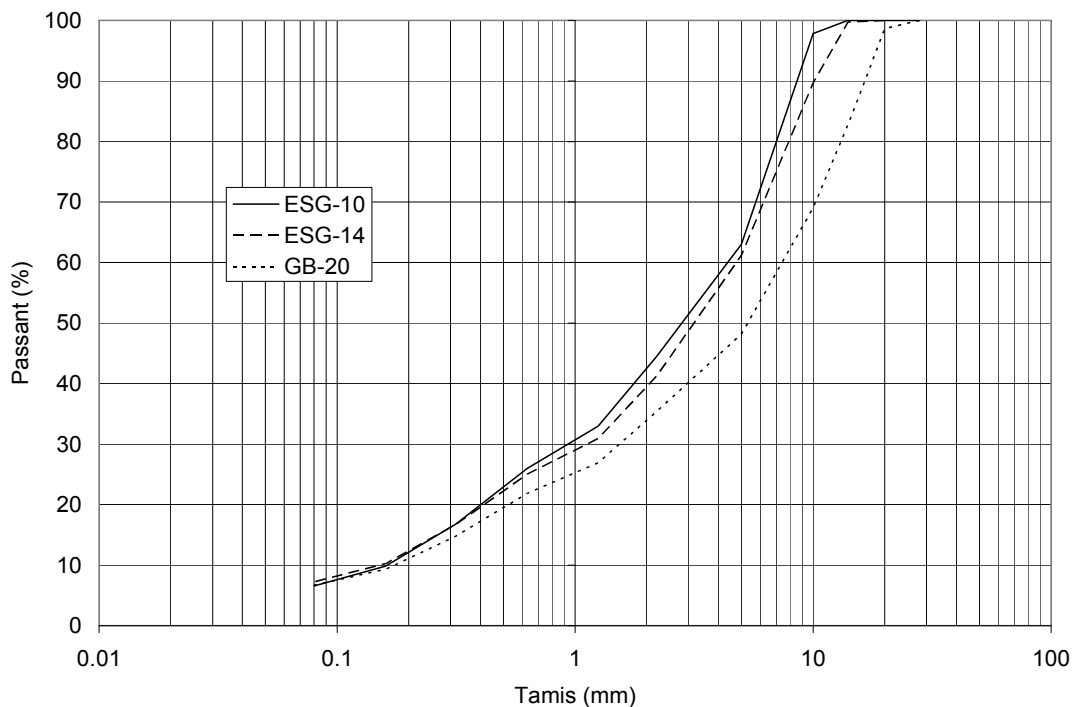


Figure 38 – Granulométrie des enrobés

Tableau 12 – Granulométrie des enrobés

Tamis	Passant (%)		
	ESG-10	ESG-14	GB-20
28 mm			100
20 mm			99
14 mm	100	100	83
10 mm	98	90	69
5 mm	63	61	48
2,5 mm	44	41	35
1,25 mm	33	31	27
630 µm	26	25	22
315 µm	17	17	15
160 µm	10	10	9
80 µm	7	7	7

Tableau 13 – Caractéristiques de formulation des enrobés

Caractéristique	Enrobé		
	ESG-10	ESG-14	GB-20
Dmax	2,617	2,621	2,665
Pb (%)	5,3	4,8	4,3
Vbe (%)	12,2	11,4	10,2
Vides à la PCG (%)			
10 girations	14,3	12,7	14,5
80 girations	6,7	-	-
100 girations	-	5,0	-
120 girations	-	-	6,2
200 girations	4,1	3,3	4,9
Résistance à l'orniérage (%)			
1 000 cycles	5,8	-	-
3 000 cycles	11,0	-	-
30 000 cycles	-	6,4	3,6

Les bitumes sélectionnés appartiennent aux cinq classes de performance les plus utilisées au Québec, qui sont, dans l'ordre, les bitumes PG 58-34, PG 64-34, PG 64-28, PG 70-28 et PG 58-28 (MTQ, 2009). Les caractéristiques des bitumes sont présentées au Tableau 14, incluant la classification PG, la température bille anneau (TBA), la recouvrance d'élasticité pour les bitumes modifiés, ainsi que les températures de malaxage et de compactage en fonction de la viscosité des bitumes (Norme 4101). Le bitume PG 64-34 n'est pas conforme pour la basse température selon la classification faite par le MTQ, mais le certificat du fournisseur est conforme. Ce bitume sera tout de même identifié comme un PG 64-34. Chaque classe de bitume provient d'un seul fournisseur qui peut différer d'une classe de bitume à l'autre.

Tableau 14 – Caractéristiques des bitumes

Caractéristique	Bitume				
	PG 58-28	PG 58-34	PG 64-28	PG 64-34	PG 70-28
Temp. élevée (°C)	59,7	60,8	65,2	64,1	71,8
Temp. basse (°C)	-28,6	-34,3	-29,3	-32,4	-30,5
TBA moy. (°C)	46,4	43,6	49,9	52,9	58,1
Recouv. élasticité (%)	-	56	38	71	70
Temp. malaxage (°C)	150	155	155	168	168
Temp. compactage (°C)	135	140	145	152	160

Une plaque a été préparée pour chaque enrobé à l'aide du compacteur de plaque, préparation incluant un conditionnement de quatre heures à la température de compactage à la suite du malaxage en laboratoire des enrobés. Trois éprouvettes ont été carottées au centre de chaque plaque (Figure 21). Les vides interstitiels moyens sont indiqués au Tableau 15. La moyenne des vides des enrobés est de 4,5 %, avec un écart type de 0,7 % pour 45 éprouvettes, ce qui est similaire aux vides obtenus pour les enrobés de l'étude de répétabilité. Ainsi, la variabilité des vides entre les différents enrobés s'explique principalement par la variabilité de la préparation des plaques.

Tableau 15 – Vides interstitiels moyens des éprouvettes d'enrobé

Bitume	Vides interstitiels, V_i (%)				Écart type	Nombre
	ESG-10	ESG-14	GB-20	Moyenne		
PG 58-28	4,6	3,7	4,2	4,2	0,5	9
PG 58-34	4,8	3,9	4,6	4,4	0,4	9
PG 64-28	4,9	4,2	5,1	4,8	0,4	9
PG 64-34	4,3	3,6	3,9	3,9	0,3	9
PG 70-28	5,2	4,2	6,1	5,2	0,8	9
Moyenne	4,8	3,9	4,8	4,5		
Écart type	0,4	0,3	0,8	0,7		
Nombre	15	15	15	45		

La moyenne et l'écart type des vides sont également indiqués par type d'enrobé et de bitume. L'écart type des vides des enrobés GB-20 et des enrobés avec un bitume PG 70-28 sont plus élevés, ce qui s'explique par les vides significativement plus élevés de l'enrobé GB-20 avec un bitume PG 70-28. La combinaison de l'enrobé le plus grossier avec le bitume le plus rigide à haute température peut expliquer en partie les vides plus élevés, mais la variabilité de la préparation des plaques est plus susceptible d'expliquer l'écart particulièrement élevé.

5.2 Résultats de module complexe

Le E^* de 15 enrobés a été déterminé conformément à la méthode LC 26-700. Les rapports d'essai sont présentés à l'Annexe 3. Les coefficients de régression des modèles de Huet-Sayegh de E^* (Équation 9) sont présentés au Tableau 16. Les paramètres statistiques des modèles (RMSE, R^2 , n) sont présentés au Tableau 17. Le RMSE moyen des modèles est de 0,028 pour le $\log E_1$ et de 0,031 pour le $\log E_2$, soit similaire au RMSE moyen de 0,033 ($\log E_1$) et de 0,028 ($\log E_2$) de l'étude de répétabilité.

Tableau 16 – Coefficients de régression des modèles de Huet-Sayegh de module complexe à 10 °C

Enrobé	Bitume	Coefficients de régression, E* (MPa)							
		E ₀	E _∞	δ	k	h	τ ₀	a ₁	a ₂
ESG-10	PG 58-28	0,4	36 100	2,512	0,177	0,545	0,044	-0,149	7,41E-4
	PG 58-34	3,9	36 700	2,740	0,166	0,494	0,006	-0,139	7,75E-4
	PG 64-28	0,1	39 100	2,627	0,143	0,415	0,024	-0,149	8,18E-4
	PG 64-34	10,1	36 900	2,370	0,149	0,441	0,009	-0,142	8,07E-4
	PG 70-28	0,1	39 800	2,742	0,119	0,365	0,033	-0,154	7,27E-4
ESG-14	PG 58-28	2,3	37 500	2,685	0,188	0,569	0,089	-0,157	1,00E-3
	PG 58-34	8,2	37 000	2,568	0,163	0,479	0,008	-0,142	8,60E-4
	PG 64-28	0,1	39 600	2,390	0,143	0,410	0,056	-0,149	8,54E-4
	PG 64-34	4,5	40 000	2,450	0,139	0,422	0,026	-0,143	7,03E-4
	PG 70-28	0,1	42 400	2,428	0,116	0,362	0,036	-0,151	7,66E-4
GB-20	PG 58-28	1,1	39 000	2,584	0,188	0,571	0,086	-0,154	9,36E-4
	PG 58-34	4,3	38 500	2,424	0,164	0,491	0,009	-0,139	8,56E-4
	PG 64-28	0,1	39 700	2,408	0,149	0,434	0,047	-0,145	8,25E-4
	PG 64-34	38,6	40 700	2,350	0,153	0,450	0,018	-0,139	7,85E-4
	PG 70-28	0,1	36 600	2,472	0,137	0,397	0,060	-0,152	7,19E-4

Tableau 17 – Paramètres statistiques des modèles de Huet-Sayegh de module complexe à 10 °C

Enrobé	Bitume	Paramètres statistiques, E* (MPa)				
		RMSE _{log E1}	R ² _{log E1}	RMSE _{log E2}	R ² _{log E2}	n
ESG-10	PG 58-28	0,032	1,00	0,031	1,00	100
	PG 58-34	0,031	1,00	0,029	1,00	104
	PG 64-28	0,023	1,00	0,028	1,00	104
	PG 64-34	0,037	1,00	0,027	1,00	100
	PG 70-28	0,021	1,00	0,029	0,99	105
ESG-14	PG 58-28	0,036	1,00	0,036	1,00	104
	PG 58-34	0,029	1,00	0,033	1,00	100
	PG 64-28	0,019	1,00	0,031	0,99	105
	PG 64-34	0,025	1,00	0,025	1,00	104
	PG 70-28	0,023	1,00	0,027	0,99	104
GB-20	PG 58-28	0,037	1,00	0,039	1,00	104
	PG 58-34	0,036	1,00	0,032	1,00	104
	PG 64-28	0,024	1,00	0,028	0,99	105
	PG 64-34	0,028	1,00	0,032	0,99	100
	PG 70-28	0,021	1,00	0,033	0,99	89
Moyenne		0,028	1,00	0,031	1,00	102
Écart type		0,006	0,00	0,004	0,01	4

Les courbes de E* sont présentées dans le plan de Cole et Cole à la Figure 39 pour les enrobés ESG-10, à la Figure 40 pour les enrobés ESG-14 et à la Figure 41 pour les enrobés GB-20. Les figures montrent que le type de bitume influence la rhéologie de l'enrobé, plus particulièrement en ce qui concerne les bitumes PG 58-28 et PG 70-28. La granulométrie influence également le comportement rhéologique, puisque les courbes tendent à prendre de l'ampleur avec l'augmentation du diamètre nominal maximal de l'enrobé. Les valeurs à 10 °C et 10 Hz sont indiquées, afin de faciliter l'interprétation des courbes.

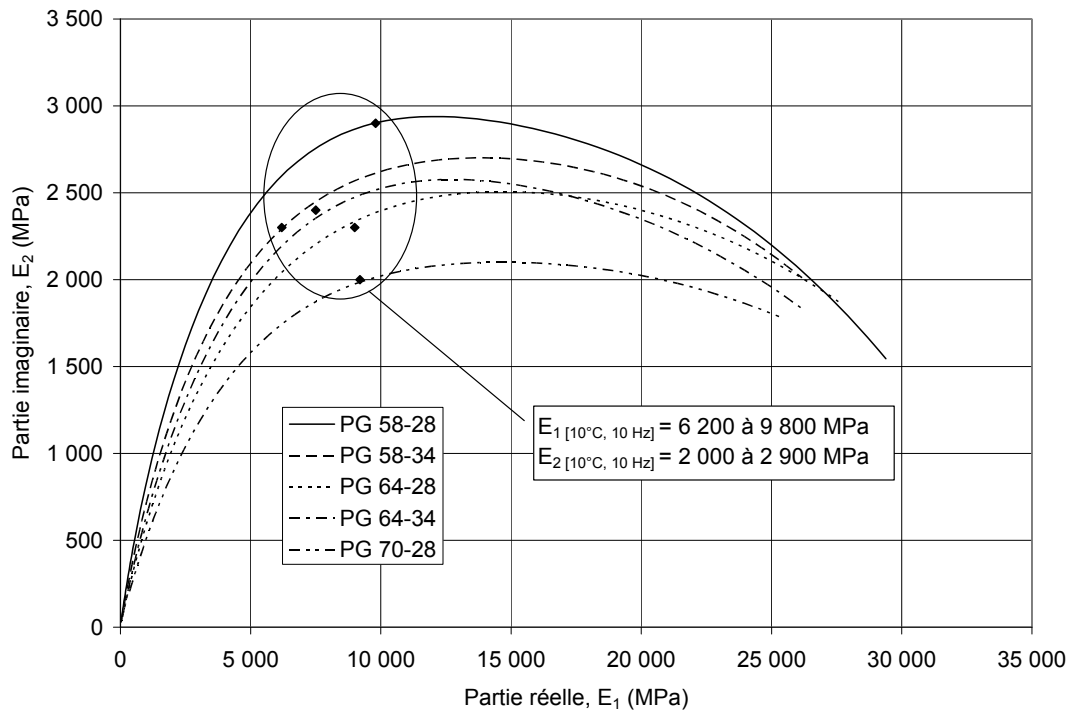


Figure 39 – Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés ESG-10

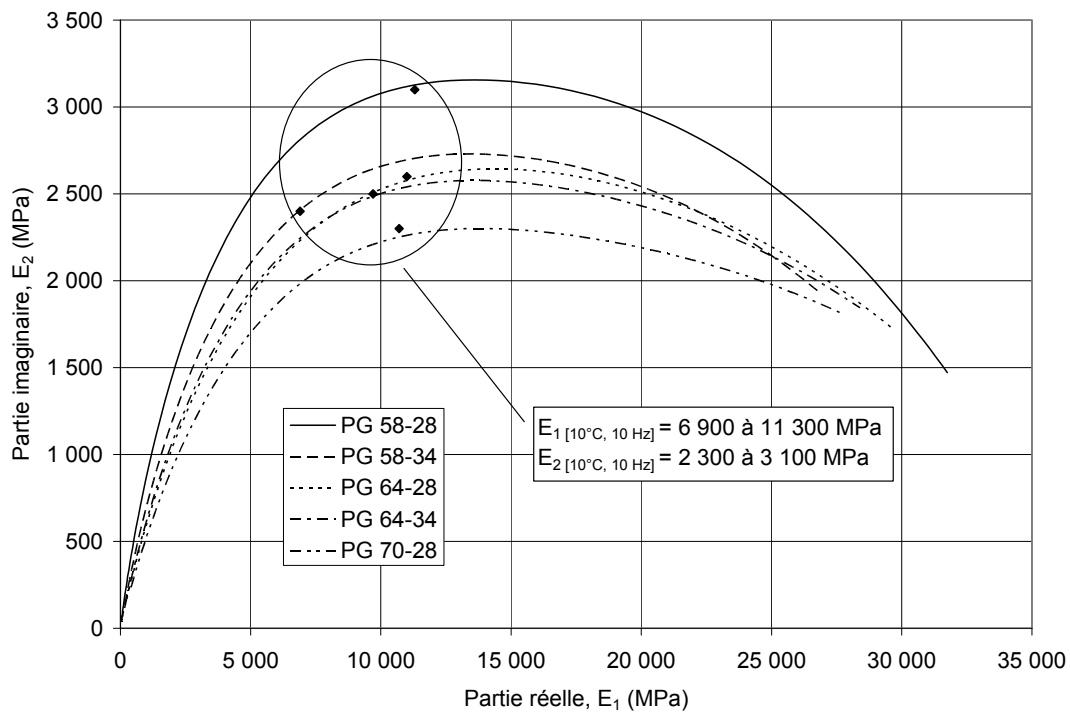


Figure 40 – Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés ESG-14

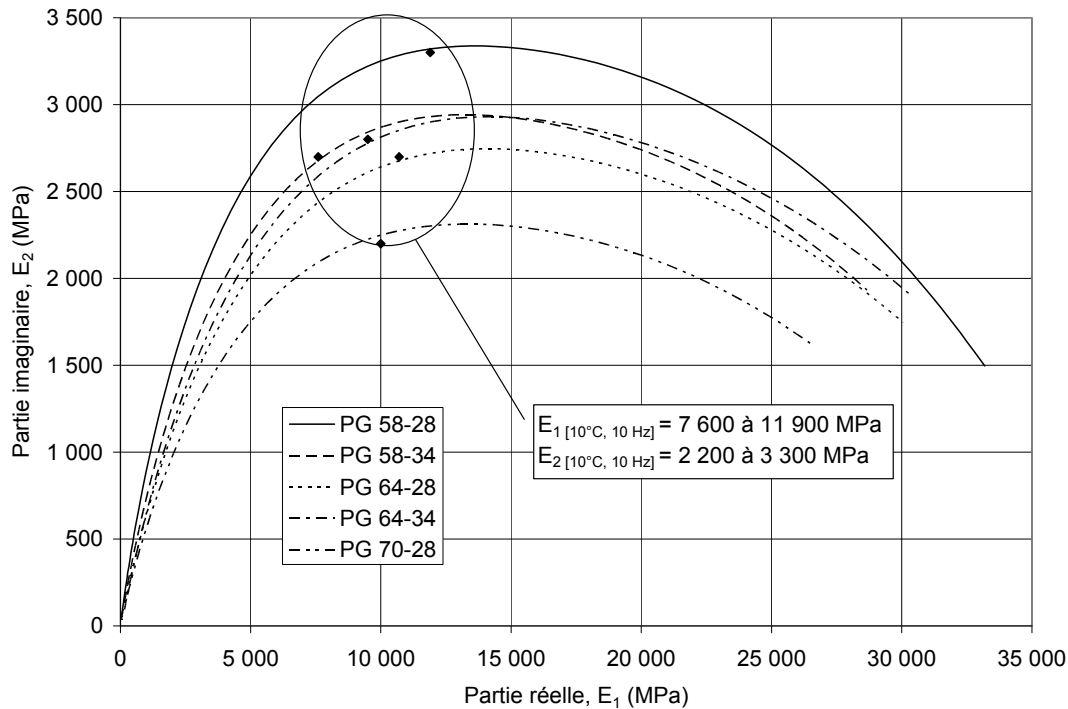


Figure 41 – Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés GB-20

Les courbes de E^* sont également présentées dans l'espace de Black à la Figure 42 pour les enrobés ESG-10, à la Figure 43 pour les enrobés ESG-14 et à la Figure 44 pour les enrobés GB-20. Les figures montrent également que le type de bitume influence la rhéologie de l'enrobé, avec les bitumes PG 58-28 et PG 70-28 qui représentent les deux extrémités du comportement. L'influence de la granulométrie semble moins évidente, bien que le $|E^*|$ de l'enrobé augmente avec le diamètre nominal maximal de l'enrobé, le ϕ semble plutôt constant. Les valeurs à 10°C et 10 Hz sont également indiquées, afin de faciliter l'interprétation des courbes.

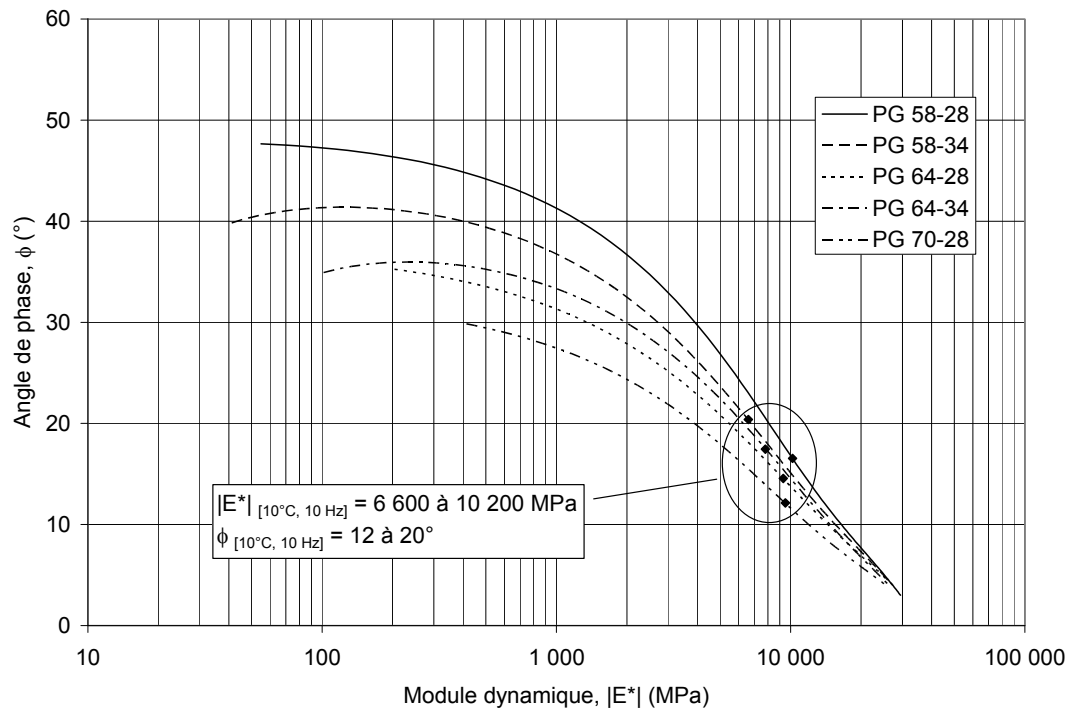


Figure 42 – Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés ESG-10

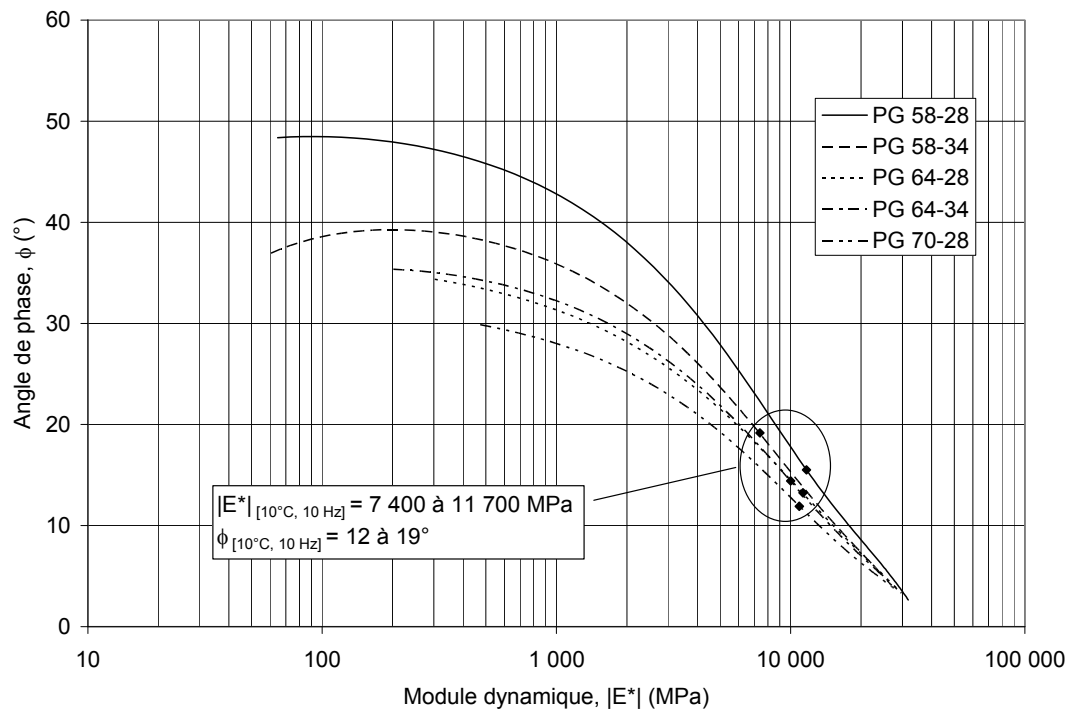


Figure 43 – Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés ESG-14

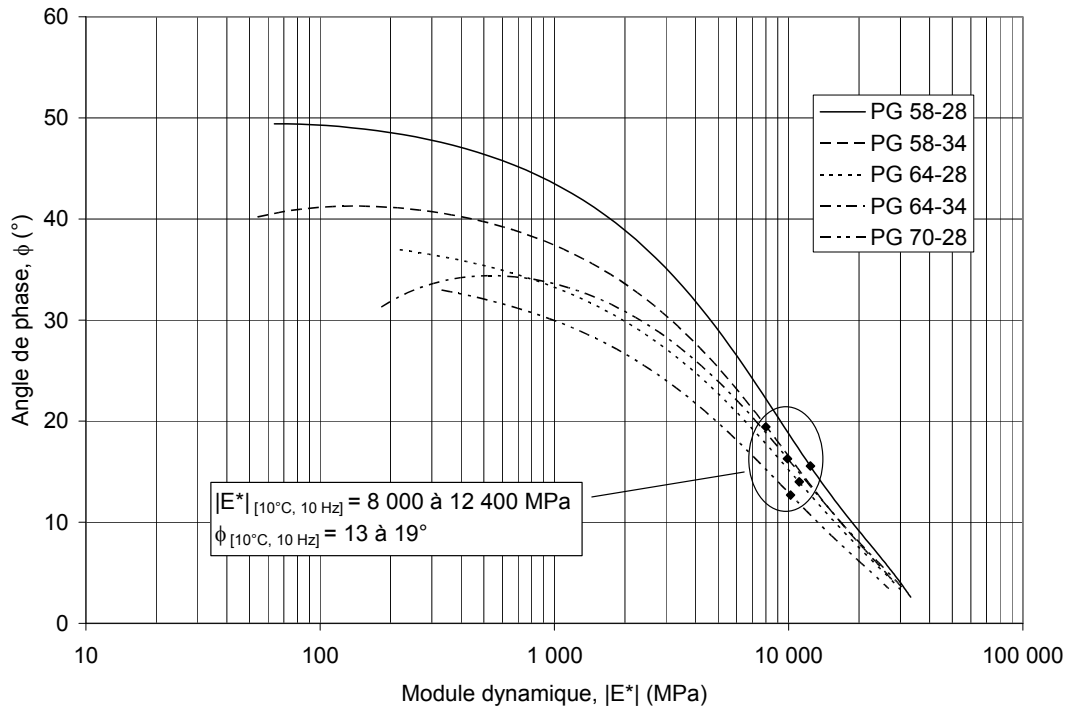


Figure 44 – Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés GB-20

Les valeurs de E^* à 10 °C et 10 Hz indiquées sur les figures précédentes, soit le E_1 et le E_2 (plan de Cole et Cole), ainsi que le $|E^*|$ et le ϕ (espace de Black), sont résumés au Tableau 18. Le E_1 et le E_2 moyens sont de 9 400 et 2 600 MPa, respectivement, et le $|E^*|$ et le ϕ de 9 800 MPa et 16°. Le coefficient de variation (CV) moyen des valeurs est de 17 %. Les valeurs semblent indiquer que l'influence du type de bitume est plus grande que la granulométrie. La température de 10 °C et la fréquence de 10 Hz sont retenues pour l'analyse, car elles sont considérées actuellement comme les paramètres équivalents (moyens) pour l'analyse de la résistance à la fatigue des enrobés au Québec.

Tableau 18 – Module complexe des enrobés à 10 °C et 10 Hz

Enrobé	Bitume	Module complexe, $E^*_{[10^\circ\text{C}, 10\text{ Hz}]}$ (MPa)			
		E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)
ESG-10	PG 58-28	9 800	2 900	10 200	17
	PG 58-34	6 200	2 300	6 600	20
	PG 64-28	9 000	2 300	9 300	15
	PG 64-34	7 500	2 400	7 800	17
	PG 70-28	9 200	2 000	9 500	12
ESG-14	PG 58-28	11 300	3 100	11 700	16
	PG 58-34	6 900	2 400	7 400	19
	PG 64-28	11 000	2 600	11 300	13
	PG 64-34	9 700	2 500	10 000	14
	PG 70-28	10 700	2 300	10 900	12
GB-20	PG 58-28	11 900	3 300	12 400	16
	PG 58-34	7 600	2 700	8 000	19
	PG 64-28	10 700	2 700	11 100	14
	PG 64-34	9 500	2 800	9 900	16
	PG 70-28	10 000	2 200	10 200	13
Moyenne		9400	2600	9800	16
Écart type		1700	400	1700	3
CV (%)		18	15	17	19

5.3 Résultats de module dynamique

Puisque le principe d'équivalence temps-température est vérifié par les résultats de E^* , les coefficients de régression des modèles de Witczak de $|E^*|$ (Équation 14) sont déterminés au Tableau 19 pour une température de référence de 10 °C. Les paramètres statistiques des modèles, soit le R^2 , le RMSE et le n, sont présentés au Tableau 20. Le RMSE moyen des 15 modèles est de 0,017, soit similaire au RMSE moyen de 0,020 des 7 enrobés de l'étude de répétabilité.

Tableau 19 – Coefficients de régression des modèles de Witczak de module dynamique à 10 °C des enrobés

Enrobé	Bitume	Coefficients de régression, $\log E^* $ (MPa)					
		δ	α	β	γ	a_1	a_2
ESG-10	PG 58-28	-0,480	5,011	-1,718	-0,412	-0,150	6,28E-4
	PG 58-34	-0,051	4,548	-1,325	-0,386	-0,144	7,20E-4
	PG 64-28	-0,083	4,627	-1,615	-0,321	-0,151	6,74E-4
	PG 64-34	0,539	3,953	-1,323	-0,377	-0,148	7,34E-4
	PG 70-28	-0,693	5,238	-1,829	-0,265	-0,160	6,11E-4
ESG-14	PG 58-28	-0,330	4,877	-1,766	-0,430	-0,149	6,72E-4
	PG 58-34	0,399	4,092	-1,295	-0,399	-0,148	8,23E-4
	PG 64-28	-0,177	4,756	-1,748	-0,313	-0,152	6,68E-4
	PG 64-34	0,480	4,056	-1,517	-0,350	-0,148	5,88E-4
	PG 70-28	0,496	4,038	-1,652	-0,304	-0,157	6,49E-4
GB-20	PG 58-28	-0,309	4,870	-1,781	-0,435	-0,149	6,36E-4
	PG 58-34	0,266	4,252	-1,345	-0,405	-0,145	8,23E-4
	PG 64-28	0,130	4,421	-1,678	-0,346	-0,150	7,14E-4
	PG 64-34	1,035	3,502	-1,284	-0,400	-0,145	6,73E-4
	PG 70-28	-0,932	5,497	-1,888	-0,279	-0,157	5,34E-4

Tableau 20 – Paramètres statistiques des modèles de Witczak de module dynamique à 10 °C des enrobés

Enrobé	Bitume	Paramètres statistiques, log E* (MPa)		
		RMSE	R ²	n
ESG-10	PG 58-28	0,017	1,00	100
	PG 58-34	0,018	1,00	104
	PG 64-28	0,015	1,00	104
	PG 64-34	0,027	1,00	100
	PG 70-28	0,015	1,00	105
ESG-14	PG 58-28	0,019	1,00	104
	PG 58-34	0,017	1,00	100
	PG 64-28	0,010	1,00	105
	PG 64-34	0,015	1,00	104
	PG 70-28	0,019	1,00	104
GB-20	PG 58-28	0,017	1,00	104
	PG 58-34	0,023	1,00	104
	PG 64-28	0,015	1,00	105
	PG 64-34	0,016	1,00	100
	PG 70-28	0,013	1,00	89
Moyenne		0,017	1,00	102
Écart type		0,004	0,00	4

Les courbes maîtresses de |E*| sont présentées en fonction de la température pour une fréquence de référence de 10 Hz à la Figure 45 pour les enrobés ESG-10, à la Figure 46 pour les enrobés ESG-14 et à la Figure 47 pour les enrobés GB-20. Les figures montrent que la granulométrie et le type de bitume influencent le |E*| de l'enrobé, et que cette influence augmente avec la température sur une échelle logarithmique.

Le |E*| de l'enrobé augmente généralement avec le diamètre nominal maximal des enrobés. De même, le |E*| des enrobés avec un bitume PG H-28 est généralement plus élevé à température intermédiaire (≈ 10 °C) que celui des enrobés avec un bitume PG H-34. Le type de bitume influence également le |E*| à haute température (> 40 °C), où les enrobés avec un bitume PG 58-L ont un |E*| plus faible que les enrobés avec un bitume PG 64-L, qui ont à leur tour un |E*| plus faible que les enrobés avec un bitume PG 70-L. Les enrobés avec le bitume PG 58-28 sont plus sensibles à la température que les autres enrobés.

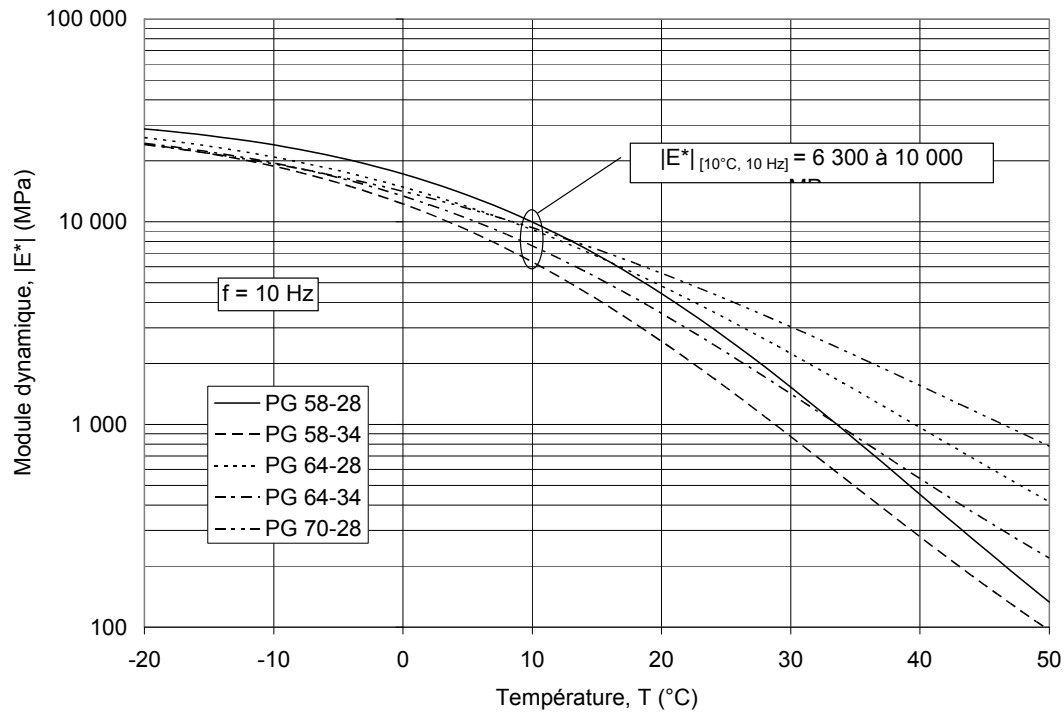


Figure 45 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés ESG-10

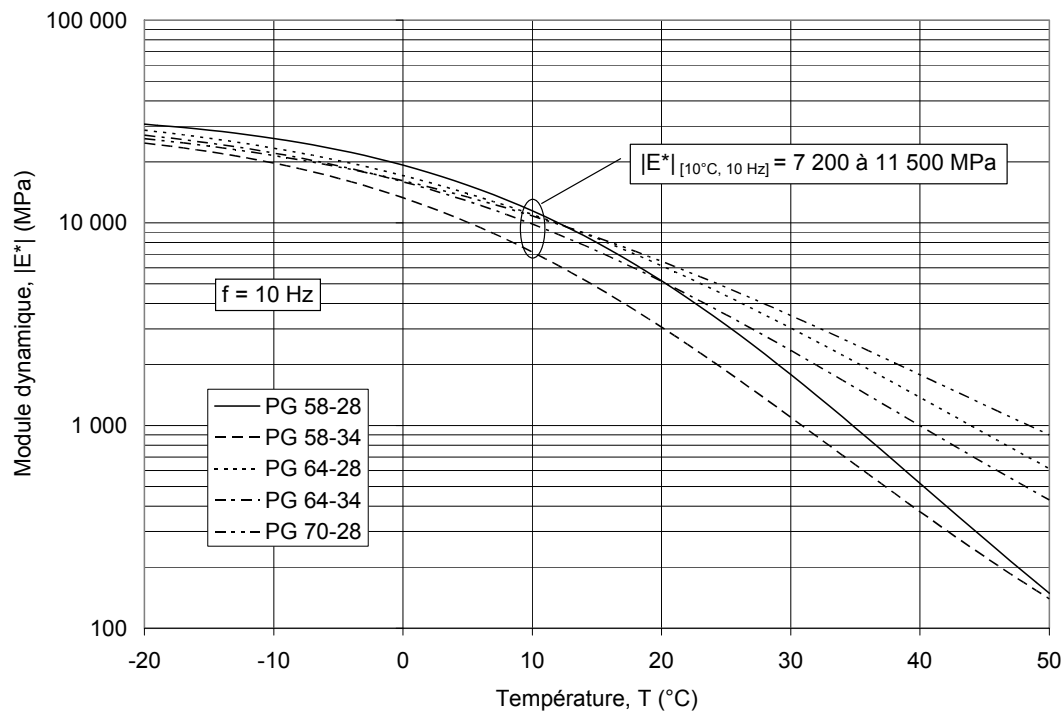


Figure 46 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés ESG-14

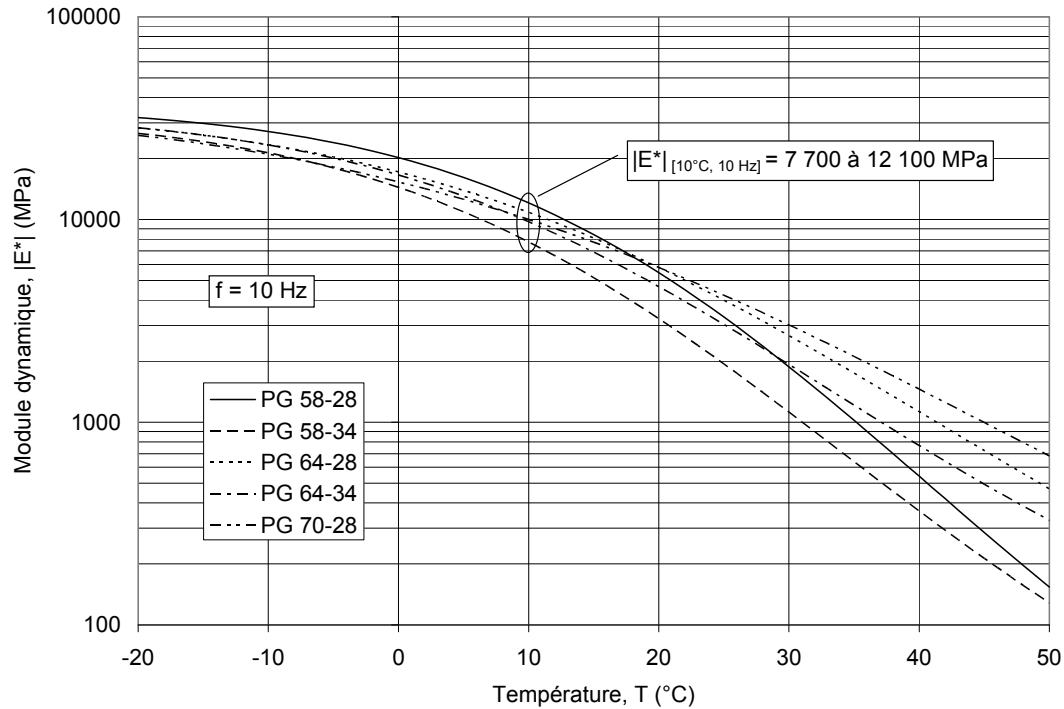


Figure 47 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés GB-20

Le Tableau 21 présente les valeurs de $|E^*|$ à 10 °C et 10 Hz, où le $|E^*|$ moyen pour les 15 enrobés est de 9 500 MPa, avec un écart type de 1 600 MPa. La granulométrie influence le $|E^*|$ de l'enrobé puisque le $|E^*|$ moyen est de 8 500 MPa pour l'enrobé ESG-10, alors qu'il est de 10 100 MPa pour les enrobés ESG-14 et GB-20. Par ailleurs, le type de bitume influence davantage le $|E^*|$ de l'enrobé puisque le $|E^*|$ moyen avec un bitume PG 58-34 est de 7 100 MPa, alors que le $|E^*|$ moyen avec un bitume PG 58-28 est de 11 200 MPa, pour une différence de 4 100 MPa. L'écart type des $|E^*|$ en fonction du bitume est similaire à l'écart type général, ce qui confirme l'influence significative du bitume sur le $|E^*|$.

Tableau 21 – Module dynamique à 10 °C et 10 Hz des enrobés

Bitume	Module dynamique, $ E^* $ [10°C, 10 Hz] (MPa)					Nombre
	ESG-10	ESG-14	GB-20	Moyenne	Écart type	
PG 58-28	10 000	11 500	12 100	11 200	1 100	3
PG 58-34	6 300	7 200	7 700	7 100	700	3
PG 64-28	9 100	11 000	10 800	10 300	1 000	3
PG 64-34	7 600	9 800	9 700	9 000	1 200	3
PG 70-28	9 300	10 800	10 000	10 000	800	3
Moyenne	8 500	10 100	10 100	9 500		
Écart type	1 500	1 700	1 600	1 600		
Nombre	5	5	5	15		

Les valeurs du Tableau 21 sont présentées à la Figure 48, afin de visualiser l'influence du type de bitume et de la granulométrie. Les vides des enrobés ESG-14 sont en moyenne 1 % plus faibles que ceux des autres enrobés (Tableau 15), ce qui semble influencer la valeur de $|E^*|$ à la hausse par rapport aux enrobés ESG-10 et GB-20. De même, les vides de l'enrobé GB-20 avec un bitume PG 70-28 sont 2 % plus élevés que ceux de l'enrobé ESG-14, ce qui diminue la valeur de $|E^*|$. La figure montre également que les enrobés avec des bitumes PG H-28 ont des valeurs de $|E^*|$ plus élevées que les enrobés avec des bitumes PG H-34 à 10 °C et 10 Hz.

Par ailleurs, il est important de noter que l'analyse des résultats à une température ou à une fréquence différente pourrait mener à des observations différentes. Par exemple, le bitume PG 58-28 est plus sensible à la température et à la fréquence de sollicitation que les autres bitumes, ce qui entraîne que le $|E^*|$ des enrobés avec un bitume PG 70-28 est plus élevé à température élevée (ou fréquence faible), alors que le $|E^*|$ des enrobés avec un bitume PG 58-28 tend vers les valeurs faibles des enrobés avec un bitume PG 58-34 (Figure 45, Figure 46 et Figure 47).

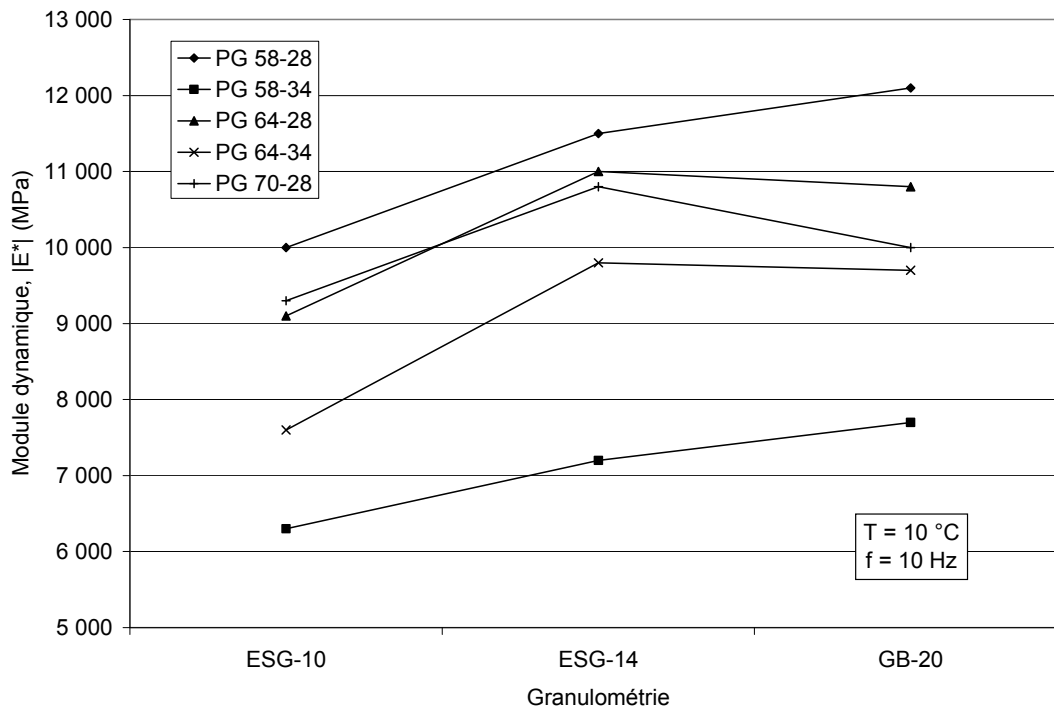


Figure 48 – Module dynamique à 10 °C et 10 Hz des enrobés selon le type de bitume en fonction de la granulométrie

6. MODÈLES GÉNÉRAUX

6.1 Modèles de module complexe

Les résultats de E^* indiquent que le type de bitume a une grande influence sur le comportement viscoélastique de l'enrobé. Ainsi, les courbes de E^* sont présentées par type de bitume dans le plan de Cole et Cole de la Figure 49 à la Figure 53. Les figures montrent que le type de bitume influence la forme de la courbe, alors que la granulométrie et les vides influencent son intensité. Les valeurs de E_1 et de E_2 à 10 °C et 10 Hz, indiquées sur les figures montrent que les plages de valeurs se restreignent en fonction du type de bitume, comparativement à la granulométrie (Figure 39, Figure 40, Figure 41).

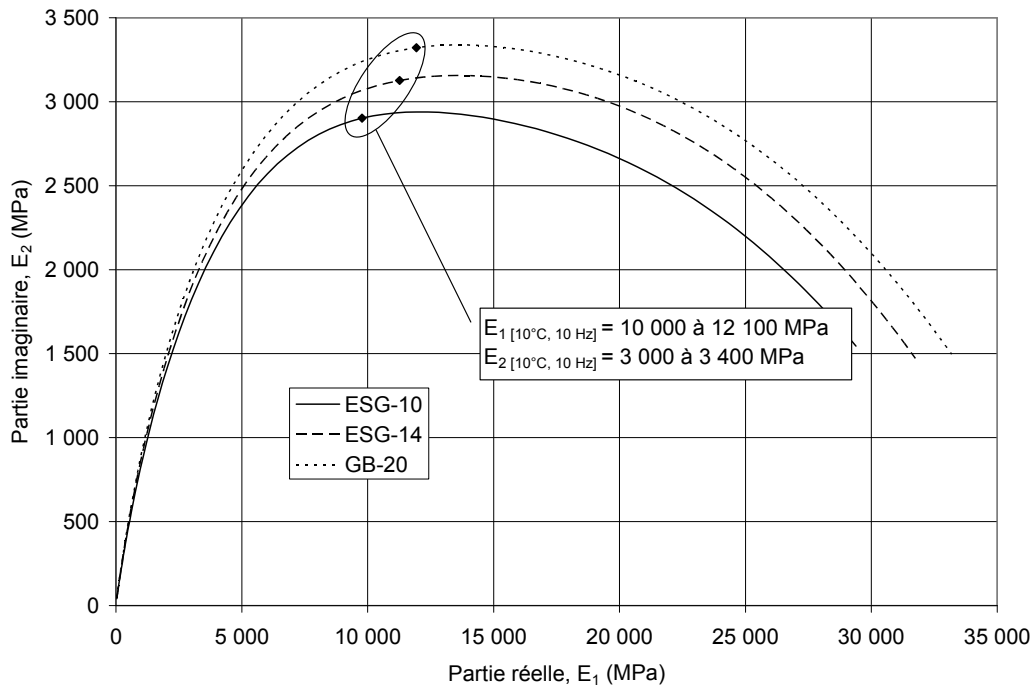


Figure 49 – Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés avec un bitume PG 58-28

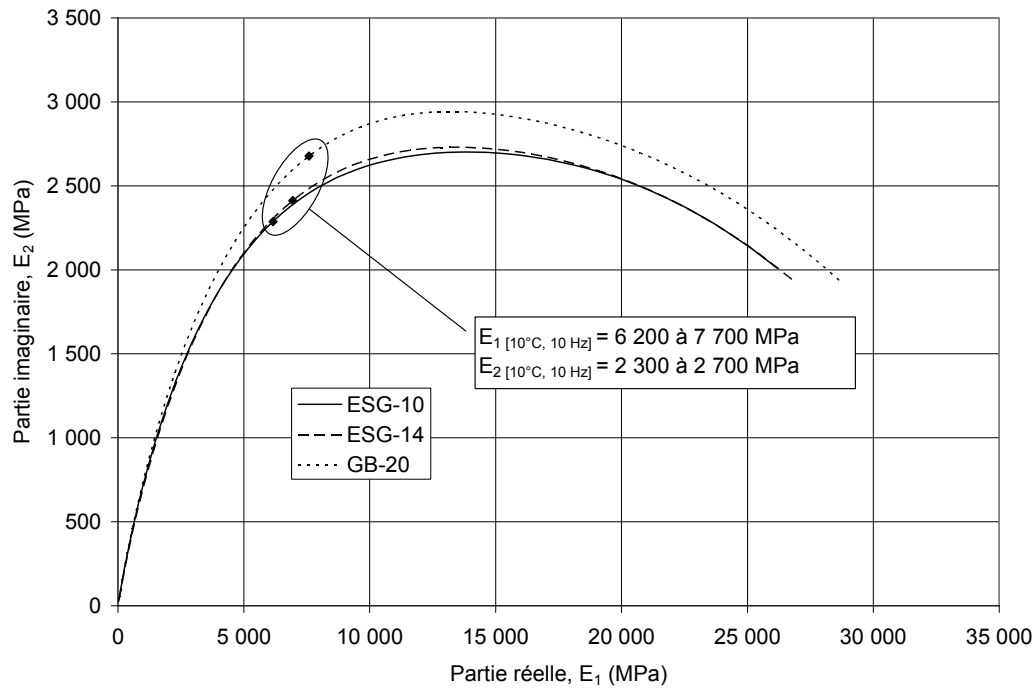


Figure 50 – Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés avec un bitume PG 58-34

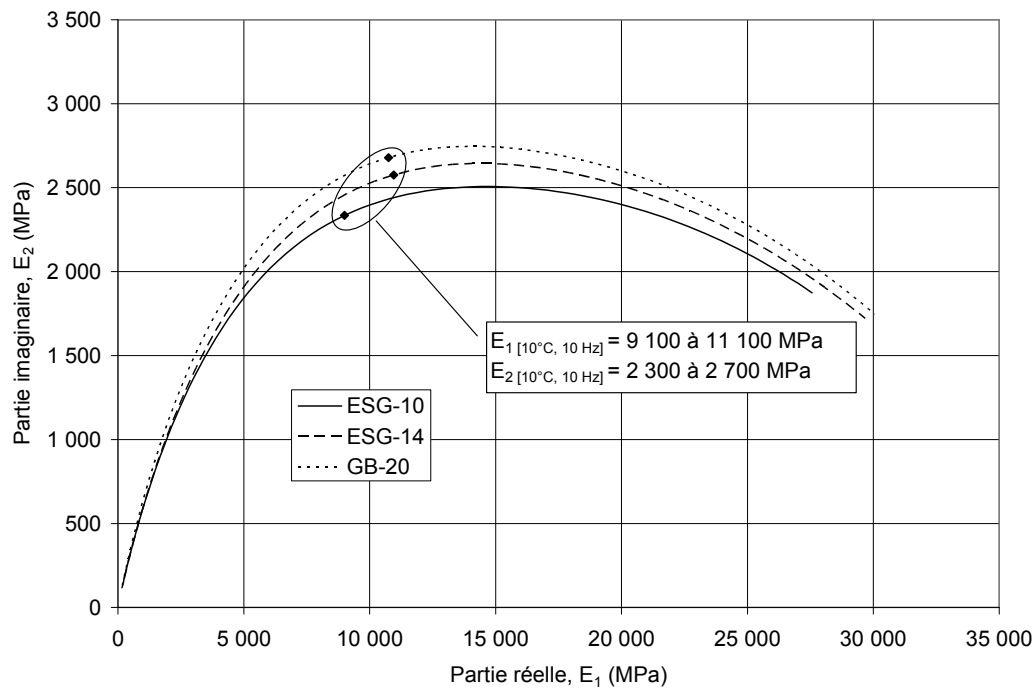


Figure 51 – Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés avec un bitume PG 64-28

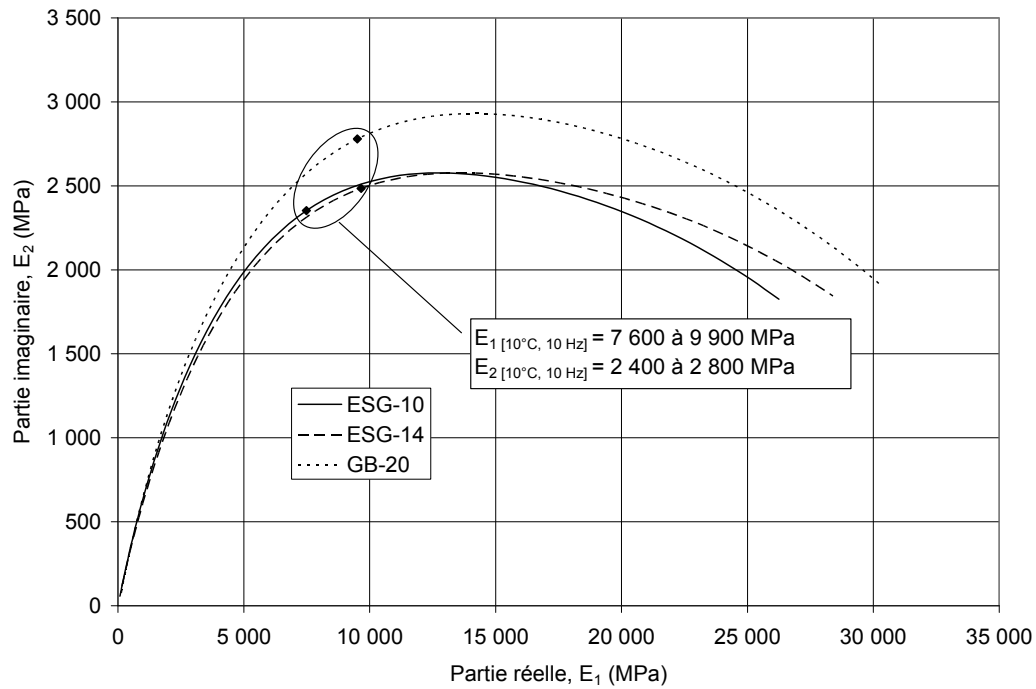


Figure 52 – Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés avec un bitume PG 64-34

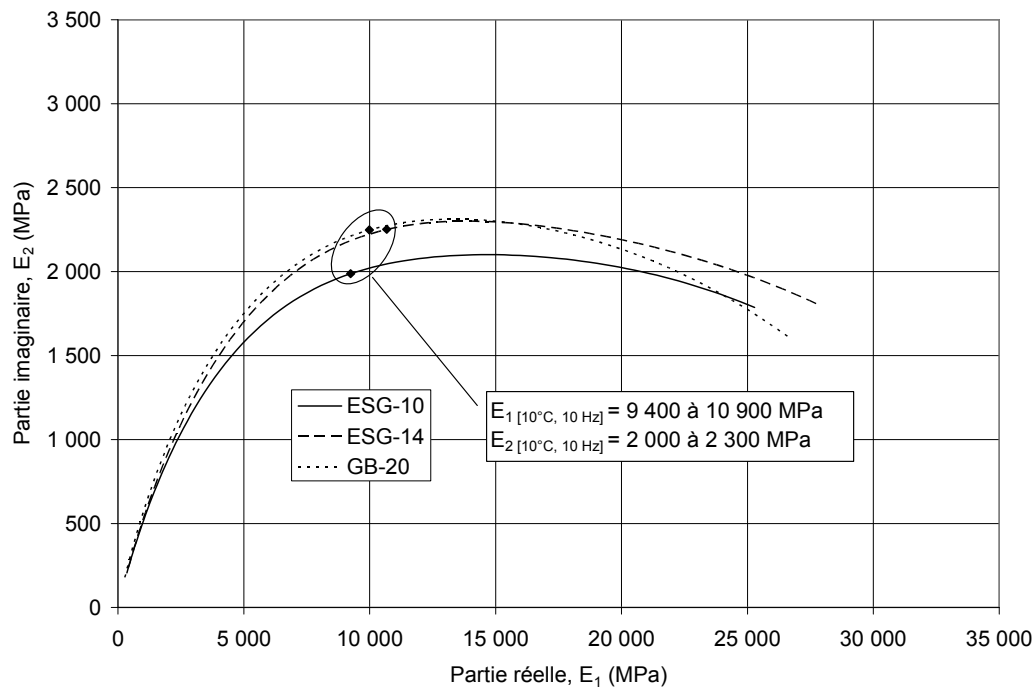


Figure 53 – Courbes de module complexe dans le plan de Cole et Cole des enrobés avec un bitume PG 70-28

Les courbes de E^* sont également présentées par type de bitume dans l'espace de Black de la Figure 54 à la Figure 58. Les figures confirment que le type de bitume influence la forme de la courbe de Black, alors que la granulométrie et les vides influencent son intensité. Les valeurs de $|E^*|$ et de ϕ à 10 °C et 10 Hz indiquées sur les figures montrent que les plages de valeurs se précisent en fonction du type de bitume, principalement en ce qui concerne le ϕ , comparativement à la granulométrie (Figure 42, Figure 43 et Figure 44).

