

**Complex Modulus Determination of Asphalt Mixes
at the Ministère des Transports du Québec**



**MATERIALS AND
INFRASTRUCTURES**



**ÉTUDES ET RECHERCHES
EN TRANSPORT**

**COMPLEX MODULUS DETERMINATION
OF ASPHALT MIXES
AT THE MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC**

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

and

**Bruno Auger, Spec. Tech.
Ministère des Transports du Québec**

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

May 2010

Note: This report is a translation from a French written report.

This study was conducted and funded by the ministère des Transports du Québec.

References to a statute or regulation are presented for informative purposes only. The official texts take precedence.

Collaborators

Denis St-Laurent, M. Sc., engineer, Direction du laboratoire des chaussées, ministère des Transports du Québec

Michel Paradis, M. Sc., engineer, Direction du laboratoire des chaussées, ministère des Transports du Québec

Gaétan Leclerc, M. Sc., chemist, Direction du laboratoire des chaussées, ministère des Transports du Québec

ISBN 978-2-550-61160-8 (print version)

ISBN 978-2-550-61161-5 (PDF)

Legal deposit – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2010

Legal deposit – Library and Archives Canada, 2010

Concerned with protecting the environment, the ministère des Transports encourages the use of paper produced from recycled fibre for the production of its printed materials and recommends that this publication be downloaded.

Printed on Rolland Enviro100 paper containing 100% post-consumer fibre, certified EcoLogo, processed chlorine free, FSC recycled and manufactured using biogas energy.



Report title and subtitle Complex Modulus Determination of Asphalt Mixes at the Ministère des Transports du Québec		Transports Québec report no. RTQ-10-01	
		Date of publication of report (Year – Month) 2010-05	
Title of research project Détermination du module complexe des enrobés au ministère des Transports du Québec		Contract no. (RRDD-AA-CCXX) N/A	Project or file no. N/A
Chief researcher Félix Doucet, ing. M.Sc.A.		Research start date 2006-05	Research end date 2009-09
Report author(s) Félix Doucet and Bruno Auger			
Project leader, Departmental unit Félix Doucet, Direction du laboratoire des chaussées		Total cost of study \$250,000	
Study or research conducted by (name and address of entity) Direction du laboratoire des chaussées Service des matériaux d'infrastructures 2700, rue Einstein Québec (Québec) G1P 3W8		Study or research funded by (name and address of entity) <i>Specify DER or other MTQ unit</i> Direction du laboratoire des chaussées Service des matériaux d'infrastructures 2700, rue Einstein Québec (Québec) G1P 3W8	
Issue The ministère des Transports du Québec (MTQ) develops test methods for determining the mechanical behaviour of pavement materials in the laboratory. The materials' mechanical properties determination (stiffness, damage resistance) is necessary in order to design pavement structures using a mechanistic approach instead of traditional empirical design methods. Mechanistic design methods can be used to determine the distribution of stresses and strains in pavements in order to assess their service life, which leads to an optimization of materials usage and road rehabilitation strategies.			
Goals The MTQ has developed test method LC 26-700 "Détermination du module complexe des enrobés" for determining the complex modulus of asphalt mixes. The development of the direct tension-compression equipment used for the tests and the methodology for preparing the samples are described. A repeatability study was also conducted, demonstrating the quality of the test and the influence of air voids on the complex modulus of asphalt mixes.			
Methodology In addition, the complex modulus of 15 asphalt mixes used in Québec, that is asphalt mixes ESG-10, ESG-14 and GB-20 incorporating PG 58-28, PG 58-34, PG 64-28, PG 64-34 and PG 70-28 binders, is determined in order to develop a database. The individual and general models determined are compared to values found in the literature. The Huet-Sayegh model is used to model the complex modulus, and the Witczak model is used for the dynamic modulus. The influence of the type of binder on the rheology of the mix and of the gradation on the intensity of the complex modulus is demonstrated.			
Results and recommendations As a result, the MTQ now has a reliable and documented test method at its disposal for determining the complex modulus of asphalt mixes. A complex modulus databank for asphalt mixes used in Québec is also made available for materials analysis and pavement design in Québec.			
Key words Complex modulus, dynamic modulus, phase angle, master curve, Cole-Cole plane, Black space, direct tension-compression test, mix, asphalt, pavement, road, viscoelastic, mechanistic.		Number of pages 151	Number of bibliographical references 30 Language of document x French x English Other (specify):

EXECUTIVE SUMMARY

The Ministère des Transports du Québec (MTQ) develops test methods for determining the mechanical behaviour of pavement materials in the laboratory. The materials mechanical properties determination (stiffness, damage resistance) is necessary in order to design pavement structures using a mechanistic approach instead of traditional empirical design methods. Mechanistic design methods can be used to determine the distribution of stresses and strains in pavements in order to assess their service life, which leads to an optimization of materials usage and road rehabilitation strategies.

The MTQ has developed test method LC 26-700 “Détermination du module complexe des enrobés” for determining the complex modulus of asphalt mixes. The development of the direct tension-compression equipment used for the tests and the methodology for preparing the samples are described. A repeatability study was also conducted, demonstrating the quality of the test and the influence of air voids on the complex modulus of asphalt mixes.

In addition, the complex modulus of 15 asphalt mixes used in Québec, that is asphalt mixes ESG-10, ESG-14 and GB-20 incorporating PG 58-28, PG 58-34, PG 64-28, PG 64-34 and PG 70-28 binders, is determined in order to develop a database. The individual and general models determined are compared to values found in the literature. The Huet-Sayegh model is used to model the complex modulus, and the Witczak model is used for the dynamic modulus. The influence of the type of binder on the rheology of the mix and of the gradation on the intensity of the complex modulus is demonstrated.

As a result, the MTQ now has a reliable and documented test method at its disposal for determining the complex modulus of asphalt mixes. A complex modulus databank for asphalt mixes used in Québec is also made available for materials analysis and pavement design in Québec.

TABLE OF CONTENTS

1.	INTRODUCTION	17
2.	THEORY	19
2.1	Pavement Design.....	19
2.2	Complex Modulus	20
2.3	Test Methods	22
2.4	Representation.....	25
2.5	Modelling.....	30
3.	DIRECT TENSION-COMPRESSION TEST	35
3.1	DTC Equipment	35
3.2	Verification with an Aluminium Specimen	38
3.3	Specimen Preparation	40
3.4	Asphalt Mix Conditioning	45
4.	REPEATABILITY STUDY	51
4.1	Study Methodology	51
4.2	Complex Modulus Repeatability	51
4.3	Dynamic Modulus Repeatability.....	54
5.	INDIVIDUAL RESULTS	59
5.1	Materials Studied	59
5.2	Complex Modulus Results	61
5.3	Dynamic Modulus Results	67
6.	GENERAL MODELS.....	73
6.1	Complex Modulus Models.....	73
6.2	Dynamic Modulus Models	81
6.3	Literature Models	86
7.	CONCLUSION	95
8.	REFERENCES	97

Appendix 1: Complex modulus of asphalt mixes conditioned for one hour

Appendix 2: Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Appendix 3: Complex modulus of asphalt mixes for the repeatability study

LIST OF TABLES

Table 1 – Standardized test methods for determining the complex modulus of asphalt mixes	23
Table 2 – Frequencies and number of cycles used to determine the complex modulus at the MTQ (LC 26-700).....	25
Table 3 – Temperatures and strain levels used to determine the complex modulus at the MTQ (LC 26-700).....	25
Table 4 – Elastic modulus and phase lag of the strain measurement of an aluminium specimen at 20 °C as a function of frequency	40
Table 5 – Air voids in GB-20 asphalt mix SGC specimens and cored specimens	41
Table 6 – Strain level as a function of temperature for complex modulus determination of asphalt mixes with different conditioning times.....	46
Table 7 – Air voids in specimens of ESG-14 mix with a PG 58-34 binder used for the repeatability study.....	51
Table 8 – Regression coefficients for the Huet-Sayegh complex modulus model at 10 °C for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents	52
Table 9 – Statistical parameters for the Huet-Sayegh complex modulus model at 10 °C for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents	52
Table 10 – Regression coefficients for the Witczak dynamic modulus model at 10 °C for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents	55
Table 11 – Statistical parameters for the Witczak dynamic modulus model at 10 °C for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents	55
Table 12 – Asphalt mix gradations	60
Table 13 – Asphalt mix characteristics	60
Table 14 – Asphalt binder characteristics.....	60
Table 15 – Average air voids in asphalt mix specimens.....	61
Table 16 – Regression coefficients of the Huet-Sayegh complex modulus models at 10 °C for different asphalt mixes.....	62
Table 17 – Statistical parameters of the Huet-Sayegh complex modulus models at 10 °C for different asphalt mixes.....	62
Table 18 – Complex modulus at 10 °C and 10 Hz for different asphalt mixes	67
Table 19 – Regression coefficients of the Witczak dynamic modulus model at 10 °C for different asphalt mixes.....	67
Table 20 – Statistical parameters of the Witczak dynamic modulus model at 10 °C for different asphalt mixes.....	68
Table 21 – Dynamic modulus at 10 °C and 10 Hz of different asphalt mixes.....	70

Table 22 – Regression coefficients for the Huet-Sayegh general complex modulus models at 10 °C by binder type	79
Table 23 – Statistical parameters for the Huet-Sayegh general complex modulus models at 10 °C by binder type	79
Table 24 – General complex modulus of asphalt mixes at 10 °C and 10 Hz.....	81
Table 25 – Regression coefficients for the Witczak general dynamic modulus models at 10 °C by binder type	84
Table 26 – Statistical parameters for the Witczak general dynamic modulus models at 10 °C by binder type	84
Table 27 – General dynamic modulus of asphalt mixes at 10 Hz by binder type	85
Table 28 – Typical dynamic modulus values of asphalt mixes used in the United States (Yoder and Witczak, 1975; Huang, 1993).....	86
Table 29 – Minimum dynamic modulus values specified by AFNOR for different types of asphalt mixes at 10 °C and 10 Hz (Corté and Delorme, 2005).....	87
Table 30 – Regression coefficients for predicting binder viscosity from binder performance grade (NCHRP 1-37A).....	88
Table 31 – Resilient modulus of asphalt mixes for CHAUSSEE 2 software (MTQ, 2006) .	92
Table 32 – Dynamic modulus of asphalt mixes used in Québec as determined with a four-point bending test (Doucet et al., 1999a.,1999b).....	92

LIST OF FIGURES

Figure 1 – Tensile and compressive loading on asphalt mixes resulting from vehicle traffic	19
Figure 2 – Representation of the complex modulus	20
Figure 3 – Alternating tensile-compressive sinusoidal loading on an asphalt mix.....	21
Figure 4 – Direct tensile-compressive axial loading and displacement (LC 26-700)	24
Figure 5 – Complex modulus of an asphalt mix in the Cole-Cole plane representation	26
Figure 6 – Complex modulus of an asphalt mix in the Black space diagram	26
Figure 7 – Dynamic modulus master curve of an asphalt mix at 10 °C	27
Figure 8 – Phase angle master curve of an asphalt mix at 10 °C.....	28
Figure 9 – Complex modulus master curves of an asphalt mix at 10 °C	29
Figure 10 – Shift factors for an asphalt mix at a reference temperature of 10 °C.....	29
Figure 11 – Representation of the Huet-Sayegh analogical model	30
Figure 12 – Extrapolation of the E_0 value of an asphalt mix in the Cole-Cole plane.....	32
Figure 13 – Extrapolation of the E_∞ value of an asphalt mix in the Black space.....	32
Figure 14 – Photo of the hydraulic axial testing system and controlled temperature chamber.....	35
Figure 15 – Photo of direct tension-compression test	36
Figure 16 – Control screen for direct tension-compression test	36
Figure 17 – Schematics of direct tension-compression equipment (LC 26-700)	37
Figure 18 – Elastic modulus of an aluminium specimen at 20 °C as a function of frequency	39
Figure 19 – Phase lag for the strain measurement of an aluminium specimen at 20 °C as a function of frequency	39
Figure 20 – The MTQ rolling wheel compactor.....	41
Figure 21 – Plan view of air voids distribution in a 100 mm thick GB-20 asphalt mix slab (Doucet and Auger, 2007)	42
Figure 22 – Core drill for coring specimens	43
Figure 23 – Glue bench for loading platens.....	44
Figure 24 – Glue bench for anchor posts	45
Figure 25 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for an ESG-14 mix with a PG 58-28 binder at different conditioning times	46
Figure 26 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder at different conditioning times	47

Figure 27 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for an ESG-14 mix with a PG 64-28 binder at different conditioning times	47
Figure 28 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for an ESG-14 mix with a PG 64-34 binder at different conditioning times	48
Figure 29 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for an ESG-14 mix with a PG 70-28 binder at different conditioning times	48
Figure 30 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for ESG-14 mixes conditioned for one hour with different binders	49
Figure 31 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for ESG-14 mixes conditioned for four hours with different binders	50
Figure 32 – Complex modulus of an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents in the Cole-Cole plane	53
Figure 33 – Complex modulus of an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents in the Black space.....	53
Figure 34 – Complex modulus master curves for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents.....	54
Figure 35 – Dynamic modulus of an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder at 10 °C and 10 Hz as a function of air voids.....	56
Figure 36 – Dynamic modulus general master curve for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder with different air voids contents	57
Figure 37 – Dynamic modulus general master curve at 10 Hz including individual and general prediction error.....	58
Figure 38 – Asphalt mix gradations	59
Figure 39 – Complex modulus curves for ESG-10 mixes in the Cole-Cole plane	63
Figure 40 – Complex modulus curves for ESG-14 mixes in the Cole-Cole plane	63
Figure 41 – Complex modulus curves for GB-20 mixes in the Cole-Cole plane.....	64
Figure 42 – Complex modulus curves for ESG-10 mixes in the Black space.....	65
Figure 43 – Complex modulus curves for ESG-14 mixes in the Black space.....	65
Figure 44 – Complex modulus curves for GB-20 mixes in the Black space	66
Figure 45 –Dynamic modulus master curves at 10 Hz of ESG-10 mixes.....	69
Figure 46 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of ESG-14 mixes.....	69
Figure 47 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of GB-20 mixes	70
Figure 48 – Dynamic modulus at 10 °C and 10 Hz of different asphalt mixes according to binder type and mix gradation	71
Figure 49 – Complex modulus curves in the Cole-Cole plane for asphalt mixes with a PG 58-28 binder	73

Figure 50 – Complex modulus curves in the Cole-Cole plane for asphalt mixes with a PG 58-34 binder	74
Figure 51 – Complex modulus curves in the Cole-Cole plane for asphalt mixes with a PG 64-28 binder	74
Figure 52 – Complex modulus curves in the Cole-Cole plane for asphalt mixes with a PG 64-34 binder	75
Figure 53 – Complex modulus curves in the Cole-Cole plane for asphalt mixes with a PG 70-28 binder	75
Figure 54 – Complex modulus curves in the Black space for asphalt mixes with a PG 58-28 binder	76
Figure 55 – Complex modulus curves in Black space for asphalt mixes with a PG 58-34 binder	77
Figure 56 –Complex modulus curves in the Black space for asphalt mixes with a PG 64-28 binder	77
Figure 57 – Complex modulus curves in the Black space for asphalt mixes with a PG 64-34 binder	78
Figure 58 – Complex modulus curves in the Black space for asphalt mixes with a PG 70-28 binder	78
Figure 59 – General complex modulus curves in the Cole-Cole plane by binder type	80
Figure 60 – General modulus curves in the Black space by binder type	80
Figure 61 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 58-28 binder	81
Figure 62 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 58-34 binder	82
Figure 63 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 64-28 binder	82
Figure 64 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for asphalt mixes with a PG 64-34 binder	83
Figure 65 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for asphalt mixes with a PG 70-28 binder	83
Figure 66 – General dynamic modulus master curves at 10 Hz by binder type	85
Figure 67 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 58-28 binder and the MEPDG model predictions	89
Figure 68 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 58-34 binder and the MEPDG model predictions	89
Figure 69 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 64-28 binder and the MEPDG model predictions	90

Figure 70 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 64-34 binder and the MEPDG model predictions	90
Figure 71 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 70-28 binder and the MEPDG model predictions	91
Figure 72 – Average dynamic modulus master curve for C-LTPP mixes and general MTQ curves (Doucet and Doré, 2004).....	93

1. INTRODUCTION

Pavements are structures that appear simple, but the mechanical behaviour of the materials and the climate- and traffic-induced stresses are complex. Therefore, given the difficulty in modelling their behaviour, the design of pavement structures is generally carried out empirically. However, the empirical approach has limitations, including in terms of design and rehabilitation optimization, and in the development of specifications for new materials and technologies.

For many decades, researchers have studied, determined and modelled the mechanical behaviour of paving materials with a view to designing pavement structures using a mechanistic approach. The stiffness and damage resistance determination of paving materials in the laboratory can be used to calculate the distribution of stresses and strains in the pavements in order to predict the service life of a road as a function of climate and traffic.

The MTQ would like to take advantage of mechanistic design approaches to optimize pavement design and materials specifications. A number of test methods are now being used or developed by the MTQ to determine the mechanical behaviour of paving materials, such as the determination of the complex modulus and fatigue resistance of asphalt mixes or the determination of the resilient modulus and permanent deformation resistance of granular materials (Doucet and St-Laurent, 2008).

This report describes the state of knowledge at the MTQ with respect to determination of the complex modulus of asphalt mixes, along with the development of test method LC 26-700 "Determining the complex modulus of asphalt mixes" and models for asphalt mixes used in Québec. A Direct Tension-Compression (DTC) equipment is used for the tests. The Huet-Sayegh (1963, 1965) and Witczak (1996, 2005) models are used to model the complex modulus and the dynamic modulus of the asphalt mixes.

The report describes the theory underlying the tests, the development of the DTC equipment and the LC 26-700 test method, and a test repeatability study as well. The results obtained for three asphalt mixes combined with five binder grades used in Québec are also presented, for a total of 15 asphalt mixes. Finally, the development of general models and a comparison with values reported in the literature are presented.

2. THEORY

2.1 Pavement Design

Pavement structures are generally designed empirically (AASHTO, 1993; MTQ, 2006), but mechanistic approaches also exist (LCPC SETRA, 1994; NCHRP 1-37A). All of these methods require a certain degree of assessment of the mechanical behaviour of pavement materials, mainly in terms of stiffness. However, some empiricism is also required, mainly in terms of on-site calibration of the damage models that are determined in the laboratory.

The main difference between the two approaches is that empirical methods employ relationships based on observations that are generally made in the field, whereas mechanistic methods use material behaviour laws whose engineering parameters are generally determined in the laboratory. Mechanical behaviour models can be used to calculate the distribution of stresses and strains in pavements based on the stiffness of the materials in order to determine the service life of the pavement as a function of the damage resistance of the materials.

An asphalt mix is the material used as the surface course for flexible pavements. Figure 1 shows the tensile and compressive stresses in asphalt mixes during the passage of vehicles. An asphalt mix is a material made of aggregates bounded with an asphaltic binder, and therefore, vehicle traffic subjects the pavement to bending stresses. The upper portion of the surface course is subjected to compressive stresses, whereas the lower portion of the surface course is subjected to tensile stresses.

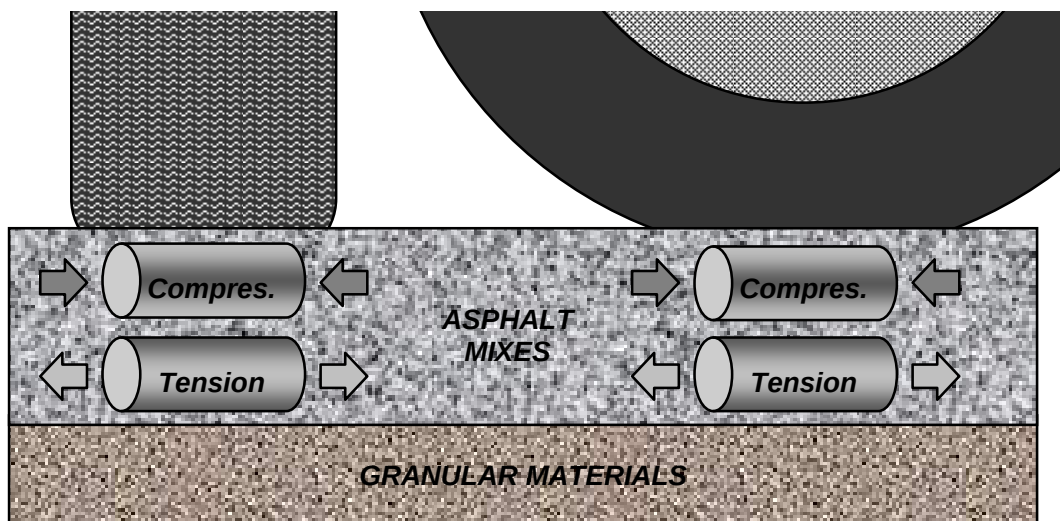


Figure 1 – Tensile and compressive loading on asphalt mixes resulting from vehicle traffic

However, as vehicles approach and leave, the upper portion of the surface course is subjected to tensile stresses and the lower portion is subjected to compressive stresses, but to a lesser extent. Asphalt mixes are generally laid in several layers, which are bounded together to ensure a continuous bending load transfer in order to optimize the structural performance of the pavement.

2.2 Complex Modulus

The complex modulus (E^*) is the expression of the stiffness of a viscoelastic material under cyclic loading, such as an asphalt mix. The deformation of a viscoelastic material depends on load duration, and is delayed through time, as opposed to an elastic material, for which deformation is instantaneous. Moreover, an asphalt mix is a thermosensible material, which means that the E^* value also varies with temperature. The E^* concept allows the generalization of methods developed to solve mechanical problems for elastic materials to viscoelastic materials (Di Benedetto et al., 2005).

The E^* is a complex number comprising a real part (E_1) and an imaginary part (E_2), as shown in Equation 1. In its vectorial form, the E^* can also be broken down into two parameters, namely its modulus ($|E^*|$) (vector norm), as presented in Equation 2, and its argument (ϕ) (vector angle) in Equation 3, as depicted in the complex plane of Figure 2.

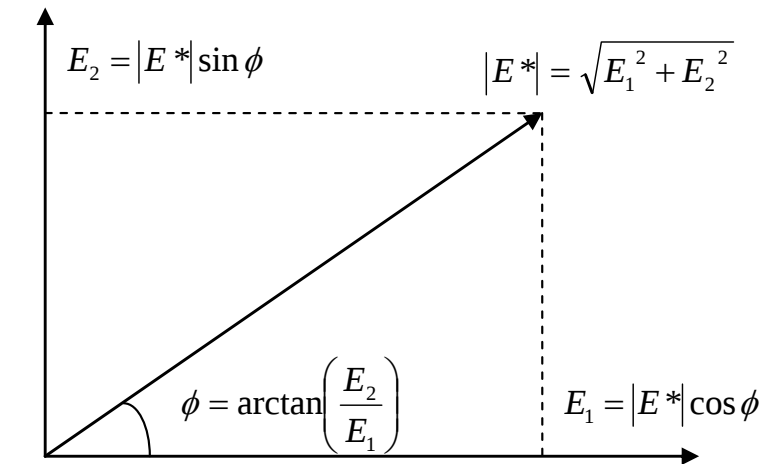


Figure 2 – Representation of the complex modulus

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

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

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

where E^* = complex modulus (MPa),
 $|E^*|$ = modulus of the complex modulus (MPa),
 ϕ = complex modulus argument (rad),
 E_1 = real part of the complex modulus (MPa),
 E_2 = imaginary part of the complex modulus (MPa),
 i = imaginary number ($\sqrt{-1}$).

The E^* of an asphalt mix is determined from cyclic tests at small deformations ($< 100 \mu\text{m/m}$) in the linear range of the mechanical behaviour, where the stiffness of the asphalt mix is independent of stress or strain state (Di Benedetto et al., 2005). Figure 3 shows a sinusoidal loading cycle under alternating tension-compression on an asphalt mix.

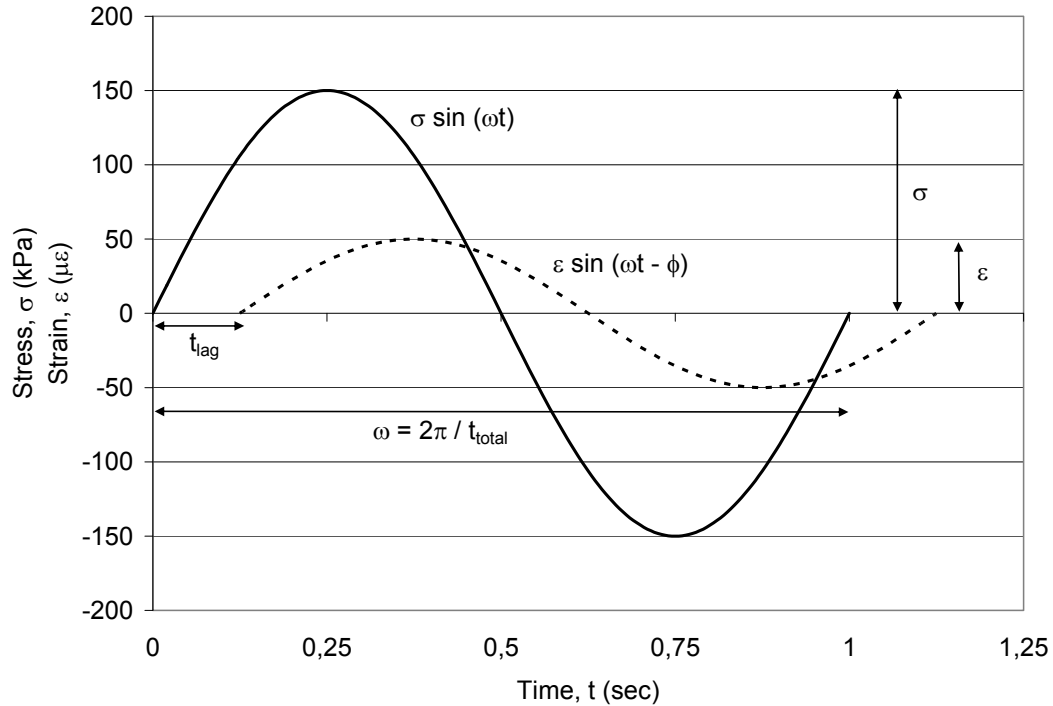


Figure 3 – Alternating tensile-compressive sinusoidal loading on an asphalt mix

Under cyclic loading, the E^* is the ratio between the cyclic stress and the cyclic strain, as shown in Equation 4. Strain lags the stress, creating a phase lag in the equation that is then expressed by a complex number. The $|E^*|$ value of the asphalt mix is called "dynamic modulus" in pavement mechanics, and is determined according to Equation 5. The ϕ is called the "phase angle", and is determined according to Equation 6.

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

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

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

where E^* = complex modulus (MPa),
 $|E^*|$ = dynamic modulus (MPa),
 ϕ = phase angle (rad),
 σ = stress (MPa),
 ε = strain (m/m),
 ω = time period (rad/s),
 t = loading time(s),
 t_{lag} = phase lag time between σ and ε (s).

The $|E^*|$ is the ratio between total (maximum) stress and total (maximum) strain, even though they are not simultaneous. The $|E^*|$ value is an approximation of the elastic modulus for a viscoelastic material that can be used to design pavement structures using elasticity laws. The ϕ represents the phase lag between stress and strain. It varies from 0° for a purely elastic material (instantaneous reaction) to 90° for a purely viscous material. The $|E^*|$ is called the "dynamic modulus" in North America (AASHTO TP 62-07, ASTM D 3497-79) and the "stiffness modulus" in Europe (EN 12697-26). E^* is required in order to describe the complete viscoelastic behaviour of an asphalt mix.

2.3 Test Methods

The E^* of an asphalt mix is determined at different frequencies and temperatures at small deformations (strains) in order to characterize the linear viscoelastic behaviour of the mix. The American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), the American Society for Testing and Materials (ASTM), and the European Committee for Standardization (CEN) propose a variety of test methods for determining the E^* of asphalt mixes. These test methods are listed in Table 1, where direct and indirect tensile or compressive tests and multi-point bending tests are used.

Table 1 – Standardized test methods for determining the complex modulus of asphalt mixes

Standard	Test method	Status
AASHTO TP 62-07	Direct compression	Amended in 2007
ASTM D 3497-79	Direct compression	Approval renewed in 2003
ASTM D 4123-82	Indirect tension	Withdrawn in 2003
EN 12697-26	Two-point bending Three-point bending Four-point bending Indirect tension Direct tension-compression Direct tension	Edited in 2004

The MTQ selected the direct tension-compression (DTC) test for its homogenous loading, which is uniformly distributed in the test specimen so that the stress and strain state can be determined directly in the loading axis (Di Benedetto et al., 2005). In the case of bending and indirect tension tests, the stresses and strains are not distributed uniformly in the specimen, and are determined indirectly. The configuration of the DTC test is such that resistance to fatigue (tension-compression), permanent deformation (compression), and thermal cracking (tension) of asphalt mixes can also be determined (Doucet and Auger, 2007). The direct determination of stress and strain using the DTC test is shown in Equations 7 and 8 and in Figure 4.

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

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

where

- σ = axial stress (kPa),
- ε = axial strain (m/m),
- P = axial load (kN),
- d = specimen diameter (m),
- Δh = axial displacement (m),
- h = height for Δh measurement (100 mm) (m).

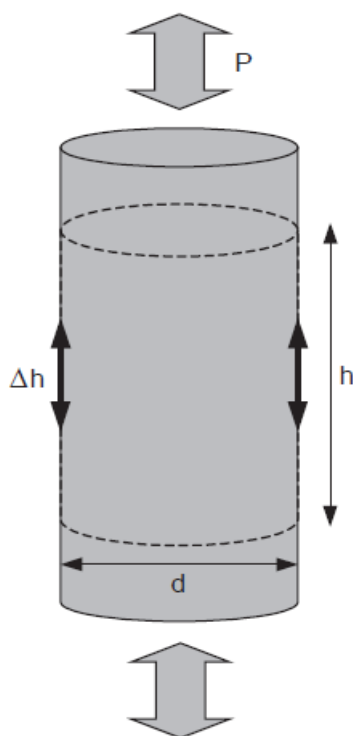


Figure 4 – Direct tensile-compressive axial loading and displacement (LC 26-700)

The DTC test is generally conducted under controlled strain, as opposed to direct compression tests where the stress is generally adjusted in order to obtain the desired strain, which makes conducting the test more complicated. In addition, the height of the test specimen is kept constant during the DTC test, whereas the specimen accumulates permanent deformation during the direct compression test. The DTC test reproduces the alternating horizontal tensile and compressive loading of the asphalt mix under bending stress (Figure 1), which corresponds to the fatigue damage mechanism asphalt mixes. The direct compression test reproduces the repeated vertical compressive loading, which corresponds to the permanent deformation damage mechanism.

The MTQ determines the E^* of asphalt mixes at small deformations through a frequency sweep test at different temperatures, in accordance with test method LC 26-700 "Determining the complex modulus of asphalt mixes", which is an adaptation of recognized test methods (AASHTO TP 62-07, ASTM D 3497-79, EN 12697-26). Table 2 shows the frequencies covered by the sweep, in order, and the number of cycles applied to each frequency. Table 3 shows the temperatures characterized, in order, and the level of strain applied at each temperature.

Table 2 – Frequencies and number of cycles used to determine the complex modulus at the MTQ (LC 26-700)

Frequency (Hz)	10	3	1	0,3	0,1
Number of cycles	100	30	10	6	6

Table 3 – Temperatures and strain levels used to determine the complex modulus at the MTQ (LC 26-700)

Temperature (°C)	-20	-10	0	10	20	30	40
Strain ($\mu\epsilon$)	30	40	50	50	50	50	50

The E^* of asphalt mixes is determined from the highest $|E^*|$ to the lowest $|E^*|$ by reducing the frequency and increasing the temperature. The number of cycles applied is the minimum required to obtain stable loading without damaging the asphalt mix, and only the last five cycles are used in the analysis. The strain level is limited to 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ in order to ensure that the E^* of the asphalt mix is determined within the linear range of behaviour, even at high temperatures.

2.4 Representation

The E^* results can be plotted in the Cole-Cole complex plane or in the Black space diagram. Figure 5 shows the E^* value for an asphalt mix in the Cole-Cole complex plane, as determined at different frequencies and temperatures, where E_2 is represented as a function of E_1 . Figure 6 shows the same E^* results in the Black space diagram, where ϕ is a function of the logarithm of $|E^*|$. The $|E^*|$ and ϕ of the mix are illustrated in polar form in the Cole-Cole plane for a given temperature and frequency. The Black space diagram can be used to visualize the maximum $|E^*|$ and the maximum ϕ of the mix.

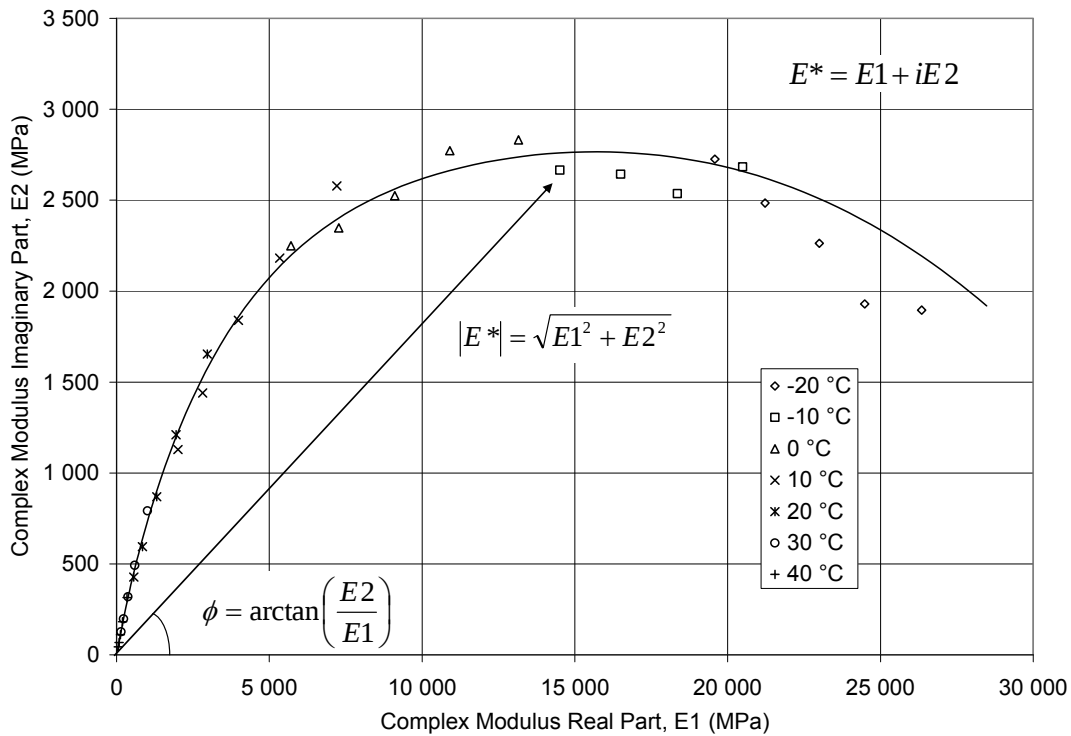


Figure 5 – Complex modulus of an asphalt mix in the Cole-Cole plane representation

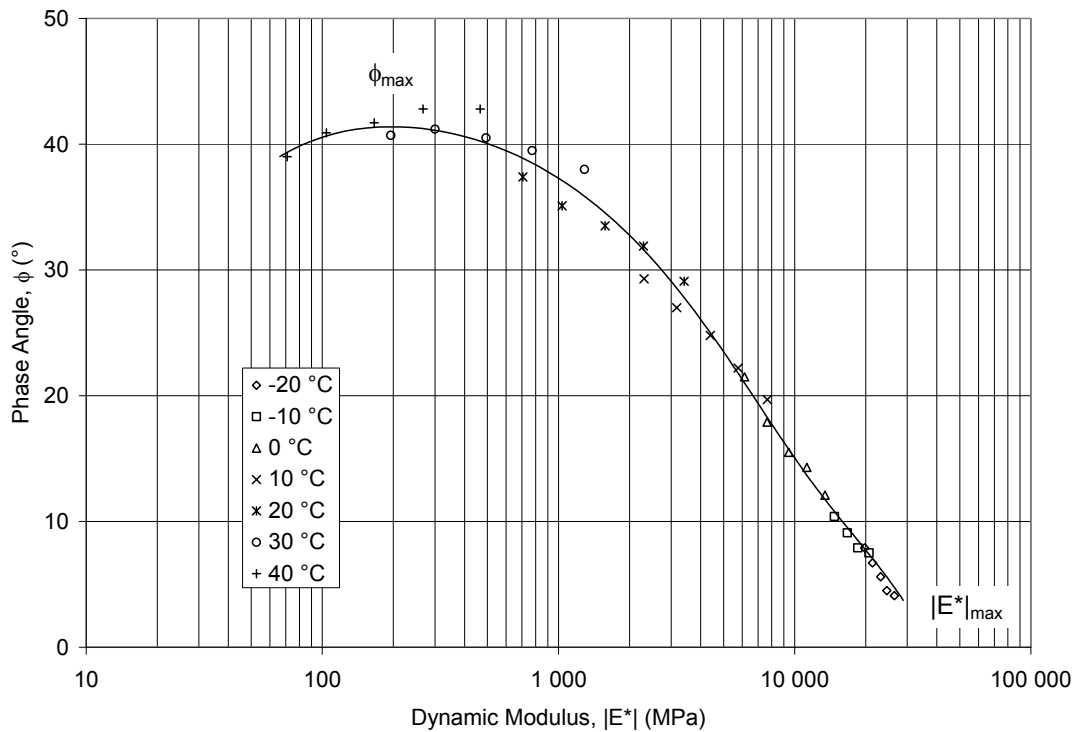


Figure 6 – Complex modulus of an asphalt mix in the Black space diagram

The Black curve shows that the ϕ of the mix increases as the $|E^*|$ decreases, or as the loading time or temperature increases. Although, the ϕ decreases at low $|E^*|$ values when the elastic behaviour of the aggregate becomes significant as compared to the viscoelastic behaviour of the binder. The Black curve of an asphalt binder does not show this characteristic decrease of the ϕ observed for asphalt mixes.

Asphalt mixes have a simple thermo-rheological behaviour when the E^* results follow a single curve in the Cole-Cole plane and Black space, which means that the time-temperature superposition principle applies. The time-temperature superposition principle states that the same E^* value can be obtained with different frequency-temperature couples, which allows for the determination of an equivalent frequency (reduced) for a reference temperature.

Therefore, the $|E^*|$ and ϕ isotherms can be translated (shifted) in relation to the frequency axis and superimposed as a master curve at a reference temperature. The construction of a master curve for a reference temperature of 10 °C using the $|E^*|$ isotherms is shown in Figure 7, and one using the ϕ isotherms is shown in Figure 8. The temperatures and frequencies prescribed by the test methods are selected with a view to ensure that the isotherms overlap in order to allow the construction of the master curves.

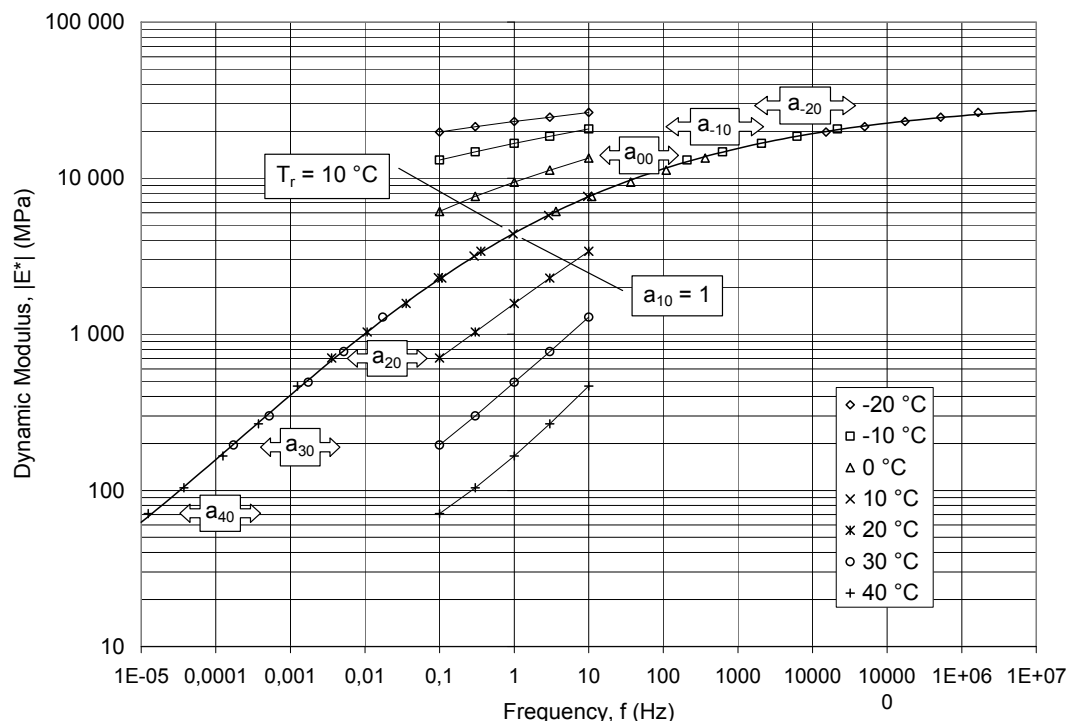


Figure 7 – Dynamic modulus master curve of an asphalt mix at 10 °C

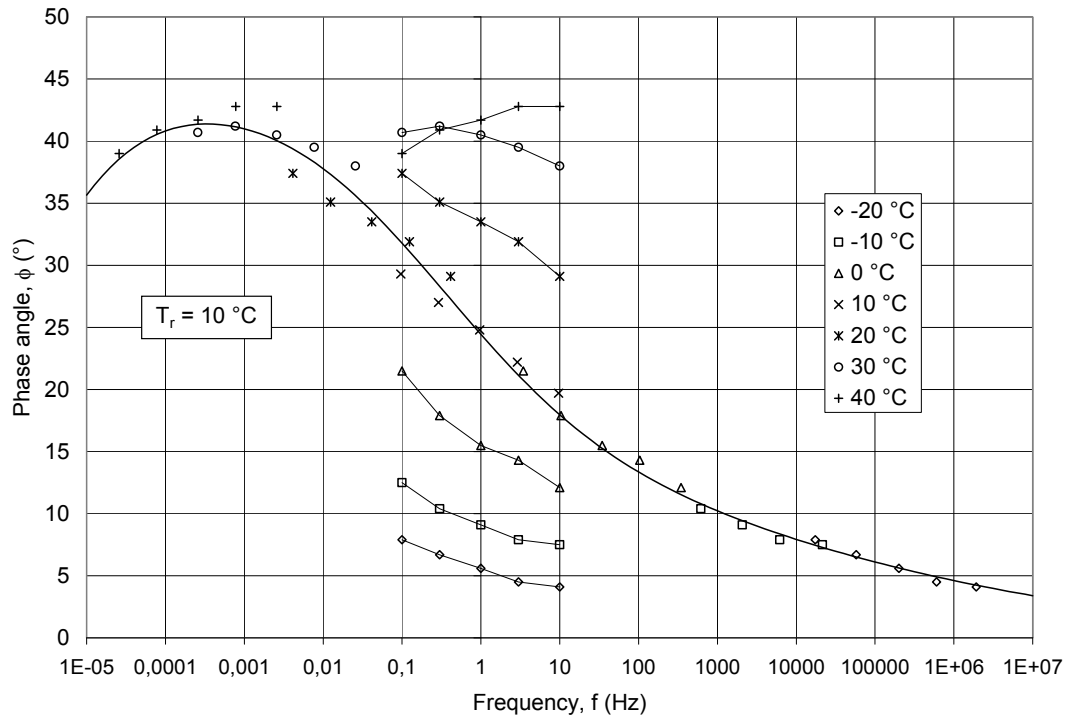


Figure 8 – Phase angle master curve of an asphalt mix at 10 °C

Similarly, the real part (E_1) and the imaginary part (E_2) of the E^* can be represented as master curves, as shown in Figure 9. The E_1 and E_2 are uniformly distributed in a bi-logarithmic plane, as opposed to the Cole-Cole arithmetic plane.

When constructing a master curve, a shift factor (a_T) is determined for each temperature, where the a_T of the reference temperature is equal to 1 ($\log a_T = 0$). A relationship between a_T and the temperature is then determined, as shown in Figure 10. This relationship is required in order to predict the E^* value at a temperature other than the reference temperature.

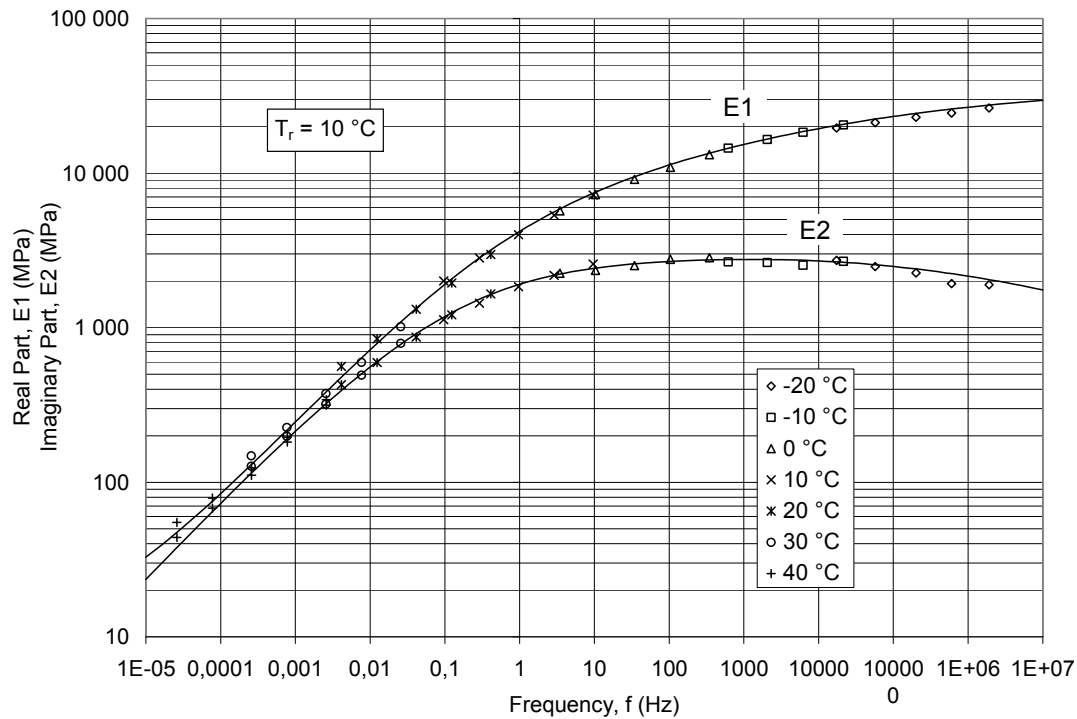


Figure 9 – Complex modulus master curves of an asphalt mix at 10 °C

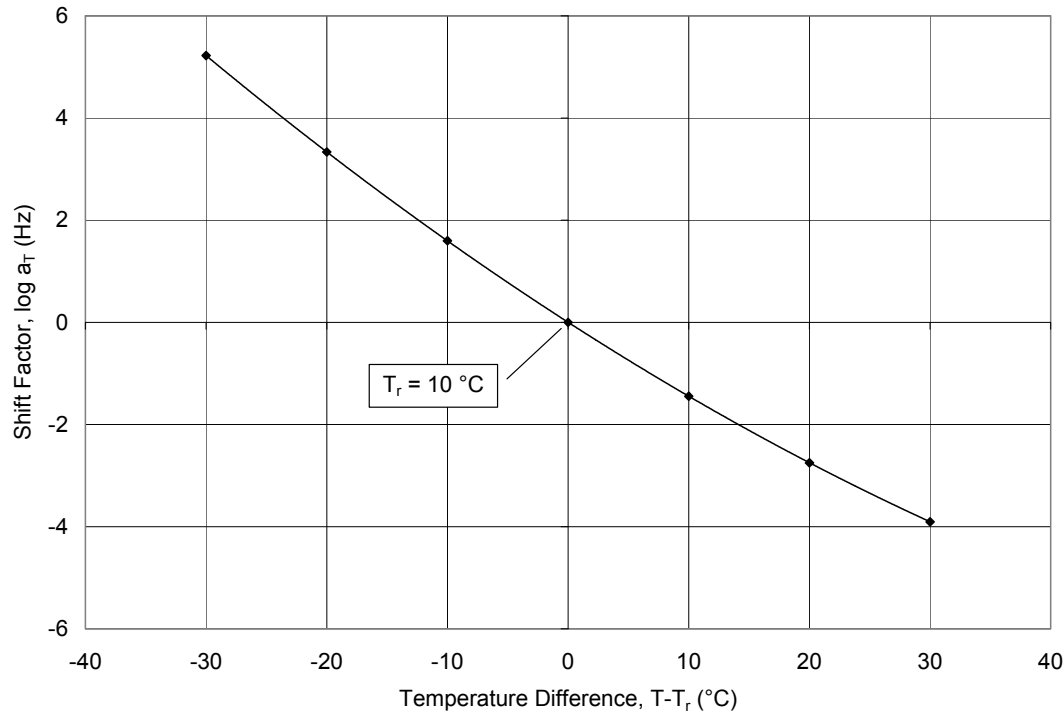


Figure 10 – Shift factors for an asphalt mix at a reference temperature of 10 °C

2.5 Modelling

The E^* of an asphalt mix can be modelled using the Huet-Sayegh analogical model presented in the Equation 9 (Huet, 1963; Sayegh, 1965). The regression coefficients of this model are associated with simple mechanical behaviours, such as springs (E_0 , E_∞) and parabolic dashpots (k , h), as illustrated in Figure 11. The model is a function of pulsation (ω) (frequency) and characteristic time (τ), adjusted for a reference temperature in accordance with the time-temperature superposition principle presented in Equation 10. The MTQ uses the quadratic equation indicated in Equation 11 to describe the relationship between $\log a_T$ and temperature.

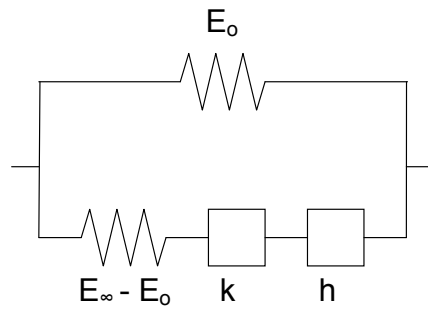


Figure 11 – Representation of the Huet-Sayegh analogical model

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

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

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

where E^* = complex modulus (MPa),
 τ = relaxation time (s),
 a_T = shift factor (MPa),
 i = imaginary number ($\sqrt{-1}$),
 ω = pulsation ($2\pi f$) (rad/s),
 T = temperature ($^{\circ}\text{C}$),
 T_r = reference temperature (10°C),
 E_0 , E_∞ , δ , k , h , τ_0 , a_1 , a_2 = regression coefficients.

The MTQ determines the regression coefficients of the Huet-Sayegh model using the least squares method, by maximizing the coefficient of determination (R^2) of the prediction of $\log E_1$ and $\log E_2$. The prediction error is determined for the logarithmic values, because both components of the E^* are distributed more uniformly on a logarithmic scale (Figure 9). The E_1 and E_2 values are determined using Equation 12 and Equation 13.

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

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

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

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

The MTQ determines the E_o value of the model by extrapolation of the E_1 and E_2 values in the Cole-Cole plane at 30 °C and 0.1 Hz, and lower, as shown in Figure 12. The E_∞ is extrapolated in the Black space using the values of $|E^*|$ at 0 °C and 1 Hz, and greater, as shown in Figure 13.

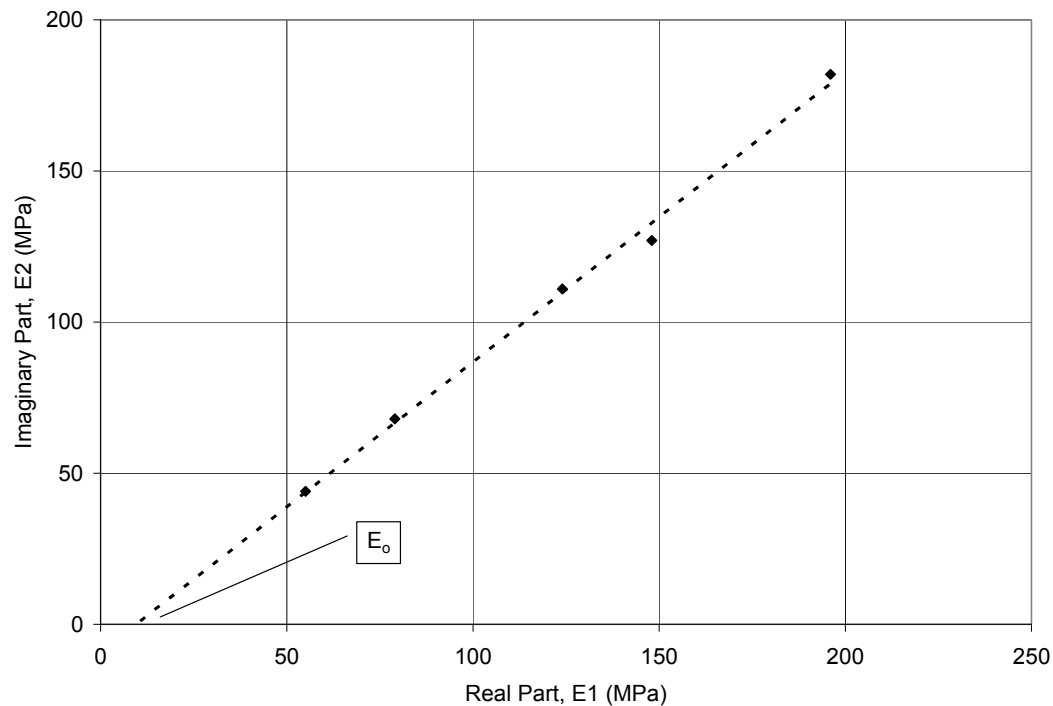


Figure 12 – Extrapolation of the E_0 value of an asphalt mix in the Cole-Cole plane

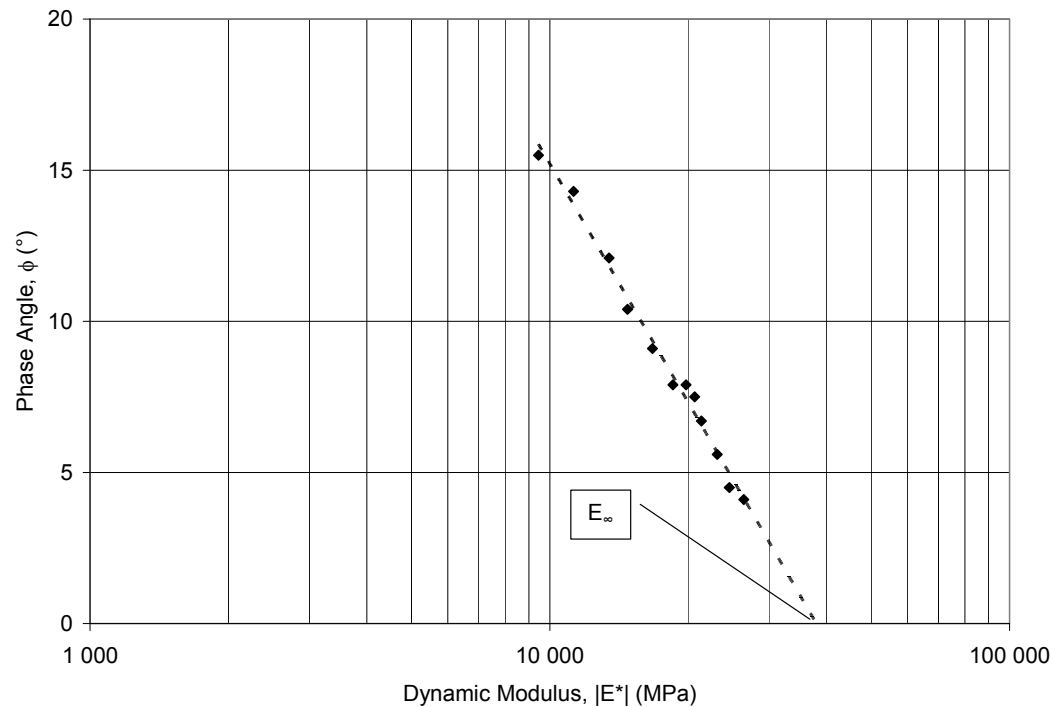


Figure 13 – Extrapolation of the E_∞ value of an asphalt mix in the Black space

The $|E^*|$ master curve can also be modeled using the Witczak model presented in Equation 14 (Witczak and Fonseca, 1996; Witczak, 2005). This model is used by the *Mechanistic Empirical Pavement Design Guide* (MEPDG) (NCHRP 1-37A) for designing pavement structures. This sigmoidal model varies between the $\log |E^*|_{\min} (\delta)$ and the $\log |E^*|_{\max} (\delta + \alpha)$ of the asphalt mix based on two shape parameters (β, γ) as a function of the reduced frequency (f_r) determined in accordance with the time-temperature superposition principle indicated in Equation 15. The MTQ uses the same quadratic equation presented in Equation 16 to model the influence of temperature.

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

$$\text{Equation 15: } f_r = a_T \cdot f \Leftrightarrow \log f_r = \log f + \log a_T$$

$$\text{Equation 16: } \log a_T = a_1(T - T_r) + a_2(T - T_r)^2$$

where

- $|E^*|$ = dynamic modulus (MPa),
- f_r = reduced frequency (Hz),
- f = frequency (Hz),
- a_T = shift factor (Hz),
- T = temperature ($^{\circ}\text{C}$),
- T_r = reference temperature (10°C),
- $\delta, \alpha, \beta, \gamma, a_1, a_2$ = regression coefficients.

The MTQ determines the regression coefficients of the Witczak model using the least squares method, by minimizing the mean error (RMSE) of the $\log |E^*|$ prediction. The Witczak and Huet-Sayegh models have a similar form and give a similar $|E^*|$ prediction, but the Witczak model does not predict the E^* of the asphalt mix (Doucet, 2006). Therefore, the Witczak model is limited to an elastic analysis of pavement structures, whereas the Huet-Sayegh model is required for a viscoelastic analysis, and can also be used for elasticity.

3. DIRECT TENSION-COMPRESSION TEST

3.1 DTC Equipment

In 1995, the MTQ acquired a 100 kN CS 7800 axial testing system from James Cox and Sons that included a controlled temperature chamber with a -20°C to 80°C range for determining the complex modulus and fatigue resistance of asphalt mixes using a four-point flexural beam test (Doucet et al., 1999a, 1999b; Doucet, 2000). In 2005, the equipment was retrofitted in-house, following a major breakdown, by replacing the entire set of electrical components, programming new software for control, acquisition and analysis in LabView, and modifying the temperature control system (Doucet and Auger, 2007). The test method was also modified for a direct tension-compression (DTC) test. Figure 14 shows a photo of the test equipment, Figure 15 a photo of the DTC test and Figure 16 the Labview control screen.



Figure 14 – Photo of the hydraulic axial testing system and controlled temperature chamber

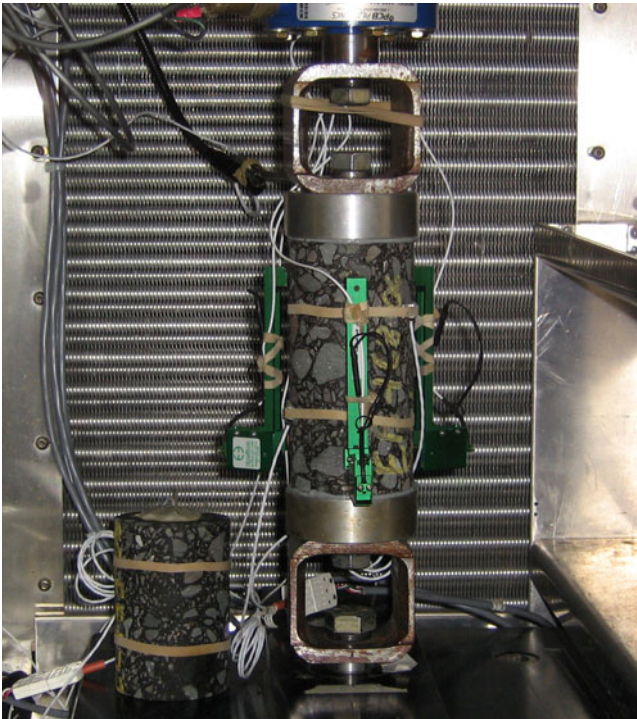


Figure 15 – Photo of direct tension-compression test

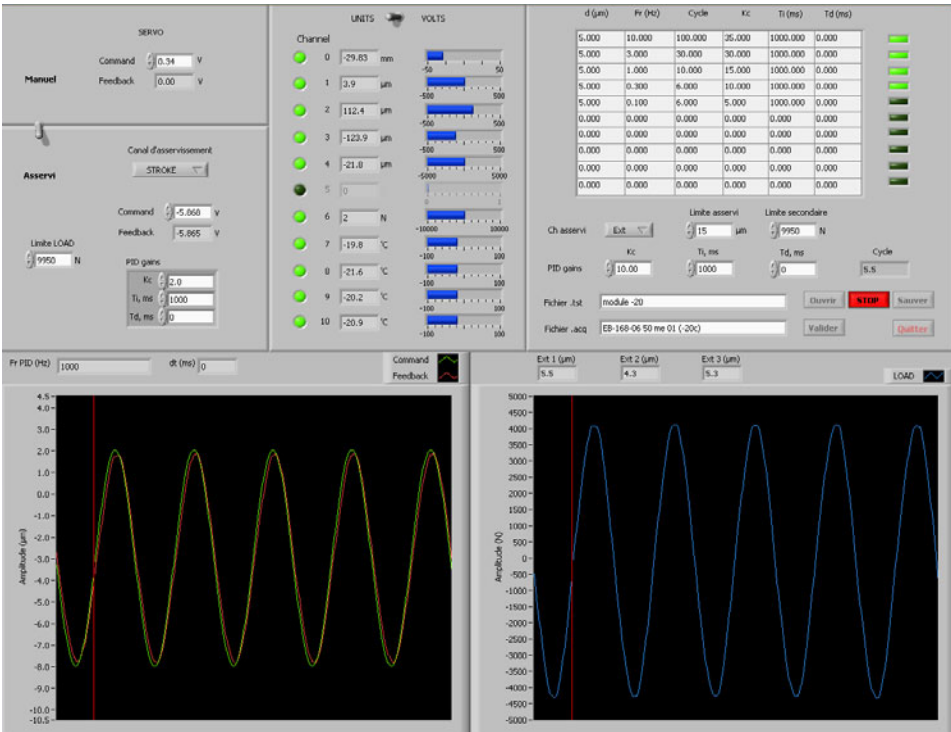


Figure 16 – Control screen for direct tension-compression test

The LC 26-700 test method uses a DTC apparatus as per the schematic shown in Figure 17. An aluminium loading platen is glued to each end of an asphalt test specimen measuring 75 mm in diameter and 150 mm in height using epoxy cement.

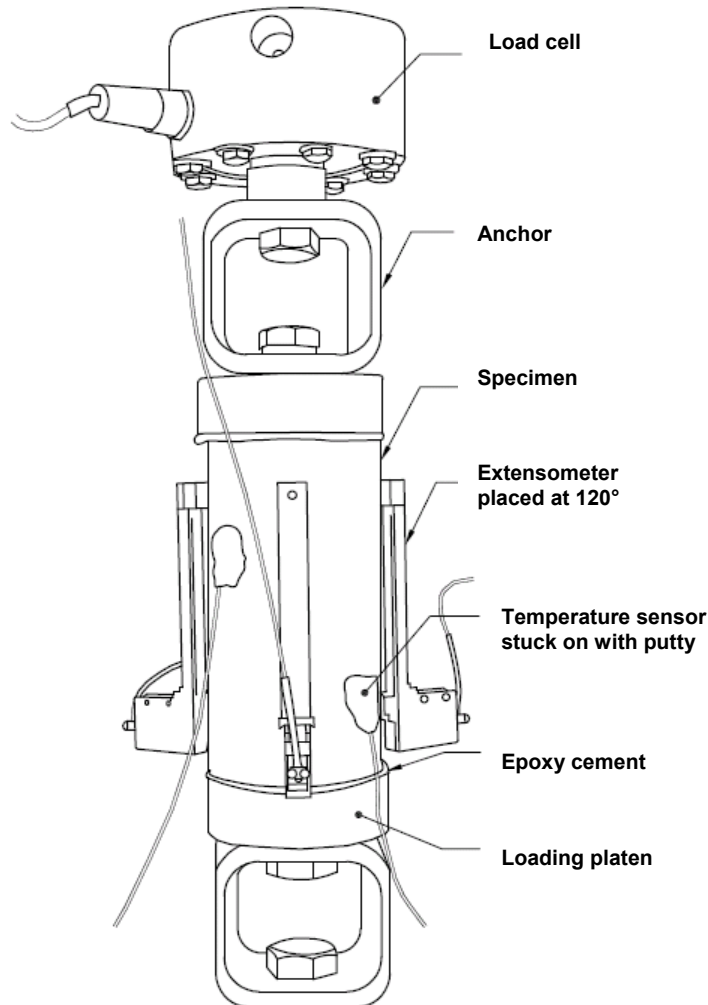


Figure 17 – Schematics of direct tension-compression equipment (LC 26-700)

Displacements are measured using three 100 mm extensometers with a range of ± 0.5 mm and an accuracy of $0.5 \mu\text{m}$. Magnetized extensometers are installed at 120° around the central two-thirds of the specimen (100 mm) on steel posts glued to the specimen. The extensometers are regularly calibrated using a certified micrometer. The coefficient of variation between the three displacement amplitudes measured during the tests have to be less than 20%, except at low temperature where the strain level is reduced in order to take into account the greater stiffness of the asphalt mix and the capacity of the load cell.

The load is measured using a load cell with a capacity of $\pm 4,450$ N and an accuracy of 2 N (0.05 %), which connects the upper loading platen to the piston of the axial testing system. The load cell is regularly calibrated using a certified load cell. A minimum amplitude of ± 10 N is required in order to obtain an acceptable load reading.

Temperature is measured by three temperature sensors with a minimum range of -20 °C to 50 °C and an accuracy of 0.1 °C. Two of the sensors are installed on the specimen using putty or rubber bands, and the third is installed inside a reference specimen. The temperature sensors are regularly calibrated using certified sensors. The difference in temperature between the three sensors is not to exceed 0.5 °C during the test.

3.2 Verification with an Aluminium Specimen

The general operation of the equipment was verified using an aluminium specimen, that is an elastic material with a constant elastic modulus and a phase angle of 0° , within the frequency and temperature ranges covered by the LC 26-700 method. The specimen has a 25 mm diameter and a 150 mm height, such that the load area is about one-tenth of the load area for the asphalt mix specimen, since the elastic modulus of aluminium is approximately 10 times greater.

The aluminium specimen was installed in the equipment five times in order to determine its elastic modulus and the phase lag in the strain measurement for a frequency sweep between 10 Hz and 0.1 Hz at 20 °C with a strain level of $50 \mu\text{m/m}$. The specimen was characterized five times for each installation, for a total of 25 tests. Figures 18 and 19 respectively show the elastic modulus and the phase lag of the strain measurement as a function of frequency for each installation, including the average and the standard deviation for the 25 readings. This verification should be conducted at least once per year in order to ensure that the equipment is in proper working order.

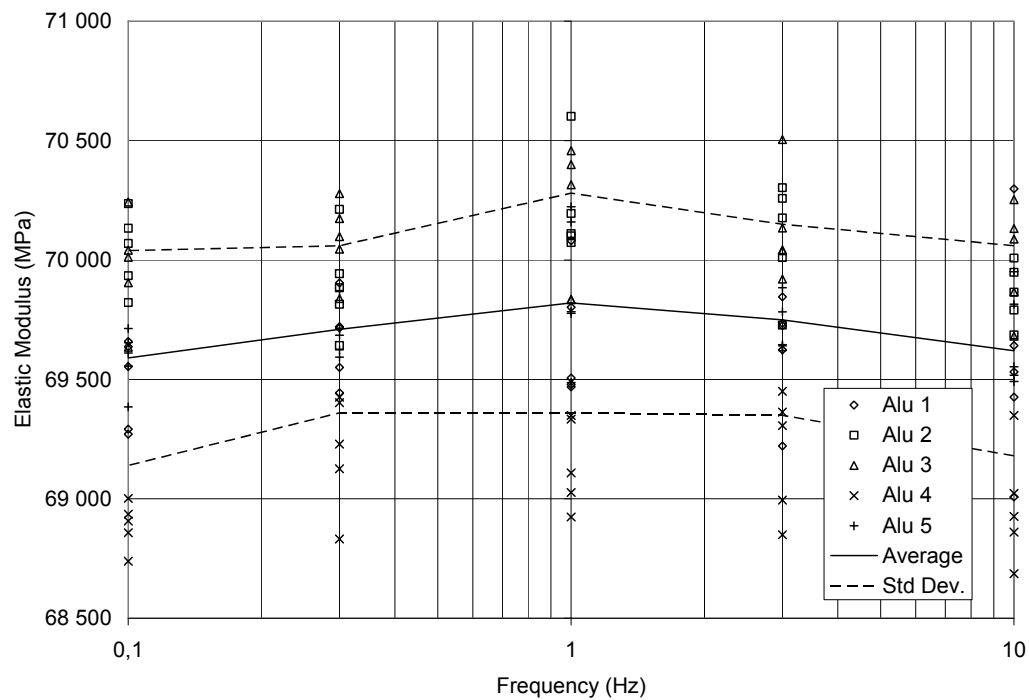


Figure 18 – Elastic modulus of an aluminium specimen at 20 °C as a function of frequency

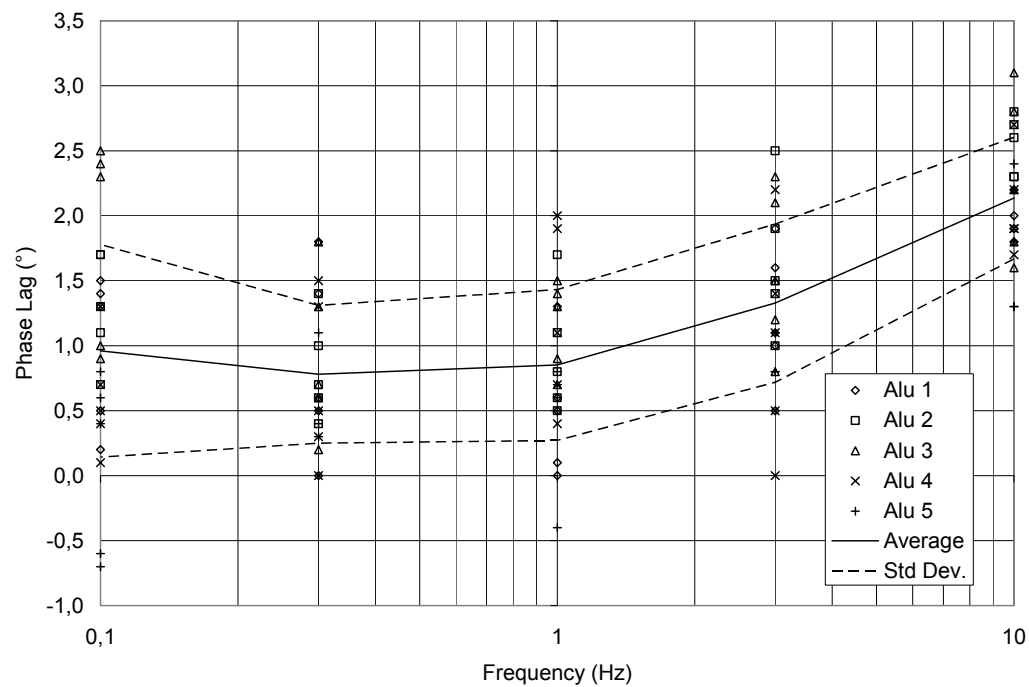


Figure 19 – Phase lag for the strain measurement of an aluminium specimen at 20 °C as a function of frequency

The average and the standard deviation of the elastic modulus of the aluminium specimen and the phase lag for the strain measurement as a function of frequency are shown in Table 4. The results confirm that the elastic modulus of the aluminium specimen is constant at 69,700 MPa, with a low standard deviation of 420 MPa. The average phase lag for the strain measurement is 1.2°, with a standard deviation of 0.8°.

Table 4 – Elastic modulus and phase lag of the strain measurement of an aluminium specimen at 20 °C as a function of frequency

Frequency	Elastic modulus (MPa)			Phase lag (°)		
	Average	Std dev.	Number	Average	Std dev.	Number
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
Average	69,700	420	125	1.2	0.8	125

Therefore, the equipment gives a stable reading for the elastic modulus of the aluminium specimen, but lags in measuring its deformation. In light of this, in order to compensate for the phase lag attributed to the equipment, the average phase lag measured at each frequency using the aluminium specimen is subtracted from the phase angle (ϕ) value that is determined for the asphalt mix. However, the standard deviation for the phase lag of the deformation measurement indicates that the ϕ values for the asphalt mixes will nevertheless be variable.

3.3 Specimen Preparation

The AASHTO TP 62-07 and ASTM D 3497-79 test methods prescribe the use of a shear gyratory compactor (SGC) for preparing the specimens used to determine the E^* of asphalt mixes. A study of the air voids distribution in the specimens prepared with the MTQ's SGC revealed that the air voids are not uniformly distributed (Doucet and Auger, 2007).

Three GB-20 asphalt mix test specimens measuring 150 mm in diameter and 135 mm in height were prepared with 5, 6 and 7% air voids content using the SGC (LC 26-003), as shown in Table 5. Cored specimens measuring 75 mm in diameter taken at the centre of the SGC specimens revealed that the air voids ranged from 1.8% to 2.9%, and from 0.3% to 1.3% in the central 100 mm section where the E^* is determined. This variation in air voids in the specimens was deemed to be unacceptable.

Table 5 – Air voids in GB-20 asphalt mix SGC specimens and cored specimens

Specimens	Diameter (mm)	Height (mm)	Air voids V_i (%)		
SGC	150	135	5.0	6.0	7.0
Cores	75	135	1.8	2.9	2.8
Cut cores	75	100	0.3	1.0	1.3

The EN 12697-26 test method prescribes using a rolling wheel or gyratory compactor to prepare specimens for the DTC test. A study of the air voids in two 100 mm thick GB-20 slabs prepared using the MTQ's rolling wheel compactor (LC 26-400), shown in Figure 20, indicates that the distribution of air voids is uniform at the centre of the slab. In fact, the slabs prepared at 5% air voids have a uniform central section with 3% air voids, as determined by horizontal and vertical cores measuring 75 mm in diameter. The average air voids are indicated by the dotted areas in Figure 21. Each dotted area represents the average of two cores, with the dotted circles representing the vertical cores and the dotted rectangles representing the horizontal cores.

**Figure 20 – The MTQ rolling wheel compactor**

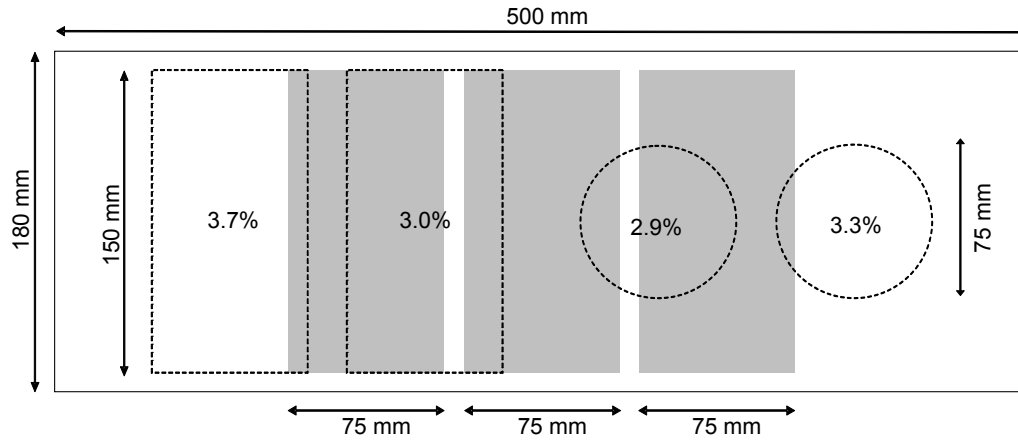


Figure 21 – Plan view of air voids distribution in a 100 mm thick GB-20 asphalt mix slab (Doucet and Auger, 2007)

Therefore, the rolling wheel compactor used in accordance with the LC 26-400 test method was selected for specimen preparation for the E^* determination with the DTC test. Three specimens measuring 75 mm in diameter and 150 mm in length are cored side-by-side in the center of the slab, as illustrated by the three grey areas in Figure 21. The ratio of specimen length to diameter is 2, in compliance with the minimum ratio of 1.8 prescribed by test method EN 12697-26. In addition, coring is carried out transversely to the compaction plane, which is the direction in which the tensile loading in the mix is the greatest on the road. The core drill used by MTQ for coring the specimens is shown in Figure 22.



Figure 22 – Core drill for coring specimens

The specimens are stored at ambient temperature and humidity for no less than two weeks and no more than two months before E^* determination, in accordance with test method EN 12697-26. The AASHTO TP 62 test method stipulates that specimens must be characterized no later than two days after they are prepared. If not, they must be covered with a plastic film for a maximum of two weeks in order to avoid aging. For reasons of repeatability and logistics, it is judged preferable to wait two weeks before tests are conducted in order to obtain similar aging of the specimens and to allow for the determination of the bulk specific gravity, the gluing of loading platens, and the E^* determination over several days.

The bulk specific gravity of the specimens is determined according to test method LC 26-040 in order to determine the air void content as a function of the maximum specific gravity of the asphalt mix. If the maximum specific gravity is unknown, it is determined using the specimens after E^* determination according to test method LC 26-045. The loading platens are affixed to the specimen with epoxy cement using the glue bench shown in Figure 23, which was specifically developed to ensure that the platens are glued perpendicularly and centered with the loading axis. The anchoring posts for the extensometers are glued with another glue bench, as shown in Figure 24, in order to ensure that the measurements are taken in the longitudinal axis of the specimen over an exact distance of 100 mm.

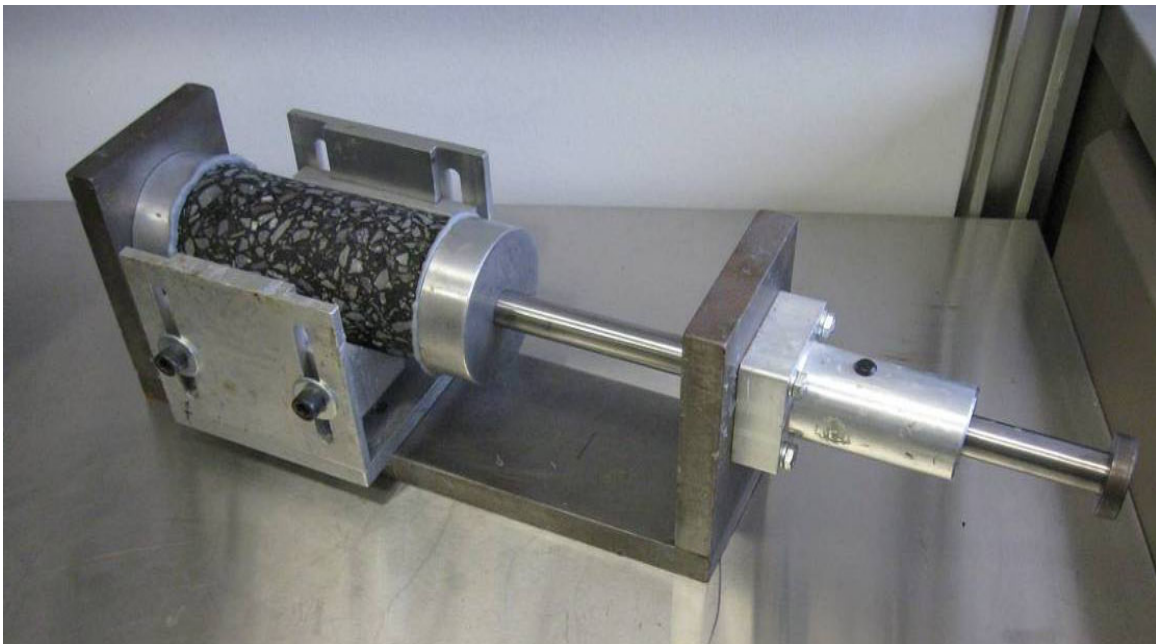


Figure 23 –Glue bench for loading platens



Figure 24 – Glue bench for anchor posts

3.4 Asphalt Mix Conditioning

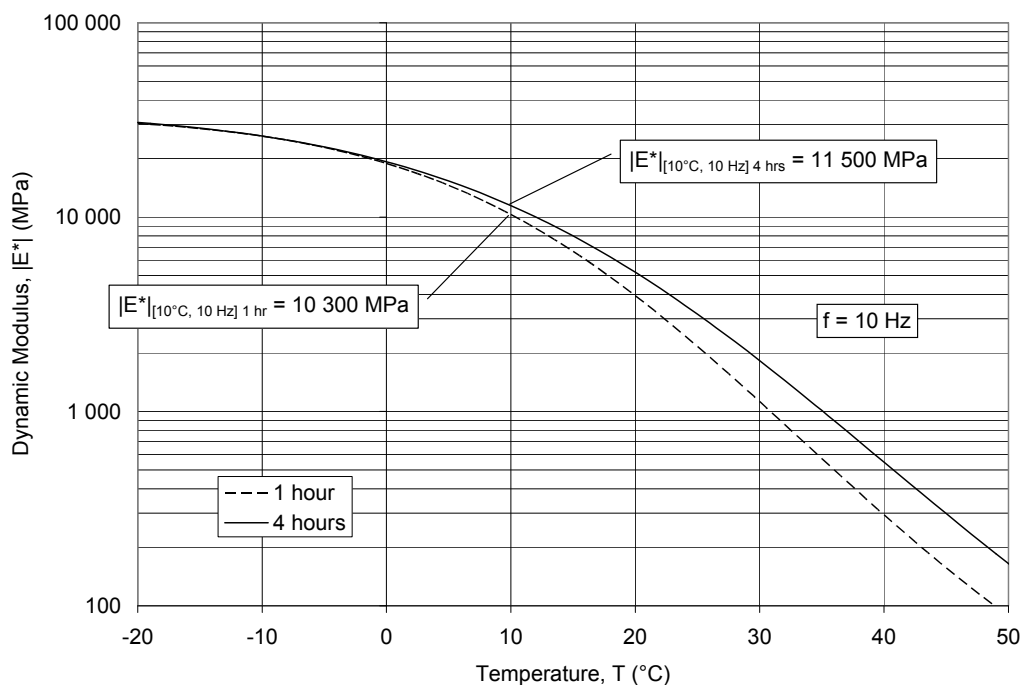
The LC 26-400 test method for preparing asphalt mix slabs with a rolling wheel compactor prescribes that the asphalt mix should be oven-cured for an hour at compaction temperature before compacting a 100 mm slab (LC 26-400). However, the AASHTO R 30-02 test method on the laboratory conditioning of asphalt mixes stipulates that, in order to determine the mechanical behaviour of asphalt mixes, the mix should be oven-cured for four hours before compaction, and that the mix, which is to be spread uniformly at a thickness of 25 to 50 mm, should be stirred every hour (AASHTO R 30-02). The four hours of conditioning simulates production of the mix at the plant, transportation and lay-down process. The one hour conditioning is used for the asphalt mixes control with the rut test, in order to reproduce the reheating of asphalt mixes sampled in boxes at the plant.

The E^* of an ESG-14 mix containing different asphalt binders was determined using one hour and four hours of conditioning times at the compaction temperature in order to assess the influence of conditioning and to determine the appropriate conditioning time for specimens preparation. Since the stiffness of mixes that were conditioned for one hour is less than that of those that were conditioned for four hours, the strain applied starting at 20 °C was increased in order to obtain adequate stress, as indicated in Table 6. The E^* test reports are reproduced in Appendices 1 and 2.

Table 6 – Strain level as a function of temperature for complex modulus determination of asphalt mixes with different conditioning times

Conditioning Time	Deformation level, ε ($\mu\varepsilon$)			
	-20 & -10 °C	0 & 10 °C	20 & 30 °C	40 & 50 °C
1 hour	30	50	70	100
4 hours	30	50	50	50

The $|E^*|$ master curves of ESG-14 asphalt mixes that were conditioned for one hour and four hours are shown in Figures 25 to 29 for different asphalt binders, as a function of temperature for a reference frequency of 10 Hz. The influence of conditioning time increases with temperature. The $|E^*|$ difference is perceptible starting at 0 °C for PG 58 binders and starting at -10 °C for PG 64 and PG 70 binders. The $|E^*|$ difference at 50 °C is approximately double for PG 58 binders and triple for PG 64 and PG 70 binders. The $|E^*|$ difference at 10 °C is approximately 1,000 MPa for PG 58-28 and PG 58-34 binders, 2,000 MPa for PG 64-28 binders, 3,000 MPa for PG 70-28 binders, and 4,000 MPa for PG 64-34 binders, which represents a significant difference in terms of pavement design.

**Figure 25 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for an ESG-14 mix with a PG 58-28 binder at different conditioning times**

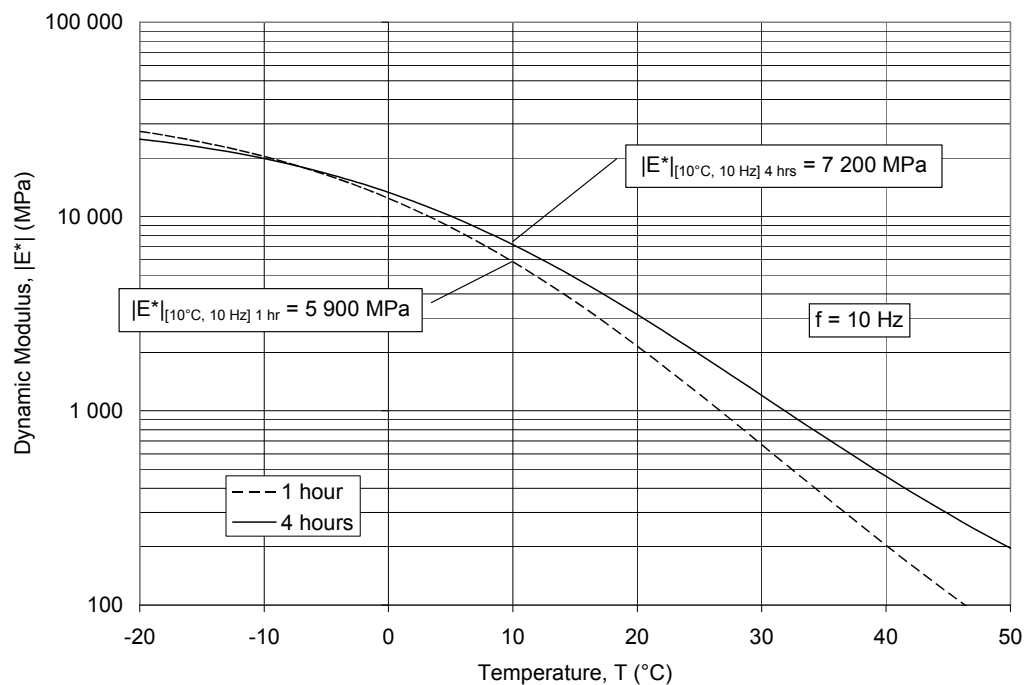


Figure 26 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder at different conditioning times

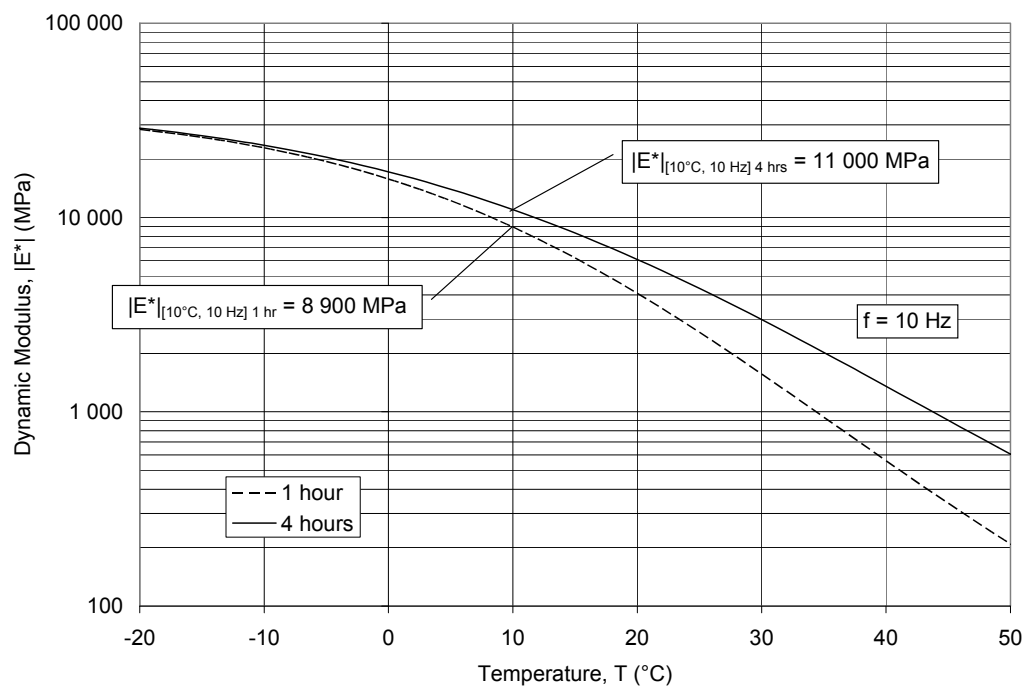


Figure 27 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for an ESG-14 mix with a PG 64-28 binder at different conditioning times

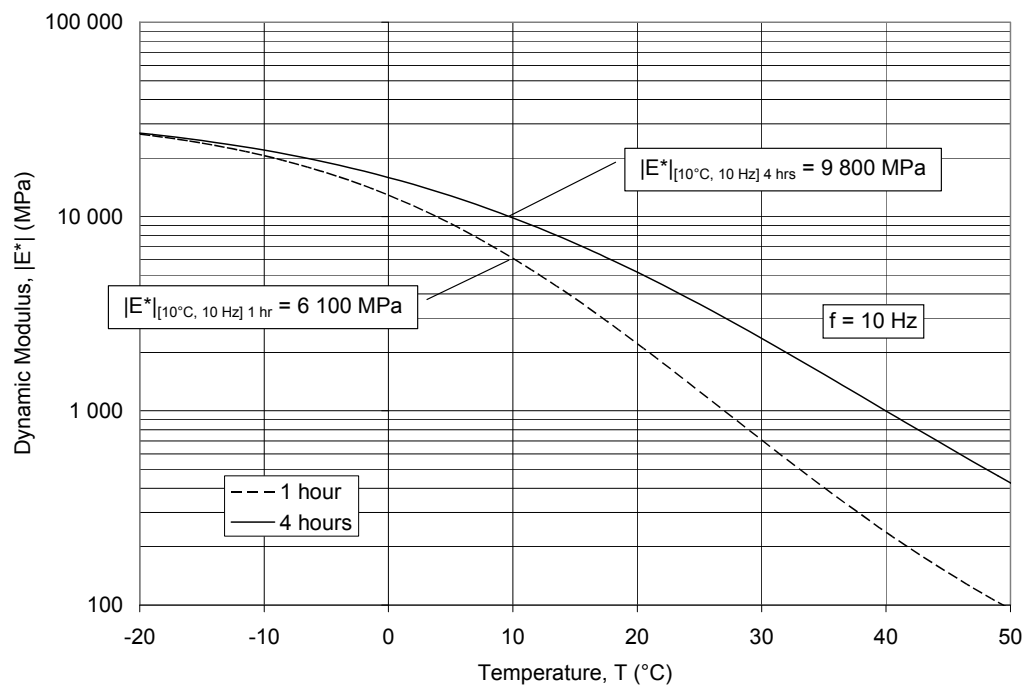


Figure 28 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for an ESG-14 mix with a PG 64-34 binder at different conditioning times

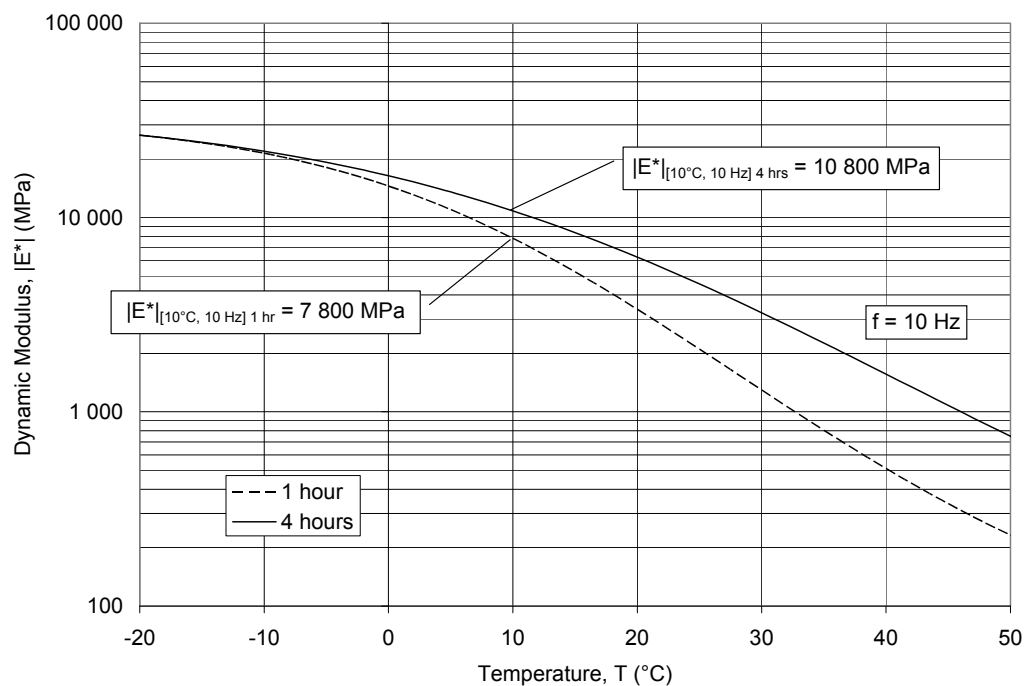


Figure 29 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for an ESG-14 mix with a PG 70-28 binder at different conditioning times

Conditioning time also influences the classification of asphalt mixes, as shown in Figure 30 for one hour of conditioning and Figure 31 for four hours of conditioning. The influence of conditioning time is particularly evident in the case of the mix with the PG 64-34 binder, where it is grouped with the PG 58-28 and PG 58-34 binders at high temperatures when conditioned for one hour, but is homologous with the PG 64-28 binder when conditioned for four hours. The mix with a PG 70-28 binder also stands out more at high temperatures when conditioned for four hours.