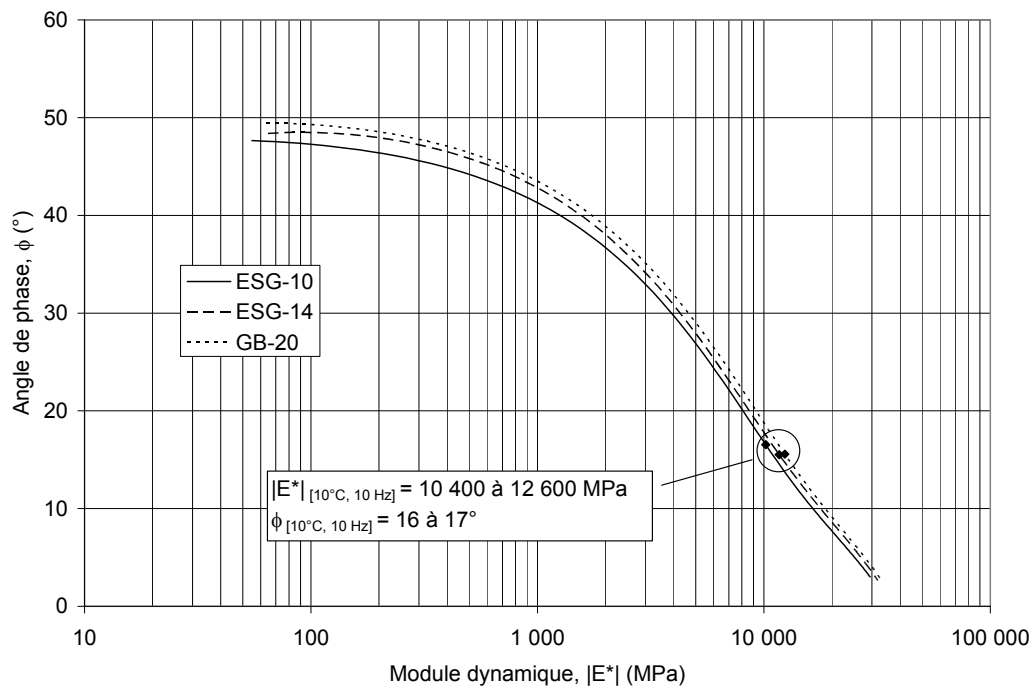


Figure 54 – Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés avec un bitume PG 58-28

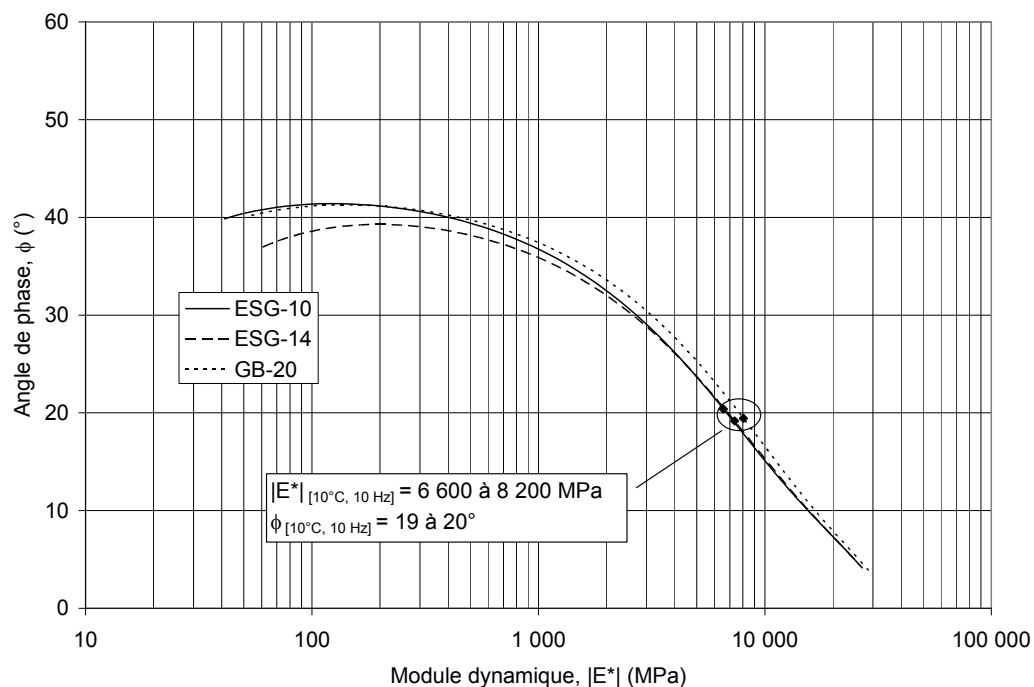


Figure 55 – Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés avec un bitume PG 58-34

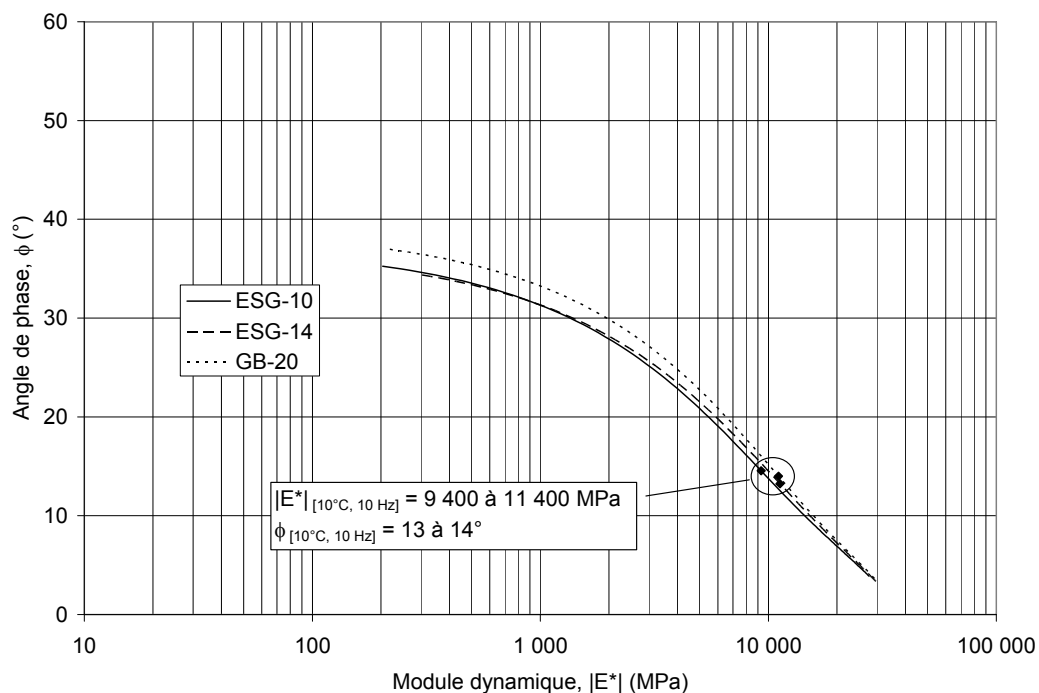


Figure 56 – Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés avec un bitume PG 64-28

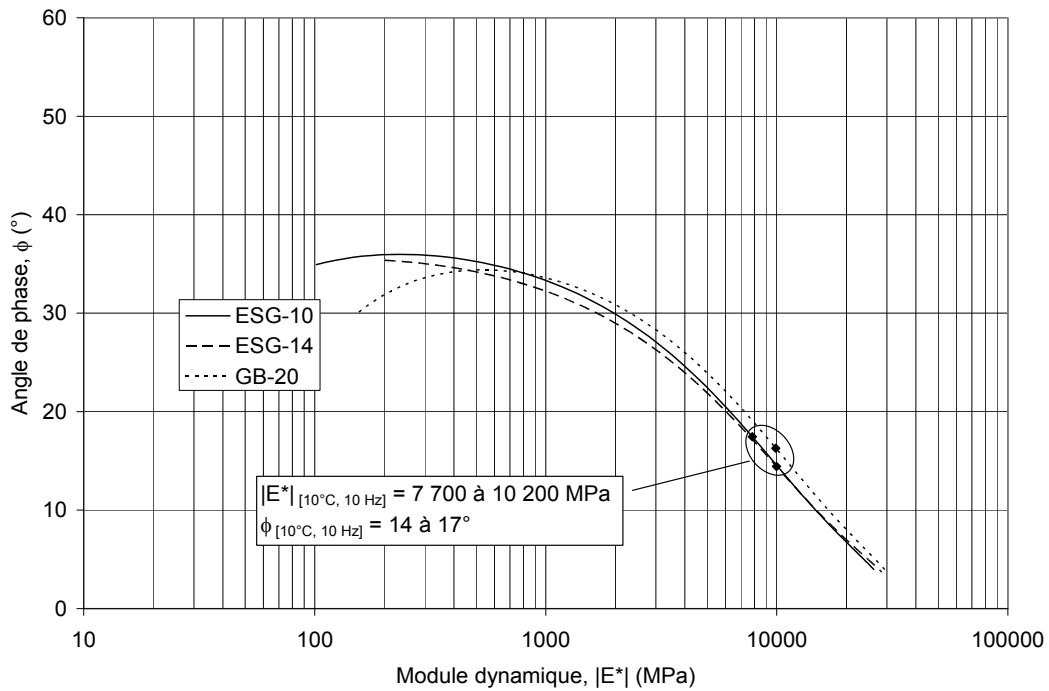


Figure 57 – Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés avec un bitume PG 64-34

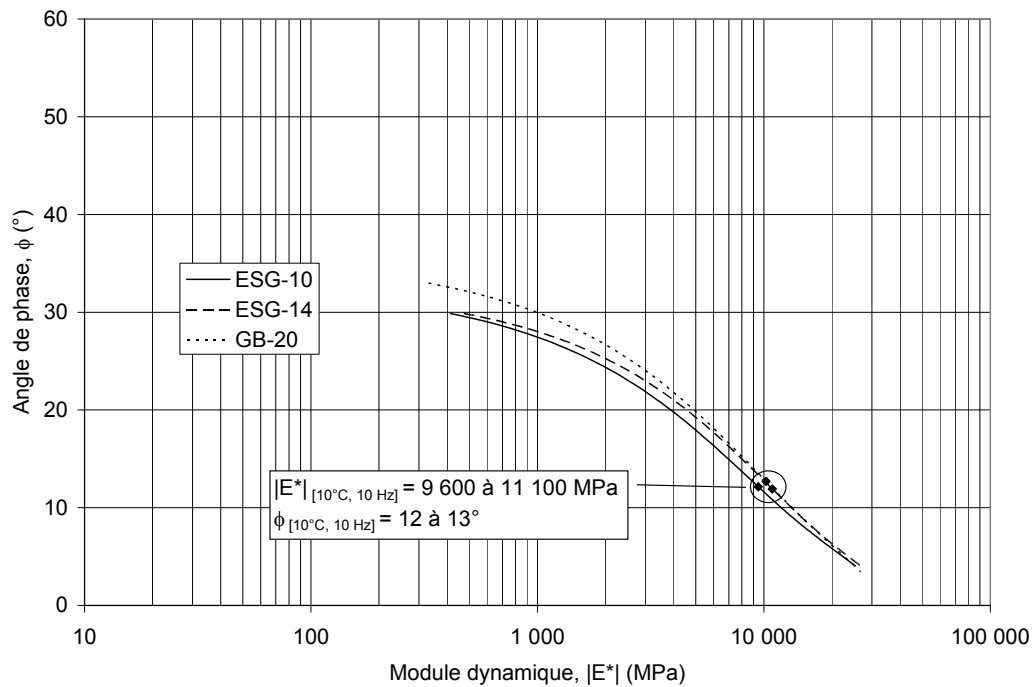


Figure 58 – Courbes de module complexe dans l'espace de Black des enrobés avec un bitume PG 70-28

Puisque la forme des courbes de E^* sont principalement fonction du type de bitume, les modèles de Huet-Sayegh individuels (Tableau 16) sont généralisés par type de bitume au Tableau 22, en combinant les résultats des enrobés ESG-10, ESG-14 et GB-20 pour un même type de bitume. Les paramètres statistiques des modèles (RMSE, R^2 , n) sont présentés au Tableau 23. Le RMSE moyen de $\log E_1$ et de $\log E_2$ augmente à 0,057 et 0,052 respectivement, alors qu'ils étaient de 0,028 et 0,031 en moyenne pour les modèles individuels (Tableau 17). Les RMSE des modèles généraux incluent l'influence de la granulométrie et des vides sur le E^* de l'enrobé.

Tableau 22 – Coefficients de régression des modèles de Huet-Sayegh généraux de module complexe à 10 °C en fonction du type de bitume

Bitume	Coefficients de régression, E^* (MPa)							
	E_0	E_∞	δ	k	h	τ_0	a_1	a_2
PG 58-28	2,3	38 000	2,65	0,184	0,564	0,0722	-0,155	9,48E-4
PG 58-34	2,8	37 600	2,54	0,163	0,486	0,0073	-0,141	8,36E-4
PG 64-28	0,1	39 800	2,47	0,145	0,420	0,0384	-0,148	8,39E-4
PG 64-34	2,3	38 800	2,32	0,151	0,433	0,0158	-0,142	7,37E-4
PG 70-28	0,1	38 900	2,50	0,126	0,373	0,0432	-0,152	7,34E-4

Tableau 23 – Paramètres statistiques des modèles de Huet-Sayegh généraux de module complexe à 10 °C en fonction du type de bitume

Bitume	Paramètres statistiques, E^* (MPa)				
	RMSE $\log E_1$	$R^2 \log E_1$	RMSE $\log E_2$	$R^2 \log E_2$	n
PG 58-28	0,048	1,00	0,050	0,99	308
PG 58-34	0,058	1,00	0,051	0,99	308
PG 64-28	0,053	0,99	0,050	0,98	314
PG 64-34	0,082	0,99	0,066	0,98	304
PG 70-28	0,044	1,00	0,042	0,99	298
Moyenne	0,057	1,00	0,052	0,99	306
Écart type	0,015	0,01	0,009	0,01	6

Dans le cadre d'une analyse générale, les modèles généraux peuvent être considérés comme représentant approximativement le comportement d'un enrobé ESG-14 comprenant les vides moyens par type de bitume indiqués au Tableau 15. Les courbes générales de E^* sont présentées dans le plan de Cole et Cole à la Figure 59 et dans l'espace de Black à la Figure 60. Les figures montrent que le comportement rhéologique des enrobés avec un bitume PG 58-28 et PG 70-28 est différent de celui des enrobés avec un bitume PG 58-34, PG 64-28 et PG 64-34 qui sont plus similaires. De plus, les valeurs de E^* à 10 °C et 10 Hz (E_1 , E_2 , $|E^*|$, ϕ) indiquées sur les figures et présentées au Tableau 24 varient significativement entre les différents bitumes. La moyenne et l'écart type des valeurs pour tout les types de bitume combinés donnent un coefficient de variation moyen de 16 %, ce qui donne une appréciation générale de l'influence du type de bitume sur le E^* de l'enrobé.

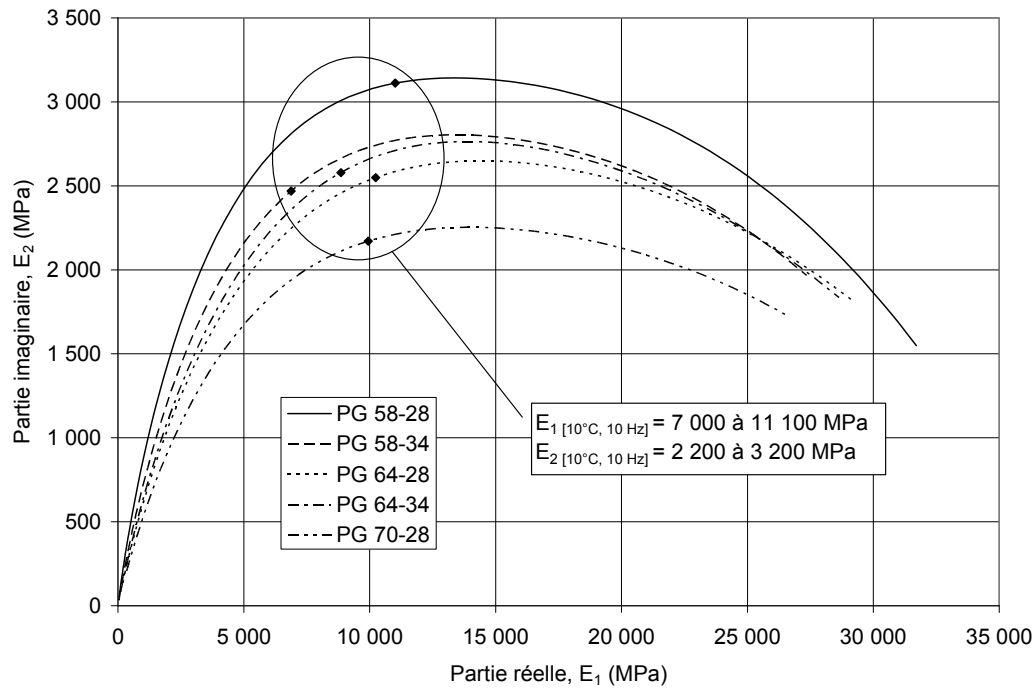


Figure 59 – Courbes générales de module complexe dans le plan de Cole et Cole en fonction du type de bitume

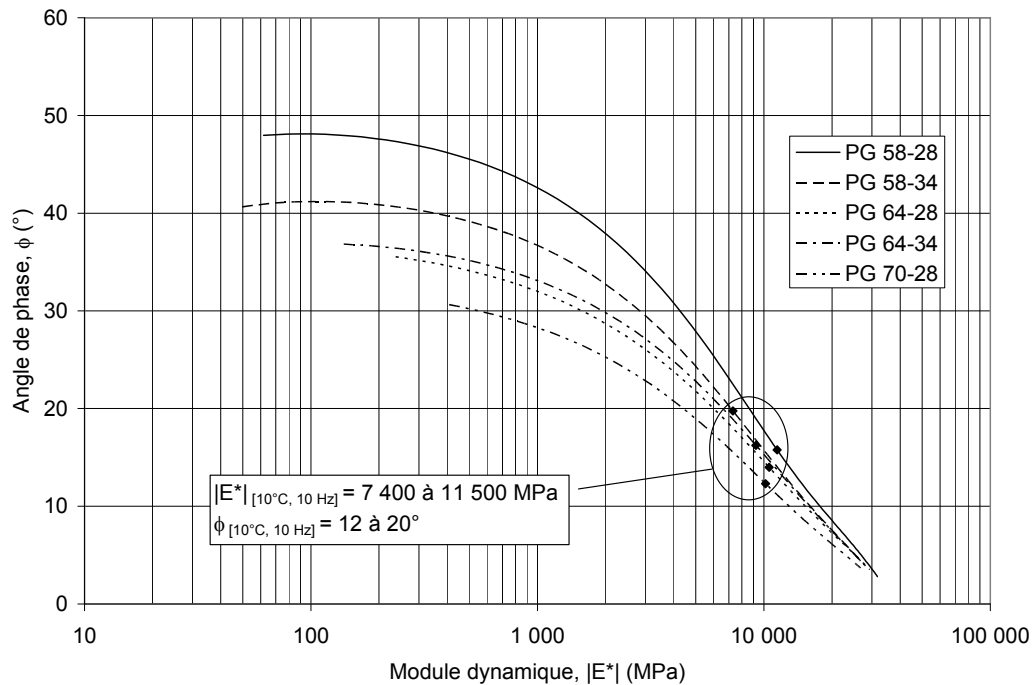


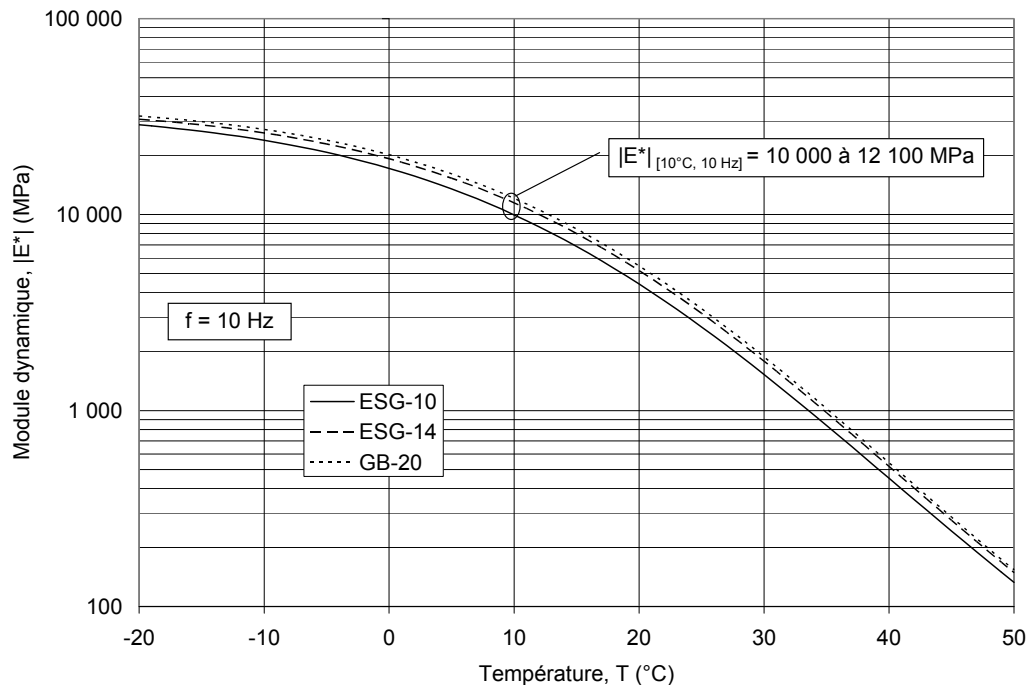
Figure 60 – Courbes générales de module complexe dans l'espace de Black en fonction du type de bitume

Tableau 24 – Module complexe général des enrobés à 10 °C et 10 Hz

Bitume	Module complexe, $E^*_{[10^\circ\text{C}, 10\text{ Hz}]}$ (MPa)			
	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	$ E^* $ (MPa)	ϕ (°)
PG 58-28	11 000	3 100	11 400	16
PG 58-34	6 900	2 500	7 300	20
PG 64-28	10 200	2 500	10 500	14
PG 64-34	8 900	2 600	9 200	16
PG 70-28	9 900	2 200	10 200	13
Moyenne	9 400	2 600	9 700	16
Écart type	1 600	300	1 600	3

6.2 Modèles de module dynamique

Les résultats de $|E^*|$ indiquent également que le type de bitume a une influence plus significative que la granulométrie sur la rigidité des enrobés. Ainsi, les courbes maîtresses de $|E^*|$ sont présentées par type de bitume de la Figure 61 à la Figure 65, en fonction de la température pour une fréquence de 10 Hz. Les figures montrent que le type de bitume influence la forme de la courbe maîtresse, alors que la granulométrie et les vides influencent son intensité, tout comme les courbes de E^* . L'écart moyen entre les courbes maîtresses pour un même type de bitume est de 1 800 MPa à 10 °C et 10 Hz, soit environ la moitié de l'écart observé pour une même granulométrie qui est de 4 100 MPa (Figure 45, Figure 46 et Figure 47).


Figure 61 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 58-28

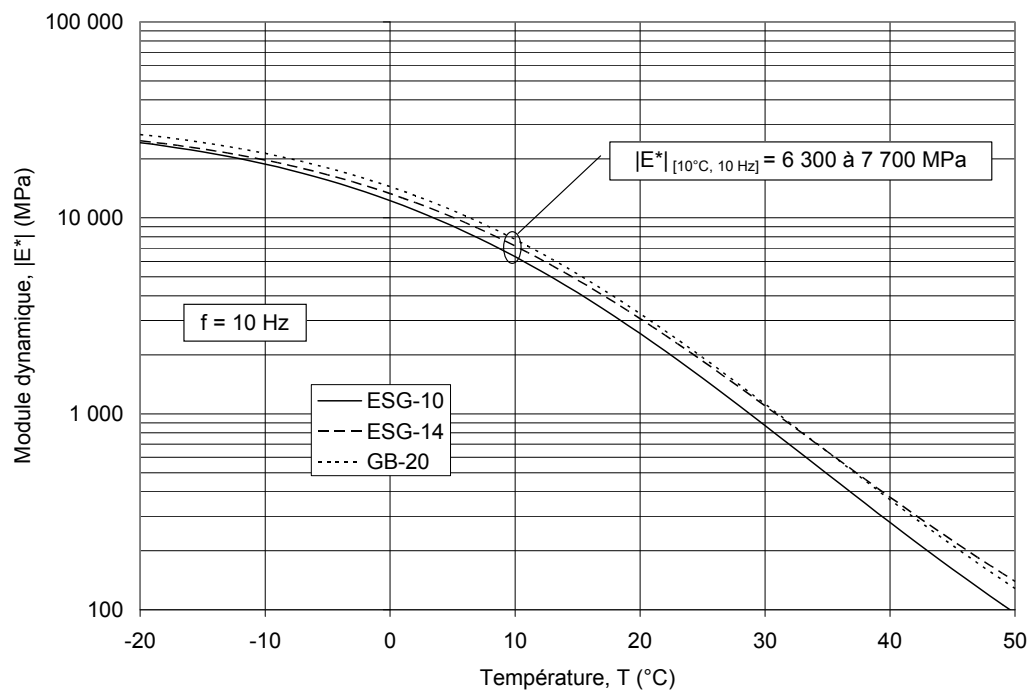


Figure 62 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 58-34

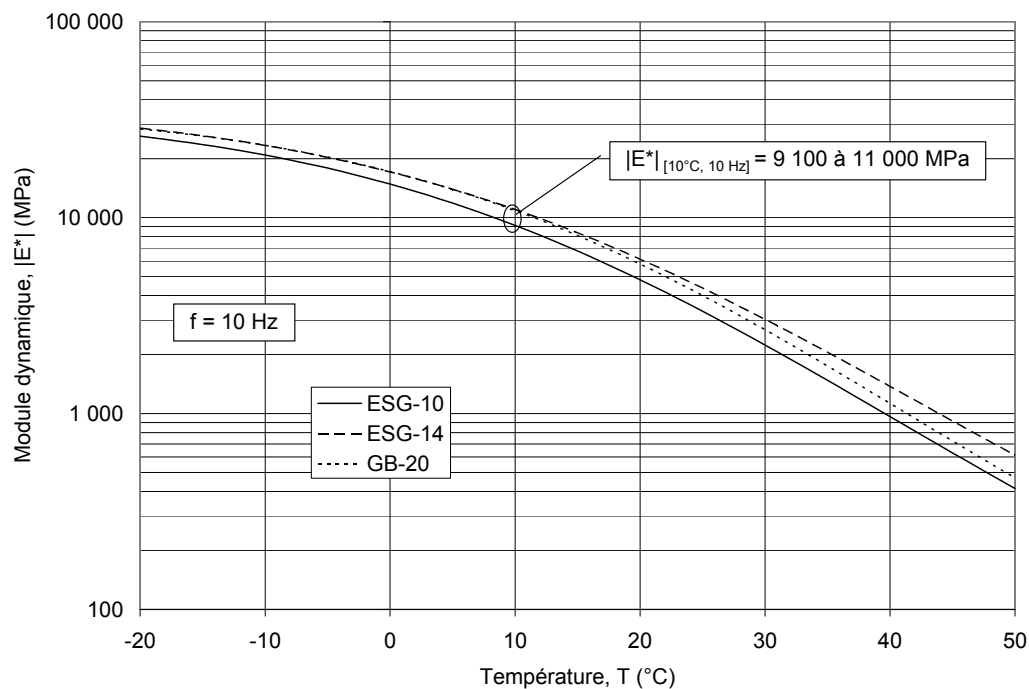


Figure 63 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 64-28

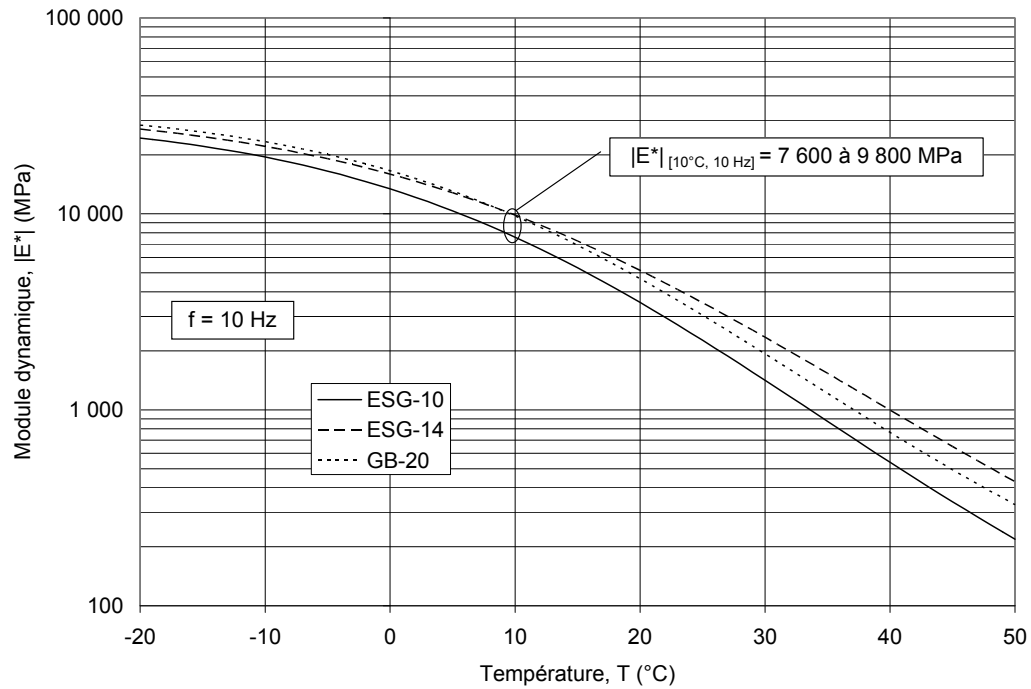


Figure 64 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 64-34

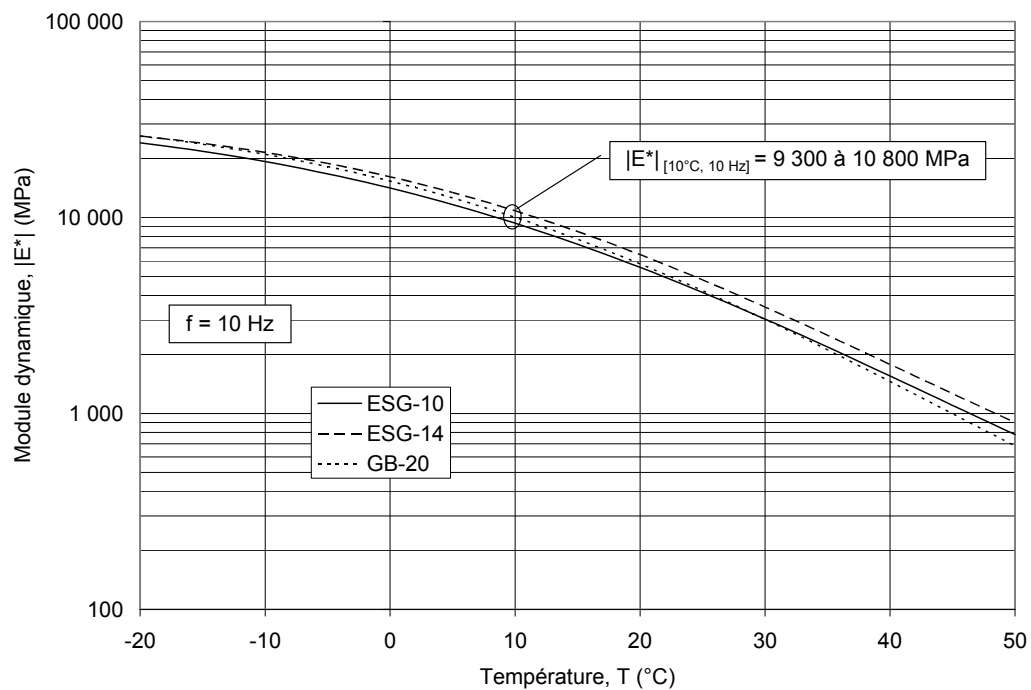


Figure 65 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 70-28

Puisque la forme de la courbe maîtresse de $|E^*|$ est fonction du type de bitume, les courbes sont généralisées par type de bitume au Tableau 25 (Équation 14), en combinant les résultats des trois granulométries. Les paramètres statistiques des modèles (RMSE, R^2 , n) sont présentés au Tableau 26. Le RMSE moyen des modèles généraux est de 0,050, soit significativement plus élevé que le RMSE moyen des modèles individuels de 0,017 (Tableau 20), mais semblable au RMSE général de l'étude de répétabilité de 0,61 (Tableau 11). Ainsi, la granulométrie et les vides ont également une influence significative sur le $|E^*|$ de l'enrobé, et les modèles généraux représentent la moyenne des valeurs obtenues pour chaque type de bitume.

Tableau 25 – Coefficients de régression des modèles de Witczak généraux de module dynamique à 10 °C en fonction du type de bitume

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

Tableau 26 – Paramètres statistiques des modèles de Witczak généraux de module dynamique à 10 °C en fonction du type de bitume

Bitume	Paramètres statistiques, $\log E^* $ (MPa)		
	RMSE	R^2	n
PG 58-28	0,039	1,00	308
PG 58-34	0,050	1,00	308
PG 64-28	0,049	0,99	314
PG 64-34	0,074	0,99	304
PG 70-28	0,040	0,99	298
Moyenne	0,050	0,99	306
Écart type	0,014	0,01	6

Tout comme les modèles généraux de E^* (section 6.1), les modèles généraux de $|E^*|$ représentent approximativement le comportement d'un enrobé ESG-14 comprenant les vides moyens indiqués par type de bitume au Tableau 15. Bien que l'influence de la granulométrie et des vides sur le $|E^*|$ des enrobés soit difficile à préciser, il est possible d'utiliser le RMSE des modèles généraux pour évaluer l'influence de ces paramètres. Ainsi, lorsque les vides de l'enrobé sont constants, il est possible d'ajouter une valeur de RMSE au modèle afin d'estimer le $|E^*|$ d'un enrobé GB-20, ou de soustraire le RMSE pour estimer le $|E^*|$ d'un enrobé ESG-10. De même, dans le cas où la granulométrie demeure la même, il pourrait être envisageable d'ajouter ou de soustraire le RMSE du modèle pour évaluer l'influence de l'écart type des vides moyens (Tableau 15) sur le $|E^*|$ des enrobés.

La Figure 66 présente les courbes maîtresses de $|E^*|$ généralisées par type de bitume, ce qui résume les résultats de $|E^*|$ obtenus pour les 15 enrobés et permet d'observer l'influence générale du bitume. Le Tableau 27 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. Le RMSE moyen des modèles généraux étant de 0,050, l'erreur de prédiction moyenne sur la valeur de 9 500 MPa est de 1 200 MPa, soit seulement 25 % plus faible que l'écart type pour tous les types de bitume combinés. Ainsi, la granulométrie et les vides de l'enrobé demeurent des paramètres importants à considérer dans l'analyse de $|E^*|$.

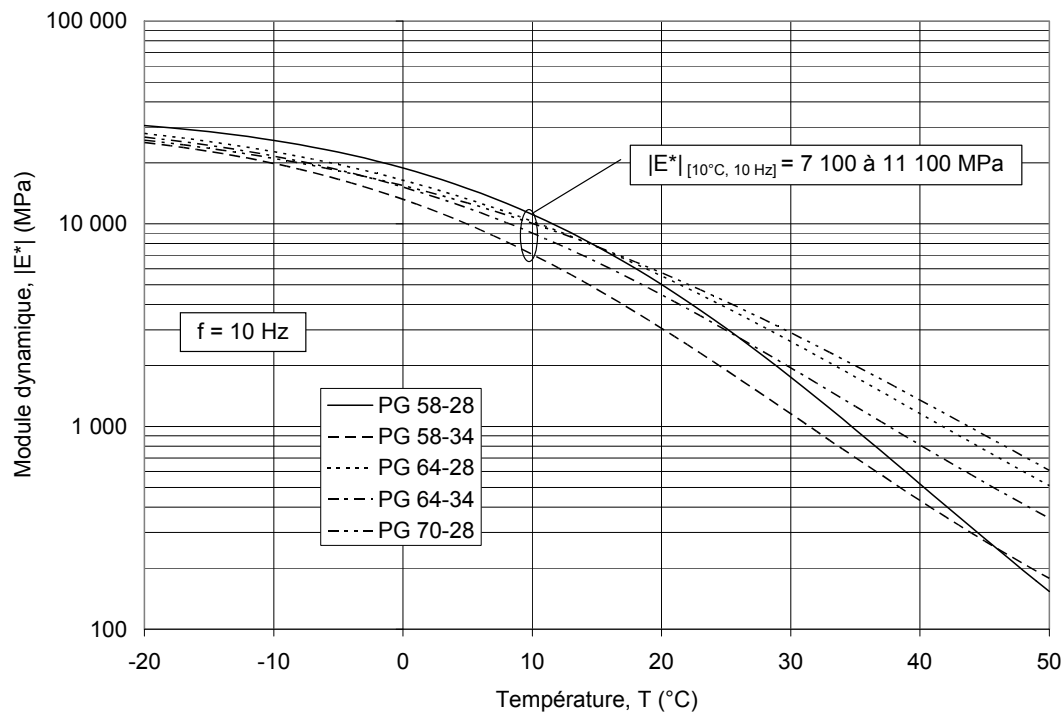


Figure 66 – Courbes maîtresses générales de module dynamique à 10 Hz selon le type de bitume

Tableau 27 – 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

6.3 Modèles de la littérature

Les modèles généraux de $|E^*|$ sont comparés aux valeurs de la littérature, afin d'évaluer l'écart entre les résultats obtenus dans le cadre de cette étude et les valeurs généralement admises dans la pratique. Les manuels de référence de Yoder et Witczak (1975) et de Huang (1993) donnent des valeurs de $|E^*|$ typiques des enrobés aux États-Unis pour différentes températures et fréquences au Tableau 28. Ces valeurs sont comparables au $|E^*|$ moyen déterminé à partir des cinq modèles généraux du MTQ (Tableau 25). Les températures et les fréquences présentées dans le tableau indiquent que l'essai de compression directe répétée a été utilisé pour déterminer ces valeurs (ASTM D 3497).

Tableau 28 – Module dynamique typique des enrobés aux États-Unis (Yoder et Witczak, 1975; Huang, 1993)

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

Les normes françaises AFNOR spécifient une valeur minimale de $|E^*|$ pour différents types d'enrobés à 15 °C et 10 Hz, tel que résumé au Tableau 29 (Corté et Delorme, 2005). Les enrobés inclus au tableau sont les graves-bitumes (GB), les enrobés à module élevé (EME), les bétons bitumineux semi-grenus (BBSG) et les bétons bitumineux à module élevé (BBME). Les GB et les EME sont des enrobés pour couches d'assise ayant généralement une granulométrie 0/14 ou 0/20, alors que les enrobés BBSG et BBME sont utilisés comme couches de surface avec une granulométrie 0/10 ou 0/14 (USIRF, 2003). Les classes de performance des enrobés sont basées sur des essais de comportement mécanique (tenue à l'eau, orniérage, module complexe, fatigue).

Les bitumes utilisés pour la fabrication des enrobés en France ont des indices de pénétrabilité à 25 °C plus faibles (plus durs) que les bitumes utilisés au Québec. Ainsi, les enrobés GB sont généralement formulés avec des bitumes de pénétration 35/50 ou 20/30, les EME avec des bitumes 10/20, 15/25 ou 20/30, les BBSG avec des bitumes 35/50 et les BBME avec des bitumes 20/30 (USIRF, 2003). Le bitume le plus dur utilisé au Québec est le bitume PG 70-28, avec un indice de pénétrabilité d'environ 80. Ainsi, les valeurs de $|E^*|$ prédites à l'aide du modèle général PG 70-28 (Tableau 25) sont comparées aux exigences minimales de l'AFNOR. La valeur de RMSE du modèle général (0,040) est ajoutée à la prédiction du $|E^*|$ pour comparer les enrobés GB avec un enrobé GB-20, alors que la valeur de RMSE est soustraite du $|E^*|$ pour comparer les enrobés BBSG et BBME avec un enrobé ESG-10.

Ainsi, il semble qu'un enrobé GB-20 avec un bitume PG 70-28 pourrait respecter l'exigence pour les enrobés GB classe 2 et 3, mais pas l'exigence des enrobés GB classe 4. Il est probable qu'un bitume plus dur 20/30 soit utilisé avec les enrobés GB classe 4 afin de respecter l'exigence, comparativement aux autres enrobés GB avec un bitume 35/50. De même, il semble que l'enrobé ESG-10 avec un bitume PG 70-28 respecte les exigences des enrobés BBSG (35/50), mais pas ceux des enrobés BBME (20/30). Évidemment, les enrobés avec un bitume PG 70-28 ne respectent pas l'exigence des enrobés EME, dont la pénétrabilité du bitume est 20/30 ou moins (10/20, 15/25). Il est important de noter que les enrobés du MTQ ont été conditionnés durant quatre heures, ce qui n'est pas le cas des enrobés AFNOR. Ainsi, le conditionnement de quatre heures des enrobés semble permettre une certaine comparaison entre un enrobé avec un bitume 80 conditionné et un bitume 35/50 non conditionné.

Tableau 29 – Valeurs minimales de module dynamique à 10 °C et 10 Hz spécifiées par les normes AFNOR pour différents types d'enrobés (Corté et Delorme, 2005)

Enrobé	Module dynamique, $ E^* _{[15^\circ\text{C}, 10\text{ Hz}]}$ (MPa)		
	$ E^* _{\text{AFNOR}}$	$ E^* _{\text{MTQ}}$	$ E^* _{\text{AFNOR}} / E^* _{\text{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

Le guide de dimensionnement des chaussées mécaniste empirique américain (MEPDG) utilise le modèle présenté à l'Équation 17 pour prédire la courbe maîtresse de $|E^*|$ des enrobés (NCHRP 1-37A). Le modèle est fonction du type de bitume (viscosité), de la granulométrie et de la volumétrie (volume des vides, volume de bitume effectif) des enrobés. L'Équation 18 permet de prédire la viscosité du bitume en fonction de la température, selon la classe de performance (PG) du bitume. Les courbes maîtresses de $|E^*|$ prédites à l'aide du modèle MEPDG sont comparées aux courbes maîtresses déterminées dans le cadre de cette étude de la Figure 67 à la Figure 71 pour chaque type de bitume, en fonction de la température pour une fréquence de 10 Hz.

Équation 17 : $\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \gamma \log f)}}$

où $\delta = 3.750063 + 0.029232 p_{200} - 0.001767 p_{200}^2 - 0.002841 p_4$
 $- 0.058097 V_a - 0.802208 V_{be} / (V_{be} + V_a),$
 $\alpha = 3.871977 - 0.002100 p_4 + 0.003958 p_{3/8} - 0.000017 p_{3/8}^2$
 $+ 0.005470 p_{3/4},$
 $\beta = - 0.603313 - 0.393532 \log \eta,$
 $\gamma = - 0.313351,$

$|E^*|$ = module dynamique (psi),
 f = fréquence (Hz),

p_{200} = retenu sur le tamis n° 200 (%),
 p_4 = retenu sur le tamis n° 4 (%),
 $p_{3/8}$ = retenu sur le tamis $\frac{3}{8}$ po (%),
 $p_{3/4}$ = retenu sur le tamis $\frac{3}{4}$ po (%),
 V_a = volume des vides (%),
 V_{be} = volume de bitume effectif (%),
 η = viscosité du bitume (10^6 Poise).

Équation 18 : $\log \log \eta = A + VTS \log T_R$

où η = viscosité du bitume (cPoise),
 T_R = température (Rankine),
 A, VTS = coefficients de régression.

Tableau 30 – Coefficients de régression pour la prédiction de la viscosité du bitume en fonction de la classe de performance du bitume (NCHRP 1-37A)

Bitume	Coefficients de régression, $\log \log \eta$ (cP)	
	A	VTS
PG 58-28	11,010	-3,701
PG 58-34	10,035	-3,350
PG 64-28	10,312	-3,440
PG 64-34	9,461	-3,134
PG 70-28	9,715	-3,217

Les valeurs du modèle MEPDG sont similaires aux valeurs du MTQ jusqu'à 20 °C pour les bitumes PG 58, jusqu'à 30 °C pour les bitumes PG 64 et jusqu'à 40 °C pour le bitume PG 70. La granulométrie influence peu les valeurs de $|E^*|$ prédites par le modèle MEPDG pour les granulométries étudiées. L'écart de $|E^*|$ à température plus élevée peut s'expliquer par le mode de sollicitation en compression utilisé pour développer le modèle MEPDG, qui sollicite le squelette granulaire de l'enrobé davantage, comparativement au mode de sollicitation en traction et compression alternées. Ainsi, plus la température haute du PG est élevée, plus la température où l'influence des granulats se fait sentir est élevée.

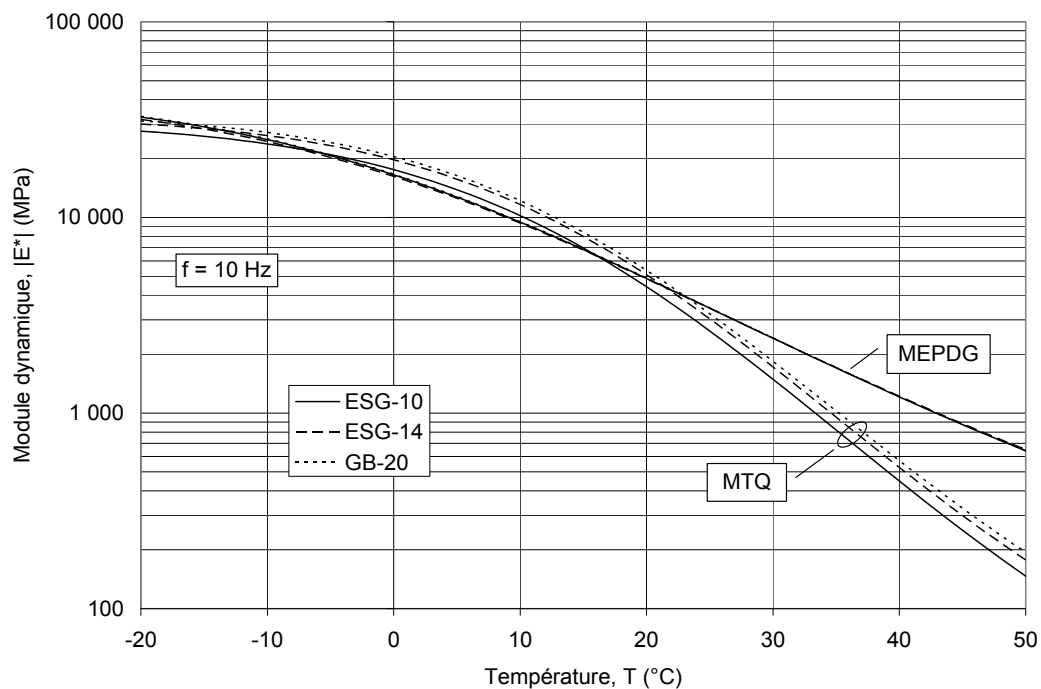


Figure 67 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 58-28 et prédiction avec le modèle MEPDG

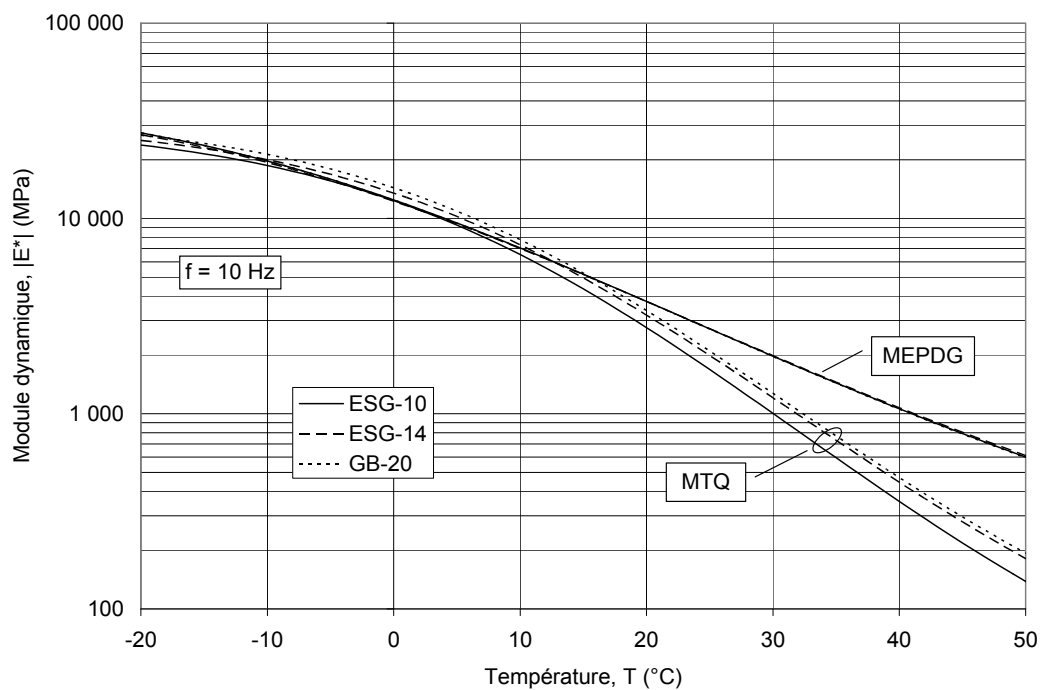


Figure 68 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 58-34 et prédiction avec le modèle MEPDG

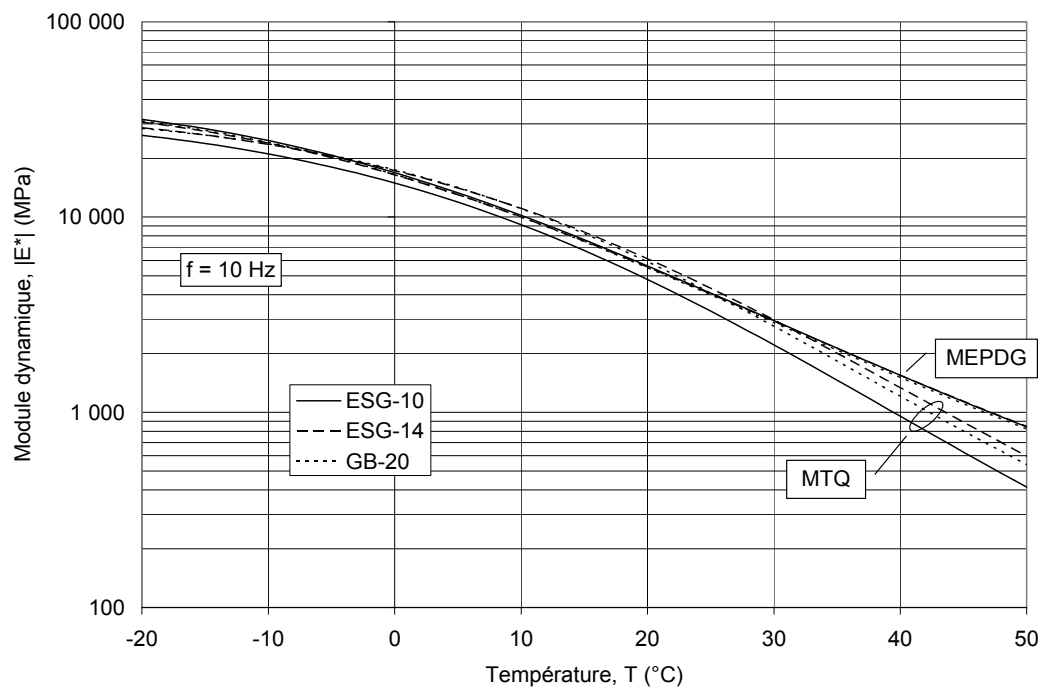


Figure 69 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 64-28 et prédiction avec le modèle MEPDG

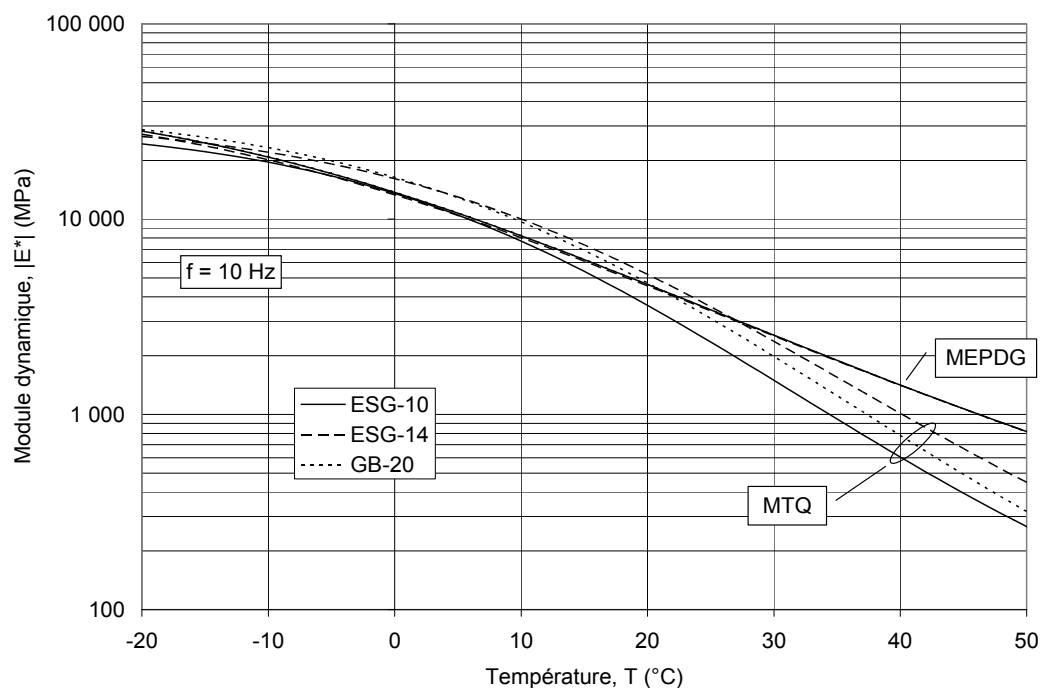


Figure 70 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 64-34 et prédiction avec le modèle MEPDG

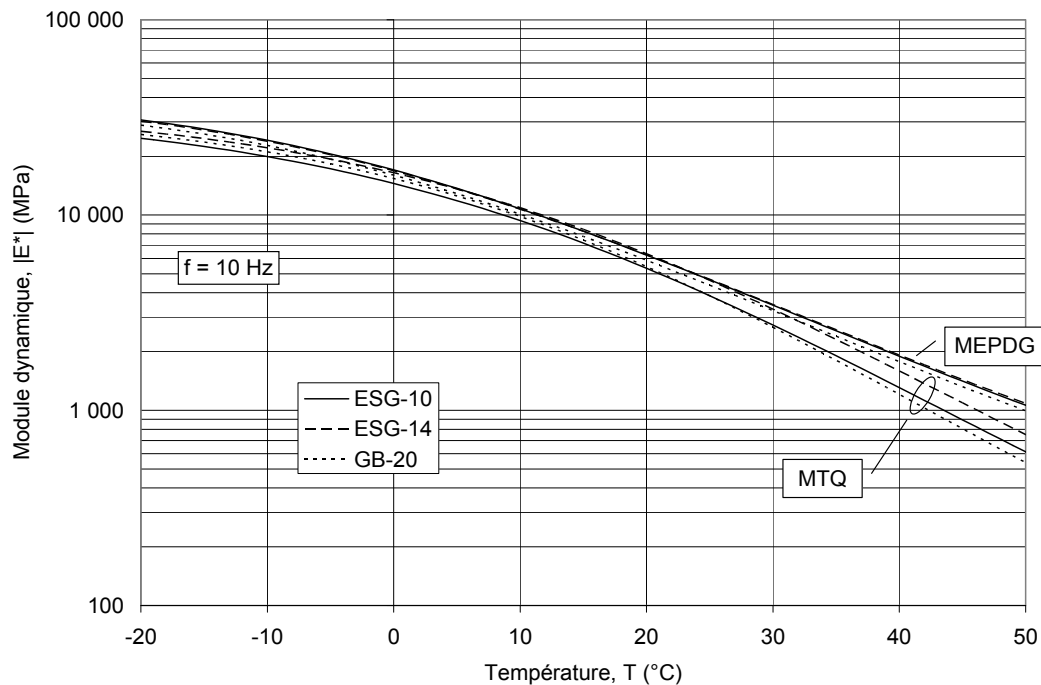


Figure 71 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 70-28 et prédiction avec le modèle MEPDG

Le logiciel de dimensionnement des chaussées CHAUSSEE 2 du MTQ utilise des valeurs de module réversible (M_r) pour déterminer les coefficients structuraux des matériaux (MTQ, 2006), conformément à l'approche proposée par le guide de dimensionnement AASHTO (1993). Le M_r des enrobés a été estimé à partir de valeurs de stabilité Marshall disponibles lors du développement du logiciel. Le M_r de l'enrobé ne varie pas en fonction du type de bitume et de granulométrie, mais en fonction de sa résistance à l'orniérage [haute résistance à l'orniérage (HRO)] et à la fatigue [base antifatique (BAF)] afin de tenir compte de ces mécanismes d'endommagement de manière indirecte.

Les valeurs de M_r des enrobés de CHAUSSEE 2 sont comparées au $|E^*|$ moyen à 10 Hz des enrobés caractérisés dans le cadre de cette étude au Tableau 31, pour les deux zones de température effective considérées pour le dimensionnement, soit 17,3 °C dans la zone nord et 20,5 °C dans la zone sud. Le tableau montre que le $|E^*|$ des enrobés est plus élevé que les M_r du logiciel.

Par ailleurs, le MTQ effectue régulièrement des analyses mécanistes-empiriques à partir de valeurs de module élastique déterminées sur la route à l'aide d'un déflectomètre à masse tombante (FWD). Les valeurs typiques pour une chaussée non fissurée sont de 5 500 MPa pour la zone nord et de 4 800 MPa pour la zone sud (St-Laurent, 1995), ce qui correspond davantage aux valeurs de $|E^*|$ moyennes de cette étude (Tableau 31).

Tableau 31 – Module réversible des enrobés pour le logiciel CHAUSSEE 2 (MTQ, 2006)

Enrobé	Température	M_r	$ E^* _{[10\text{ 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

Avant le développement de l'essai TCD, le MTQ déterminait le $|E^*|$ des enrobés à l'aide d'un essai de flexion aux tiers points (Doucet et coll., 1999a, 1999b). Le $|E^*|$ en flexion d'enrobés GB-20 et MB-16 (ESG-14) avec différents bitumes sont comparés au $|E^*|$ en traction-compression des enrobés équivalents de cette étude au Tableau 32 à 15 °C et 10 Hz. Les enrobés pour l'essai de flexion ont été malaxés et compactés en laboratoire, sans conditionner les mélanges avant le compactage. Les enrobés MB-16 ont été fabriqués avec des bitumes entreposés sur une période de six ans dans des contenants étanches.

Les enrobés GB-20 montrent que le conditionnement des enrobés influence significativement le $|E^*|$, particulièrement pour le bitume PG 64-34, tel qu'observé lors de l'étude de conditionnement. Les enrobés MB-16 et ESG-14 présentent des $|E^*|$ similaires, ce qui indique que le bitume a subi un certain vieillissement durant son entreposage. Il est difficile d'évaluer précisément l'influence du vieillissement, puisque les résultats ont été obtenus avec deux méthodes d'essai différentes.

Tableau 32 – Module dynamique d'enrobés du Québec à l'aide d'un essai de flexion aux tiers points (Doucet et coll., 1999a, 1999b)

Enrobé	Bitume	Équivalence PG	Module dynamique, $ E^* _{[15^\circ\text{C}, 10\text{ Hz}]}$		
			$ E^* _{\text{flexion}}$	$ E^* _{\text{TCD}}$	$ E^* _{\text{flexion}} / E^* _{\text{TCD}}$
GB-20	Conventionnel	PG 64-28	6 500	8 200	0,79
	Polymère	PG 64-34	3 800	6 900	0,55
	80/100	PG 58-28	9 500	8 000	1,19
MB-16	MG 90	PG 64-28	7 000	8 400	0,83
ESG-14	150/200	PG 52-34	7 000	-	-
	MG 175	PG 58-34	5 200	4 900	1,06

Les matériaux de 11 sites de suivi de performance du *Canadian Long Term Pavement Performance Program* (C-LTPP) ont été échantillonnés pour déterminer leur rigidité en laboratoire. Le $|E^*|$ des enrobés C-LTPP a été déterminé à l'aide de l'essai de flexion aux tiers points (Doucet et Doré, 2004). La courbe maîtresse générale des sites C-LTPP est comparée aux courbes maîtresses générales des enrobés de cette étude à la Figure 72. La courbe C-LTPP montre que le $|E^*|$ des enrobés vieillis à long terme sur la route est similaire au $|E^*|$ des enrobés vieillis à court terme (quatre heures) en laboratoire, mais que la forme de la courbe diffère. Il est difficile d'évaluer l'influence du type d'essai sur ces observations, mais il semble pertinent de vieillir les enrobés en laboratoire.