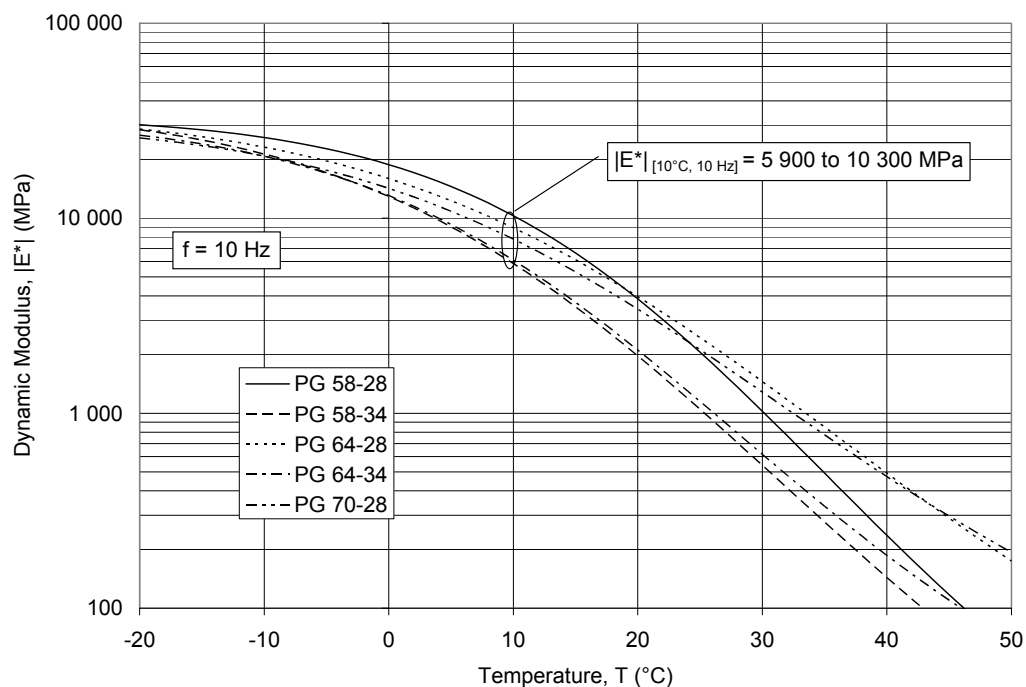


Figure 30 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for ESG-14 mixes conditioned for one hour with different binders

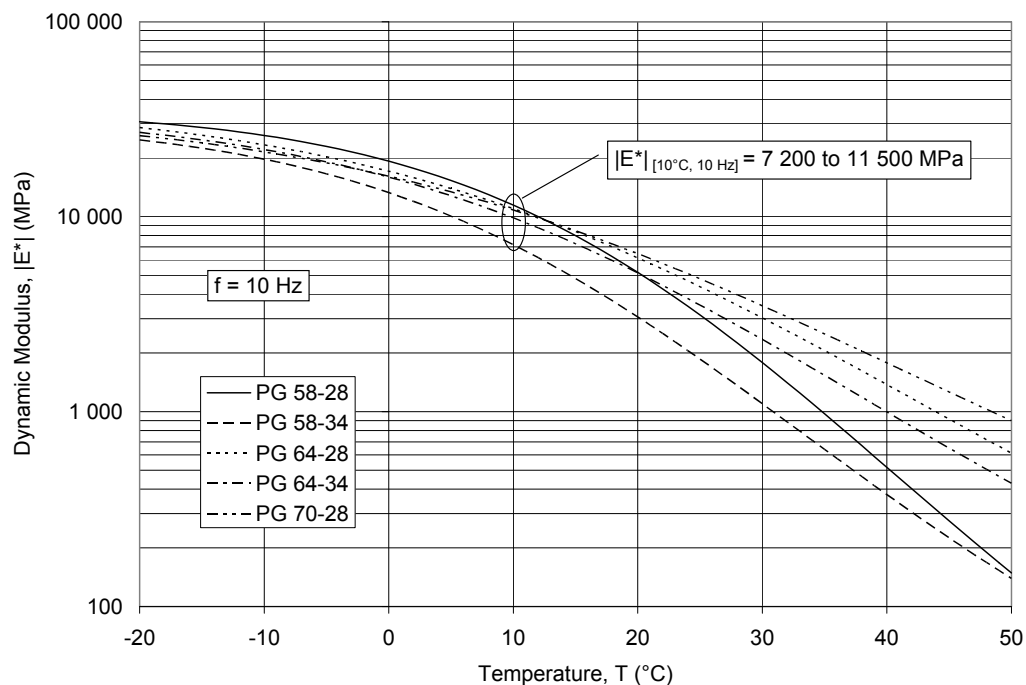


Figure 31 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for ESG-14 mixes conditioned for four hours with different binders

Therefore, four hours of conditioning is necessary to correspond to the PG binder classification (Norme 4101), principally in terms of high temperature characterization (T_H) of the PG which is determined after short-term aging simulated with the rolling thin film oven test (RTFOT). The low temperature (T_L) of the PG classification corresponds less to the $|E^*|$ determination, because T_L is determined after long-term aging using a pressurized aging vessel (PAV), which represents several years of road use. In addition, the $|E^*|$ values at high temperature seem more realistic after a four hours conditioning, which will be confirmed in Section 6.3 pertaining to models found in the literature. In light of this, the four hours conditioning time is selected for the LC 26-700 method.

4. REPEATABILITY STUDY

4.1 Study Methodology

Seven slabs of an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder were prepared in order to assess the repeatability of the E^* determination according to the LC 26-700 method using 21 specimens. The ESG-14 mix represents a gradation between the gradation of a 10 and 20 mm maximal nominal size gradation. The PG 58-34 binder represents 55% of the binder usage in Québec in 2008 (MTQ, 2009). The variability involved in preparing the slabs required the preparation of seven slabs in order to obtain a uniformly distributed range of air voids that could be used for the study, as shown in the Table 7. The test reports for the E^* determination are in Appendix 3.

Table 7 – Air voids in specimens of ESG-14 mix with a PG 58-34 binder used for the repeatability study

Slab	Air voids, V_i (%)							General
	1	2	3	4	5	6	7	
Specimen 1	4.0	5.5	4.7	5.6	4.2	4.7	5.1	-
Specimen 2	3.9	5.4	4.3	5.6	4.1	4.5	4.7	-
Specimen 3	3.8	5.5	4.5	5.5	3.9	4.5	5.0	-
Average	3.9	5.5	4.5	5.6	4.1	4.6	4.9	4.7
Std deviation	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.6
Number	3	3	3	3	3	3	3	21

The slabs are presented in order of preparation. Slab 1 was prepared for the conditioning study, and the others were prepared in pairs for the repeatability study. Air voids in pair 2 and 3 and pair 4 and 5 are different, but the voids in pair 6 and 7 are similar, and close to the average. The average air voids in the specimens is 4.7%, with a standard deviation of 0.6%. The standard deviation for the three specimens taken from the same slab averaged 0.15%, so four times less. Specimen 2 is always taken from the centre of the slab, and its air void content is similar to specimens 1 and 3.

4.2 Complex Modulus Repeatability

The regression coefficients for the Huet-Sayegh E^* model (Equation 9) at a reference temperature of 10 °C are shown in Table 8 for each slab, identified by their average air voids content. The models are determined for each slab using the combined results of the three specimens from the same slab. A general model is also determined for the seven slabs combined (21 specimens).

The coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE) and number of data (n) for the models are shown in Table 9. The RMSE for the $\log E_1$ and $\log E_2$ of the individual models average 0.033 and 0.028, respectively, whereas the RMSE for the $\log E_1$ and the $\log E_2$ of the general model are 0.069 and 0.054, which is two times the error. This appears to be due to the influence of the air voids on the E^* of the mix.

Table 8 – Regression coefficients for the Huet-Sayegh complex modulus model at 10 °C for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents

Air voids	Regression coefficients, 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	37000	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
General	7.7	36,000	2.353	0.166	0.477	6.54E-3	-0.140	7.27E-4

Table 9 – Statistical parameters for the Huet-Sayegh complex modulus model at 10 °C for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents

Air voids	Statistical parameters, E^* (MPa)				
	RMSE _{log E1}	R ² _{log E1}	RMSE _{log E2}	R ² _{log E2}	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
General	0.069	1.00	0.054	0.99	714

Figure 32 presents the E^* results in the Cole-Cole plane and the general prediction model, which shows that the prediction error is greater for higher E_1 values in the arithmetic plane. Figure 33 presents the E^* results and the general model in the Black space, which shows that the prediction error is greater for lower $|E^*|$ values in a logarithmic plane. Figure 34 shows that the prediction error is uniformly distributed for the log E_1 and the log E_2 as a function of the logarithm of frequency, which justifies the use of log E_1 and log E_2 for determining the regression coefficients of the Huet-Sayegh model. It should be noted that the various parameters form a single curve, which indicates that the time-temperature superposition principle is applicable.

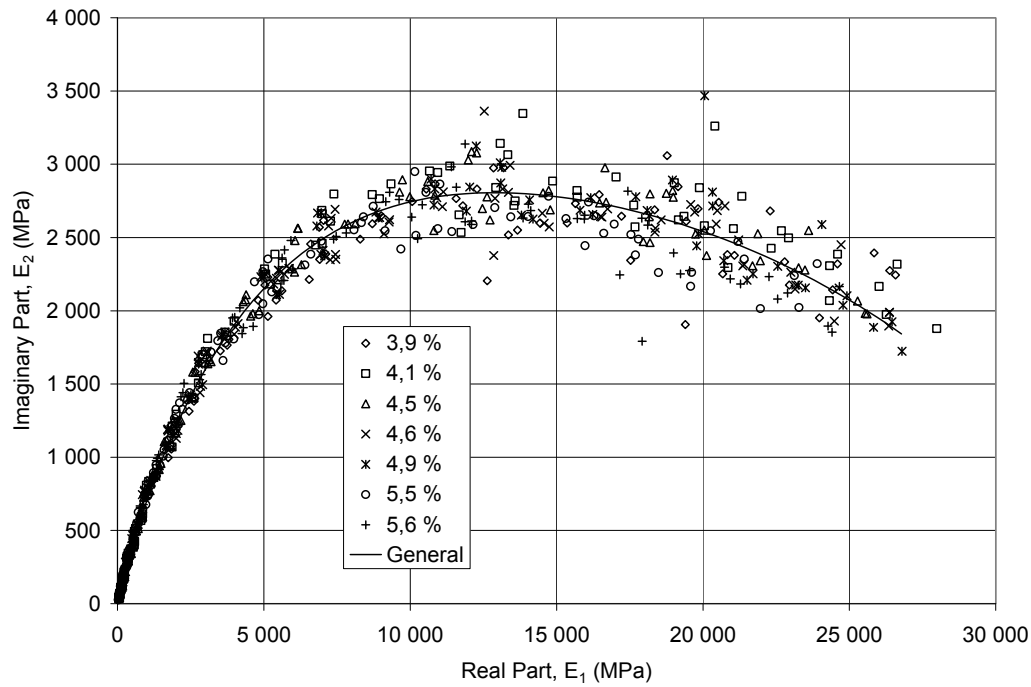


Figure 32 – Complex modulus of an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents in the Cole-Cole plane

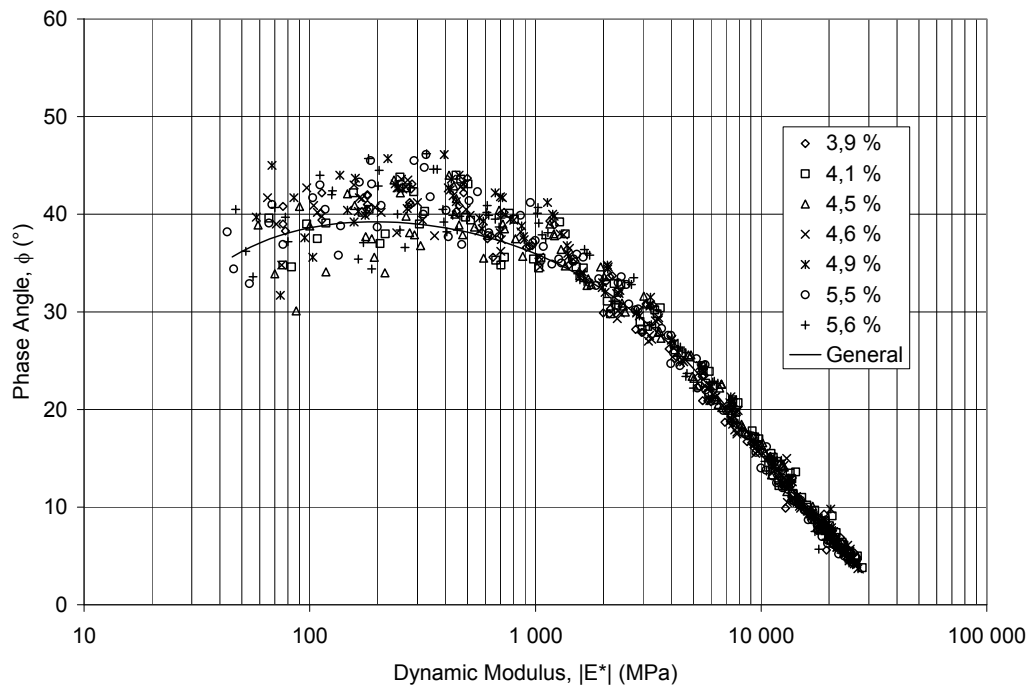


Figure 33 – Complex modulus of an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents in the Black space

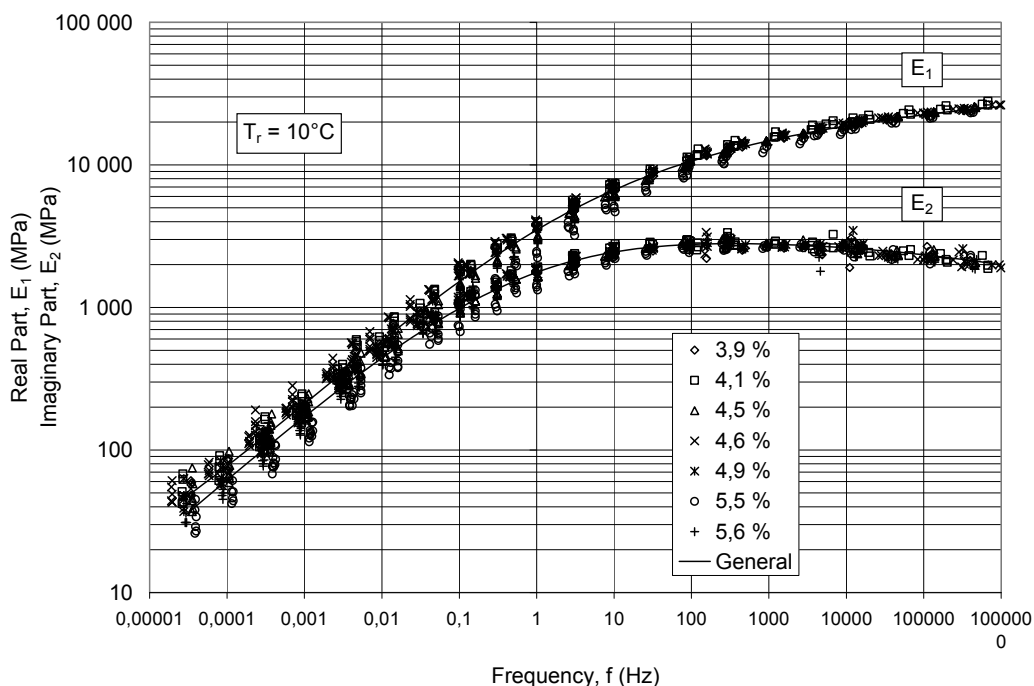


Figure 34 – Complex modulus master curves for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents

Tests were also conducted at 50 °C, but the results were not used for modeling because their variability was too high. In addition, the frequency sweep at 40 °C covers the $|E^*|$ values at 50 °C for 1, 3 and 10 Hz, and at 60 °C for 10 Hz, according to the time-temperature superposition principle, which represents a sufficient range of $|E^*|$ for pavement analysis.

4.3 Dynamic Modulus Repeatability

The regression coefficients for the Witczak $|E^*|$ model (Equation 14) are shown in Table 10 for each mix (3 specimens), and in general (21 specimens), at a reference temperature of 10 °C. The statistical parameters (R^2 , RMSE, n) for each model are shown in Table 11.

Table 10 – Regression coefficients for the Witczak dynamic modulus model at 10 °C for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents

Air voids	Regression coefficients, 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
General	0.299	4.223	-1.248	-0.389	-0.144	6.32E-4

Table 11 – Statistical parameters for the Witczak dynamic modulus model at 10 °C for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder for different air voids contents

Air voids	Statistical parameters, 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
General	0.061	0.99	714

The average RMSE of the log |E*| for each mix is 0.020, which is approximately one-third of the general RMSE of 0.061, which indicates that the air voids influence the |E*| of the mix. The influence of air voids on the |E*| at 10 °C and 10 Hz is shown in Figure 35. The R² of the relationship between the air voids and the |E*| is 0.52, which indicates that the variation in the |E*| value is not due to the variation in air voids exclusively, but that the variability of the test must also be taken into account.

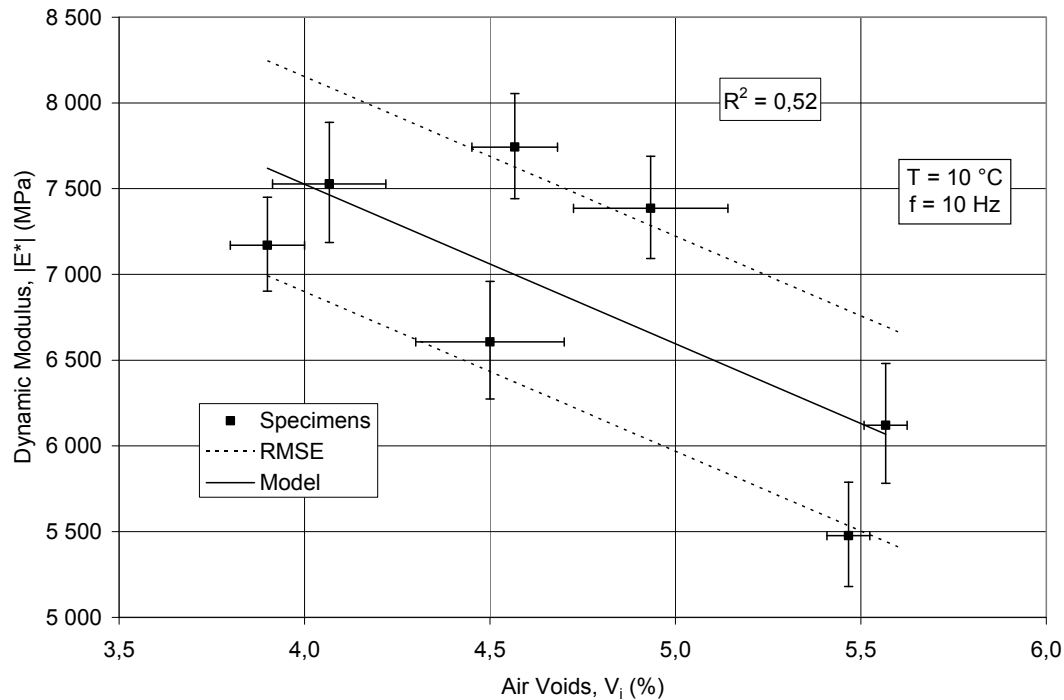


Figure 35 – Dynamic modulus of an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder at 10 °C and 10 Hz as a function of air voids

Figure 36 shows the $|E^*|$ results obtained for different air voids contents, as well as the general model with its RMSE. The variability of the results increases on a logarithmic scale as the $|E^*|$ value decreases, which means that the general RMSE overestimates the prediction error for high $|E^*|$ values and underestimates the prediction error for low $|E^*|$ values. Therefore, the general RMSE is more representative of the prediction error for intermediate $|E^*|$ values, namely between 0 °C and 20 °C. In addition, the RMSE for individual models is constant in relation to frequency, which indicates that the variability of the test is constant, but that the influence of air voids increases as the $|E^*|$ decreases.

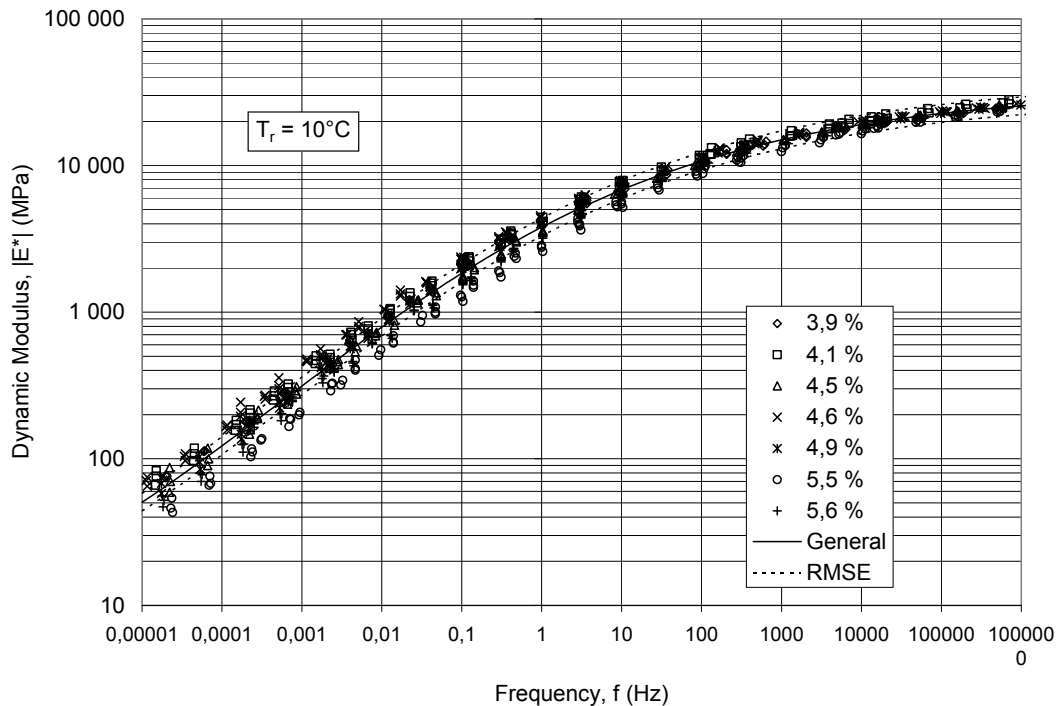


Figure 36 – Dynamic modulus general master curve for an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder with different air voids contents

The $|E^*|$ general master curve is shown in Figure 37 as a function of temperature for a frequency of 10 Hz, along with the average RMSE for individual models (0.020) and the general RMSE (0.061), both applied to the general model. The figure shows the influence of a variation in air voids of 0.15% (individual) and 0.6% (general) on the $|E^*|$ prediction of an ESG-14 mix with a PG 58-34 binder.

In light of this, a RMSE of 0.061 could be used as a first approximation instead of an RMSE of 0.020, if the air voids in the mix vary by 0.6% on-site instead of by 0.15% in the laboratory. Similarly, a 0.061 correction of the log $|E^*|$ value could be applied to estimate the influence of air voids in the mix on-site, if a difference of 0.6% is observed from the mix characterized in the laboratory.

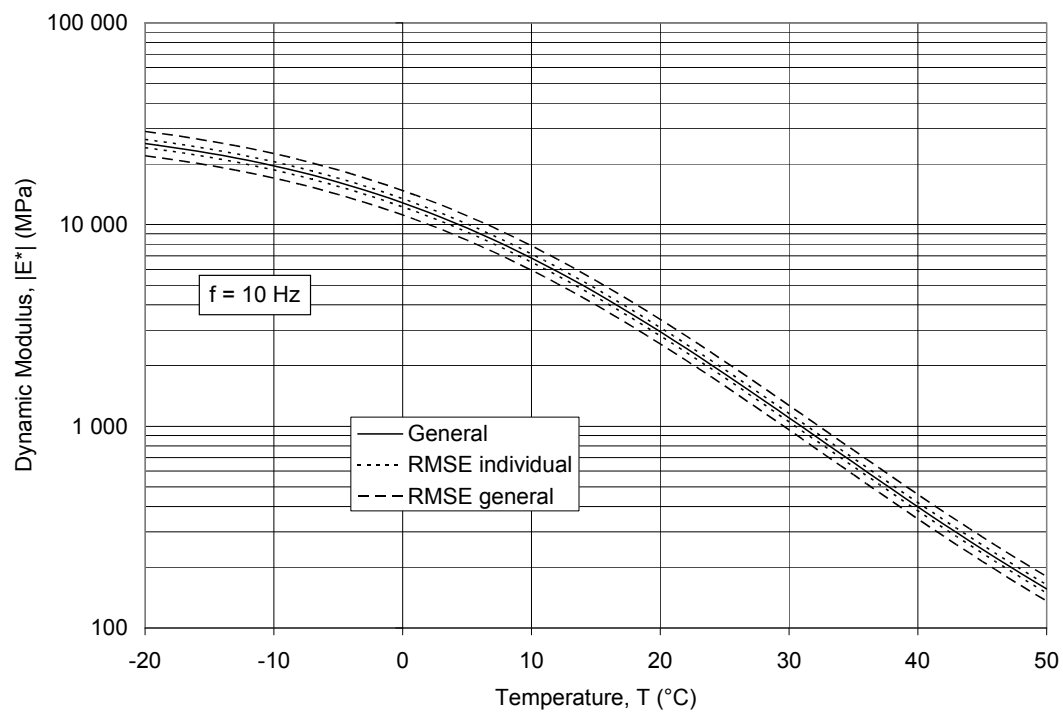


Figure 37 – Dynamic modulus general master curve at 10 Hz including individual and general prediction error

5. INDIVIDUAL RESULTS

5.1 Materials Studied

The E^* of three asphalt mixes formulated with five different asphalt binders is determined in order to study the influence of the gradation of the mix and the performance grade (PG) of the binder. The results will also serve as reference data for pavement analysis and design. The asphalt mixes studied are an ESG-10 surface-course mix, an ESG-14 base course or single course mix and a GB-20 base mix. The asphalt binders studied are a PG 58-28, PG 58-34, PG 64-28, PG 64-34 and PG 70-28.

The asphalt mix gradations are shown in Table 12 and in Figure 38, where the gradation of the ESG-10 and the ESG-14 mixes are similar, whereas the gradation of the GB-20 mix is coarser. The volumetric characteristics of the mixes, the SGC formulation, and the rutting test results are shown in Table 13. The mixes were formulated using a quarried basaltic aggregate.

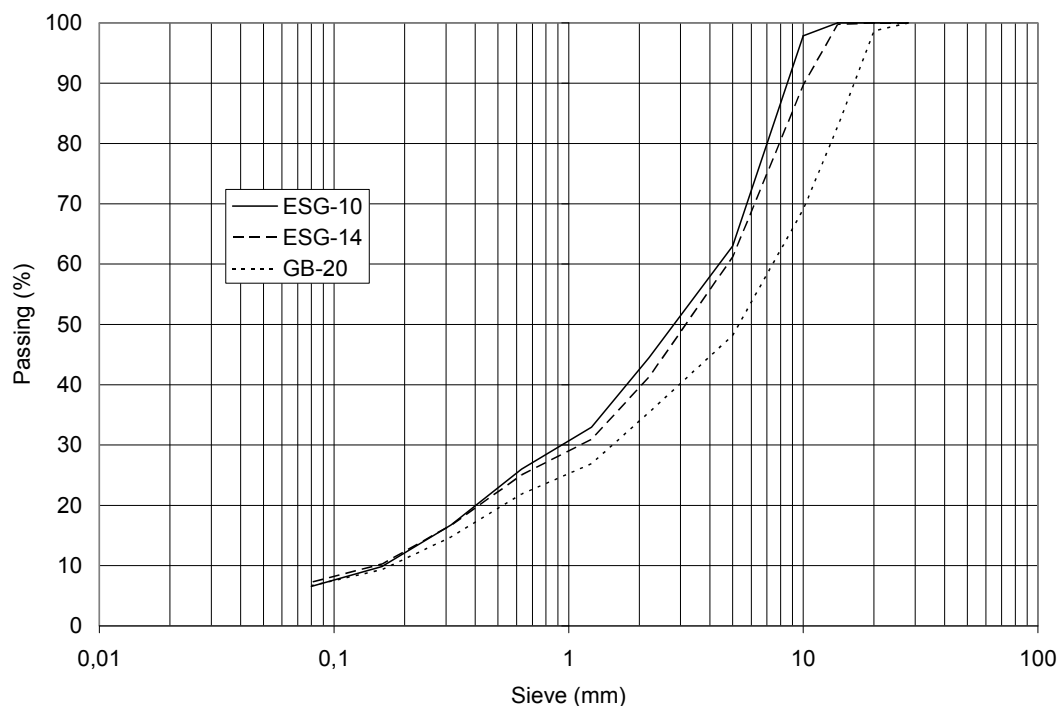


Figure 38 – Asphalt mix gradations

Table 12 – Asphalt mix gradations

Sieve	Passing (%)		
	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

Table 13 – Asphalt mix characteristics

Characteristic	Asphalt mix		
	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
SGC air voids (%)			
10 gyrations	14.3	12.7	14.5
80 gyrations	6.7	-	-
100 gyrations	-	5.0	-
120 gyrations	-	-	6.2
200 gyrations	4.1	3.3	4.9
Rut resistance (%)			
1,000 cycles	5.8	-	-
3,000 cycles	11.0	-	-
30,000 cycles	-	6.4	3.6

The selected asphalt binders belong to the five performance grades that are used the most in Québec, listed in order as PG 58-34, PG 64-34, PG 64-28, PG 70-28 and PG 58-28 (MTQ, 2009). The binder characteristics are shown in Table 14, including the PG classification, the softening point temperature (Ring & Ball), the elastic recovery for modified binders, and the mixing and compacting temperatures as a function of the binder viscosity (Norme 4101). The PG 64-34 binder low temperature does not comply according the MTQ tests, but the supplier's certificate is in compliance. Nevertheless, this binder will be identified as a PG 64-34. Each binder comes from a single source, that is different between the binders.

Table 14 – Asphalt binder characteristics

Characteristic	Asphalt binder				
	PG 58-28	PG 58-34	PG 64-28	PG 64-34	PG 70-28
High temp. (°C)	59.7	60.8	65.2	64.1	71.8
Low temp. (°C)	-28.6	-34.3	-29.3	-32.4	-30.5
Avg. soft. pt. (°C)	46.4	43.6	49.9	52.9	58.1
Elastic recovery (%)	-	56	38	71	70
Mixing temp. (°C)	150	155	155	168	168
Compaction time (°C)	135	140	145	152	160

A slab was prepared for each asphalt mix with the rolling wheel compactor, following a four hours conditioning at compaction temperature. Three specimens were cored at the centre of each slab (Figure 21). Average air voids are shown in Table 15. The average air voids in the mixes is 4.5%, with a standard deviation of 0.7% for the 45 specimens, which is similar to the air voids obtained in the repeatability study. Therefore, the variability in the air voids among the different mixes can mainly be explained by the variability in slab preparation.

Table 15 – Average air voids in asphalt mix specimens

Binder	Air voids, V_i (%)				Std dev.	Number
	ESG-10	ESG-14	GB-20	Average		
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
Average	4.8	3.9	4.8	4.5		
Std dev.	0.4	0.3	0.8	0.7		
Number	15	15	15	45		

Air void averages and standard deviations are also shown by mix and binder type. Air void standard deviations for GB-20 mixes and mixes with a PG 70-28 binder are higher, because air voids are significantly higher in the GB-20 mix with the PG 70-28 binder. The combination of the coarsest mix with the stiffest binder at high temperature may partially explain the higher air voids content, but the variability in slab preparation is more likely to explain the particularly high difference.

5.2 Complex Modulus Results

The E^* of the 15 asphalt mixes was determined using the LC 26-700 method. The test reports are presented in Appendix 3. The regression coefficients for the Huet-Sayegh E^* models (Equation 9) are shown in Table 16. The statistical parameters for the models (RMSE, R^2 , n) are shown in Table 17. The average RMSE of the models is 0.028 for the $\log E_1$ and .031 for the $\log E_2$, which is similar to the average RMSE of 0.033 ($\log E_1$) and 0.028 ($\log E_2$) that was obtained in the repeatability study.

Table 16 – Regression coefficients of the Huet-Sayegh complex modulus models at 10 °C for different asphalt mixes

Mix	Binder	Regression coefficients, 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

Table 17 – Statistical parameters of the Huet-Sayegh complex modulus models at 10 °C for different asphalt mixes

Mix	Binder	Statistical parameters, 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
Average		0.028	1.00	0.031	1.00	102
Std dev.		0.006	0.00	0.004	0.01	4

The E* curves are shown in the Cole-Cole plane for the ESG-10 mixes in Figure 39, for the ESG-14 mixes in Figure 40, and for the GB-20 mixes in Figure 41. The figures show that the binder type influences the rheology of the mix, especially in the case of the PG 58-28 and PG 70-28 binders. The gradation also influences the rheological behaviour, because the amplitude of the curves tends to increase with an increase in the nominal maximal diameter of the mix. Values at 10 °C and 10 Hz are shown in order to facilitate the interpretation of the curves.

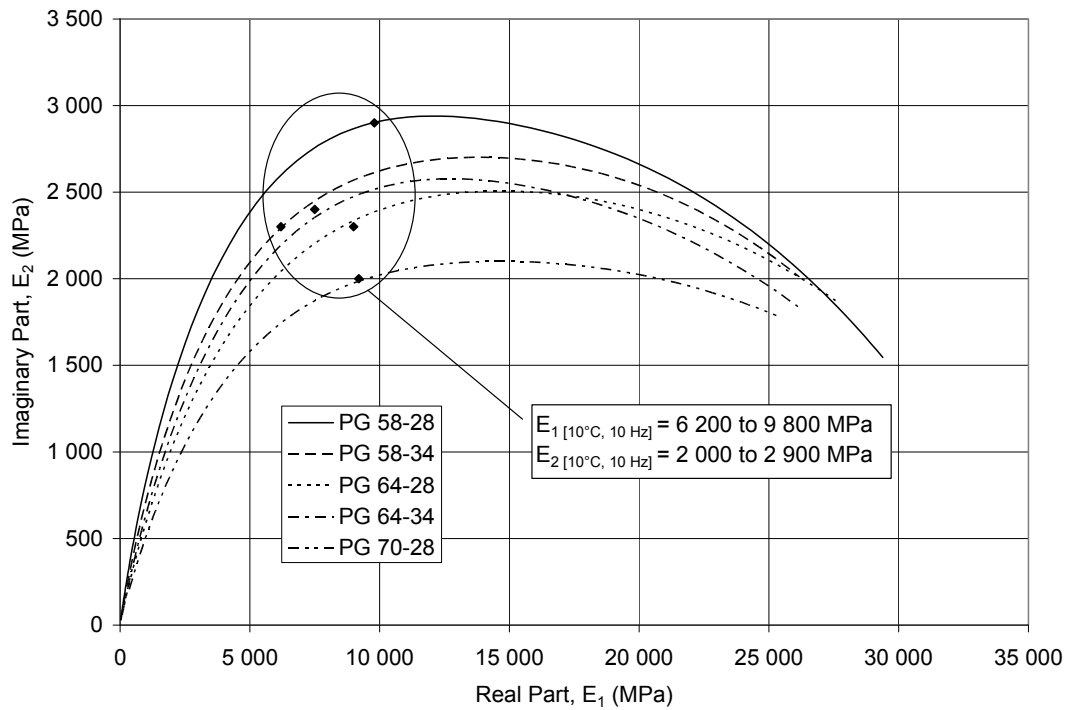


Figure 39 – Complex modulus curves for ESG-10 mixes in the Cole-Cole plane

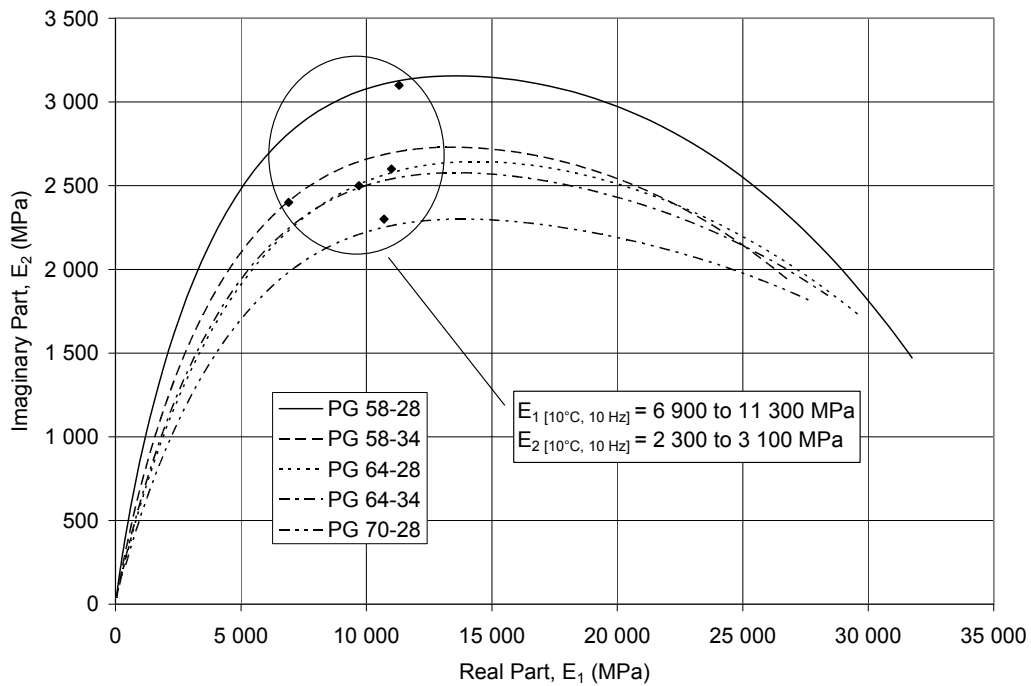


Figure 40 – Complex modulus curves for ESG-14 mixes in the Cole-Cole plane

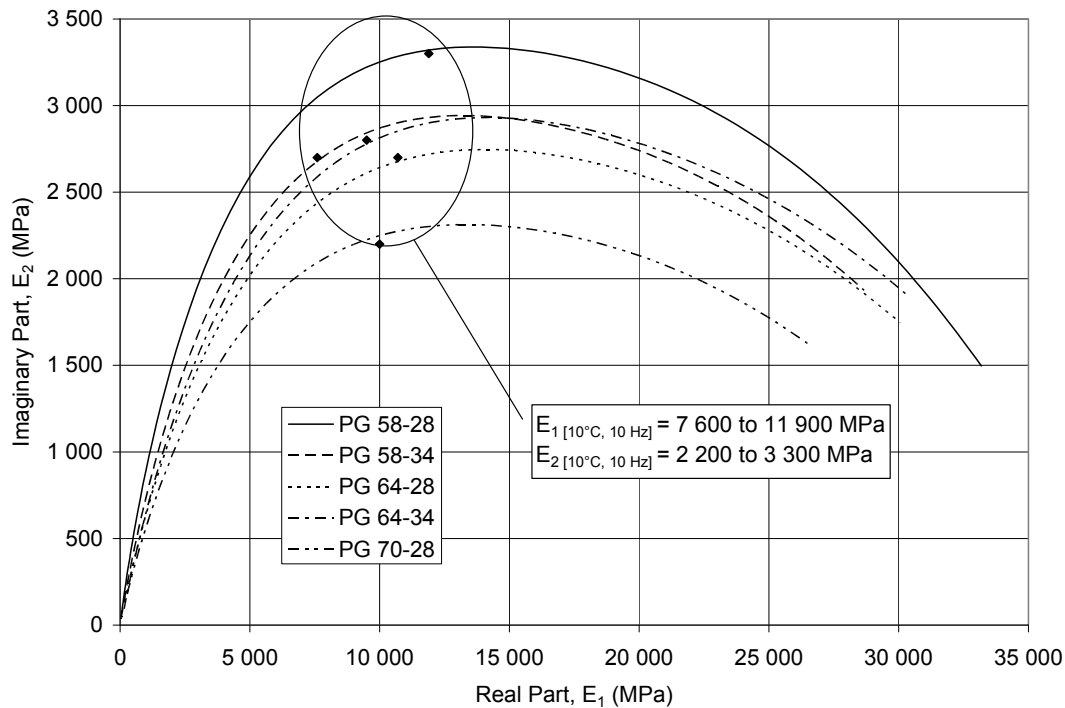


Figure 41 – Complex modulus curves for GB-20 mixes in the Cole-Cole plane

The E^* curves are also presented in the Black space for the ESG-10 mixes in Figure 42, for the ESG-14 mixes in Figure 43, and for the GB-20 mixes in Figure 44. The figures also show that the type of binder influences the rheology of the mix, with the PG 58-28 and PG 70-28 binders representing the behavioural extremes. The influence of gradation is less obvious, and although the $|E^*|$ of the mix increases with the nominal maximum diameter of the mix, the ϕ appears to be relatively constant. The values at 10 °C and 10 Hz are shown in order to facilitate interpretation of the curves.

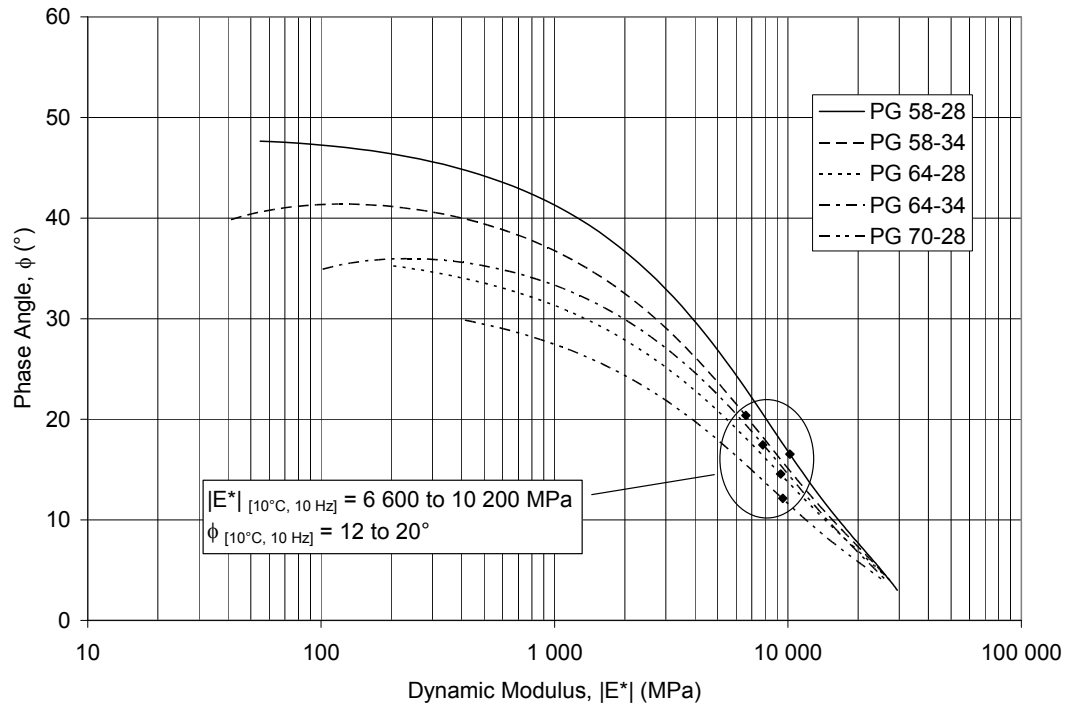


Figure 42 – Complex modulus curves for ESG-10 mixes in the Black space

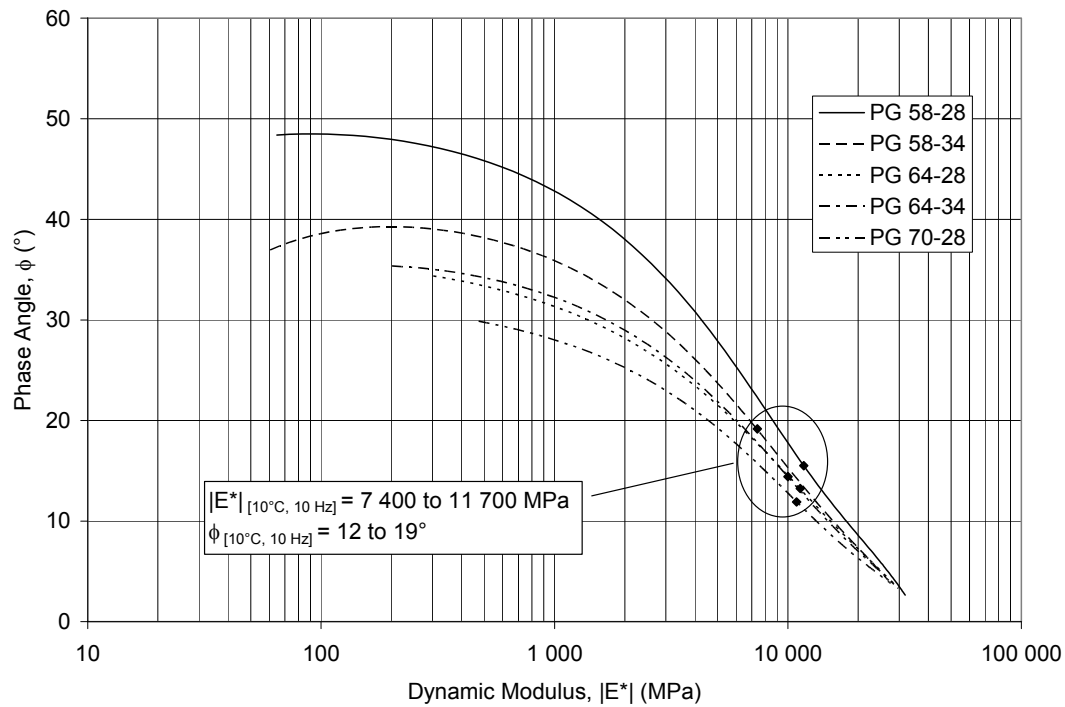


Figure 43 – Complex modulus curves for ESG-14 mixes in the Black space

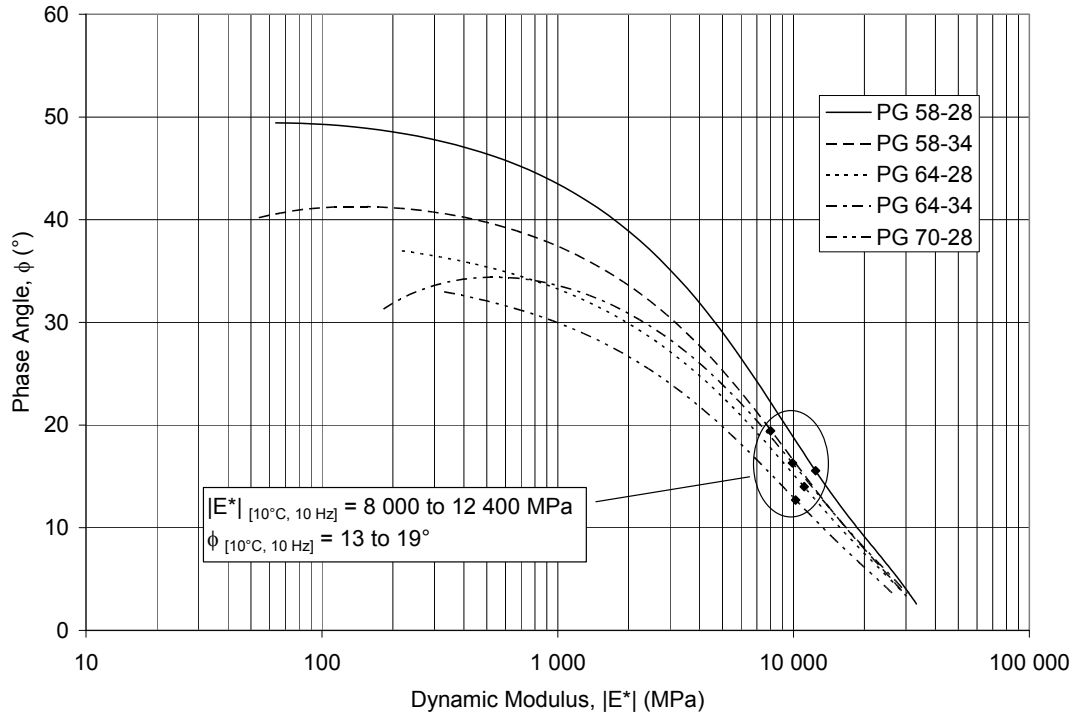


Figure 44 – Complex modulus curves for GB-20 mixes in the Black space

The E^* values at 10 °C and 10 Hz shown in the previous figures, namely the E_1 and E_2 (Cole-Cole plane) and the $|E^*|$ and ϕ (Black space), are summarized in Table 18. The average E_1 and E_2 values are 9,400 and 2,600 MPa, respectively, while the $|E^*|$ and ϕ values are 9,800 MPa and 16°. The average coefficient of variation (CV) for the values is 17%. The values seem to indicate that the influence of the binder is greater than that of the gradation. A temperature of 10 °C and a frequency of 10 Hz are used in the analysis, because they are currently considered to be the equivalent parameters (average) for the fatigue resistance analysis of asphalt mixes in Québec.

Table 18 – Complex modulus at 10 °C and 10 Hz for different asphalt mixes

Asphalt mix	Binder	Complex modulus, $E^*_{[10\text{ °C}, 10\text{ Hz}]}$ (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
Average		9,400	2,600	9,800	16
Std dev.		1,700	400	1,700	3
CV (%)		18	15	17	19

5.3 Dynamic Modulus Results

The time-temperature superposition principle is confirmed by the E^* results, and therefore, the regression coefficients for the Witczak $|E^*|$ models (Equation 14) are determined in Table 19 for a reference temperature of 10 °C. The statistical parameters for the models, namely R^2 , RMSE, and n , are shown in Table 20. The average RMSE for the 15 models is 0.017, which is similar to the average RMSE of 0.020 for the 7 mixes in the repeatability study.

Table 19 – Regression coefficients of the Witczak dynamic modulus model at 10 °C for different asphalt mixes

Mix	Binder	Regression coefficients, $\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

Table 20 – Statistical parameters of the Witczak dynamic modulus model at 10 °C for different asphalt mixes

Mix	Binder	Statistical parameters, 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
Average		0.017	1.00	102
Std dev.		0.004	0.00	4

The |E*| master curves as a function of temperature for a reference frequency of 10 Hz are shown for the ESG-10 mixes in Figure 45, for the ESG-14 mixes in Figure 46, and for the GB-20 mixes in Figure 47. The figures show that the gradation and the binder type influence the |E*| of the mix, and that this influence increases with temperature on a logarithmic scale.

The |E*| of the mix generally increases with the nominal maximum diameter of the mix. Also, the |E*| value of the mixes using PG H-28 binder is generally higher at an intermediate temperature (≈ 10 °C) than that of mixes with PG H-34 binder. The type of binder also influences the |E*| value at high temperatures (> 40 °C), where the mixes with a PG 58-L binder have a lower |E*| than the mixes with a PG 64-L binder, which in turn have a lower |E*| than the mixes with a PG 70-L binder. The mixes with a PG 58-28 binder are more sensitive to temperature than the other mixes.

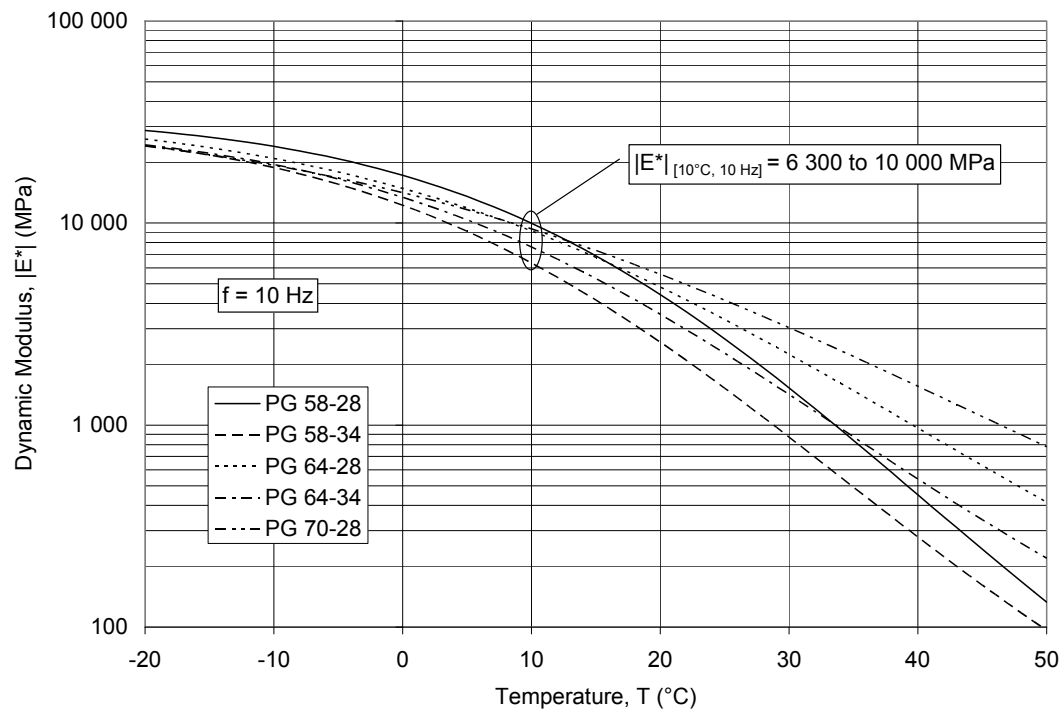


Figure 45 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of ESG-10 mixes

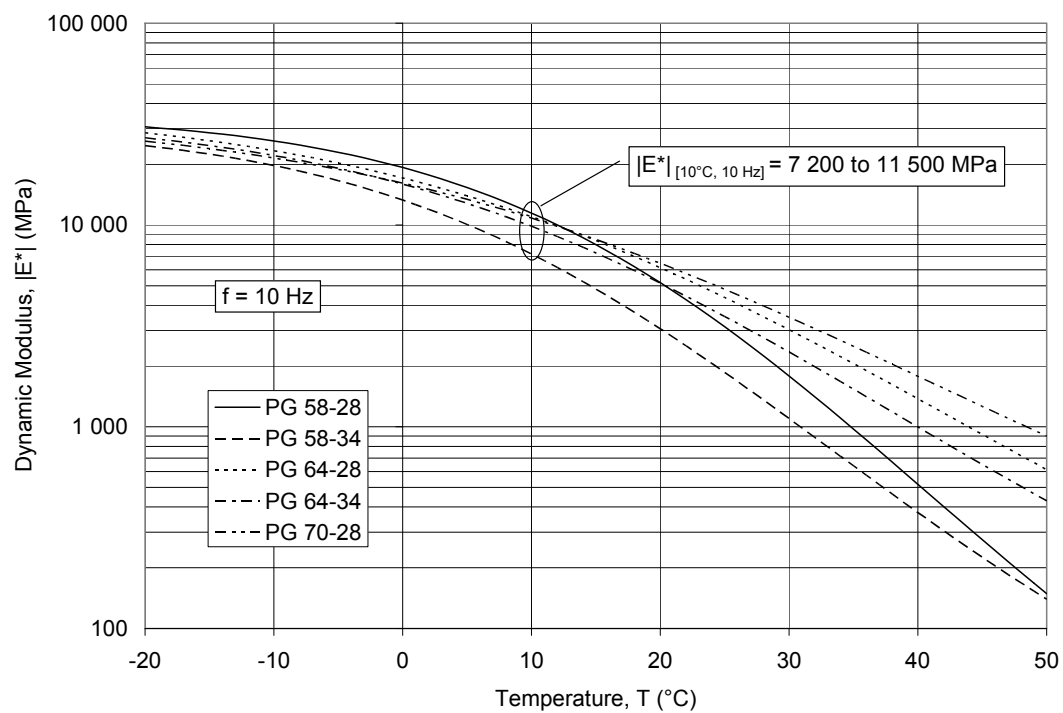


Figure 46 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of ESG-14 mixes

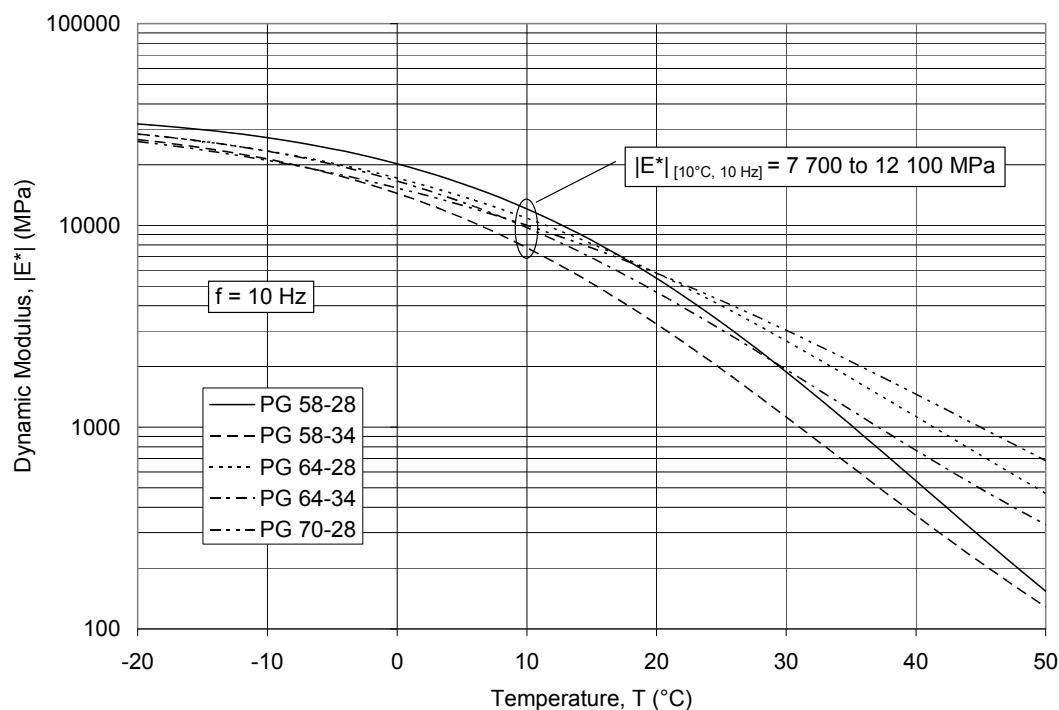


Figure 47 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of GB-20 mixes

Table 21 presents the $|E^*|$ values at 10 °C and 10 Hz. The average $|E^*|$ for the 15 mixes is 9,500 MPa, with a standard deviation of 1,600 MPa. The gradation influences the $|E^*|$ value of the mix, because the average $|E^*|$ is 8,500 MPa for the ESG-10 mixes, whereas it is 10,100 MPa for the ESG-14 and GB-20 mixes. In addition, the type of binder has a greater influence on the $|E^*|$ of the mix, because the average $|E^*|$ for a mix with a PG 58-34 binder is 7,100 MPa, whereas the $|E^*|$ for a mix with a PG 58-28 binder is 11,200 MPa, which represents a difference of 4,100 MPa. The $|E^*|$ standard deviation as a function of binder is lower than the general standard deviation, which confirms the significant influence of the binder on the $|E^*|$.

Table 21 – Dynamic modulus at 10 °C and 10 Hz of different asphalt mixes

Binder	Dynamic modulus, $ E^* _{[10\text{ °C}, 10\text{ Hz}]}$ (MPa)					Number
	ESG-10	ESG-14	GB-20	Average	Std dev.	
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
Average	8,500	10,100	10,100	9,500		
Std dev.	1,500	1,700	1,600	1,600		
Number	5	5	5	15		

The values in Table 21 are plotted in Figure 48 in order to visualize the influence of binder type and gradation. The air voids in the ESG-14 mixes are in average 1% lower than those in the other mixes (Table 15), which seems to increase the $|E^*|$ value when compared to the ESG-10 and GB-20 mixes. Similarly, the air voids in the GB-20 mix with a PG 70-28 binder are 2% greater than those in the ESG-14 mix, which reduces the $|E^*|$ value. The figure also shows that the mixes with PG H-28 binders have higher $|E^*|$ values than the mixes with PG H-34 binders at 10 °C and 10 Hz.

It is important to note that the analysis of the results at a different temperature or frequency could lead to different observations. For example, the PG 58-28 binder is more sensitive to temperature and frequency than the other binders, which means that the $|E^*|$ of mixes with a PG 70-28 binder is higher at high temperatures (or low frequencies), whereas the $|E^*|$ of mixes with a PG 58-28 binder tend towards the low values of mixes with a PG 58-34 binder (Figure 45, Figure 46, and Figure 47).

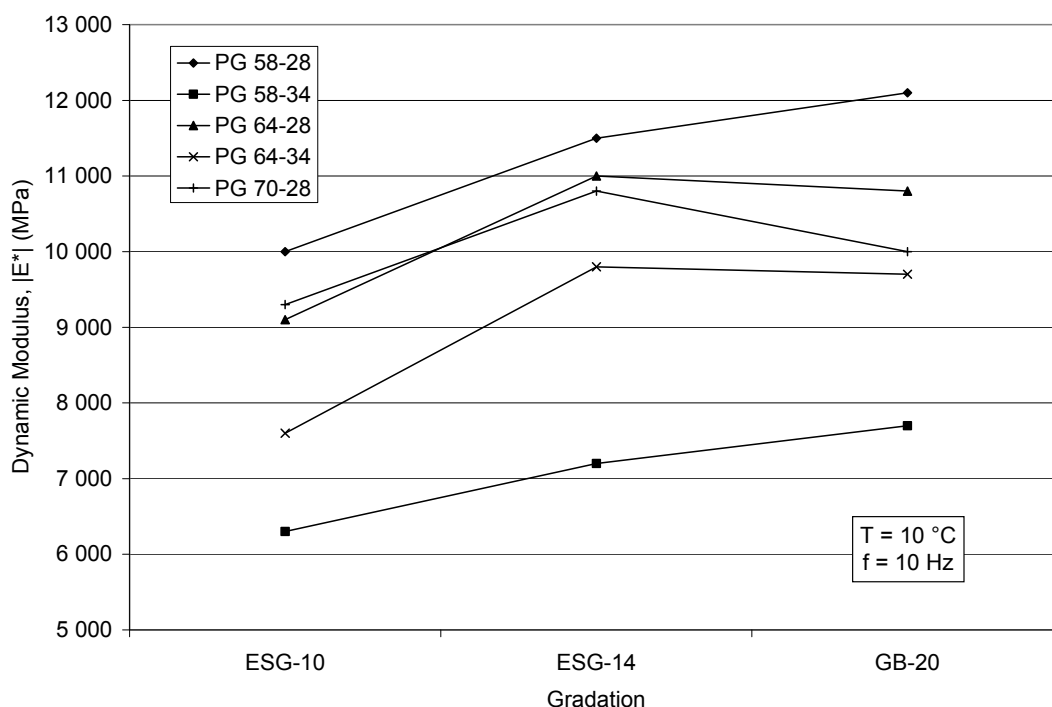


Figure 48 – Dynamic modulus at 10 °C and 10 Hz of different asphalt mixes according to binder type and mix gradation

6. GENERAL MODELS

6.1 Complex Modulus Models

The E^* results indicate that the type of binder has a significant influence on the viscoelastic behaviour of the asphalt mix. Therefore, the E^* curves in the Cole-Cole plane are presented by binder type in Figures 49 to 53. The figures show that the binder type influences the shape of the curve, whereas the mix gradation and air voids influence its intensity. The E_1 and E_2 values at 10 °C and 10 Hz presented in the figures show that the range of the values narrows as a function of binder type, as compared to the gradation influence (Figure 39, Figure 40, and Figure 41).

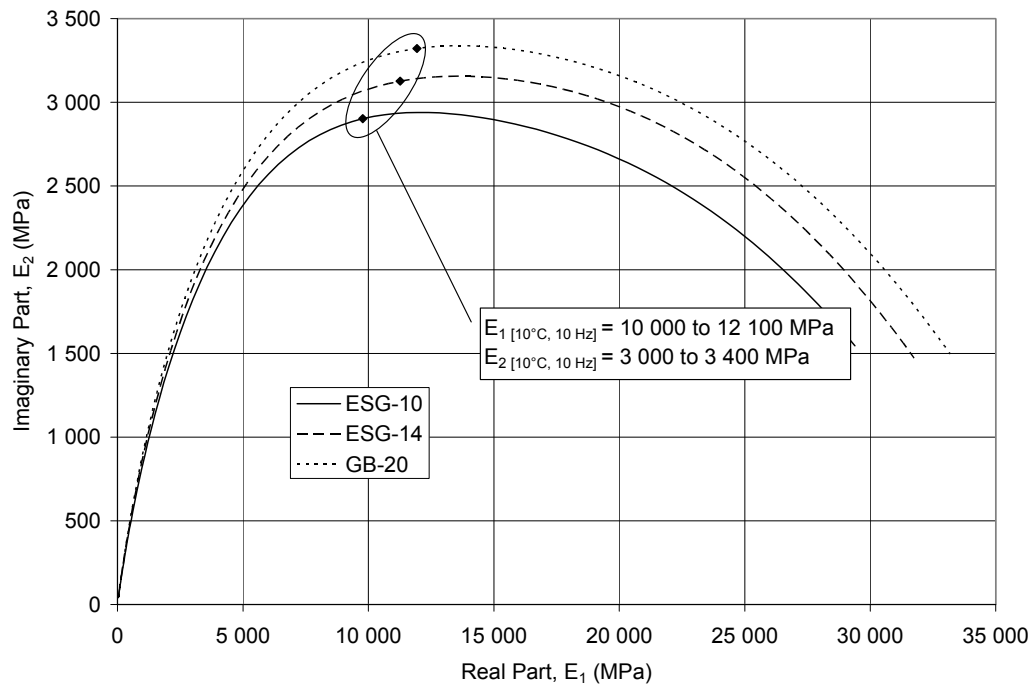


Figure 49 – Complex modulus curves in the Cole-Cole plane for asphalt mixes with a PG 58-28 binder

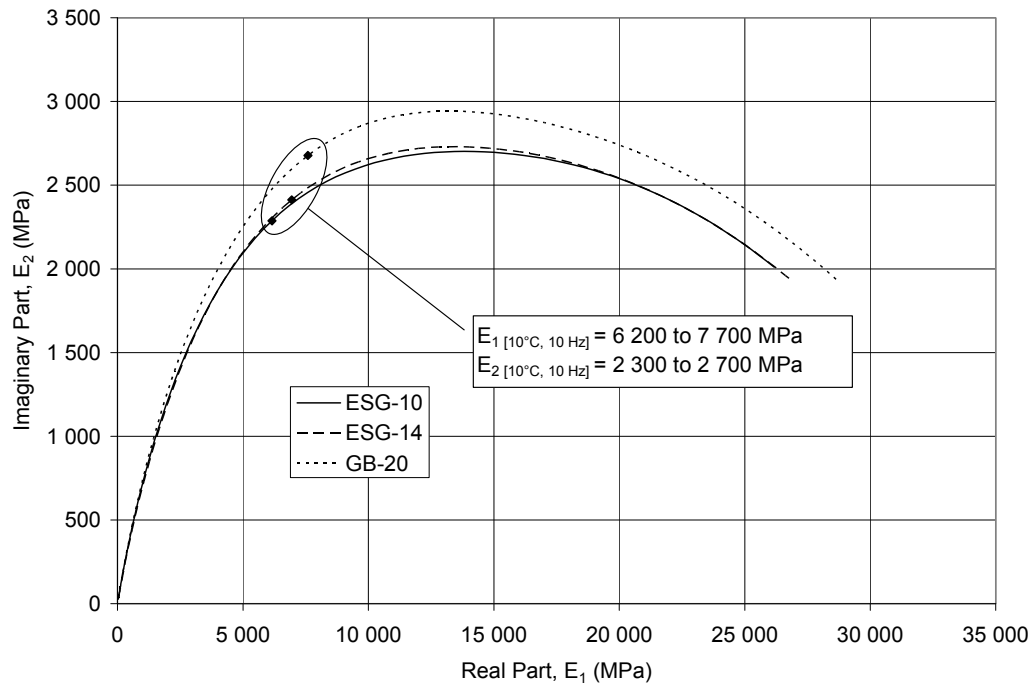


Figure 50 – Complex modulus curves in the Cole-Cole plane for asphalt mixes with a PG 58-34 binder

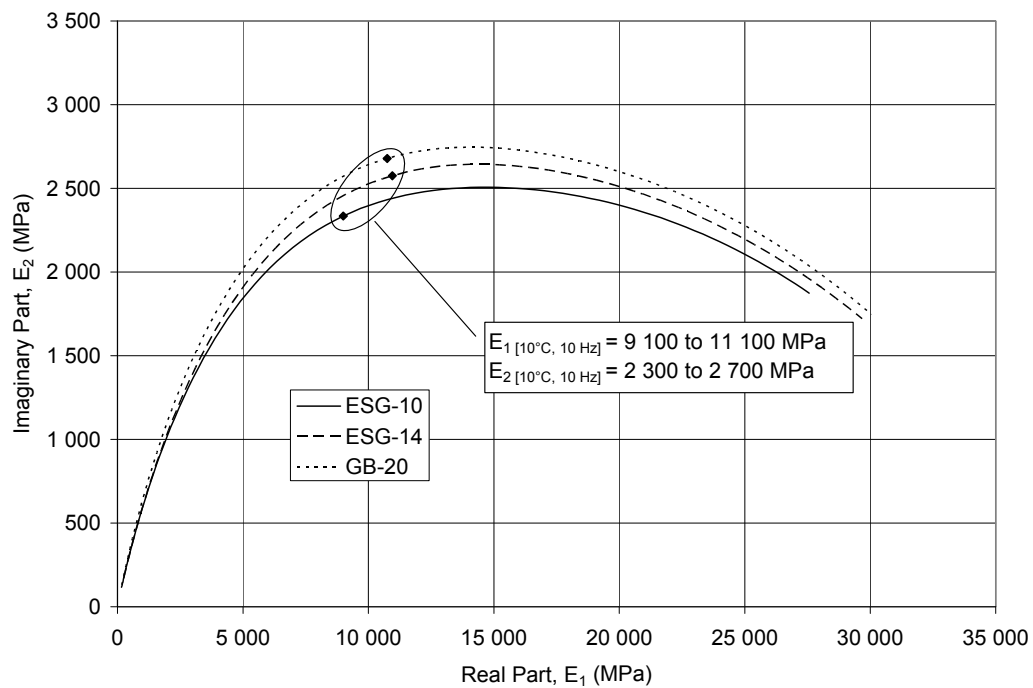


Figure 51 – Complex modulus curves in the Cole-Cole plane for asphalt mixes with a PG 64-28 binder

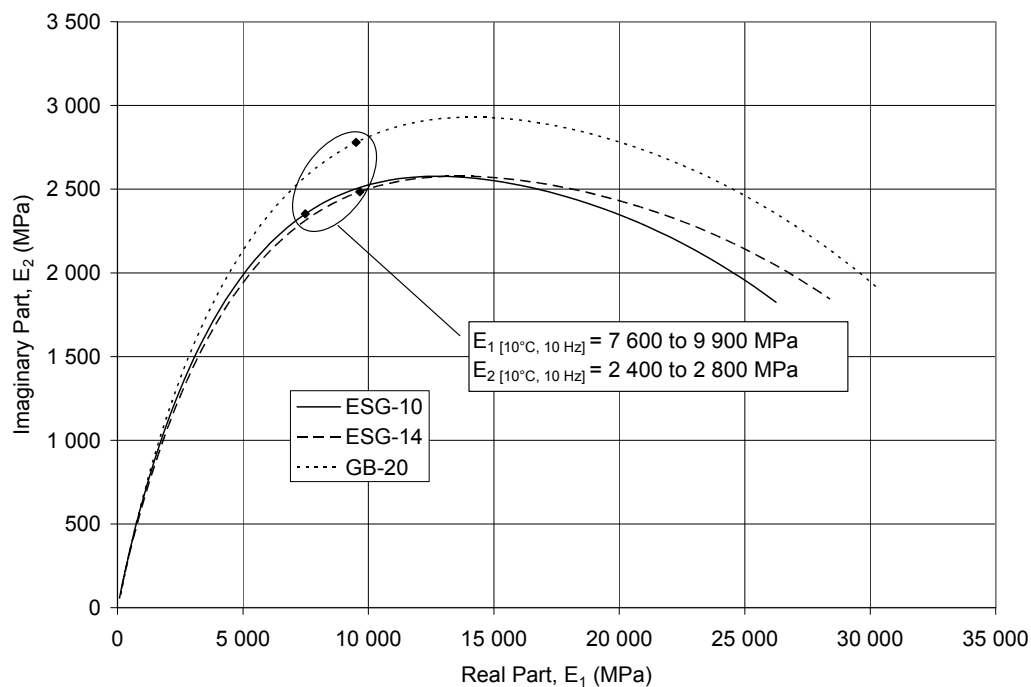


Figure 52 – Complex modulus curves in the Cole-Cole plane for asphalt mixes with a PG 64-34 binder

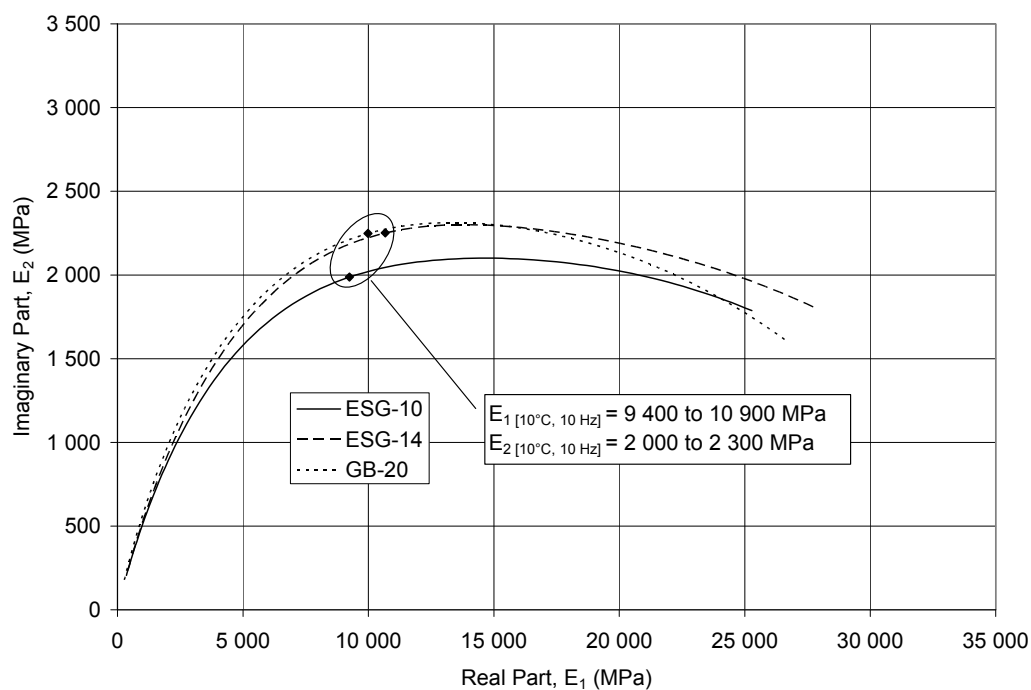


Figure 53 – Complex modulus curves in the Cole-Cole plane for asphalt mixes with a PG 70-28 binder

The E^* curves in the Black space are also presented by binder type in Figures 54 to 58. The figures confirm that the binder influences the shape of the Black curve, whereas the gradation and air voids influence its intensity. The $|E^*|$ and ϕ values at 10 °C and 10 Hz presented in the figures show that the range of the values becomes more precise in accordance with binder type, mainly with respect to the ϕ value, as compared to the gradation influence (Figure 42, Figure 43, and Figure 44).

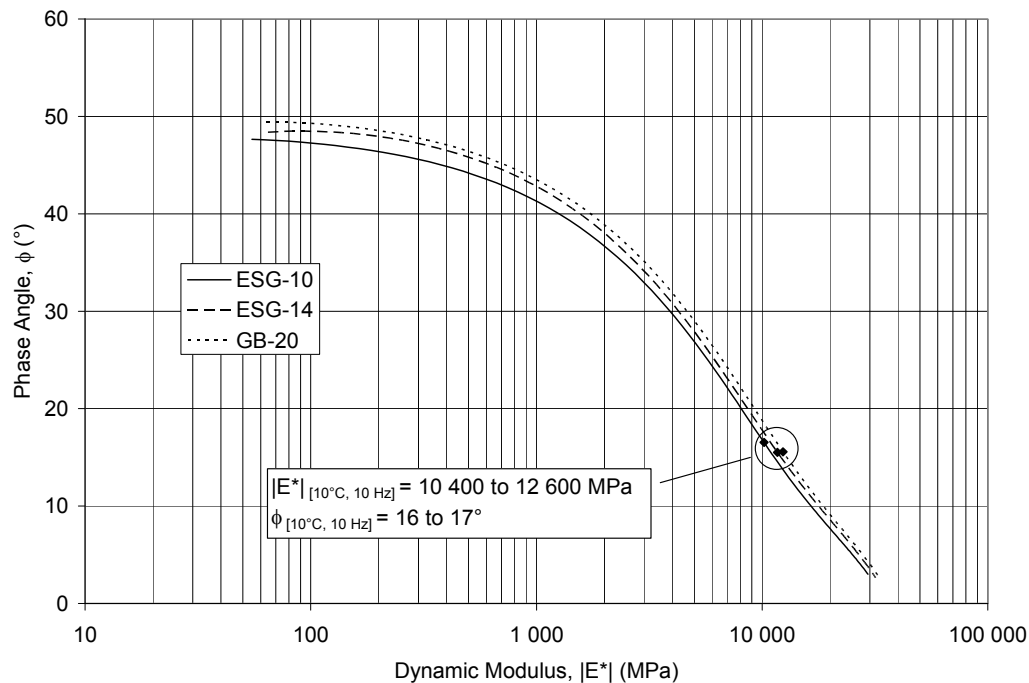


Figure 54 – Complex modulus curves in the Black space for asphalt mixes with a PG 58-28 binder

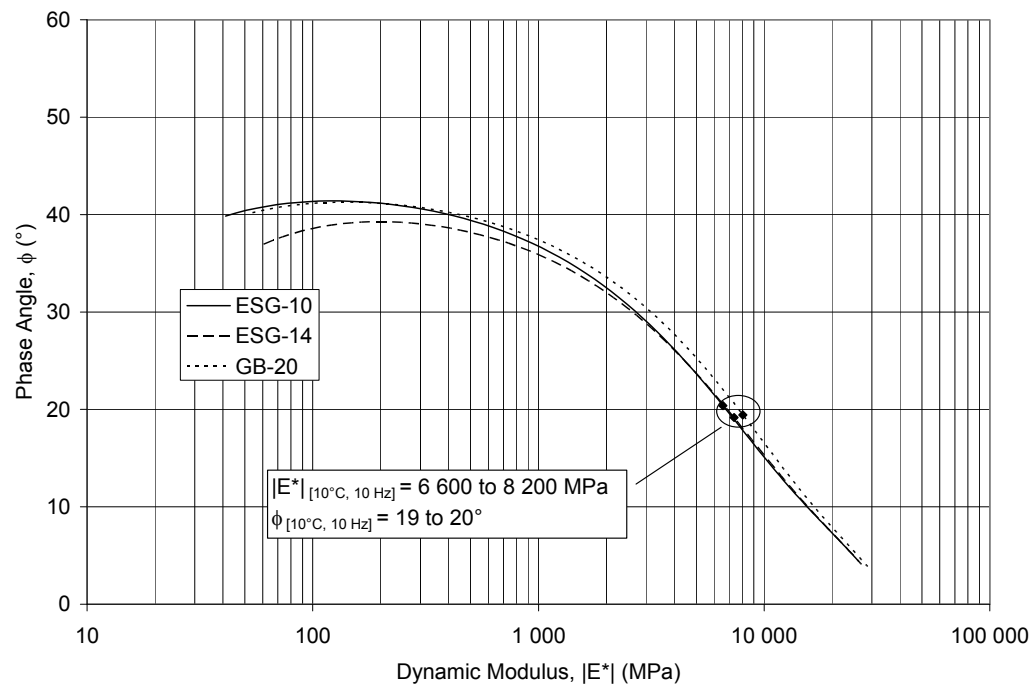


Figure 55 – Complex modulus curves in Black space for asphalt mixes with a PG 58-34 binder

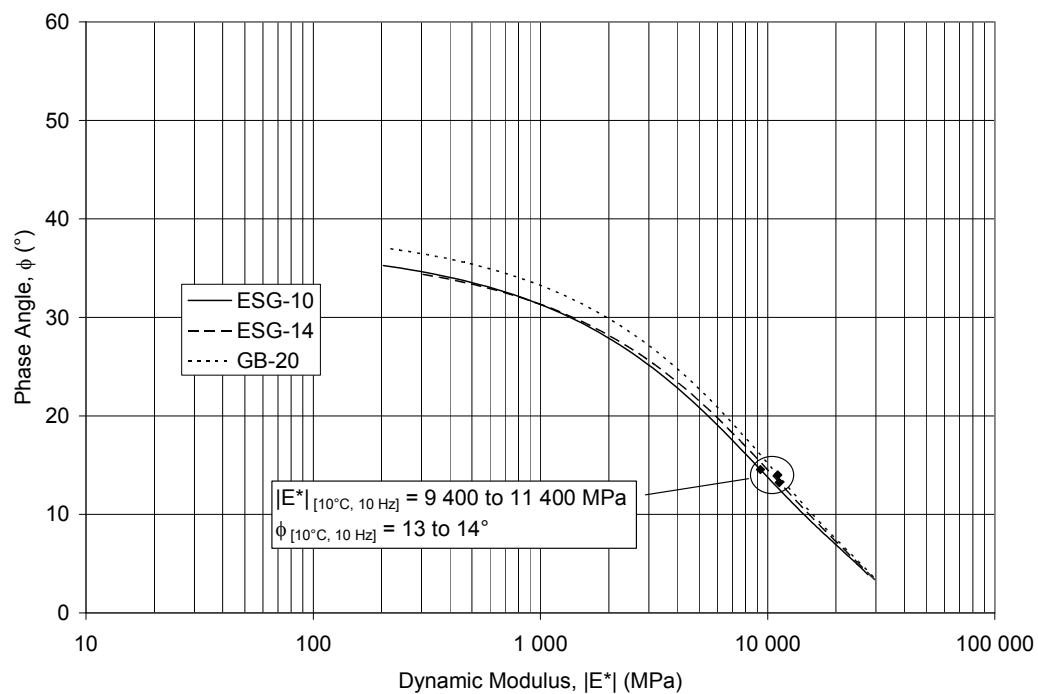


Figure 56 –Complex modulus curves in the Black space for asphalt mixes with a PG 64-28 binder

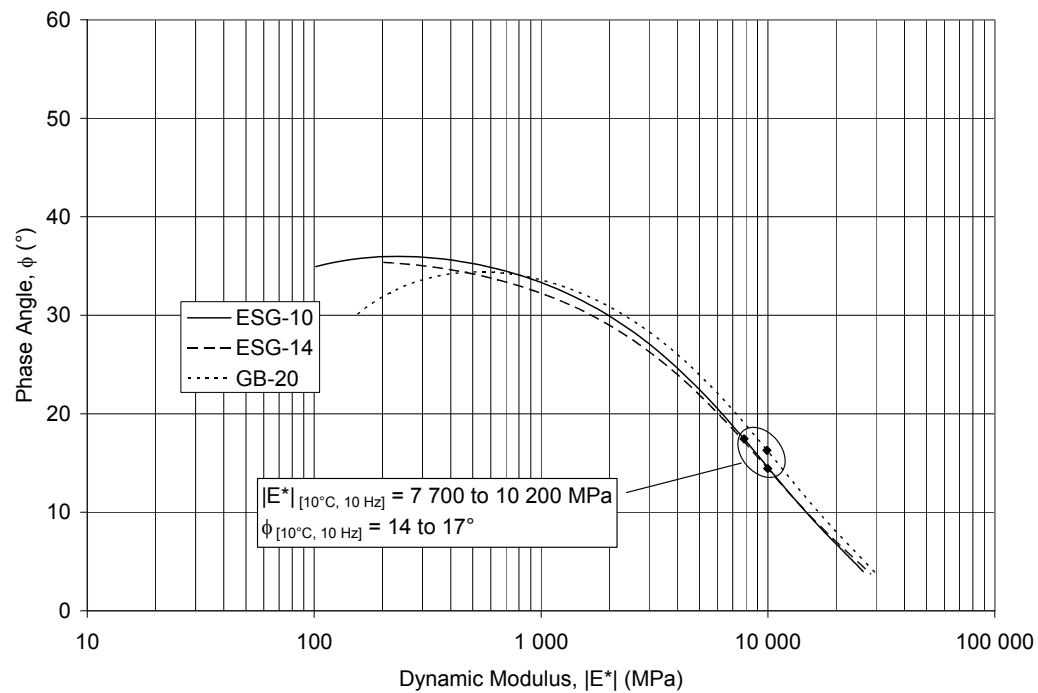


Figure 57 – Complex modulus curves in the Black space for asphalt mixes with a PG 64-34 binder

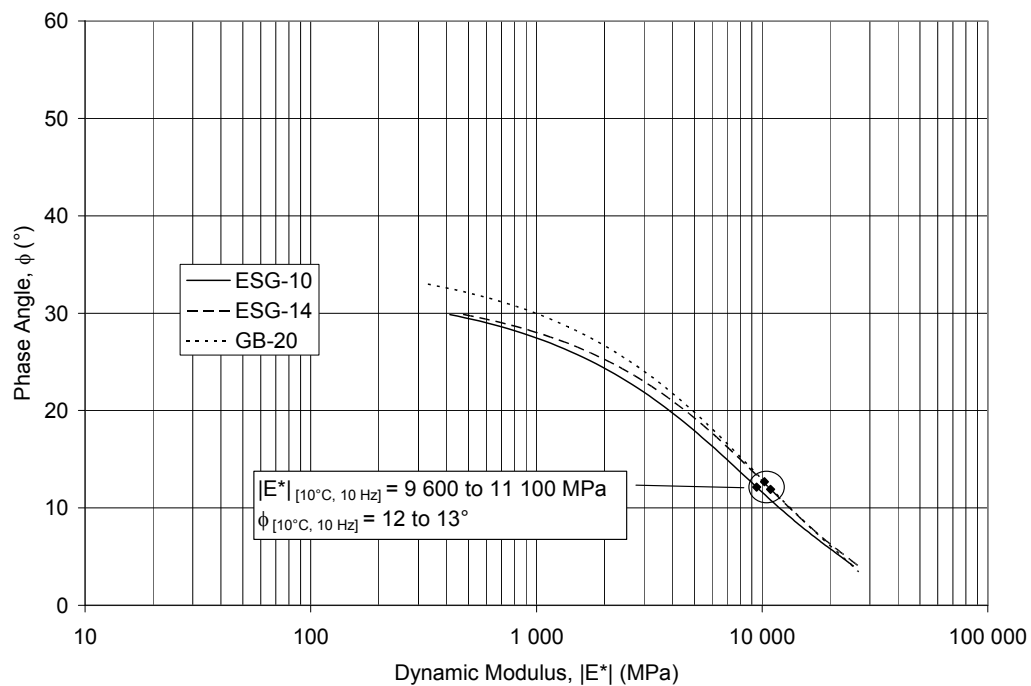


Figure 58 – Complex modulus curves in the Black space for asphalt mixes with a PG 70-28 binder

The shape of the E^* curves is mainly a function of the type of binder, and therefore, the individual Huet-Sayegh models (Table 16) are generalized by binder type in Table 22, combining the results for the ESG-10, ESG-14 and GB-20 mixes with the same binder. The statistical parameters for the models (RMSE, R^2 , n) are shown in Table 23. The average RMSE for the $\log E_1$ and $\log E_2$ increases to 0.057 and 0.052 respectively, as opposed to 0.028 and 0.031 as obtained for the individual models (Table 17). The RMSE for the general models include the influence of gradation and air voids on the E^* value of the mix.