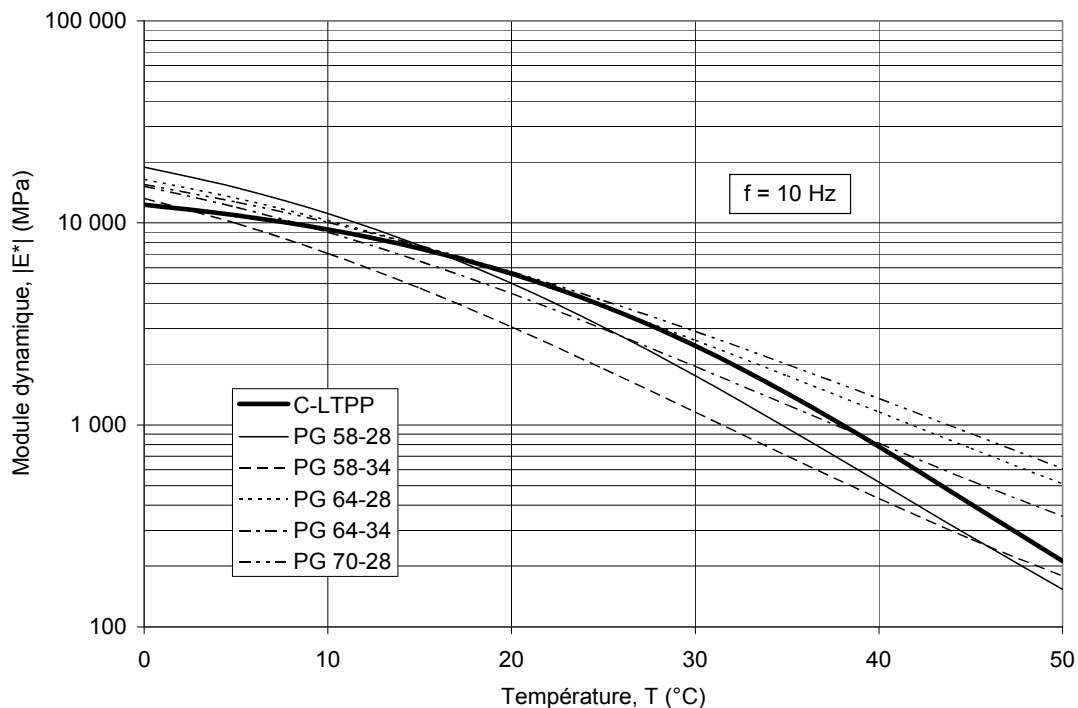


Figure 72 – Courbe maîtresse moyenne de module dynamique des enrobés C-LTPP et générales du MTQ (Doucet et Doré, 2004)

Finalement, l'influence des variations saisonnières sur la portance de cinq routes du Québec a été étudiée par St-Laurent à l'aide d'un déflectomètre à masse tombante (FWD) (St-Laurent, 1995). Le module élastique (E) moyen des enrobés déterminé par rétrocalcul à l'aide d'un logiciel multicouche élastique est de 5 760 MPa à 20 °C. Considérant que la fréquence de chargement du FWD est d'environ 20 Hz (Huang, 1993), le $|E^*|$ moyen des modèles généraux est de 5 620 MPa à 20 °C. Ces résultats montrent que les essais de FWD et de TCD peuvent déterminer des valeurs de rigidité similaires.

7. CONCLUSION

Ce rapport fait état du développement d'un équipement de traction-compression directe (TCD) et de la méthode d'essai LC 26-700 « Détermination du module complexe des enrobés ».

- L'équipement TCD développé par le MTQ est jugé fonctionnel, bien qu'il persiste un déphasage dans la lecture des données, ce qui influence la mesure de l'angle de phase. Une correction a été apportée à la suite des essais effectués avec un matériau élastique (aluminium) afin de minimiser cette erreur.
- Les éprouvettes sont préparées à l'aide d'un compacteur de plaques à pneu roulant, ce qui donne une distribution des vides plus uniforme que les éprouvettes préparées à l'aide d'une presse à cisaillement giratoire.
- Les enrobés sont conditionnés durant quatre heures avant le compactage, afin de simuler le vieillissement lors de leur fabrication, de leur transport et de leur mise en œuvre, ce qui permet d'obtenir des résultats en concordance avec la classification PG des bitumes.
- La répétabilité de l'essai est influencée par les vides interstitiels des éprouvettes, qui varient lors de leur préparation. Une augmentation des vides entraîne généralement une diminution du $|E^*|$ de l'enrobé.

Des modèles de module complexe (E^*) et de module dynamique ($|E^*|$) ont été déterminés pour trois enrobés de grosseurs nominales maximales différentes, combinés au cinq types de bitume les plus utilisés au Québec.

- Le type de bitume influence principalement la rhéologie des enrobés, donc la forme de la courbe de E^* et de $|E^*|$.
- La granulométrie et les vides interstitiels influencent principalement l'intensité du E^* et du $|E^*|$. Une augmentation du diamètre nominal maximal de l'enrobé entraîne généralement une augmentation du $|E^*|$ de l'enrobé.
- Il est proposé de modéliser le E^* et le $|E^*|$ en fonction du type de bitume, et d'ajouter ou de soustraire une certaine valeur à la prédiction pour tenir compte de l'influence de la granulométrie ou des vides.
- La modélisation du $|E^*|$ à l'aide du modèle de Witczak est plus précise que la modélisation de E^* à l'aide du modèle de Huet-Sayegh, ce qui rend le modèle de Witczak intéressant pour le dimensionnement des chaussées lorsque seulement la valeur de $|E^*|$ est utilisée. Par contre, le modèle de Huet-Sayegh est nécessaire pour tenir compte du comportement viscoélastique complet de l'enrobé.

- Le principe de superposition temps-température s'applique aux enrobés caractérisés. Les points problématiques sont expliqués par la variabilité de la mesure de l'angle de phase.
- Les résultats obtenus sont comparables aux valeurs indiquées dans la littérature, mais seulement une source de granulats et de bitume par classe PG a été caractérisée. Les valeurs obtenues semblent également correspondre aux valeurs déterminées à l'aide d'un déflectomètre à masse tombante (FWD).

Le MTQ dispose maintenant d'une méthode d'essai fiable et documentée pour la détermination du module complexe des enrobés. Il dispose également d'une banque de données de module complexe pour des enrobés du Québec. La banque de données est rendue disponible dans ce rapport, afin qu'elle soit éprouvée dans divers contextes, par différents intervenants. Par ailleurs, des essais additionnels sont à prévoir pour caractériser des enrobés avec des bitumes et des granulats de sources différentes.

Parallèlement, le MTQ poursuit le développement de ses connaissances sur le module complexe des enrobés, par le biais des expertises qu'il effectue continuellement en lien avec diverses problématiques. Ainsi, le MTQ cherche à développer l'utilisation du module complexe dans la pratique, tel que pour l'évaluation de nouveaux produits et de nouvelles techniques, l'optimisation du dimensionnement des chaussées et des interventions sur le réseau routier, et l'évaluation du préjudice en cas de non-conformité. Le MTQ désire également compléter son expertise à partir d'éprouvettes prélevées sur la route.

En perspective, il est important de se rappeler que le module complexe est une propriété intrinsèque de l'enrobé, et que la détermination de la résistance à l'endommagement est nécessaire pour évaluer sa performance mécanique. Ainsi, en plus du comportement à petites déformations décrit par le module complexe, la détermination de la résistance à l'endommagement par orniérage à haute température, par retrait thermique à basse température et par fatigue à température intermédiaire sont également requis, afin d'évaluer la performance d'un enrobé dans un contexte de dimensionnement des chaussées.

8. RÉFÉRENCES

AASHTO R 30-02 (2005). « Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA) », *Standard Specifications for Transportation and Methods of Sampling and Testing*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.

AASHTO TP 62-07 (2007). « Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures », *Standard Specifications for Transportation and Methods of Sampling and Testing*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.

AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation, Washington, D.C., 640 p.

ASTM D 3497-79 (2003). « Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures », *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 4.03, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA, USA.

CORTÉ, JEAN-FRANÇOIS et JEAN-LUC DELORME (2005). « Chapitre 1. Composition et formulation des mélanges bitumineux », *Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*, Mécanique et Ingénierie des Matériaux, Lavoisier, Paris, France, p. 23-73.

DI BENEDETTO, HERVÉ, CHANTAL DE LA ROCHE et JEAN-MICHEL PIAU (2005). « Chapitre 2. Propriétés mécaniques et thermomécaniques des mélanges bitumineux », *Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*, Mécanique et Ingénierie des Matériaux, Lavoisier, Paris, France, p. 75-235.

DOUCET, FÉLIX et DENIS ST-LAURENT (2008). « Détermination du comportement mécanique des matériaux de chaussée souple au MTQ », *Bulletin Innovation Transport*, Numéro 32, ministère des Transports du Québec, Canada.

DOUCET, FÉLIX et BRUNO AUGER (2007). « Essai de tension-compression cyclique pour la détermination du comportement mécanique des enrobés », *Recueil des communications du 42^e Congrès de l'AQTR*, Association Québécoise du Transport et des Routes, Montréal, Canada.

DOUCET, FÉLIX (2006). « Complex Modulus Characterization of Asphalt Mixes at MTQ and LCPC », *Proceedings of the 10th International Conference of Asphalt Pavements*, Québec, Canada.

DOUCET, FÉLIX et GUY DORÉ (2004). « Module dynamique et angle de phase des enrobés CLTPP », *Proceedings of the 49th Annual Conference of the CTAA*, Canadian Technical Asphalt Association, Montréal, Canada.

DOUCET, FÉLIX (2000). *Caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue des enrobés*, mémoire de maîtrise en Sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Canada, 212 p.

DOUCET, FÉLIX, CLAUDE LUPIEN et PIERRE LANGLOIS (1999a). « Caractérisation de la rigidité et de la résistance à la fatigue des revêtements bitumineux », *Compte-rendu du 34^e congrès annuel de l'AQTR*, Association Québécoise du Transport et des Routes, Montréal, Canada.

DOUCET, FÉLIX, YVES SAVARD, CLAUDE LUPIEN et PIERRE LANGLOIS (1999b). « Stiffness and Fatigue Resistance Characterization of Asphalt Mixes used at the C-SHRP Experimental Site on Highway 10 », *Proceedings of the 44th Annual Conference of the CTAA*, Canadian Technical Asphalt Association, Québec, Canada.

EN 12697-26 (2005). « Partie 26 : Module de rigidité », *Mélanges bitumineux, Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud*, Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, Belgique.

HUANG, YANG (1993). *Pavement Analysis and Design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 718 p.

HUET, CHRISTIAN (1963). *Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés*, thèse de docteur-ingénieur, Faculté des sciences de l'Université de Paris, France, 69 p.

LC 26-003 (2007). « Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire », *Recueil des méthodes d'essai LC*, Laboratoire des chaussées, ministère des Transports du Québec, Les Publications du Québec, Canada.

LC 26-400 (2008). « Fabrication d'éprouvettes au compacteur LCPC », *Recueil des méthodes d'essai LC*, Laboratoire des chaussées, Ministère des Transports du Québec, Les Publications du Québec, Canada.

LC 26-700 (2008). « Détermination du module complexe des enrobés », *Recueil des méthodes d'essais LC*, Laboratoire des chaussées, ministère des Transports du Québec, Les Publications du Québec, Canada.

LCPC et SETRA (1994). *Conception et dimensionnement des structures de chaussées*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, Paris, France, 250 p.

MTQ (2009). *Enrobés — Bilan saisonnier 2008*, ministère des Transports du Québec, Direction du laboratoire des chaussées, Service des matériaux d'infrastructures, Québec, Canada, 46 p.

MTQ (2006). CHAUSSEE 2 : Logiciel de dimensionnement des chaussées souples, Direction du laboratoire des chaussées, ministère des Transports du Québec, Canada, [En ligne]

[http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussee/logiciel_dimensionnement_chaussees] (Consulté le 17 décembre 2007).

NCHRP 1-37A (2004). *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., USA, [En ligne] [<http://www.trb.org/mepdg/home.htm>] (Consulté le 23 novembre 2007).

NORME 4101 (2008). « 4.1 Liants bitumineux — Bitumes », *Tome VII — Matériaux, Normes ouvrages routiers*, ministère des Transports du Québec, Les Publications du Québec, Canada.

SAYEGH, GEORGES (1965). *Contribution à l'étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux*, thèse de docteur-ingénieur, Faculté des sciences de l'Université de Paris, France, 74 p.

ST-LAURENT, DENIS (1995). *Évaluation structurale de chaussées souples dans un contexte climatique nordique*, mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, Canada.

USIRF (2003). « Chapitre 6 : Enrobés bitumineux routiers », *Les enrobés bitumineux, Tome 2*, Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française, Routes de France, Paris, p. 16-62.

WITCZAK, MATTHEW (2005). *Simple performance tests: Summary of recommended methods and database*, NCHRP Report 547, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA, 15 p.

WITCZAK, MATTHEW and OSWALDO FONSECA (1996). *Revised Predictive Model for Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures*, Transportation Research Record 1540, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., USA.

YODER, ELDON and MATTHEW WITCZAK (1975). *Principles of Pavement Design*, second edition, John Wiley and Sons, New York, USA, 697 p.

Annexe 1

Module complexe des enrobés conditionnés une heure



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07 Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14 Source granulats :
Type bitume : PG 58-28 Source bitume :
Teneur bitume : 4,8% Source enrobé : Laboratoire
Teneur vides : 3,3% Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

E _o	E _∞	δ	k	h	τ _o	a ₁	a ₂
4,4	36 900	2,507	0,203	0,615	0,038	-0,154	1,06E-03

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

δ	α	β	γ	a ₁	a ₂
0,066	4,458	-1,541	-0,503	-0,149	7,88E-04

Note : Cure = 1 heure

Échantillon : EB-052-07 Densité brute : 2,536
Teneur vides : 3,2% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,2	10	877,1	27,5	24	31 873	2,6	31 839	1 467
-20,2	3	863,8	28,5	25	30 316	3,5	30 260	1 841
-20,1	1	795,4	27,3	25	29 126	3,8	29 062	1 916
-20,1	0,3	783,2	28,3	25	27 703	4,0	27 634	1 946
-20,2	0,1	769,4	29,4	23	26 166	5,7	26 036	2 605
-9,9	10	1018,7	38,6	14	26 410	5,5	26 287	2 547
-9,9	3	928,8	38,5	14	24 150	6,1	24 012	2 578
-9,9	1	830,7	37,5	14	22 158	8,0	21 945	3 065
-9,9	0,3	774,8	38,8	14	19 963	9,3	19 701	3 224
-9,9	0,1	711,1	40,0	14	17 760	12,2	17 356	3 763
0,1	10	791,5	43,0	13	18 421	10,6	18 108	3 385
0,1	3	766,0	48,9	14	15 653	12,9	15 260	3 489
0,1	1	652,8	49,3	14	13 233	15,1	12 776	3 449
0,1	0,3	535,6	50,2	15	10 663	18,2	10 129	3 331
0,1	0,1	433,5	51,1	14	8 481	21,6	7 883	3 127
10,0	10	446,6	43,2	6	10 331	20,7	9 666	3 646
10,0	3	383,4	50,4	7	7 600	25,3	6 871	3 250
10,0	1	275,3	49,8	7	5 529	29,4	4 818	2 712
10,0	0,3	190,0	51,7	7	3 677	34,1	3 044	2 063
10,0	0,1	123,9	51,5	7	2 405	38,5	1 881	1 498
19,9	10	277,9	69,6	7	3 992	36,8	3 195	2 393
19,9	3	159,1	66,6	6	2 390	42,3	1 768	1 608
19,9	1	104,2	73,3	5	1 422	46,5	979	1 032
19,9	0,3	56,0	72,2	3	776	49,6	503	591
19,9	0,1	31,6	71,4	1	443	51,7	274	348
30,0	10	84,0	72,1	4	1 165	51,5	726	912
30,0	3	42,0	72,3	1	581	54,8	335	475
30,0	1	21,9	72,6	2	302	57,0	164	253
30,0	0,3	10,6	71,7	5	148	58,2	78	126
29,9	0,1	5,7	71,3	9	79	57,0	43	67
39,9	10	29,5	95,6	0	309	58,7	160	264
39,9	3	14,7	102,4	2	144	59,5	73	124
39,9	1	8,0	105,7	4	75	56,7	41	63
39,9	0,3	4,1	101,9	6	40	52,9	24	32
39,9	0,1	2,6	101,6	9	25	52,5	16	20

Échantillon : EB-054-07 Densité brute : 2,533
Teneur vides : 3,4% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	878,1	27,7	10	31 710	2,5	31 679	1 406
-20,0	3	860,0	28,6	10	30 106	3,4	30 053	1 782
-19,9	1	793,7	27,4	11	28 942	3,4	28 891	1 716
-19,9	0,3	774,2	28,2	11	27 411	4,3	27 335	2 031
-19,8	0,1	766,5	29,5	9	25 988	3,8	25 930	1 741
-10,0	10	1006,5	38,7	8	26 017	5,6	25 894	2 532
-10,0	3	916,0	38,5	9	23 816	6,3	23 672	2 619
-10,0	1	821,4	37,5	9	21 877	7,5	21 691	2 844
-10,0	0,3	763,9	38,9	8	19 663	8,7	19 438	2 968
-10,0	0,1	702,6	40,1	9	17 525	10,8	17 212	3 299
0,1	10	783,8	42,9	4	18 258	10,5	17 955	3 316
0,1	3	757,4	48,8	5	15 518	13,2	15 110	3 536
0,2	1	648,3	49,2	5	13 180	15,0	12 730	3 414
0,1	0,3	533,3	50,2	6	10 616	17,9	10 104	3 257
0,1	0,1	431,0	51,1	6	8 430	21,0	7 871	3 019
10,0	10	435,7	42,3	9	10 290	20,0	9 668	3 524
10,1	3	376,5	49,3	10	7 631	25,5	6 886	3 290
10,1	1	276,0	49,5	10	5 571	28,6	4 890	2 670
10,0	0,3	192,2	51,6	10	3 725	33,6	3 103	2 061
10,0	0,1	126,3	51,6	10	2 449	38,2	1 924	1 516
19,9	10	290,0	70,9	6	4 091	36,4	3 291	2 430
19,9	3	175,4	71,7	6	2 446	41,9	1 821	1 633
19,9	1	107,9	73,3	5	1 473	45,7	1 028	1 054
19,9	0,3	58,3	72,2	4	808	49,2	528	611
19,9	0,1	33,0	71,5	3	462	50,6	294	357
29,9	10	89,6	68,7	5	1 305	49,1	854	987
29,9	3	46,5	69,9	3	666	52,6	404	529
29,9	1	26,0	72,1	3	360	52,8	218	287
29,9	0,3	13,7	71,6	3	191	50,8	121	148
29,9	0,1	8,1	71,4	3	113	48,7	75	85
39,9	10	32,8	102,2	5	321	58,6	167	274
39,9	3	15,7	103,7	3	151	58,7	79	129
39,9	1	8,5	106,3	3	80	54,5	46	65
39,9	0,3	4,4	102,1	2	43	55,7	24	35
39,9	0,1	2,7	101,8	2	26	45,1	19	19

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 24 janvier 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 24 janvier 2008

Annexe 1

Module complexe des enrobés conditionnés une heure

Ministère
des Transports

Québec



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

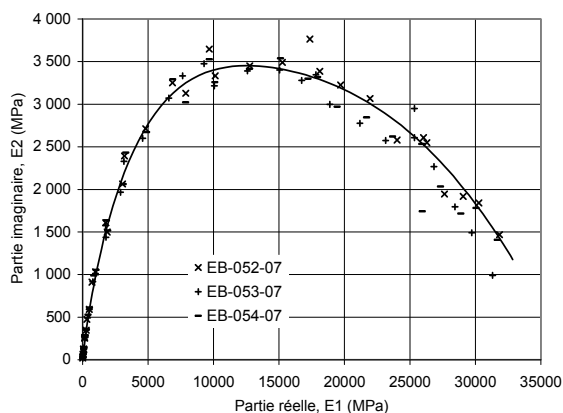
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-28

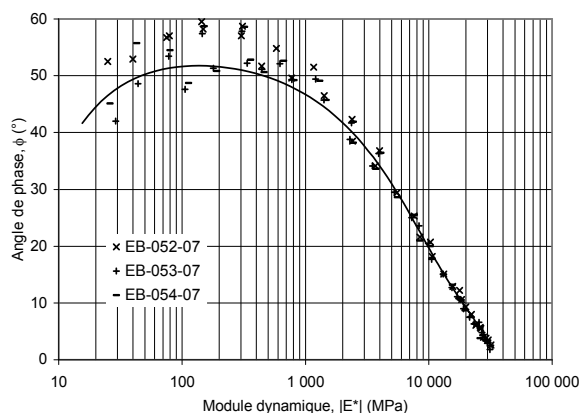
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,3%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

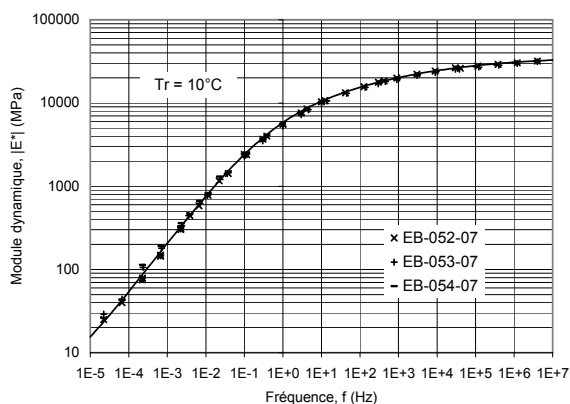
Module complexe dans le plan Cole et Cole



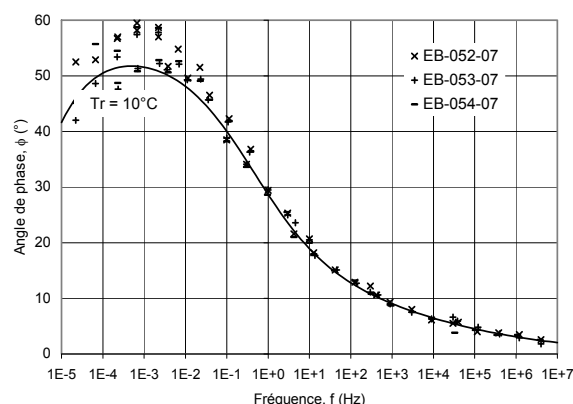
Module complexe dans l'espace de Black



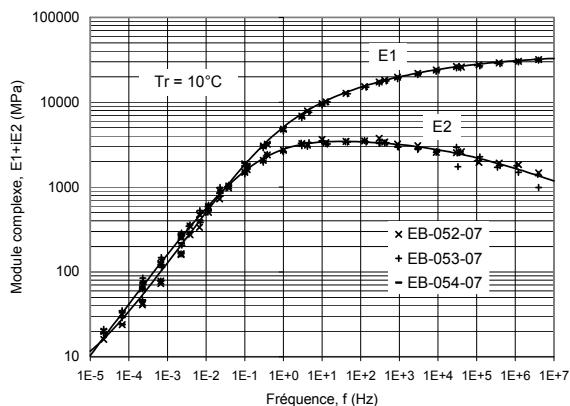
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



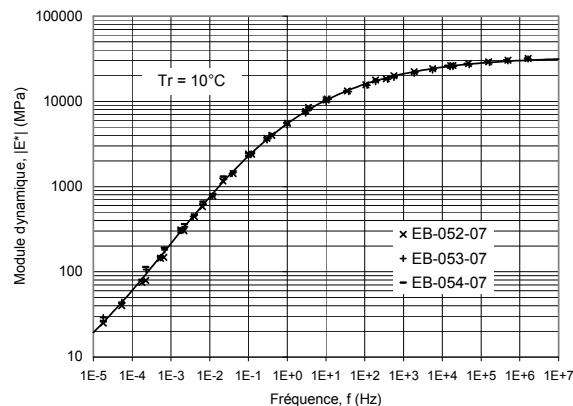
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 24 janvier 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 24 janvier 2008

Annexe 1

Module complexe des enrobés conditionnés une heure



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07 Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14 Source granulats :
Type bitume : PG 58-34 Source bitume :
Teneur bitume : 4,8% Source enrobé : Laboratoire
Teneur vides : 3,0% Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
3,4	37 700	2,474	0,191	0,548	0,004	-0,133	6,49E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
-0,279	4,852	-1,205	-0,409	-0,140	6,27E-04

Note : Cure = 1 heure

Échantillon : EB-016-07 Densité brute : 2,543
Teneur vides : 3,0% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,3	10	805,8	29,6	16	27 181	5,4	27 062	2 546
-20,2	3	735,7	29,3	16	25 070	6,6	24 905	2 874
-20,2	1	657,0	28,5	15	23 065	6,9	22 899	2 764
-20,1	0,3	607,8	29,0	15	20 964	8,0	20 759	2 926
-20,2	0,1	574,1	30,1	14	19 090	9,1	18 848	3 029
-10,2	10	667,9	33,1	9	20 187	7,7	20 003	2 720
-10,2	3	540,9	30,2	10	17 920	12,0	17 530	3 719
-10,2	1	462,9	29,8	11	15 547	11,7	15 222	3 160
-10,2	0,3	397,1	30,2	13	13 168	16,7	12 615	3 779
-10,3	0,1	336,2	30,4	14	11 052	17,9	10 516	3 401
0,0	10	680,3	56,6	4	12 012	16,9	11 491	3 502
0,0	3	489,1	51,6	4	9 471	19,7	8 915	3 197
0,0	1	373,3	50,2	4	7 433	22,2	6 880	2 814
-0,1	0,3	279,4	50,6	4	5 522	25,5	4 986	2 374
0,0	0,1	209,6	51,7	2	4 054	27,9	3 582	1 899
9,9	10	265,4	44,3	4	5 991	26,9	5 341	2 714
9,8	3	233,1	58,3	5	3 998	31,3	3 417	2 077
9,8	1	143,7	52,1	5	2 758	33,7	2 294	1 532
9,8	0,3	91,6	51,7	4	1 772	36,5	1 423	1 055
9,9	0,1	60,3	51,4	4	1 173	37,5	930	714
20,0	10	136,9	59,9	7	2 286	38,3	1 794	1 416
20,0	3	96,4	72,9	5	1 323	42,1	982	887
20,0	1	58,9	72,5	3	812	43,4	590	558
20,0	0,3	34,2	71,8	2	476	43,8	344	330
20,0	0,1	21,2	71,3	1	298	43,6	215	205
30,3	10	56,5	78,7	1	718	47,8	482	532
30,3	3	31,2	81,1	1	384	48,8	253	289
30,3	1	17,1	75,8	2	225	47,5	152	166
30,2	0,3	9,3	71,4	3	130	47,9	87	96
30,2	0,1	5,9	71,3	3	82	45,3	58	59
40,0	10	22,5	105,0	2	214	53,9	126	173
40,0	3	12,3	113,0	1	109	52,5	66	86
40,0	1	6,5	104,1	3	62	50,5	40	48
40,0	0,3	3,7	101,8	4	36	47,2	25	27
40,0	0,1	2,4	101,5	5	23	46,0	16	17

Échantillon : EB-017-07 Densité brute : 2,544
Teneur vides : 2,9% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,3	10	809,3	29,5	33	27 413	6,0	27 261	2 888
-20,3	3	737,8	29,2	32	25 245	5,4	25 133	2 381
-20,4	1	659,1	28,1	31	23 434	6,6	23 277	2 712
-20,5	0,3	616,8	28,8	31	21 409	7,8	21 211	2 908
-20,3	0,1	578,8	30,0	32	19 294	8,5	19 080	2 862
-10,2	10	657,7	32,6	16	20 187	8,6	19 959	3 030
-10,3	3	525,5	29,8	15	17 610	9,8	17 354	2 992
-10,3	1	460,0	29,7	13	15 495	11,9	15 163	3 189
-10,2	0,3	393,1	30,1	12	13 076	13,5	12 715	3 051
-10,2	0,1	334,8	30,2	10	11 070	16,6	10 610	3 157
-0,2	10	679,1	57,0	13	11 912	17,1	11 386	3 499
-0,1	3	484,6	51,6	10	9 397	20,2	8 821	3 240
-0,1	1	369,8	50,3	9	7 355	22,6	6 788	2 832
-0,1	0,3	275,5	50,6	8	5 447	25,5	4 917	2 343
-0,1	0,1	206,7	51,5	7	4 016	28,4	3 533	1 910
9,8	10	280,7	47,0	5	5 966	27,2	5 305	2 728
9,8	3	231,6	57,9	4	4 002	31,5	3 413	2 089
9,8	1	143,0	51,8	3	2 761	34,1	2 286	1 548
9,8	0,3	91,4	51,6	2	1 771	37,0	1 415	1 065
9,8	0,1	59,9	51,4	3	1 165	37,5	924	710
20,1	10	143,7	65,8	5	2 185	40,2	1 668	1 411
20,1	3	95,6	76,2	7	1 254	43,2	914	859
20,1	1	55,1	72,5	8	760	44,9	538	537
20,1	0,3	31,3	71,7	9	437	45,7	305	313
20,1	0,1	19,2	71,3	9	270	45,7	188	193
30,2	10	58,0	87,8	11	660	49,2	431	500
30,2	3	28,9	82,2	10	352	50,2	225	270
30,2	1	15,2	75,2	8	203	49,1	133	153
30,2	0,3	8,1	71,4	5	114	48,6	75	85
30,1	0,1	5,1	71,3	0	72	47,1	49	53
40,0	10	22,6	110,3	11	204	54,3	119	166
40,0	3	11,7	112,7	12	104	52,4	63	82
40,0	1	6,2	103,8	12	60	51,2	37	47
40,0	0,3	3,5	101,7	13	35	49,6	23	27
40,0	0,1	2,4	101,4	14	23	49,8	15	18

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 19 octobre 2007

Échantillon : EB-018-07 Densité brute : 2,539
Teneur vides : 3,1% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,4	10	804,0	28,6	16	28 097	4,6	28 007	2 246
-20,4	3	748,7	28,8	16	25 964	5,8	25 831	2 621
-20,4	1	674,5	28,0	16	24 071	6,5	23 917	2 718
-20,3	0,3	633,0	28,9	16	21 880	7,8	21 679	2 964
-20,2	0,1	599,6	30,1	16	19 947	8,3	19 738	2 878
-10,2	10	685,5	32,3	8	21 249	8,7	21 004	3 218
-10,2	3	554,0	29,8	8	18 570	10,5	18 259	3 382
-10,2	1	487,3	29,7	9	16 420	11,5	16 087	3 286
-10,3	0,3	421,5	30,1	9	14 018	14,0	13 603	3 386
-10,2	0,1	357,0	30,3	9	11 768	15,4	11 348	3 117
-0,1	10	704,9	55,9	13	12 608	16,3	12 103	3 534
-0,1	3	512,3	51,5	14	9 942	19,5	9 373	3 314
-0,1	1	392,2	50,2	15	7 808	22,2	7 230	2 949
0,0	0,3	291,3	50,5	14	5 765	25,8	5 190	2 510
-0,1	0,1	218,5	51,5	14	4 245	28,9	3 717	2 049
9,7	10	284,0	44,6	5	6 361	27,0	5 667	2 890
9,7	3	244,6	57,6	6	4 245	31,5	3 620	2 217
9,7	1	150,9	51,7	7	2 920	34,2	2 415	1 641
9,7	0,3	96,7	51,6	8	1 873	37,4	1 488	1 138
9,7	0,1	63,1	51,4	8	1 229	38,7	959	768
20,2	10	141,2	61,2	14	2 307	39,6	1 777	1 472
20,2	3	98,0	74,2	11	1 321	43,4	959	908
20,2	1	58,0	72,6	9	800	44,9	567	564
20,2	0,3	33,1	71,8	7	460	45,8	321	330
20,2	0,1	20,1	71,2	6	282	45,8	197	202
30,2	10	59,8	84,9	5	705	49,5	457	536
30,2	3	30,6	82,3	4	372	50,0	239	285
30,3	1	16,1	75,4	5	213	49,6	138	162
30,3	0,3	8,5	71,4	8	119	48,1	79	88
30,2	0,1	5,3	71,1	11	75	48,5	50	56
40,1	10	23,7	109,0	4	217	54,6	126	177
40,0	3	12,3	112,9	4	109	53,0	65	87
40,0	1	6,5	104,1	6	62	50,8	39	48
40,1	0,3	3,5	101,7	9	34	47,1	23	25
40,0	0,1	2,2	101,5	12	22	43,6	16	15

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 19 octobre 2007

Annexe 1

Module complexe des enrobés conditionnés une heure

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

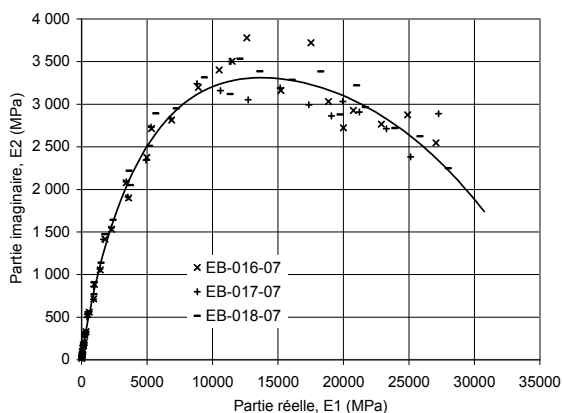
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-34

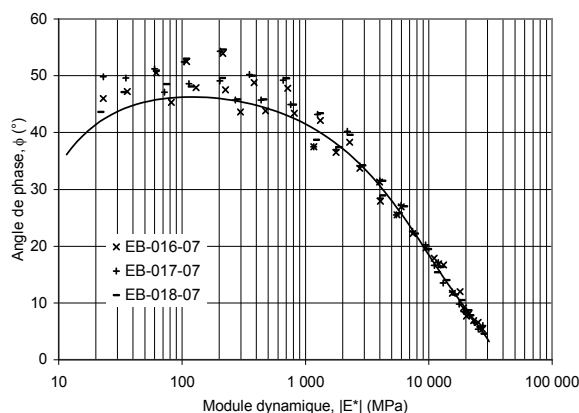
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,0%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

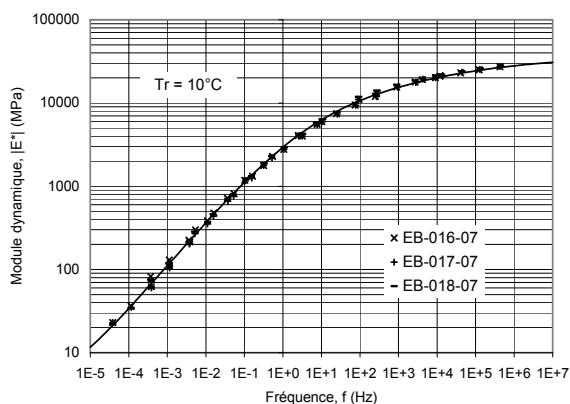
Module complexe dans le plan Cole et Cole



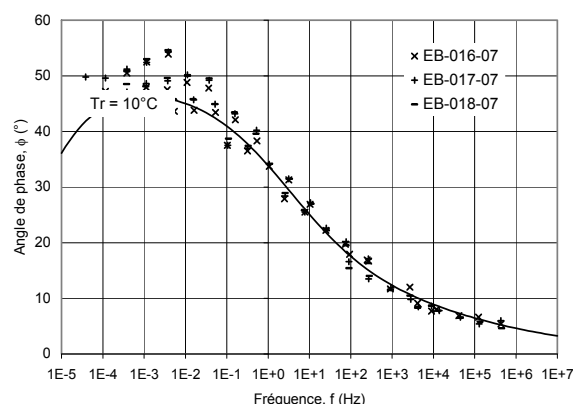
Module complexe dans l'espace de Black



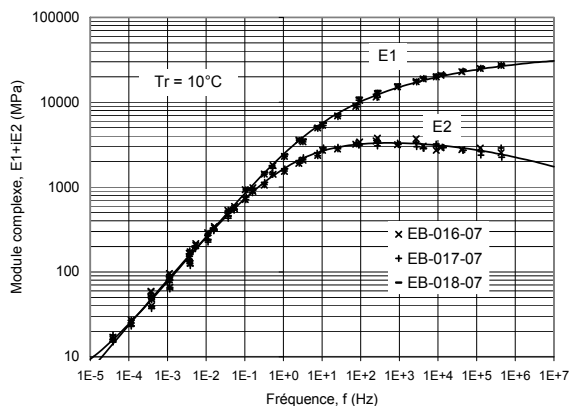
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



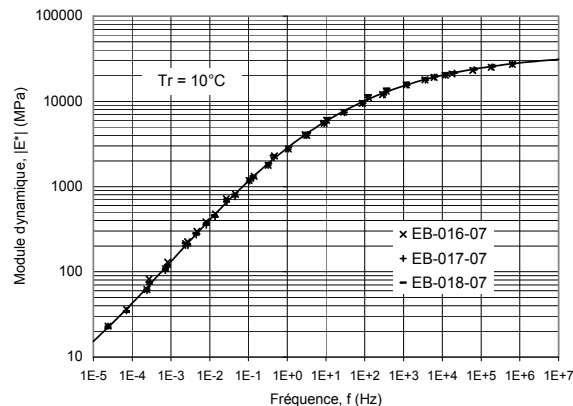
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 19 octobre 2007

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 19 octobre 2007

Annexe 1

Module complexe des enrobés conditionnés une heure



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14

Source granulats :

Type bitume : PG 64-28

Source bitume :

Teneur bitume : 4,8%

Source enrobé :

Teneur vides : 3,5%

Ajout :

Laboratoire

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E1 =	0,031
RMSE log E2 =	0,029
R ² log E1 =	1,00
R ² log E2 =	1,00
n =	100

E _o	E _∞	δ	k	h	τ _o	a ₁	a ₂
6,5	39 200	2,456	0,166	0,490	0,017	-0,142	7,83E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E* =	0,017
R ² log E* =	1,00
n =	100
E _{min} =	1,5
E _{max} =	35 700

δ	α	β	γ	a ₁	a ₂
0,165	4,388	-1,449	-0,390	-0,146	6,38E-04

Note : Cure = 1 heure

Échantillon : EB-034-07 Densité brute : 2,532
Teneur vides : 3,4% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	825,8	28,5	12	28 950	3,9	28 883	1 968
-20,1	3	784,0	28,8	12	27 181	4,8	27 085	2 277
-20,2	1	711,7	27,8	12	25 644	5,7	25 516	2 561
-20,2	0,3	677,9	28,4	12	23 843	5,9	23 715	2 463
-20,2	0,1	652,2	29,7	14	21 942	6,1	21 818	2 329
-10,0	10	902,7	41,2	21	21 936	6,8	21 784	2 579
-10,0	3	768,8	39,1	22	19 676	7,7	19 499	2 638
-10,0	1	672,4	37,9	23	17 717	9,3	17 486	2 857
-10,0	0,3	609,4	38,9	23	15 660	10,8	15 385	2 922
-10,1	0,1	555,6	40,4	24	13 738	11,7	13 455	2 775
0,1	10	716,9	47,6	17	15 053	12,4	14 701	3 238
0,1	3	625,4	49,6	18	12 603	14,0	12 230	3 045
0,1	1	522,4	49,3	18	10 597	15,3	10 219	2 805
0,1	0,3	427,9	50,0	19	8 555	17,5	8 158	2 574
0,1	0,1	353,4	51,4	19	6 878	20,5	6 443	2 405
9,9	10	401,7	46,3	14	8 685	19,4	8 192	2 885
9,9	3	339,1	51,9	15	6 540	22,5	6 041	2 504
9,9	1	247,7	49,8	15	4 976	24,5	4 528	2 064
9,9	0,3	183,7	51,3	15	3 577	27,2	3 183	1 633
9,9	0,1	133,3	51,6	14	2 585	29,5	2 250	1 271
19,9	10	295,2	73,3	13	4 029	29,6	3 504	1 988
19,9	3	203,5	75,7	13	2 689	32,2	2 276	1 432
19,9	1	133,7	71,9	12	1 859	33,7	1 546	1 032
19,9	0,3	88,2	71,9	10	1 227	35,3	1 002	708
19,9	0,1	60,2	71,6	9	840	36,1	679	495
29,9	10	116,9	74,0	8	1 580	38,6	1 235	986
29,9	3	68,7	72,5	7	949	40,5	722	616
29,9	1	44,4	74,8	6	594	41,4	445	393
29,9	0,3	25,6	71,7	4	357	42,7	262	242
29,9	0,1	16,1	71,5	4	225	43,3	163	154

Échantillon : EB-035-07 Densité brute : 2,529
Teneur vides : 3,5% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,0	10	838,5	28,7	31	29 192	3,6	29 136	1 812
-20,0	3	789,4	28,9	32	27 324	4,8	27 227	2 299
-19,9	1	712,6	27,8	32	25 666	5,5	25 549	2 453
-19,9	0,3	681,0	28,6	32	23 846	5,9	23 718	2 469
-20,0	0,1	659,4	29,7	32	22 207	7,3	22 029	2 806
-10,1	10	953,8	40,6	33	23 489	7,8	23 273	3 180
-10,1	3	819,9	39,0	34	21 025	8,1	20 816	2 958
-10,1	1	724,8	38,1	34	19 037	9,0	18 803	2 977
-10,1	0,3	653,1	38,9	33	16 776	10,3	16 507	2 993
-10,1	0,1	593,8	40,4	34	14 704	12,2	14 374	3 102
-0,2	10	751,4	46,6	14	16 112	12,3	15 741	3 439
-0,2	3	667,3	49,5	14	13 477	13,9	13 084	3 233
-0,2	1	562,7	49,4	15	11 385	15,2	10 985	2 992
-0,2	0,3	461,1	50,0	15	9 215	17,4	8 795	2 751
-0,2	0,1	380,2	51,1	14	7 443	21,3	6 933	2 707
9,9	10	420,8	45,5	6	9 252	18,6	8 768	2 953
9,9	3	352,5	50,2	6	7 019	21,9	6 511	2 623
9,9	1	259,6	48,5	5	5 348	24,3	4 875	2 199
9,9	0,3	196,8	51,0	5	3 857	26,9	3 441	1 742
9,9	0,1	143,8	51,5	3	2 791	29,3	2 433	1 367
19,9	10	286,9	67,1	6	4 273	29,6	3 717	2 108
19,9	3	211,3	74,9	5	2 821	32,7	2 373	1 525
19,9	1	140,0	72,5	5	1 933	35,0	1 582	1 110
19,9	0,3	90,3	71,9	4	1 256	36,9	1 004	754
19,8	0,1	60,0	71,6	3	838	37,6	663	511
29,9	10	119,3	69,6	4	1 714	38,4	1 343	1 065
29,9	3	70,8	68,4	2	1 035	40,3	789	670
29,9	1	47,6	73,3	2	650	40,4	495	422
29,9	0,3	28,6	71,8	1	399	41,8	297	266
29,9	0,1	18,4	71,4	1	258	41,3	194	170
39,9	10	60,7	107,5	2	564	45,6	395	403
39,9	3	32,0	99,6	2	321	45,8	224	230
39,9	1	21,0	106,9	2	196	44,7	139	138
39,9	0,3	12,2	102,1	2	119	44,5	85	84
39,9	0,1	8,1	101,9	3	79	42,5	58	54

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 21 janvier 2008

Échantillon : EB-036-07 Densité brute : 2,523
Teneur vides : 3,7% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,7	10	827,7	28,6	15	28 928	4,7	28 829	2 386
-19,7	3	781,7	28,8	15	27 175	4,3	27 097	2 057
-19,7	1	710,8	27,7	15	25 693	4,9	25 599	2 204
-19,8	0,3	680,0	28,5	15	23 855	5,9	23 729	2 450
-19,8	0,1	654,8	29,7	15	22 013	6,0	21 892	2 308
-10,1	10	934,2	40,9	21	22 821	7,2	22 642	2 851
-10,1	3	803,2	39,1	22	20 537	8,4	20 317	2 996
-10,1	1	710,1	38,2	22	18 567	8,8	18 346	2 855
-10,1	0,3	641,5	39,1	22	16 425	10,0	16 177	2 843
-10,1	0,1	583,7	40,4	22	14 464	11,0	14 198	2 761
0,2	10	746,7	47,2	14	15 831	12,4	15 462	3 396
0,2	3	659,1	49,5	14	13 308	13,7	12 932	3 141
0,2	1	553,9	49,4	14	11 204	15,2	10 815	2 929
0,1	0,3	456,9	50,1	13	9 115	17,5	8 691	2 747
0,1	0,1	375,6	51,2	13	7 335	19,9	6 896	2 501
10,0	10	422,2	45,9	13	9 203	19,6	8 671	3 082
10,0	3	351,7	50,6	13	6 954	21,7	6 463	2 567
10,0	1	260,3	49,0	11	5 307	24,4	4 833	2 194
10,0	0,3	195,9	51,1	10	3 833	26,7	3 424	1 723
10,1	0,1	141,9	51,4	9	2 760	29,1	2 411	1 344
20,0	10	301,6	71,7	11	4 208	29,5	3 663	2 070
20,0	3	209,4	74,6	9	2 807	32,8	2 360	1 519
20,0	1	138,9	72,2	7	1 922	34,8	1 579	1 096
20,0	0,3	90,0	71,9	5	1 251	36,6	1 004	747
20,0	0,1	59,4	71,6	3	830	37,6	658	506
29,9	10	119,8	69,7	5	1 718	37,8	1 357	1 054
29,9	3	73,4	70,9	4	1 036	39,9	795	664
29,9	1	47,2	72,0	5	656	40,6	498	426
29,9	0,3	28,9	71,9	6	403	40,9	304	264
29,9	0,1	18,3	71,6	7	255	40,5	194	166
39,9	10	62,2	103,9	4	598	44,4	428	418
39,9	3	32,5	93,9	5	346	44,5	246	242
39,9	1	22,6	106,3	6	213	43,1	155	145
39,9	0,3	13,5	102,3	7	132	41,9	98	88
39,9	0,1	9,1	101,8	7	89	39,3	69	57

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 21 janvier 2008

Annexe 1

Module complexe des enrobés conditionnés une heure

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

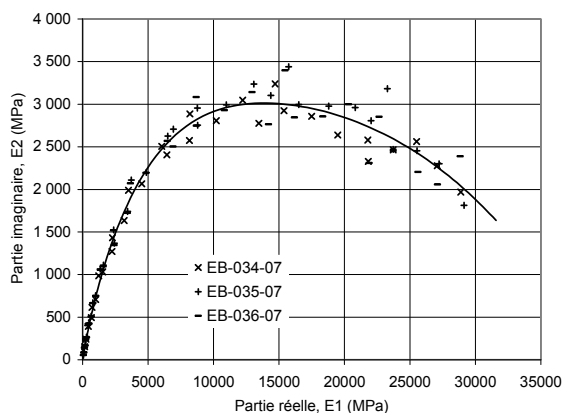
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 64-28

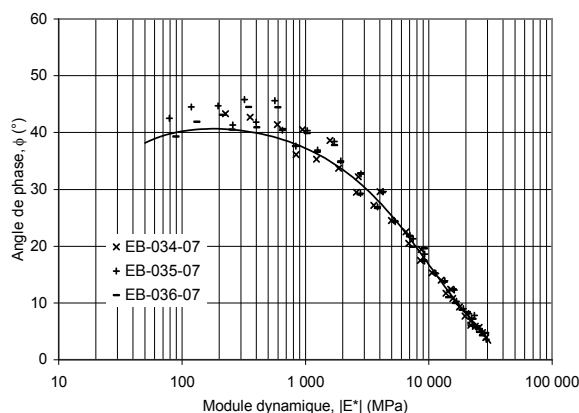
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,5%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

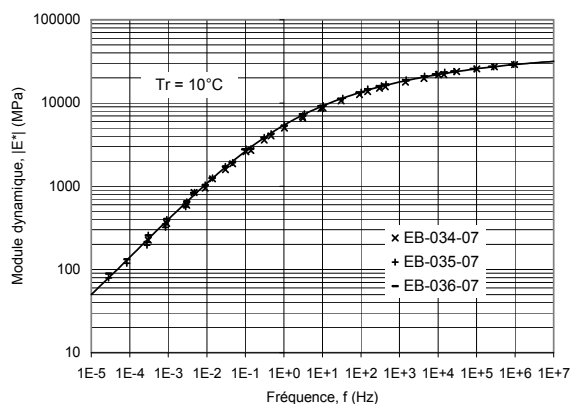
Module complexe dans le plan Cole et Cole



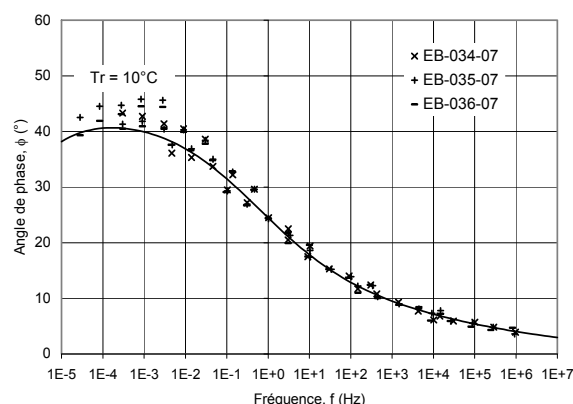
Module complexe dans l'espace de Black



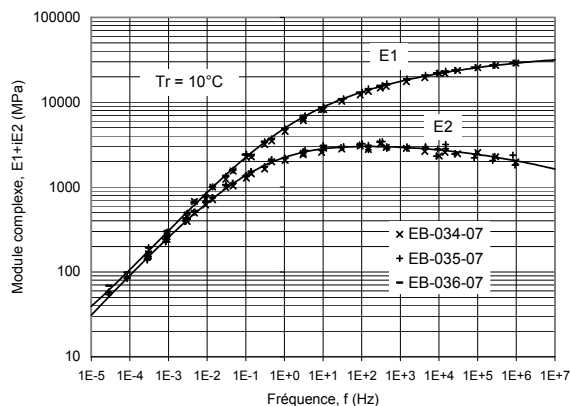
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



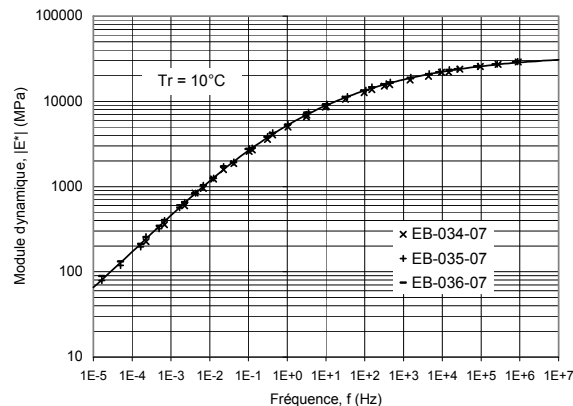
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 21 janvier 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 21 janvier 2008

Annexe 1

Module complexe des enrobés conditionnés une heure



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14

Source granulats :

Type bitume : PG 64-34

Source bitume :

Teneur bitume : 4,8%

Source enrobé :

Laboratoire

Teneur vides : 3,2%

Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

E _o	E _∞	δ	k	h	τ _o	a ₁	a ₂
6,6	39 200	2,190	0,174	0,503	0,003	-0,138	7,85E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

δ	α	β	γ	a ₁	a ₂
0,593	3,924	-1,023	-0,449	-0,145	7,33E-04

Note : Cure = 1 heure

Échantillon : EB-025-07 Densité brute : 2,528
Teneur vides : 3,5% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,4	10	792,8	28,9	41	27 468	5,0	27 364	2 391
-20,3	3	735,7	29,0	42	25 333	6,1	25 188	2 704
-20,3	1	662,3	28,0	42	23 636	7,2	23 450	2 965
-20,3	0,3	620,4	28,8	41	21 534	7,9	21 331	2 947
-20,5	0,1	589,1	30,1	40	19 603	9,3	19 343	3 184
-10,4	10	650,7	32,1	43	20 286	8,6	20 055	3 048
-10,4	3	533,3	30,0	44	17 759	10,0	17 492	3 069
-10,4	1	464,3	29,9	45	15 544	12,4	15 182	3 338
-10,3	0,3	397,1	30,1	46	13 173	14,4	12 758	3 281
-10,3	0,1	338,0	30,4	41	11 120	15,8	10 701	3 023
-0,3	10	674,1	52,2	42	12 905	15,7	12 427	3 482
-0,2	3	526,2	51,3	44	10 266	18,1	9 758	3 187
-0,2	1	411,4	50,4	43	8 167	21,3	7 611	2 962
-0,2	0,3	314,4	50,7	38	6 206	24,0	5 670	2 522
-0,2	0,1	241,4	51,8	34	4 663	25,1	4 223	1 977
10,0	10	284,8	46,9	7	6 078	26,9	5 423	2 745
10,0	3	221,9	54,0	5	4 106	31,1	3 518	2 119
10,0	1	147,6	51,8	5	2 849	33,1	2 386	1 557
10,0	0,3	96,7	51,7	6	1 869	35,4	1 523	1 083
10,1	0,1	65,3	51,5	9	1 270	36,6	1 019	758
20,0	10	159,5	72,2	5	2 208	40,1	1 689	1 422
20,0	3	96,1	74,6	6	1 287	42,7	946	873
20,1	1	57,3	72,5	7	791	43,3	576	543
20,1	0,3	33,5	71,8	7	467	43,2	340	320
20,1	0,1	21,5	71,4	7	301	41,8	224	200
29,8	10	64,9	89,2	6	727	47,3	493	535
29,9	3	34,1	84,7	6	403	46,6	276	293
29,9	1	18,5	75,1	5	246	44,6	175	173
29,8	0,3	10,6	71,3	3	149	43,1	109	102
29,8	0,1	7,1	71,3	1	100	41,6	75	66
39,7	10	27,6	116,0	9	238	50,4	151	183
39,7	3	14,6	111,9	8	131	47,2	89	96
39,7	1	8,4	103,5	9	81	45,0	57	57
39,7	0,3	5,2	101,8	11	51	41,6	38	34
39,7	0,1	3,6	101,6	14	36	41,3	27	24

Échantillon : EB-026-07 Densité brute : 2,537
Teneur vides : 3,2% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,3	10	796,2	29,0	17	27 427	5,4	27 307	2 560
-20,2	3	731,6	29,0	18	25 259	6,3	25 108	2 760
-20,2	1	654,2	28,0	17	23 345	6,5	23 196	2 639
-20,2	0,3	616,0	28,8	16	21 391	7,1	21 225	2 662
-10,2	10	658,6	32,0	8	20 599	9,2	20 333	3 297
-10,2	3	536,7	29,8	10	18 015	9,9	17 745	3 108
-10,3	1	472,7	29,7	10	15 906	11,0	15 613	3 042
-10,2	0,3	406,5	30,1	10	13 502	13,7	13 118	3 197
-10,2	0,1	347,1	30,4	8	11 416	14,6	11 047	2 879
-0,3	10	691,8	52,9	5	13 069	15,9	12 567	3 589
-0,3	3	532,5	51,1	3	10 427	18,0	9 914	3 229
-0,3	1	417,0	50,1	1	8 330	20,6	7 800	2 926
-0,4	0,3	319,2	50,5	2	6 321	23,4	5 800	2 512
-0,3	0,1	244,5	51,4	4	4 753	26,2	4 264	2 100
10,1	10	288,8	47,4	7	6 093	26,1	5 471	2 682
10,1	3	225,7	54,7	7	4 122	30,9	3 536	2 120
10,1	1	148,2	51,9	8	2 857	33,6	2 381	1 579
10,1	0,3	96,1	51,6	9	1 862	36,0	1 507	1 095
10,1	0,1	64,4	51,4	10	1 254	36,8	1 004	752
20,0	10	159,9	70,4	6	2 271	39,4	1 755	1 440
20,0	3	97,6	72,9	6	1 338	42,1	993	897
20,1	1	60,0	72,5	6	828	43,0	606	565
20,1	0,3	35,4	71,8	6	494	42,6	363	335
20,0	0,1	22,7	71,5	7	317	41,1	239	209
30,0	10	56,3	73,9	3	761	46,4	525	551
30,1	3	35,1	84,3	4	417	46,1	289	300
30,0	1	19,2	74,3	5	259	43,3	188	177
30,0	0,3	11,4	71,2	7	160	41,2	120	105
29,9	0,1	7,8	71,5	8	109	39,9	84	70
40,3	10	28,8	117,8	5	244	49,6	158	186
40,3	3	15,2	111,4	6	137	44,2	98	95
40,3	1	9,0	103,3	7	87	43,3	63	60
40,3	0,3	5,7	101,8	8	56	41,4	42	37
40,3	0,1	4,0	101,5	11	39	38,0	31	24

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 27 novembre 2007

Échantillon : EB-027-07 Densité brute : 2,546
Teneur vides : 2,9% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,3	10	804,4	28,5	36	28 193	4,9	28 091	2 391
-20,3	3	759,1	29,1	34	26 124	5,3	26 014	2 392
-20,4	1	684,6	28,2	32	24 311	6,4	24 158	2 727
-20,4	0,3	640,2	28,8	31	22 225	7,6	22 028	2 948
-20,3	0,1	604,2	30,1	39	20 104	8,4	19 889	2 926
-10,2	10	673,3	31,5	27	21 392	9,1	21 121	3 398
-10,2	3	562,6	29,8	26	18 904	10,1	18 609	3 323
-10,2	1	493,1	29,7	25	16 576	11,0	16 269	3 176
-10,3	0,3	427,4	30,1	23	14 199	12,6	13 859	3 088
-10,3	0,1	365,2	30,4	24	12 016	14,6	11 629	3 026
-0,3	10	694,8	52,1	21	13 337	15,5	12 854	3 557
-0,3	3	546,0	51,2	22	10 654	17,7	10 150	3 238
-0,3	1	428,6	50,2	22	8 536	20,3	8 006	2 960
-0,2	0,3	327,8	50,5	20	6 486	22,9	5 975	2 524
-0,3	0,1	252,9	51,5	18	4 913	26,0	4 415	2 154
10,1	10	278,2	43,6	11	6 374	25,5	5 751	2 748
10,1	3	228,7	52,6	12	4 346	29,7	3 774	2 155
10,1	1	156,8	51,6	13	3 037	32,9	2 550	1 649
10,1	0,3	103,5	51,6	13	2 006	34,8	1 649	1 144
10,1	0,1	70,2	51,4	12	1 366	35,1	1 118	785
20,0	10	137,6	55,0	10	2 500	37,1	1 994	1 508
20,0	3	98,9	66,8	9	1 479	40,3	1 128	956
20,0	1	66,9	72,5	8	923	41,3	693	610
20,0	0,3	40,1	71,9	6	558	40,9	422	366
20,0	0,1	26,3	71,5	4	367	40,5	279	239
39,7	10	31,1	114,5	2	271	48,9	178	204
39,7	3	17,2	112,2	1	153	45,3	108	109
39,7	1	10,1	103,5	4	98	42,3	72	66
39,8	0,1	4,6	101,6	8	45	38,3	35	28