Table 22 – Regression coefficients for the Huet-Sayegh general complex modulus models at 10 °C by binder type

Binder	Regression coefficients, 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

Table 23 – Statistical parameters for the Huet-Sayegh general complex modulus models at 10 °C by binder type

Binder	Statistical parameters, 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
Average	0.057	1.00	0.052	0.99	306
Std dev.	0.015	0.01	0.009	0.01	6

In an overall analysis, the general models can be considered to approximate the behaviour of an ESG-14 mix with the average air voids by binder type indicated in Table 15. The general E^* curves are shown in the Cole-Cole plane in Figure 59, and in the Black space in Figure 60. These figures show that the rheological behaviour of the mixes with a PG 58-28 and PG 70-28 binder is different from that of mixes with a PG 58-34, PG 64-28 and PG 64-34 binder, which are more similar to each other. In addition, the E^* values at 10 °C and 10 Hz (E_1 , E_2 , $|E^*|$, ϕ) shown in the figures and in Table 24 vary significantly between the different binders. The average and standard deviation for the values for all binder types combined yield an average coefficient of variation of 16%, which provides a general appreciation of the binder influence on the E^* value of the mix.

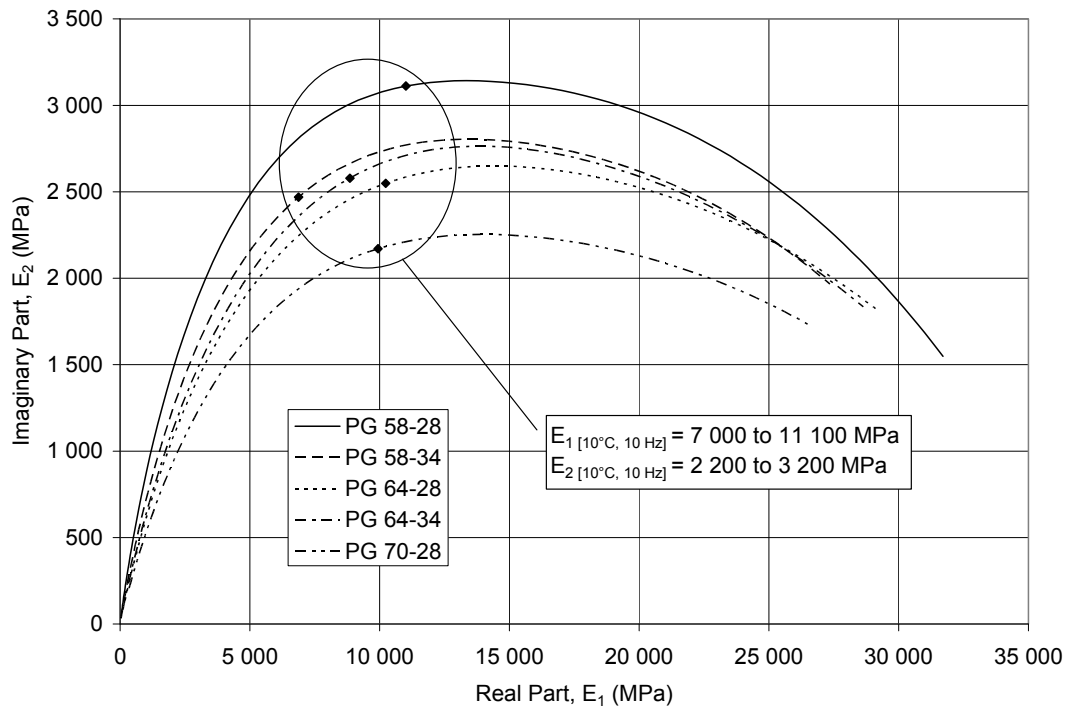


Figure 59 – General complex modulus curves in the Cole-Cole plane by binder type

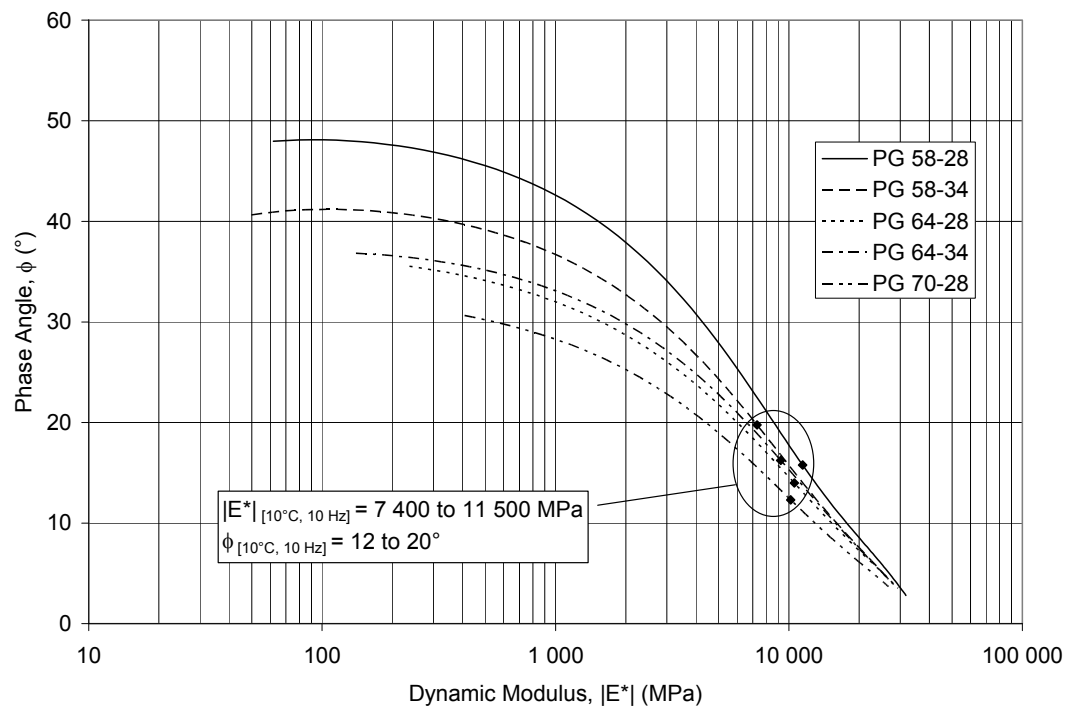


Figure 60 – General modulus curves in the Black space by binder type

Table 24 – General complex modulus of asphalt mixes at 10 °C and 10 Hz

Binder	Complex modulus, $E^*_{[10\text{ °C}, 10\text{ Hz}]}$ (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
Average	9,400	2,600	9,700	16
Std dev.	1,600	300	1,600	3

6.2 Dynamic Modulus Models

The $|E^*|$ results also indicate that the binder type has a more significant influence on the stiffness of the mix than the gradation. Therefore, the $|E^*|$ master curves in Figures 61 to 65 are presented by binder type as a function of temperature for a frequency of 10 Hz. The figures show that the binder influences the shape of the master curves, whereas the gradation and air voids influence its intensity, as is the case for the E^* curves. The average difference between the master curves for the same binder is 1,800 MPa at 10 °C and 10 Hz, which is approximately half the difference observed for the same gradation, namely 4,100 MPa (Figure 45, Figure 46, and Figure 47).

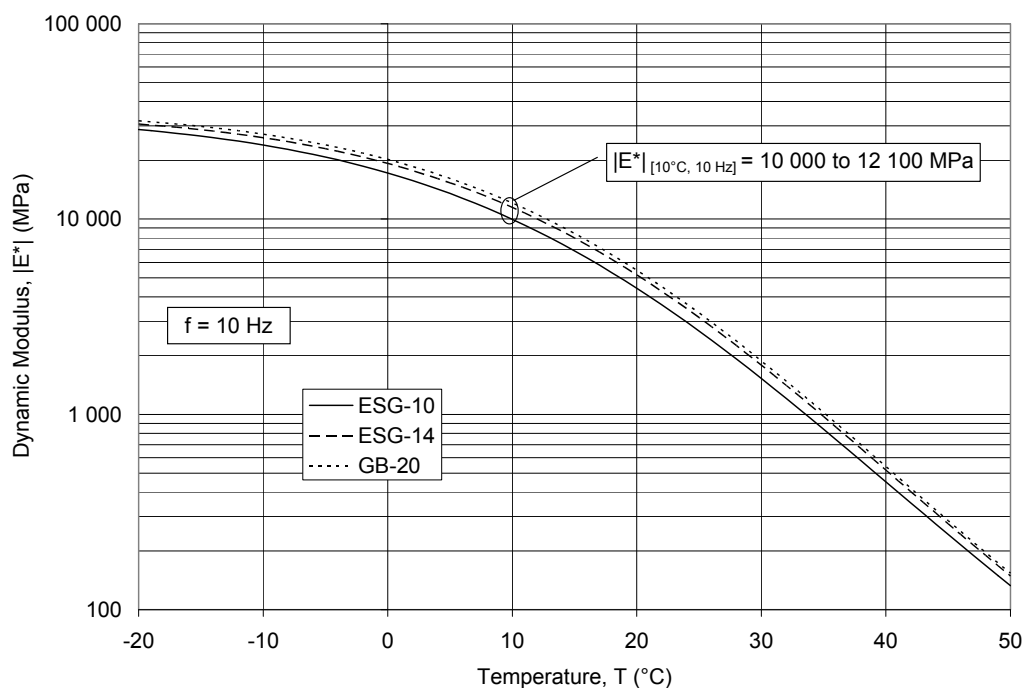


Figure 61 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 58-28 binder

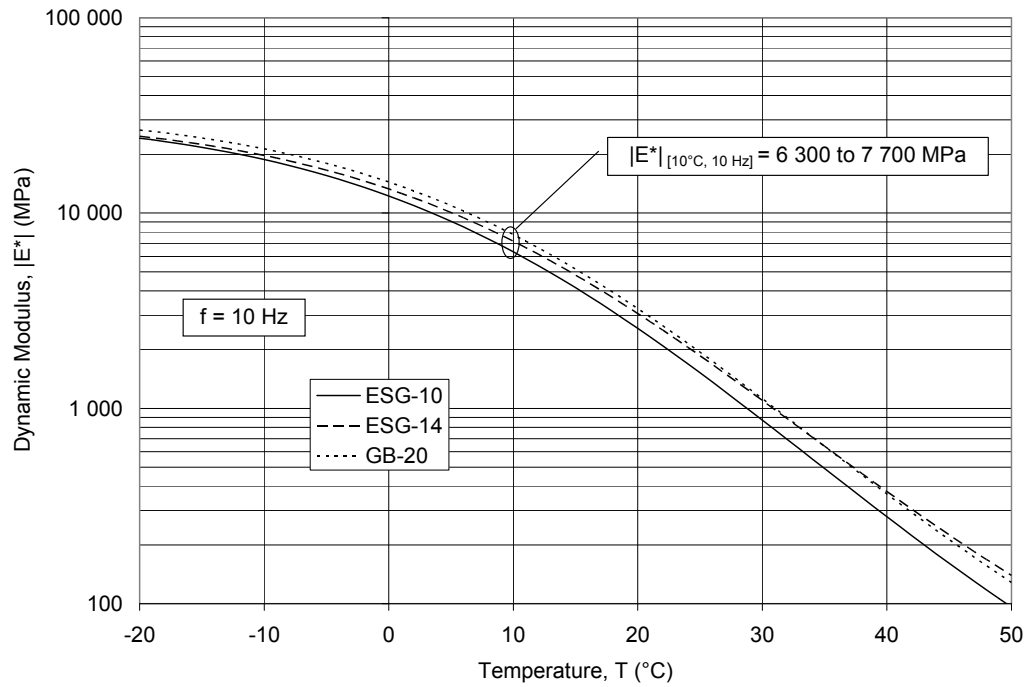


Figure 62 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 58-34 binder

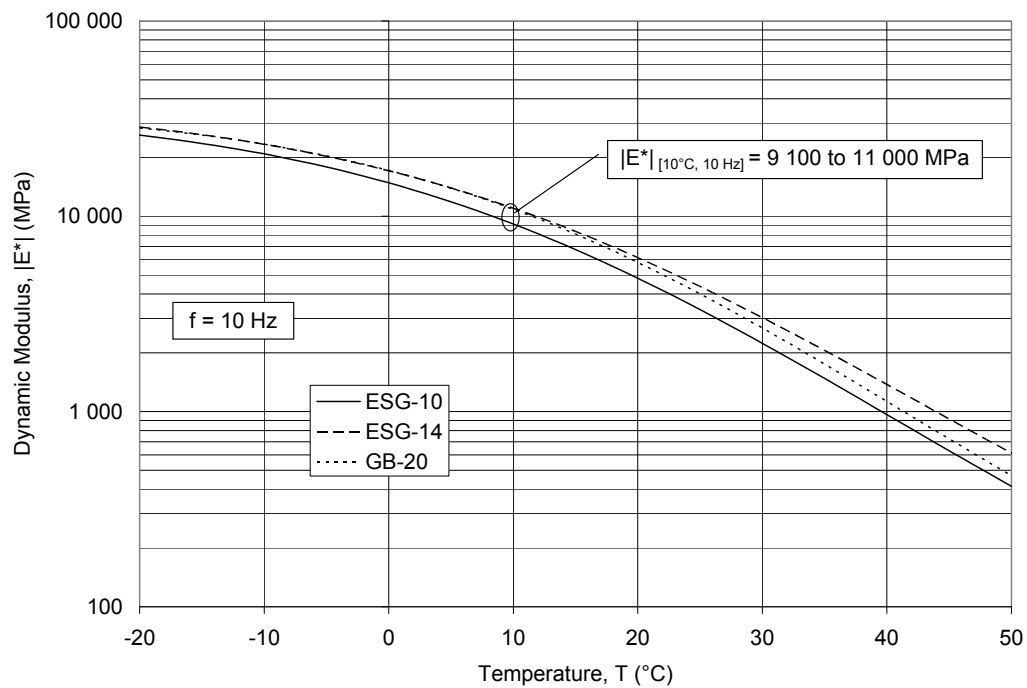


Figure 63 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 64-28 binder

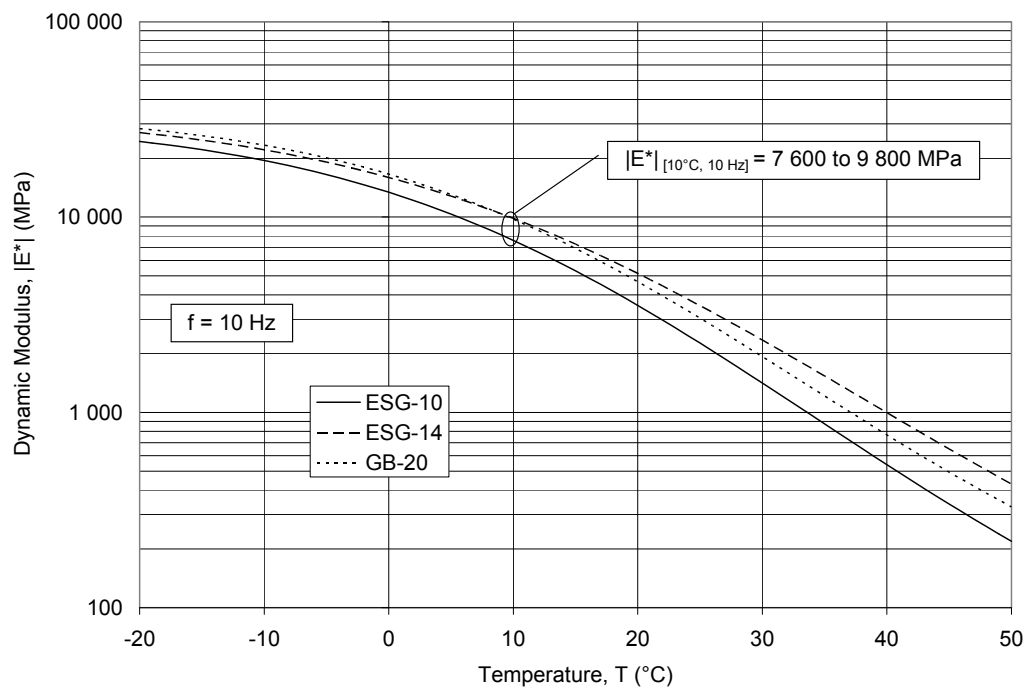


Figure 64 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for asphalt mixes with a PG 64-34 binder

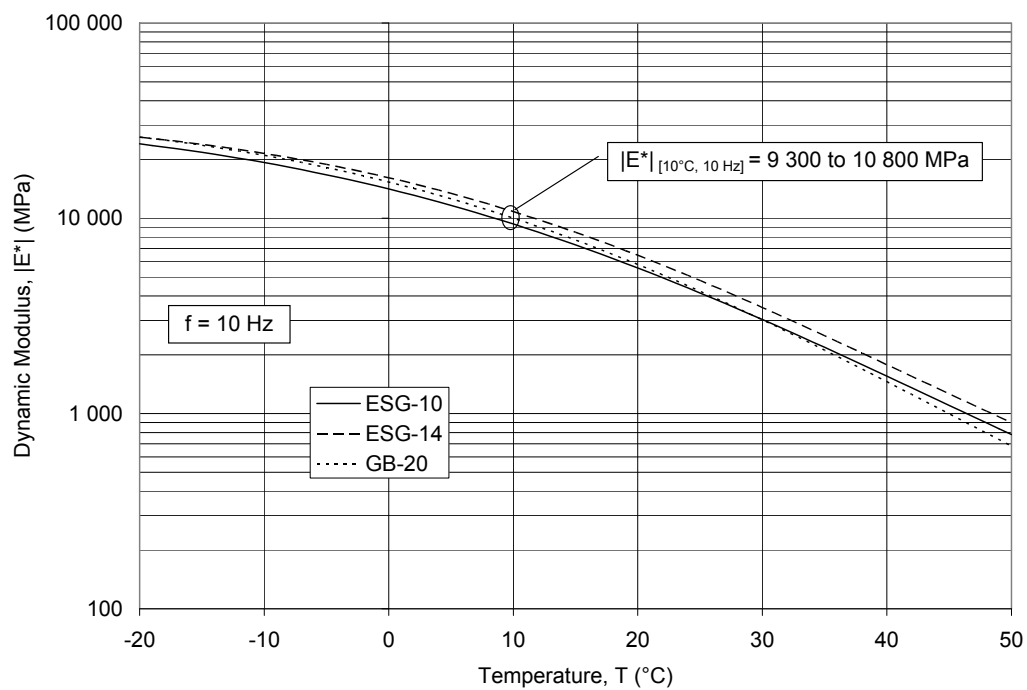


Figure 65 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz for asphalt mixes with a PG 70-28 binder

The shape of the $|E^*|$ master curves is a function of the type of binder, and therefore, the curves are generalized by binder type in Table 25 (Equation 14) by combining the results for the three gradations. The statistical parameters for the models (RMSE, R^2 , n) are shown in Table 26. The average RMSE of the general models is 0.050, which is significantly greater than the average RMSE of 0.017 for the individual models (Table 20), but similar to the general RMSE of 0.61 that was obtained in the repeatability study (Table 11). Therefore, the gradation and air voids also have a significant influence on the $|E^*|$ value of the mix, and the general models represent the average values obtained for each type of binder.

Table 25 – Regression coefficients for the Witczak general dynamic modulus models at 10 °C by binder type

Binder	Regression coefficients, $\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

Table 26 – Statistical parameters for the Witczak general dynamic modulus models at 10 °C by binder type

Binder	Statistical parameters, $\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
Average	0.050	0.99	306
Std dev.	0.014	0.01	6

As was the case with the E^* general models (Section 6.1), the $|E^*|$ general models approximate the behaviour of an ESG-14 mix with the average air voids indicated by type of binder in Table 15. Although the influence of gradation and air voids on the $|E^*|$ is hard to clarify, the RMSE for the general models can be used to assess the influence of these parameters. Therefore, when the air voids in the mix are constant, a RMSE value can be added to the model in order to estimate the $|E^*|$ value of a GB-20 mix, or the RMSE can be subtracted in order to estimate the $|E^*|$ value of an ESG-10 mix. Similarly, in cases where the gradation is the same, adding or subtracting the RMSE from the model can be considered in order to assess the influence of the standard deviation of average air voids (table 15) on the $|E^*|$ value of the mix.

Figure 66 shows the generalized $|E^*|$ master curves by type of binder, providing a summary of the $|E^*|$ results for the 15 mixes and a picture of the general influence of the binder. Table 27 shows the $|E^*|$ values at 10 Hz for different temperatures. The average $|E^*|$ at 10 °C and 10 Hz is 9,500 MPa, with a standard deviation of 1,600 MPa, which provides a general idea of the $|E^*|$ of a mix and the influence of the type of binder on this value. The average RMSE for the general models is 0.050, and therefore, the average prediction error for the value of 9,500 MPa is 1,200 MPa, which is only 25% lower than the standard deviation for all binder types combined. Therefore, the gradation and air voids of a mix remain important parameters to be considered in the $|E^*|$ analysis.

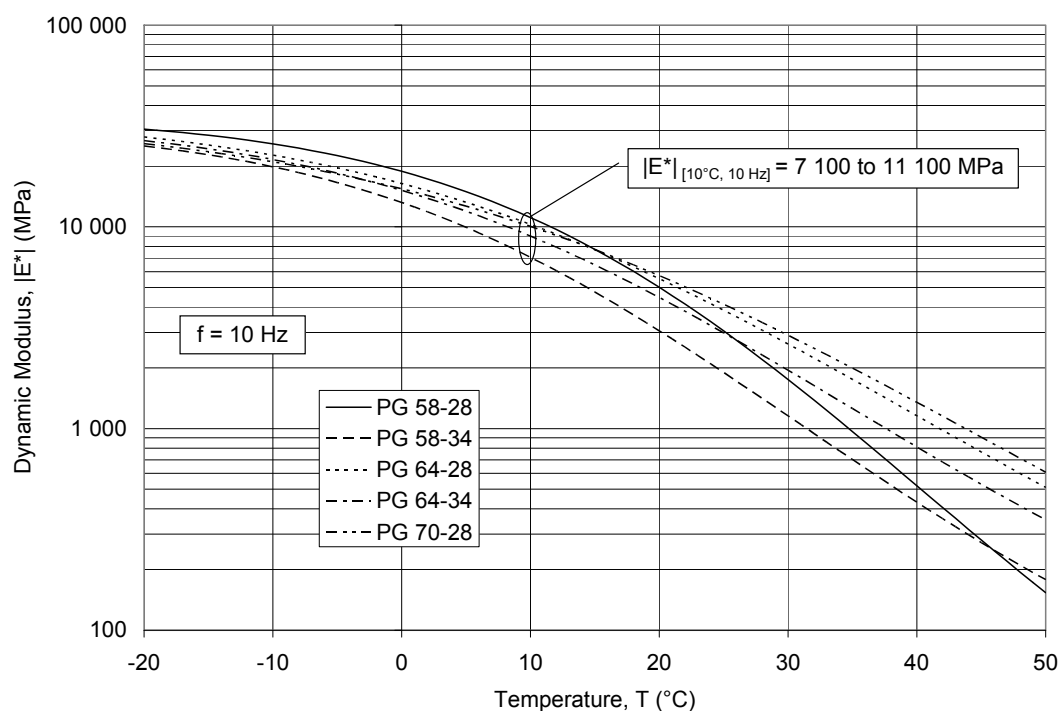


Figure 66 – General dynamic modulus master curves at 10 Hz by binder type

Table 27 – General dynamic modulus of asphalt mixes at 10 Hz by binder type								
Binder	Dynamic modulus, $ 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
Average	27,300	22,200	15,800	9,500	4,800	2,100	850	360
Std dev.	2,100	2,300	2,100	1,600	1,100	700	400	200

6.3 Literature Models

The $|E^*|$ general models are compared to the values found in the literature, in order to assess the difference between the results obtained in this study and the values that are generally recognized in practice. The reference manuals by Yoder and Witczak (1975) and Huang (1993) describe typical $|E^*|$ values for mixes used in the United States for different temperatures and frequencies, as shown in Table 28. These values are comparable to the average $|E^*|$ values determined with the five MTQ general models (Table 25). The temperatures and frequencies presented in the table indicate that the repeated direct compression test was used to determine these values (ASTM D 3497).

Table 28 – Typical dynamic modulus values of asphalt mixes used in the United States (Yoder and Witczak, 1975; Huang, 1993)

Temperature	Frequency	Dynamic modulus, $ 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

French AFNOR standards specify a minimum $|E^*|$ value for various types of asphalt mixes at 15 °C and 10 Hz, as summarized in Table 29 (Corté and Delorme, 2005). The types of mixes presented in the table include “graves-bitumes” (GB), “enrobés à module élevé” (EME), “bétons bitumineux semi-grenus” (BBSM), and “bétons bitumineux à module élevé” (BBME). GB and EME are base-course mixes that generally have a particle-size distribution of 0/14 or 0/20, whereas BBSG and BBME are surface-course mixes with a particle-size distribution of 0/10 or 0/14 (USIRF, 2003). The performance classes of the mixes are based on mechanical behaviour tests (moisture resistance, rutting, complex modulus, fatigue).

Asphalt binders used in France have lower penetration indices (harder) at 25 °C than the binders used in Québec. Therefore, the GB mixes are generally formulated with a 35/50 or 20/30 penetration binder, the EME mixes with a 10/20, 15/25, or 20/30 penetration binder, the BBSG mixes with a 35/50 penetration binder, and the BBME mixes with a 20/30 penetration binder (USIRF, 2003). The hardest binder used in Québec is the PG 70-28, which has a penetrability index of approximately 80. Therefore, the $|E^*|$ values predicted with the PG 70-28 general model (Table 25) are compared to the minimum AFNOR requirements. The RMSE value for the general model (0.040) is added to the $|E^*|$ value prediction in order to compare the GB mixes to the GB-20 mix, whereas the RMSE value is subtracted from the $|E^*|$ prediction in order to compare the BBSG and BBME mixes to the ESG-10 mix.

Given this, it appears that a GB-20 mix with a PG 70-28 binder could meet the requirement for a class 2 and class 3 GB mix, but not for a class 4 GB mix. In order to meet the requirement, a harder 20/30 asphalt binder is probably used with class 4 GB mixes, compared to other GB mixes with a 35/50 binder. Similarly, it would appear that the ESG-10 mix with a PG 70-28 binder meets the requirements of BBSG mixes (35/50 binder), but not those of BBME mixes (20/30 binder). Obviously, the mixes that incorporate a PG 70-28 asphalt did not meet the requirement of EME mixes, which use a binder with a penetration of 20/30 or less (10/20, 15/25). It should be noted that the MTQ mixes were conditioned for four hours, which is not the case for the AFNOR mixes. Therefore, a four hours conditioning appears to allow for a certain comparison between a conditioned mix with a 80 penetration asphalt binder and unconditioned 35/50 binder.

Table 29 – Minimum dynamic modulus values specified by AFNOR for different types of asphalt mixes at 10 °C and 10 Hz (Corté and Delorme, 2005)

Asphalt mix	Dynamic modulus, $ E^* _{[15\text{ °C}, 10\text{ Hz}]}$ (MPa)		
	$ E^* _{\text{AFNOR}}$	$ E^* _{\text{MTQ}}$	$ E^* _{\text{AFNOR}} / E^* _{\text{MTQ}}$
GB class 2, 3	9,000	8,500	1.05
GB class 4	11,000	8,500	1.29
EME	14,000	7,700	1.82
BBSG class 1	5,500	7,000	0.79
BBSG class 2, 3	7,000	7,000	1.00
BBME class 1	9,000	7,000	1.29
BBME class 2,3	12,000	7,000	1.71

The American Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide (MEPDG) uses the model shown in Equation 17 to predict the $|E^*|$ master curve of asphalt mixes (NCHRP 1-37A). This model is based on the type of binder (viscosity) and the volumetric properties (air voids, effective binder volume) of the mixes. Equation 18 can be used to predict the binder viscosity as a function of temperature, based on the performance grade (PG) of the binder. The $|E^*|$ master curves predicted with the MEPDG model are compared to the master curves determined in this study for each binder type, as shown in Figures 67 to 71 as a function of temperature for a frequency of 10 Hz.

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

where $\delta = 3.750063 + 0.029232 p_{200} - 0.001767 p_{200}^2 - 0.002841 p_4$
 $- 0.058097 V_a - 0.802208 V_{be}/(V_{be} + V_a)$.

$\alpha = 3.871977 - 0.002100 p_4 + 0.003958 p_{3/8} - 0.000017 p_{3/8}^2$
 $+ 0.005470 p_{3/4}$.

$\beta = -0.603313 - 0.393532 \log \eta$,

$\gamma = -0.313351$.

$|E^*|$ = dynamic modulus (psi),

f = frequency (Hz),

p_{200} = passing on No. 200 sieve (%),

p_4 = retained on No. 4 sieve (%),

$p_{3/8}$ = retained on $\frac{3}{8}$ in. sieve (%),
 $p_{3/4}$ = retained on $\frac{3}{4}$ in. sieve (%),
 V_a = air voids (%),
 V_{be} = effective binder volume (%),
 η = binder viscosity (10^6 Poise).

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

where η = asphalt viscosity (cPoise),
 T_R = temperature (Rankine),
 A, VTS = regression coefficients.

Table 30 – Regression coefficients for predicting binder viscosity from binder performance grade (NCHRP 1-37A)

Binder	Regression coefficients, $\log \log \eta$ (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

The MEPDG model values are similar to the MTQ values up to 20 °C for PG 58 binders, up to 30 °C for PG 64 binders, and up to 40 °C for the PG 70 binder. The gradations studied have little influence on the $|E^*|$ values predicted by the MEPDG model. The difference in $|E^*|$ at a higher temperature can be explained by the type of loading in compression used to develop the MEPDG model, which can load the aggregate skeleton more as compared to an alternating tensile and compressive loading. Therefore, the higher the PG temperature, the higher the temperature at which the influence of the aggregates becomes significant.

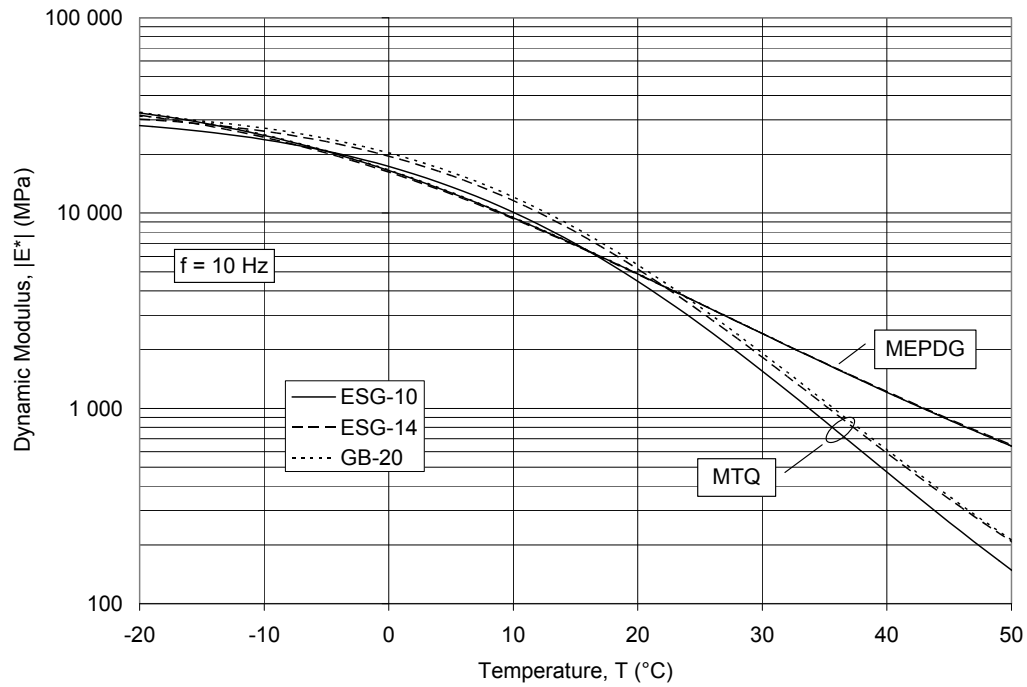


Figure 67 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 58-28 binder and the MEPDG model predictions

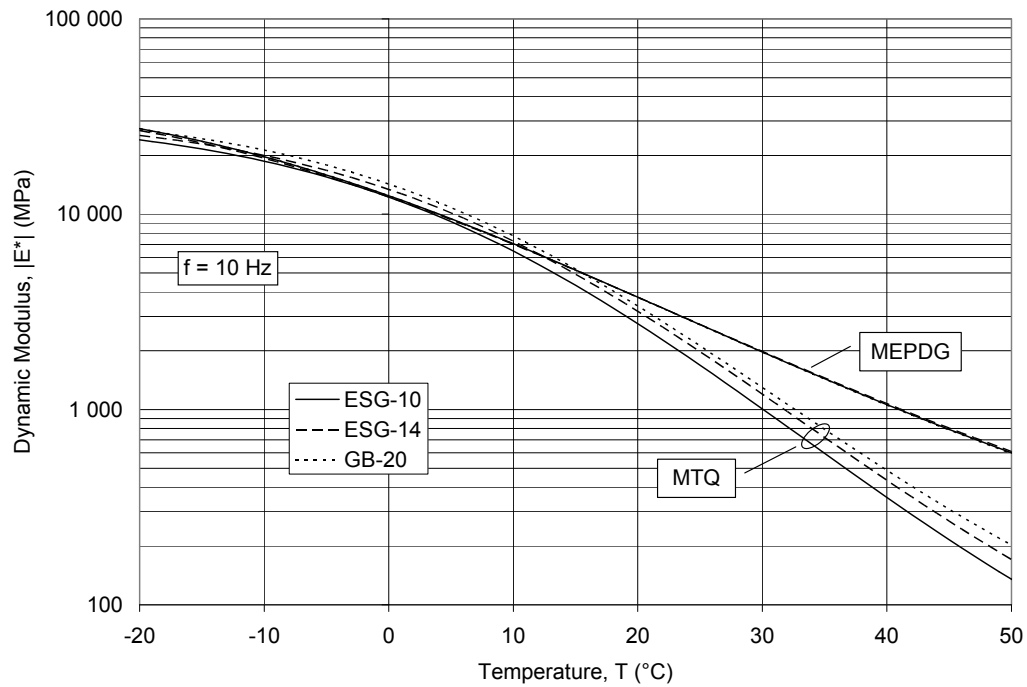


Figure 68 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 58-34 binder and the MEPDG model predictions

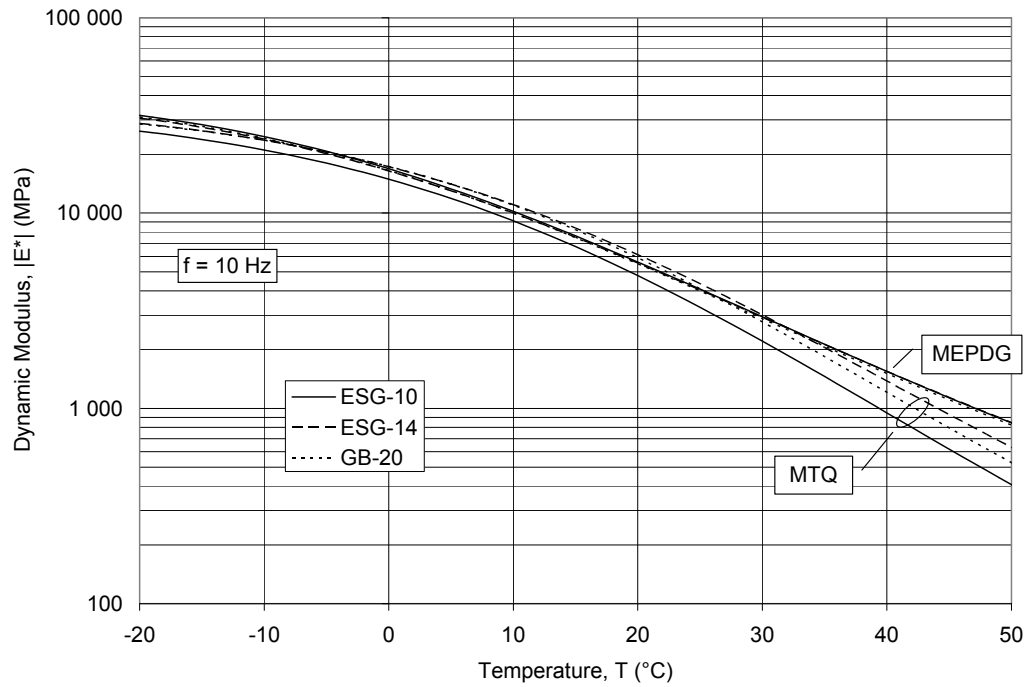


Figure 69 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 64-28 binder and the MEPDG model predictions

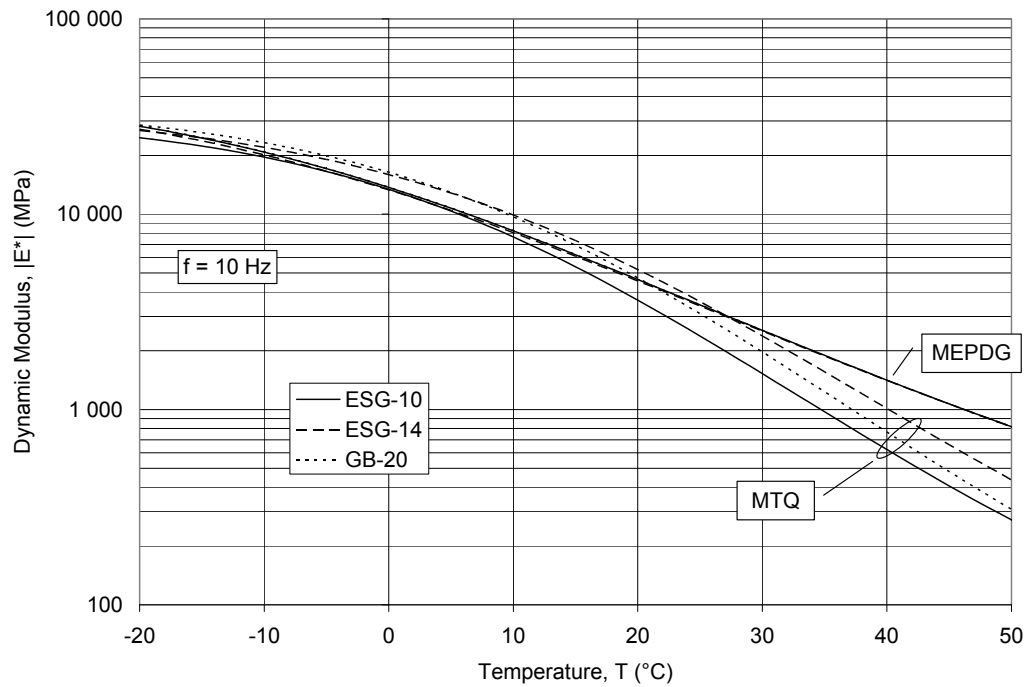


Figure 70 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 64-34 binder and the MEPDG model predictions

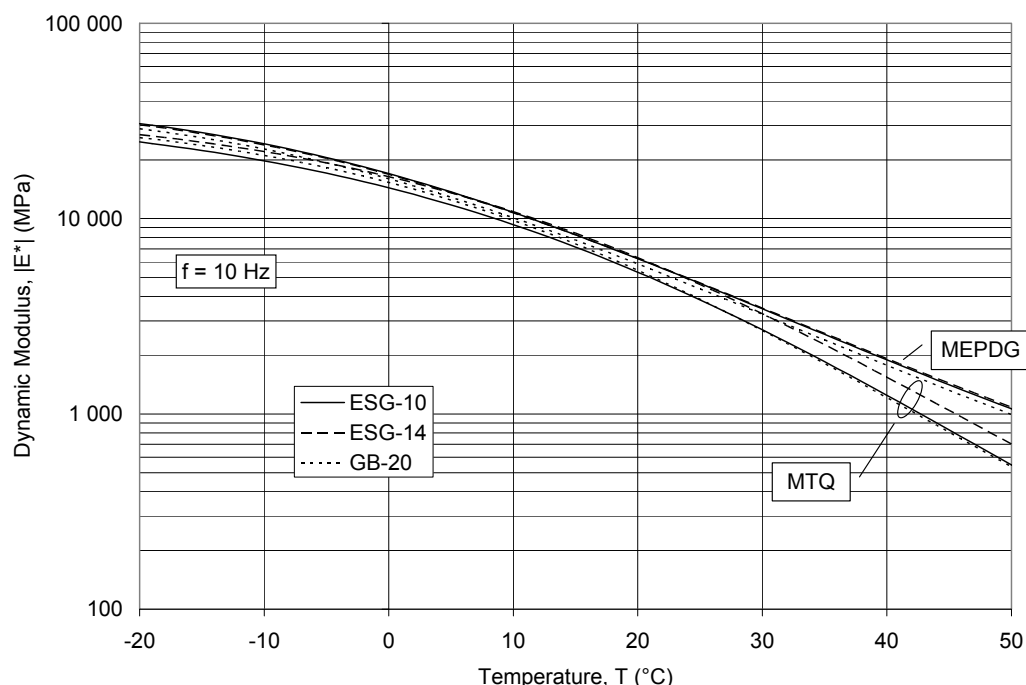


Figure 71 – Dynamic modulus master curves at 10 Hz of asphalt mixes with a PG 70-28 binder and the MEPDG model predictions

The pavement design software CHAUSSEÉ 2 of the MTQ uses the resilient modulus values (M_r) of the materials to determine their structural coefficients (MTQ, 2006), in accordance with the approach proposed by the AASHTO design guide (1993). The M_r values of the asphalt mixes were estimated using the Marshall stability values that were available when the software was developed. The M_r of the asphalt mixes do not vary according to the type of binder and gradation, but according to its resistance to rutting [high rut resistance (HRO)] and fatigue [anti-fatigue base (BAF)] in order to indirectly take into account these damage mechanisms.

The M_r values of the asphalt mixes from CHAUSSEÉ 2 are compared to the average $|E^*|$ of the mixes characterized in this study at 10 Hz for the two effective temperature zones that are considered for design purposes, namely 17.3 °C in the northern zone and 20.5 °C in the southern zone, as shown in Table 31. The table shows that the $|E^*|$ values for the mixes are higher than the M_r values from the software.

The MTQ regularly conducts mechanistic-empirical analyses based on the elastic modulus values determined on the road using a falling weight deflectometer (FWD). Typical values for uncracked pavement are 5,500 MPa in the northern zone and 4,800 MPa in the southern zone (St-Laurent, 1995), which is closer to the $|E^*|$ values in this study (Table 31).

Table 31 – Resilient modulus of asphalt mixes for CHAUSSEE 2 software (MTQ, 2006)

Mix	Temperature	M_r	$ E^* _{[10,Hz]}$	$M_r / E^* $
BB	North zone : 17.3 °C	3,580	5,830	0.61
	South zone : 20.5 °C	2,890	4,580	0.63
BB HRO	North zone : 17.3 °C	4,140	5,830	0.71
	South zone : 20.5 °C	3,590	4,580	0.78
BB BAF	North zone : 17.3 °C	4,640	5,830	0.80
	South zone : 20.5 °C	4,020	4,580	0.88

Before the development of the DTC test, the MTQ used a four-point bending test to determine the $|E^*|$ value of asphalt mixes (Doucet et al., 1999a, 1999b). The bending $|E^*|$ value of GB-20 and MB-16 (ESG-14) mixes incorporating different binders are compared with the tension-compression $|E^*|$ value of the equivalent mixes in this study, as shown in Table 32 at 15 °C and 10 Hz. The mixes characterized with the bending test were laboratory mixed and compacted, with a one hour conditioning before compaction. The MB-16 mixes were made with binders that had been stored in sealed containers for six years.

The GB-20 mixes show that the conditioning of the mixes significantly influences the $|E^*|$ value, particularly in the case of the PG 64-34 binder, as observed in the conditioning study. The MB-16 and ESG-14 mixes have similar $|E^*|$ values, which indicates that the binder aged somewhat during storage. The aging influence is difficult to analyse, because the results were obtained using two different test methods.

Table 32 – Dynamic modulus of asphalt mixes used in Québec as determined with a four-point bending test (Doucet et al., 1999a.,1999b)

Mix	Binder	PG Equivalent	Dynamic modulus, $ E^* _{[15\text{ °C}, 10\text{ Hz}]}$ (MPa)		
			$ E^* _{\text{flexural}}$	$ E^* _{\text{DTC}}$	$ E^* _{\text{flexural}} / E^* _{\text{DTC}}$
GB-20	Conventional	PG 64-28	6,500	8,200	0.79
	Polymer	PG 64-34	3,800	6,900	0.55
MB-16	80/100	PG 58-28	9,500	8,000	1.19
	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

The materials from 11 performance monitoring sites of the *Canadian Long Term Pavement Performance Program* (C-LTPP) were sampled in order to determine their stiffness in the laboratory. The $|E^*|$ value of the C-LTPP mixes were determined using the four-point bending test (Doucet and Doré, 2004). The general master curve for the C-LTPP sites is compared to the general master curves for the mixes in this study, as shown in Figure 72. The C-LTPP curve shows that the $|E^*|$ value of mixes that have aged for some time on the road is similar to the $|E^*|$ value of mixes that were short-term aged in the laboratory (four hours), but the shape of the curve is different. Assessing the influence of the type of test on these observations is difficult, but laboratory aging of the mixes appears to be relevant.

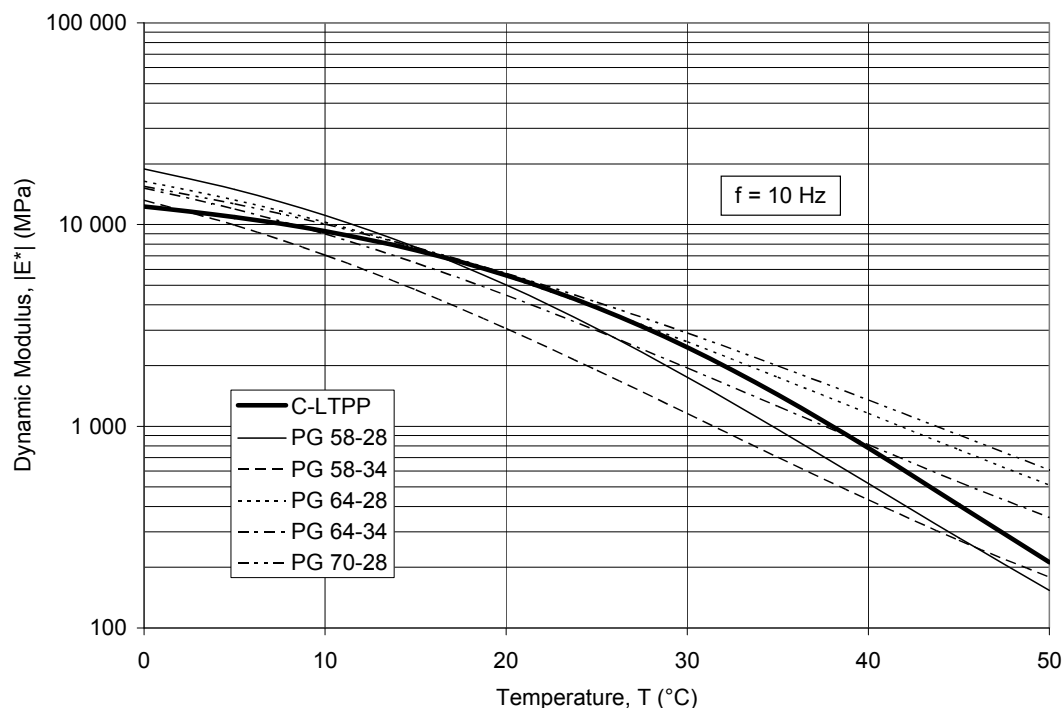


Figure 72 – Average dynamic modulus master curve for C-LTPP mixes and general MTQ curves (Doucet and Doré, 2004)

Finally, the influence of seasonal variations on the bearing capacity of five roads in Québec was studied by St-Laurent using a falling weight deflectometer (FWD) (St-Laurent, 1995). The average elastic modulus (E) of the mixes as determined through back-calculation using a multilayered elastic software was 5,760 MPa at 20 °C. The loading frequency of the FWD is approximately 20 Hz (Huang, 1993), and therefore, the average $|E^*|$ value of the general models in this study is 5,620 MPa at 20 °C. These results show that FWD and DTC tests can determine similar stiffness values.

7. CONCLUSION

This report describes the development of a direct tension-compression (DTC) equipment and test method LC 26-700 for "Determining the complex modulus of asphalt mixes".

- The DTC equipment developed by the MTQ is deemed functional, even though a phase lag persists in the data acquisition, which influences the measurement of the phase angle. A correction is made to minimize this error based on tests conducted with an elastic material (aluminium).
- The specimens are prepared using a rolling wheel compactor, which distributes air voids more uniformly in the specimens than a gyratory compactor.
- The mixes are conditioned for four hours before compaction in order to simulate the aging process during mixing at the plant, transportation and the lay-down process. This procedure yield results that are in accordance with the PG grading of the asphalt binders.
- Test repeatability is influenced by the air voids in the specimens, which vary during sample preparation. An increase in air voids generally reduces the $|E^*|$ value of the asphalt mix.

Complex modulus (E^*) and dynamic modulus ($|E^*|$) models were determined for three asphalt mixes with different nominal maximal sizes, combined with the five asphalt binder types that are used the most in Québec.

- The type of binder mainly influences the rheology of the mixes, and therefore, the shape of the E^* and $|E^*|$ curves.
- Gradation and air voids mainly influence the intensity of the E^* and $|E^*|$ values. An increase in the nominal maximal size of a mix generally increases the $|E^*|$ value of the mix.
- The proposal is to model the E^* and $|E^*|$ by type of binder, and to add or subtract a certain value from the prediction in order to take into account the influence of gradation and air voids.
- The Witczak model more accurately models the $|E^*|$ value than the Huet-Sayegh model for the E^* value, which makes the Witczak model interesting for pavement design when only the $|E^*|$ value is needed. However, the Huet-Sayegh model is required to account for the complete viscoelastic behaviour of the mix.
- The time-temperature superposition principle applies to the characterized mixes. The problematic values are related to the variability of the phase angle measurement.

- The results obtained are comparable to the values reported in the literature, but only one source of aggregate and binder per PG grade was characterized. The values obtained also seem comparable to the values determined with a falling weight deflectometer (FWD).

The MTQ now has a reliable and documented test method for determining the complex modulus of asphalt mixes. It has also developed a complex modulus databank for mixes that are used in Québec. The databank is made available in this report so that it can be used by other stakeholders in a variety of contexts. In addition, additional tests should be planned to characterize mixes that incorporate binders and aggregates from other sources.

At the same time, the MTQ is pursuing the development of its knowledge pertaining to the complex modulus of asphalt mixes through analyses that it conducts on an ongoing basis in response to various problematics. Using this approach, the MTQ is seeking to develop the use of the complex modulus in practice, such as for assessing new products and new technologies, optimizing pavement design and road rehabilitation, and assessing the prejudice in cases of non-compliance. The MTQ is also seeking to complete its analysis using samples taken from the road.

It is important to remember that the complex modulus is an intrinsic property of a mix, and that the determination of damage resistance is required to assess its mechanical performance. Therefore, in addition to the behaviour of a mix at small deformation, as described by the complex modulus, its resistance to damage from rutting at high temperatures, thermal cracking at low temperatures, and fatigue at intermediate temperatures is also required to assess its performance in terms of pavement design.

8. REFERENCES

AASHTO R 30-02 (2005). "Standard Practice for Mix 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 Mixes", *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 Mixes", *Annual Book of ASTM Standards*, Volume 4.03, American Society for Testing Materials, West Conshohocken, PA, USA.

CORTÉ, JEAN-FRANÇOIS and 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 and 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 and 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 and 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 and 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 and 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 and 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). “Bituminous mixtures—Test methods for hot mix asphalt—Part 26 Stiffness”, Comité Européen de Normalisation, Brussels, Belgium.

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 and 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. [On line]
[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. [On line]
[<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 Mixes*, 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.

Appendix 1

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for one hour



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-053-07** Densité brute : **2,538**
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	843,4	26,9	12	31 327	1,8	31 311	991
-20,2	3	838,5	28,2	13	29 765	2,9	29 727	1 491
-20,2	1	778,0	27,3	13	28 501	3,6	28 445	1 794
-20,2	0,3	761,5	28,3	14	26 927	4,8	26 832	2 267
-20,1	0,1	752,1	29,5	12	25 479	5,9	25 346	2 606
-9,9	10	1003,5	39,3	11	25 520	6,6	25 349	2 949
-9,9	3	900,4	38,6	12	23 298	6,3	23 155	2 574
-9,9	1	805,8	37,7	12	21 369	7,5	21 188	2 775
-9,9	0,3	744,9	39,0	11	19 114	9,0	18 878	2 997
-9,9	0,1	685,5	40,2	11	17 049	11,1	16 730	3 278
-0,1	10	780,5	43,1	13	18 123	10,6	17 812	3 343
-0,1	3	751,1	48,7	13	15 421	12,7	15 041	3 401
-0,1	1	641,1	49,2	13	13 044	15,1	12 596	3 390
-0,1	0,3	530,3	50,2	13	10 572	17,7	10 071	3 214
-0,1	0,1	429,5	51,6	13	8 331	23,6	7 636	3 332
10,0	10	434,4	43,9	15	9 906	20,5	9 277	3 474
10,0	3	362,9	49,9	16	7 267	25,0	6 587	3 070
10,0	1	261,9	49,7	16	5 271	29,5	4 586	2 598
10,0	0,3	180,6	51,6	17	3 502	34,1	2 899	1 965
10,0	0,1	118,0	51,4	17	2 293	38,8	1 788	1 437
20,1	10	275,2	70,0	9	3 931	36,3	3 168	2 328
20,1	3	158,0	68,8	10	2 366	41,7	1 767	1 574
20,1	1	103,8	73,2	11	1 417	45,7	990	1 013
20,0	0,3	55,9	72,1	11	776	49,3	506	589
20,1	0,1	31,7	71,3	12	444	51,1	279	346
29,8	10	86,3	71,5	11	1 208	49,4	786	917
29,8	3	42,6	68,3	11	623	52,1	383	492
29,8	1	24,9	74,0	11	337	52,2	207	267
29,8	0,3	12,9	71,7	10	180	51,3	113	141
29,8	0,1	7,6	71,8	12	106	47,6	72	78
39,9	10	31,9	104,2	10	306	57,8	163	259
39,9	3	15,4	105,3	9	146	57,4	78	123
39,9	1	8,3	105,6	7	78	53,4	47	63
39,9	0,3	4,5	101,8	7	44	48,6	29	33
39,9	0,1	2,9	101,6	9	29	42,0	21	19

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

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

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

Appendix 1

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for one hour

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

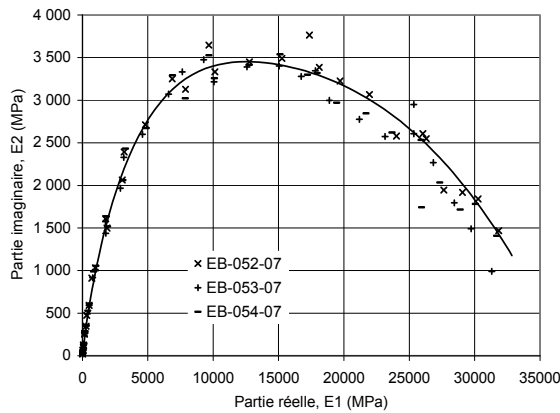
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

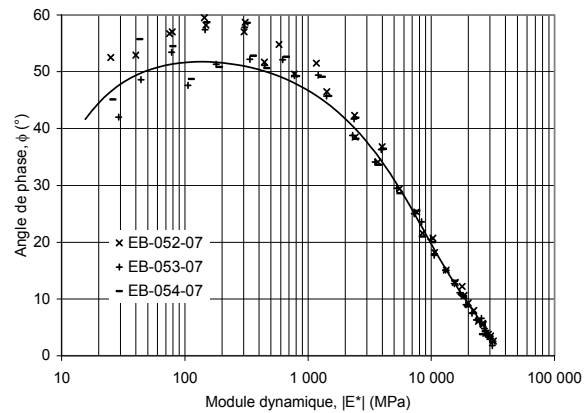
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,3%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

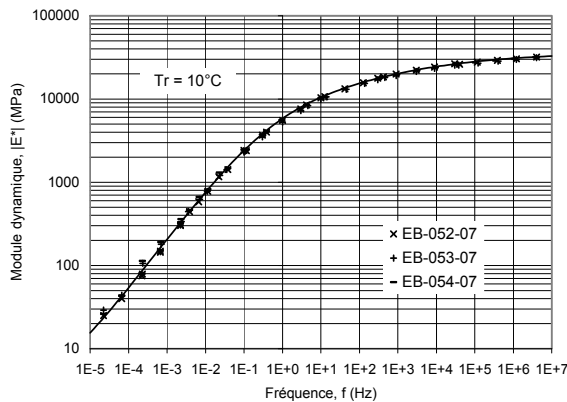
Module complexe dans le plan Cole et Cole



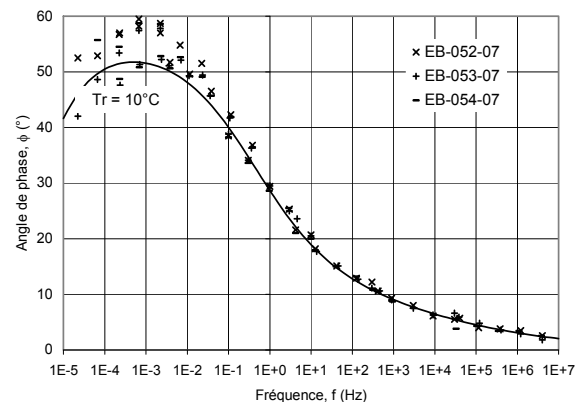
Module complexe dans l'espace de Black



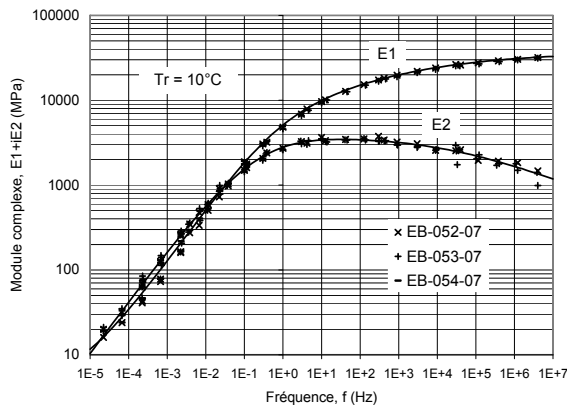
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



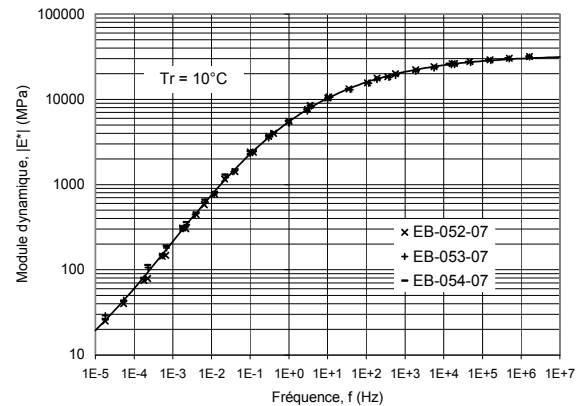
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 1

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for one hour



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 (μs)	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	71,3	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 (μs)	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 (μs)	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

Appendix 1

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for one hour

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

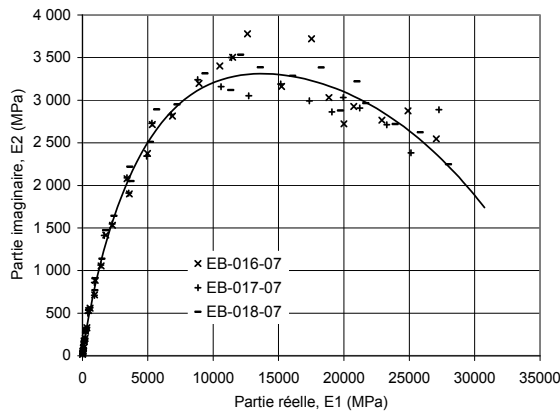
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

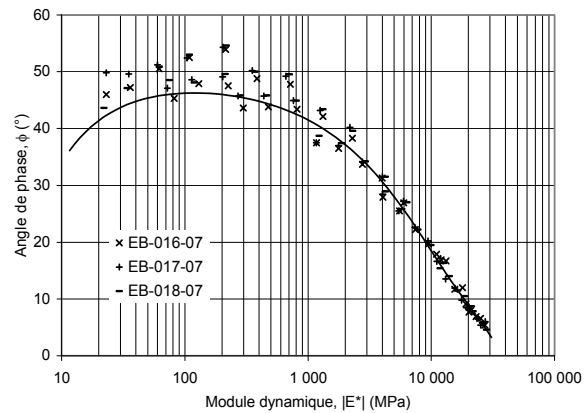
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,0%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

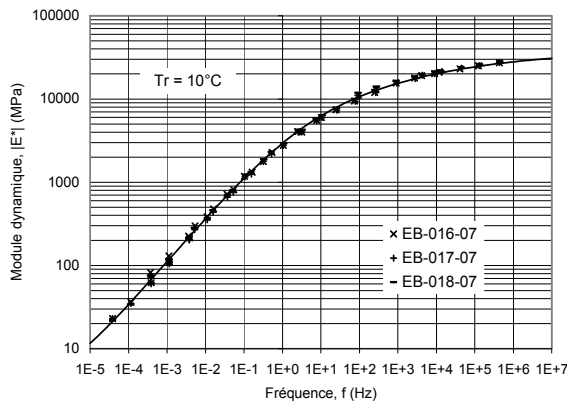
Module complexe dans le plan Cole et Cole



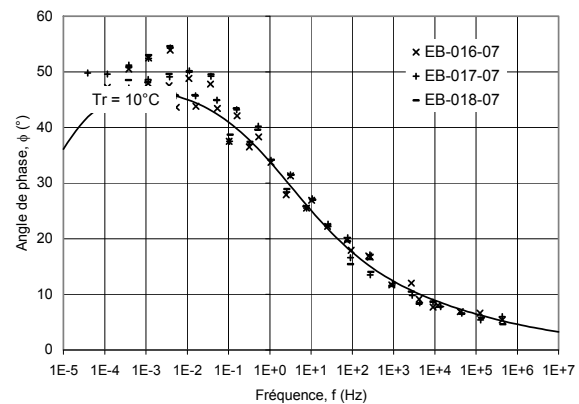
Module complexe dans l'espace de Black



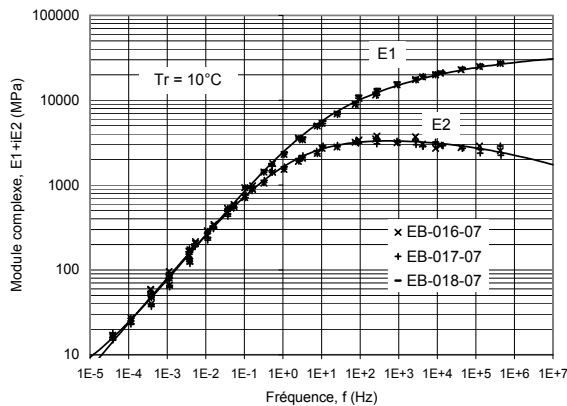
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



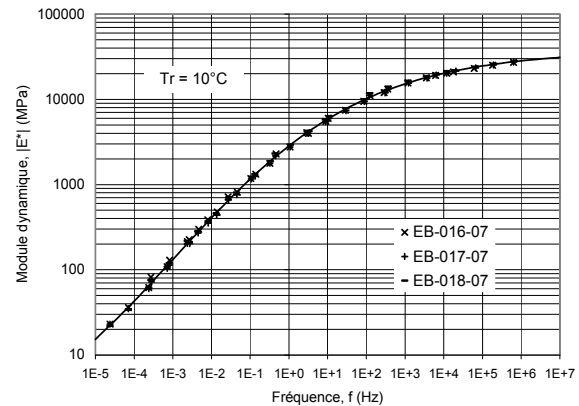
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 1

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for one hour



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 : **3,5%** Ajout :

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

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

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

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

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)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

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**

Appendix 1

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for one hour

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

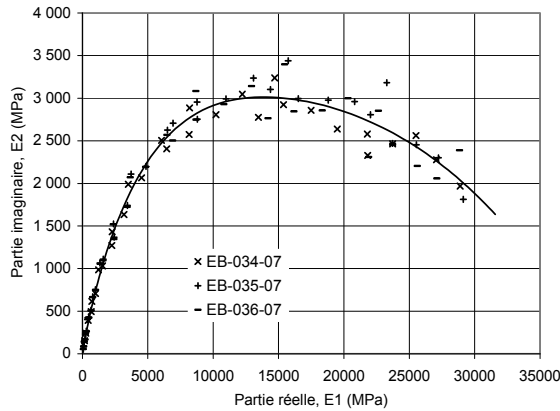
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

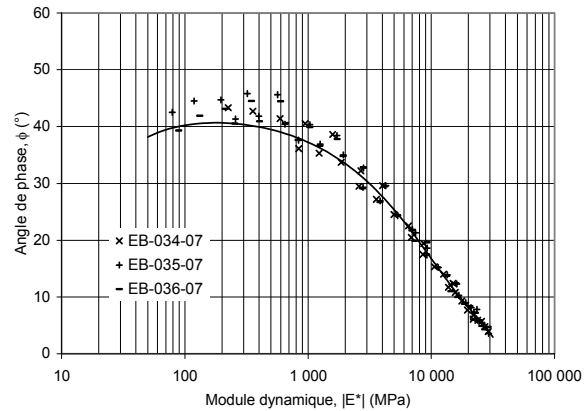
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,5%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

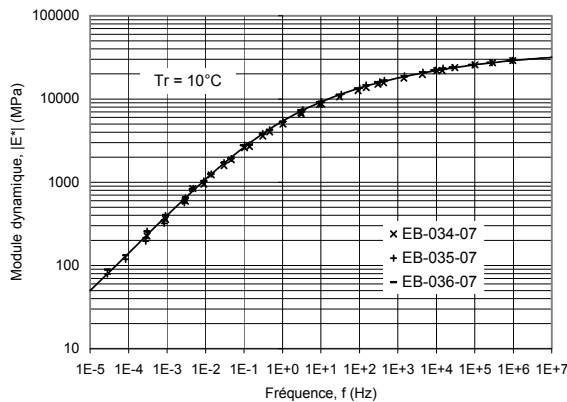
Module complexe dans le plan Cole et Cole



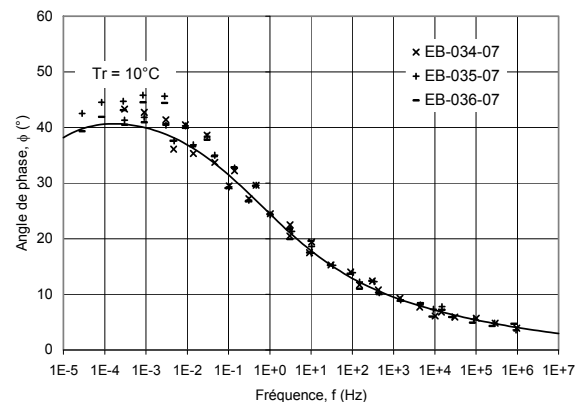
Module complexe dans l'espace de Black



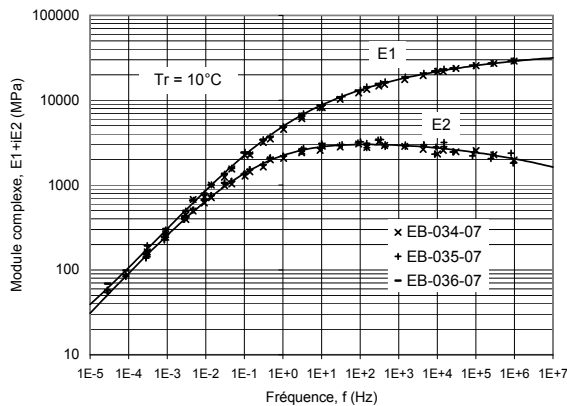
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



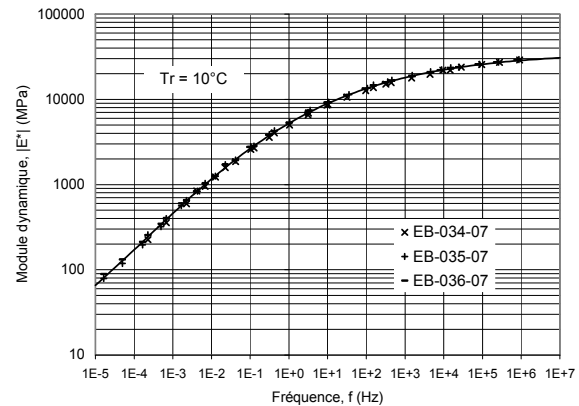
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 1

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for one hour



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

Appendix 1

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for one hour

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

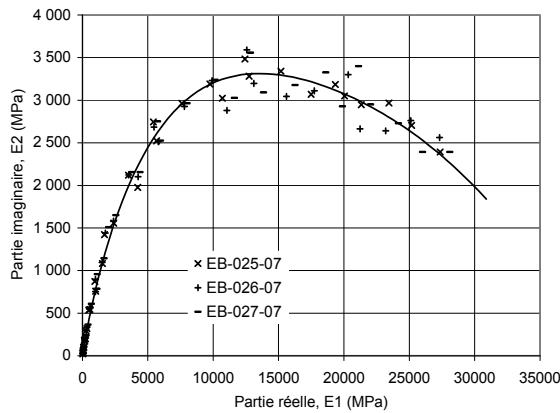
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

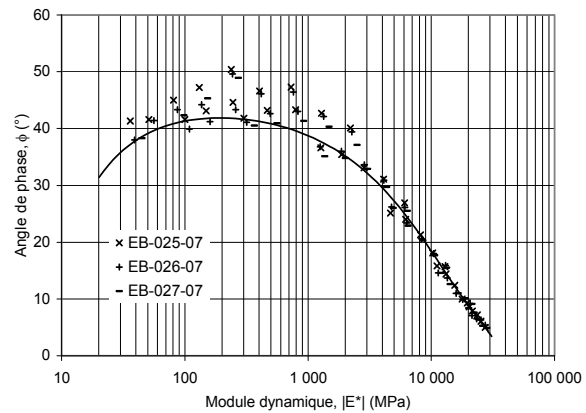
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,2%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

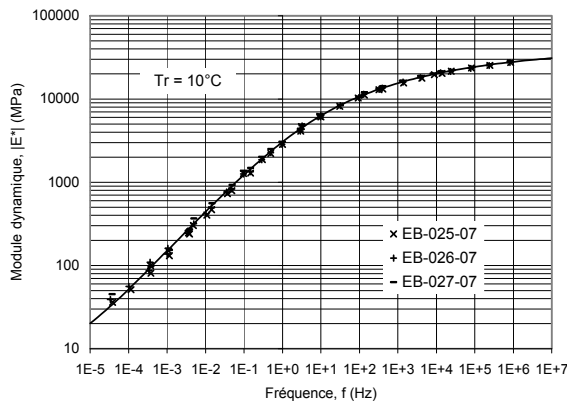
Module complexe dans le plan Cole et Cole



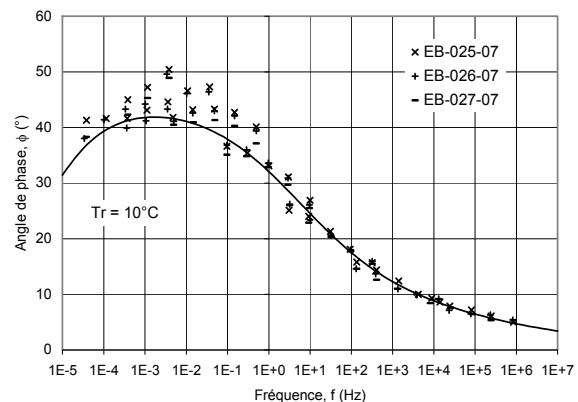
Module complexe dans l'espace de Black



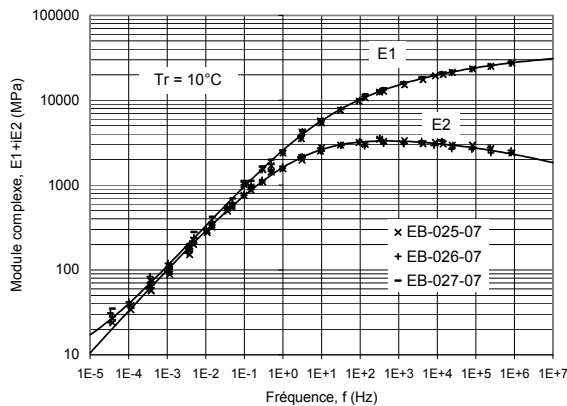
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



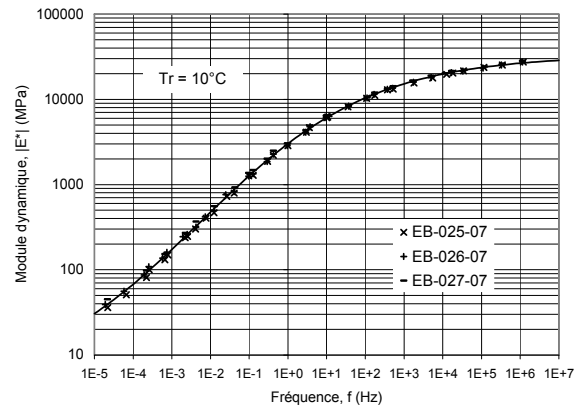
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 1

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for one hour



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 (μs)	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
-0,1	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 (μs)	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 (μs)	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**

Appendix 1

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for one hour

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

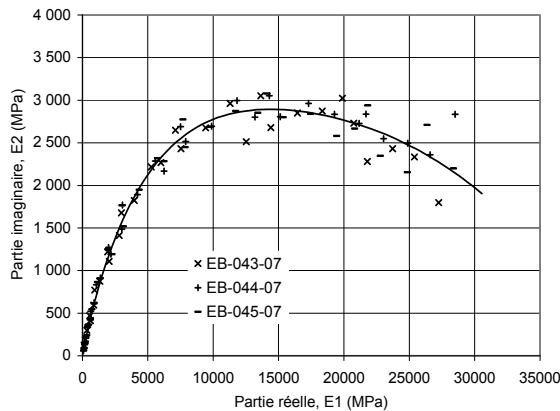
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

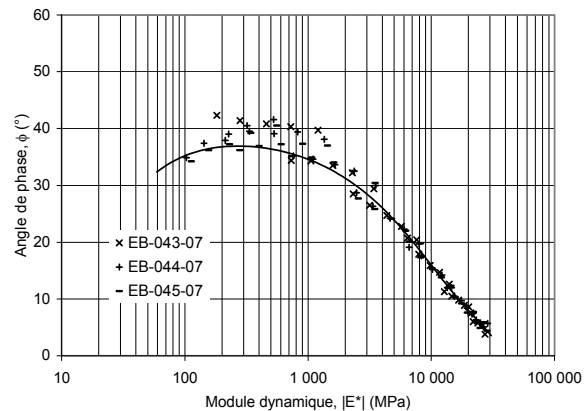
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,2%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

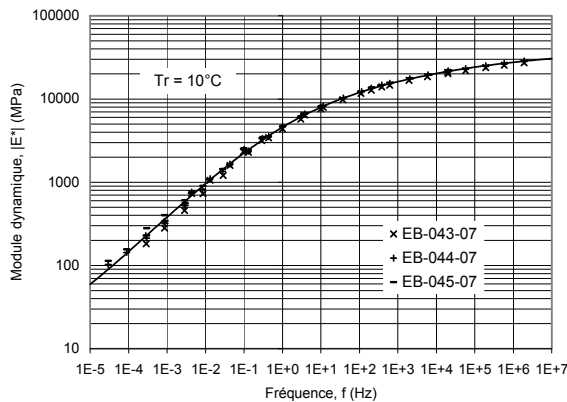
Module complexe dans le plan Cole et Cole



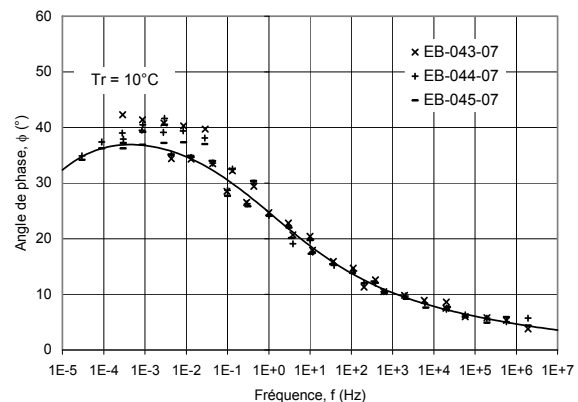
Module complexe dans l'espace de Black



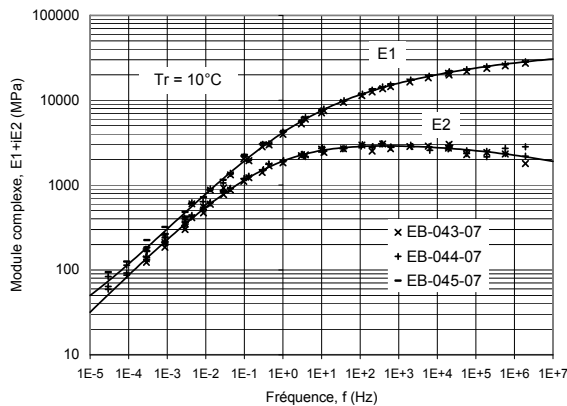
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



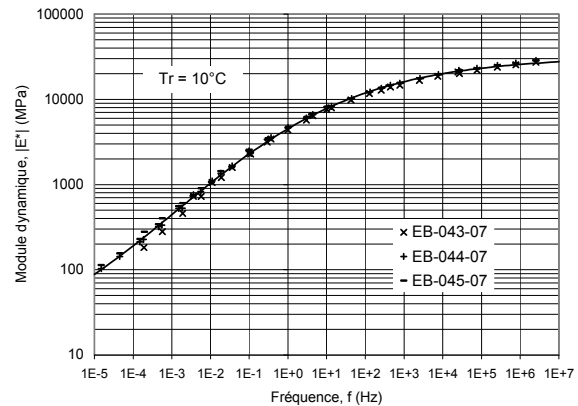
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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 (μs)	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 (μs)	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 (μs)	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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

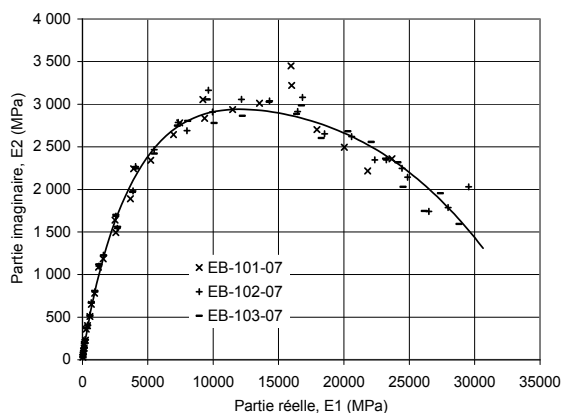
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

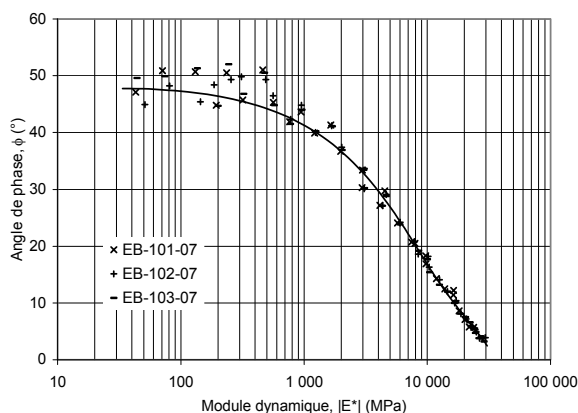
Teneur bitume : 5,3%
Teneur vides : 4,6%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

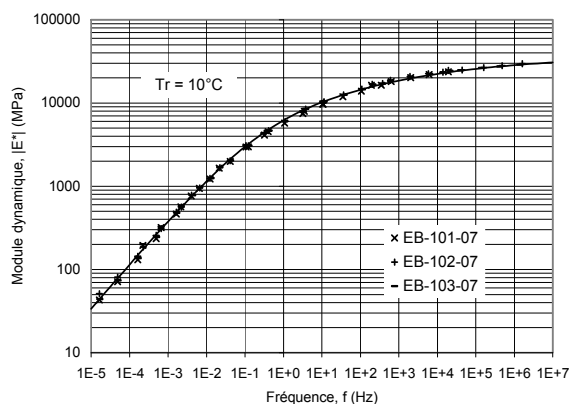
Module complexe dans le plan Cole et Cole



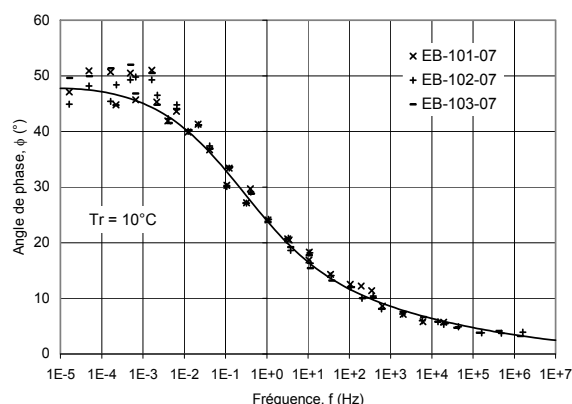
Module complexe dans l'espace de Black



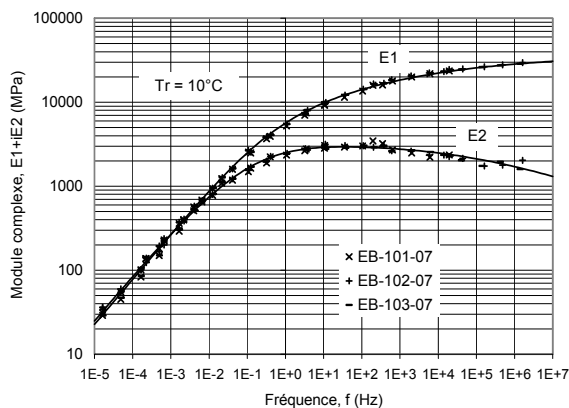
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



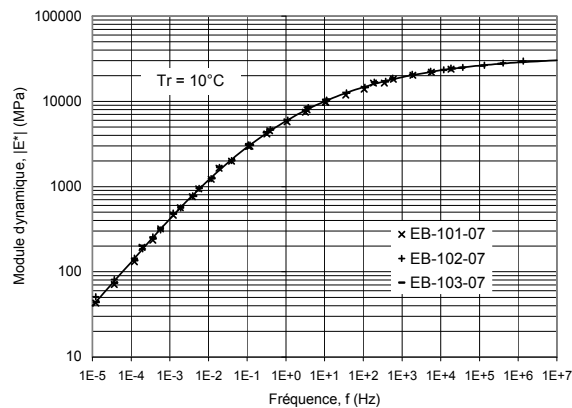
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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-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

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

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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

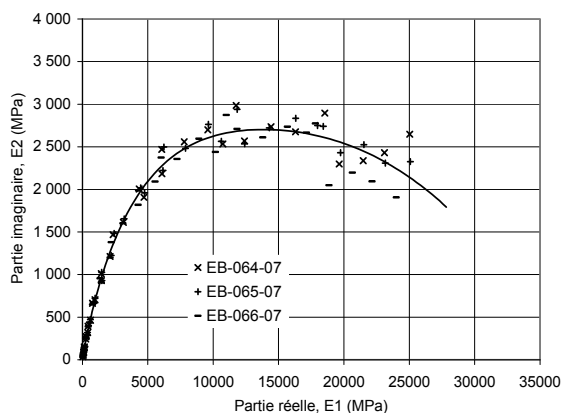
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

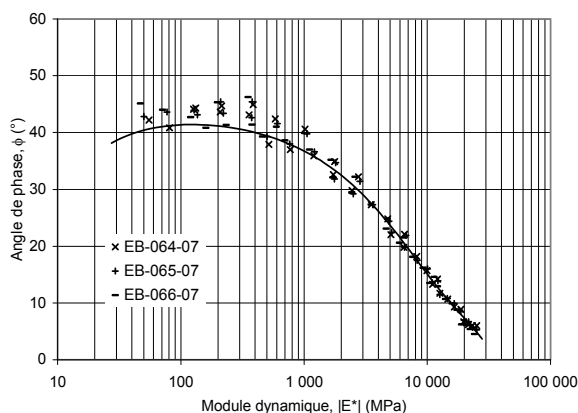
Teneur bitume : 5,3%
Teneur vides : 4,8%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

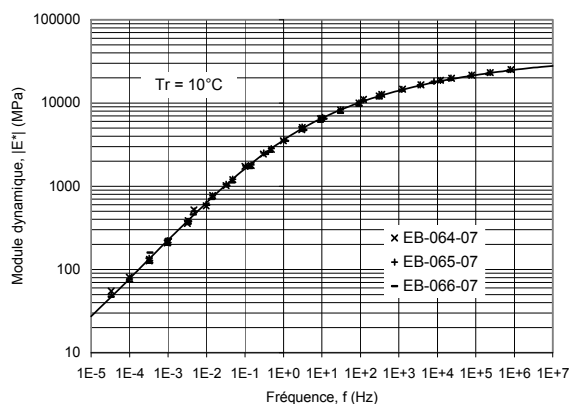
Module complexe dans le plan Cole et Cole



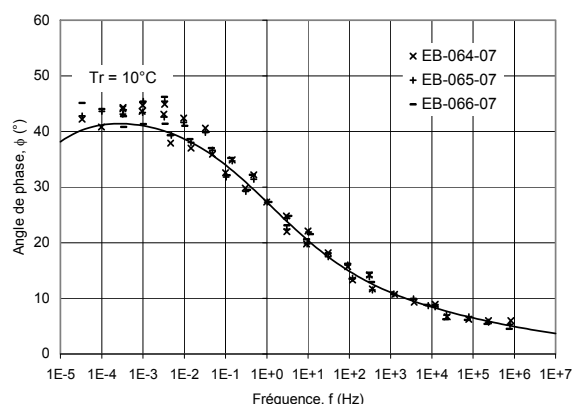
Module complexe dans l'espace de Black



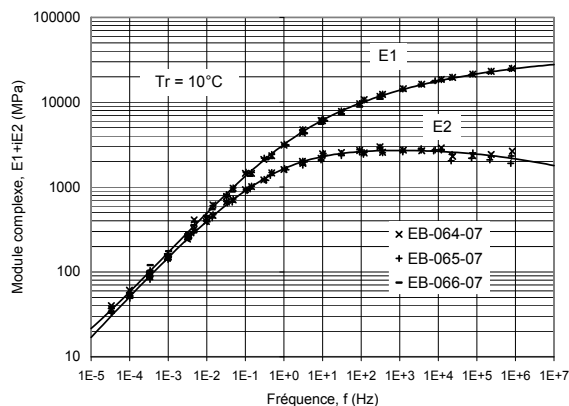
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