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 27 novembre 2007

Annexe 1

Module complexe des enrobés conditionnés une heure

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

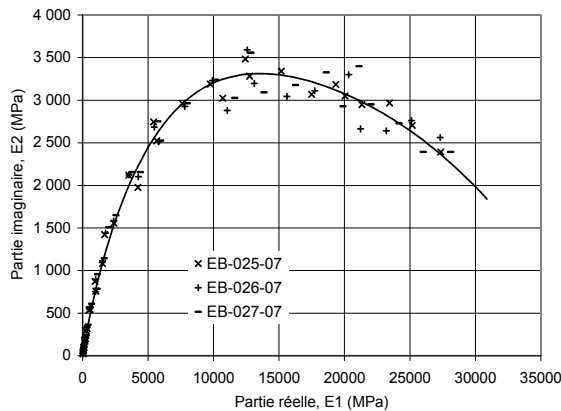
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 64-34

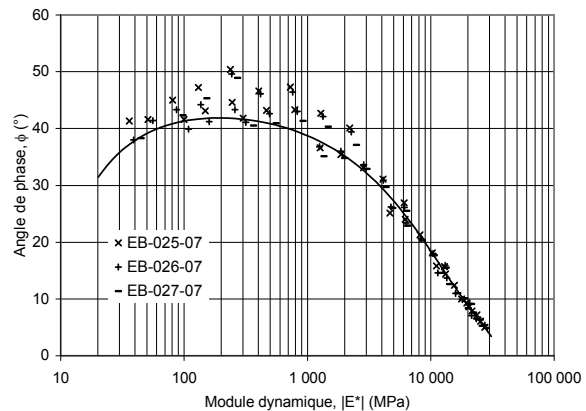
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,2%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

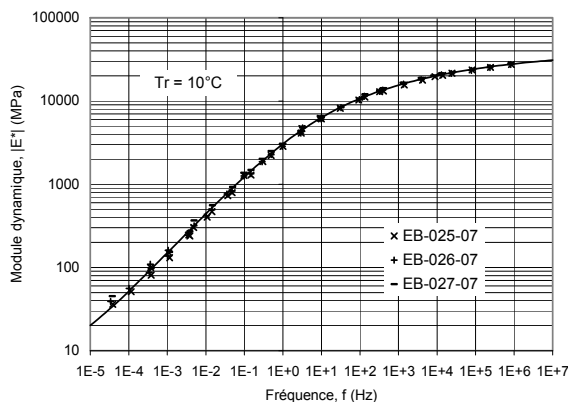
Module complexe dans le plan Cole et Cole



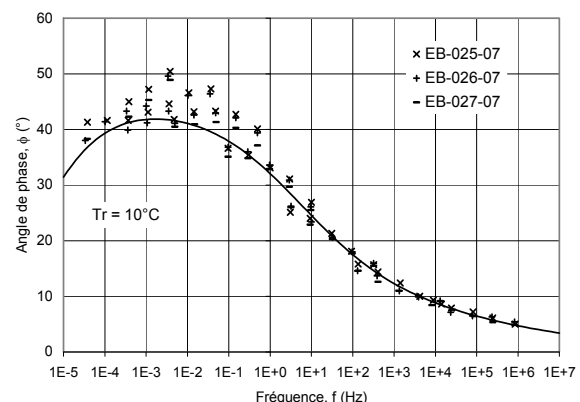
Module complexe dans l'espace de Black



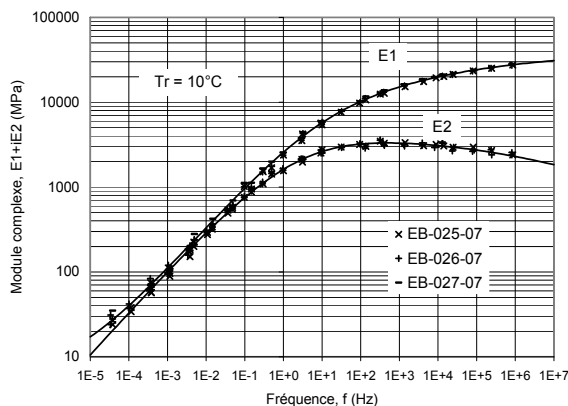
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



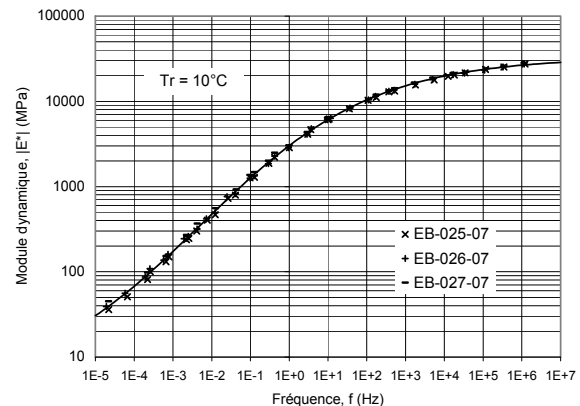
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 27 novembre 2007

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 27 novembre 2007

Annexe 1

Module complexe des enrobés conditionnés une heure



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07 Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14 Source granulats :
Type bitume : PG 70-28 Source bitume :
Teneur bitume : 4,8% Source enrobé : Laboratoire
Teneur vides : 3,2% Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
12,6	40 900	2,468	0,153	0,456	0,007	-0,147	9,71E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
0,883	3,618	-1,188	-0,412	-0,154	8,74E-04

Note : Cure = 1 heure

Échantillon : EB-043-07 Densité brute : 2,535
Teneur vides : 3,3% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,0	10	788,8	28,9	27	27 311	3,8	27 252	1 798
-20,0	3	731,4	28,7	27	25 497	5,3	25 390	2 333
-20,0	1	656,1	27,5	27	23 848	5,8	23 723	2 430
-20,0	0,3	623,1	28,4	24	21 911	6,0	21 792	2 279
-20,1	0,1	602,7	30,0	27	20 117	8,6	19 888	3 022
-9,8	10	877,8	42,0	15	20 924	7,5	20 746	2 728
-9,8	3	732,2	39,4	13	18 575	8,9	18 352	2 873
-9,8	1	642,7	38,5	13	16 683	9,8	16 438	2 848
-9,9	0,3	576,5	39,3	13	14 653	10,5	14 406	2 677
-9,9	0,1	518,0	40,6	13	12 772	11,3	12 522	2 512
0,0	10	706,3	50,5	13	13 976	12,6	13 639	3 051
0,0	3	588,5	50,4	14	11 671	14,7	11 290	2 960
0,0	1	487,1	49,7	13	9 795	15,9	9 422	2 675
-0,1	0,3	397,7	50,2	13	7 925	17,9	7 543	2 431
-0,1	0,1	327,0	51,0	12	6 407	20,7	5 992	2 268
10,0	10	405,9	53,4	10	7 597	20,4	7 121	2 647
10,0	3	302,0	52,8	9	5 716	22,8	5 269	2 215
10,0	1	217,4	49,8	9	4 364	24,7	3 965	1 822
10,1	0,3	161,7	51,2	8	3 159	26,5	2 827	1 411
10,1	0,1	119,1	51,3	8	2 321	28,5	2 041	1 107
19,9	10	230,0	67,3	11	3 416	29,4	2 976	1 677
19,9	3	157,6	68,8	11	2 290	32,2	1 939	1 219
19,9	1	113,9	71,8	11	1 586	33,5	1 323	875
19,9	0,3	75,8	71,7	10	1 057	34,3	873	596
19,9	0,1	52,2	71,4	10	731	34,4	603	413
29,9	10	85,1	70,5	8	1 207	39,7	928	771
29,9	3	52,6	72,5	8	725	40,3	553	470
29,9	1	33,3	72,6	8	458	40,8	347	299
29,9	0,3	20,2	71,9	9	280	41,4	210	185
29,9	0,1	13,1	71,6	10	182	42,3	135	123

Échantillon : EB-044-07 Densité brute : 2,538
Teneur vides : 3,2% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,0	10	825,7	28,8	38	28 648	5,7	28 508	2 833
-20,0	3	760,7	28,5	40	26 691	5,1	26 587	2 359
-20,0	1	690,3	27,6	40	25 006	5,7	24 881	2 493
-20,0	0,3	657,9	28,4	39	23 174	6,3	23 033	2 547
-20,1	0,1	632,5	29,6	38	21 344	7,3	21 169	2 727
-9,9	10	909,0	41,6	36	21 869	7,5	21 684	2 837
-9,9	3	766,6	39,3	38	19 485	8,4	19 278	2 833
-9,9	1	672,8	38,4	39	17 540	9,7	17 288	2 960
-9,9	0,3	603,8	39,2	39	15 395	10,5	15 138	2 805
-9,9	0,1	544,6	40,4	39	13 492	12,0	13 198	2 800
-0,1	10	723,9	49,5	25	14 624	12,0	14 302	3 051
-0,1	3	609,5	50,0	27	12 198	14,2	11 825	2 994
-0,1	1	507,6	49,5	27	10 245	15,2	9 885	2 692
-0,1	0,3	415,8	50,1	27	8 296	17,6	7 905	2 515
-0,1	0,1	341,3	51,6	30	6 608	19,1	6 242	2 166
10,0	10	415,1	52,1	6	7 974	19,7	7 507	2 689
10,0	3	314,1	52,1	7	6 025	22,3	5 575	2 285
10,0	1	227,7	49,3	8	4 622	24,2	4 217	1 892
10,0	0,3	171,8	51,1	7	3 360	26,3	3 013	1 488
10,0	0,1	127,4	51,3	6	2 482	28,7	2 176	1 193
19,9	10	257,3	72,6	4	3 545	30,0	3 072	1 770
19,9	3	178,2	75,2	4	2 369	32,5	1 998	1 272
19,9	1	118,9	72,0	4	1 652	33,6	1 376	914
19,9	0,3	78,9	71,8	3	1 099	34,6	905	624
19,9	0,1	54,4	71,5	3	760	35,2	621	439
30,0	10	95,5	70,7	4	1 351	38,1	1 063	834
30,0	3	57,5	69,6	3	825	39,4	638	523
30,0	1	37,3	70,5	2	529	39,1	411	334
30,0	0,3	24,0	71,8	1	334	39,5	258	213
30,0	0,1	16,2	71,4	2	227	39,0	176	143
39,9	10	55,5	105,8	5	525	41,6	392	348
39,9	3	32,7	102,1	6	320	40,5	244	208
39,9	1	22,6	106,1	6	213	37,9	168	131
39,9	0,3	14,7	102,8	8	143	37,4	114	87
39,9	0,1	10,5	102,1	8	103	34,9	84	59

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 24 janvier 2008

Échantillon : EB-045-07 Densité brute : 2,538
Teneur vides : 3,2% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,0	10	828,3	29,1	12	28 467	4,4	28 382	2 198
-20,0	3	769,5	29,0	13	26 504	5,9	26 365	2 708
-20,0	1	694,8	27,9	13	24 940	4,9	24 847	2 152
-20,0	0,3	654,3	28,6	13	22 907	5,9	22 786	2 347
-20,0	0,1	627,2	29,9	12	20 984	7,3	20 814	2 666
-10,0	10	908,3	41,3	21	22 012	7,7	21 814	2 939
-10,0	3	768,9	39,2	22	19 612	7,6	19 442	2 579
-10,0	1	676,0	38,2	23	17 679	9,2	17 449	2 839
-10,0	0,3	613,1	39,3	22	15 618	10,3	15 365	2 797
-10,0	0,1	553,2	40,3	22	13 716	12,0	13 416	2 851
0,1	10	721,5	50,0	13	14 440	12,3	14 108	3 077
0,1	3	602,8	49,9	13	12 076	13,8	11 729	2 872
0,1	1	503,0	49,6	13	10 147	15,4	9 785	2 686
0,1	0,3	412,8	50,2	12	8 225	17,3	7 853	2 448
0,1	0,1	339,7	51,1	11	6 652	20,1	6 248	2 283
9,9	10	413,9	50,6	5	8 173	19,8	7 689	2 773
9,9	3	318,0	51,3	5	6 194	22,0	5 744	2 317
9,9	1	233,4	49,0	5	4 767	24,1	4 352	1 947
9,9	0,3	178,3	51,2	5	3 484	25,8	3 135	1 518
10,0	0,1	131,5	51,3	4	2 560	27,7	2 266	1 192
20,0	10	253,5	72,6	6	3 491	30,4	3 012	1 765
20,0	3	176,9	76,2	6	2 322	32,5	1 959	1 247
20,0	1	116,7	72,1	5	1 618	34,0	1 341	906
20,0	0,3	77,2	71,9	4	1 073	34,9	880	613
20,0	0,1	52,6	71,5	3	735	35,1	601	423
30,0	10	102,2	71,0	5	1 439	37,0	1 150	865
29,9	3	65,9	73,0	4	904	37,3	719	547
29,9	1	40,9	67,7	3	604	37,2	482	365
29,9	0,3	28,7	71,9	3	400	36,9	320	240
29,8	0,1	19,9	71,5	2	279	36,2	225	165
39,9	10	57,1	102,4	2	557	40,5	424	362
39,9	3	35,7	104,4	2	342	39,2	265	216
39,9	1	24,3	105,6	2	230	37,2	184	139
39,9	0,3	15,9	102,2	4	156	36,2	125	92
39,9	0,1	11,5	102,0	5	113	34,2	94	64

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 24 janvier 2008

Annexe 1

Module complexe des enrobés conditionnés une heure

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

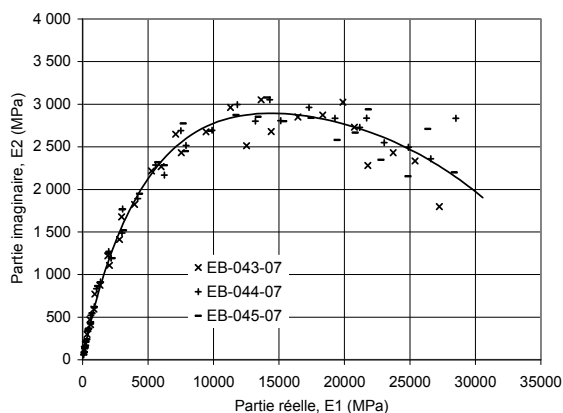
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 70-28

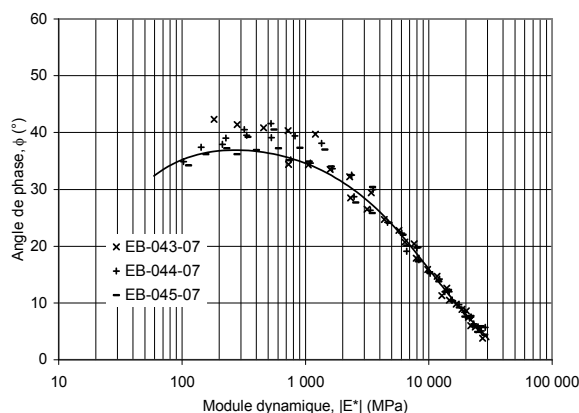
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,2%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

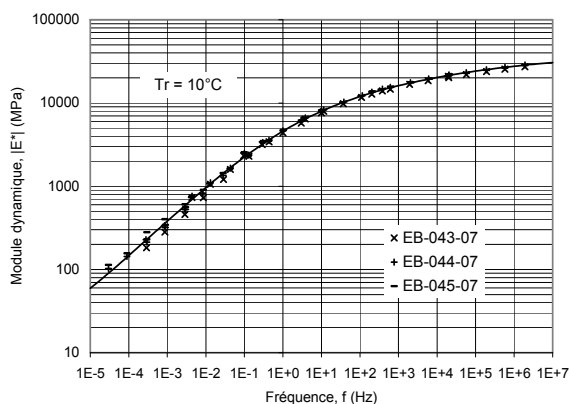
Module complexe dans le plan Cole et Cole



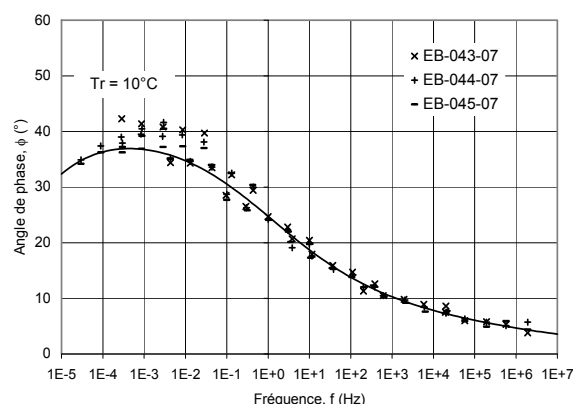
Module complexe dans l'espace de Black



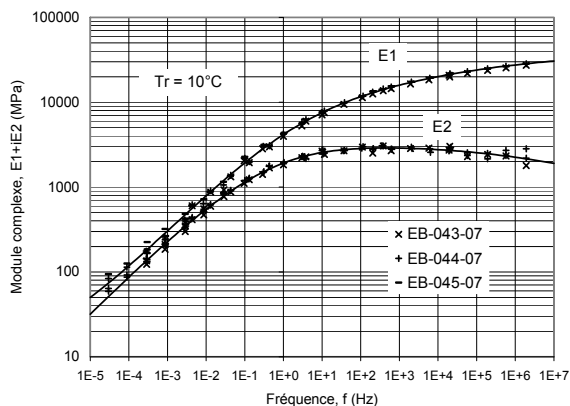
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



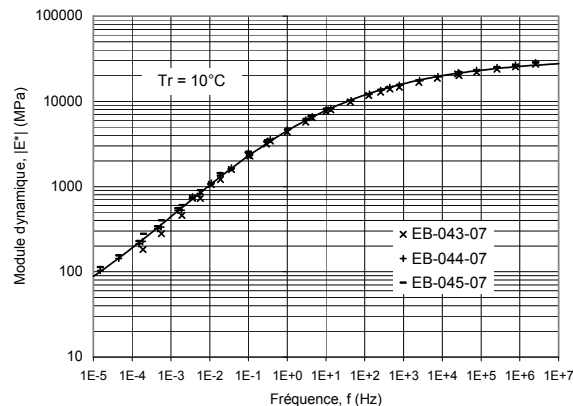
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 24 janvier 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 24 janvier 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Ministère
des Transports

Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-10

Source granulats :

Type bitume : PG 58-28

Source bitume :

Teneur bitume : 5,3%

Source enrobé :

Laboratoire

Teneur vides : 4,6%

Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
0,4	36 100	2,512	0,177	0,545	0,044	-0,149	7,41E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
-0,480	5,011	-1,718	-0,412	-0,150	6,28E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-101-07 Densité brute : 2,490
Teneur vides : 4,9% Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-10,1	10	970,3	40,8	38	23 785	5,7	23 667	2 359
-10,2	3	860,5	39,2	38	21 929	5,8	21 817	2 215
-10,2	1	765,7	37,9	38	20 190	7,1	20 036	2 493
-10,3	0,3	708,6	39,1	40	18 139	8,6	17 937	2 701
-10,1	0,1	654,5	40,1	41	16 324	12,2	15 956	3 449
0,1	10	822,7	50,4	20	16 319	11,4	15 998	3 220
0,1	3	681,1	49,1	21	13 873	12,5	13 542	3 010
0,1	1	584,7	49,3	22	11 854	14,3	11 485	2 935
0,1	0,3	490,1	50,2	22	9 762	16,9	9 341	2 834
0,1	0,1	407,2	51,2	21	7 948	20,5	7 446	2 779
9,8	10	502,2	51,8	16	9 703	18,3	9 210	3 054
9,8	3	379,5	50,9	15	7 455	20,7	6 972	2 641
9,8	1	286,6	50,0	15	5 732	24,1	5 233	2 340
9,8	0,3	211,1	51,2	12	4 127	27,2	3 669	1 888
9,8	0,1	152,3	51,4	10	2 961	30,3	2 557	1 493
19,9	10	232,2	51,4	13	4 520	29,7	3 925	2 240
19,8	3	159,1	53,4	11	2 981	33,4	2 489	1 640
19,8	1	103,7	52,4	9	1 981	36,7	1 588	1 184
19,8	0,3	63,7	52,4	7	1 217	39,9	934	780
19,9	0,1	39,5	51,8	5	763	41,9	568	509
29,9	10	89,9	54,6	8	1 645	41,3	1 235	1 087
29,9	3	49,5	52,5	5	942	43,6	682	650
29,9	1	29,5	52,4	3	563	45,3	396	400
29,8	0,3	16,3	51,2	1	319	45,7	223	229
29,8	0,1	9,9	51,0	2	194	44,8	138	137
39,9	10	22,6	48,8	4	463	51,0	291	360
39,9	3	12,1	51,7	2	235	50,5	149	181
39,9	1	6,8	52,1	2	131	50,7	83	101
39,9	0,3	3,6	50,9	3	71	50,9	45	55
39,9	0,1	2,2	51,0	5	43	47,1	29	31

Échantillon : EB-102-07 Densité brute : 2,502
Teneur vides : 4,4% Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,4	10	845,3	28,6	16	29 605	3,9	29 535	2 030
-20,4	3	792,1	28,3	16	28 031	3,7	27 974	1 786
-20,4	1	726,1	27,3	16	26 553	3,8	26 495	1 741
-20,2	0,3	703,1	28,2	18	24 957	4,9	24 865	2 141
-20,1	0,1	693,7	29,7	18	23 372	5,8	23 254	2 346
-10,1	10	980,2	39,9	19	24 540	5,3	24 437	2 246
-10,1	3	875,8	39,0	19	22 479	6,0	22 356	2 347
-10,1	1	784,9	37,8	18	20 752	7,2	20 586	2 618
-10,2	0,3	727,1	38,9	17	18 713	8,1	18 524	2 651
-10,2	0,1	671,9	40,2	19	16 716	10,0	16 460	2 913
-0,1	10	855,1	49,9	16	17 123	10,4	16 844	3 078
0,0	3	716,6	49,0	16	14 630	12,0	14 311	3 038
0,0	1	617,5	49,2	16	12 540	14,1	12 162	3 055
-0,1	0,3	520,0	50,2	16	10 365	16,3	9 949	2 907
-0,1	0,1	431,6	51,2	15	8 435	18,6	7 994	2 689
9,7	10	526,1	51,8	7	10 149	18,2	9 644	3 163
9,7	3	405,0	51,6	5	7 845	20,8	7 334	2 784
9,7	1	302,4	50,2	4	6 019	24,2	5 490	2 467
9,8	0,3	222,8	51,3	4	4 340	27,1	3 862	1 980
9,8	0,1	158,9	51,6	4	3 079	30,1	2 665	1 543
19,8	10	228,0	49,0	7	4 655	29,1	4 065	2 267
19,8	3	160,9	52,5	6	3 064	33,4	2 559	1 686
19,8	1	106,3	52,5	6	2 024	37,4	1 609	1 228
19,8	0,3	65,0	52,4	5	1 239	40,0	949	797
19,8	0,1	40,3	51,8	4	779	42,3	576	525
29,8	10	92,4	55,3	2	1 672	41,2	1 259	1 101
29,8	3	50,0	52,5	1	952	44,8	676	670
29,8	1	29,5	52,6	1	561	46,5	386	406
29,8	0,3	15,9	51,2	1	310	49,8	200	237
29,7	0,1	9,5	51,0	1	186	48,4	123	139
39,9	10	22,9	46,7	4	489	49,3	319	371
39,9	3	12,9	50,5	5	256	49,3	166	194
39,9	1	7,4	51,5	6	144	45,4	101	102
39,9	0,3	4,1	50,9	7	81	48,2	54	60
39,9	0,1	2,6	50,9	10	51	44,9	36	36

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 8 avril 2008

Échantillon : EB-103-07 Densité brute : 2,496
Teneur vides : 4,6% Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	842,6	29,2	26	28 852	3,2	28 808	1 593
-20,1	3	800,1	29,1	29	27 451	4,1	27 381	1 954
-20,1	1	736,5	28,1	30	26 201	3,8	26 143	1 746
-20,0	0,3	698,3	28,4	30	24 615	4,7	24 531	2 030
-20,1	0,1	690,6	29,6	25	23 297	5,8	23 178	2 358
-10,3	10	986,6	40,7	16	24 242	5,5	24 132	2 314
-10,3	3	868,6	39,1	18	22 236	6,6	22 089	2 556
-10,2	1	778,3	38,0	17	20 472	7,5	20 296	2 680
-10,2	0,3	717,4	38,9	17	18 444	8,1	18 260	2 600
-10,3	0,1	668,7	40,2	14	16 628	10,0	16 376	2 885
-0,1	10	844,0	49,6	13	17 014	10,1	16 750	2 983
-0,1	3	715,4	49,0	13	14 599	12,0	14 282	3 028
-0,1	1	618,6	49,3	14	12 553	13,2	12 223	2 861
-0,1	0,3	523,5	50,2	15	10 436	15,4	10 060	2 778
-0,1	0,1	436,4	51,2	15	8 523	19,2	8 049	2 804
9,8	10	520,4	51,9	7	10 025	17,7	9 549	3 053
9,8	3	393,2	50,6	7	7 770	20,7	7 269	2 746
9,8	1	300,3	50,0	7	5 999	23,8	5 490	2 419
9,9	0,3	221,1	51,3	6	4 312	27,1	3 837	1 967
9,8	0,1	159,6	51,4	5	3 103	30,2	2 682	1 560
19,7	10	231,8	49,8	7	4 651	28,8	4 074	2 244
19,7	3	161,0	52,4	6	3 071	33,6	2 558	1 699
19,7	1	106,8	52,4	4	2 036	36,9	1 629	1 222
19,6	0,3	65,6	52,5	3	1 250	40,2	955	806
19,6	0,1	40,3	52,0	2	776	41,5	581	514
29,8	10	84,6	49,7	4	1 701	41,1	1 281	1 119
29,8	3	53,1	55,1	2	964	44,0	693	670
29,8	1	30,2	52,6	1	574	44,8	407	404
29,8	0,3	16,6	51,2	2	324	46,8	222	236
29,8	0,1	10,3	51,0	2	201	44,7	143	141
39,8	10	24,5	51,2	3	478	50,5	304	369
39,8	3	13,0	53,1	2	245	52,0	150	193
39,8	1	7,1	52,0	2	136	51,3	85	106
39,8	0,3	3,7	50,9	4	74	49,9	47	56
39,8	0,1	2,3	51,0	6	44	49,6	29	34

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 8 avril 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

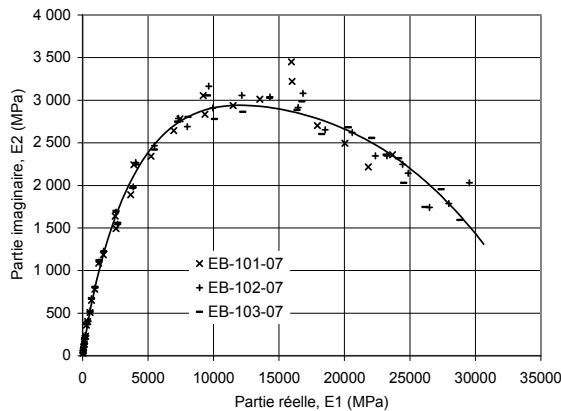
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-10
Type bitume : PG 58-28

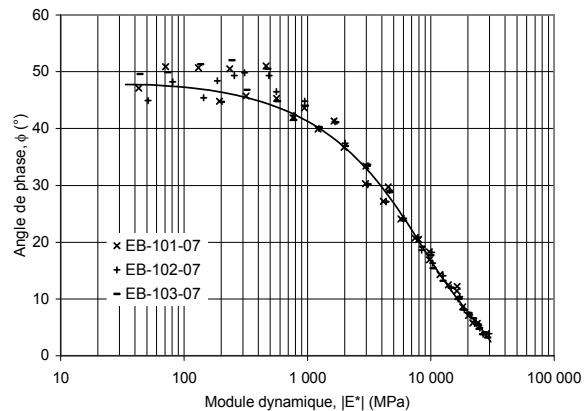
Teneur bitume : 5,3%
Teneur vides : 4,6%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

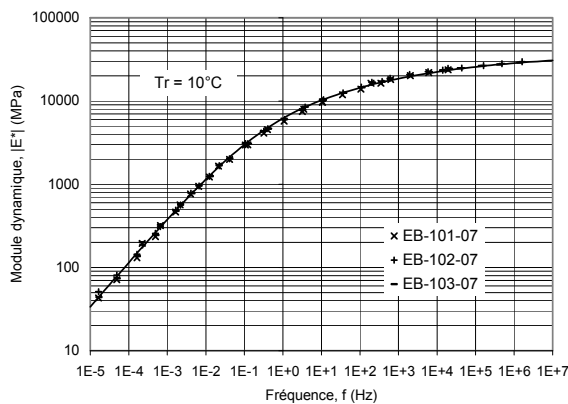
Module complexe dans le plan Cole et Cole



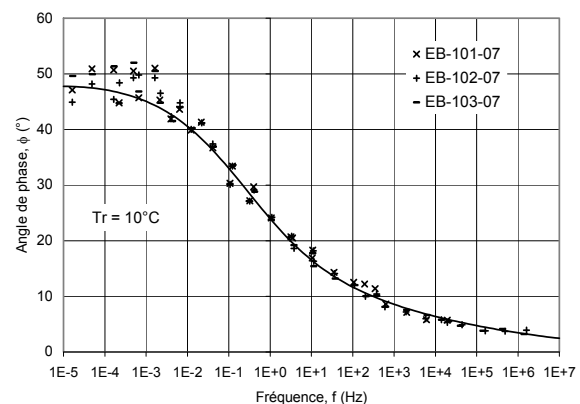
Module complexe dans l'espace de Black



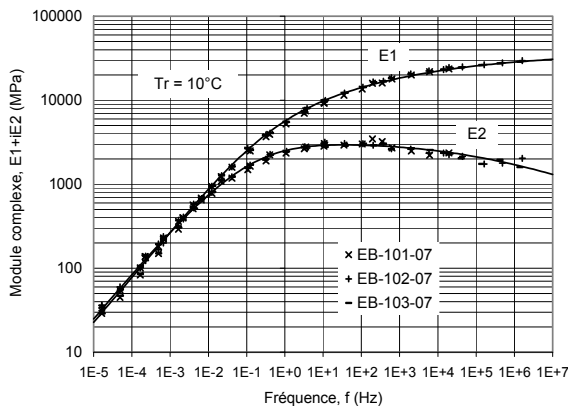
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



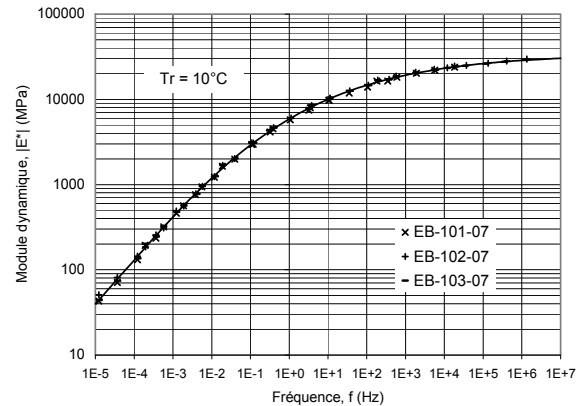
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 8 avril 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 8 avril 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-10

Source granulats :

Type bitume : PG 58-34

Source bitume :

Teneur bitume : 5,3%

Source enrobé :

Laboratoire

Teneur vides : 4,8%

Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C
RMSE log E1 = 0,031
RMSE log E2 = 0,029
R ² log E1 = 1,00
R ² log E2 = 1,00
n = 104

E _o	E _∞	δ	k	h	τ _o	a ₁	a ₂
3,9	36 700	2,740	0,166	0,494	0,006	-0,139	7,75E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C
RMSE log E* = 0,018
R ² log E* = 1,00
n = 104
E _{min} = 0,9
E _{max} = 31 400

δ	α	β	γ	a ₁	a ₂
-0,051	4,548	-1,325	-0,386	-0,144	7,20E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-064-07 Densité brute : 2,490
Teneur vides : 4,9% Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,2	10	750,9	29,8	20	25 167	6,0	25 028	2 647
-20,1	3	675,5	29,1	20	23 224	6,0	23 097	2 430
-20,1	1	607,3	28,1	20	21 595	6,2	21 468	2 336
-20,1	0,3	573,9	29,0	18	19 770	6,7	19 636	2 297
-9,9	10	611,4	32,6	24	18 769	8,9	18 544	2 895
-10,0	3	495,5	30,0	23	16 520	9,3	16 301	2 676
-10,0	1	437,4	29,8	22	14 681	10,7	14 424	2 734
-9,9	0,3	381,5	30,1	21	12 664	11,7	12 400	2 569
-9,9	0,1	333,9	30,3	17	11 033	13,3	10 738	2 533
-0,1	10	652,4	53,8	12	12 132	14,2	11 759	2 983
-0,1	3	505,4	50,7	11	9 965	15,7	9 593	2 698
-0,1	1	410,1	50,0	10	8 202	18,2	7 793	2 557
-0,1	0,3	325,6	50,4	9	6 455	19,8	6 075	2 183
-0,1	0,1	261,6	51,5	7	5 082	22,0	4 711	1 906
10,0	10	268,4	41,0	3	6 546	22,1	6 063	2 468
10,0	3	225,5	47,1	2	4 786	24,8	4 346	2 004
10,0	1	177,1	50,3	2	3 518	27,3	3 126	1 614
10,0	0,3	126,1	51,6	4	2 444	29,8	2 122	1 213
10,0	0,1	88,3	51,1	5	1 726	32,6	1 454	930
20,0	10	180,7	65,5	3	2 760	32,2	2 337	1 469
20,0	3	138,6	78,4	1	1 768	34,9	1 450	1 012
20,0	1	86,4	71,9	1	1 201	35,9	973	705
20,0	0,3	55,5	71,8	3	772	37,0	617	465
20,1	0,1	37,0	71,3	4	518	37,9	409	318
30,1	10	63,3	62,0	1	1 020	40,6	775	664
30,1	3	45,5	78,1	1	583	42,4	431	393
30,2	1	26,8	74,8	1	358	43,1	261	244
30,2	0,3	14,9	71,6	2	208	43,6	151	144
30,1	0,1	9,0	71,3	2	127	44,1	91	88
39,9	10	18,4	47,7	1	386	44,9	274	273
40,0	3	12,2	56,9	2	214	44,7	152	150
40,0	1	6,8	51,5	3	132	44,3	95	92
40,0	0,3	4,1	51,1	3	81	40,8	61	53
39,9	0,1	2,8	51,0	4	55	42,2	40	37

Échantillon : EB-065-07 Densité brute : 2,496
Teneur vides : 4,6% Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	755,6	30,0	25	25 191	5,3	25 083	2 325
-20,1	3	684,5	29,4	24	23 278	5,7	23 163	2 308
-20,1	1	615,2	28,4	24	21 678	6,7	21 530	2 525
-20,0	0,3	578,9	29,1	24	19 890	7,0	19 741	2 430
-20,2	0,1	548,7	30,2	24	18 185	8,7	17 976	2 749
-9,9	10	607,0	32,6	28	18 633	8,5	18 431	2 740
-9,9	3	490,8	29,7	29	16 552	9,9	16 308	2 834
-9,9	1	432,3	29,7	28	14 560	10,8	14 303	2 722
-9,9	0,3	381,0	30,1	28	12 669	11,5	12 412	2 535
-9,9	0,1	331,0	30,3	27	10 930	13,6	10 625	2 564
-0,1	10	652,2	53,5	16	12 197	13,9	11 837	2 938
-0,1	3	506,1	50,5	15	10 023	16,0	9 635	2 761
-0,1	1	412,7	49,9	14	8 271	17,5	7 890	2 481
-0,2	0,3	330,4	50,5	13	6 544	19,8	6 156	2 220
-0,1	0,1	264,3	51,4	12	5 145	22,4	4 758	1 959
9,9	10	267,2	39,8	2	6 707	21,9	6 225	2 497
9,9	3	225,9	46,2	1	4 890	24,4	4 455	2 016
9,9	1	180,9	50,2	0	3 605	27,3	3 203	1 655
9,9	0,3	129,4	51,6	0	2 509	29,2	2 189	1 226
9,9	0,1	90,6	51,4	1	1 762	31,8	1 497	928
20,0	10	179,1	63,1	6	2 840	31,4	2 422	1 482
20,0	3	143,6	79,6	5	1 804	34,7	1 483	1 026
20,0	1	87,8	72,4	5	1 213	36,6	974	723
20,0	0,3	55,0	71,9	5	766	38,0	604	472
20,0	0,1	35,9	71,4	5	502	39,3	388	318
30,1	10	66,7	63,1	4	1 057	39,8	812	676
30,1	3	47,7	78,5	5	608	41,6	455	403
30,1	1	28,4	75,6	6	375	42,6	276	254
30,1	0,3	15,8	71,6	7	221	43,4	161	152
30,1	0,1	9,7	71,3	7	136	43,1	99	93
39,9	10	20,1	53,1	4	379	45,4	266	270
39,9	3	12,2	58,0	2	210	45,4	148	150
39,9	1	6,6	51,7	0	128	43,9	92	89
39,9	0,3	3,9	51,1	3	77	43,6	56	53
39,9	0,1	2,6	51,1	6	50	42,8	37	34

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 11 décembre 2007

Échantillon : EB-066-07 Densité brute : 2,486
Teneur vides : 5,0% Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,0	10	723,5	30,1	64	24 070	4,5	23 995	1 905
-19,9	3	646,0	29,0	65	22 242	5,4	22 144	2 093
-19,9	1	583,9	28,1	64	20 763	6,1	20 647	2 195
-19,9	0,3	550,2	29,0	62	18 963	6,2	18 852	2 047
-20,0	0,1	522,4	30,1	61	17 335	8,8	17 129	2 665
-9,9	10	588,9	32,7	51	18 026	8,8	17 812	2 771
-9,9	3	477,2	30,0	52	15 913	9,9	15 677	2 733
-9,9	1	418,0	29,8	52	14 037	10,7	13 792	2 609
-9,8	0,3	365,0	30,1	52	12 125	12,9	11 818	2 709
-9,8	0,1	316,5	30,3	48	10 447	13,5	10 159	2 437
-0,1	10	625,4	55,0	9	11 363	14,6	10 994	2 871
-0,1	3	470,8	50,8	11	9 274	16,2	8 903	2 594
-0,1	1	380,4	50,0	11	7 602	18,1	7 227	2 356
-0,1	0,3	300,2	50,6	12	5 939	20,6	5 559	2 091
-0,1	0,1	237,9	51,3	11	4 634	23,1	4 263	1 817
9,6	10	267,8	41,4	8	6 464	21,5	6 013	2 372
9,6	3	226,0	47,7	8	4 733	24,8	4 296	1 985
9,6	1	176,8	50,6	8	3 493	27,3	3 105	1 600
9,6	0,3	125,6	51,6	8	2 435	29,5	2 119	1 199
9,7	0,1	87,8	51,4	7	1 708	32,1	1 447	908
20,3	10	186,0	71,8	3	2 590	32,2	2 192	1 379
20,3	3	135,8	82,2	2	1 653	35,2	1 350	954
20,2	1	80,2	72,5	2	1 107	37,0	884	666
20,2	0,3	50,2	71,8	2	699	38,6	546	436
20,2	0,1	32,7	71,4	2	458	39,3	354	290
29,9	10	68,9	68,1	1	1 012	39,9	776	649
29,9	3	46,7	78,5	2	596	41,0	449	391
29,9	1	27,8	73,8	3	377	41,4	283	249
29,9	0,3	16,7	71,6	4	233	41,3	175	154
29,9	0,1	11,3	71,3	5	159	40,8	120	104
40,0	10	24,6	69,9	3	351	46,2	243	253
40,0	3	11,5	58,0	4	198	45,3	139	141
39,9	1	6,2	51,7	6	120	42,7	88	82
39,9	0,3	3,6	51,0	8	71	44,0	51	49
39,9	0,1	2,4	51,0	10	47	45,1	33	33

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 11 décembre 2007

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

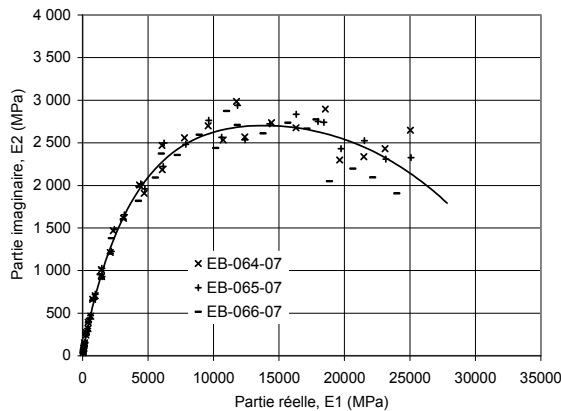
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-10
Type bitume : PG 58-34

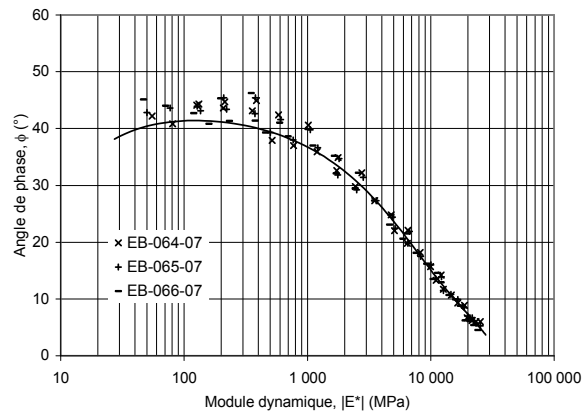
Teneur bitume : 5,3%
Teneur vides : 4,8%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

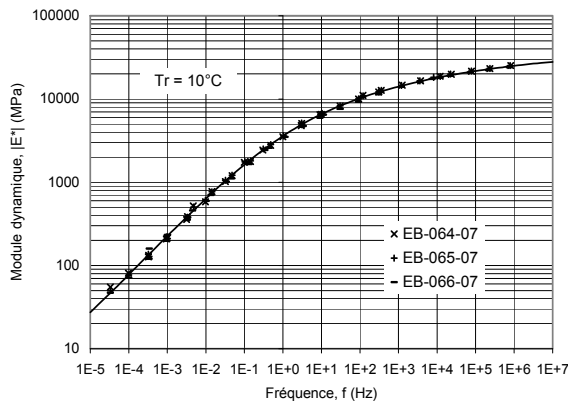
Module complexe dans le plan Cole et Cole



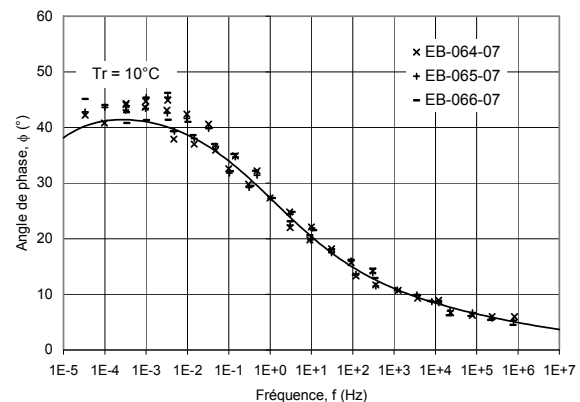
Module complexe dans l'espace de Black



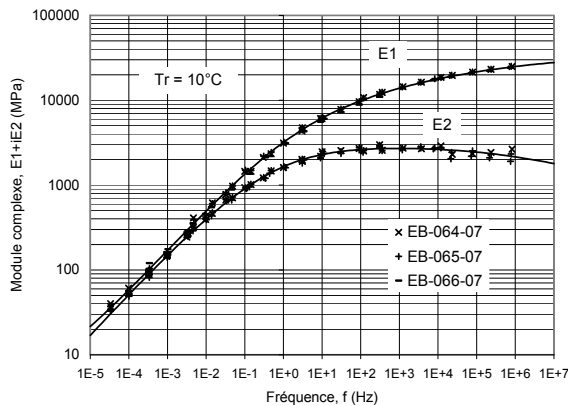
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



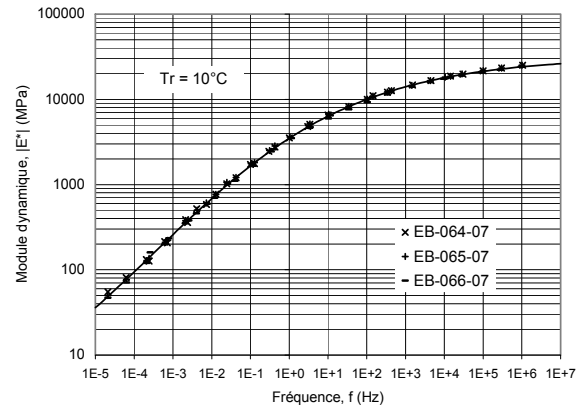
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 11 décembre 2007

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 11 décembre 2007

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-10
Type bitume : PG 64-28
Teneur bitume : 5,3%
Teneur vides : 4,9%

Source granulats :
Source bitume :
Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C
RMSE log E1 = 0,023
RMSE log E2 = 0,028
R ² log E1 = 1,00
R ² log E2 = 1,00
n = 104

E _o	E _∞	δ	k	h	τ _o	a ₁	a ₂
0,1	39 100	2,627	0,143	0,415	0,024	-0,149	8,18E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C
RMSE log E* = 0,015
R ² log E* = 1,00
n = 104
E _{min} = 0,8
E _{max} = 35 000

δ	α	β	γ	a ₁	a ₂
-0,083	4,627	-1,615	-0,321	-0,151	6,74E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-082-07
Teneur vides : 5,0%
Densité brute : 2,486
Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	793,8	29,1	14	27 247	3,3	27 201	1 581
-20,1	3	738,4	29,0	14	25 451	3,5	25 402	1 574
-20,2	1	672,5	27,8	14	24 160	5,0	24 067	2 114
-20,2	0,3	640,8	28,5	13	22 499	5,5	22 395	2 160
-20,2	0,1	618,7	29,8	18	20 757	7,4	20 586	2 656
-9,9	10	888,4	41,9	14	21 190	6,9	21 038	2 530
-9,9	3	757,0	39,4	15	19 191	7,7	19 019	2 561
-9,8	1	669,3	38,3	15	17 465	7,8	17 302	2 378
-9,9	0,3	612,1	39,3	14	15 575	9,0	15 385	2 424
-9,9	0,1	561,9	40,4	16	13 913	10,6	13 676	2 557
-0,1	10	773,5	51,5	15	15 011	10,5	14 759	2 736
-0,2	3	642,2	49,5	16	12 970	11,7	12 701	2 624
-0,1	1	555,9	49,3	17	11 266	12,5	11 000	2 434
-0,1	0,3	476,9	50,0	17	9 542	13,5	9 280	2 223
-0,1	0,1	411,2	51,0	17	8 067	15,1	7 790	2 097
10,0	10	468,2	51,7	3	9 049	16,0	8 700	2 490
10,0	3	361,9	50,0	3	7 235	17,8	6 887	2 217
10,0	1	286,3	49,0	3	5 848	19,2	5 522	1 927
10,0	0,3	229,4	50,4	3	4 548	20,7	4 254	1 608
10,0	0,1	182,8	51,3	4	3 562	22,1	3 300	1 342
19,9	10	238,2	48,7	2	4 890	22,9	4 505	1 903
19,9	3	184,0	51,5	2	3 573	24,5	3 250	1 484
19,9	1	135,9	50,8	1	2 674	26,3	2 397	1 185
19,9	0,3	97,9	51,4	0	1 904	27,8	1 685	887
19,9	0,1	70,7	51,3	1	1 380	29,9	1 196	688
30,0	10	125,6	55,8	4	2 252	29,6	1 958	1 112
30,0	3	78,5	51,3	4	1 531	30,6	1 318	779
30,0	1	54,6	51,0	4	1 071	31,9	909	565
30,0	0,3	36,9	51,2	4	721	32,9	606	391
30,0	0,1	26,1	51,1	4	510	33,6	425	282
40,0	10	51,8	54,4	5	953	35,3	777	551
40,0	3	33,2	54,9	5	605	35,7	491	353
40,0	1	21,3	52,2	5	408	36,0	330	240
39,9	0,3	13,6	51,1	4	266	36,2	214	157
39,9	0,1	9,4	51,0	3	184	36,9	147	110

Échantillon : EB-083-07
Teneur vides : 4,8%
Densité brute : 2,492
Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	783,6	29,5	13	26 591	3,8	26 533	1 751
-20,1	3	720,4	29,0	13	24 871	4,9	24 780	2 133
-20,1	1	651,9	27,8	13	23 452	4,9	23 368	1 987
-20,1	0,3	624,5	28,7	13	21 757	6,4	21 620	2 436
-20,0	0,1	603,4	29,9	13	20 190	6,5	20 060	2 291
-10,0	10	873,9	41,9	15	20 833	6,9	20 684	2 492
-10,0	3	744,7	39,6	15	18 782	7,6	18 619	2 476
-9,9	1	659,2	38,6	14	17 066	8,3	16 889	2 450
-9,9	0,3	598,8	39,3	14	15 232	9,2	15 037	2 432
-9,9	0,1	551,2	40,5	14	13 617	10,4	13 395	2 449
-0,1	10	763,1	51,1	9	14 947	10,1	14 715	2 624
-0,1	3	635,6	49,1	9	12 932	11,1	12 688	2 501
-0,1	1	552,3	49,1	8	11 242	12,0	10 996	2 341
-0,2	0,3	476,5	50,0	7	9 536	13,5	9 272	2 230
-0,1	0,1	411,4	51,0	7	8 074	15,2	7 792	2 114
10,0	10	427,9	47,0	6	9 113	15,9	8 763	2 501
10,0	3	367,3	50,2	6	7 323	16,9	7 007	2 126
10,0	1	291,1	49,1	6	5 933	18,6	5 623	1 894
10,0	0,3	234,5	50,5	6	4 641	20,4	4 350	1 617
9,9	0,1	186,8	51,3	7	3 642	22,3	3 369	1 383
19,9	10	232,9	47,6	4	4 891	22,0	4 536	1 828
19,9	3	182,2	51,0	5	3 572	24,6	3 247	1 488
19,9	1	135,2	50,6	5	2 671	26,0	2 401	1 171
19,9	0,3	98,0	51,4	6	1 905	27,6	1 689	882
19,9	0,1	70,7	51,2	6	1 381	28,9	1 208	668
29,9	10	110,0	46,5	5	2 362	28,8	2 070	1 138
29,9	3	79,1	49,5	5	1 598	30,1	1 382	802
29,9	1	56,4	50,4	5	1 120	31,5	955	584
29,9	0,3	38,8	51,3	4	756	32,0	641	401
29,9	0,1	27,2	51,3	4	529	32,5	447	284
39,9	10	55,4	52,2	5	1 061	33,6	883	587
39,8	3	35,1	51,2	6	685	34,2	566	385
39,8	1	24,1	51,5	7	468	34,1	388	263
39,8	0,3	16,0	51,2	8	312	34,6	257	177
39,8	0,1	11,3	51,0	9	221	36,0	179	130

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 5 février 2008

Échantillon : EB-084-07
Teneur vides : 4,9%
Densité brute : 2,489
Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,2	10	793,5	29,8	19	26 667	4,6	26 581	2 145
-20,1	3	731,4	29,4	20	24 860	5,0	24 764	2 182
-20,1	1	662,8	28,3	20	23 412	5,0	23 322	2 059
-20,0	0,3	626,2	28,7	20	21 807	5,7	21 698	2 181
-10,1	10	887,6	41,6	14	21 347	6,3	21 216	2 360
-10,2	3	764,3	39,5	15	19 364	7,8	19 182	2 644
-10,2	1	673,0	38,2	16	17 619	8,0	17 448	2 447
-10,2	0,3	616,4	39,2	16	15 714	9,1	15 517	2 479
-10,1	0,1	565,0	40,4	17	13 992	9,0	13 821	2 182
-0,1	10	767,4	50,9	19	15 064	10,4	14 817	2 716
-0,1	3	636,0	49,1	20	12 965	11,3	12 712	2 551
-0,1	1	551,6	49,2	20	11 219	12,8	10 941	2 485
-0,1	0,3	474,5	50,0	21	9 493	13,5	9 232	2 212
-0,1	0,1	409,4	50,9	21	8 038	15,6	7 743	2 157
10,0	10	431,9	47,4	12	9 115	15,3	8 794	2 400
10,0	3	367,4	50,3	12	7 306	17,3	6 975	2 175
10,0	1	290,5	48,9	13	5 936	18,9	5 617	1 919
10,0	0,3	233,7	50,5	12	4 626	20,6	4 330	1 629
10,0	0,1	185,5	51,3	12	3 617	22,3	3 346	1 374
19,9	10	234,4	48,6	4	4 826	22,8	4 450	1 867
19,9	3	158,8	44,7	3	3 552	24,5	3 232	1 472
19,9	1	132,8	50,4	3	2 635	26,4	2 360	1 171
19,9	0,3	96,1	51,3	3	1 875	27,8	1 658	875
19,9	0,1	70,0	51,2	3	1 365	29,9	1 184	680
29,8	10	117,1	50,2	5	2 335	29,0	2 042	1 131
29,8	3	79,3	50,1	6	1 580	30,7	1 359	806
29,8	1	55,6	50,5	6	1 101	31,4	940	574
29,8	0,3	38,0	51,3	7	740	32,5	624	398
29,8	0,1	26,2	51,2	7	513	33,6	427	284
40,2	10	45,2	48,3	9	936	35,4	763	542
40,2	3	30,3	51,9	9	584	36,1	472	344
40,2	1	20,1	52,3	10	385	36,8	308	231
40,3	0,3	12,6	51,0	10	247	36,6	198	147
40,2	0,1	8,4	50,9	9	165	35,1	135	95

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 5 février 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

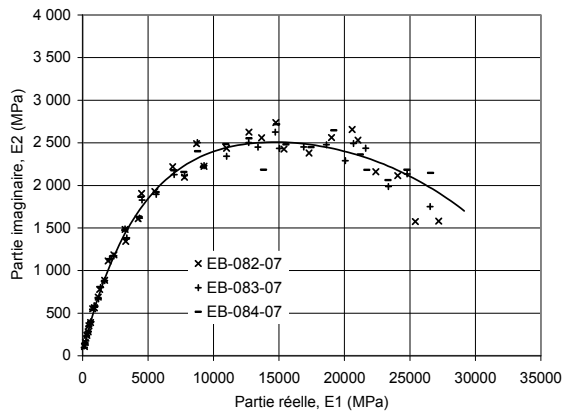
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-10
Type bitume : PG 64-28

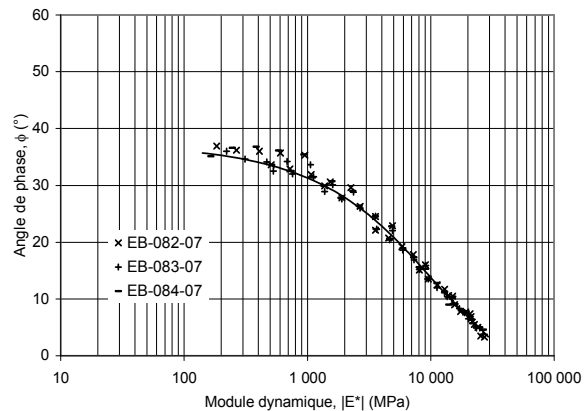
Teneur bitume : 5,3%
Teneur vides : 4,9%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

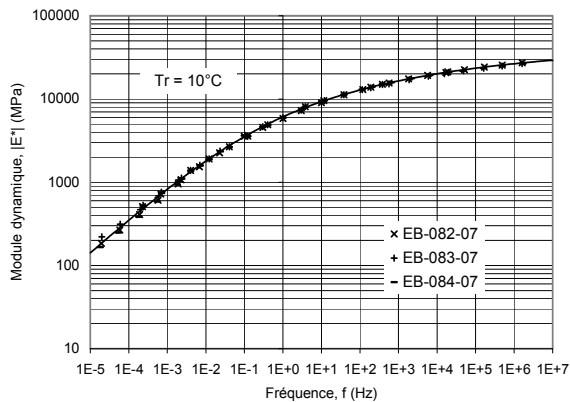
Module complexe dans le plan Cole et Cole



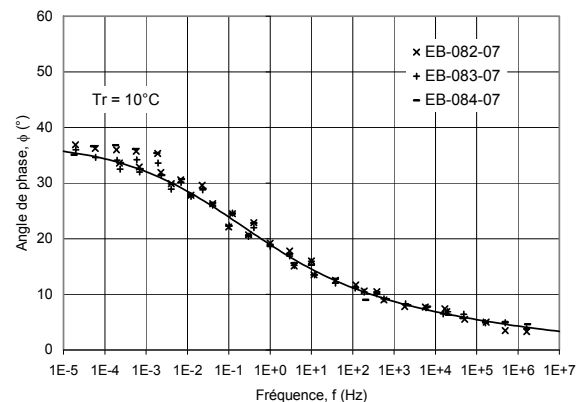
Module complexe dans l'espace de Black



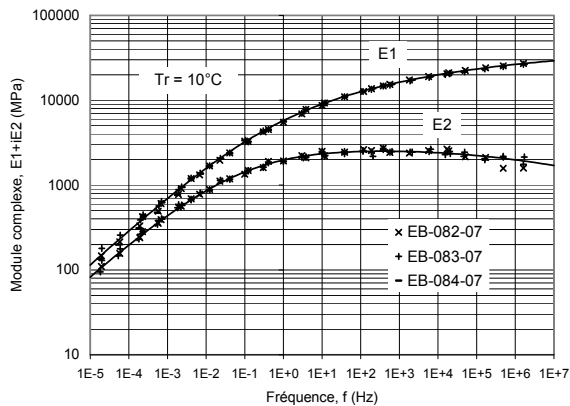
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



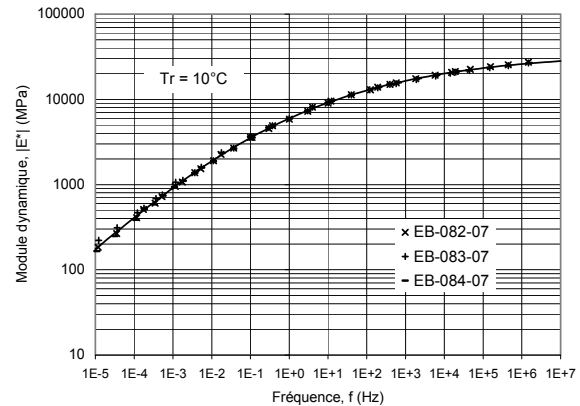
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 5 février 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 5 février 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-10

Source granulats :

Type bitume : PG 64-34

Source bitume :

Teneur bitume : 5,3%

Source enrobé : Laboratoire

Teneur vides : 4,3%

Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E1 =	0,037
RMSE log E2 =	0,027
R ² log E1 =	1,00
R ² log E2 =	1,00
n =	100

E _o	E _∞	δ	k	h	τ _o	a ₁	a ₂
10,1	36 900	2,370	0,149	0,441	0,009	-0,142	8,07E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E* =	0,027
R ² log E* =	1,00
n =	100
E _{min} =	3,5
E _{max} =	31 000