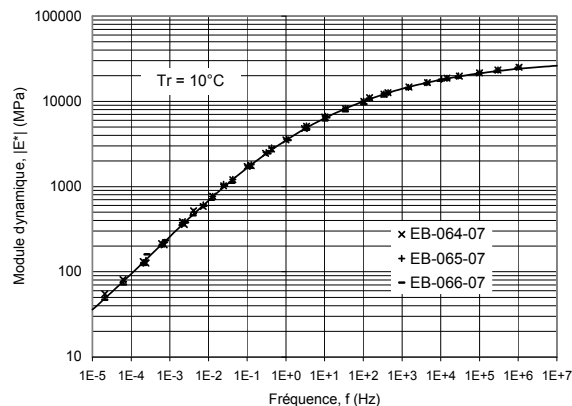
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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 64-28

Source bitume :

Teneur bitume : 5,3%

Source enrobé : Laboratoire

Teneur vides : 4,9%

Ajout :

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

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

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

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

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)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

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 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)
-20,1	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	4 584	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 Densité brute : 2,492
Teneur vides : 4,8% 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 Densité brute : 2,489
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	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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

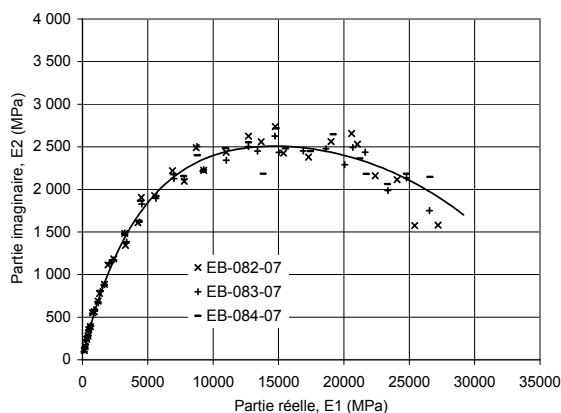
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

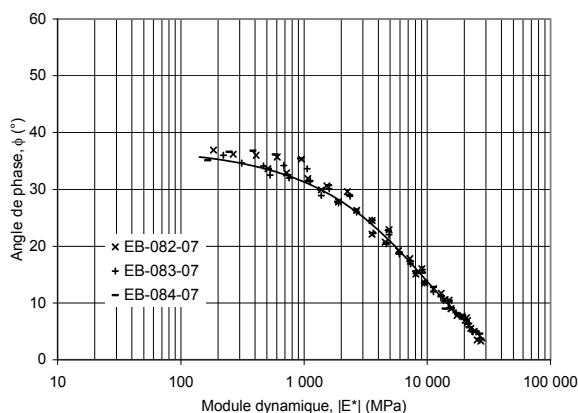
Teneur bitume : 5,3%
Teneur vides : 4,9%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

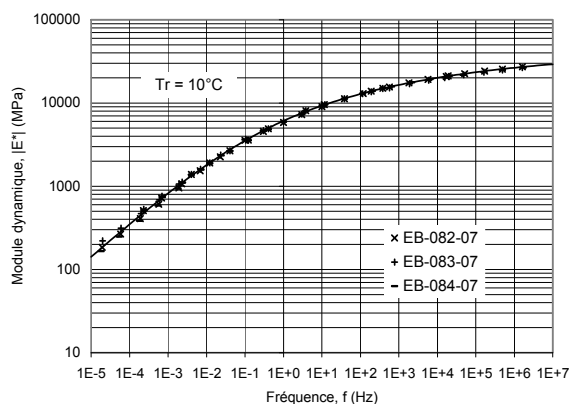
Module complexe dans le plan Cole et Cole



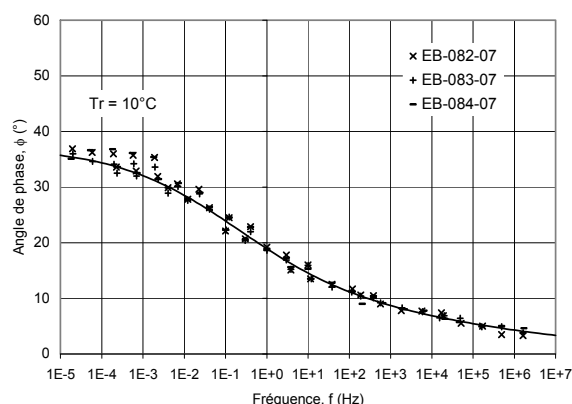
Module complexe dans l'espace de Black



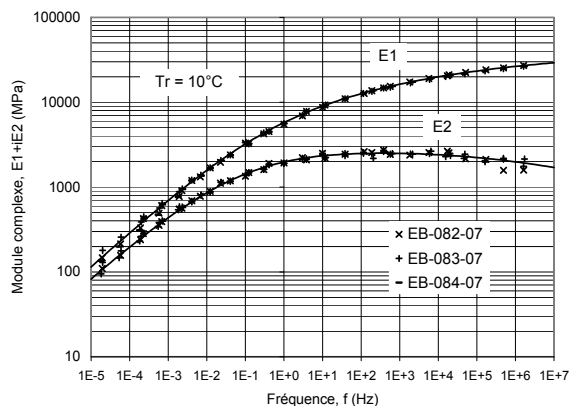
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



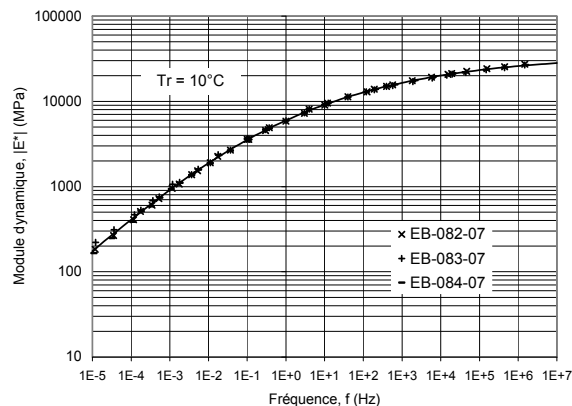
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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)

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

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

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

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)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

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-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

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

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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

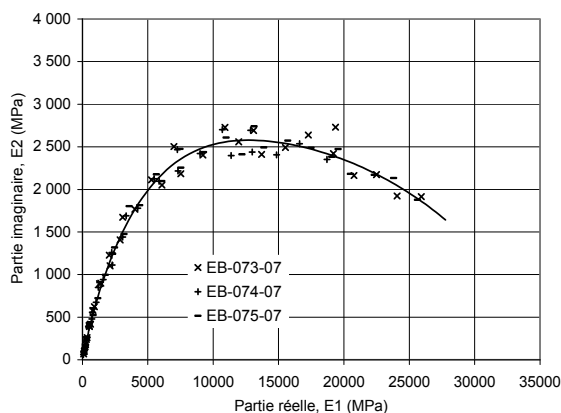
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

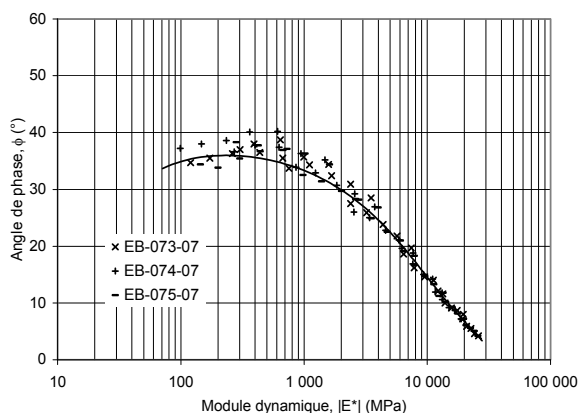
Teneur bitume : 5,3%
Teneur vides : 4,3%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

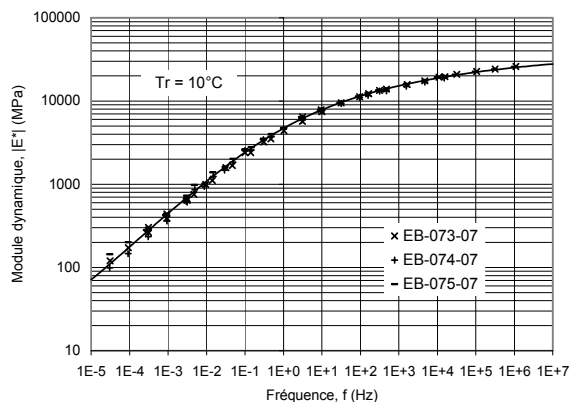
Module complexe dans le plan Cole et Cole



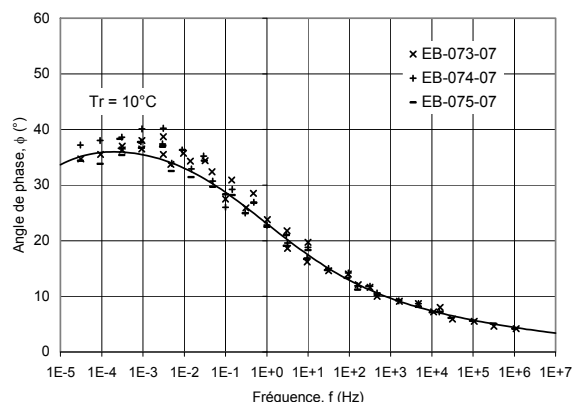
Module complexe dans l'espace de Black



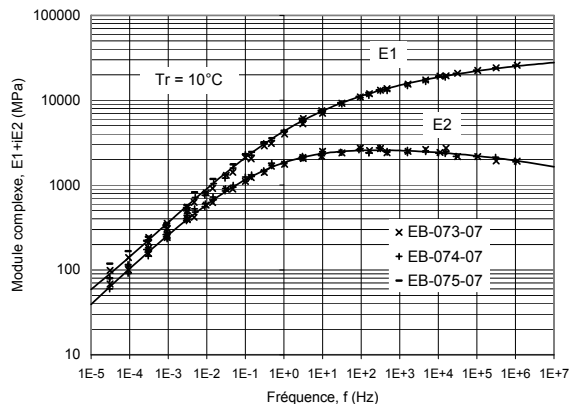
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



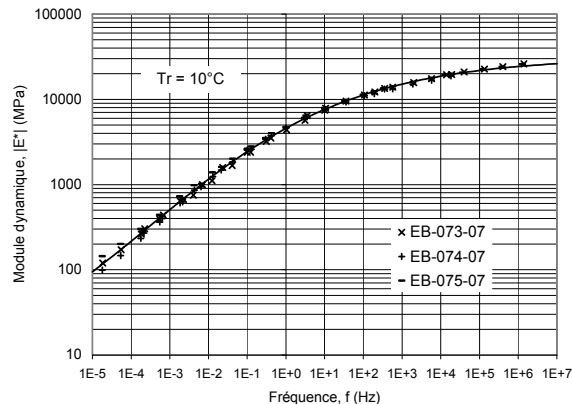
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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)

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

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

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

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)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

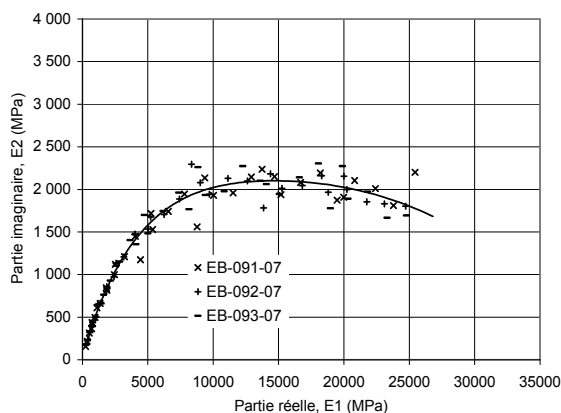
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

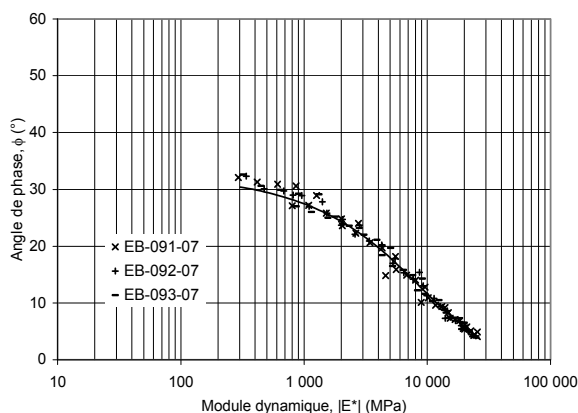
Teneur bitume : 5,3%
Teneur vides : 5,2%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

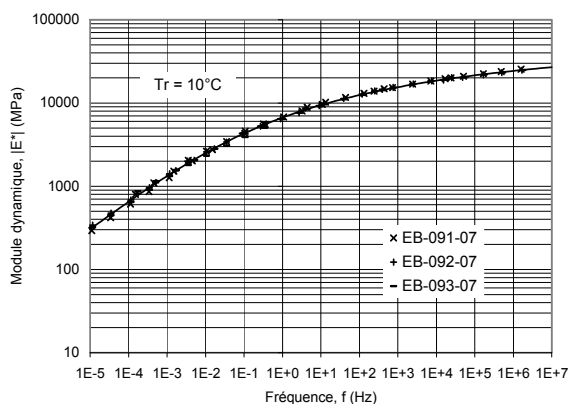
Module complexe dans le plan Cole et Cole



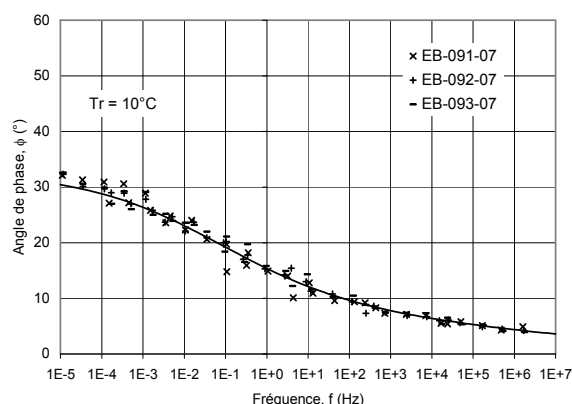
Module complexe dans l'espace de Black



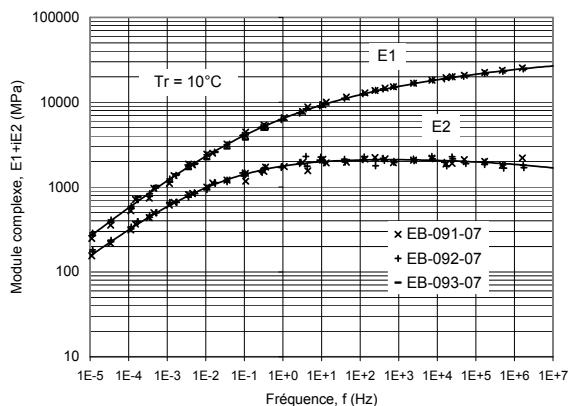
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



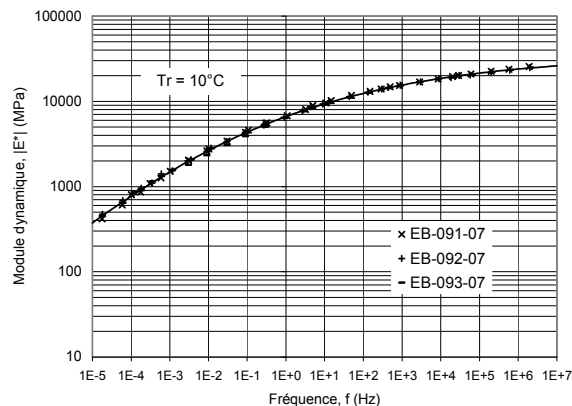
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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 : **3,7%** 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
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)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

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** 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	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-100-07** Densité brute : **2,517**
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)
-20,1	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

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

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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

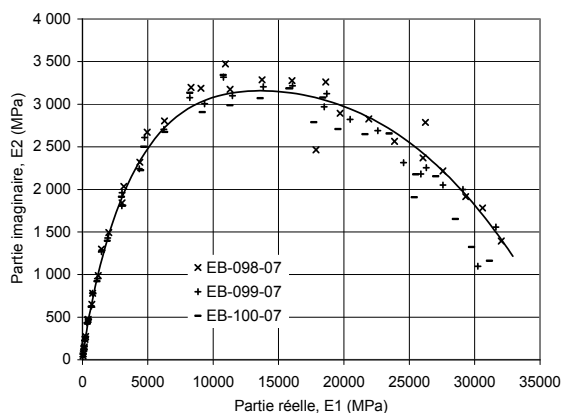
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

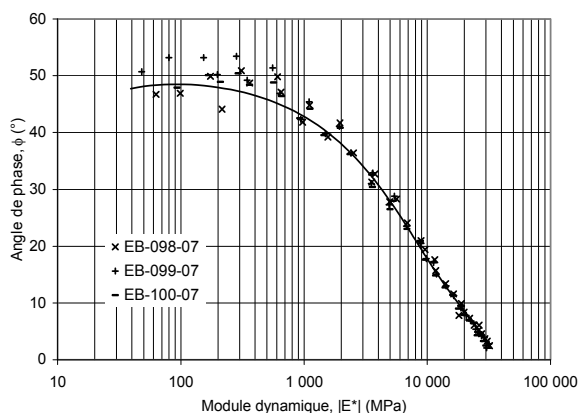
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 3,7%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

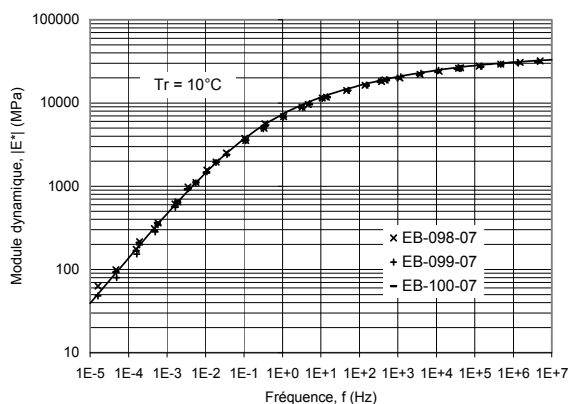
Module complexe dans le plan Cole et Cole



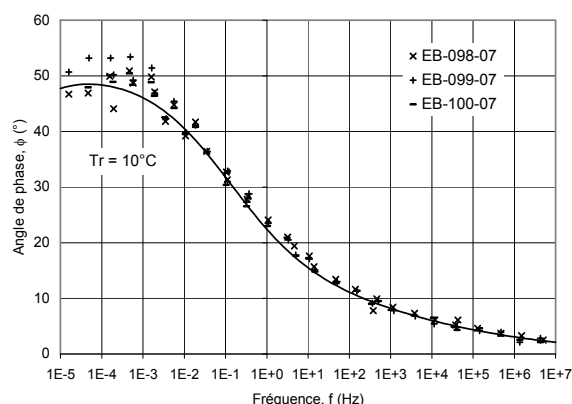
Module complexe dans l'espace de Black



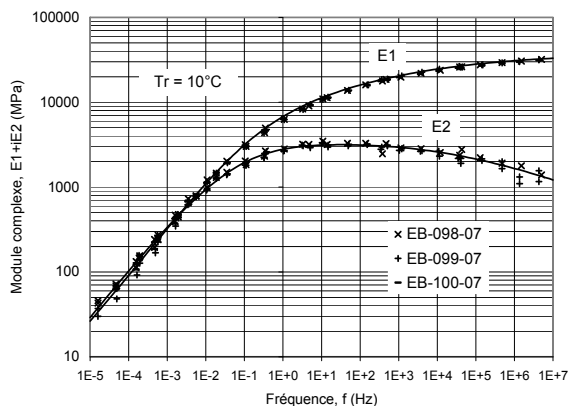
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



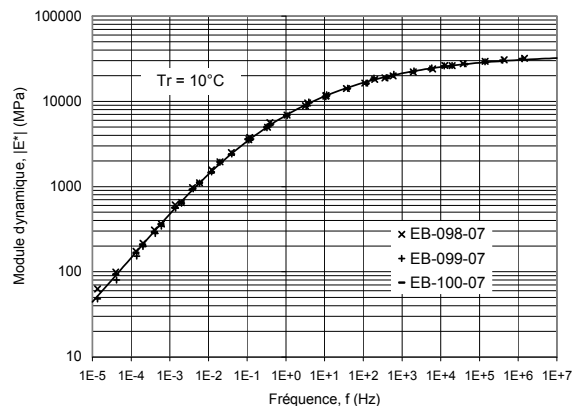
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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 : **3,9%** 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
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)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

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-061-07** Densité brute : **2,516**
Teneur vides : **4,0%** 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	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-062-07** Densité brute : **2,520**
Teneur vides : **3,9%** Densité max : **2,621**

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε ($\mu\epsilon$)	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-063-07** Densité brute : **2,521**
Teneur vides : **3,8%** 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	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**

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

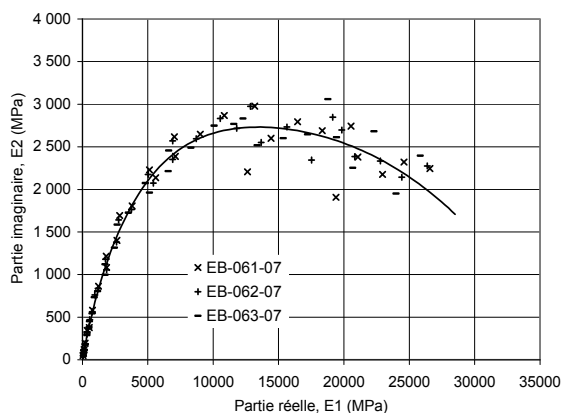
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

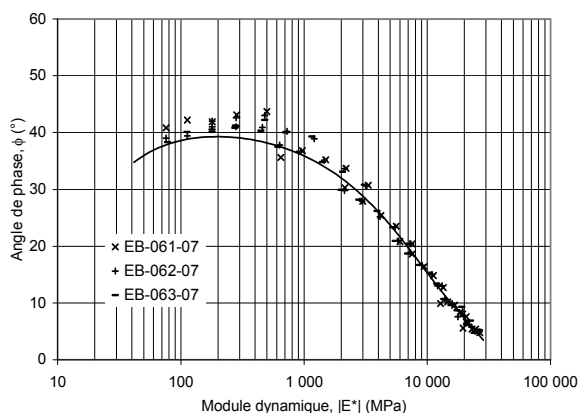
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 3,9%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

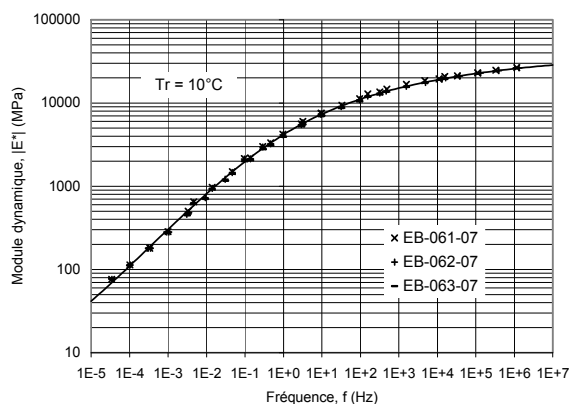
Module complexe dans le plan Cole et Cole



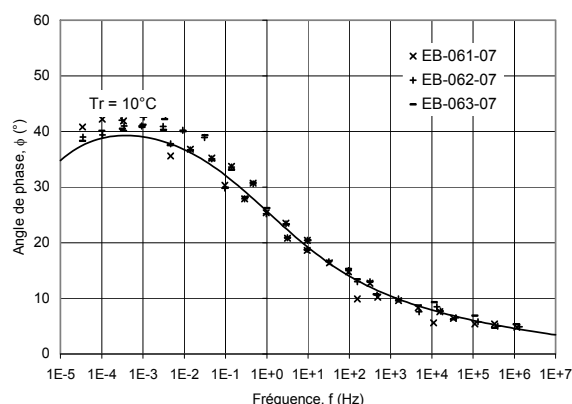
Module complexe dans l'espace de Black



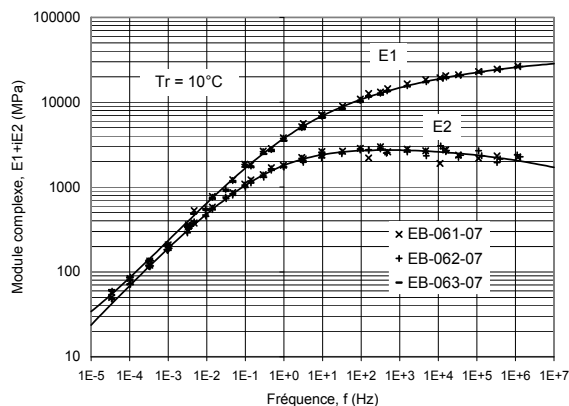
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



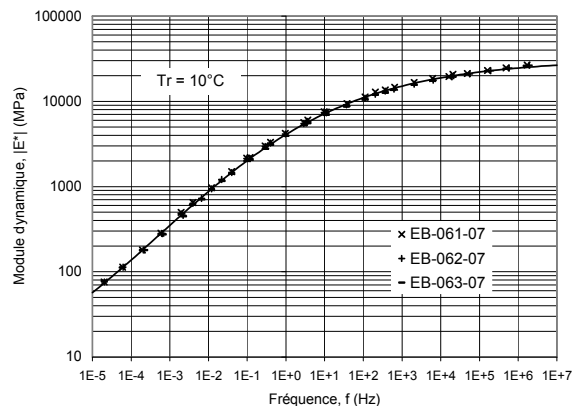
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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 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	39 600	2,390	0,143	0,410	0,056	-0,149	8,54E-04

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

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

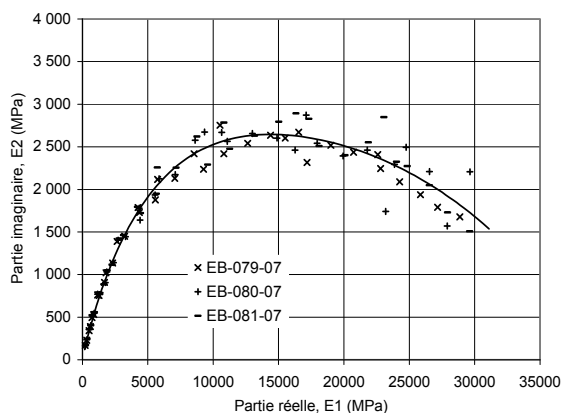
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

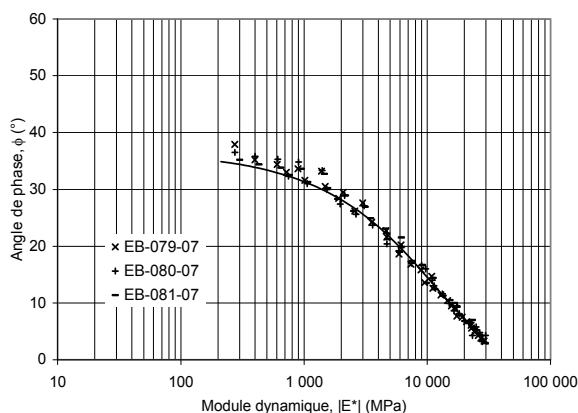
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,2%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

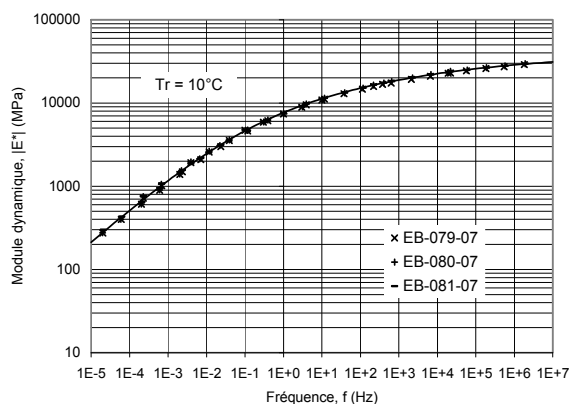
Module complexe dans le plan Cole et Cole



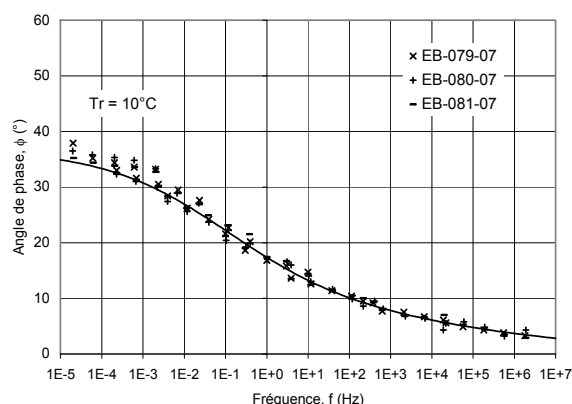
Module complexe dans l'espace de Black



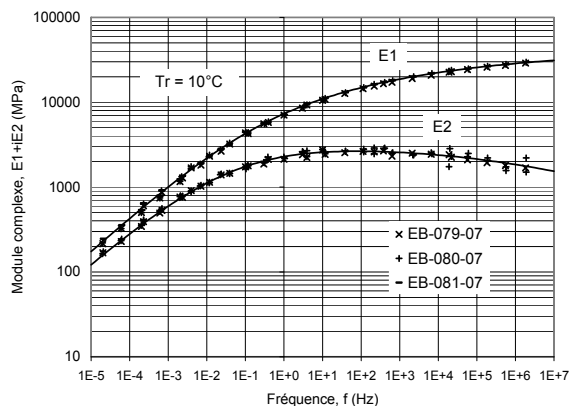
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



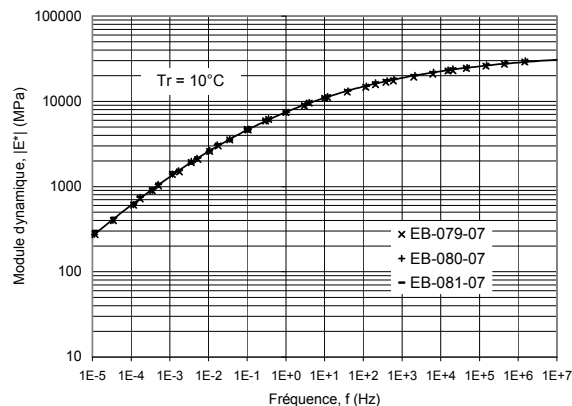
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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 : **3,6%** Ajout :

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

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

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

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

$T_r = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

RMSE log E1 = 0,025
RMSE log E2 = 0,025
R² log E1 = 1,00
R² log E2 = 1,00
n = 104

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)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

$T_r = 10 \text{ }^\circ\text{C}$

RMSE log |E*| = 0,015
R² log |E*| = 1,00
n = 104
E_{min} = 3,0
E_{max} = 34 400

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** Densité brute : **2,519**
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)
-20,2	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-072-07** 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)
-20,1	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

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

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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

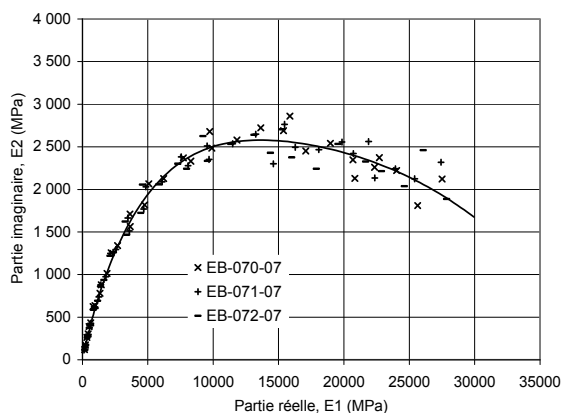
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

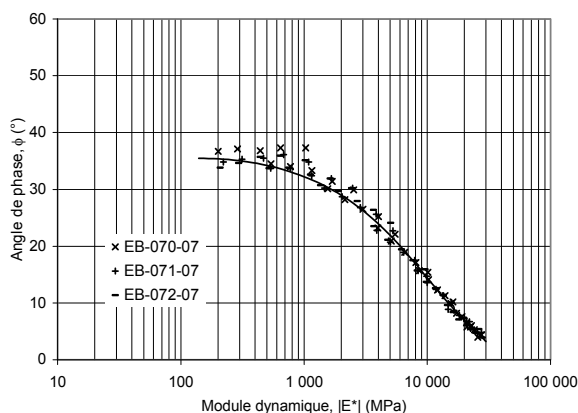
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 3,6%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

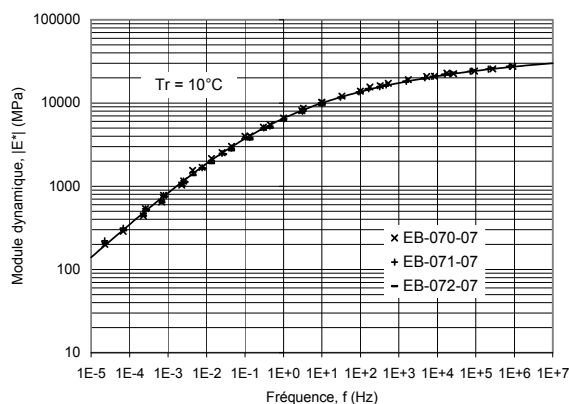
Module complexe dans le plan Cole et Cole



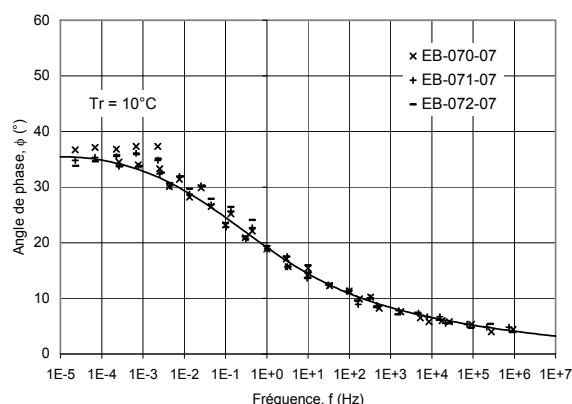
Module complexe dans l'espace de Black



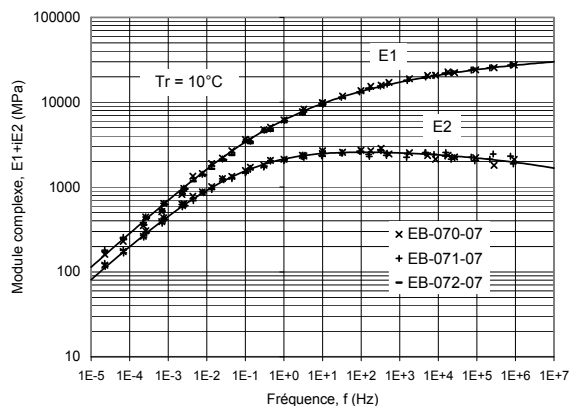
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



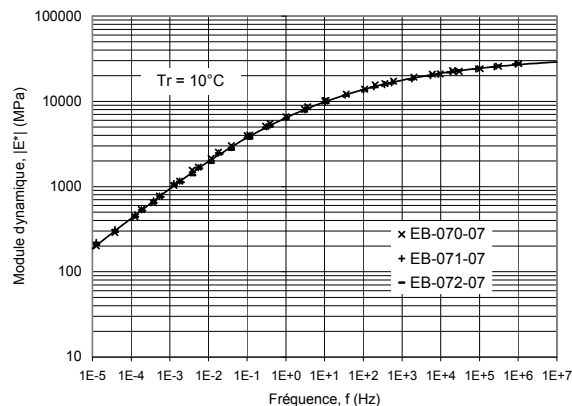
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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 (μs)	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 (μs)	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 (μs)	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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

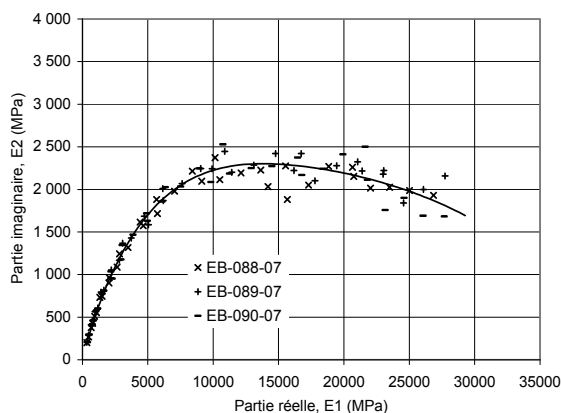
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

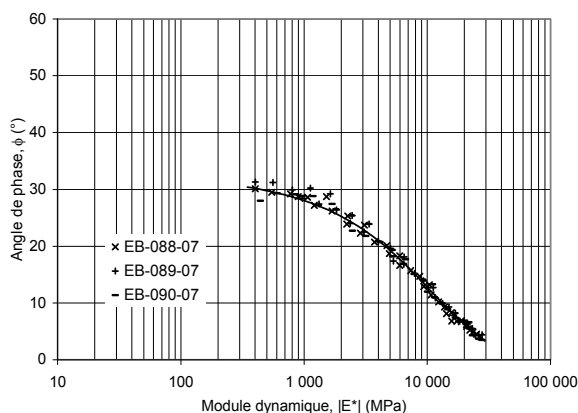
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,2%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

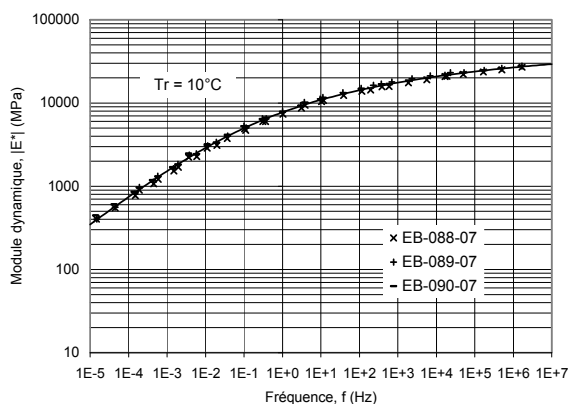
Module complexe dans le plan Cole et Cole



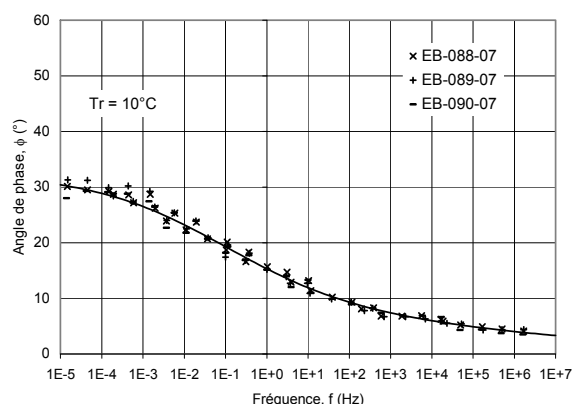
Module complexe dans l'espace de Black



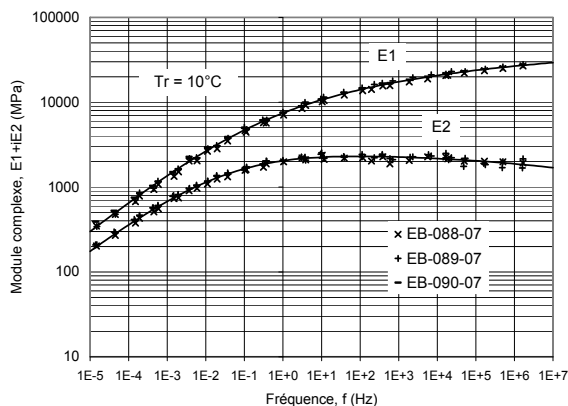
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



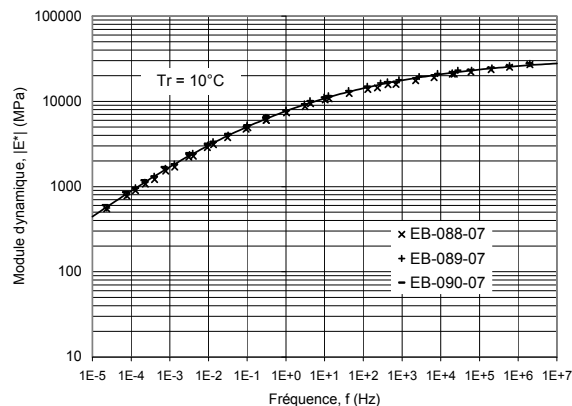
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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)

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

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

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

$T_r =$	10 °C
RMSE log E1 =	0,037
RMSE log E2 =	0,039
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
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)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

$T_r =$	10 °C
RMSE log E* =	0,017
R ² log E* =	1,00
n =	104
E _{min} =	0,5
E _{max} =	36 400

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 (μs)	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-097-07 Densité brute : 2,553
Teneur vides : 4,2% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	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	2 204
-10,2	10	1050,4	39,5	13	26 624	5,5	26 500	2 574
-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

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

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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

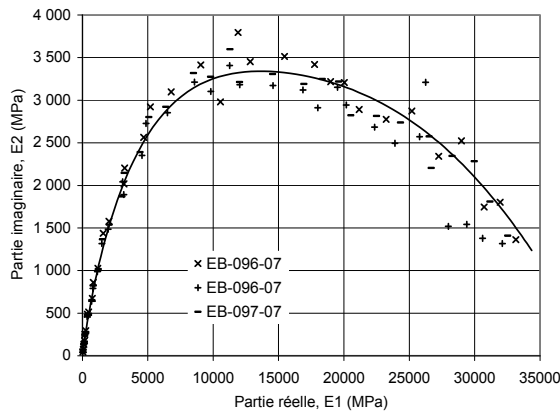
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

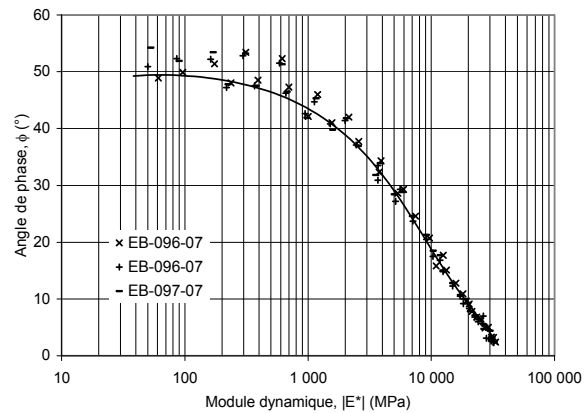
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 4,2%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

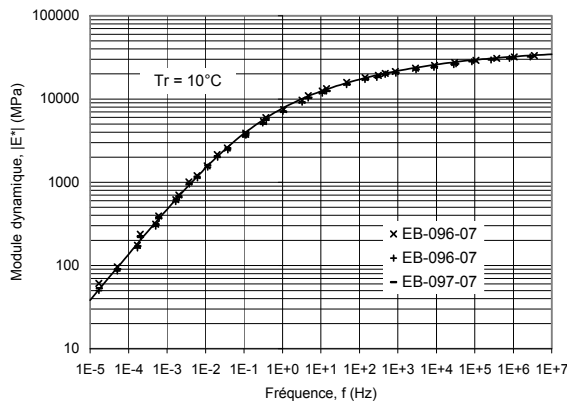
Module complexe dans le plan Cole et Cole



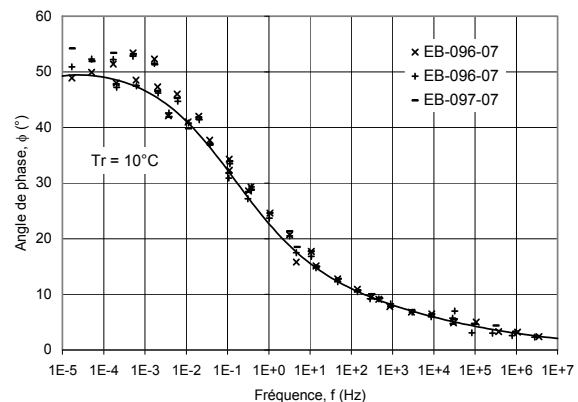
Module complexe dans l'espace de Black



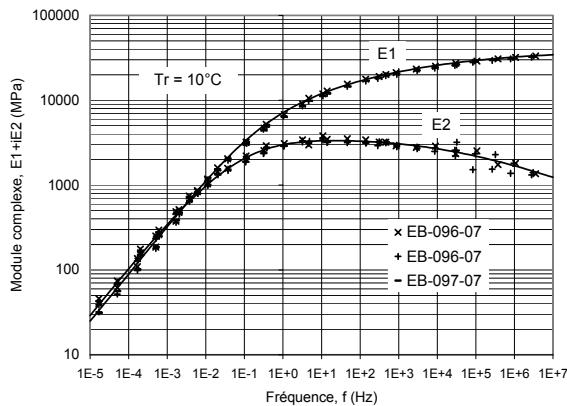
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



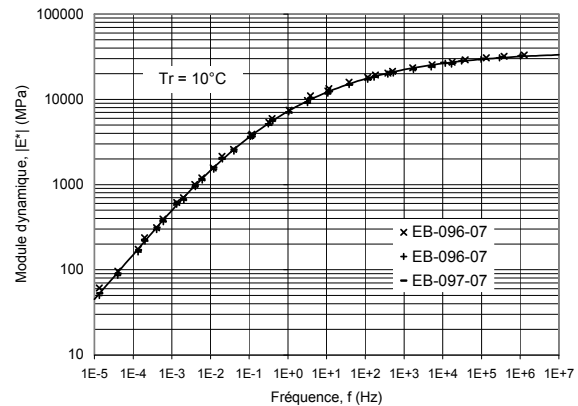
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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 granulats :
Source bitume :
Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

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

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

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

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

$T_r = 10 \text{ }^\circ\text{C}$
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)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

$T_r = 10 \text{ }^\circ\text{C}$
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 (µε)	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-060-07 Densité brute : 2,537
Teneur vides : 4,8% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (µε)	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

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

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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