δ	α	β	γ	a ₁	a ₂
0,539	3,953	-1,323	-0,377	-0,148	7,34E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-074-07 Densité brute : 2,510
Teneur vides : 4,1% Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-10,1	10	782,8	41,5	41	18 845	7,2	18 697	2 352
-10,2	3	664,6	39,6	42	16 797	8,7	16 604	2 536
-10,2	1	583,1	38,7	43	15 052	9,2	14 858	2 404
-10,2	0,3	521,7	39,5	45	13 203	10,6	12 976	2 439
-10,2	0,1	472,2	40,6	43	11 631	11,9	11 382	2 397
0,0	10	665,4	50,6	20	13 151	11,8	12 872	2 692
0,0	3	552,2	50,0	20	11 038	14,2	10 703	2 701
0,0	1	462,9	49,6	19	9 327	15,0	9 008	2 420
0,0	0,3	383,3	50,2	18	7 632	16,9	7 304	2 215
0,0	0,1	318,3	51,1	16	6 234	19,6	5 871	2 096
10,0	10	390,1	50,8	14	7 673	18,8	7 266	2 467
10,0	3	302,0	51,3	14	5 886	21,1	5 490	2 123
10,0	1	225,0	49,1	13	4 585	22,8	4 226	1 779
10,0	0,3	173,8	51,0	11	3 406	25,0	3 087	1 439
10,0	0,1	130,8	51,5	11	2 538	26,0	2 281	1 113
19,8	10	199,7	53,3	5	3 744	26,9	3 340	1 691
19,8	3	148,9	57,8	6	2 578	29,2	2 250	1 258
19,8	1	95,2	51,7	7	1 841	30,7	1 582	941
19,7	0,3	63,8	51,5	8	1 239	32,9	1 041	673
19,7	0,1	44,1	51,2	8	862	33,9	715	480
30,1	10	96,5	65,3	11	1 478	35,2	1 208	851
30,1	3	52,3	55,6	10	942	36,3	758	558
30,1	1	32,3	51,6	10	626	37,4	497	380
30,1	0,3	20,5	51,1	10	401	37,8	317	246
30,1	0,1	13,8	51,0	11	271	36,6	218	162
39,7	10	33,9	55,7	8	610	40,2	465	394
39,7	3	21,3	59,0	7	362	40,1	277	233
39,8	1	12,2	51,9	7	234	38,6	183	146
39,8	0,3	7,5	51,0	6	147	38,0	116	91
39,8	0,1	5,1	51,0	6	99	37,2	79	60

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 20 décembre 2007

Échantillon : EB-073-07 Densité brute : 2,503
Teneur vides : 4,4% Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,3	10	761,7	29,3	31	25 981	4,2	25 911	1 914
-20,2	3	702,2	29,1	31	24 136	4,6	24 059	1 923
-20,2	1	635,7	28,1	32	22 592	5,5	22 487	2 172
-20,2	0,3	605,6	29,0	32	20 888	5,9	20 776	2 161
-20,3	0,1	581,0	30,0	29	19 354	7,2	19 202	2 419
-10,2	10	814,0	41,6	20	19 557	8,0	19 365	2 730
-10,2	3	691,3	39,6	21	17 473	8,7	17 273	2 638
-10,3	1	608,4	38,7	22	15 719	9,1	15 520	2 491
-10,2	0,3	548,4	39,4	22	13 909	10,0	13 698	2 410
-10,3	0,1	497,3	40,7	22	12 226	12,1	11 955	2 559
0,0	10	670,8	50,2	17	13 365	11,6	13 091	2 691
0,0	3	560,9	49,9	17	11 243	14,0	10 907	2 727
0,0	1	473,2	49,7	17	9 528	14,6	9 220	2 403
0,0	0,3	393,8	50,3	17	7 828	16,2	7 518	2 182
0,0	0,1	328,2	51,1	16	6 424	18,6	6 088	2 049
10,0	10	387,2	52,1	9	7 438	19,7	7 005	2 502
9,9	3	291,3	51,3	10	5 683	21,8	5 276	2 111
9,9	1	214,5	48,9	10	4 384	23,8	4 013	1 766
9,9	0,3	164,2	51,0	9	3 217	25,9	2 892	1 407
10,0	0,1	122,8	51,4	8	2 390	27,5	2 120	1 104
19,9	10	200,4	57,2	8	3 504	28,5	3 080	1 671
19,9	3	139,3	58,3	8	2 387	30,9	2 047	1 228
19,9	1	86,8	51,8	7	1 675	32,4	1 414	898
19,9	0,3	57,1	51,6	6	1 107	34,3	915	623
19,9	0,1	38,7	51,3	4	754	33,7	628	418
29,8	10	76,5	48,3	4	1 583	34,4	1 306	894
29,8	3	55,3	55,6	3	995	35,7	809	580
29,9	1	32,8	48,9	1	671	35,5	546	390
29,9	0,3	22,4	51,1	1	438	36,5	353	261
29,9	0,1	15,4	50,9	2	302	37,0	241	181
39,7	10	35,1	54,7	1	642	38,7	501	402
39,7	3	22,8	58,2	2	392	38,0	309	241
39,7	1	13,5	51,3	3	262	36,3	211	156
39,7	0,3	8,8	51,0	5	172	35,5	140	100
39,7	0,1	6,1	51,0	6	120	34,7	99	68

Échantillon : EB-075-07 Densité brute : 2,504
Teneur vides : 4,3% Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	753,6	29,3	36	25 690	4,2	25 622	1 877
-20,1	3	695,5	29,1	37	23 904	5,1	23 809	2 131
-20,0	1	630,8	28,1	38	22 411	5,6	22 306	2 169
-20,0	0,3	596,8	29,0	37	20 613	6,1	20 497	2 181
-20,1	0,1	574,3	29,9	34	19 212	7,1	19 064	2 382
-10,2	10	824,0	41,8	24	19 715	7,2	19 559	2 470
-10,2	3	695,9	39,4	24	17 670	8,1	17 494	2 486
-10,2	1	612,6	38,5	23	15 922	9,3	15 713	2 570
-10,2	0,3	555,0	39,4	23	14 088	10,2	13 866	2 492
-10,2	0,1	502,7	40,4	23	12 435	11,2	12 199	2 409
0,2	10	673,2	50,2	19	13 411	11,8	13 128	2 740
0,2	3	561,6	49,7	18	11 289	13,3	10 984	2 606
0,2	1	474,0	49,5	17	9 573	14,7	9 258	2 435
0,1	0,3	394,4	50,2	17	7 849	16,7	7 518	2 253
0,2	0,1	327,9	51,1	16	6 418	19,1	6 066	2 097
10,0	10	395,9	50,3	10	7 866	18,3	7 467	2 473
10,0	3	309,0	51,0	10	6 056	21,0	5 652	2 175
10,0	1	231,4	48,9	11	4 732	22,5	4 371	1 812
10,0	0,3	179,2	51,0	11	3 510	24,9	3 184	1 476
10,0	0,1	134,7	51,4	11	2 623	28,3	2 310	1 242
19,8	10	199,4	49,9	9	3 996	26,8	3 566	1 802
19,8	3	149,0	53,5	8	2 787	28,2	2 456	1 317
19,8	1	102,2	50,8	7	2 011	29,7	1 748	995
19,8	0,3	71,2	51,4	7	1 385	31,4	1 182	722
19,8	0,1	50,1	51,2	5	978	32,5	825	526
30,0	10	94,4	58,7	7	1 607	34,4	1 326	909
30,0	3	54,4	53,5	6	1 018	36,3	820	603
30,1	1	33,7	50,1	6	673	36,9	538	404
30,2	0,3	21,7	51,1	5	425	37,7	336	260
30,4	0,1	14,3	51,0	4	281	38,3	220	174
39,8	10	32,8	45,1	5	728	37,1	581	439
39,8	3	24,9	56,6	4	440	36,7	353	263
39,8	1	15,2	50,6	3	300	35,4	245	174
39,8	0,3	10,2	51,0	3	200	33,8	166	111
39,8	0,1	7,3	51,0	3	144	34,4	119	81

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 20 décembre 2007

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

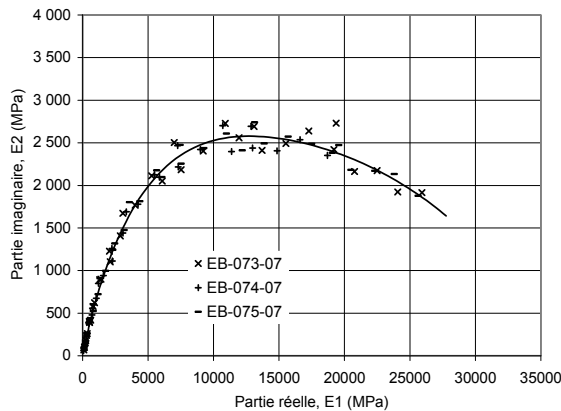
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-10
Type bitume : PG 64-34

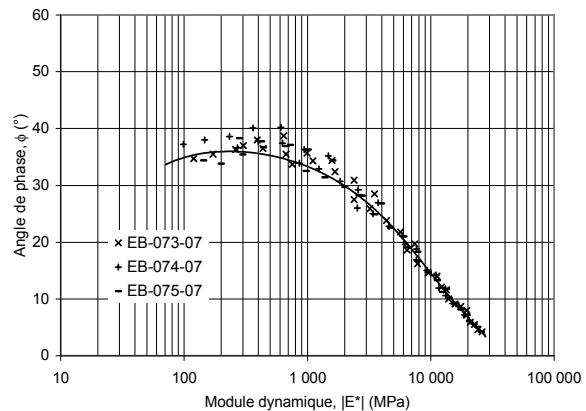
Teneur bitume : 5,3%
Teneur vides : 4,3%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

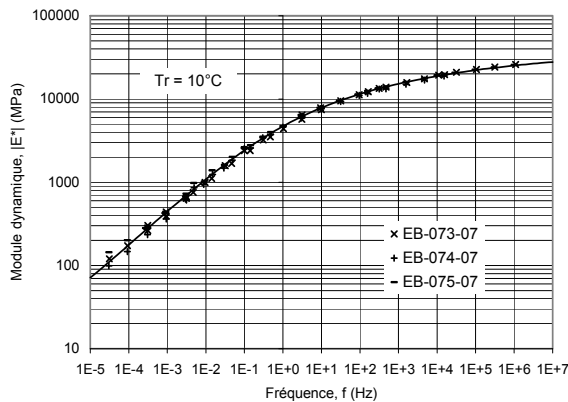
Module complexe dans le plan Cole et Cole



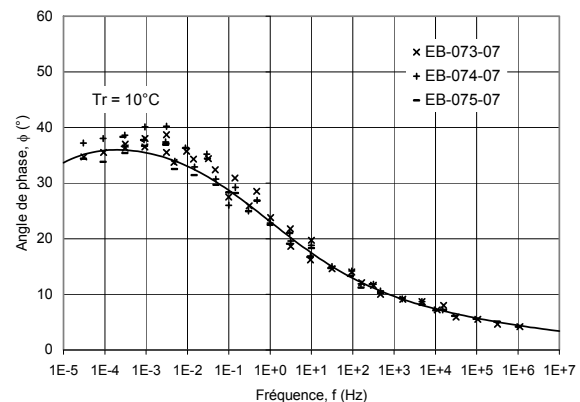
Module complexe dans l'espace de Black



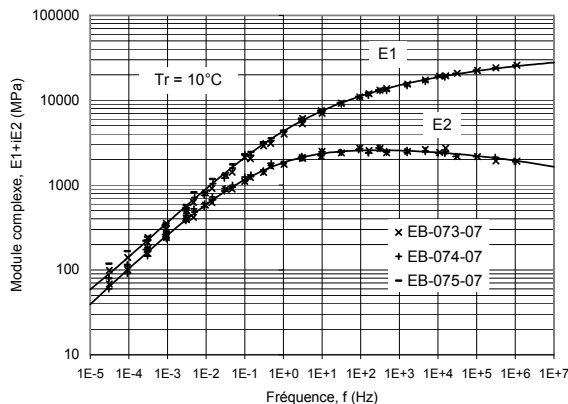
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



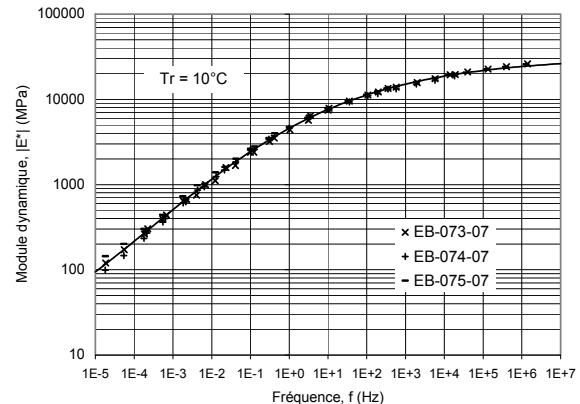
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 20 décembre 2007

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 20 décembre 2007

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-10

Source granulats :

Type bitume : PG 70-28

Source bitume :

Teneur bitume : 5,3%

Source enrobé :

Laboratoire

Teneur vides : 5,2%

Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E1 =	0,021
RMSE log E2 =	0,029
R ² log E1 =	1,00
R ² log E2 =	0,99
n =	105

E _o	E _∞	δ	k	h	τ _o	a ₁	a ₂
0,1	39 800	2,742	0,119	0,365	0,033	-0,154	7,27E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E* =	0,015
R ² log E* =	1,00
n =	105
E _{min} =	0,2
E _{max} =	35 100

δ	α	β	γ	a ₁	a ₂
-0,693	5,238	-1,829	-0,265	-0,160	6,11E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-091-07 Densité brute : 2,482
Teneur vides : 5,2% Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,7	10	769,7	30,1	33	25 545	4,9	25 450	2 201
-19,7	3	691,3	29,0	34	23 862	4,3	23 793	1 809
-19,8	1	631,5	28,1	35	22 506	5,1	22 416	2 008
-19,8	0,3	603,2	28,8	37	20 929	5,8	20 823	2 104
-19,8	0,1	585,7	29,9	34	19 558	5,5	19 468	1 874
-10,1	10	828,8	41,3	19	20 077	5,4	19 986	1 906
-10,1	3	718,2	39,2	21	18 324	6,9	18 192	2 192
-10,1	1	643,0	38,2	20	16 813	7,1	16 684	2 081
-10,1	0,3	600,7	39,2	19	15 308	7,3	15 185	1 938
-10,1	0,1	559,1	40,2	21	13 923	9,2	13 743	2 236
-0,2	10	745,6	50,2	7	14 840	8,3	14 684	2 149
-0,2	3	637,8	48,7	8	13 098	9,4	12 921	2 145
-0,2	1	572,1	48,9	8	11 689	9,6	11 523	1 959
-0,2	0,3	509,0	49,9	9	10 209	10,9	10 025	1 930
-0,2	0,1	453,6	50,9	9	8 915	10,1	8 777	1 560
9,8	10	516,5	53,8	8	9 598	12,8	9 358	2 133
9,8	3	394,3	49,1	7	8 035	14,0	7 796	1 944
9,8	1	331,4	48,8	6	6 794	14,9	6 567	1 741
9,8	0,3	281,2	50,3	5	5 593	15,9	5 380	1 530
9,8	0,1	235,6	51,3	4	4 596	14,8	4 443	1 175
19,9	10	287,6	52,1	6	5 516	18,2	5 241	1 719
19,9	3	222,0	51,6	6	4 304	19,7	4 052	1 450
19,9	1	171,3	49,9	6	3 433	20,6	3 213	1 209
19,9	0,3	134,8	51,2	5	2 633	22,3	2 437	998
19,9	0,1	105,1	51,5	4	2 041	23,6	1 871	816
30,3	10	146,1	53,0	4	2 756	24,0	2 518	1 120
30,3	3	104,1	51,7	4	2 013	24,8	1 827	844
30,3	1	74,9	49,4	4	1 515	25,8	1 364	660
30,3	0,3	55,9	51,2	4	1 092	27,2	971	499
30,3	0,1	41,1	51,2	4	802	27,1	713	366
39,9	10	67,0	53,0	4	1 265	28,9	1 107	611
39,9	3	46,0	53,5	3	859	30,6	740	437
39,9	1	31,3	51,3	3	610	30,9	524	313
39,9	0,3	21,3	51,0	3	417	31,3	356	217
40,0	0,1	14,9	51,0	3	293	32,1	248	155

Échantillon : EB-092-07 Densité brute : 2,480
Teneur vides : 5,2% Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,8	10	751,0	30,3	10	24 787	4,2	24 721	1 803
-19,8	3	677,4	29,2	11	23 176	4,5	23 104	1 829
-19,8	1	616,5	28,2	12	21 834	4,9	21 756	1 853
-19,7	0,3	586,7	28,9	13	20 334	5,6	20 236	1 998
-19,6	0,1	567,4	30,0	14	18 906	6,0	18 804	1 965
-10,2	10	845,9	42,0	21	20 120	6,1	20 004	2 155
-10,2	3	724,7	39,3	23	18 421	6,7	18 294	2 160
-10,2	1	649,5	38,3	24	16 944	6,9	16 820	2 045
-10,2	0,3	602,4	39,1	25	15 395	7,5	15 263	2 011
-10,2	0,1	564,1	40,4	26	13 968	7,3	13 854	1 782
0,1	10	739,6	50,9	31	14 536	8,6	14 372	2 182
0,1	3	627,4	49,0	34	12 799	9,4	12 626	2 098
0,1	1	557,8	49,2	35	11 337	10,8	11 136	2 128
0,1	0,3	494,7	50,0	37	9 893	11,3	9 700	1 943
0,1	0,1	439,8	50,8	36	8 659	15,4	8 349	2 296
10,3	10	487,4	52,7	22	9 248	13,0	9 012	2 077
10,3	3	377,7	49,3	25	7 666	14,2	7 430	1 887
10,3	1	316,1	48,9	27	6 468	15,3	6 238	1 706
10,3	0,3	264,8	50,3	29	5 262	17,0	5 033	1 535
10,3	0,1	220,8	51,2	28	4 310	20,0	4 051	1 472
20,0	10	293,2	53,6	13	5 473	17,8	5 211	1 674
20,0	3	219,9	51,5	13	4 268	20,2	4 007	1 471
19,9	1	168,9	49,8	13	3 390	20,9	3 168	1 208
19,9	0,3	132,4	51,1	13	2 593	22,1	2 402	974
20,0	0,1	102,7	51,3	12	2 000	23,7	1 831	803
29,9	10	144,6	51,3	13	2 818	23,7	2 580	1 134
29,9	3	106,9	52,2	13	2 049	24,7	1 861	857
29,9	1	76,8	50,1	13	1 532	25,8	1 379	667
29,9	0,3	56,3	51,3	12	1 099	27,0	979	499
29,9	0,1	41,1	50,6	10	813	29,0	710	394
39,8	10	65,0	46,1	10	1 409	27,8	1 246	658
39,8	3	49,2	51,5	10	957	28,9	838	463
39,8	1	34,8	50,8	10	685	29,7	595	339
39,8	0,3	24,2	51,1	10	473	30,1	409	237
39,8	0,1	17,3	51,0	10	340	32,3	287	182

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 27 mars 2008

Échantillon : EB-093-07 Densité brute : 2,478
Teneur vides : 5,3% Densité max : 2,617

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,9	10	731,4	29,5	31	24 821	3,9	24 763	1 693
-19,9	3	674,0	28,9	31	23 348	4,1	23 288	1 668
-19,9	1	612,7	28,0	31	21 889	5,2	21 800	1 973
-20,0	0,3	591,6	29,0	33	20 392	5,3	20 304	1 890
-19,9	0,1	571,4	30,0	34	19 049	5,4	18 966	1 777
-10,1	10	845,9	42,3	31	20 013	6,5	19 884	2 273
-10,1	3	719,1	39,5	32	18 197	7,3	18 050	2 303
-10,1	1	641,8	38,4	32	16 726	7,4	16 589	2 140
-10,2	0,3	596,7	39,3	32	15 185	7,4	15 060	1 945
-10,2	0,1	555,3	40,4	34	13 756	8,8	13 595	2 102
-0,1	10	732,1	51,5	42	14 209	8,3	14 059	2 061
-0,1	3	614,9	49,3	45	12 474	10,5	12 265	2 271
0,0	1	543,5	49,3	45	11 014	10,3	10 835	1 977
0,0	0,3	479,6	50,0	45	9 589	11,6	9 393	1 932
-0,1	0,1	425,0	50,9	44	8 343	12,2	8 154	1 767
10,1	10	489,6	53,7	33	9 122	14,3	8 838	2 259
10,1	3	373,4	49,0	35	7 615	14,9	7 358	1 961
10,1	1	314,5	49,1	34	6 403	15,8	6 160	1 746
10,1	0,3	263,5	50,5	33	5 220	16,5	5 005	1 484
10,1	0,1	220,3	51,2	32	4 299	18,4	4 081	1 355
20,0	10	291,7	58,0	10	5 029	19,7	4 734	1 697
19,9	3	207,0	53,1	10	3 894	21,1	3 632	1 403
19,9	1	154,6	50,4	9	3 068	22,0	2 845	1 150
19,9	0,3	119,1	51,2	8	2 325	23,6	2 131	930
19,9	0,1	92,0	51,4	8	1 790	25,2	1 620	762
29,8	10	140,3	49,9	9	2 811	23,2	2 585	1 105
29,8	3	104,9	50,8	8	2 065	23,9	1 888	837
29,8	1	78,1	49,9	6	1 565	25,0	1 419	661
29,8	0,3	58,7	51,2	6	1 146	26,0	1 031	502
29,8	0,1	44,2	51,2	5	864	27,0	769	392
39,8	10	65,4	49,6	4	1 319	29,1	1 152	641
39,8	3	47,6	52,9	4	901	29,2	786	440
39,8	1	32,8	50,9	4	646	29,9	560	322
39,8	0,3	22,9	51,2	4	447	30,6	385	227
39,8	0,1	16,4	51,0	5	321	32,6	270	173

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 27 mars 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

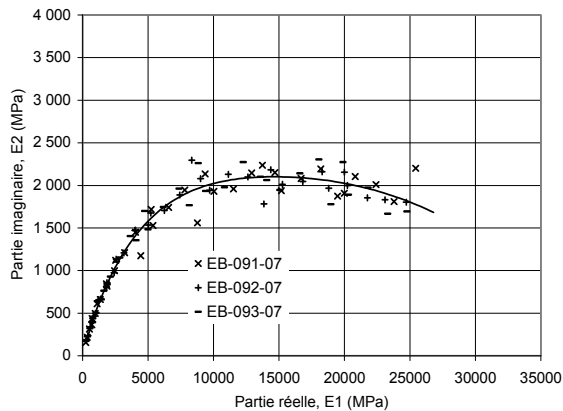
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-10
Type bitume : PG 70-28

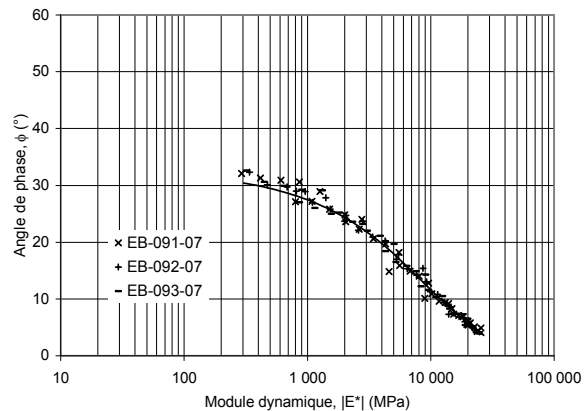
Teneur bitume : 5,3%
Teneur vides : 5,2%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

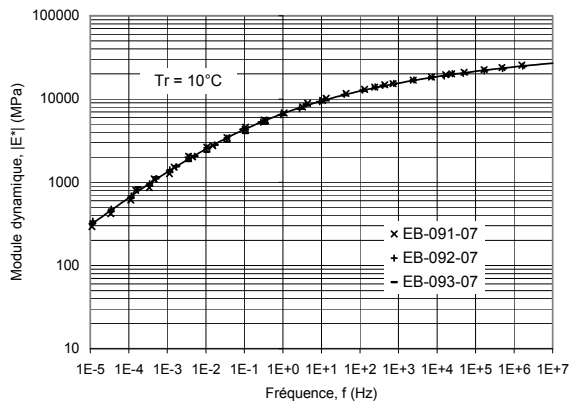
Module complexe dans le plan Cole et Cole



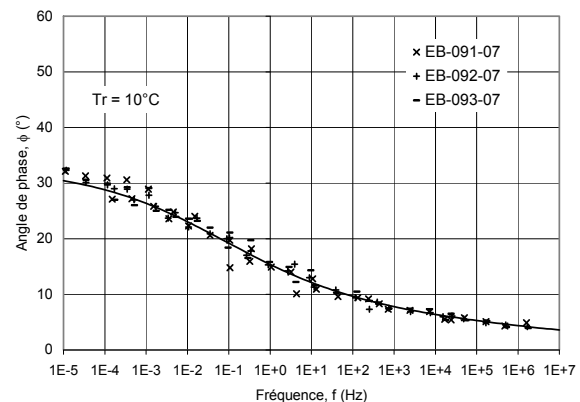
Module complexe dans l'espace de Black



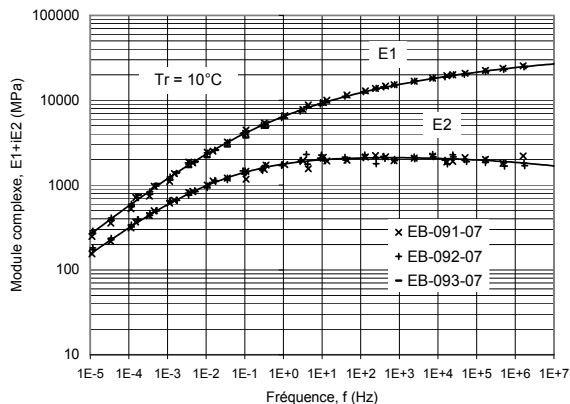
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



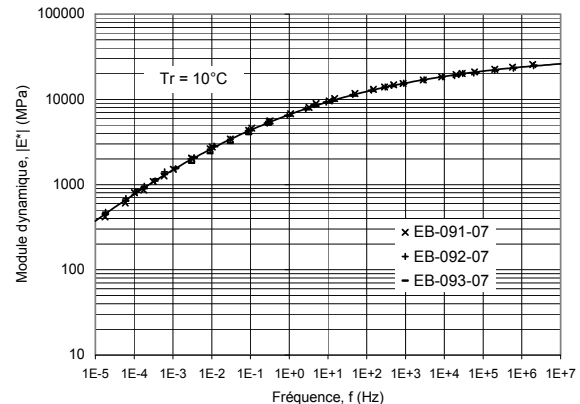
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 27 mars 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 27 mars 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-28
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,7%

Source granulats :
Source bitume :
Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E1 =	0,036
RMSE log E2 =	0,036
R ² log E1 =	1,00
R ² log E2 =	1,00
n =	104

E _o	E _∞	δ	k	h	τ _o	a ₁	a ₂
2,3	37 500	2,685	0,188	0,569	0,089	-0,157	1,00E-03

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E* =	0,019
R ² log E* =	1,00
n =	104
E _{min} =	0,5
E _{max} =	35 300

δ	α	β	γ	a ₁	a ₂
-0,330	4,877	-1,766	-0,430	-0,149	6,72E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-098-07
Teneur vides : 3,5%
Densité brute : 2,528
Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,4	10	874,5	27,3	21	32 057	2,5	32 027	1 393
-20,4	3	857,6	28,0	24	30 654	3,3	30 602	1 783
-20,3	1	795,6	27,1	26	29 373	3,7	29 311	1 914
-20,1	0,3	782,4	28,3	33	27 669	4,6	27 580	2 216
-20,1	0,1	775,9	29,4	29	26 378	6,1	26 231	2 784
-10,2	10	1031,6	39,4	27	26 162	5,2	26 055	2 369
-10,3	3	930,2	38,7	28	24 005	6,1	23 868	2 562
-10,2	1	832,1	37,7	30	22 088	7,3	21 906	2 825
-10,2	0,3	766,9	38,5	31	19 917	8,4	19 706	2 893
-10,2	0,1	722,7	40,1	30	18 040	7,8	17 871	2 463
0,0	10	921,7	48,8	14	18 893	9,9	18 609	3 261
0,0	3	792,1	48,4	16	16 361	11,6	16 030	3 276
0,0	1	691,9	49,0	16	14 127	13,4	13 740	3 285
0,0	0,3	584,6	49,8	16	11 737	15,7	11 300	3 172
0,0	0,1	492,4	51,3	18	9 602	19,4	9 058	3 186
9,8	10	601,6	52,4	16	11 473	17,6	10 936	3 471
9,8	3	449,8	50,5	18	8 899	21,0	8 306	3 195
9,8	1	342,1	49,8	16	6 877	24,1	6 279	2 804
9,7	0,3	253,1	51,0	12	4 963	27,8	4 388	2 319
9,7	0,1	183,0	51,7	9	3 541	31,3	3 025	1 840
19,9	10	286,8	51,0	8	5 628	28,3	4 954	2 671
19,9	3	185,1	49,2	8	3 761	32,7	3 163	2 034
19,9	1	130,9	52,0	8	2 515	36,4	2 023	1 494
19,8	0,3	82,4	52,7	7	1 565	39,2	1 213	989
19,9	0,1	50,6	51,9	8	974	41,8	725	650
29,9	10	103,7	53,1	8	1 954	41,7	1 459	1 300
29,9	3	58,4	52,6	8	1 109	44,8	788	781
29,8	1	35,2	54,2	7	650	47,1	442	476
29,8	0,3	18,6	51,5	7	362	48,7	239	272
29,8	0,1	11,1	51,1	8	216	44,1	155	151
39,9	10	30,2	49,6	5	610	49,8	393	466
40,0	3	16,6	53,4	5	310	50,9	195	241
40,0	1	8,9	51,4	5	174	49,9	112	133
40,0	0,3	5,1	51,0	5	99	46,9	68	72
39,9	0,1	3,2	50,9	5	63	46,7	43	46

Échantillon : EB-099-07
Teneur vides : 3,5%
Densité brute : 2,528
Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	888,1	28,0	9	31 663	2,8	31 625	1 557
-20,2	3	863,7	28,5	9	30 271	2,1	30 251	1 097
-20,3	1	795,0	27,3	8	29 172	3,9	29 103	2 000
-20,3	0,3	778,7	28,2	9	27 650	4,2	27 574	2 049
-20,0	0,1	765,3	29,5	10	25 974	4,8	25 882	2 181
-10,2	10	1031,8	39,1	11	26 386	4,9	26 290	2 254
-10,2	3	946,8	38,4	11	24 667	5,4	24 559	2 312
-10,3	1	849,5	37,3	12	22 744	6,8	22 584	2 688
-10,3	0,3	799,5	38,7	12	20 671	7,8	20 477	2 820
-10,1	0,1	750,2	40,0	12	18 735	9,1	18 498	2 970
-0,2	10	920,9	48,6	5	18 941	9,5	18 681	3 123
-0,2	3	795,2	48,5	5	16 387	11,3	16 068	3 215
-0,2	1	696,0	49,0	6	14 194	13,0	13 828	3 203
-0,1	0,3	592,9	49,9	5	11 890	15,1	11 479	3 100
-0,2	0,1	500,4	51,0	5	9 821	17,8	9 350	3 005
9,8	10	602,2	53,4	4	11 282	17,1	10 783	3 317
9,7	3	451,4	51,5	4	8 772	20,5	8 215	3 076
9,8	1	339,9	50,1	3	6 785	23,5	6 223	2 704
9,8	0,3	250,0	51,1	3	4 895	27,3	4 352	2 242
9,7	0,1	181,1	51,5	3	3 514	31,0	3 013	1 808
19,7	10	292,0	53,9	3	5 421	28,8	4 751	2 610
19,7	3	185,8	51,4	3	3 612	32,9	3 033	1 961
19,8	1	126,1	52,3	3	2 410	36,4	1 939	1 430
19,8	0,3	78,1	52,5	3	1 488	39,8	1 143	953
19,8	0,1	48,9	52,1	3	938	42,3	694	631
29,9	10	96,6	50,1	1	1 931	41,1	1 455	1 269
29,9	3	51,5	46,9	2	1 097	45,4	770	782
29,8	1	34,2	53,6	2	638	46,9	435	466
29,8	0,3	17,8	51,4	2	345	49,2	226	261
29,8	0,1	10,1	51,1	2	198	50,2	127	152
39,8	10	28,4	51,0	2	557	51,4	347	435
39,8	3	15,1	53,4	2	282	53,4	168	226
39,8	1	8,0	52,1	2	153	53,2	92	123
39,8	0,3	4,1	50,9	3	80	53,2	48	64
39,9	0,1	2,4	50,8	5	48	50,7	30	37

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 8 avril 2008

Échantillon : EB-100-07
Teneur vides : 4,0%
Densité brute : 2,517
Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	864,1	27,7	15	31 155	2,1	31 134	1 162
-20,2	3	846,1	28,4	16	29 776	2,5	29 747	1 321
-20,3	1	776,1	27,2	15	28 570	3,3	28 523	1 652
-20,3	0,3	764,9	28,2	16	27 109	4,6	27 024	2 153
-20,0	0,1	750,8	29,5	17	25 441	4,3	25 370	1 907
-10,0	10	1005,2	39,3	17	25 585	4,9	25 492	2 176
-10,1	3	911,8	38,6	18	23 614	6,5	23 464	2 654
-10,1	1	819,4	37,6	18	21 764	7,0	21 603	2 647
-10,0	0,3	765,2	38,8	19	19 732	7,9	19 546	2 705
-10,0	0,1	715,5	40,0	17	17 901	9,0	17 683	2 788
-0,2	10	899,2	48,3	10	18 633	9,5	18 377	3 077
-0,2	3	779,7	48,4	10	16 105	11,4	15 787	3 184
-0,1	1	682,2	49,0	10	13 936	12,7	13 594	3 069
-0,1	0,3	582,0	49,9	10	11 665	14,8	11 276	2 986
-0,2	0,1	490,7	51,0	10	9 619	17,6	9 171	2 904
9,9	10	592,4	52,5	6	11 281	17,2	10 775	3 341
9,9	3	437,4	49,8	9	8 789	20,9	8 212	3 133
9,9	1	339,8	49,7	11	6 837	23,0	6 293	2 672
9,8	0,3	254,7	51,1	13	4 980	26,5	4 455	2 224
9,9	0,1	184,5	51,5	11	3 582	30,4	3 090	1 811
19,9	10	280,1	52,7	3	5 313	28,0	4 689	2 498
19,8	3	182,8	51,6	3	3 546	32,6	2 986	1 913
19,9	1	123,8	52,4	3	2 364	36,2	1 907	1 397
19,9	0,3	76,0	52,4	3	1 451	39,5	1 121	922
20,0	0,1	47,6	51,8	3	920	42,5	679	621
29,9	10	95,9	48,9	6	1 961	40,8	1 484	1 282
29,9	3	57,0	51,1	5	1 115	44,2	799	778
29,9	1	34,7	53,0	5	655	46,4	452	474
29,9	0,3	18,5	51,2	5	361	48,4	240	270
29,9	0,1	10,7	51,0	5	209	48,9	137	157
40,0	10	29,4	52,1	6	564	48,8	371	424
40,0	3	15,6	53,5	6	292	50,4	186	225
40,0	1	8,7	52,2	7	167	50,1	107	128
40,0	0,3	4,7	51,0	8	93	47,9	62	69

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 8 avril 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

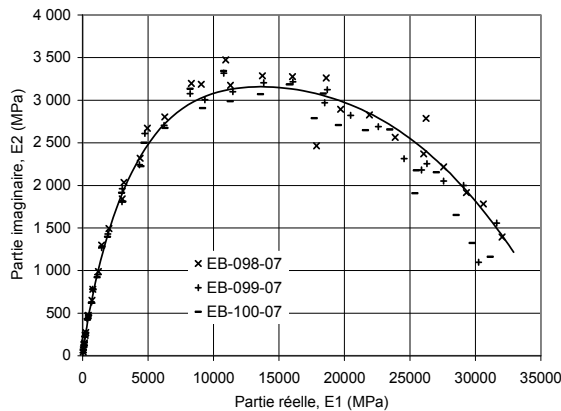
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-28

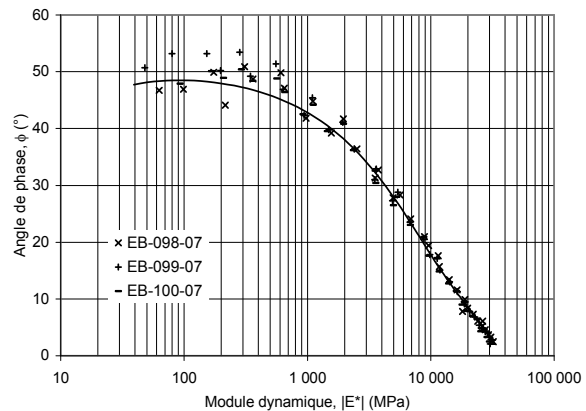
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 3,7%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

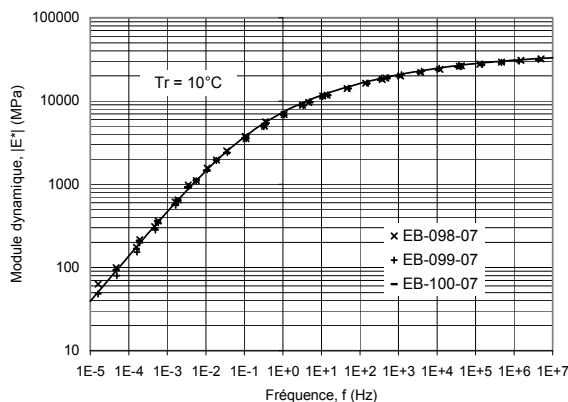
Module complexe dans le plan Cole et Cole



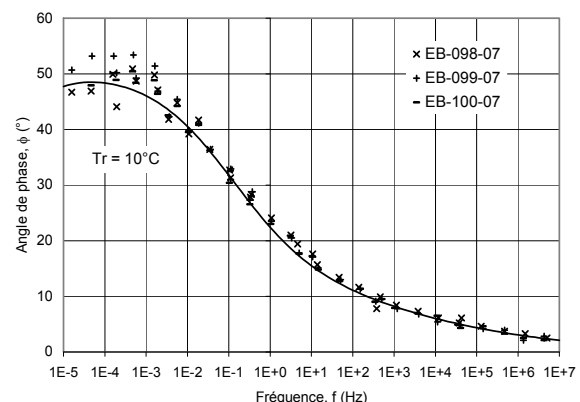
Module complexe dans l'espace de Black



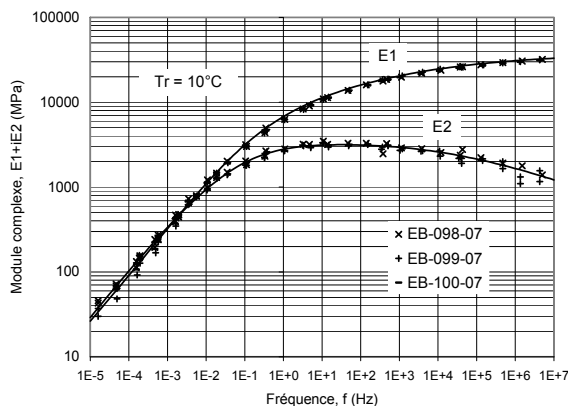
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



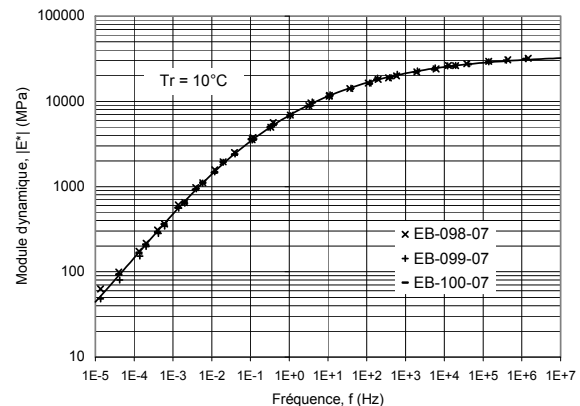
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 8 avril 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 8 avril 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-34
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,9%

Source granulats :
Source bitume :
Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E1 =	0,029
RMSE log E2 =	0,033
R ² log E1 =	1,00
R ² log E2 =	1,00
n =	100

E _o	E _∞	δ	k	h	τ _o	a ₁	a ₂
8,2	37 000	2,568	0,163	0,479	0,008	-0,142	8,60E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E* =	0,017
R ² log E* =	1,00
n =	100
E _{min} =	2,5
E _{max} =	31 000

δ	α	β	γ	a ₁	a ₂
0,399	4,092	-1,295	-0,399	-0,148	8,23E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-062-07 Densité brute : 2,520
Teneur vides : 3,9% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,5	10	779,9	29,5	52	26 477	4,9	26 379	2 274
-20,5	3	724,7	29,6	54	24 520	5,0	24 427	2 142
-20,5	1	656,4	28,7	55	22 909	5,8	22 790	2 334
-20,4	0,3	607,0	28,9	55	20 970	6,5	20 834	2 383
-20,5	0,1	581,2	30,0	53	19 359	8,5	19 148	2 847
-10,2	10	641,6	32,1	46	20 010	7,7	19 828	2 696
-10,2	3	529,3	29,9	47	17 683	7,6	17 527	2 344
-10,1	1	471,3	29,7	48	15 876	9,9	15 640	2 732
-10,1	0,3	417,1	30,0	45	13 903	10,6	13 667	2 550
-10,1	0,1	366,8	30,3	45	12 104	13,0	11 796	2 716
0,0	10	678,9	51,5	6	13 185	13,0	12 845	2 975
0,0	3	551,5	50,5	6	10 921	15,0	10 548	2 830
0,0	1	452,3	49,8	6	9 080	16,6	8 702	2 593
0,0	0,3	366,5	50,2	5	7 296	18,8	6 907	2 350
0,0	0,1	298,0	51,4	5	5 803	20,9	5 420	2 073
10,1	10	326,5	44,4	8	7 358	20,4	6 894	2 569
10,1	3	265,9	48,5	6	5 485	23,4	5 035	2 175
10,1	1	204,1	49,3	5	4 143	25,2	3 749	1 765
10,1	0,3	151,5	51,3	2	2 955	27,9	2 612	1 382
10,1	0,1	109,3	51,4	1	2 126	29,8	1 845	1 056
20,0	10	253,2	78,5	7	3 226	30,6	2 778	1 641
20,0	3	162,5	76,2	7	2 133	33,6	1 777	1 180
20,0	1	105,5	72,4	6	1 458	35,1	1 193	838
20,0	0,3	67,7	71,8	5	942	36,7	756	563
20,0	0,1	45,3	71,5	4	634	37,8	501	389
30,2	10	89,7	73,9	2	1 212	38,9	944	761
30,2	3	54,1	74,5	1	726	40,2	555	469
30,2	1	34,6	75,4	1	459	40,9	347	300
30,2	0,3	20,0	71,5	1	280	41,0	211	184
30,2	0,1	12,8	71,3	2	180	42,0	134	120
39,8	10	29,4	61,3	2	480	43,0	351	327
39,8	3	16,1	57,4	1	281	42,6	207	190
39,8	1	9,3	51,7	1	180	41,0	136	118
39,8	0,3	5,7	50,9	2	113	39,4	87	72
39,8	0,1	3,9	50,9	3	76	39,0	59	48

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 11 décembre 2007

Échantillon : EB-061-07 Densité brute : 2,516
Teneur vides : 4,0% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,2	10	783,5	29,4	24	26 671	4,8	26 577	2 244
-20,1	3	725,2	29,4	25	24 702	5,4	24 592	2 320
-20,1	1	651,6	28,3	26	23 048	5,4	22 945	2 175
-20,1	0,3	612,4	28,9	26	21 205	6,4	21 072	2 378
-20,1	0,1	588,3	30,2	21	19 490	5,6	19 397	1 906
-10,1	10	664,8	32,1	13	20 719	7,6	20 537	2 741
-10,1	3	548,1	29,6	12	18 545	8,3	18 349	2 688
-10,1	1	494,4	29,6	11	16 690	9,6	16 455	2 793
-10,2	0,3	441,6	30,1	10	14 663	10,2	14 431	2 599
-10,1	0,1	388,5	30,3	12	12 822	9,9	12 631	2 205
0,0	10	687,7	50,9	10	13 518	12,7	13 187	2 976
0,0	3	565,0	50,3	10	11 224	14,8	10 852	2 866
-0,1	1	466,8	49,7	10	9 391	16,4	9 010	2 648
0,0	0,3	377,1	50,3	10	7 504	18,6	7 114	2 388
0,0	0,1	308,4	51,3	8	6 007	20,8	5 614	2 136
10,1	10	333,4	44,4	9	7 509	20,4	7 038	2 616
10,1	3	271,9	48,6	10	5 599	23,5	5 136	2 229
10,1	1	208,7	49,6	10	4 210	25,4	3 804	1 804
10,1	0,3	153,9	51,4	10	2 991	27,9	2 643	1 401
10,1	0,1	110,4	51,4	10	2 148	30,3	1 855	1 083
20,0	10	257,5	77,7	6	3 314	30,7	2 850	1 692
20,0	3	165,7	75,6	6	2 192	33,7	1 824	1 215
20,0	1	108,3	72,4	5	1 496	35,2	1 223	862
20,0	0,3	69,6	71,9	5	968	36,8	775	581
20,0	0,1	46,5	71,8	4	648	35,6	527	377
40,0	10	25,4	50,9	2	499	43,7	360	345
40,0	3	16,3	57,4	4	284	43,1	208	194
40,0	1	9,3	51,8	6	180	41,9	134	120
39,9	0,3	5,8	51,0	10	113	42,2	84	76
39,9	0,1	3,9	51,1	14	76	40,8	57	50

Échantillon : EB-063-07 Densité brute : 2,521
Teneur vides : 3,8% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	761,8	29,4	18	25 953	5,3	25 842	2 395
-20,1	3	694,7	28,9	18	24 057	4,7	23 977	1 951
-20,1	1	628,3	28,0	18	22 456	6,9	22 295	2 681
-20,1	0,3	600,5	28,9	16	20 797	6,2	20 674	2 251
-20,2	0,1	570,5	30,0	18	19 019	9,3	18 772	3 058
-10,1	10	634,0	32,3	13	19 602	7,7	19 427	2 611
-10,1	3	525,3	30,2	13	17 419	8,7	17 217	2 645
-10,1	1	464,9	29,8	13	15 578	9,6	15 359	2 599
-10,0	0,3	409,6	30,1	11	13 588	10,7	13 353	2 518
-10,1	0,1	360,7	30,3	10	11 898	13,4	11 572	2 766
0,0	10	665,4	52,8	9	12 602	13,0	12 280	2 830
0,0	3	529,8	50,7	10	10 439	15,3	10 071	2 746
0,0	1	431,7	49,9	10	8 656	16,7	8 291	2 488
0,0	0,3	347,9	50,3	11	6 916	18,7	6 552	2 213
0,0	0,1	282,5	51,4	11	5 499	20,9	5 138	1 961
10,0	10	304,5	43,2	9	7 040	20,4	6 598	2 455
10,0	3	241,1	46,0	9	5 238	23,3	4 811	2 072
10,0	1	193,2	49,4	10	3 913	26,2	3 511	1 726
10,0	0,3	142,6	51,3	10	2 779	28,2	2 448	1 314
10,0	0,1	102,6	51,4	9	1 999	29,9	1 732	997
20,0	10	262,9	85,0	6	3 092	30,8	2 656	1 584
20,0	3	159,5	77,7	8	2 051	33,1	1 718	1 121
20,0	1	101,8	72,4	8	1 407	34,8	1 156	803
20,0	0,3	65,5	71,8	9	912	36,6	732	544
20,1	0,1	43,7	71,3	10	612	37,5	485	373
30,1	10	92,1	79,4	7	1 159	39,3	897	733
30,1	3	51,5	73,2	8	703	40,0	538	452
30,1	1	33,6	75,2	9	446	40,3	340	289
30,1	0,3	19,6	71,5	9	274	40,8	207	179
30,1	0,1	12,8	71,3	10	179	40,5	136	116
40,0	10	24,6	51,2	8	480	42,2	355	322
40,0	3	16,0	57,7	7	277	41,2	208	183
40,0	1	9,3	51,9	6	179	40,1	137	115
40,0	0,3	5,7	51,0	5	112	40,1	86	72
39,9	0,1	3,9	50,9	5	78	38,3	61	48

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 11 décembre 2007

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

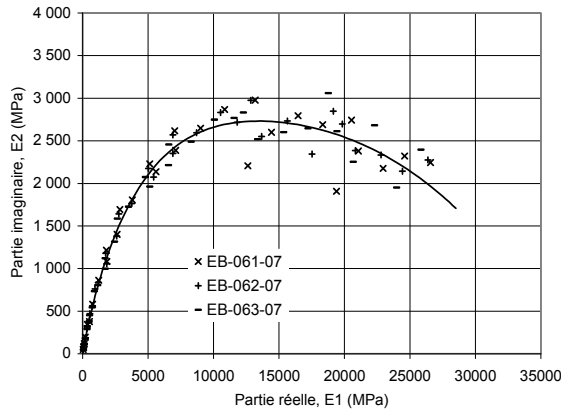
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-34

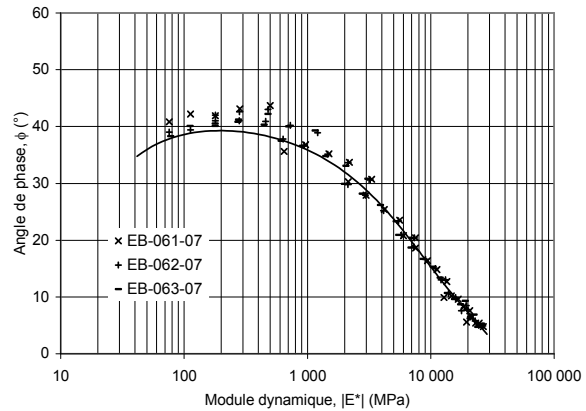
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 3,9%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

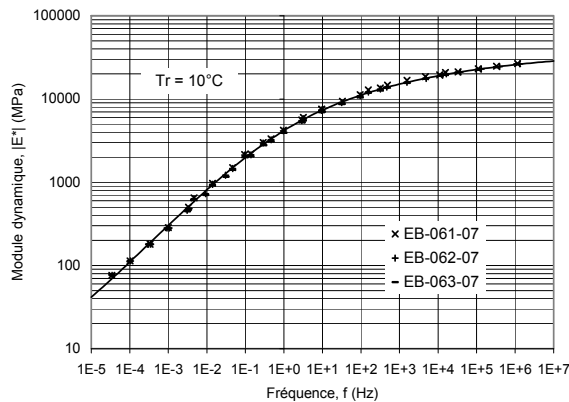
Module complexe dans le plan Cole et Cole



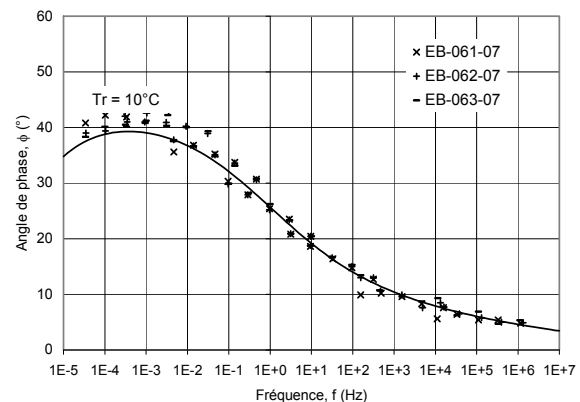
Module complexe dans l'espace de Black



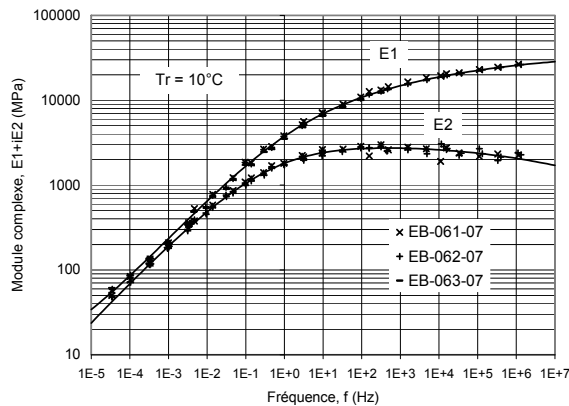
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



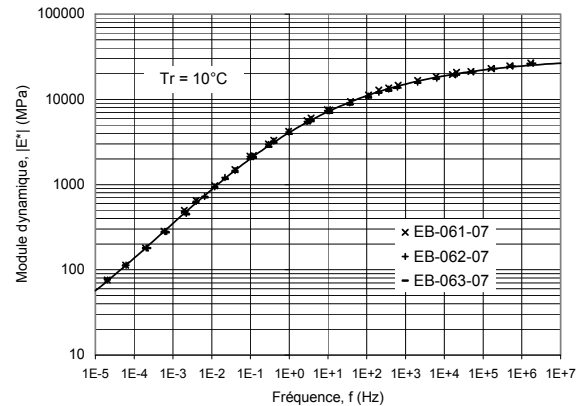
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 11 décembre 2007

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 11 décembre 2007

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14

Source granulats :

Type bitume : PG 64-28

Source bitume :

Teneur bitume : 4,8%

Source enrobé :

Laboratoire

Teneur vides : 4,2%

Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E1 =	0,019
RMSE log E2 =	0,031
R ² log E1 =	1,00
R ² log E2 =	0,99
n =	105

E _o	E _∞	δ	k	h	τ _o	a ₁	a ₂
0,1	39 600	2,390	0,143	0,410	0,056	-0,149	8,54E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E* =	0,010
R ² log E* =	1,00
n =	105
E _{min} =	0,7
E _{max} =	37 900

δ	α	β	γ	a ₁	a ₂
-0,177	4,756	-1,748	-0,313	-0,152	6,68E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-079-07 Densité brute : 2,502
Teneur vides : 4,5% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	828,3	28,6	26	28 926	3,3	28 877	1 678
-20,1	3	778,2	28,6	25	27 229	3,8	27 171	1 789
-20,1	1	712,2	27,5	26	25 922	4,3	25 849	1 937
-20,2	0,3	692,4	28,4	25	24 351	4,9	24 261	2 088
-20,2	0,1	673,3	29,6	25	22 718	6,1	22 590	2 407
-10,1	10	929,0	40,5	31	22 919	5,6	22 809	2 243
-10,1	3	818,1	39,2	33	20 877	6,7	20 734	2 435
-10,0	1	726,0	37,9	34	19 174	7,5	19 008	2 517
-10,0	0,3	670,5	38,7	34	17 343	7,7	17 187	2 315
-10,1	0,1	630,5	40,1	32	15 720	9,5	15 503	2 602
0,0	10	828,2	49,4	10	16 761	9,2	16 547	2 670
0,0	3	712,2	48,7	11	14 637	10,4	14 398	2 634
0,0	1	630,3	48,9	11	12 885	11,4	12 632	2 541
-0,1	0,3	549,8	49,6	11	11 080	12,6	10 813	2 418
-0,1	0,1	481,5	50,6	10	9 524	13,6	9 257	2 237
10,0	10	549,9	50,6	17	10 873	14,7	10 519	2 751
10,0	3	434,9	49,0	19	8 877	15,8	8 542	2 417
10,0	1	355,0	48,1	19	7 380	16,8	7 066	2 129
10,0	0,3	294,3	50,1	19	5 879	18,6	5 572	1 875
10,0	0,1	241,1	51,4	19	4 691	21,6	4 361	1 727
20,0	10	298,3	48,6	16	6 135	20,2	5 759	2 116
20,0	3	220,9	47,8	16	4 623	22,7	4 264	1 787
20,0	1	177,8	50,3	16	3 533	24,2	3 222	1 449
20,0	0,3	132,3	51,3	16	2 579	26,2	2 315	1 137
20,0	0,1	98,1	51,3	15	1 912	28,4	1 683	908
29,9	10	159,0	53,0	15	2 996	27,6	2 655	1 388
29,9	3	113,4	54,5	14	2 079	29,5	1 811	1 022
29,9	1	76,1	51,2	13	1 486	30,5	1 279	755
30,0	0,3	52,0	51,3	12	1 013	31,6	863	531
30,0	0,1	36,8	51,2	12	718	33,0	603	391
39,9	10	69,1	49,8	13	1 388	33,2	1 162	760
39,9	3	45,1	50,5	11	892	33,6	743	494
39,9	1	31,6	52,1	9	606	34,4	500	343
39,9	0,3	20,3	51,1	8	398	35,2	325	229
39,9	0,1	13,9	50,8	10	274	37,9	216	168

Échantillon : EB-080-07 Densité brute : 2,513
Teneur vides : 4,1% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,2	10	842,9	28,4	40	29 729	4,3	29 647	2 205
-20,2	3	799,7	28,6	41	27 946	3,2	27 902	1 569
-20,2	1	730,5	27,4	41	26 627	4,8	26 535	2 208
-20,3	0,3	712,3	28,6	42	24 876	5,8	24 750	2 493
-20,2	0,1	692,1	29,8	43	23 260	4,3	23 195	1 741
-10,1	10	950,0	39,6	21	23 973	5,5	23 863	2 293
-10,2	3	850,1	38,8	22	21 921	6,4	21 782	2 462
-10,2	1	760,6	37,9	24	20 083	6,8	19 940	2 391
-10,1	0,3	708,2	39,1	27	18 121	8,1	17 943	2 539
-10,1	0,1	662,2	40,2	24	16 454	8,6	16 269	2 462
-0,2	10	824,2	47,5	30	17 351	9,5	17 112	2 873
-0,1	3	732,2	48,5	32	15 105	9,9	14 879	2 601
-0,1	1	649,4	49,0	33	13 260	11,6	12 992	2 656
-0,1	0,3	567,1	49,8	32	11 379	13,0	11 087	2 562
-0,1	0,1	495,3	51,0	31	9 714	16,0	9 340	2 673
9,9	10	550,7	50,1	2	10 987	14,0	10 659	2 667
9,9	3	436,9	48,5	2	9 002	16,6	8 626	2 575
9,9	1	357,6	48,1	1	7 427	17,0	7 102	2 172
9,9	0,3	295,4	50,2	1	5 889	19,2	5 562	1 934
9,9	0,1	239,9	51,1	1	4 698	20,4	4 403	1 639
20,0	10	286,6	46,0	2	6 233	19,9	5 861	2 123
20,0	3	221,1	47,1	4	4 698	22,3	4 347	1 780
20,0	1	181,1	50,4	4	3 597	23,7	3 293	1 446
20,0	0,3	135,7	51,4	5	2 641	25,6	2 382	1 140
20,0	0,1	100,9	51,3	5	1 967	27,4	1 746	905
30,1	10	159,5	51,8	5	3 080	27,1	2 741	1 404
30,1	3	112,1	52,5	5	2 135	28,9	1 869	1 031
30,1	1	76,3	49,8	5	1 532	30,0	1 328	765
30,1	0,3	54,3	51,3	5	1 058	31,0	906	545
30,0	0,1	38,3	51,2	4	748	32,3	632	400
39,9	10	75,1	53,6	4	1 401	33,3	1 171	770
39,9	3	46,5	51,4	4	904	34,8	743	515
39,9	1	32,0	52,3	4	612	35,3	500	354
40,0	0,3	20,4	51,1	4	400	35,8	324	234
40,0	0,1	14,0	51,0	4	275	36,5	221	164

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 5 février 2008

Échantillon : EB-081-07 Densité brute : 2,514
Teneur vides : 4,1% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,2	10	828,4	28,0	26	29 639	2,9	29 601	1 505
-20,2	3	792,9	28,3	25	27 969	3,5	27 916	1 729
-20,2	1	723,7	27,2	24	26 605	4,4	26 526	2 048
-20,2	0,3	700,7	28,1	20	24 932	5,2	24 828	2 272
-20,3	0,1	685,6	29,5	27	23 227	7,0	23 052	2 847
-10,1	10	972,9	40,3	32	24 128	5,5	24 016	2 324
-10,1	3	862,9	39,2	35	22 011	6,6	21 863	2 549
-10,1	1	772,4	38,2	37	20 228	6,8	20 085	2 399
-10,0	0,3	712,6	39,0	38	18 269	7,9	18 096	2 507
-10,1	0,1	665,0	40,1	33	16 585	10,0	16 331	2 890
-0,1	10	842,3	48,0	10	17 535	9,3	17 306	2 827
-0,1	3	738,1	48,3	10	15 271	10,5	15 014	2 792
-0,1	1	655,1	48,8	10	13 427	11,3	13 167	2 630
-0,1	0,3	573,4	49,7	10	11 539	12,4	11 270	2 475
-0,1	0,1	501,1	50,9	11	9 840	13,5	9 570	2 291
10,0	10	568,2	50,8	8	11 178	14,4	10 827	2 782
10,0	3	443,1	48,5	9	9 135	16,7	8 751	2 619
10,0	1	363,1	48,3	9	7 518	17,4	7 172	2 253
10,0	0,3	299,7	50,2	9	5 974	19,0	5 648	1 947
10,0	0,1	244,2	51,3	9	4 763	21,2	4 441	1 721
20,1	10	273,5	44,5	11	6 152	21,5	5 723	2 257
20,1	3	212,8	46,5	10	4 574	23,1	4 207	1 795
20,1	1	175,0	50,4	10	3 473	24,9	3 150	1 463
20,1	0,3	129,6	51,3	8	2 526	26,2	2 266	1 116
20,0	0,1	95,9	51,3	6	1 869	28,3	1 646	885
29,9	10	162,5	51,7	1	3 141	26,9	2 800	1 423
29,9	3	114,4	52,6	0	2 175	28,9	1 905	1 050
29,9	1	78,0	50,0	0	1 560	30,2	1 349	784
30,0	0,3	55,1	51,3	1	1 074	31,3	917	558
30,0	0,1	38,9	51,2	2	760	32,5	641	409
39,8	10	69,8	47,8	2	1 460	32,7	1 228	790
39,8	3	46,1	48,6	3	948	33,6	790	524
39,8	1	33,4	51,7	3	647	33,8	537	360
39,8	0,3	22,0	51,1	4	431	34,4	356	244
39,8	0,1	15,3	51,1	5	300	35,2	245	173

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 5 février 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

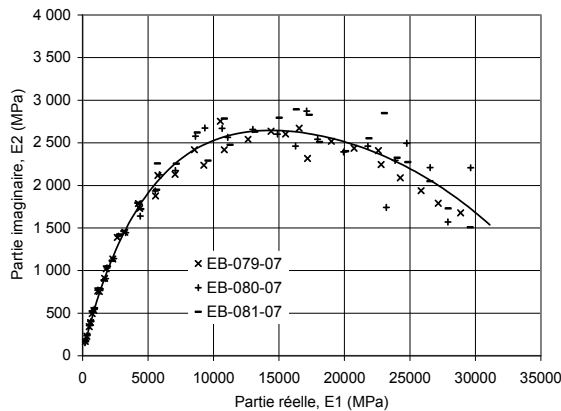
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 64-28

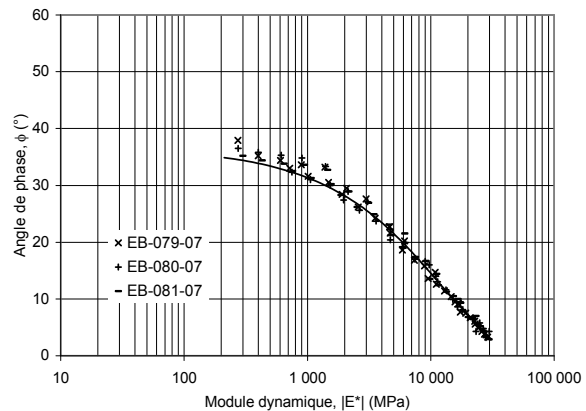
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,2%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

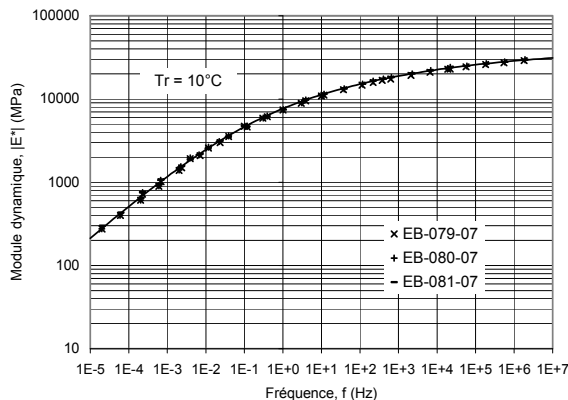
Module complexe dans le plan Cole et Cole



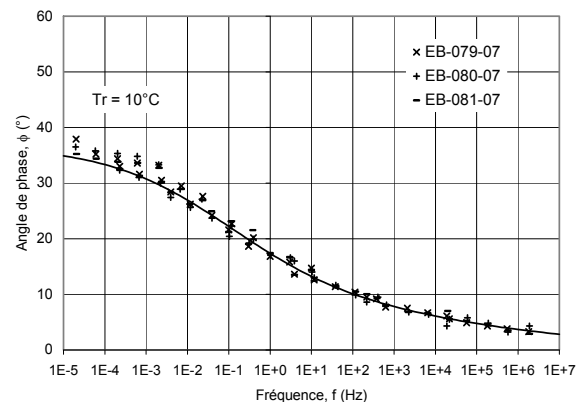
Module complexe dans l'espace de Black



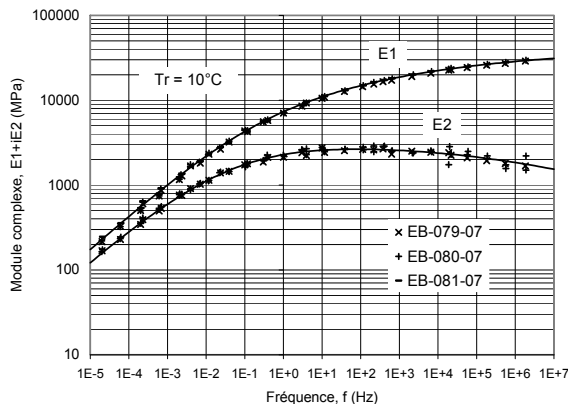
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



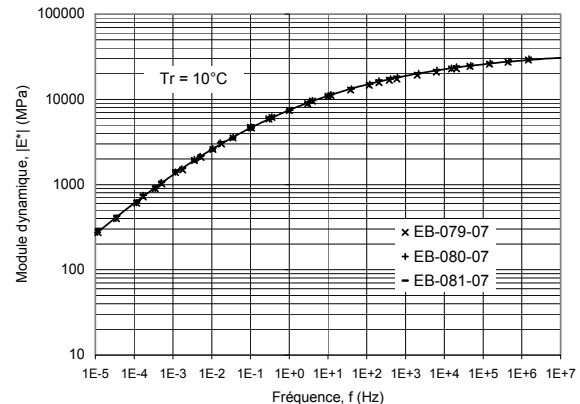
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 5 février 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 5 février 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 64-34
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,6%

Source granulats :
Source bitume :
Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
4,5	40 000	2,450	0,139	0,422	0,026	-0,143	7,03E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
0,480	4,056	-1,517	-0,350	-0,148	5,88E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-070-07
Teneur vides : 3,9%
Densité brute : 2,519
Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (µε)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,2	10	776,5	28,2	53	27 581	4,4	27 500	2 121
-20,2	3	734,8	28,6	56	25 698	4,0	25 634	1 809
-20,2	1	675,1	28,0	58	24 137	5,3	24 034	2 221
-20,1	0,3	642,3	28,6	59	22 452	5,8	22 338	2 258
-20,0	0,1	624,3	29,8	58	20 946	5,8	20 838	2 130
-10,6	10	909,2	39,8	38	22 820	6,0	22 697	2 371
-10,6	3	810,5	38,9	39	20 816	6,5	20 683	2 347
-10,6	1	727,7	38,0	40	19 134	7,6	18 964	2 541
-10,6	0,3	670,8	38,9	40	17 263	8,2	17 088	2 450
-10,6	0,1	626,4	40,1	40	15 610	9,9	15 377	2 687
-0,1	10	722,8	44,8	16	16 128	10,2	15 873	2 858
-0,1	3	681,3	49,0	17	13 903	11,3	13 634	2 720
-0,1	1	595,4	49,2	17	12 090	12,3	11 812	2 578
-0,1	0,3	509,3	49,9	16	10 216	14,1	9 909	2 483
-0,1	0,1	439,2	51,0	14	8 620	15,7	8 299	2 330
10,0	10	453,4	44,9	3	10 100	15,4	9 739	2 677
10,0	3	380,2	47,1	4	8 071	17,1	7 716	2 369
10,0	1	307,1	46,8	5	6 562	18,9	6 209	2 126
10,0	0,3	257,2	50,5	6	5 098	20,9	4 762	1 818
10,0	0,1	204,3	51,4	8	3 974	23,2	3 654	1 563
19,9	10	257,2	46,9	11	5 485	22,1	5 081	2 065
19,9	3	195,2	48,6	11	4 017	25,2	3 635	1 709
19,9	1	152,2	50,7	11	3 003	26,5	2 688	1 339
19,9	0,3	110,3	51,4	11	2 144	28,2	1 890	1 014
20,0	0,1	79,7	51,2	9	1 556	30,1	1 346	781
30,1	10	114,6	45,4	14	2 524	29,9	2 189	1 257
30,1	3	78,0	46,1	14	1 691	31,4	1 444	880
30,1	1	58,9	50,9	13	1 158	33,3	967	636
30,1	0,3	39,8	51,3	14	776	34,0	643	434
30,0	0,1	27,6	51,2	15	538	34,5	444	305
39,8	10	61,3	59,4	13	1 032	37,3	820	626
39,8	3	38,9	60,3	11	646	37,3	514	391
39,8	1	22,8	51,8	11	440	36,8	352	263
39,8	0,3	14,7	51,0	11	288	37,1	230	174
39,8	0,1	10,3	51,0	12	201	36,7	161	120

Échantillon : EB-071-07
Teneur vides : 3,4%
Densité brute : 2,532
Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (µε)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,7	10	790,2	28,7	24	27 522	4,8	27 424	2 318
-19,6	3	737,0	28,9	24	25 496	4,8	25 407	2 123
-19,6	1	669,6	27,9	25	24 036	5,3	23 931	2 241
-19,6	0,3	643,9	28,7	24	22 459	5,5	22 358	2 135
-19,8	0,1	623,4	29,9	24	20 856	6,7	20 715	2 421
-10,3	10	901,5	40,9	10	22 033	6,7	21 884	2 560
-10,3	3	786,8	39,3	10	20 013	7,3	19 849	2 555
-10,3	1	699,1	38,3	11	18 245	7,8	18 077	2 466
-10,3	0,3	642,2	39,0	11	16 470	8,7	16 280	2 493
-10,4	0,1	596,1	40,3	11	14 792	8,9	14 612	2 300
0,0	10	723,2	46,1	14	15 702	10,1	15 457	2 761
0,1	3	662,7	49,0	15	13 521	11,3	13 260	2 648
0,1	1	578,6	49,2	15	11 763	12,4	11 487	2 534
0,0	0,3	497,1	49,9	14	9 970	13,6	9 689	2 352
0,0	0,1	428,6	51,0	14	8 403	15,7	8 088	2 277
9,9	10	465,2	47,1	7	9 871	14,7	9 546	2 510
9,9	3	378,4	47,7	7	7 931	17,5	7 565	2 381
9,9	1	301,1	46,8	8	6 438	18,9	6 091	2 087
9,9	0,3	252,4	50,4	8	5 011	20,7	4 688	1 770
9,9	0,1	200,7	51,5	7	3 899	22,8	3 594	1 511
19,9	10	265,0	50,3	5	5 262	22,7	4 855	2 030
19,9	3	197,0	51,1	6	3 854	25,6	3 476	1 665
19,9	1	146,3	51,0	6	2 868	26,8	2 559	1 295
19,9	0,3	104,6	51,5	6	2 033	28,7	1 784	975
19,9	0,1	75,3	51,3	6	1 468	30,2	1 269	738
30,1	10	117,9	47,5	7	2 481	30,2	2 144	1 249
30,1	3	78,0	46,8	7	1 666	31,9	1 414	880
30,1	1	57,2	49,7	7	1 152	32,4	973	617
30,1	0,3	39,6	51,2	7	773	33,7	643	429
30,0	0,1	27,4	51,1	8	536	33,7	446	298
39,8	10	54,8	50,2	8	1 092	34,8	896	623
39,8	3	40,2	59,0	8	681	36,1	550	401
39,8	1	24,2	51,7	9	468	35,5	381	272
39,8	0,3	16,0	51,1	10	313	35,3	255	181
39,8	0,1	11,3	51,0	11	221	34,8	181	126

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 20 décembre 2007

Échantillon : EB-072-07
Teneur vides : 3,5%
Densité brute : 2,528
Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (µε)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	782,4	28,0	44	27 917	3,9	27 853	1 886
-20,1	3	750,5	28,7	45	26 188	5,4	26 072	2 457
-20,1	1	684,2	27,7	45	24 709	4,7	24 625	2 037
-20,1	0,3	658,9	28,7	46	22 982	5,5	22 875	2 213
-10,2	10	891,5	40,9	12	21 779	6,1	21 654	2 325
-10,2	3	775,6	39,4	13	19 707	7,4	19 544	2 531
-10,2	1	691,8	38,4	14	18 023	7,1	17 883	2 242
-10,2	0,3	633,4	39,2	14	16 178	8,4	16 003	2 374
-10,3	0,1	587,5	40,3	15	14 584	9,6	14 381	2 428
-0,1	10	718,0	46,2	11	15 536	10,0	15 299	2 704
-0,1	3	657,0	49,1	12	13 370	11,4	13 107	2 639
-0,1	1	572,8	49,3	13	11 621	12,6	11 342	2 533
-0,1	0,3	491,8	50,0	13	9 833	13,7	9 553	2 332
-0,1	0,1	422,2	51,0	14	8 276	15,7	7 967	2 240
10,0	10	458,7	47,9	14	9 585	15,9	9 218	2 625
10,0	3	371,2	48,6	15	7 642	17,5	7 287	2 299
10,0	1	292,1	47,2	15	6 189	19,4	5 838	2 057
10,0	0,3	241,3	50,5	16	4 778	21,1	4 456	1 723
10,0	0,1	189,9	51,5	16	3 691	23,5	3 386	1 469
19,9	10	260,7	51,8	13	5 028	24,1	4 589	2 055
19,9	3	184,4	50,6	14	3 648	26,4	3 268	1 622
19,9	1	136,7	50,8	14	2 693	27,9	2 379	1 261
19,9	0,3	97,3	51,4	13	1 893	29,7	1 644	937
19,9	0,1	69,6	51,3	12	1 357	30,7	1 167	692
29,8	10	119,6	49,3	14	2 425	30,2	2 095	1 221
29,8	3	74,5	45,8	13	1 628	31,9	1 382	860
29,8	1	52,6	46,8	12	1 124	32,6	947	606
29,8	0,3	38,5	51,3	11	751	33,8	624	417
29,8	0,1	26,6	51,1	10	520	33,7	433	289
39,7	10	53,5	52,4	9	1 021	35,1	835	587
39,7	3	37,6	58,7	7	641	35,9	519	375
39,7	1	22,6	51,4	6	441	35,7	358	257
39,7	0,3	15,0	51,0	5	294	34,6	242	167
39,7	0,1	10,6	51,0	5	208	33,8	173	116

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 20 décembre 2007

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

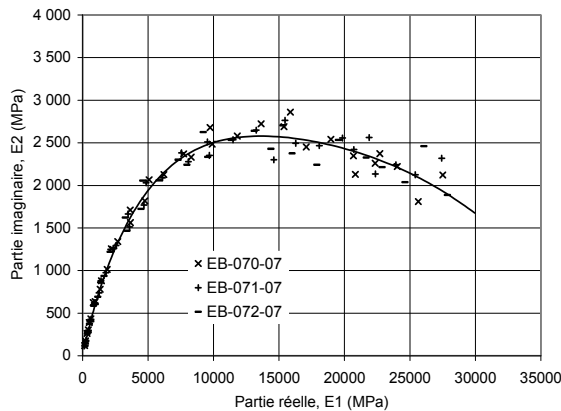
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 64-34

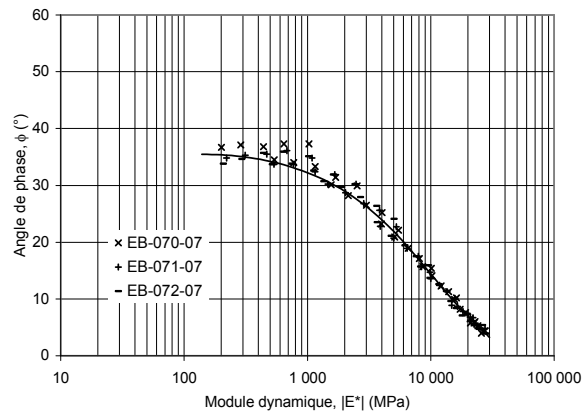
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,6%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

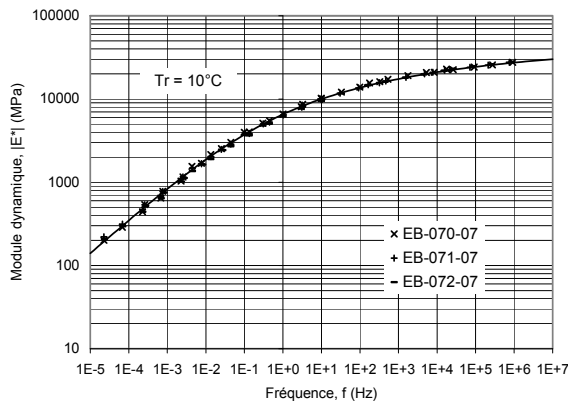
Module complexe dans le plan Cole et Cole



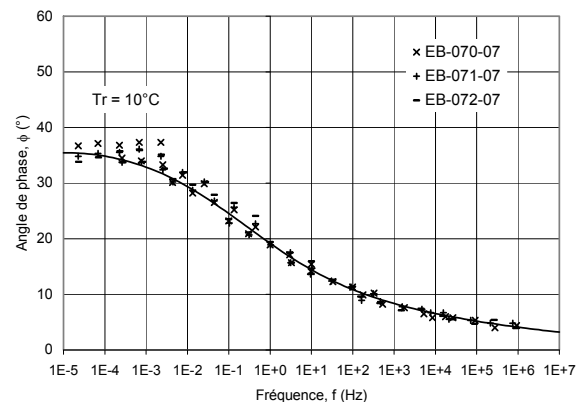
Module complexe dans l'espace de Black



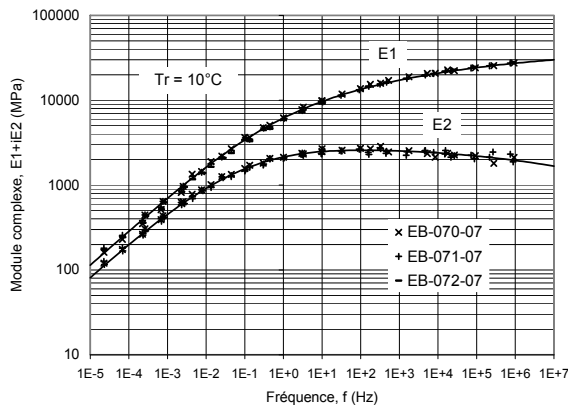
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



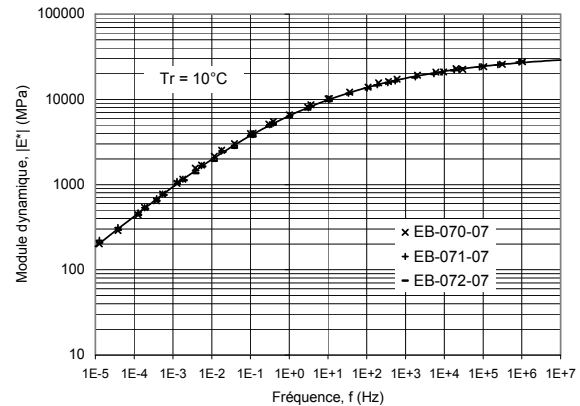
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 20 décembre 2007

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 20 décembre 2007

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14

Source granulats :

Type bitume : PG 70-28

Source bitume :

Teneur bitume : 4,8%

Source enrobé : Laboratoire

Teneur vides : 4,2%

Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
0,1	42 400	2,428	0,116	0,362	0,036	-0,151	7,66E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
0,496	4,038	-1,652	-0,304	-0,157	6,49E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-088-07 Densité brute : 2,508
Teneur vides : 4,3% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (µε)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,0	10	781,2	29,0	16	26 915	4,1	26 846	1 929
-20,0	3	724,8	28,9	16	25 099	4,5	25 020	1 987
-20,0	1	656,1	27,8	15	23 579	4,9	23 492	2 024
-20,0	0,3	629,2	28,4	15	22 131	5,2	22 039	2 015
-20,0	0,1	620,9	29,9	16	20 773	6,2	20 650	2 260
-9,7	10	843,9	40,4	53	20 867	5,9	20 756	2 151
-9,7	3	741,4	39,1	58	18 971	6,9	18 835	2 269
-9,7	1	663,2	38,1	61	17 417	6,8	17 296	2 050
-9,8	0,3	616,7	39,1	63	15 783	6,8	15 671	1 882
-9,8	0,1	580,8	40,5	63	14 343	8,1	14 199	2 032
0,0	10	789,1	50,3	37	15 701	8,3	15 535	2 274
0,0	3	674,7	48,8	39	13 817	9,3	13 637	2 225
0,0	1	604,9	49,1	39	12 330	10,2	12 133	2 194
0,0	0,3	533,6	49,8	39	10 724	11,4	10 514	2 113
0,0	0,1	476,2	50,8	38	9 367	12,9	9 129	2 096
9,9	10	523,0	50,2	15	10 415	13,2	10 142	2 372
9,9	3	423,1	48,7	16	8 690	14,7	8 404	2 212
9,9	1	356,1	48,6	16	7 329	15,7	7 057	1 978
9,9	0,3	299,6	50,0	15	5 990	16,6	5 739	1 716
9,9	0,1	251,9	51,3	14	4 911	18,7	4 653	1 572
20,0	10	310,0	51,9	18	5 977	18,3	5 674	1 881
20,0	3	233,6	49,7	17	4 701	20,1	4 415	1 616
20,0	1	185,5	49,7	14	3 733	20,7	3 493	1 317
20,0	0,3	146,3	51,1	11	2 865	22,3	2 650	1 088
20,0	0,1	113,9	51,2	10	2 224	23,9	2 032	902
29,9	10	173,7	56,1	7	3 094	23,7	2 833	1 244
29,9	3	117,3	51,8	8	2 264	25,3	2 048	966
29,9	1	85,3	50,5	9	1 688	26,2	1 514	745
29,9	0,3	62,1	51,3	9	1 210	27,2	1 076	554
30,0	0,1	45,7	51,1	11	895	28,7	785	430
39,8	10	87,4	57,4	10	1 522	28,7	1 334	732
39,8	3	54,9	51,5	12	1 067	28,6	937	511
39,8	1	39,4	50,9	13	774	29,2	675	378
39,8	0,3	27,8	50,9	14	547	29,5	476	269
39,9	0,1	20,5	51,0	16	402	30,1	348	202

Échantillon : EB-089-07 Densité brute : 2,517
Teneur vides : 4,0% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (µε)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,0	10	808,0	29,0	22	27 822	4,4	27 738	2 158
-20,0	3	755,1	28,9	22	26 159	4,4	26 082	1 998
-20,1	1	680,8	27,7	21	24 619	4,3	24 550	1 841
-20,1	0,3	655,2	28,4	21	23 105	5,4	23 002	2 178
-20,0	0,1	638,3	29,7	25	21 515	5,9	21 400	2 215
-10,2	10	936,1	40,4	29	23 153	5,5	23 046	2 222
-10,2	3	823,8	38,9	31	21 174	6,3	21 046	2 324
-10,2	1	740,8	37,9	32	19 568	6,7	19 435	2 277
-10,2	0,3	695,7	38,8	31	17 909	6,7	17 785	2 102
-10,2	0,1	654,5	40,1	32	16 335	7,8	16 184	2 221
0,1	10	819,9	48,5	43	16 912	8,2	16 737	2 421
0,1	3	726,9	48,6	46	14 968	9,3	14 771	2 420
0,1	1	650,7	48,9	49	13 315	9,9	13 118	2 284
0,1	0,3	575,8	49,5	52	11 636	10,9	11 426	2 200
0,1	0,1	515,2	50,7	52	10 172	12,7	9 922	2 241
10,1	10	529,7	47,5	33	11 163	12,7	10 892	2 445
10,0	3	445,0	47,7	35	9 321	13,9	9 047	2 244
10,0	1	381,5	48,4	37	7 890	15,2	7 615	2 067
10,0	0,3	322,5	49,9	38	6 464	16,8	6 188	1 869
10,0	0,1	271,3	51,2	38	5 299	17,4	5 057	1 584
19,9	10	308,7	47,7	16	6 471	18,1	6 151	2 010
19,9	3	249,0	49,5	17	5 033	19,6	4 742	1 686
19,9	1	200,3	50,0	18	4 006	20,9	3 742	1 429
19,9	0,3	156,4	51,1	18	3 058	22,5	2 826	1 170
19,9	0,1	121,5	51,2	17	2 371	24,0	2 167	963
30,0	10	171,4	50,8	5	3 372	23,9	3 083	1 367
30,0	3	125,5	51,1	5	2 457	25,4	2 219	1 055
30,0	1	93,1	50,7	5	1 835	26,4	1 643	817
30,0	0,3	67,9	51,4	5	1 323	27,4	1 175	608
30,0	0,1	49,6	51,2	5	969	28,4	853	461
39,9	10	85,5	52,4	5	1 631	29,2	1 424	795
39,9	3	57,0	50,7	4	1 124	30,2	971	566
39,9	1	41,0	51,0	4	804	29,9	697	401
39,8	0,3	28,6	51,2	3	559	31,2	478	289
39,8	0,1	20,5	51,1	3	402	31,3	344	209

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 25 mars 2008

Échantillon : EB-090-07 Densité brute : 2,507
Teneur vides : 4,3% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (µε)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,9	10	807,0	29,1	26	27 722	3,5	27 671	1 683
-19,9	3	747,1	28,6	26	26 096	3,7	26 041	1 689
-19,9	1	682,4	27,7	25	24 668	4,4	24 595	1 898
-19,9	0,3	661,8	28,5	24	23 219	4,3	23 153	1 755
-20,0	0,1	646,4	29,7	25	21 765	6,6	21 621	2 498
-9,8	10	887,1	40,5	11	21 888	5,5	21 786	2 110
-9,8	3	782,0	39,0	12	20 069	6,9	19 924	2 409
-9,8	1	703,9	38,0	13	18 535	6,9	18 399	2 240
-9,8	0,3	660,7	39,1	13	16 915	7,4	16 775	2 166
0,1	10	791,2	47,6	26	16 631	8,2	16 461	2 371
0,1	3	709,1	48,3	28	14 675	8,9	14 498	2 273
0,0	1	640,5	48,9	30	13 098	9,9	12 903	2 250
0,0	0,3	570,1	49,7	32	11 459	11,0	11 249	2 185
0,0	0,1	510,4	50,8	33	10 045	12,0	9 826	2 085
10,0	10	535,6	48,6	12	11 026	13,3	10 732	2 528
10,0	3	438,7	47,6	12	9 218	14,1	8 941	2 243
10,0	1	376,2	48,4	12	7 778	15,1	7 507	2 033
10,0	0,3	318,4	50,0	12	6 373	16,9	6 097	1 855
10,0	0,1	267,6	51,2	11	5 226	18,2	4 964	1 632
20,0	10	317,4	47,7	18	6 656	17,7	6 341	2 025
19,9	3	252,7	48,6	16	5 196	19,3	4 904	1 718
20,0	1	206,5	49,8	15	4 145	20,7	3 877	1 468
20,0	0,3	162,0	51,1	13	3 172	21,8	2 946	1 176
20,0	0,1	126,5	51,3	10	2 467	22,7	2 276	952
30,0	10	172,1	51,9	8	3 319	23,9	3 034	1 345
30,0	3	123,7	51,2	7	2 417	25,4	2 184	1 037
30,0	1	92,0	50,8	6	1 811	26,5	1 620	809
30,0	0,3	67,1	51,4	4	1 305	27,2	1 160	597
30,0	0,1	49,1	51,1	3	961	28,8	842	463
40,1	10	85,3	50,5	7	1 690	27,4	1 500	779
40,1	3	57,8	48,9	6	1 182	28,8	1 035	570
40,1	1	43,4	50,7	5	856	29,1	748	416
40,1	0,3	30,9	51,1	4	604	29,3	526	296
40,1	0,1	22,6	51,1	4	443	28,0	391	208

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 25 mars 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

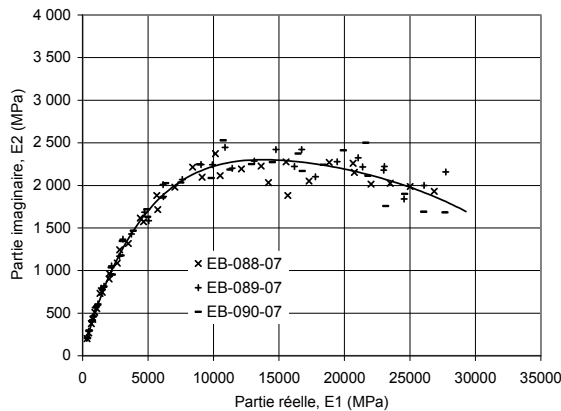
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 70-28

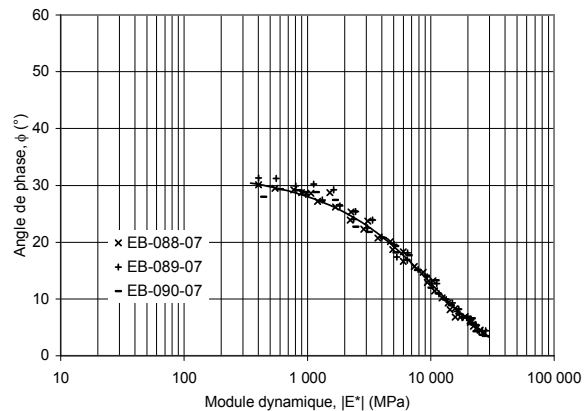
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,2%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

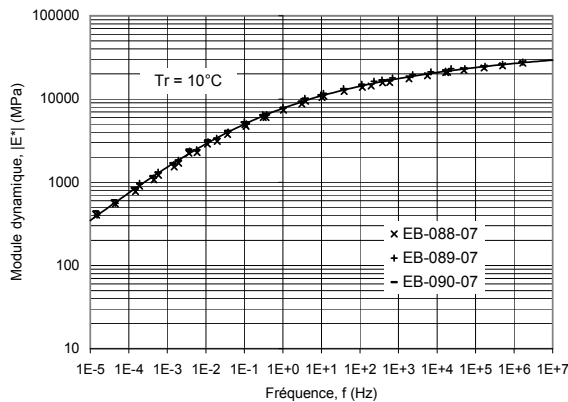
Module complexe dans le plan Cole et Cole



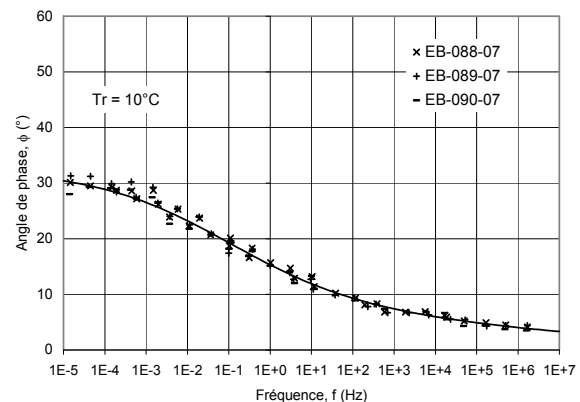
Module complexe dans l'espace de Black



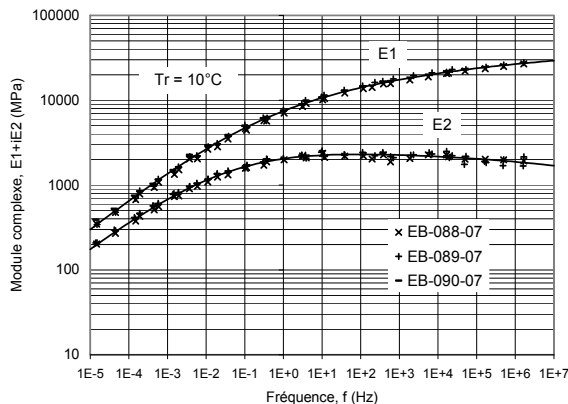
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



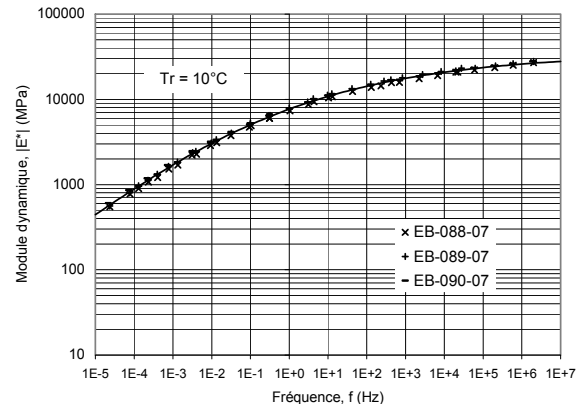
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 25 mars 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 25 mars 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : GB-20
Type bitume : PG 58-28
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 4,2%

Source granulats :
Source bitume :
Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
1,1	39 000	2,584	0,188	0,571	0,086	-0,154	9,36E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
-0,309	4,870	-1,781	-0,435	-0,149	6,36E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-096-07 Densité brute : 2,552
Teneur vides : 4,2% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,4	10	915,8	27,6	43	33 178	2,4	33 149	1 363
-20,4	3	900,9	28,2	43	32 003	3,2	31 952	1 803
-20,5	1	827,0	26,9	46	30 769	3,3	30 720	1 746
-20,4	0,3	813,0	28,0	49	29 086	5,0	28 976	2 523
-10,1	10	1050,7	38,4	26	27 347	4,9	27 247	2 341
-10,1	3	974,6	38,4	28	25 353	6,5	25 190	2 873
-10,0	1	874,9	37,4	30	23 388	6,8	23 222	2 775
-10,0	0,3	823,7	38,6	32	21 363	7,8	21 166	2 889
-10,2	0,1	769,4	40,0	34	19 257	9,6	18 987	3 216
-0,2	10	950,9	46,9	12	20 287	9,1	20 032	3 206
-0,2	3	873,8	48,3	12	18 081	10,9	17 754	3 419
-0,2	1	771,2	48,6	14	15 856	12,8	15 462	3 513
-0,2	0,3	659,7	49,7	16	13 284	15,1	12 828	3 451
-0,2	0,1	560,6	51,1	19	10 963	15,8	10 550	2 980
9,8	10	605,6	48,5	10	12 485	17,7	11 895	3 793
9,8	3	479,5	49,6	11	9 673	20,7	9 051	3 413
9,8	1	369,2	49,5	10	7 452	24,6	6 779	3 097
9,8	0,3	273,2	51,1	9	5 349	28,6	4 695	2 563
9,7	0,1	194,9	51,7	7	3 770	32,3	3 185	2 016
19,9	10	299,3	50,2	6	5 963	29,3	5 200	2 919
19,9	3	206,1	52,7	4	3 907	34,3	3 227	2 202
19,9	1	135,3	52,5	4	2 578	37,7	2 038	1 578
19,9	0,3	81,4	52,0	6	1 566	41,0	1 182	1 027
19,9	0,1	51,7	51,5	7	1 004	42,1	746	673
29,9	10	102,8	48,0	15	2 145	42,0	1 593	1 436
29,9	3	64,5	53,9	11	1 197	46,0	832	861
29,9	1	37,4	53,5	9	699	47,3	474	514
29,9	0,3	20,2	51,4	7	393	48,5	261	294
29,9	0,1	12,1	51,3	7	237	48,0	159	176
39,9	10	29,5	47,9	8	616	52,3	376	488
39,9	3	16,8	53,9	5	312	53,4	186	251
39,9	1	9,1	52,1	3	174	51,4	109	136
39,9	0,3	4,9	50,9	2	96	49,9	62	74
39,9	0,1	3,1	51,0	4	61	48,9	40	46

Échantillon : EB-096-07 Densité brute : 2,554
Teneur vides : 4,2% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,9	10	887,1	27,6	51	32 134	2,3	32 107	1 317
-19,8	3	863,7	28,2	51	30 645	2,6	30 614	1 378
-19,8	1	796,5	27,1	53	29 427	3,0	29 386	1 542
-19,9	0,3	784,9	28,0	51	28 024	3,1	27 983	1 519
-20,2	0,1	772,1	29,2	48	26 446	7,0	26 250	3 208
-10,0	10	1020,7	39,4	19	25 921	5,7	25 793	2 570
-10,0	3	932,5	38,8	20	24 037	6,0	23 907	2 495
-10,1	1	845,5	37,6	22	22 508	6,8	22 347	2 684
-10,1	0,3	785,7	38,5	22	20 391	8,3	20 177	2 942
-10,0	0,1	729,9	40,0	23	18 233	9,2	17 999	2 910
-0,2	10	927,5	46,9	15	19 757	9,2	19 505	3 149
-0,2	3	821,3	47,9	17	17 148	10,5	16 862	3 119
-0,2	1	728,2	48,8	20	14 917	12,3	14 576	3 171
-0,2	0,3	621,1	49,9	24	12 441	14,8	12 027	3 181
-0,2	0,1	525,7	51,0	27	10 304	17,5	9 825	3 102
9,8	10	604,2	51,4	11	11 764	16,8	11 260	3 404
9,8	3	465,7	50,9	14	9 157	20,5	8 576	3 210
9,9	1	354,6	49,9	17	7 101	23,7	6 503	2 852
9,9	0,3	261,5	50,9	19	5 133	27,2	4 564	2 350
9,8	0,1	189,7	51,5	20	3 682	30,9	3 159	1 892
19,8	10	285,2	51,1	12	5 578	29,3	4 866	2 727
19,8	3	192,9	52,1	14	3 701	33,5	3 086	2 043
19,8	1	129,5	52,7	14	2 459	37,1	1 960	1 485
19,8	0,3	79,0	52,2	13	1 512	40,8	1 145	987
19,8	0,1	48,7	51,4	13	947	42,6	697	641
29,8	10	98,6	49,5	14	1 993	41,4	1 495	1 318
29,8	3	57,4	51,0	14	1 127	44,7	801	792
29,8	1	35,4	53,6	13	660	46,2	457	476
29,8	0,3	18,9	51,4	13	368	47,5	249	272
29,8	0,1	11,2	51,2	14	218	47,2	148	160
39,9	10	29,8	50,8	11	586	51,5	364	459
39,9	3	15,8	53,2	11	297	52,8	179	236
39,9	1	8,4	51,9	11	162	52,2	99	128
39,9	0,3	4,4	50,9	11	86	52,3	52	68
39,9	0,1	2,6	50,9	11	50	50,9	32	39

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 8 avril 2008

Échantillon : EB-097-07 Densité brute : 2,553
Teneur vides : 4,2% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	911,2	28,0	13	32 552	2,5	32 521	1 408
-20,2	3	882,5	28,3	13	31 218	3,3	31 166	1 809
-20,2	1	809,7	26,9	14	30 059	4,4	29 973	2 282
-20,2	0,3	796,3	28,1	14	28 363	4,7	28 266	2 344
-20,0	0,1	785,4	29,3	14	26 767	4,7	26 676	2 574
-10,2	10	1050,4	39,5	13	26 624	5,5	26 500	2 204
-10,1	3	950,0	38,8	14	24 485	6,4	24 332	2 736
-10,1	1	853,2	37,6	14	22 661	7,1	22 486	2 812
-10,1	0,3	797,7	38,5	13	20 716	7,8	20 523	2 821
-10,2	0,1	743,5	39,9	15	18 629	10,0	18 344	3 246
-0,3	10	884,4	44,6	15	19 847	9,3	19 584	3 217
-0,3	3	814,0	47,2	16	17 229	10,7	16 932	3 188
-0,3	1	726,9	48,7	17	14 918	12,8	14 547	3 306
-0,3	0,3	619,0	49,7	19	12 444	15,0	12 023	3 211
-0,3	0,1	526,4	50,9	22	10 337	18,5	9 805	3 273
9,8	10	594,8	50,2	5	11 843	17,7	11 284	3 596
9,8	3	460,7	50,6	7	9 111	21,3	8 486	3 317
9,8	1	350,9	50,0	8	7 020	24,6	6 384	2 920
9,8	0,3	257,0	51,2	10	5 019	28,4	4 413	2 389
9,8	0,1	183,3	51,7	11	3 542	31,8	3 010	1 868
19,8	10	298,8	51,5	6	5 807	28,8	5 087	2 801
19,8	3	199,8	51,9	7	3 848	33,9	3 195	2 144
19,8	1	134,0	52,3	7	2 562	36,9	2 050	1 538
19,8	0,3	82,5	52,0	5	1 585	39,8	1 217	1 015
19,8	0,1	50,2	51,3	3	979	41,9	729	654
29,9	10	103,0	50,3	3	2 048	41,8	1 527	1 366
29,9	3	56,5	48,6	2	1 161	45,3	817	825
29,9	1	36,7	54,2	2	677	46,5	466	492
29,9	0,3	19,5	51,6	4	378	47,5	255	279
29,9	0,1	11,5	51,3	6	224	47,8	150	166
39,8	10	30,1	48,9	3	616	51,3	385	480
39,8	3	16,8	54,1	2	311	53,2	186	250
39,8	1	8,9	52,1	1	170	53,4	101	137
39,8	0,3	4,6	51,0	2	90	51,9	56	71
39,8	0,1	2,7	50,8	5	53	54,2	31	43

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 8 avril 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

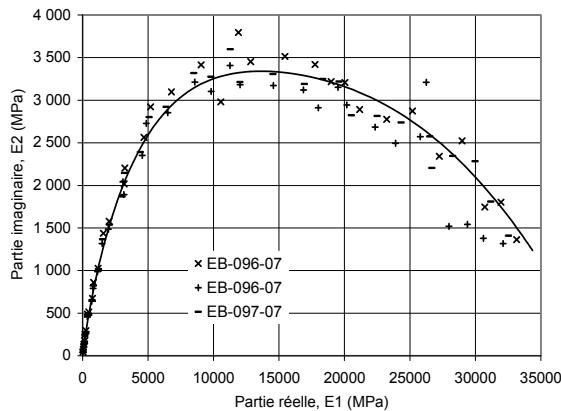
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : GB-20
Type bitume : PG 58-28

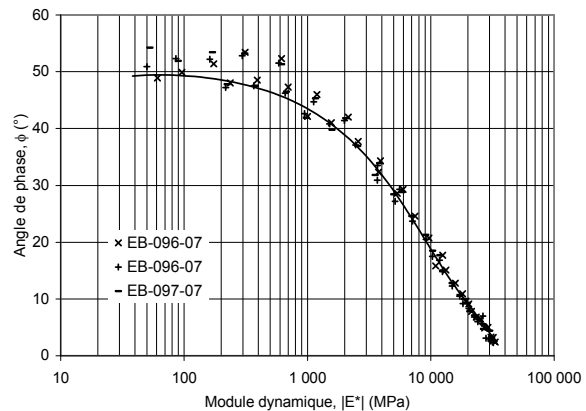
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 4,2%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

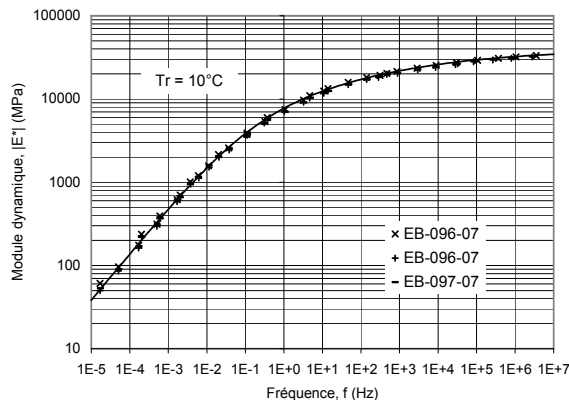
Module complexe dans le plan Cole et Cole



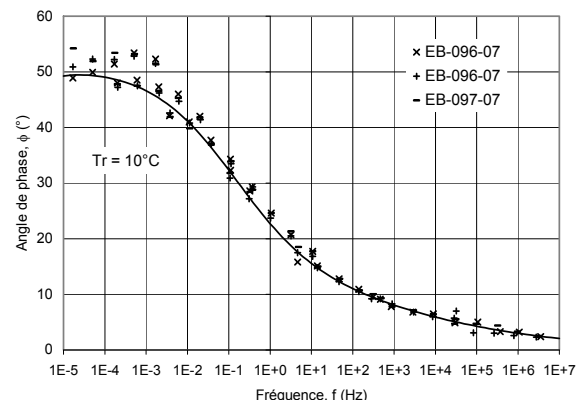
Module complexe dans l'espace de Black



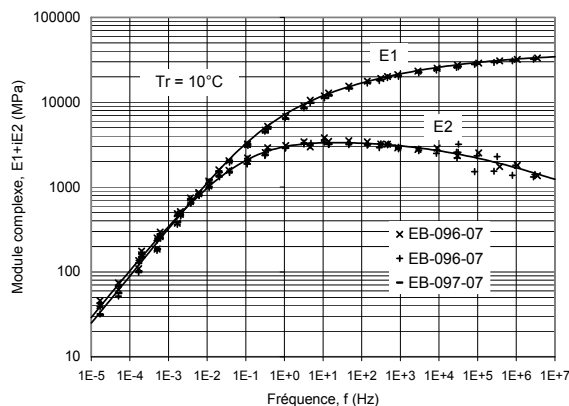
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



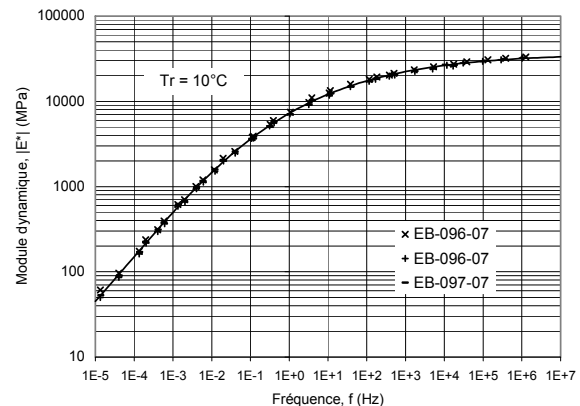
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 8 avril 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 8 avril 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : GB-20

Source granulats :

Type bitume : PG 58-34

Source bitume :

Teneur bitume : 4,3%

Source enrobé :

Laboratoire

Teneur vides : 4,6%

Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

$T_r = 10^\circ\text{C}$
RMSE log E1 = 0,036
RMSE log E2 = 0,032
$R^2 \log E1 = 1,00$
$R^2 \log E2 = 1,00$
n = 104

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
4,3	38 500	2,424	0,164	0,491	0,009	-0,139	8,56E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

$T_r = 10^\circ\text{C}$
RMSE log E* = 0,023
$R^2 \log E^* = 1,00$
n = 104
$E_{\min} = 1,8$
$E_{\max} = 33\ 000$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
0,266	4,252	-1,345	-0,405	-0,145	8,23E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-058-07 Densité brute : 2,543
Teneur vides : 4,6% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,6	10	765,9	28,8	31	26 593	4,7	26 505	2 158
-19,6	3	700,6	28,6	31	24 539	5,3	24 433	2 281
-19,6	1	633,6	27,6	32	22 967	5,3	22 868	2 131
-19,6	0,3	597,9	28,6	33	20 932	7,4	20 757	2 702
-19,4	0,1	575,8	30,2	33	19 082	7,3	18 929	2 413
-10,3	10	664,5	31,5	30	21 062	7,8	20 867	2 855
-10,2	3	564,5	30,0	32	18 829	8,4	18 626	2 753
-10,2	1	498,5	29,6	32	16 828	9,8	16 585	2 850
-10,2	0,3	443,4	30,0	30	14 803	10,9	14 536	2 799
-10,2	0,1	391,0	30,2	27	12 938	12,4	12 635	2 781
-0,2	10	692,6	49,9	10	13 892	12,7	13 554	3 042
-0,2	3	580,7	50,5	10	11 490	15,3	11 083	3 029
-0,2	1	474,3	49,7	9	9 547	16,9	9 137	2 769
-0,2	0,3	381,7	50,2	8	7 600	19,2	7 178	2 496
-0,2	0,1	310,5	51,5	8	6 028	21,6	5 606	2 216
10,1	10	397,4	56,0	16	7 100	22,9	6 543	2 758
10,1	3	287,9	55,6	15	5 180	25,6	4 673	2 236
10,1	1	198,8	51,9	15	3 827	28,5	3 365	1 824
10,1	0,3	136,9	51,5	14	2 659	31,2	2 274	1 377
10,1	0,1	96,2	51,3	13	1 874	32,9	1 574	1 017
19,9	10	254,7	76,3	15	3 338	31,5	2 845	1 746
19,9	3	159,9	72,9	15	2 193	34,5	1 806	1 243
19,9	1	107,7	72,1	15	1 493	35,8	1 212	873
19,9	0,3	69,7	72,0	14	968	37,3	770	586
19,9	0,1	46,4	71,7	12	647	38,3	508	402
30,1	10	96,1	77,9	13	1 233	40,3	940	797
30,1	3	56,6	77,8	11	728	41,9	542	486
30,1	1	34,1	74,9	10	456	42,6	335	309
30,1	0,3	19,4	71,6	8	272	43,2	198	186
30,1	0,1	12,1	71,2	5	170	44,8	121	120
39,8	10	27,2	54,3	12	501	43,6	362	346
39,8	3	16,4	57,5	9	285	43,7	206	197
39,8	1	9,3	52,1	7	178	41,9	133	119
39,8	0,3	5,5	51,1	5	108	40,0	83	70
39,8	0,1	3,7	51,2	7	72	40,8	54	47

Échantillon : EB-059-07 Densité brute : 2,548
Teneur vides : 4,4% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,7	10	786,3	28,1	9	27 999	4,8	27 901	2 345
-19,8	3	739,6	28,6	9	25 898	4,2	25 827	1 912
-19,8	1	669,2	27,6	8	24 244	6,6	24 083	2 794
-19,8	0,3	636,5	28,6	9	22 284	6,4	22 146	2 475
-19,8	0,1	613,6	29,9	9	20 506	7,2	20 346	2 559
-10,0	10	669,3	31,1	8	21 549	7,2	21 377	2 714
-10,0	3	567,8	29,7	8	19 117	9,1	18 875	3 038
-10,0	1	508,7	29,5	8	17 253	9,8	17 003	2 925
-10,1	0,3	451,1	30,0	8	15 037	10,8	14 771	2 817
-10,0	0,1	397,9	30,3	7	13 130	12,4	12 824	2 818
-0,1	10	699,8	48,1	5	14 545	12,9	14 178	3 248
0,0	3	604,6	50,1	6	12 077	15,0	11 664	3 133
0,0	1	496,3	49,6	6	10 008	16,5	9 598	2 837
0,0	0,3	402,4	50,2	7	8 013	18,8	7 585	2 583
0,0	0,1	326,6	51,4	8	6 358	21,5	5 916	2 331
10,1	10	384,2	47,1	9	8 149	20,9	7 610	2 913
10,1	3	302,1	50,2	9	6 023	23,7	5 514	2 424
10,1	1	223,1	49,3	9	4 528	26,0	4 069	1 986
10,1	0,3	164,3	51,4	9	3 195	28,8	2 799	1 541
10,1	0,1	116,9	51,4	9	2 274	30,7	1 956	1 161
20,0	10	237,3	65,5	13	3 623	30,7	3 116	1 848
20,0	3	170,0	72,3	12	2 351	34,1	1 945	1 320
20,0	1	115,2	72,7	11	1 585	36,2	1 279	936
20,0	0,3	72,9	72,0	10	1 012	37,1	807	611
20,0	0,1	47,9	71,6	10	668	39,9	513	429
30,1	10	90,5	67,7	10	1 337	40,1	1 022	861
30,2	3	59,0	75,4	9	782	41,3	587	516
30,2	1	36,4	74,7	9	487	42,5	359	329
30,2	0,3	21,0	71,6	9	293	42,9	214	199
30,1	0,1	13,3	71,3	9	186	42,8	137	127
40,0	10	32,1	60,6	10	529	44,4	378	371
40,0	3	17,6	57,9	10	304	42,2	225	204
40,0	1	10,1	51,9	10	195	41,5	146	129
40,0	0,3	6,2	51,0	10	121	41,8	90	81
39,9	0,1	4,2	51,0	11	82	38,1	65	51

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 7 décembre 2007

Échantillon : EB-060-07 Densité brute : 2,537
Teneur vides : 4,8% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,4	10	808,3	27,7	62	29 136	4,8	29 036	2 419
-20,4	3	777,4	28,6	62	27 156	5,4	27 035	2 561
-20,4	1	709,0	27,8	61	25 497	5,2	25 391	2 322
-20,4	0,3	677,9	28,7	57	23 642	4,9	23 557	2 004
-9,9	10	666,5	31,0	11	21 525	7,9	21 321	2 963
-10,0	3	566,0	29,6	10	19 097	9,1	18 855	3 027
-10,0	1	508,1	29,6	11	17 159	9,4	16 927	2 814
-9,9	0,3	449,6	30,0	12	14 997	11,1	14 718	2 882
-9,9	0,1	397,1	30,4	6	13 044	12,3	12 744	2 780
-0,1	10	709,8	49,3	3	14 401	12,3	14 072	3 057
-0,1	3	602,2	50,2	4	12 001	14,8	11 604	3 063
-0,1	1	496,4	49,7	6	9 988	16,4	9 583	2 815
0,0	0,3	402,5	50,2	7	8 025	18,5	7 609	2 551
-0,1	0,1	327,5	51,3	8	6 386	21,3	5 951	2 316
10,0	10	394,1	48,5	7	8 122	20,8	7 595	2 878
10,0	3	298,2	49,4	8	6 041	23,9	5 521	2 451
10,0	1	221,0	48,9	9	4 522	26,8	4 038	2 036
10,0	0,3	164,4	51,2	10	3 208	28,6	2 815	1 538
10,0	0,1	118,4	51,4	10	2 306	31,3	1 970	1 198
20,0	10	260,2	72,0	6	3 616	31,2	3 091	1 876
20,0	3	174,0	74,0	6	2 353	34,5	1 939	1 332
20,0	1	114,9	72,5	5	1 584	36,4	1 274	940
20,0	0,3	72,6	71,9	4	1 009	38,2	792	624
20,0	0,1	47,5	71,6	4	664	39,6	511	423
29,8	10	91,5	64,0	7	1 430	39,8	1 099	915
29,8	3	60,1	71,7	6	839	41,8	625	558
29,9	1	38,3	73,5	6	521	42,1	387	349
29,9	0,3	22,4	71,6	6	313	43,0	229	213
29,9	0,1	14,2	71,3	5	199	41,9	149	133
40,0	10	34,0	65,6	4	518	45,9	360	372
40,0	3	17,0	58,0	4	292	45,7	204	209
40,0	1	9,3	52,1	4	179	44,6	127	125
39,9	0,3	5,3	51,0	4	105	45,4	73	75
39,9	0,1	3,5	51,0	5	68	45,5	48	49

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 7 décembre 2007

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

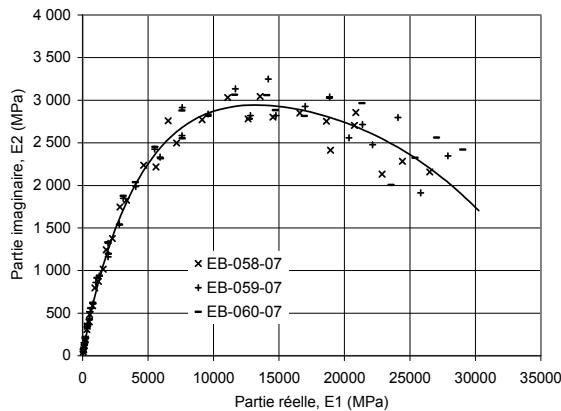
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : GB-20
Type bitume : PG 58-34

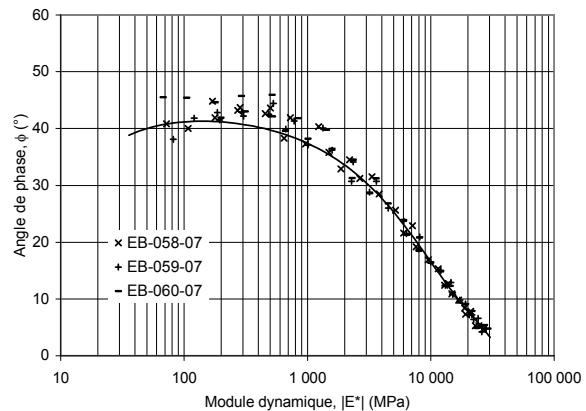
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 4,6%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

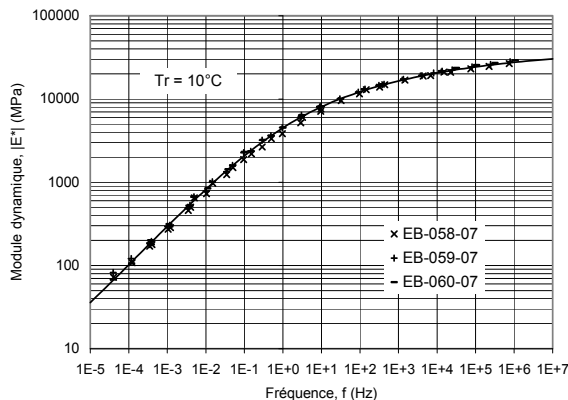
Module complexe dans le plan Cole et Cole



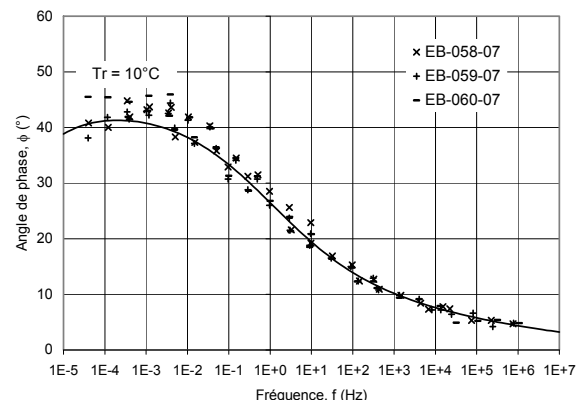
Module complexe dans l'espace de Black



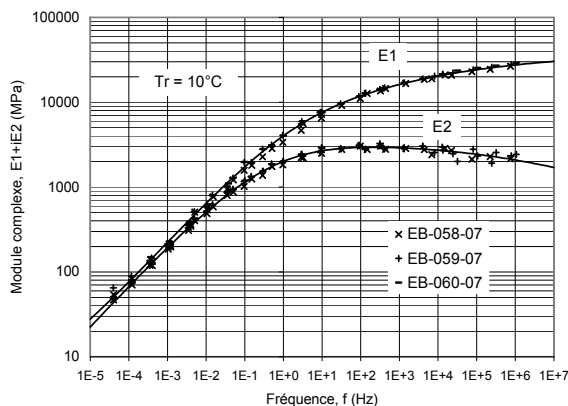
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



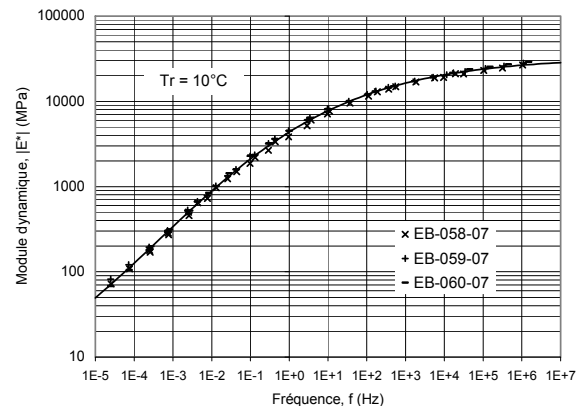
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 7 décembre 2007

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 7 décembre 2007

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : GB-20
Type bitume : PG 64-28
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 5,1%

Source granulats :
Source bitume :
Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
0,1	39 700	2,408	0,149	0,434	0,047	-0,145	8,25E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
0,130	4,421	-1,678	-0,346	-0,150	7,14E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-076-07
Teneur vides : 5,3%
Densité brute : 2,525
Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _r (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,2	10	858,8	28,7	46	29 895	3,6	29 836	1 885
-20,2	3	807,4	28,8	48	28 022	3,8	27 960	1 864
-20,2	1	736,7	27,7	48	26 587	4,5	26 504	2 099
-20,2	0,3	711,9	28,6	48	24 916	4,7	24 834	2 029
-20,2	0,1	693,9	29,7	47	23 359	6,3	23 216	2 583
-10,2	10	977,4	40,3	35	24 251	6,3	24 106	2 643
-10,1	3	865,8	39,1	37	22 133	7,2	21 960	2 760
-10,1	1	774,8	38,0	37	20 393	6,6	20 257	2 352
-10,1	0,3	716,7	38,9	35	18 413	8,1	18 229	2 600
-10,2	0,1	665,6	40,2	36	16 553	9,5	16 325	2 733
-0,2	10	762,5	43,8	24	17 409	9,5	17 172	2 864
-0,2	3	734,6	48,6	25	15 102	11,3	14 810	2 957
-0,2	1	646,1	49,1	25	13 163	11,8	12 886	2 686
-0,2	0,3	556,0	49,8	26	11 172	13,4	10 867	2 591
-0,2	0,1	483,4	51,0	26	9 470	15,4	9 128	2 520
9,7	10	537,9	48,9	18	11 006	15,8	10 591	2 995
9,7	3	441,1	50,0	19	8 819	17,2	8 424	2 609
9,7	1	350,2	48,9	19	7 166	19,0	6 774	2 338
9,7	0,3	282,8	50,6	18	5 585	21,0	5 212	2 006
9,7	0,1	225,4	51,5	17	4 376	22,5	4 044	1 672
19,9	10	301,1	51,5	8	5 850	22,7	5 398	2 255
20,0	3	220,2	51,4	7	4 282	25,3	3 871	1 831
20,0	1	163,8	51,1	7	3 206	26,6	2 867	1 434
20,0	0,3	117,4	51,5	6	2 279	28,3	2 006	1 081
20,0	0,1	85,0	51,4	5	1 654	31,3	1 414	859
30,0	10	144,1	53,2	11	2 708	31,1	2 319	1 397
30,0	3	97,5	54,0	11	1 807	32,4	1 526	968
30,0	1	61,7	49,0	11	1 259	33,8	1 045	701
30,0	0,3	43,1	51,5	11	837	34,7	688	476
30,0	0,1	29,5	51,3	11	576	35,8	467	337
39,8	10	62,3	50,6	5	1 231	35,3	1 004	712
39,8	3	41,6	53,8	5	773	35,8	627	452
39,8	1	27,5	52,9	5	521	35,8	422	305
39,8	0,3	17,5	51,3	5	341	36,5	274	203
39,8	0,1	12,0	51,1	7	236	36,1	190	139

Échantillon : EB-077-07
Teneur vides : 5,0%
Densité brute : 2,531
Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _r (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,9	10	849,2	29,0	8	29 316	4,2	29 239	2 124
-19,9	3	794,7	28,7	8	27 654	4,5	27 567	2 190
-19,9	1	721,3	27,6	8	26 140	4,7	26 052	2 150
-20,0	0,3	696,6	28,3	8	24 586	4,8	24 499	2 065
-19,9	0,1	676,5	29,6	8	22 841	6,7	22 686	2 655
-10,3	10	960,6	40,5	13	23 697	5,9	23 571	2 450
-10,3	3	849,4	39,2	14	21 645	6,7	21 496	2 534
-10,2	1	758,2	38,1	15	19 876	7,5	19 706	2 587
-10,2	0,3	694,8	38,7	14	17 948	8,5	17 749	2 662
-10,2	0,1	652,1	40,1	13	16 264	10,9	15 973	3 065
-0,1	10	781,6	44,0	7	17 783	9,6	17 535	2 960
-0,2	3	750,0	48,2	6	15 544	11,1	15 252	3 001
-0,2	1	664,1	48,8	6	13 614	11,1	13 357	2 631
-0,2	0,3	574,2	49,6	6	11 587	13,1	11 287	2 621
-0,1	0,1	501,6	50,9	5	9 862	15,3	9 514	2 598
10,0	10	559,1	49,4	4	11 310	14,7	10 941	2 865
10,0	3	448,2	49,0	5	9 142	16,9	8 748	2 655
10,0	1	360,0	48,3	6	7 453	18,4	7 071	2 356
10,0	0,3	291,5	50,2	8	5 803	20,5	5 435	2 034
10,0	0,1	232,2	51,4	11	4 515	22,7	4 166	1 740
20,1	10	314,7	51,4	13	6 121	22,7	5 646	2 362
20,1	3	229,5	51,6	14	4 452	25,3	4 024	1 905
20,1	1	169,6	51,1	15	3 319	26,7	2 964	1 493
20,1	0,3	121,0	51,5	15	2 350	29,3	2 049	1 151
20,1	0,1	86,5	51,3	15	1 686	31,2	1 442	873
30,0	10	139,6	46,4	19	3 012	30,2	2 604	1 514
30,0	3	99,7	49,8	18	2 001	31,9	1 698	1 058
30,0	1	69,2	50,2	16	1 380	33,3	1 154	758
30,1	0,3	46,7	51,5	15	907	34,6	747	515
30,0	0,1	31,6	51,2	13	618	36,7	495	369
39,8	10	68,6	54,8	15	1 252	37,2	997	757
39,8	3	41,5	53,5	15	777	38,0	612	479
39,8	1	26,6	52,6	14	507	39,2	393	320
39,8	0,3	16,2	51,1	14	317	39,6	244	202
39,8	0,1	10,6	51,2	14	206	40,5	157	134

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 5 février 2008

Échantillon : EB-078-07
Teneur vides : 5,1%
Densité brute : 2,528
Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _r (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,2	10	835,3	29,1	18	28 678	3,2	28 633	1 600
-20,2	3	779,6	28,9	18	27 001	4,4	26 923	2 049
-20,1	1	713,8	27,8	19	25 720	4,4	25 644	1 970
-20,1	0,3	692,0	28,7	19	24 119	4,7	24 038	1 976
-20,2	0,1	675,8	29,9	19	22 603	5,6	22 494	2 216
-10,0	10	926,2	40,5	18	22 871	6,4	22 728	2 553
-10,1	3	814,1	39,0	19	20 869	6,7	20 728	2 420
-10,1	1	725,6	37,8	20	19 180	7,5	19 016	2 502
-10,1	0,3	670,2	38,9	21	17 241	8,6	17 047	2 578
-10,0	0,1	626,3	40,3	21	15 554	8,8	15 370	2 388
-0,2	10	749,4	44,8	20	16 728	9,6	16 493	2 795
-0,2	3	706,8	48,6	20	14 541	11,1	14 268	2 804
-0,2	1	625,5	49,0	21	12 757	11,5	12 500	2 547
-0,2	0,3	540,8	49,8	21	10 864	13,2	10 577	2 477
-0,2	0,1	469,9	51,0	22	9 217	15,1	8 897	2 405
10,0	10	538,7	51,2	10	10 519	14,8	10 171	2 684
10,0	3	424,9	49,9	11	8 513	16,9	8 146	2 474
10,0	1	339,0	48,7	11	6 955	18,5	6 597	2 204
10,0	0,3	274,6	50,3	11	5 455	20,4	5 114	1 898
10,0	0,1	219,4	51,4	11	4 273	22,1	3 959	1 608
20,0	10	299,6	52,3	11	5 723	22,3	5 295	2 172
20,0	3	215,1	51,1	12	4 207	24,2	3 837	1 725
20,0	1	160,0	50,7	13	3 153	26,2	2 828	1 395
20,0	0,3	115,7	51,4	13	2 250	28,0	1 986	1 058
20,0	0,1	83,7	51,3	13	1 634	30,9	1 402	838
29,8	10	152,5	54,7	11	2 788	29,1	2 437	1 354
29,9	3	99,5	52,7	11	1 886	31,5	1 609	985
29,9	1	68,4	52,1	10	1 313	32,3	1 109	702
29,9	0,3	44,9	51,4	9	874	34,1	724	489
29,9	0,1	30,6	51,1	9	599	35,0	491	343
39,8	10	68,3	53,4	10	1 279	34,7	1 051	729
39,8	3	42,5	52,3	10	813	35,1	665	467
39,8	1	28,7	52,2	9	550	35,8	446	322
39,8	0,3	18,3	51,1	9	359	36,4	289	213
39,8	0,1	12,5	51,1	10	246	37,3	195	149

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 5 février 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

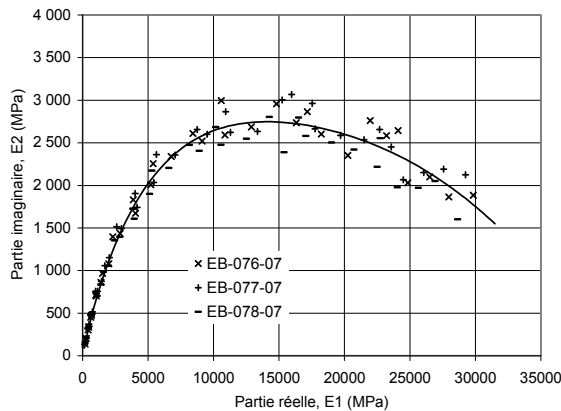
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : GB-20
Type bitume : PG 64-28

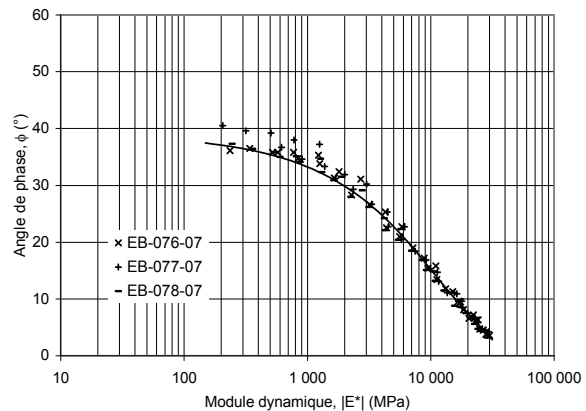
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 5,1%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

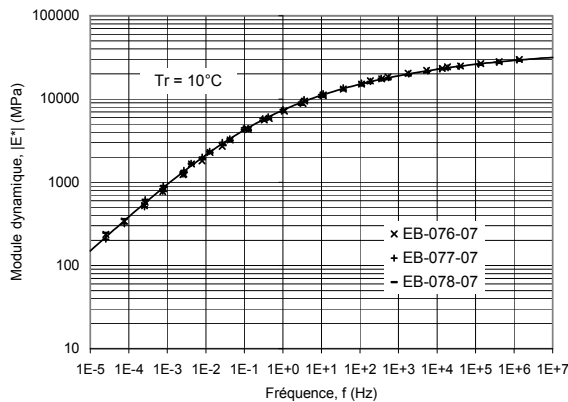
Module complexe dans le plan Cole et Cole



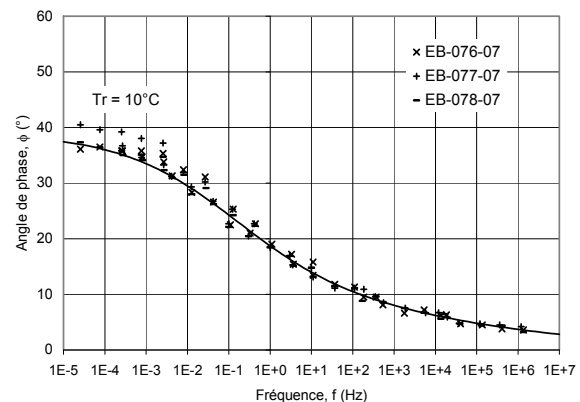
Module complexe dans l'espace de Black



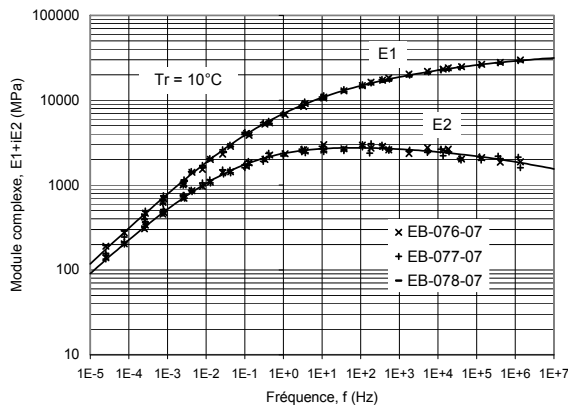
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



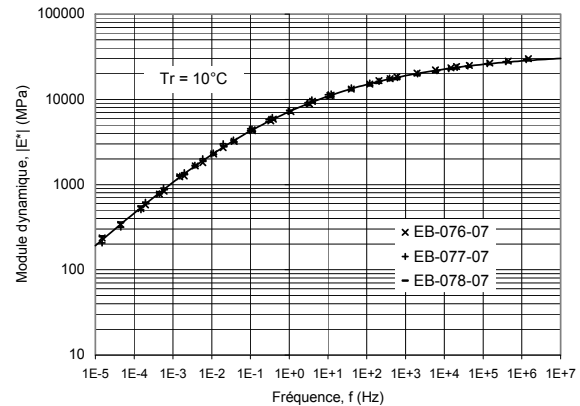
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 5 février 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 5 février 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : GB-20

Source granulats :

Type bitume : PG 64-34

Source bitume :

Teneur bitume : 4,3%

Source enrobé :

Laboratoire

Teneur vides : 3,9%

Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
38,6	40 700	2,350	0,153	0,450	0,018	-0,139	7,85E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
1,035	3,502	-1,284	-0,400	-0,145	6,73E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-067-07 Densité brute : 2,555
Teneur vides : 4,1% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	824,2	28,0	51	29 468	5,3	29 342	2 728
-20,1	3	783,7	28,5	51	27 524	5,3	27 404	2 560
-20,1	1	709,3	27,4	51	25 855	5,5	25 735	2 491
-20,1	0,3	679,7	28,2	50	24 065	5,9	23 936	2 490
-20,1	0,1	662,0	29,7	55	22 287	7,8	22 080	3 032
-10,6	10	924,0	40,1	24	23 063	6,7	22 905	2 698
-10,6	3	812,8	39,0	25	20 834	7,9	20 635	2 873
-10,6	1	716,6	37,9	26	18 930	8,4	18 726	2 766
-10,6	0,3	657,3	38,8	26	16 926	9,3	16 702	2 744
-10,6	0,1	607,6	40,2	27	15 095	11,0	14 816	2 887
0,1	10	721,0	45,6	20	15 803	11,2	15 501	3 073
0,0	3	663,4	49,3	21	13 443	12,8	13 110	2 973
0,0	1	564,4	49,2	22	11 469	14,7	11 094	2 908
0,0	0,3	471,6	49,9	22	9 446	16,4	9 064	2 660
0,0	0,1	398,6	51,4	23	7 759	19,3	7 324	2 559
10,0	10	453,3	47,6	19	9 531	18,0	9 067	2 939
10,0	3	365,2	49,6	19	7 369	20,4	6 906	2 571
10,0	1	275,5	47,8	18	5 761	22,7	5 315	2 223
10,1	0,3	219,8	51,0	17	4 312	24,5	3 925	1 786
10,0	0,1	168,4	51,7	13	3 257	26,1	2 924	1 435
19,9	10	267,6	54,7	16	4 896	26,2	4 391	2 165
19,9	3	185,0	53,9	14	3 432	28,9	3 005	1 658
19,9	1	126,9	51,3	13	2 474	30,5	2 132	1 256
19,9	0,3	87,3	51,5	9	1 695	32,4	1 431	909
19,9	0,1	60,8	51,3	6	1 187	33,1	994	648
29,8	10	105,4	49,9	9	2 113	33,8	1 755	1 175
29,8	3	73,3	54,6	6	1 342	35,6	1 091	781
29,8	1	48,6	54,5	4	892	36,2	720	526
29,8	0,3	29,8	51,4	4	581	36,9	465	348
29,8	0,1	20,4	51,3	5	398	36,2	321	235

Échantillon : EB-068-07 Densité brute : 2,563
Teneur vides : 3,8% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,7	10	819,1	28,4	7	28 834	4,3	28 752	2 169
-19,8	3	773,2	28,7	6	26 932	4,2	26 860	1 968
-19,8	1	696,4	27,5	6	25 307	4,6	25 224	2 047
-19,8	0,3	666,7	28,4	6	23 507	6,8	23 342	2 782
-19,7	0,1	646,8	29,7	9	21 759	5,6	21 655	2 130
-10,1	10	918,5	40,3	2	22 778	6,8	22 616	2 713
-10,1	3	802,3	39,0	2	20 554	7,4	20 381	2 662
-10,2	1	709,8	37,8	0	18 758	8,0	18 578	2 597
-10,2	0,3	647,7	38,9	1	16 671	9,6	16 436	2 793
-10,2	0,1	599,7	40,3	1	14 887	9,9	14 664	2 569
0,1	10	736,6	46,1	10	15 989	10,7	15 712	2 967
0,1	3	671,8	49,1	9	13 692	12,5	13 368	2 963
0,1	1	575,3	49,1	10	11 720	14,0	11 373	2 830
0,1	0,3	486,9	49,8	11	9 784	15,3	9 439	2 575
0,0	0,1	413,4	51,2	11	8 081	17,0	7 728	2 361
9,9	10	470,3	48,0	10	9 792	16,8	9 371	2 837
9,9	3	375,1	48,9	11	7 677	19,7	7 226	2 594
9,9	1	287,2	47,1	11	6 093	21,4	5 674	2 219
9,9	0,3	232,8	50,7	12	4 595	23,4	4 216	1 827
9,9	0,1	179,5	51,5	12	3 485	25,3	3 151	1 490
19,9	10	278,0	55,3	14	5 028	25,8	4 528	2 186
19,9	3	188,9	53,1	14	3 560	28,2	3 137	1 684
19,9	1	131,7	51,0	14	2 584	29,4	2 251	1 268
19,9	0,3	91,6	51,4	14	1 781	31,4	1 521	926
20,0	0,1	64,1	51,2	14	1 252	33,1	1 049	685
30,0	10	118,2	53,3	15	2 217	33,1	1 857	1 209
30,0	3	74,6	52,0	14	1 435	34,5	1 183	812
30,1	1	50,5	52,5	13	962	35,4	785	557
30,1	0,3	32,5	51,4	13	633	35,9	513	371
30,1	0,1	22,5	51,3	13	438	35,0	359	251
39,8	10	44,9	49,2	11	914	38,0	720	563
39,8	3	33,4	59,0	9	566	37,1	452	341
39,8	1	20,6	52,0	9	396	38,4	310	246
39,8	0,3	14,1	51,1	8	276	33,9	229	154
39,8	0,1	10,6	51,1	9	207	32,9	174	113

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 17 décembre 2007

Échantillon : EB-069-07 Densité brute : 2,565
Teneur vides : 3,8% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,7	10	822,6	27,5	29	29 886	3,7	29 823	1 946
-19,8	3	795,2	28,5	28	27 858	4,9	27 756	2 375
-19,8	1	723,7	27,5	29	26 351	5,0	26 249	2 317
-19,9	0,3	691,1	28,4	30	24 361	5,7	24 242	2 405
-19,6	0,1	668,7	29,7	35	22 546	7,8	22 335	3 077
-10,5	10	942,6	40,0	18	23 576	6,5	23 425	2 672
-10,5	3	831,7	38,9	18	21 392	7,3	21 221	2 704
-10,5	1	738,9	37,9	18	19 503	7,7	19 329	2 597
-10,5	0,3	677,2	38,7	18	17 486	8,8	17 282	2 663
-10,5	0,1	626,2	39,6	17	15 812	12,2	15 458	3 328
-0,1	10	743,5	44,8	9	16 586	11,1	16 277	3 190
-0,1	3	694,1	49,1	9	14 138	12,4	13 811	3 025
-0,1	1	598,3	49,2	9	12 163	13,7	11 819	2 871
-0,1	0,3	503,6	49,8	9	10 116	15,3	9 759	2 663
-0,1	0,1	427,8	51,1	9	8 373	17,4	7 991	2 500
9,9	10	466,5	47,4	10	9 844	17,6	9 382	2 980
9,9	3	378,8	49,4	9	7 665	19,9	7 206	2 614
9,9	1	289,2	47,9	9	6 031	22,0	5 591	2 263
9,9	0,3	229,1	50,8	9	4 508	23,9	4 122	1 825
9,9	0,1	174,2	51,5	10	3 384	26,2	3 035	1 497
19,9	10	270,5	53,3	10	5 072	26,1	4 553	2 235
19,9	3	189,2	53,4	9	3 545	28,5	3 114	1 694
19,9	1	130,1	51,1	9	2 544	30,4	2 195	1 286
19,9	0,3	89,0	51,5	9	1 729	32,2	1 462	922
19,9	0,1	61,6	51,2	9	1 205	34,1	997	675
30,1	10	120,9	54,9	11	2 200	33,9	1 826	1 226
30,0	3	75,2	53,4	10	1 409	35,4	1 148	817
30,0	1	49,4	52,4	9	943	36,1	762	556
30,0	0,3	31,3	51,2	9	611	36,6	491	364
30,0	0,1	21,4	51,1	9	419	36,4	337	248
39,8	10	48,2	51,5	6	936	38,1	737	578
39,8	3	34,0	59,6	5	571	37,8	451	351
39,8	1	20,3	52,0	5	391	36,4	315	232
39,8	0,3	13,3	50,9	4	262	35,2	214	151
39,8	0,1	9,5	51,0	4	187	31,3	159	97

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 17 décembre 2007

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

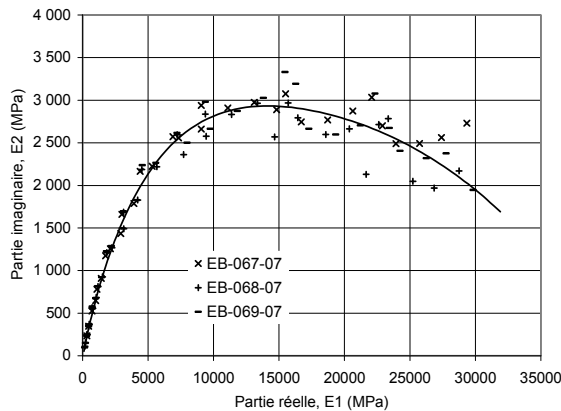
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : GB-20
Type bitume : PG 64-34

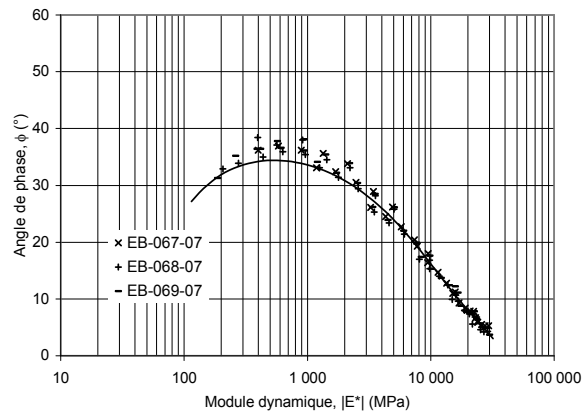
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 3,9%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

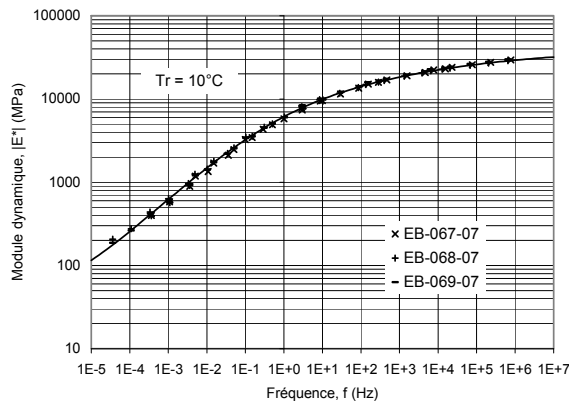
Module complexe dans le plan Cole et Cole



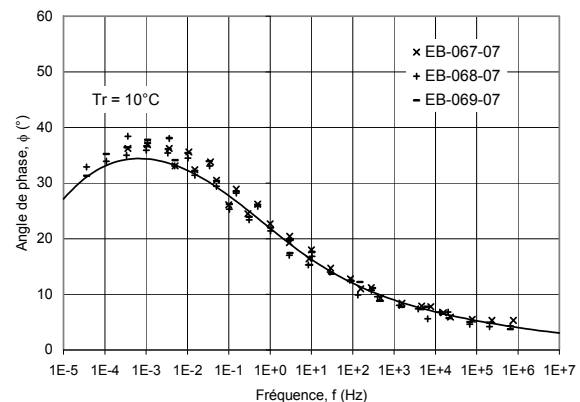
Module complexe dans l'espace de Black



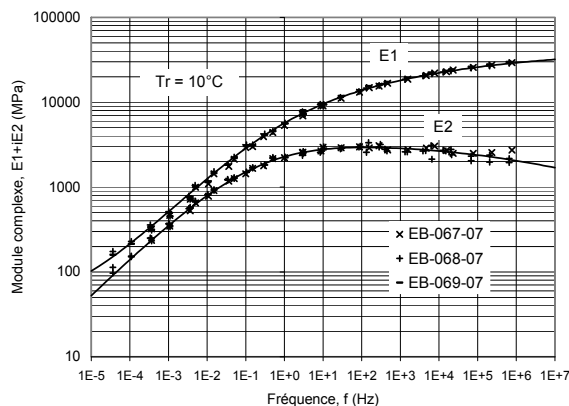
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



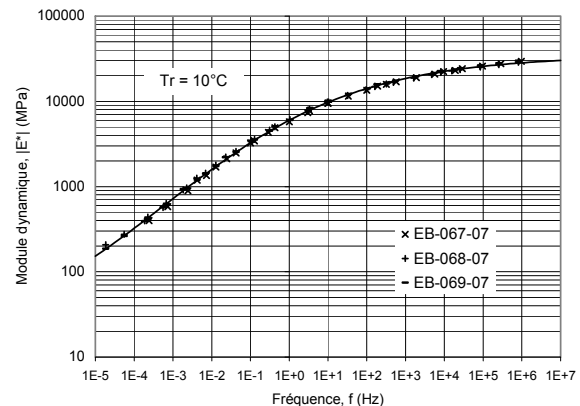
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 17 décembre 2007

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 17 décembre 2007

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-011-07

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : GB-20

Source granulats :

Type bitume : PG 70-28

Source bitume :

Teneur bitume : 4,3%

Source enrobé :

Laboratoire

Teneur vides : 6,1%

Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
0,1	36 600	2,472	0,137	0,397	0,060	-0,152	7,19E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
-0,932	5,497	-1,888	-0,279	-0,157	5,34E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-085-07 Densité brute : 2,504
Teneur vides : 6,0% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,8	10	774,4	28,6	22	27 075	3,3	27 031	1 552
-19,9	3	730,1	28,7	22	25 464	4,3	25 391	1 930
-19,9	1	659,8	27,3	22	24 132	4,7	24 051	1 970
-19,9	0,3	637,1	28,2	22	22 580	5,6	22 471	2 211
-10,2	10	908,1	41,1	17	22 110	5,8	21 997	2 232
-10,2	3	790,9	39,1	18	20 236	6,7	20 096	2 376
-10,2	1	711,4	38,1	17	18 684	6,6	18 562	2 136
-10,2	0,3	660,1	38,9	17	16 985	7,7	16 832	2 278
-10,2	0,1	621,0	40,1	16	15 501	8,7	15 323	2 338
-0,1	10	799,9	48,9	18	16 363	8,7	16 174	2 476
-0,1	3	693,3	48,1	18	14 409	9,9	14 195	2 473
-0,1	1	620,5	48,6	18	12 777	10,5	12 565	2 320
-0,1	0,3	548,7	49,5	17	11 090	11,7	10 860	2 250
-0,1	0,1	489,4	50,9	17	9 610	12,1	9 398	2 006
9,9	10	522,7	49,2	14	10 633	13,8	10 328	2 528
9,9	3	427,8	48,7	14	8 786	15,1	8 482	2 291
9,9	1	353,5	48,2	14	7 335	16,9	7 019	2 129
9,9	0,3	295,8	50,0	13	5 913	18,3	5 616	1 853
9,9	0,1	245,6	51,4	12	4 782	20,4	4 483	1 663

Échantillon : EB-086-07 Densité brute : 2,500
Teneur vides : 6,2% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,8	10	769,6	29,0	4	26 552	3,8	26 492	1 782
-19,8	3	721,2	28,8	5	25 016	3,4	24 971	1 501
-19,7	1	660,7	27,8	5	23 728	4,9	23 640	2 031
-19,7	0,3	637,8	28,6	5	22 295	3,9	22 243	1 518
-19,8	0,1	624,0	29,7	6	20 992	6,3	20 866	2 296
-9,9	10	873,8	41,3	8	21 137	6,3	21 007	2 337
-9,8	3	756,4	39,2	9	19 290	6,7	19 161	2 235
-9,8	1	677,6	38,3	8	17 691	7,2	17 552	2 215
-9,9	0,3	626,9	39,1	8	16 042	7,8	15 894	2 170
-9,9	0,1	585,8	40,3	8	14 551	8,9	14 375	2 261
0,0	10	783,4	51,3	6	15 269	9,3	15 068	2 470
0,0	3	654,8	49,2	5	13 308	10,0	13 107	2 301
0,0	1	575,6	49,0	6	11 750	11,3	11 522	2 301
0,0	0,3	502,8	49,6	6	10 138	12,4	9 902	2 174
0,0	0,1	444,8	51,1	5	8 711	11,8	8 527	1 779
9,9	10	514,6	51,5	27	9 990	14,6	9 667	2 519
9,9	3	409,3	49,8	29	8 220	14,6	7 957	2 066
9,9	1	334,0	48,8	30	6 845	16,5	6 562	1 950
9,9	0,3	277,4	50,1	31	5 531	18,6	5 242	1 765
9,9	0,1	229,1	51,4	30	4 458	19,6	4 199	1 496
19,9	10	296,8	52,3	16	5 679	19,7	5 346	1 916
19,9	3	212,1	49,0	15	4 333	21,3	4 036	1 575
19,9	1	168,9	50,0	14	3 376	23,2	3 103	1 331
19,9	0,3	129,2	51,2	12	2 523	24,3	2 300	1 037
19,9	0,1	97,7	51,2	11	1 905	25,6	1 719	822
29,9	10	146,1	51,4	11	2 841	26,5	2 542	1 268
29,9	3	104,5	51,8	11	2 016	27,5	1 787	932
29,9	1	74,2	50,4	10	1 473	28,1	1 300	693
29,9	0,3	53,0	51,3	9	1 035	29,6	900	511
29,9	0,1	38,0	51,1	9	743	29,3	648	363
39,8	10	67,1	55,5	8	1 210	32,4	1 021	649
39,8	3	42,4	53,0	8	800	33,3	669	439
39,8	1	29,0	52,6	8	551	33,7	458	305
39,8	0,3	18,6	51,0	9	364	34,4	301	206
39,8	0,1	12,8	51,0	9	251	34,5	207	142

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 25 mars 2008

Échantillon : EB-087-07 Densité brute : 2,503
Teneur vides : 6,1% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	767,8	29,5	20	26 062	3,7	26 008	1 683
-20,1	3	714,7	29,1	20	24 552	3,9	24 495	1 679
-20,1	1	655,9	28,2	19	23 230	4,8	23 148	1 948
-20,1	0,3	628,2	28,8	18	21 780	5,0	21 699	1 880
-20,1	0,1	614,5	29,9	20	20 585	5,1	20 504	1 825
-10,2	10	864,9	40,8	38	21 216	5,5	21 120	2 018
-10,2	3	760,9	39,2	41	19 400	6,0	19 293	2 036
-10,2	1	685,5	38,3	44	17 906	6,3	17 799	1 956
-10,2	0,3	638,3	39,2	46	16 278	6,7	16 167	1 896
-10,2	0,1	595,8	40,3	47	14 791	7,5	14 665	1 931
0,1	10	769,9	50,9	20	15 113	10,1	14 878	2 655
0,1	3	644,1	49,0	20	13 148	10,7	12 919	2 442
0,1	1	567,6	49,1	21	11 555	11,1	11 339	2 224
0,1	0,3	493,9	49,7	21	9 935	12,8	9 689	2 197
0,1	0,1	433,8	50,8	20	8 530	14,2	8 271	2 089
10,2	10	511,6	52,6	22	9 725	14,1	9 433	2 364
10,2	3	396,1	49,7	23	7 966	15,7	7 670	2 154
10,2	1	322,0	48,9	23	6 589	17,6	6 279	1 997
10,1	0,3	264,6	50,1	22	5 276	19,1	4 984	1 730
10,0	0,1	217,1	51,3	22	4 232	20,9	3 954	1 508
19,9	10	288,3	51,3	7	5 616	19,7	5 289	1 889
19,9	3	210,3	48,9	6	4 301	21,4	4 004	1 571
19,9	1	167,9	50,2	6	3 342	23,0	3 076	1 308
19,9	0,3	128,1	51,3	6	2 499	24,6	2 272	1 041
19,9	0,1	97,0	51,7	8	1 875	23,9	1 714	759
30,0	10	141,6	51,7	7	2 736	26,6	2 446	1 225
30,1	3	100,8	51,9	9	1 942	27,6	1 721	900
30,1	1	71,7	50,1	10	1 430	28,8	1 253	689
30,0	0,3	51,9	51,3	11	1 012	29,9	878	504
30,0	0,1	37,4	51,1	11	731	30,6	629	372
39,8	10	67,8	55,1	15	1 231	31,7	1 048	646
39,8	3	40,5	49,7	16	816	32,9	684	444
39,8	1	29,0	51,9	16	560	33,6	466	310
39,8	0,3	18,9	51,0	16	371	34,1	307	208
39,8	0,1	13,0	51,0	15	256	35,6	208	149

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 25 mars 2008

Annexe 2

Module complexe des enrobés conditionnés quatre heures

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

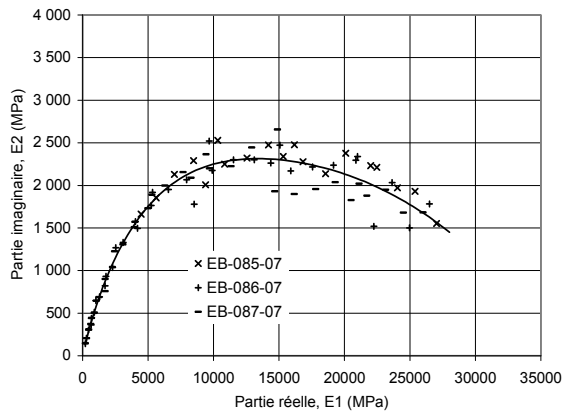
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : GB-20
Type bitume : PG 70-28

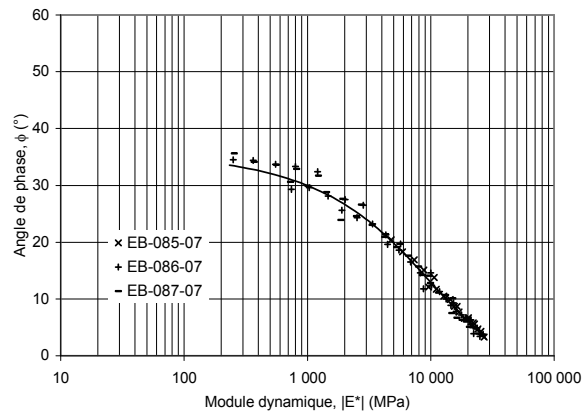
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 6,1%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

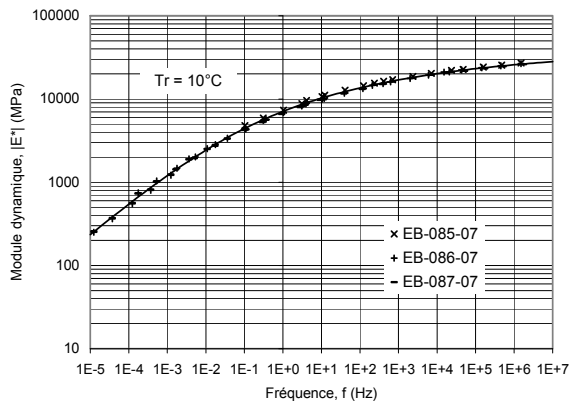
Module complexe dans le plan Cole et Cole



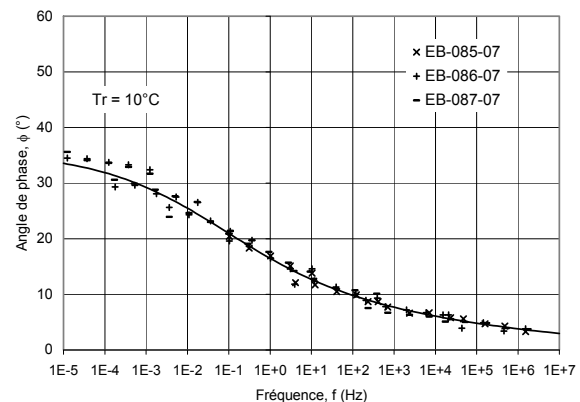
Module complexe dans l'espace de Black



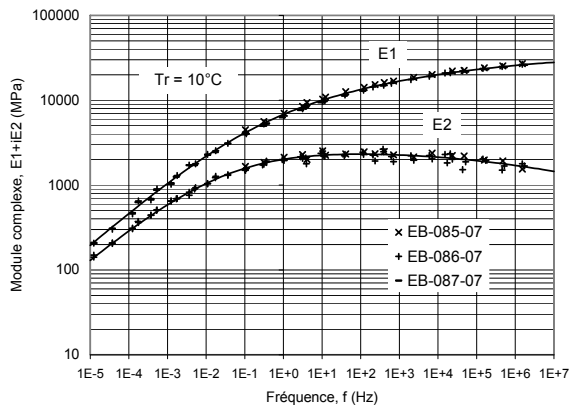
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



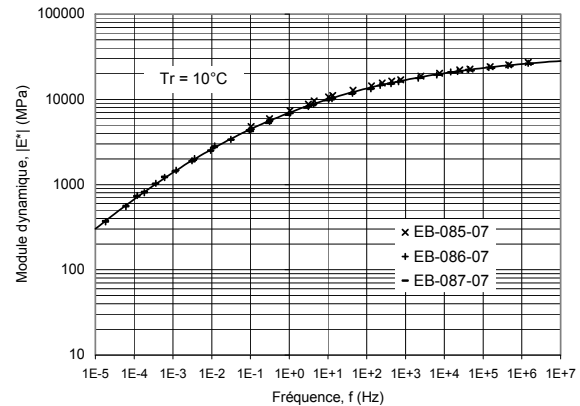
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 25 mars 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 25 mars 2008

Annexe 3

Module complexe des enrobés de l'étude de répétabilité



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-017-08

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-34
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 5,5%

Source granulats :
Source bitume :
Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C
RMSE log E1 = 0,038
RMSE log E2 = 0,028
R ² log E1 = 1,00
R ² log E2 = 1,00
n = 100

E _o	E _∞	δ	k	h	τ _o	a ₁	a ₂
11,5	34 100	2,434	0,170	0,489	0,004	-0,134	6,91E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C
RMSE log E* = 0,024
R ² log E* = 1,00
n = 100
E _{min} = 1,4
E _{max} = 33 200

δ	α	β	γ	a ₁	a ₂
0,147	4,374	-1,141	-0,383	-0,139	6,21E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-004-08 Densité brute : 2,476
Teneur vides : 5,5% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,8	10	722,9	30,1	20	24 016	5,5	23 903	2 321
-19,8	3	644,4	29,2	20	22 055	5,2	21 962	2 014
-19,8	1	575,3	28,2	21	20 419	7,2	20 260	2 546
-19,9	0,3	538,6	28,9	21	18 621	7,0	18 483	2 261
-20,0	0,1	509,8	30,3	21	16 803	8,7	16 612	2 529
-10,1	10	772,7	43,6	12	17 722	8,2	17 542	2 520
-10,1	3	620,3	39,9	13	15 546	9,7	15 322	2 629
-10,1	1	531,9	38,8	14	13 696	11,1	13 439	2 641
-10,1	0,3	463,2	39,6	15	11 703	12,5	11 424	2 540
-10,1	0,1	408,0	40,9	16	9 981	14,0	9 683	2 421
0,0	10	580,3	51,0	5	11 380	14,6	11 014	2 865
0,0	3	466,1	51,0	6	9 145	17,3	8 734	2 713
0,0	1	370,8	50,1	7	7 394	19,5	6 968	2 474
0,0	0,3	287,9	50,6	9	5 685	22,0	5 272	2 129
0,0	0,1	224,0	51,4	10	4 362	24,5	3 970	1 807
10,0	10	277,5	49,1	10	5 653	24,6	5 140	2 353
10,0	3	213,7	53,7	12	3 983	27,6	3 529	1 846
10,0	1	146,9	51,5	12	2 854	30,3	2 464	1 441
10,1	0,3	99,4	52,0	12	1 910	33,4	1 594	1 052
10,1	0,1	67,3	51,7	11	1 303	35,0	1 067	748
20,0	10	125,2	49,5	14	2 529	32,8	2 125	1 371
20,0	3	83,4	51,2	13	1 627	35,6	1 323	947
20,0	1	56,0	51,6	11	1 085	36,7	870	648
20,0	0,3	35,9	52,1	8	690	37,7	547	422
20,0	0,1	24,3	51,7	6	471	36,9	376	283
29,6	10	49,4	52,1	7	949	41,2	714	625
29,6	3	28,6	51,6	5	554	42,3	410	373
29,6	1	18,7	54,8	4	342	41,8	255	228
29,7	0,3	10,6	51,3	3	207	40,9	157	136
29,7	0,1	7,0	51,3	3	137	38,8	107	86
40,0	10	16,0	49,0	5	327	46,1	227	236
40,0	3	8,5	46,0	5	186	45,5	130	133
40,0	1	5,8	52,1	3	111	43,0	81	76
40,0	0,3	3,5	51,3	2	68	41,0	51	44
40,0	0,1	2,2	51,7	1	43	38,2	34	27

Échantillon : EB-005-08 Densité brute : 2,480
Teneur vides : 5,4% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,8	10	719,0	31,0	33	23 229	5,5	23 121	2 240
-19,8	3	626,4	29,4	35	21 340	6,7	21 196	2 472
-19,7	1	559,6	28,4	37	19 699	6,3	19 579	2 166
-19,7	0,3	523,2	29,3	37	17 852	7,7	17 693	2 381
-19,7	0,1	490,8	30,4	35	16 156	8,7	15 970	2 444
-9,8	10	727,3	44,1	27	16 494	9,2	16 280	2 648
-9,8	3	573,8	40,2	31	14 278	10,7	14 031	2 643
-9,8	1	487,9	39,3	33	12 421	12,0	12 148	2 589
-9,9	0,3	419,1	39,9	35	10 504	13,8	10 199	2 514
-9,9	0,1	361,5	41,0	38	8 808	17,4	8 403	2 640
-0,1	10	568,5	53,7	13	10 579	16,2	10 160	2 950
-0,1	3	434,7	51,3	14	8 476	17,5	8 083	2 552
-0,1	1	342,2	50,3	13	6 806	19,9	6 402	2 312
-0,1	0,3	264,8	50,8	13	5 216	22,2	4 829	1 973
-0,1	0,1	204,5	51,5	12	3 974	24,7	3 611	1 660
9,9	10	268,9	52,0	12	5 170	25,2	4 680	2 197
9,9	3	196,9	54,3	11	3 627	28,3	3 194	1 718
9,9	1	133,3	51,5	9	2 589	30,8	2 224	1 326
9,9	0,3	90,1	51,9	7	1 737	33,0	1 457	946
9,9	0,1	61,0	51,6	5	1 182	34,9	970	676
19,9	10	112,2	48,3	9	2 323	33,0	1 949	1 264
20,0	3	73,2	49,6	6	1 476	35,4	1 203	855
20,0	1	50,0	51,4	4	972	37,1	776	586
20,0	0,3	31,9	51,9	4	615	37,8	486	377
20,0	0,1	21,2	51,6	5	411	37,7	325	251
29,8	10	48,0	55,9	8	858	39,9	659	550
29,8	3	27,0	53,2	5	508	41,4	381	336
29,8	1	17,1	53,7	4	319	40,0	244	205
29,8	0,3	10,2	51,1	3	199	38,7	155	125
29,8	0,1	6,9	51,2	3	134	35,8	109	79
40,2	10	15,3	52,8	3	290	45,5	203	207
40,2	3	7,3	44,1	2	166	43,3	121	114
40,2	1	5,0	48,8	1	103	41,7	77	68
40,2	0,3	3,4	51,2	2	66	39,1	51	42
40,2	0,1	2,4	51,4	3	46	34,4	38	26

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 10 juin 2008

Échantillon : EB-006-08 Densité brute : 2,477
Teneur vides : 5,5% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,0	10	723,0	30,9	29	23 365	5,0	23 277	2 022
-20,0	3	630,5	29,3	31	21 538	6,3	21 409	2 353
-20,0	1	557,6	28,2	31	19 742	6,6	19 612	2 262
-20,0	0,3	520,6	29,0	33	17 969	8,0	17 796	2 489
-19,9	0,1	494,1	30,3	32	16 326	9,7	16 094	2 742
-9,9	10	753,1	43,9	12	17 165	8,7	16 969	2 591
-9,9	3	601,4	40,1	14	14 984	10,7	14 724	2 781
-9,9	1	516,0	39,2	14	13 172	11,8	12 892	2 704
-9,9	0,3	446,4	39,7	14	11 240	13,2	10 945	2 561
-10,0	0,1	389,1	41,0	14	9 492	15,6	9 144	2 545
0,1	10	568,1	52,1	7	10 910	14,9	10 542	2 808
0,0	3	445,1	51,0	8	8 730	17,3	8 334	2 601
0,0	1	352,4	50,2	9	7 025	19,9	6 607	2 386
0,0	0,3	272,1	50,6	9	5 373	22,4	4 968	2 047
0,0	0,1	210,5	51,4	9	4 095	25,8	3 687	1 781
10,0	10	267,8	49,1	10	5 459	24,5	4 966	2 267
10,0	3	192,1	49,6	10	3 870	27,6	3 428	1 795
10,0	1	141,9	51,2	10	2 769	30,2	2 394	1 391
10,0	0,3	96,4	51,9	9	1 860	32,7	1 564	1 006
10,0	0,1	65,5	51,7	7	1 268	35,4	1 033	735
20,1	10	111,9	46,0	10	2 399	33,6	1 999	1 326
20,0	3	76,3	50,0	8	1 525	35,9	1 235	894
20,0	1	51,6	51,8	7	997	37,3	793	604
20,0	0,3	32,3	51,9	6	622	38,1	489	384
20,0	0,1	20,7	51,5	5	402	40,4	306	260
40,1	10	17,3	53,9	3	322	44,8	228	227
40,1	3	8,2	43,7	5	188	43,1	137	128
40,1	1	5,8	49,4	7	117	40,5	89	76
40,1	0,3	3,9	51,2	9	76	36,9	61	46
40,1	0,1	2,8	51,7	12	54	32,9	45	29

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 10 juin 2008

Annexe 3

Module complexe des enrobés de l'étude de répétabilité

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

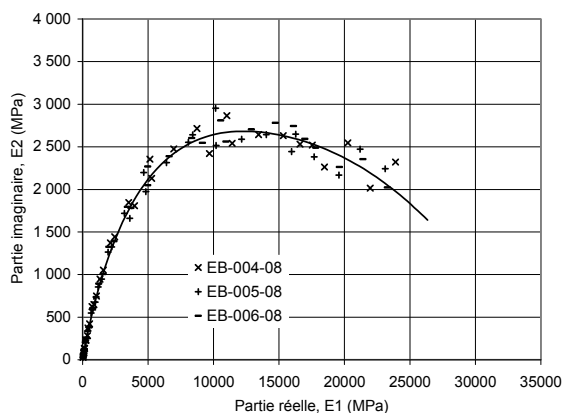
Projet : AM-017-08
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-34

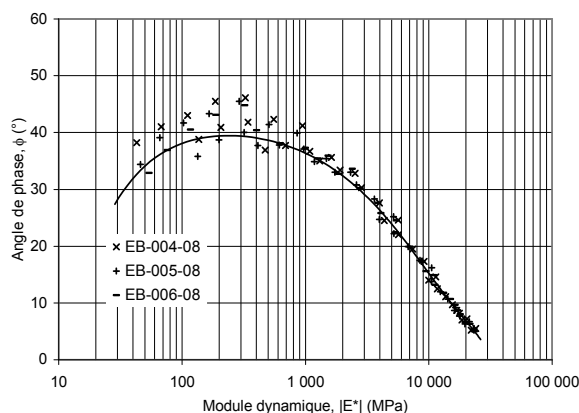
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 5,5%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

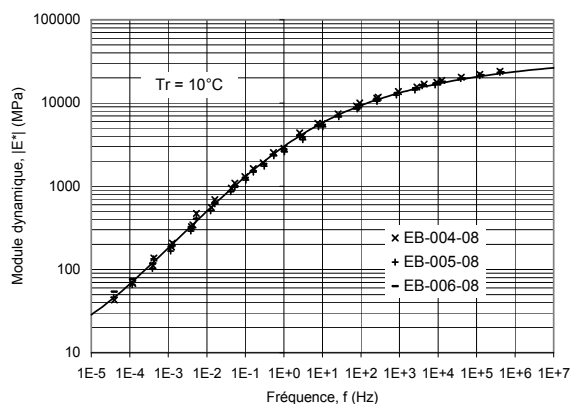
Module complexe dans le plan Cole et Cole



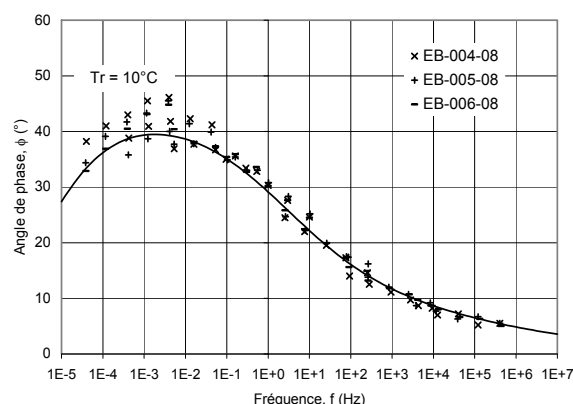
Module complexe dans l'espace de Black



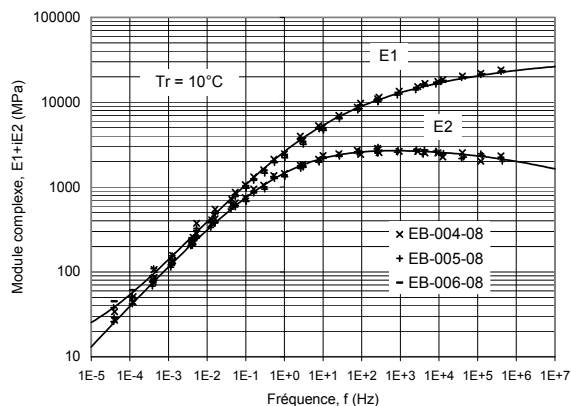
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



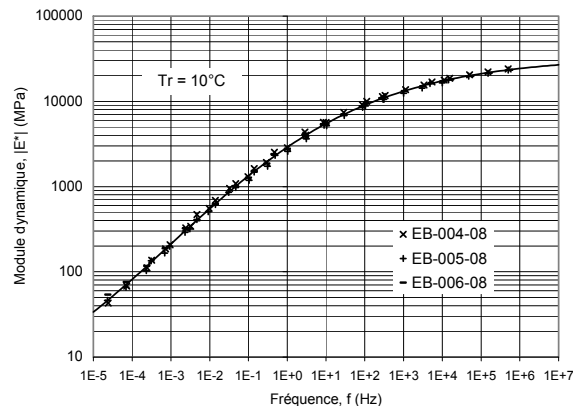
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 10 juin 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 10 juin 2008

Annexe 3

Module complexe des enrobés de l'étude de répétabilité



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-017-08

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14

Source granulats :

Type bitume : PG 58-34

Source bitume :

Teneur bitume : 4,8%

Source enrobé :

Laboratoire

Teneur vides : 4,5%

Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

$T_r = 10^\circ\text{C}$
RMSE log E1 = 0,038
RMSE log E2 = 0,022
$R^2 \log E1 = 1,00$
$R^2 \log E2 = 1,00$
n = 100

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
8,8	36 200	2,173	0,162	0,463	0,005	-0,135	6,78E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

$T_r = 10^\circ\text{C}$
RMSE log E* = 0,023
$R^2 \log E^* = 1,00$
n = 100
$E_{\min} = 2,5$
$E_{\max} = 34 800$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
0,396	4,145	-1,172	-0,385	-0,139	6,03E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-007-08 Densité brute : 2,499
Teneur vides : 4,7% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	765,4	30,2	12	25 366	4,7	25 282	2 067
-20,1	3	682,4	29,2	12	23 380	5,6	23 267	2 293
-20,1	1	613,3	28,1	12	21 814	6,1	21 691	2 307
-20,2	0,3	575,7	28,9	12	19 906	7,3	19 745	2 524
-20,1	0,1	545,6	30,1	11	18 128	7,8	17 958	2 472
-10,1	10	817,3	43,1	10	18 955	8,5	18 747	2 801
-10,1	3	665,5	39,9	11	16 694	9,4	16 468	2 735
-10,1	1	576,4	38,9	11	14 803	10,9	14 535	2 805
-10,1	0,3	504,9	39,6	12	12 756	12,2	12 467	2 697
-10,1	0,1	446,1	40,6	13	10 984	15,2	10 599	2 883
0,1	10	623,7	50,5	8	12 358	14,2	11 980	3 030
0,1	3	508,4	50,6	8	10 039	16,3	9 637	2 810
0,1	1	408,9	49,9	9	8 187	18,5	7 766	2 591
0,1	0,3	322,6	50,6	10	6 379	21,0	5 955	2 286
0,0	0,1	253,9	51,3	10	4 952	23,4	4 546	1 964
9,9	10	307,8	46,2	16	6 669	22,6	6 157	2 563
9,9	3	232,5	48,0	16	4 840	25,4	4 372	2 075
9,9	1	174,4	49,2	16	3 548	28,0	3 132	1 666
9,9	0,3	126,5	51,6	15	2 451	30,6	2 109	1 249
9,9	0,1	88,3	51,5	14	1 714	33,4	1 431	943
19,9	10	144,2	47,7	18	3 020	31,6	2 573	1 581
19,9	3	101,5	52,2	17	1 946	34,6	1 602	1 106
19,9	1	67,5	52,0	15	1 297	36,4	1 045	769
19,9	0,3	42,6	52,2	14	816	37,5	647	497
20,0	0,1	27,5	51,2	11	537	38,7	419	335
30,1	10	55,5	47,9	12	1 159	39,0	900	730
30,1	3	36,9	53,5	11	690	40,4	525	447
30,0	1	22,3	50,7	10	439	40,0	337	282
30,0	0,3	14,2	51,2	9	277	38,1	218	171
30,1	0,1	9,6	51,0	9	188	37,5	149	115
40,1	10	21,5	49,5	10	435	42,9	318	296
40,1	3	12,7	50,1	9	252	42,2	187	169
40,1	1	8,3	52,4	7	158	40,9	119	103
40,1	0,3	5,1	51,3	6	100	38,8	78	63
40,1	0,1	3,6	51,4	4	70	33,9	58	39

Échantillon : EB-009-08 Densité brute : 2,504
Teneur vides : 4,5% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,0	10	766,0	29,9	24	25 616	4,4	25 539	1 981
-20,0	3	683,5	29,0	23	23 591	5,5	23 480	2 278
-20,0	1	617,6	28,0	23	22 022	6,6	21 876	2 526
-20,0	0,3	586,1	29,0	22	20 204	7,3	20 043	2 551
-20,0	0,1	554,4	30,1	21	18 406	8,7	18 192	2 798
-9,9	10	824,7	43,0	21	19 175	8,5	18 966	2 820
-10,0	3	673,6	39,8	23	16 918	10,1	16 654	2 976
-10,0	1	583,5	38,9	23	14 993	10,8	14 725	2 822
-10,0	0,3	513,5	39,7	24	12 925	12,4	12 623	2 777
-10,0	0,1	453,0	40,8	24	11 101	13,3	10 805	2 548
-0,3	10	715,7	56,6	5	12 650	14,1	12 269	3 078
-0,3	3	523,7	50,5	5	10 365	15,6	9 986	2 779
-0,3	1	425,1	49,9	5	8 522	17,7	8 117	2 594
-0,3	0,3	338,2	50,5	6	6 695	20,2	6 282	2 315
-0,3	0,1	268,7	51,3	7	5 237	22,4	4 840	2 000
9,9	10	323,2	48,4	11	6 679	22,6	6 169	2 562
9,9	3	242,2	49,7	12	4 878	25,6	4 399	2 109
9,9	1	172,6	48,0	13	3 599	27,3	3 197	1 652
9,9	0,3	129,1	51,6	12	2 500	30,0	2 165	1 252
9,9	0,1	91,3	51,7	12	1 767	32,8	1 485	958
30,1	10	56,0	46,5	6	1 205	38,0	950	741
30,1	3	37,5	52,4	2	717	39,0	557	451
30,1	1	23,0	50,0	2	459	38,9	357	288
30,1	0,3	14,9	51,2	4	291	37,9	230	179
30,1	0,1	9,9	51,2	6	193	35,6	157	112
40,2	10	21,4	51,7	2	414	44,0	297	288
40,2	3	12,1	51,3	4	236	43,5	171	162
40,2	1	7,3	49,9	5	147	42,1	109	98
40,2	0,3	4,6	51,3	5	90	40,8	68	59
40,2	0,1	3,0	51,5	5	59	38,9	46	37

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 10 juin 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 10 juin 2008

Annexe 3

Module complexe des enrobés de l'étude de répétabilité

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

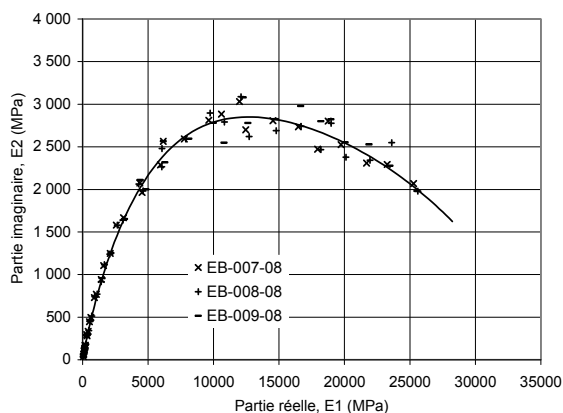
Projet : AM-017-08
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-34

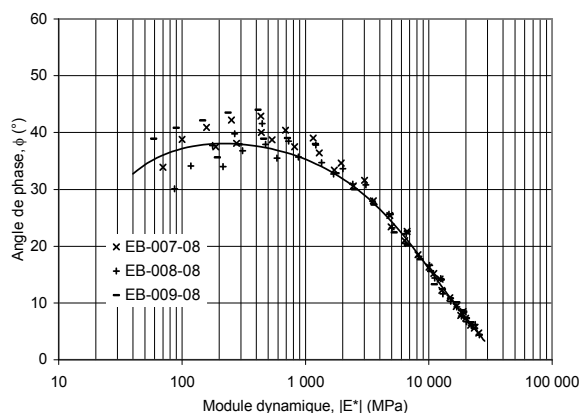
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,5%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

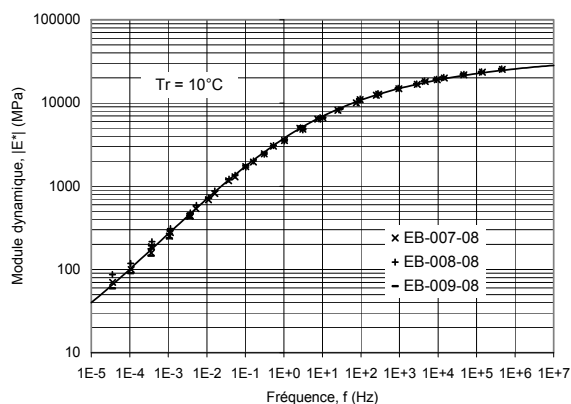
Module complexe dans le plan Cole et Cole



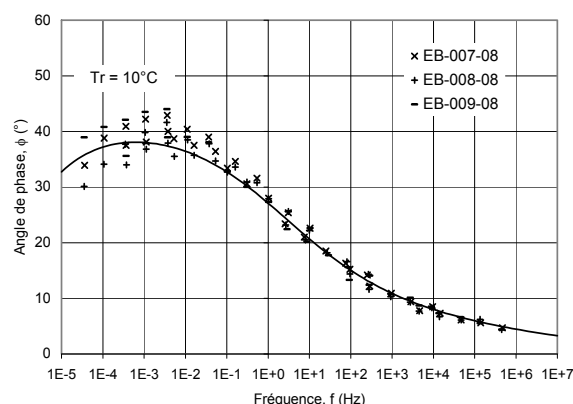
Module complexe dans l'espace de Black



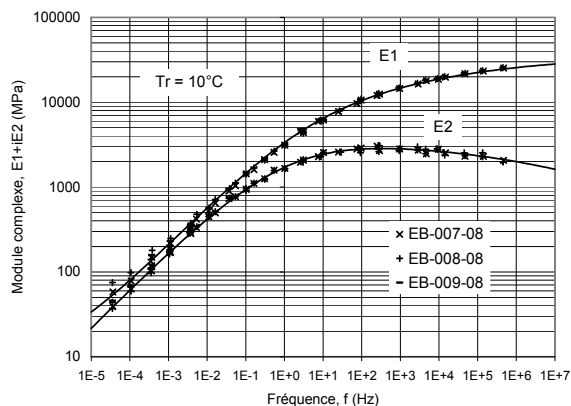
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



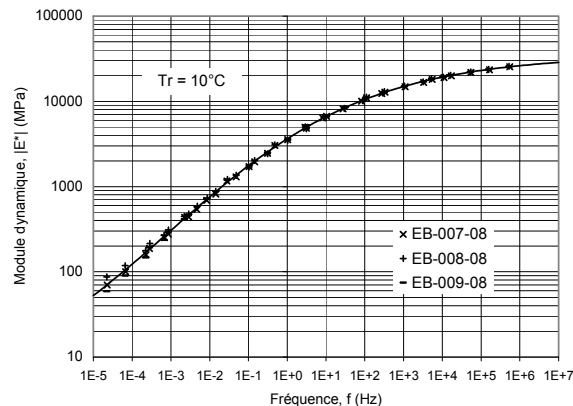
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 10 juin 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 10 juin 2008

Annexe 3

Module complexe des enrobés de l'étude de répétabilité



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-017-08

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-34
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 5,6%

Source granulats :
Source bitume :
Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
1,0	33 300	2,006	0,163	0,465	0,004	-0,136	6,20E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
0,157	4,375	-1,204	-0,379	-0,142	5,80E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-010-08
Teneur vides : 5,6%
Densité brute : 2,473
Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,2	10	731,5	29,6	18	24 753	5,0	24 658	2 165
-20,1	3	669,7	29,1	19	22 986	5,3	22 888	2 121
-20,1	1	604,4	28,3	20	21 393	5,9	21 282	2 183
-20,1	0,3	568,9	28,9	20	19 676	6,6	19 544	2 274
-20,1	0,1	542,2	30,1	18	18 015	5,7	17 925	1 792
-9,9	10	777,5	42,5	17	18 295	8,1	18 112	2 585
-9,9	3	642,3	39,7	17	16 164	9,4	15 949	2 627
-9,9	1	557,1	38,8	16	14 367	10,8	14 114	2 683
-9,9	0,3	490,7	39,7	15	12 375	12,2	12 096	2 613
-9,9	0,1	432,3	40,2	12	10 761	14,7	10 411	2 723
-0,2	10	628,0	51,1	12	12 283	14,8	11 875	3 139
-0,2	3	508,9	50,9	12	10 004	16,0	9 616	2 759
-0,2	1	411,0	50,0	14	8 213	18,0	7 813	2 531
-0,2	0,3	324,4	50,6	15	6 410	20,9	5 989	2 286
-0,2	0,1	257,4	51,4	16	5 010	22,2	4 638	1 893
9,9	10	304,4	47,4	8	6 427	22,7	5 930	2 479
9,9	3	238,2	51,3	9	4 642	25,8	4 179	2 020
9,9	1	168,9	49,6	9	3 406	28,4	2 996	1 620
9,9	0,3	121,4	51,7	9	2 350	30,8	2 019	1 202
9,9	0,1	84,8	51,6	9	1 644	33,1	1 378	898
19,9	10	142,9	52,4	6	2 727	33,5	2 275	1 504
20,0	3	90,7	52,2	6	1 739	35,8	1 412	1 016
20,0	1	59,7	52,6	6	1 135	38,1	893	701
20,0	0,3	36,6	52,1	7	703	39,6	542	448
20,0	0,1	23,7	51,4	10	462	39,8	355	295
29,9	10	53,3	52,0	11	1 025	40,7	777	668
29,9	3	31,2	51,0	12	611	40,9	462	400
29,9	1	19,6	50,5	14	389	40,5	295	253
29,9	0,3	12,5	51,2	17	245	40,0	187	157
29,9	0,1	8,5	51,4	19	164	35,4	134	95
39,9	10	17,2	46,7	5	367	44,6	261	258
39,9	3	10,5	51,6	5	203	44,5	145	142
39,9	1	6,5	51,5	6	126	42,4	93	85
39,9	0,3	4,0	51,2	6	78	39,7	60	50
39,9	0,1	2,7	51,6	5	52	36,2	42	31

Échantillon : EB-011-08
Teneur vides : 5,6%
Densité brute : 2,474
Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	734,3	30,0	7	24 482	4,3	24 412	1 854
-20,1	3	664,9	29,4	7	22 645	5,3	22 549	2 081
-20,0	1	597,6	28,4	7	21 048	6,0	20 931	2 217
-20,0	0,3	562,6	29,1	8	19 363	6,7	19 232	2 251
-20,1	0,1	533,7	30,2	9	17 657	9,2	17 431	2 816
-9,9	10	778,3	42,4	9	18 343	8,2	18 156	2 615
-9,8	3	641,6	39,7	9	16 177	9,4	15 958	2 652
-9,9	1	555,4	38,8	9	14 297	11,0	14 034	2 728
-9,9	0,3	489,4	39,6	10	12 366	12,1	12 093	2 588
-10,0	0,1	429,9	40,7	11	10 551	13,7	10 253	2 492
-0,2	10	638,8	54,2	10	11 790	14,7	11 407	2 983
-0,2	3	486,2	50,8	12	9 569	16,7	9 167	2 745
-0,2	1	389,8	50,0	13	7 790	18,6	7 382	2 488
-0,2	0,3	305,3	50,6	15	6 036	21,4	5 619	2 207
-0,2	0,1	237,9	51,3	17	4 636	23,4	4 254	1 844
9,9	10	302,8	49,6	14	6 099	22,8	5 624	2 360
9,9	3	229,7	52,3	17	4 390	26,4	3 932	1 951
9,9	1	159,4	49,8	20	3 198	28,6	2 809	1 529
9,9	0,3	113,7	51,6	21	2 203	31,1	1 885	1 139
9,9	0,1	79,3	51,5	22	1 539	33,9	1 278	858
19,9	10	127,0	49,0	20	2 594	33,0	2 175	1 413
19,9	3	84,3	51,2	20	1 648	36,4	1 327	977
19,9	1	56,3	52,7	19	1 069	37,9	844	657
19,9	0,3	34,6	52,1	19	663	39,5	511	422
19,9	0,1	22,4	52,1	18	430	39,9	330	276
29,9	10	51,5	50,5	16	1 020	40,1	779	657
29,9	3	33,4	54,8	15	609	40,2	465	394
29,9	1	20,2	51,2	13	393	39,2	305	249
29,9	0,3	12,8	51,1	11	251	38,4	196	156
29,9	0,1	8,9	51,1	10	173	37,1	138	105
40,0	10	18,1	55,1	10	329	46,2	227	238
40,0	3	9,7	53,0	9	182	45,7	127	130
40,0	1	5,7	51,5	9	111	44,0	80	77
40,0	0,3	3,5	51,0	9	70	40,7	53	45
40,0	0,1	2,4	51,2	10	47	40,5	36	31

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 31 juillet 2008

Échantillon : EB-012-08
Teneur vides : 5,5%
Densité brute : 2,478
Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _{ε} (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,9	10	727,0	29,9	23	24 341	4,5	24 267	1 895
-19,9	3	648,4	29,0	23	22 367	5,7	22 256	2 232
-19,9	1	587,2	28,1	23	20 864	6,3	20 737	2 297
-20,0	0,3	555,9	29,0	23	19 147	7,2	18 997	2 395
-20,0	0,1	524,3	30,3	24	17 303	7,5	17 157	2 245
-10,1	10	767,6	42,4	29	18 104	8,4	17 912	2 631
-10,1	3	633,4	39,8	30	15 927	9,5	15 708	2 629
-10,1	1	548,2	38,9	31	14 105	10,8	13 857	2 633
-10,1	0,3	481,3	39,6	31	12 158	12,4	11 875	2 607
-10,1	0,1	423,7	40,8	31	10 392	14,7	10 051	2 639
-0,2	10	638,8	53,6	11	11 917	13,8	11 573	2 843
-0,2	3	490,1	50,5	12	9 708	16,8	9 293	2 809
-0,2	1	393,4	49,9	12	7 879	18,6	7 469	2 508
-0,2	0,3	308,5	50,6	12	6 100	21,2	5 687	2 207
-0,2	0,1	241,3	51,4	11	4 695	23,7	4 300	1 884
9,9	10	311,8	50,3	6	6 196	22,9	5 706	2 415
9,9	3	234,6	52,6	6	4 463	26,0	4 012	1 955
9,9	1	163,9	50,3	6	3 259	28,7	2 859	1 565
9,9	0,3	116,0	51,6	4	2 248	30,9	1 929	1 154
9,9	0,1	81,1	51,5	3	1 573	33,3	1 315	864
20,0	10	138,8	52,2	8	2 658	32,8	2 234	1 441
20,0	3	89,0	52,6	6	1 691	36,0	1 368	993
20,0	1	58,7	52,8	5	1 110	37,5	880	676
20,0	0,3	35,9	51,9	3	690	38,7	538	432
20,0	0,1	23,3	51,8	0	450	38,4	353	280
29,9	10	50,5	48,9	7	1 033	39,1	801	652
29,9	3	33,0	53,1	5	621	39,9	476	399
29,9	1	20,6	50,9	3	405	38,2	319	251
29,9	0,3	13,5	51,3	3	264	36,6	212	157
29,9	0,1	9,6	51,2	2	188	34,4	155	106
40,1	10	17,3	49,0	4	353	44,6	251	248
40,1	3	10,1	50,3	3	201	42,9	147	137
40,1	1	6,2	49,6	2	125	42,0	93	84
40,1	0,3	4,0	50,9	3	80	37,2	63	48
40,1	0,1	2,9	51,1	4	56	33,6	47	31

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 31 juillet 2008

Annexe 3

Module complexe des enrobés de l'étude de répétabilité

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

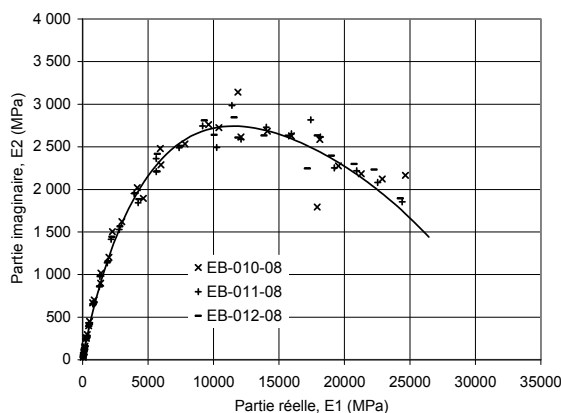
Projet : AM-017-08
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-34

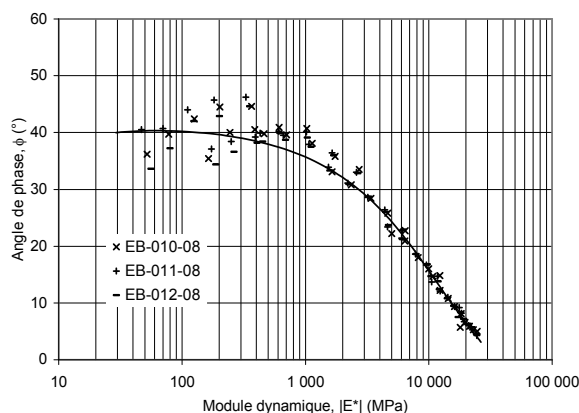
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 5,6%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

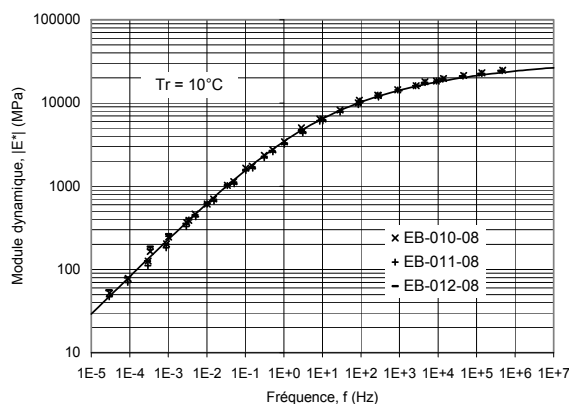
Module complexe dans le plan Cole et Cole



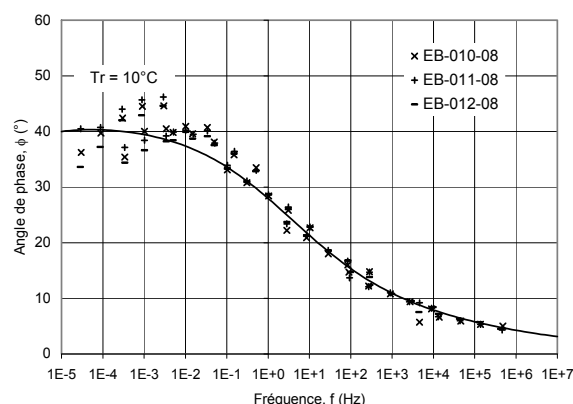
Module complexe dans l'espace de Black



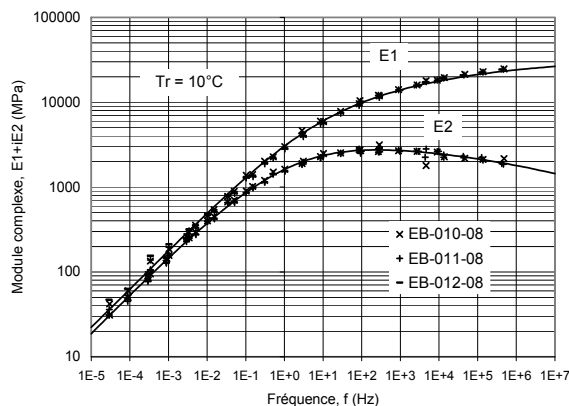
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



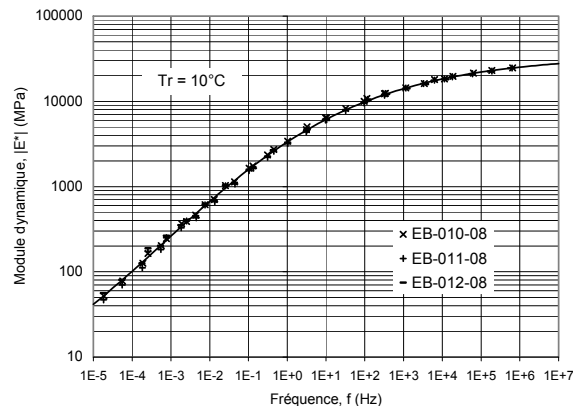
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 31 juillet 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 31 juillet 2008

Annexe 3

Module complexe des enrobés de l'étude de répétabilité



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-017-08

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-34
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,1%

Source granulats :
Source bitume :
Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C
RMSE log E1 = 0,033
RMSE log E2 = 0,027
R ² log E1 = 1,00
R ² log E2 = 1,00
n = 100

E _o	E _∞	δ	k	h	τ _o	a ₁	a ₂
14,3	37 200	2,374	0,167	0,478	0,009	-0,140	6,89E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C
RMSE log E* = 0,020
R ² log E* = 1,00
n = 100
E _{min} = 2,0
E _{max} = 35 200

δ	α	β	γ	a ₁	a ₂
0,310	4,237	-1,290	-0,382	-0,144	5,60E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-013-08
Teneur vides : 4,2%
Densité brute : 2,510
Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	771,1	29,3	17	26 340	4,3	26 266	1 974
-20,1	3	708,4	29,0	17	24 410	4,9	24 322	2 069
-20,1	1	639,0	28,0	17	22 824	6,4	22 681	2 546
-20,1	0,3	602,6	28,7	17	20 976	6,3	20 850	2 295
-20,1	0,1	578,8	29,9	18	19 342	7,8	19 164	2 620
-10,0	10	842,9	42,0	12	20 084	8,1	19 882	2 840
-10,0	3	707,1	39,6	12	17 844	8,8	17 635	2 720
-10,0	1	616,8	38,7	13	15 953	10,2	15 702	2 820
-10,0	0,3	545,8	39,4	13	13 860	11,4	13 585	2 750
-10,0	0,1	488,6	40,7	14	12 012	12,2	11 742	2 534
-0,2	10	688,5	50,3	12	13 680	12,9	13 333	3 065
-0,2	3	567,7	50,1	13	11 327	15,1	10 938	2 943
-0,2	1	466,3	49,8	14	9 366	17,2	8 949	2 765
-0,2	0,3	374,4	50,5	15	7 418	19,4	6 998	2 459
-0,2	0,1	299,4	51,1	15	5 862	21,6	5 451	2 158
9,9	10	357,4	47,8	16	7 479	20,8	6 990	2 662
9,9	3	281,3	51,0	16	5 519	24,5	5 024	2 285
9,9	1	203,9	49,5	16	4 121	26,7	3 681	1 854
9,9	0,3	150,0	51,6	15	2 906	29,0	2 541	1 410
9,9	0,1	107,3	51,5	13	2 082	31,1	1 782	1 077
20,0	10	165,1	47,7	15	3 461	29,8	3 003	1 721
20,0	3	103,6	44,6	15	2 324	32,0	1 970	1 232
20,0	1	79,7	50,6	14	1 575	33,7	1 311	874
19,9	0,3	54,6	52,9	13	1 033	34,5	851	585
20,0	0,1	37,2	52,9	11	703	34,8	577	401
29,9	10	66,7	49,2	11	1 356	38,0	1 068	835
29,9	3	43,8	54,4	8	806	39,5	622	513
29,9	1	26,8	52,0	6	516	39,4	399	327
29,9	0,3	16,6	51,3	4	323	40,3	247	209
29,9	0,1	11,1	51,2	3	216	38,0	171	133
40,0	10	21,9	46,9	8	467	43,6	338	322
40,0	3	14,0	52,3	10	268	42,7	197	182
40,0	1	8,8	51,4	12	171	40,2	130	110
40,0	0,3	5,5	51,1	14	108	37,5	85	66
40,0	0,1	3,9	51,5	16	76	34,8	62	43

Échantillon : EB-014-08
Teneur vides : 4,1%
Densité brute : 2,514
Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,7	10	760,3	28,4	42	26 732	5,0	26 631	2 318
-19,6	3	710,0	28,7	42	24 717	5,5	24 602	2 386
-19,6	1	642,3	27,9	42	23 061	6,2	22 925	2 497
-19,6	0,3	609,9	28,8	40	21 199	6,9	21 044	2 561
-19,6	0,1	584,1	29,9	36	19 529	7,8	19 349	2 644
-10,1	10	831,0	41,1	43	20 214	7,3	20 048	2 580
-10,1	3	705,9	39,5	46	17 870	8,3	17 684	2 572
-10,1	1	613,6	38,5	47	15 947	10,0	15 703	2 775
-10,1	0,3	543,3	39,3	47	13 817	11,3	13 547	2 719
-10,1	0,1	485,8	40,6	44	11 971	12,8	11 673	2 654
0,0	10	653,8	48,6	41	13 449	13,5	13 077	3 142
0,0	3	551,8	49,9	43	11 061	15,5	10 659	2 954
0,0	1	453,6	49,6	45	9 140	17,8	8 703	2 792
0,0	0,3	362,9	50,4	45	7 203	19,9	6 774	2 448
0,0	0,1	290,2	51,2	42	5 667	22,7	5 230	2 182
9,9	10	348,0	46,5	10	7 479	21,0	6 980	2 685
10,0	3	275,6	49,8	9	5 539	24,0	5 062	2 249
9,9	1	202,8	48,7	7	4 163	26,1	3 739	1 830
9,9	0,3	152,7	51,5	5	2 967	28,2	2 614	1 403
9,9	0,1	111,0	51,6	4	2 152	29,8	1 868	1 070
19,9	10	163,9	48,5	9	3 376	30,2	2 917	1 699
19,9	3	108,1	48,4	10	2 234	32,9	1 877	1 212
19,9	1	77,1	50,9	10	1 515	34,6	1 246	861
19,9	0,3	53,4	54,5	11	981	35,4	800	568
19,9	0,1	36,1	54,1	11	667	35,3	544	385
29,9	10	68,8	53,7	3	1 280	39,2	992	808
29,9	3	41,7	54,3	4	767	40,1	586	494
29,9	1	25,4	52,0	5	490	39,7	377	313
29,9	0,3	15,7	51,3	7	306	39,0	238	193
29,9	0,1	10,6	51,8	4	205	37,0	164	124
40,1	10	23,2	52,2	4	445	44,0	320	309
40,1	3	13,4	53,5	4	251	43,8	181	174
40,1	1	7,8	50,3	3	156	42,2	116	105
40,1	0,3	5,0	51,2	4	97	39,0	76	61
40,1	0,1	3,4	51,2	7	66	39,6	51	42

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 31 juillet 2008

Échantillon : EB-015-08
Teneur vides : 3,9%
Densité brute : 2,518
Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,1	10	802,4	28,6	43	28 050	3,8	27 987	1 878
-20,0	3	747,5	28,6	44	26 105	4,8	26 015	2 165
-20,0	1	678,1	27,8	44	24 433	5,4	24 324	2 307
-20,0	0,3	647,0	28,8	43	22 466	6,2	22 334	2 426
-20,1	0,1	617,6	29,9	43	20 664	9,1	20 406	3 260
-10,1	10	879,6	40,9	20	21 509	7,4	21 329	2 781
-10,1	3	756,1	39,3	19	19 236	8,6	19 020	2 873
-10,1	1	661,8	38,3	18	17 279	9,7	17 031	2 913
-10,1	0,3	596,4	39,4	16	15 141	11,0	14 864	2 885
-10,1	0,1	533,3	40,3	15	13 232	12,4	12 923	2 841
0,0	10	685,2	48,1	22	14 251	13,6	13 852	3 346
0,0	3	585,1	49,8	23	11 739	14,7	11 352	2 988
0,0	1	485,5	49,7	22	9 776	17,0	9 346	2 866
0,0	0,3	390,7	50,5	20	7 735	19,7	7 281	2 611
0,0	0,1	312,8	51,3	18	6 097	22,4	5 637	2 325
9,9	10	370,8	46,9	17	7 904	20,7	7 393	2 796
9,9	3	287,4	48,8	17	5 888	23,9	5 383	2 386
9,9	1	217,1	49,0	15	4 432	25,8	3 990	1 929
9,9	0,3	162,3	51,5	12	3 151	28,5	2 768	1 506
9,9	0,1	117,8	51,7	8	2 280	30,7	1 960	1 164
20,0	10	185,4	51,9	10	3 574	30,4	3 082	1 810
20,0	3	115,3	48,3	8	2 387	32,8	2 006	1 294
19,9	1	82,0	50,3	6	1 629	34,5	1 342	923
19,9	0,3	58,0	54,9	2	1 057	35,5	861	613
20,0	0,1	39,5	54,2	2	729	35,6	593	425
40,0	10	24,9	49,5	8	503	43,1	367	344
40,0	3	15,3	53,0	8	289	42,3	214	195
40,0	1	9,5	51,7	8	183	40,5	139	119
40,0	0,3	6,0	51,3	10	118	39,1	91	74
40,0	0,1	4,3	51,5	12	83	34,6	68	47

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 31 juillet 2008

Annexe 3

Module complexe des enrobés de l'étude de répétabilité

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

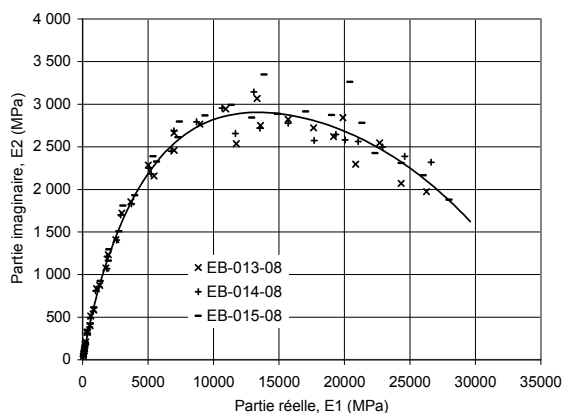
Projet : AM-017-08
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-34

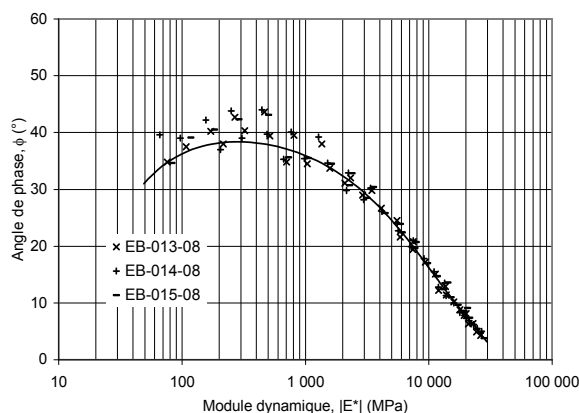
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,1%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

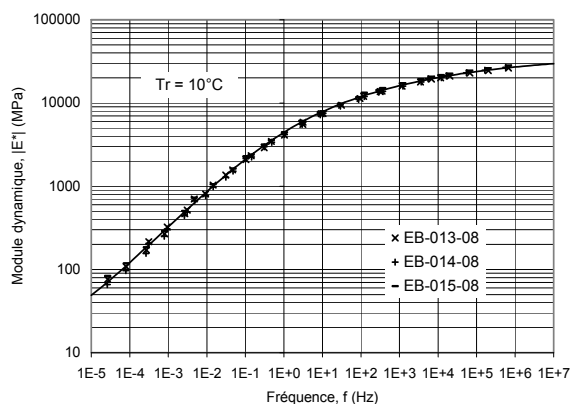
Module complexe dans le plan Cole et Cole



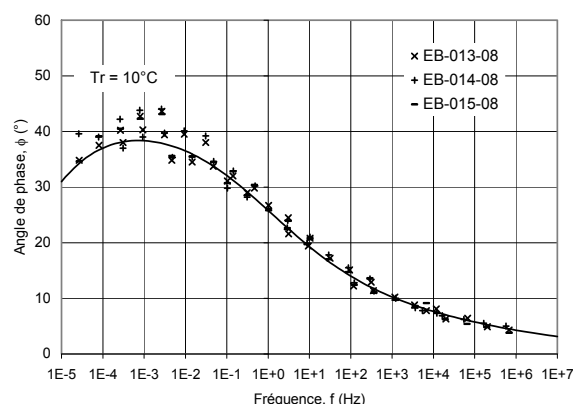
Module complexe dans l'espace de Black



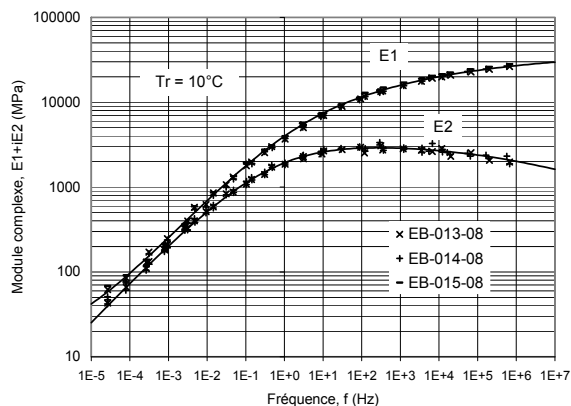
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



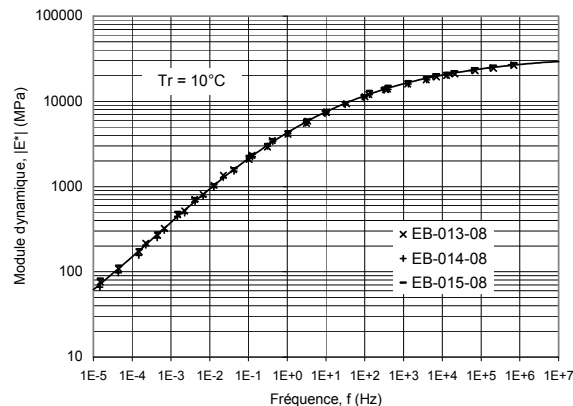
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 31 juillet 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 31 juillet 2008

Annexe 3

Module complexe des enrobés de l'étude de répétabilité



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-017-08

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-34
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,6%

Source granulats :
Source bitume :
Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

$T_r = 10^\circ\text{C}$
RMSE log E1 = 0,031
RMSE log E2 = 0,025
$R^2 \log E1 = 1,00$
$R^2 \log E2 = 1,00$
n = 104

E_o	E_∞	δ	k	h	τ_o	a_1	a_2
6,4	37 000	2,507	0,162	0,475	0,012	-0,145	7,09E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

$T_r = 10^\circ\text{C}$
RMSE log E* = 0,017
$R^2 \log E^* = 1,00$
n = 104
$E_{\min} = 1,3$
$E_{\max} = 33\,700$

δ	α	β	γ	a_1	a_2
0,098	4,429	-1,408	-0,374	-0,150	6,13E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-028-08 Densité brute : 2,499
Teneur vides : 4,7% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _r (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,4	10	757,2	28,6	27	26 440	4,3	26 365	1 988
-19,5	3	723,5	29,2	26	24 744	5,0	24 650	2 155
-19,6	1	655,4	28,2	25	23 275	5,4	23 173	2 176
-19,7	0,3	618,1	28,8	24	21 484	6,2	21 360	2 306
-19,5	0,1	598,5	30,1	28	19 892	7,7	19 712	2 674
-9,9	10	864,3	41,9	22	20 616	7,2	20 453	2 592
-9,9	3	738,3	39,8	22	18 552	7,9	18 374	2 563
-9,9	1	648,9	38,7	21	16 751	9,1	16 542	2 639
-9,9	0,3	587,2	39,7	20	14 805	10,1	14 575	2 598
-9,9	0,1	533,6	40,8	19	13 072	10,5	12 854	2 377
0,2	10	662,1	48,5	24	13 649	11,9	13 357	2 808
0,2	3	575,8	50,4	25	11 427	13,7	11 101	2 710
0,1	1	480,6	49,9	25	9 636	15,7	9 276	2 606
0,1	0,3	394,4	50,4	24	7 819	17,7	7 447	2 384
0,1	0,1	326,1	51,9	22	6 289	21,3	5 858	2 288
10,1	10	364,1	46,0	11	7 908	19,9	7 435	2 693
10,1	3	286,8	48,0	9	5 971	22,4	5 520	2 276
10,1	1	225,8	49,8	7	4 538	24,9	4 115	1 912
10,1	0,3	169,7	51,8	4	3 272	27,2	2 911	1 495
10,1	0,1	123,7	52,0	3	2 378	29,9	2 062	1 184
20,1	10	181,4	51,6	5	3 514	29,4	3 061	1 725
20,1	3	116,1	49,1	8	2 363	32,2	2 000	1 259
20,1	1	79,6	49,4	11	1 613	34,1	1 336	903
20,1	0,3	60,5	57,7	14	1 048	34,6	862	595
20,1	0,1	43,3	61,7	17	702	36,2	566	414
30,1	10	65,5	46,3	5	1 415	36,5	1 137	842
30,1	3	44,5	51,7	7	862	38,2	677	533
30,1	1	28,5	50,8	10	562	38,3	441	349
30,1	0,3	18,4	51,6	13	357	37,8	282	219
30,1	0,1	12,5	51,5	17	243	38,1	191	150
39,9	10	24,8	51,6	6	479	43,1	350	327
39,9	3	16,2	59,4	7	272	43,5	197	187
39,9	1	9,2	53,9	9	170	41,6	127	113
39,9	0,3	5,6	51,8	11	108	40,2	82	69
39,9	0,1	3,9	51,8	13	75	34,8	61	43

Échantillon : EB-029-08 Densité brute : 2,502
Teneur vides : 4,5% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _r (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,9	10	781,5	29,5	15	26 446	4,3	26 371	1 990
-19,9	3	722,3	29,1	16	24 833	5,7	24 712	2 450
-20,0	1	652,8	28,1	16	23 245	5,3	23 146	2 148
-19,9	0,3	621,6	28,9	17	21 524	6,2	21 399	2 317
-10,0	10	868,0	41,5	9	20 928	7,5	20 751	2 715
-10,0	3	744,6	39,7	10	18 754	8,0	18 570	2 620
-9,9	1	655,6	38,7	9	16 959	9,1	16 743	2 695
-9,9	0,3	592,5	39,6	9	14 969	9,9	14 747	2 572
-9,9	0,1	538,5	40,8	9	13 194	12,1	12 900	2 767
0,1	10	675,9	49,2	16	13 740	12,6	13 410	2 993
0,1	3	578,2	50,4	17	11 481	14,2	11 131	2 811
0,1	1	482,4	50,0	18	9 657	15,8	9 294	2 621
0,2	0,3	394,3	50,4	19	7 822	17,5	7 460	2 351
0,1	0,1	325,8	51,7	19	6 301	21,3	5 870	2 290
10,2	10	362,9	46,8	6	7 760	19,8	7 301	2 631
10,1	3	274,9	46,8	6	5 870	22,2	5 433	2 221
10,1	1	219,8	49,3	7	4 455	25,1	4 035	1 888
10,1	0,3	165,4	51,6	9	3 206	27,6	2 842	1 484
10,0	0,1	120,4	51,9	10	2 320	30,1	2 008	1 162
20,0	10	193,3	55,2	7	3 502	29,2	3 056	1 709
20,0	3	121,2	51,6	7	2 348	31,9	1 994	1 241
20,0	1	79,0	49,2	7	1 606	33,9	1 333	896
20,0	0,3	57,9	55,6	8	1 041	35,6	846	607
20,0	0,1	39,0	55,8	9	698	38,1	549	431
30,1	10	68,8	51,7	3	1 331	37,9	1 050	817
30,1	3	43,3	54,0	4	801	39,4	619	509
30,1	1	25,8	50,4	5	513	39,9	394	329
30,1	0,3	16,3	51,5	6	316	39,4	245	201
30,1	0,1	10,7	51,5	6	207	40,2	158	134
39,9	10	21,9	47,7	4	459	44,0	330	319
39,9	3	14,3	55,9	4	255	43,6	185	176
39,9	1	8,4	53,5	4	157	43,0	115	107
39,9	0,3	5,1	51,9	4	97	42,7	72	66
39,9	0,1	3,4	51,5	5	65	41,7	49	43

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 22 septembre 2008

Échantillon : EB-030-08 Densité brute : 2,502
Teneur vides : 4,5% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	CV _r (%)	E* (MPa)	ϕ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-20,0	10	759,8	28,8	25	26 416	4,1	26 348	1 896
-20,1	3	710,6	28,9	25	24 558	4,5	24 483	1 930
-20,1	1	648,1	28,0	27	23 111	5,6	23 000	2 263
-20,0	0,3	621,5	29,1	28	21 366	6,7	21 221	2 484
-19,8	0,1	598,1	30,3	29	19 771	7,9	19 582	2 726
-10,0	10	862,9	41,8	24	20 663	7,5	20 488	2 683
-9,9	3	736,7	39,8	25	18 527	7,9	18 353	2 536
-9,9	1	647,2	38,7	27	16 710	9,1	16 500	2 643
-9,9	0,3	585,0	39,7	27	14 753	10,4	14 510	2 666
-10,0	0,1	529,5	40,8	28	12 970	15,0	12 527	3 363
0,2	10	674,8	50,1	19	13 457	12,1	13 156	2 832
0,2	3	569,5	50,6	21	11 254	14,3	10 907	2 772
0,2	1	472,2	50,0	23	9 446	15,5	9 102	2 525
0,2	0,3	385,5	50,5	24	7 641	17,9	7 271	2 348
0,2	0,1	316,6	51,6	25	6 131	21,5	5 704	2 249
10,1	10	365,8	47,8	14	7 656	19,7	7 209	2 579
10,1	3	281,8	48,9	14	5 766	22,2	5 338	2 182
10,1	1	218,9	49,8	14	4 392	24,8	3 988	1 840
10,1	0,3	163,9	51,7	12	3 168	27,0	2 821	1 440
10,1	0,1	119,9	52,0	11	2 304	29,3	2 009	1 129
20,0	10	187,3	55,1	8	3 401	29,1	2 972	1 654
20,0	3	122,2	53,3	8	2 291	31,9	1 945	1 210
20,0	1	82,8	52,6	7	1 576	33,5	1 314	869
20,0	0,3	56,5	54,5	5	1 036	35,1	848	595
20,0	0,1	37,9	53,7	5	706	37,4	561	428
30,1	10	65,5	50,9	5	1 287	38,0	1 014	792
30,1	3	42,0	54,2	5	774	39,5	597	492
30,1	1	24,9	50,6	5	493	40,5	375	320
30,1	0,3	15,5	51,5	6	300	41,2	226	198
30,1	0,1	10,0	51,4	7	195	40,7	148	127
40,0	10	23,8	51,1	4	466	42,8	342	316
40,0	3	14,1	52,6	4	267	42,8	196	182
40,0	1	8,8	52,7	6	166	41,7	124	111
40,0	0,3	5,4	51,9	9	104	40,9	79	68
40,0	0,1	3,7	51,8	11	71	39,0	55	44

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 22 septembre 2008

Annexe 3

Module complexe des enrobés de l'étude de répétabilité

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

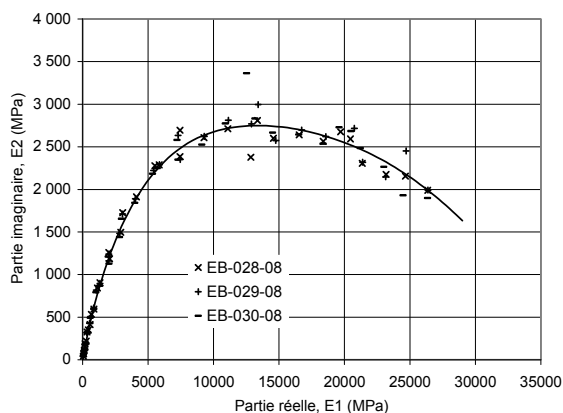
Projet : AM-017-08
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-34

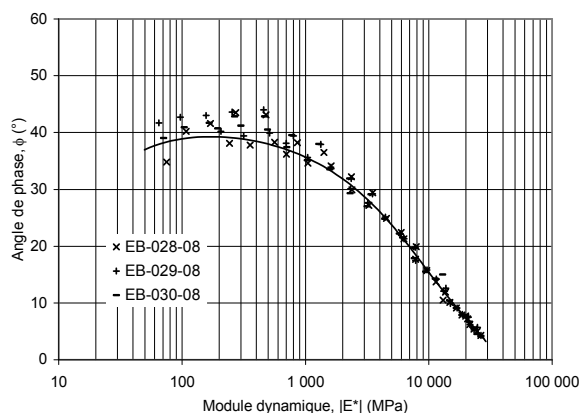
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,6%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

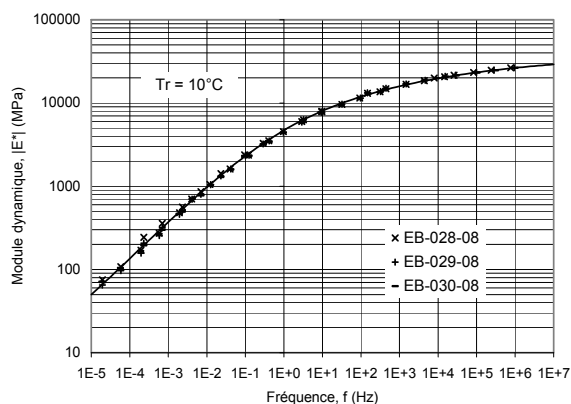
Module complexe dans le plan Cole et Cole



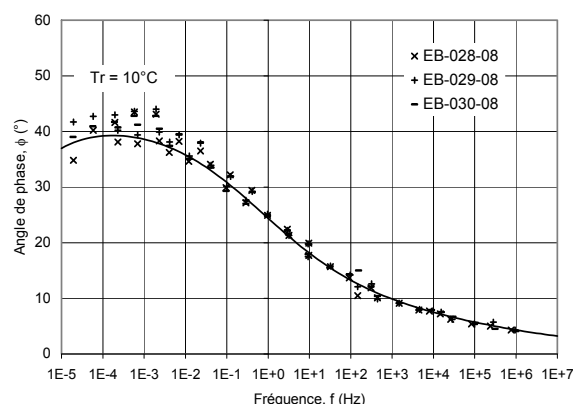
Module complexe dans l'espace de Black



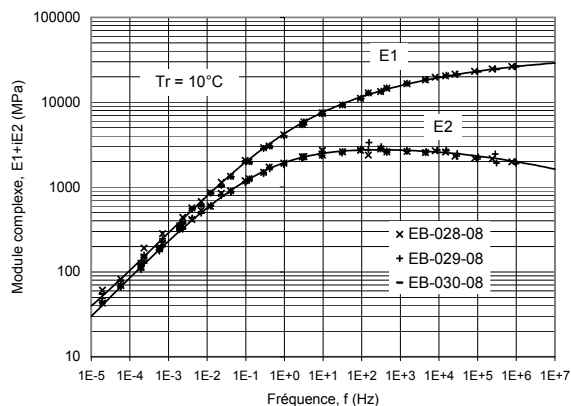
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



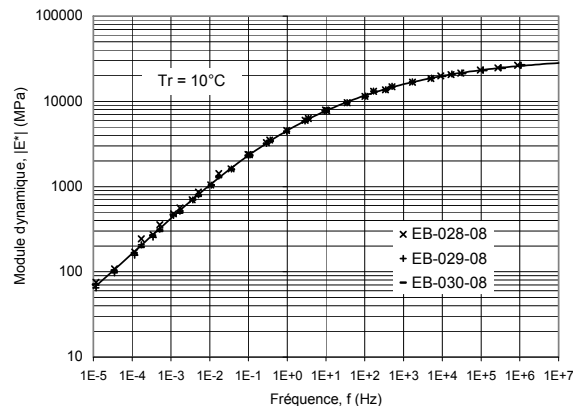
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 22 septembre 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 22 septembre 2008

Annexe 3

Module complexe des enrobés de l'étude de répétabilité



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Projet : AM-017-08

Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14

Source granulats :

Type bitume : PG 58-34

Source bitume :

Teneur bitume : 4,8%

Source enrobé :

Laboratoire

Teneur vides : 4,9%

Ajout :

MODÈLE HUET-SAYEGH DE MODULE COMPLEXE, E* (MPa)

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

$$\tau = a_T \cdot \tau_o$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E1 =	0,033
RMSE log E2 =	0,031
R ² log E1 =	1,00
R ² log E2 =	1,00
n =	105

E _o	E _∞	δ	k	h	τ _o	a ₁	a ₂
12,3	36 600	2,459	0,167	0,491	0,009	-0,144	8,49E-04

MODÈLE WITCZAK DE MODULE DYNAMIQUE, LOG |E*| (MPa)

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \log f_r)}}$$

$$f_r = a_T \cdot f$$

$$\log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

T _r = 10 °C	
RMSE log E* =	0,018
R ² log E* =	1,00
n =	105
E _{min} =	3,5
E _{max} =	31 000

δ	α	β	γ	a ₁	a ₂
0,540	3,952	-1,252	-0,423	-0,147	7,19E-04

Note : Cure = 4 heures

Échantillon : EB-031-08

Densité brute : 2,488

Teneur vides : 5,1%

Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,9	10	768,4	29,0	9	26 522	4,2	26 452	1 925
-20,0	3	722,9	29,1	8	24 866	4,7	24 782	2 038
-20,1	1	654,8	28,0	8	23 357	5,3	23 256	2 174
-20,1	0,3	625,9	29,0	8	21 616	5,9	21 503	2 209
-19,9	0,1	600,4	30,1	9	19 936	7,0	19 786	2 443
-9,9	10	856,6	41,8	11	20 514	7,6	20 333	2 715
-9,9	3	729,7	39,7	11	18 358	8,3	18 166	2 648
-9,9	1	637,7	38,8	11	16 448	9,3	16 232	2 657
-9,9	0,3	571,3	39,6	12	14 431	10,5	14 190	2 625
-9,9	0,1	513,2	40,6	11	12 645	14,3	12 253	3 124
0,1	10	677,1	50,5	11	13 405	12,4	13 094	2 872
0,1	3	565,9	50,7	11	11 154	14,1	10 816	2 722
0,1	1	465,2	50,1	9	9 289	16,5	8 909	2 633
0,1	0,3	375,3	50,6	7	7 420	19,0	7 018	2 411
0,1	0,1	304,6	51,2	6	5 946	22,5	5 493	2 277
10,1	10	367,4	50,5	5	7 280	20,7	6 809	2 579
10,1	3	275,1	51,1	4	5 383	24,5	4 898	2 232
10,1	1	204,0	51,0	3	3 999	27,1	3 558	1 825
10,1	0,3	145,8	52,0	2	2 803	29,9	2 429	1 398
10,1	0,1	102,7	52,0	2	1 976	32,5	1 666	1 063
20,0	10	161,2	50,3	3	3 224	30,7	2 771	1 647
20,0	3	109,0	52,0	5	2 097	34,6	1 726	1 192
20,0	1	73,9	52,8	7	1 400	35,7	1 136	818
20,0	0,3	47,1	52,8	9	892	37,4	708	542
20,0	0,1	30,8	52,5	13	587	39,3	455	372
30,0	10	59,2	48,9	11	1 211	39,8	930	775
30,0	3	35,4	49,6	10	714	41,7	533	475
30,0	1	22,4	50,1	11	446	41,3	335	295
30,0	0,3	13,9	51,4	11	270	40,6	205	176
30,0	0,1	9,0	51,5	13	176	39,9	135	113
40,0	10	22,1	56,1	6	394	46,1	273	284
40,0	3	11,6	52,4	7	222	45,7	155	159
40,0	1	7,2	52,8	9	136	44,0	98	94
39,9	0,3	4,4	51,9	11	85	41,7	64	57
40,0	0,1	3,0	51,6	12	58	39,7	45	37

Échantillon : EB-032-08

Densité brute : 2,499

Teneur vides : 4,7%

Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,8	10	774,9	28,9	8	26 852	3,7	26 796	1 723
-19,8	3	723,9	28,9	8	25 007	4,8	24 919	2 102
-19,8	1	658,6	27,9	8	23 602	5,2	23 503	2 156
-19,9	0,3	632,1	29,0	9	21 828	5,9	21 712	2 252
-20,0	0,1	605,7	29,8	12	20 356	9,8	20 058	3 468
-9,9	10	845,1	42,3	17	19 998	7,3	19 838	2 525
-9,8	3	716,3	40,0	18	17 924	8,9	17 708	2 778
-9,8	1	623,8	38,9	18	16 029	9,6	15 802	2 686
-9,8	0,3	556,2	39,6	18	14 050	10,9	13 797	2 653
-9,9	0,1	499,8	40,9	18	12 215	12,7	11 917	2 680
0,1	10	669,7	49,7	12	13 462	12,8	13 128	2 979
0,1	3	565,0	50,4	12	11 202	14,6	10 838	2 832
0,1	1	467,1	50,0	11	9 336	16,4	8 956	2 637
0,1	0,3	377,6	50,6	10	7 466	18,5	7 078	2 374
0,1	0,1	305,8	51,7	9	5 920	20,9	5 531	2 112
10,0	10	368,6	49,4	8	7 453	21,0	6 959	2 668
10,0	3	279,2	50,7	8	5 511	24,1	5 030	2 253
10,0	1	208,5	50,7	7	4 114	26,8	3 672	1 855
10,0	0,3	149,6	51,8	7	2 887	29,6	2 509	1 427
10,0	0,1	105,8	52,0	7	2 034	32,0	1 724	1 080
19,9	10	164,0	50,7	3	3 233	31,5	2 756	1 690
19,9	3	112,8	54,1	3	2 084	34,8	1 712	1 189
19,9	1	74,3	53,8	3	1 382	36,8	1 106	828
19,9	0,3	45,9	52,8	3	868	38,8	677	544
20,0	0,1	29,4	52,1	3	564	39,6	434	359
30,0	10	61,6	51,7	5	1 192	40,0	913	766
30,0	3	35,3	50,5	4	699	41,8	521	466
30,0	1	21,6	50,0	4	432	41,9	322	288
30,0	0,3	13,3	51,4	3	258	42,6	190	175
30,0	0,1	8,4	51,5	2	164	40,3	125	106
40,0	10	22,7	54,3	6	419	42,5	309	283
40,0	3	12,6	51,0	9	247	42,7	181	168
40,0	1	8,2	52,1	11	157	39,2	122	99
40,0	0,3	5,4	51,9	15	103	35,6	84	60
40,0	0,1	3,8	51,7	18	74	31,7	63	39

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.

Date : 22 septembre 2008

Échantillon : EB-033-08

Densité brute : 2,491

Teneur vides : 5,0%

Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	E* (MPa)	φ (°)	E1 (MPa)	E2 (MPa)
-19,7	10	747,7	28,9	8	25 897	4,2	25 828	1 886
-19,7	3	696,9	28,8	7	24 196	6,1	24 057	2 589
-19,7	1	630,7	27,8	7	22 668	5,8	22 551	2 303
-19,8	0,3	597,2	28,7	6	20 841	6,5	20 709	2 342
-19,9	0,1	576,1	30,0	6	19 177	8,7	18 958	2 893
-10,0	10	852,6	41,6	5	20 517	7,9	20 324	2 810
-10,0	3	725,8	39,7	5	18 291	8,4	18 093	2 685
-10,0	1	636,5	38,8	4	16 407	9,7	16 171	2 772
-10,0	0,3	566,2	39,5	3	14 347	11,1	14 079	2 757
-9,9	0,1	509,6	41,2	2	12 368	13,3	12 036	2 844
0,1	10	681,2	50,8	2	13 421	13,0	13 078	3 011
0,1	3	561,6	50,6	4	11 099	15,1	10 714	2 899
0,1	1	461,4	50,0	5	9 227	16,8	8 832	2 673
0,2	0,3	371,9	50,6	6	7 350	18,9	6 952	2 386
0,1	0,1	300,6	51,5	8	5 833	21,2	5 439	2 109
10,0	10	372,4	50,8	4	7 337	21,3	6 835	2 667
10,0	3	276,0	51,0	6	5 416	24,2	4 939	2 222
10,0	1	203,8	50,7	7	4 022	27,2	3 579	1 835
10,0	0,3	145,8	51,9	8	2 811	30,0	2 436	1 404
10,0	0,1	102,8	51,8	10	1 984	33,0	1 664	1 079
19,9	10	165,5	51,5	10	3 214	30,6	2 767	1 636
19,9	3	109,7	52,5	11	2 089	34,4	1 725	1 179
19,9	1	73,6	52,9	10	1 391	36,0	1 126	817
19,9	0,3	46,6	52,7	9	884	37,7	700	541
19,9	0,1	30,4	52,3	8	581	38,5	455	362
30,0	10	59,3	52,4	8	1 131	41,2	852	745
30,0	3	36,3	54,7	6	663	42,2	491	445
30,0	1	21,8	53,0	4	411	42,7	302	279
30,0	0,3	12,6	51,5	2	244	42,7	179	165
30,0	0,1	8,1	51,2	1	159	43,7	115	110
40,0	10	19,9	46,8	5	424	43,6	307	292
40,0	3	11,1	46,5	4	239	43,1	175	163
40,0	1	7,4	50,1	4	147	40,4	112	95
40,0	0,3	4,9	51,9	4	95	37,6	75	58
40,0	0,1	3,5	51,9	7	68	45,0	48	48

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.

Date : 22 septembre 2008

Annexe 3

Module complexe des enrobés de l'étude de répétabilité

Ministère
des Transports

Québec



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

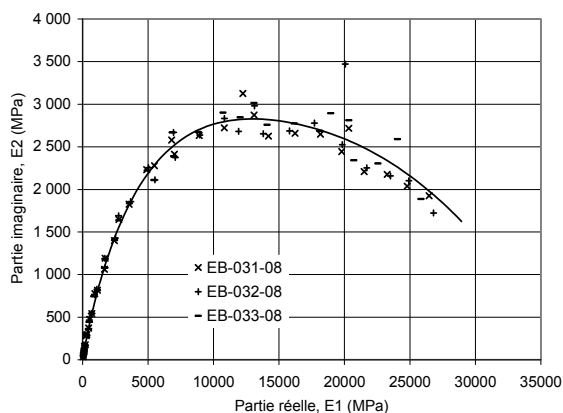
Projet : AM-017-08
Client : Félix Doucet, SMI

Type enrobé : ESG-14
Type bitume : PG 58-34

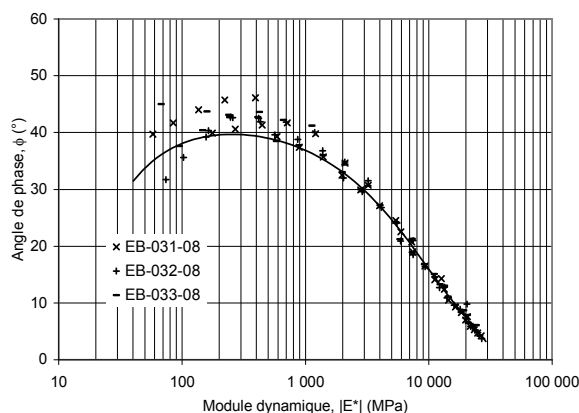
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,9%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

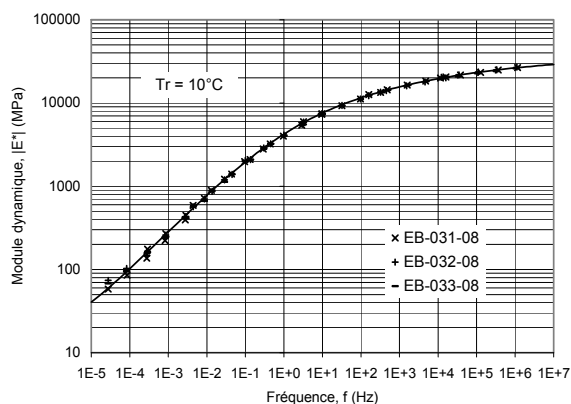
Module complexe dans le plan Cole et Cole



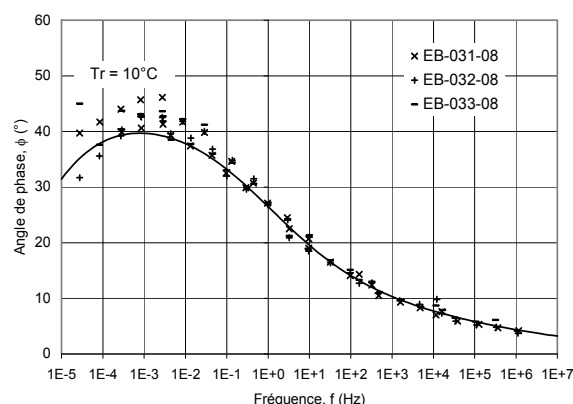
Module complexe dans l'espace de Black



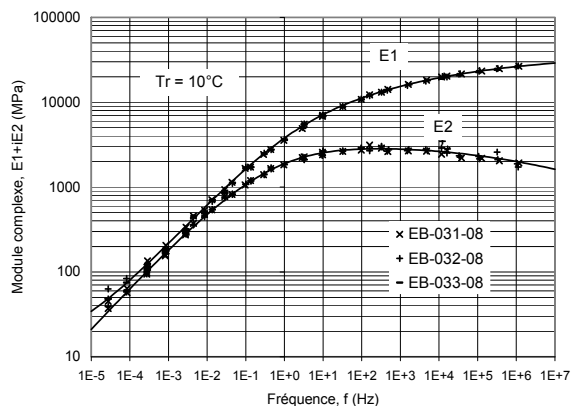
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



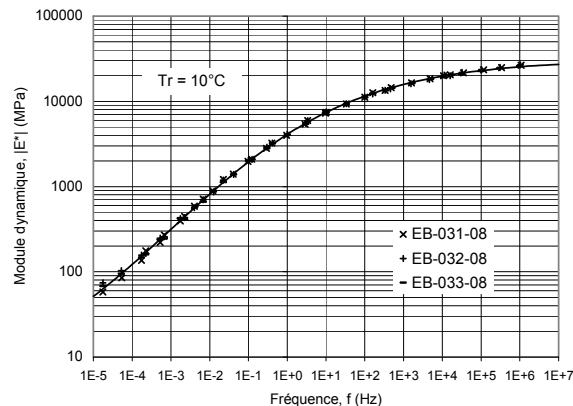
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module complexe



Courbe maîtresse Witczak de module dynamique



Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 22 septembre 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 22 septembre 2008