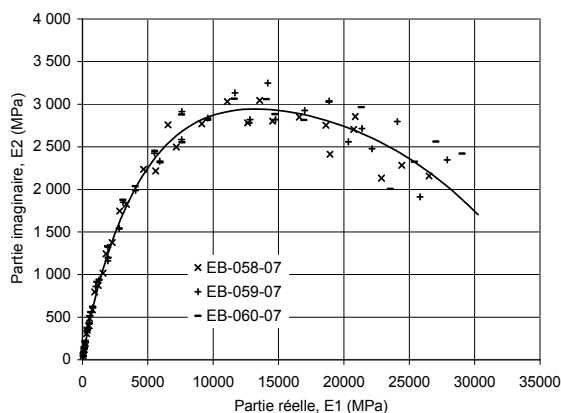
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

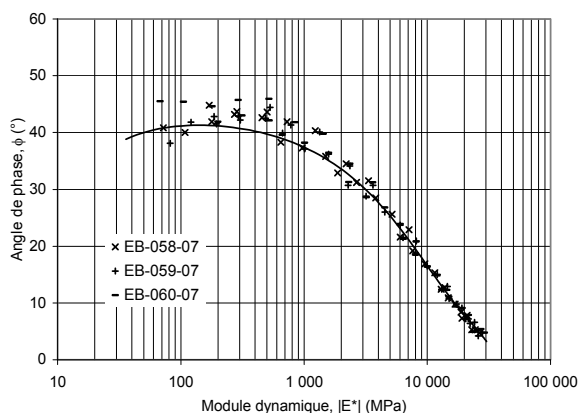
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 4,6%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

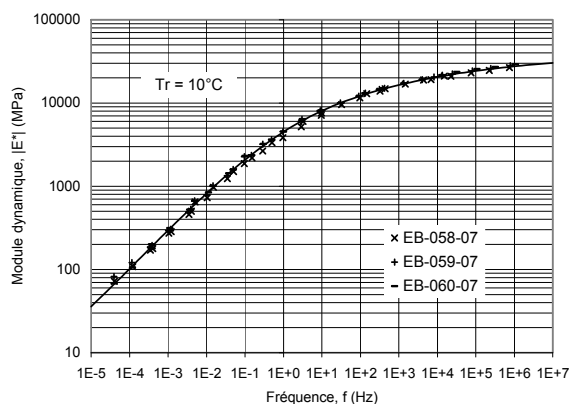
Module complexe dans le plan Cole et Cole



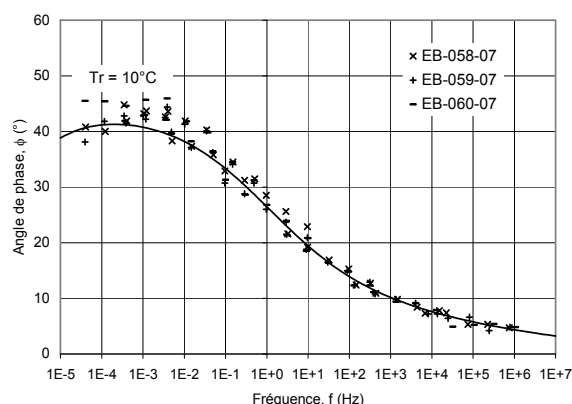
Module complexe dans l'espace de Black



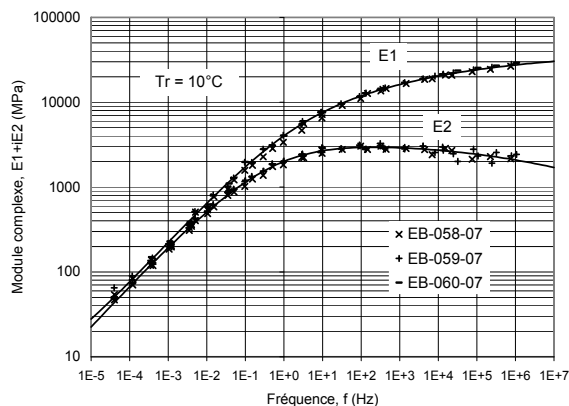
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



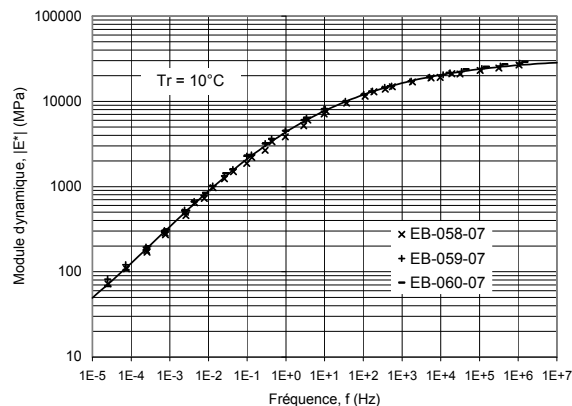
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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 64-28

Source bitume :

Teneur bitume : 4,3%

Source enrobé :

Laboratoire

Teneur vides : 5,1%

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	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 Densité brute : 2,525
Teneur vides : 5,3% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	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 Densité brute : 2,531
Teneur vides : 5,0% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	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 Densité brute : 2,528
Teneur vides : 5,1% Densité max : 2,665

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	CV _ε (%)	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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

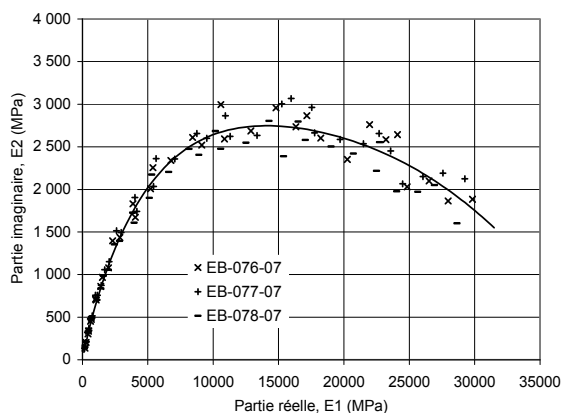
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

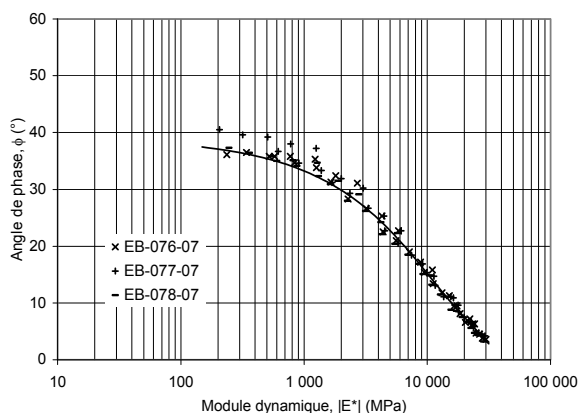
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 5,1%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

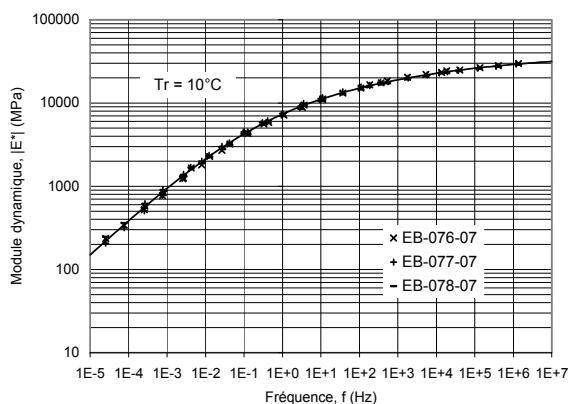
Module complexe dans le plan Cole et Cole



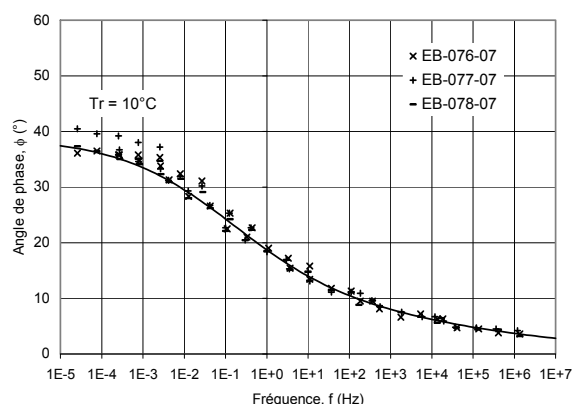
Module complexe dans l'espace de Black



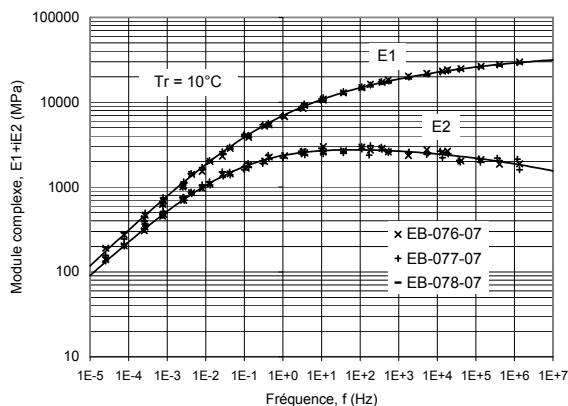
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



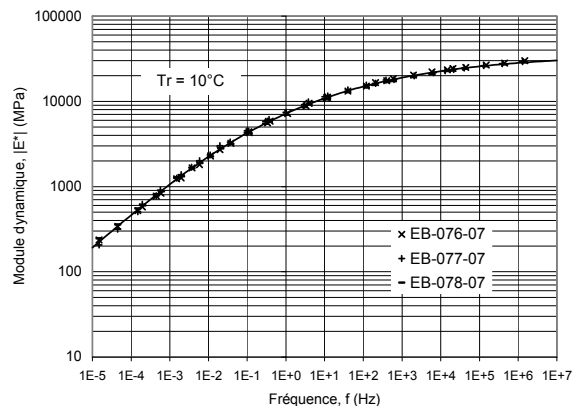
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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 (μs)	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 (μs)	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	50,0	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 (μs)	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
30,1	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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

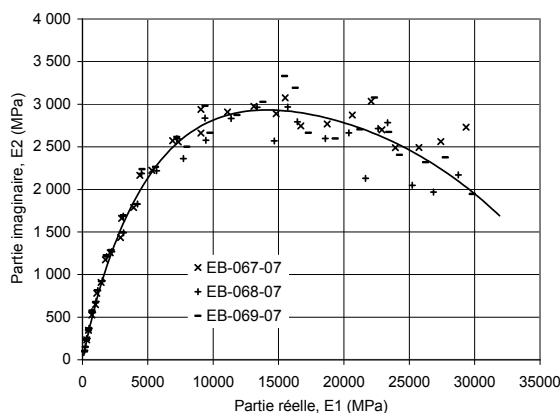
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

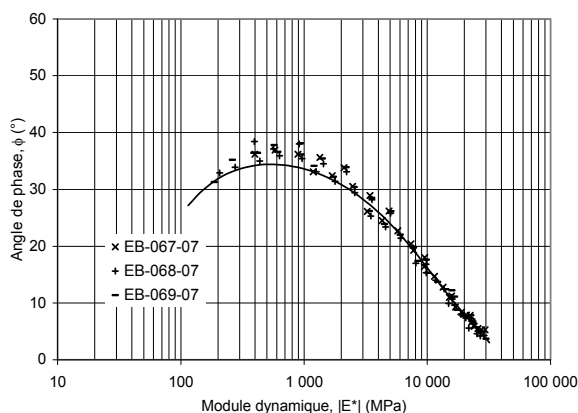
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 3,9%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

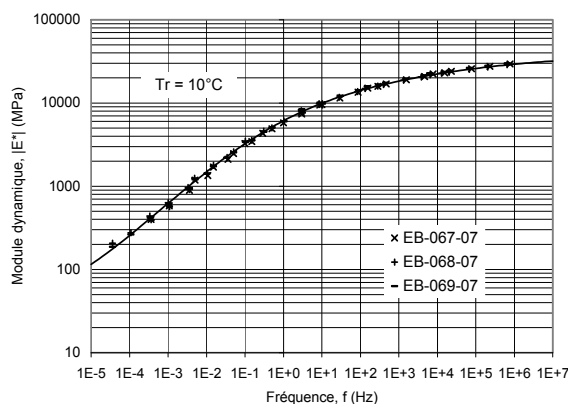
Module complexe dans le plan Cole et Cole



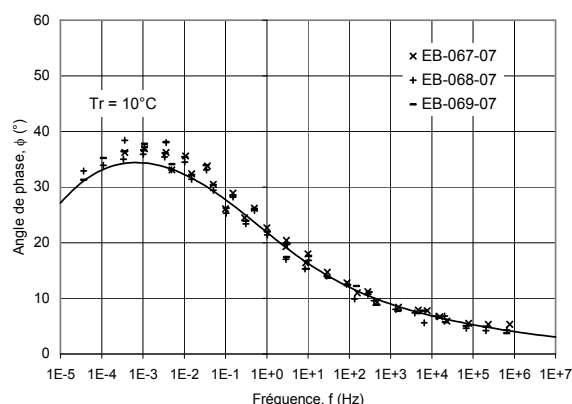
Module complexe dans l'espace de Black



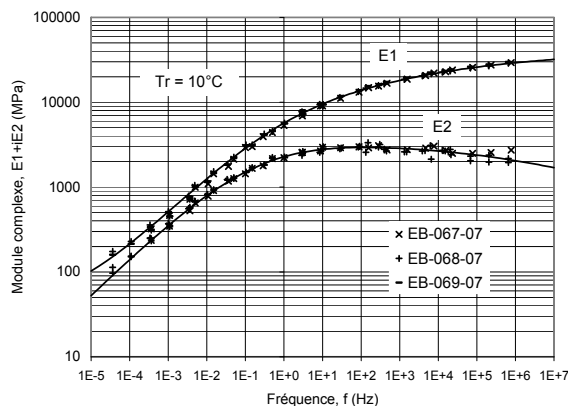
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



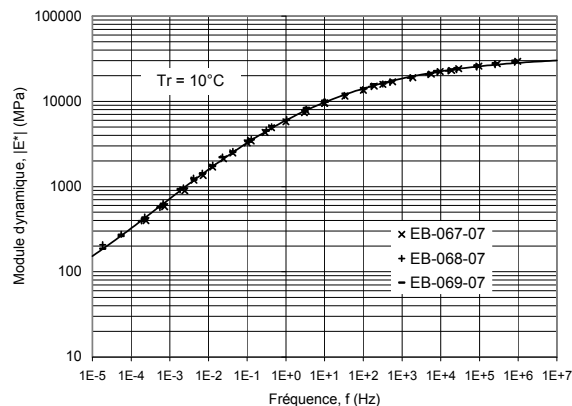
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours



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 (μs)	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 (μs)	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 (μs)	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**

Appendix 2

Complex modulus of asphalt mixes conditioned for four hours

Ministère
des Transports

Québec



MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

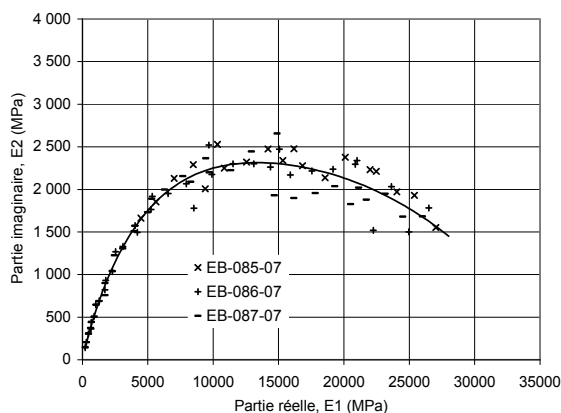
Projet : AM-011-07
Client : Félix Doucet, SMI

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

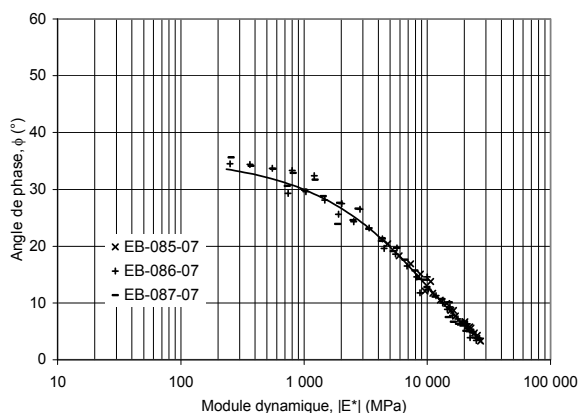
Teneur bitume : 4,3%
Teneur vides : 6,1%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

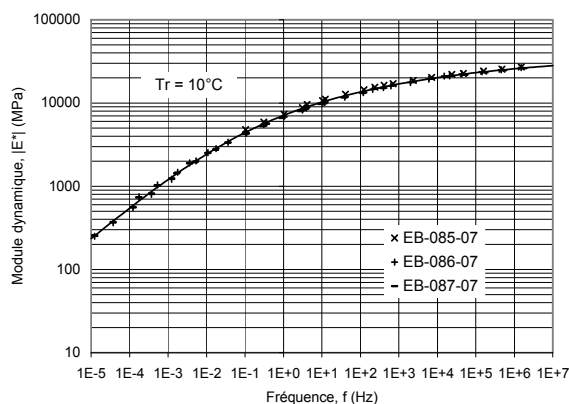
Module complexe dans le plan Cole et Cole



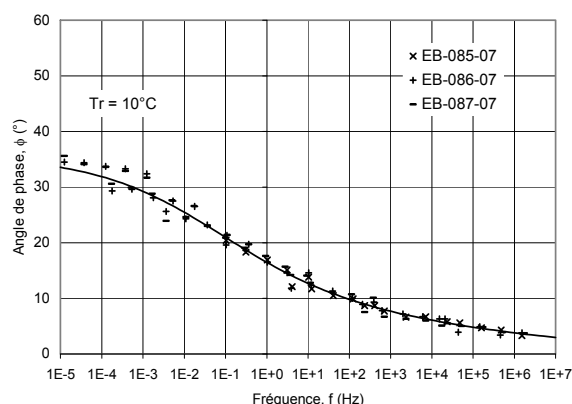
Module complexe dans l'espace de Black



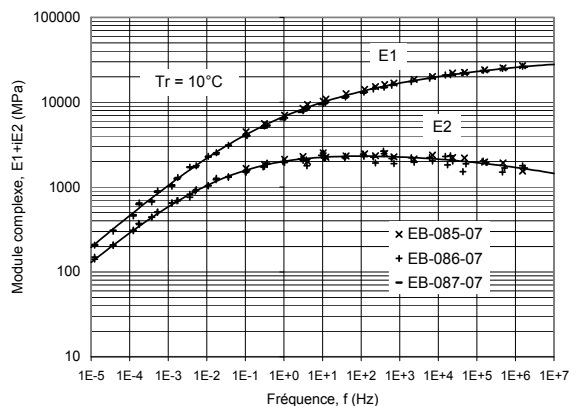
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



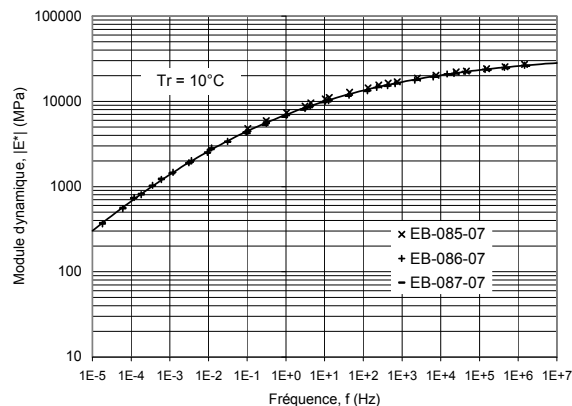
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 3

Complex modulus of asphalt mixes for the repeatability study



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 : 5,5%

Ajout :

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

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

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

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

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)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

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	46,6	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

Appendix 3

Complex modulus of asphalt mixes for the repeatability study

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

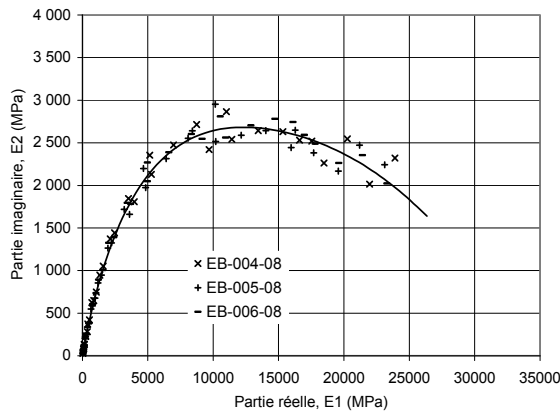
Projet : AM-017-08
Client : Félix Doucet, SMI

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

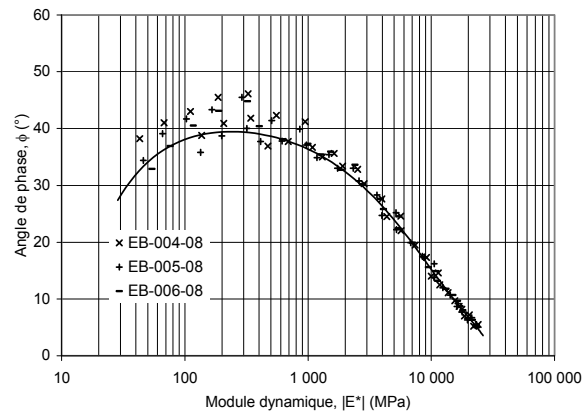
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 5,5%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

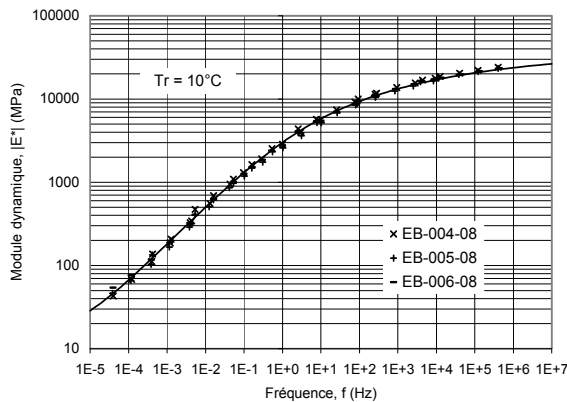
Module complexe dans le plan Cole et Cole



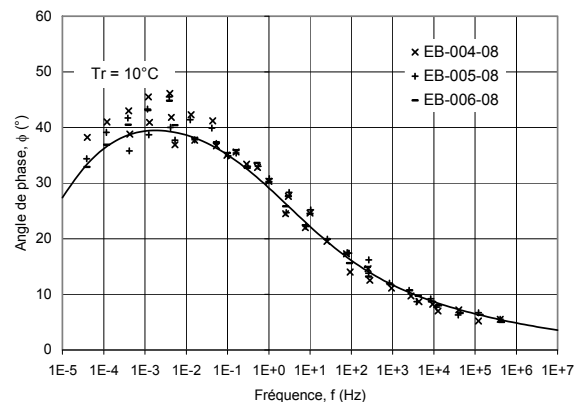
Module complexe dans l'espace de Black



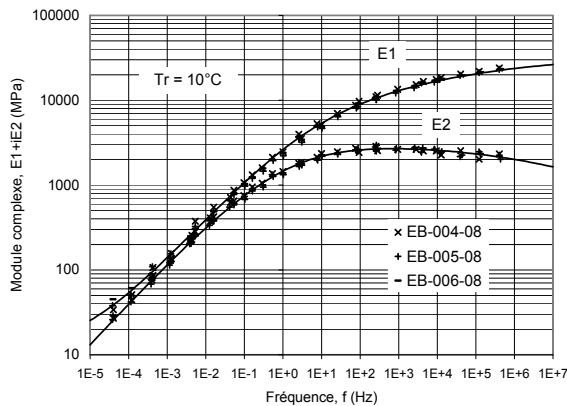
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



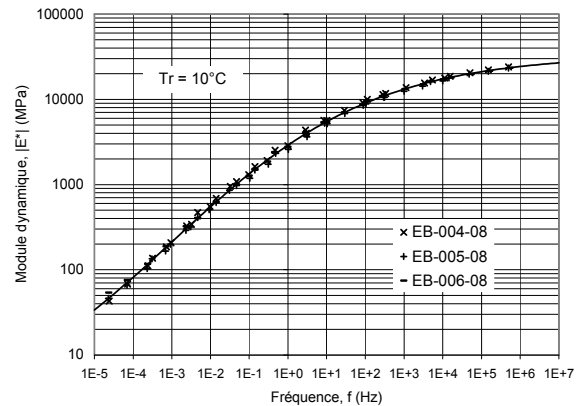
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 3

Complex modulus of asphalt mixes for the repeatability study



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)

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

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

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

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)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

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 (μs)	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 (μs)	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

Appendix 3

Complex modulus of asphalt mixes for the repeatability study

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

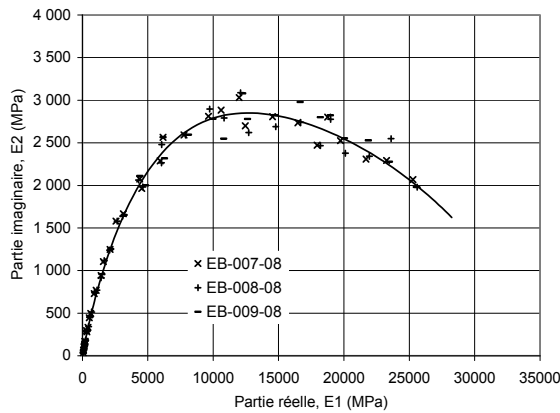
Projet : AM-017-08
Client : Félix Doucet, SMI

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

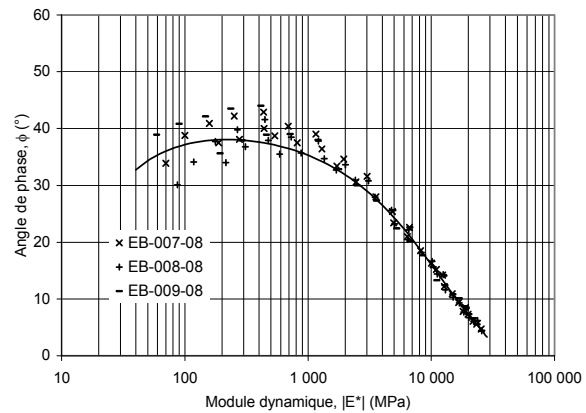
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,5%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

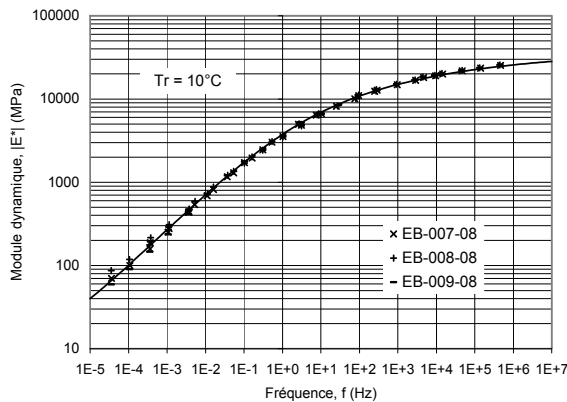
Module complexe dans le plan Cole et Cole



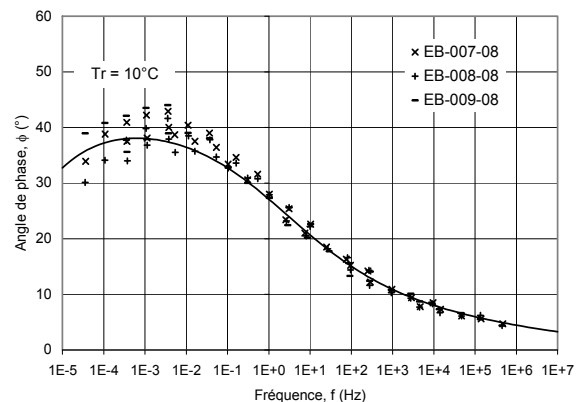
Module complexe dans l'espace de Black



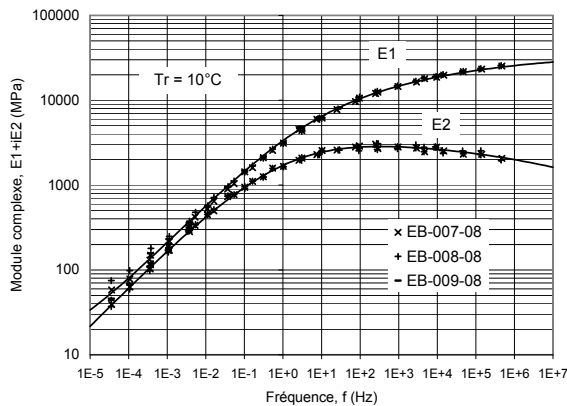
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



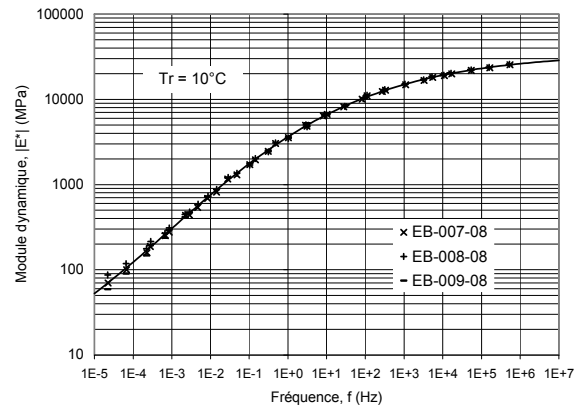
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 3

Complex modulus of asphalt mixes for the repeatability study



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 : 5,6% 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
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 Densité brute : 2,473
Teneur vides : 5,6% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	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 Densité brute : 2,474
Teneur vides : 5,6% Densité max : 2,621

T (°C)	f (Hz)	σ (kPa)	ε (μs)	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 Densité brute : 2,478
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)
-19,9	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

Appendix 3

Complex modulus of asphalt mixes for the repeatability study

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

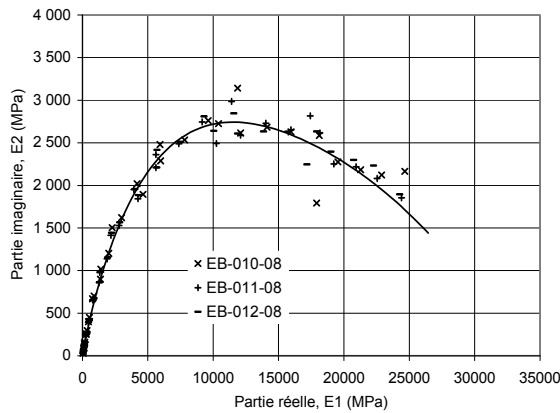
Projet : AM-017-08
Client : Félix Doucet, SMI

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

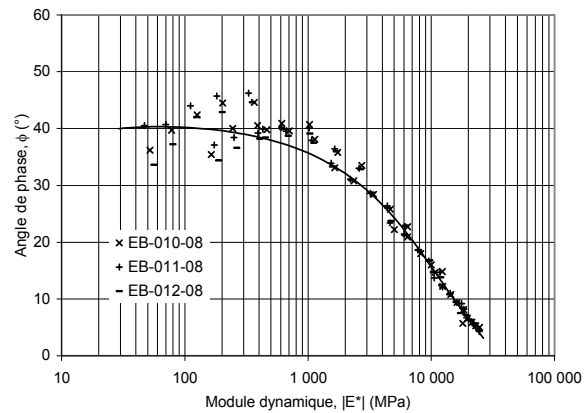
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 5,6%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

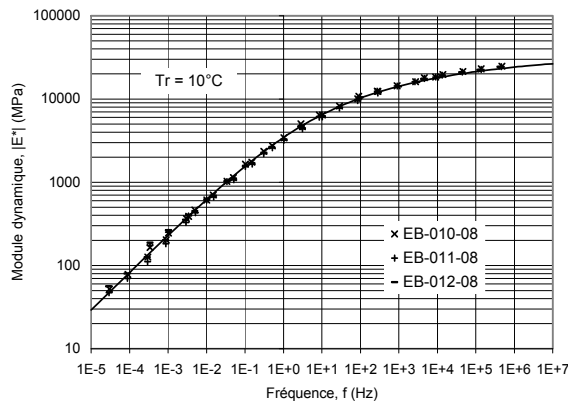
Module complexe dans le plan Cole et Cole



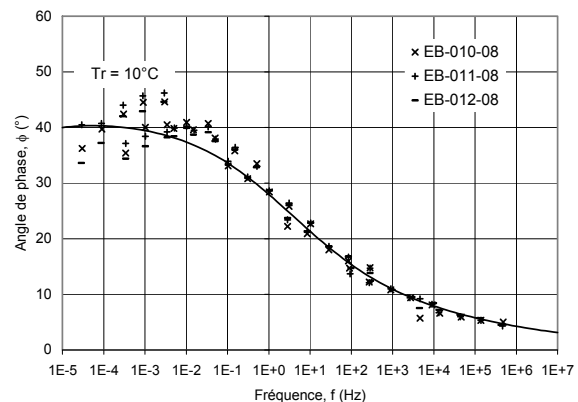
Module complexe dans l'espace de Black



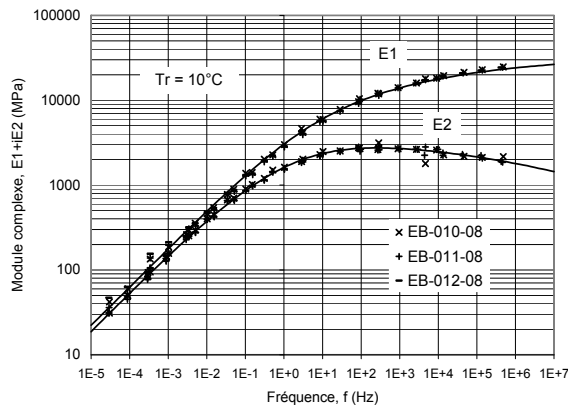
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



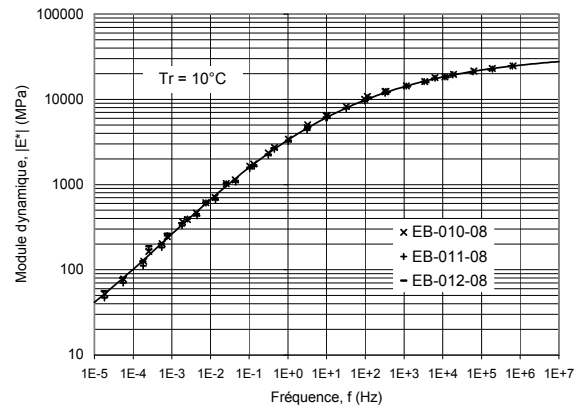
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 3

Complex modulus of asphalt mixes for the repeatability study



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 : 4,1%

Ajout :

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

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

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

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

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 Densité brute : 2,510
Teneur vides : 4,2% 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-015-08 Densité brute : 2,518
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)
-20,1	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

Réalisé par : Bruno Auger, tech. spec.
Date : 31 juillet 2008

Approuvé par : Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Date : 31 juillet 2008

Appendix 3

Complex modulus of asphalt mixes for the repeatability study

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

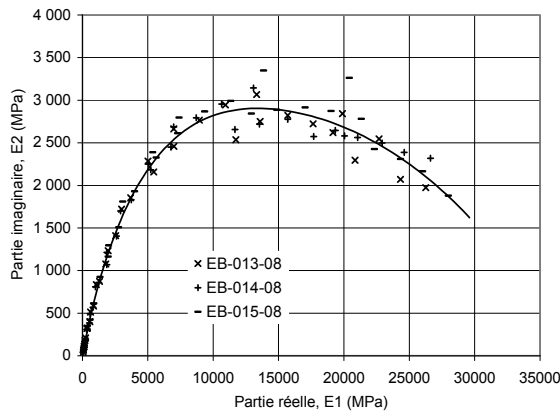
Projet : AM-017-08
Client : Félix Doucet, SMI

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

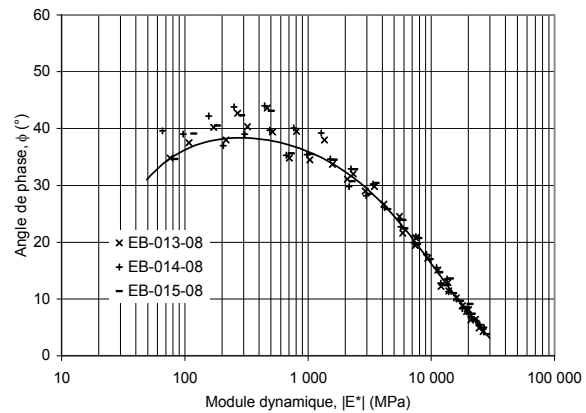
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,1%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

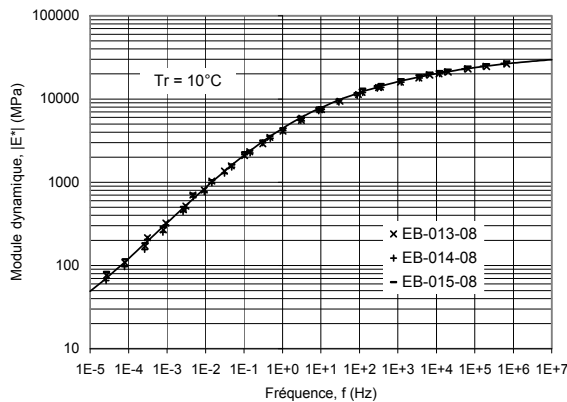
Module complexe dans le plan Cole et Cole



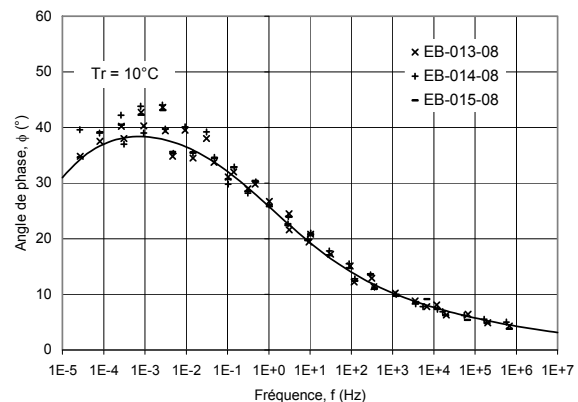
Module complexe dans l'espace de Black



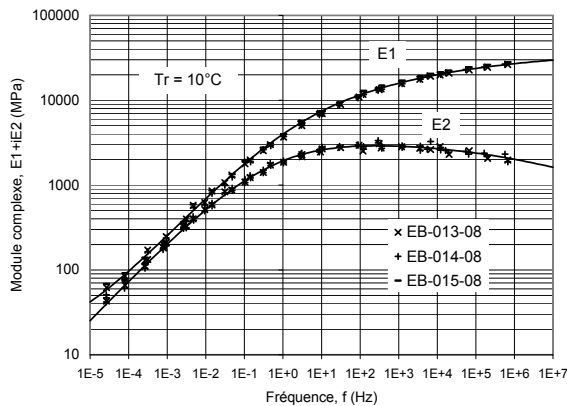
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



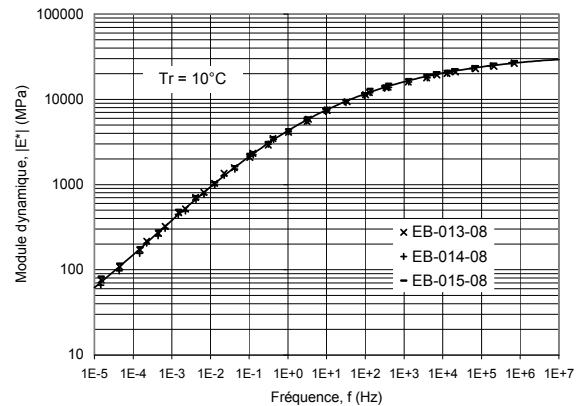
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 3

Complex modulus of asphalt mixes for the repeatability study



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 : **4,6%** 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
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)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

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 (μs)	CV _ε (%)	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-030-08** 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)
-20,0	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	10,7	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**

Approuvé par : **Félix Doucet, ing. M.Sc.A.**
Date : **22 septembre 2008**

Appendix 3

Complex modulus of asphalt mixes for the repeatability study

Ministère
des Transports
Québec

MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

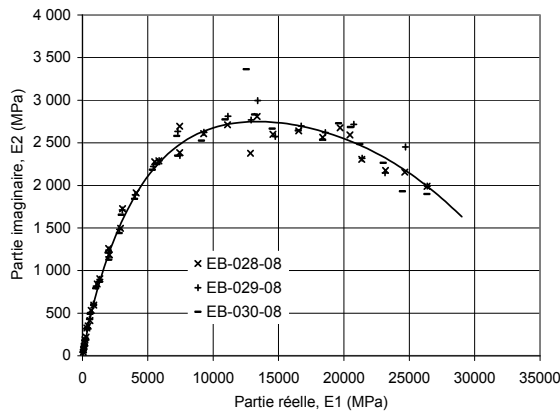
Projet : AM-017-08
Client : Félix Doucet, SMI

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

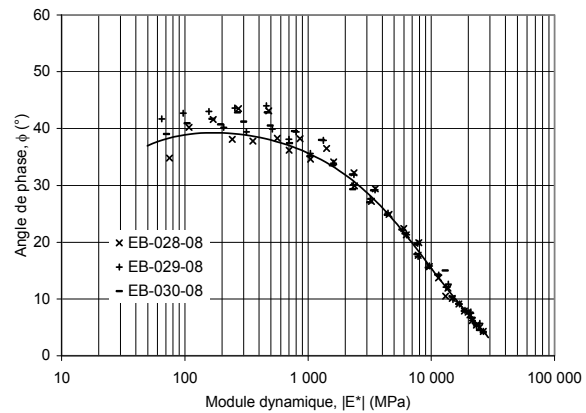
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,6%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

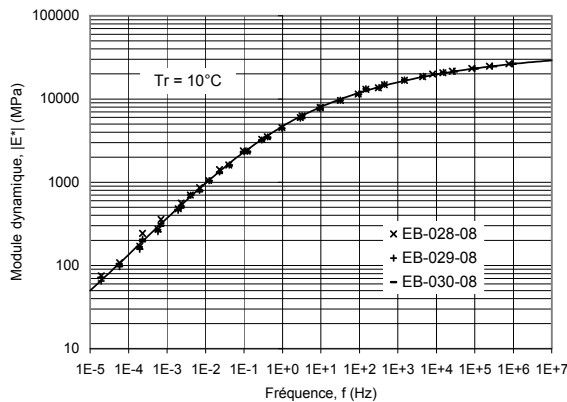
Module complexe dans le plan Cole et Cole



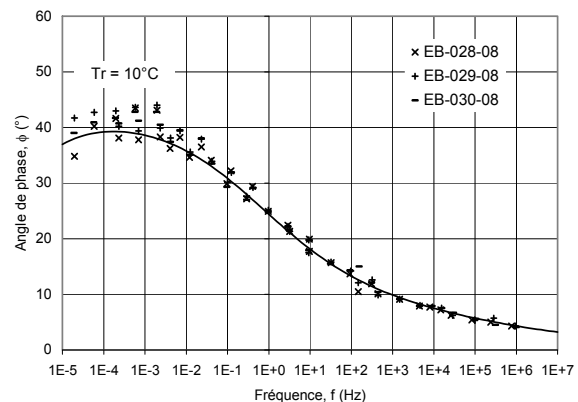
Module complexe dans l'espace de Black



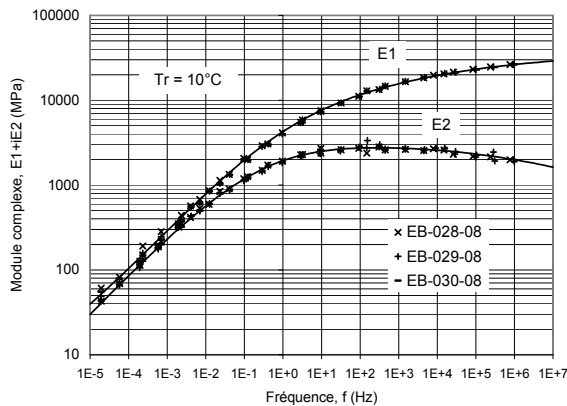
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



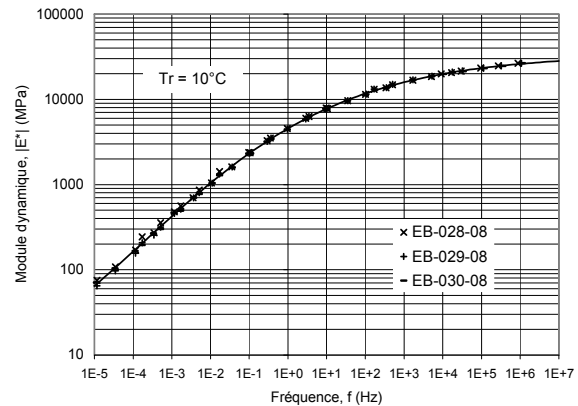
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

Appendix 3

Complex modulus of asphalt mixes for the repeatability study



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)

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

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

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

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)

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

$$f_r = a_T \cdot f$$

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

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

Appendix 3

Complex modulus of asphalt mixes for the repeatability study

Ministère
des Transports
Québec MÉTHODE LC 26-700
MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

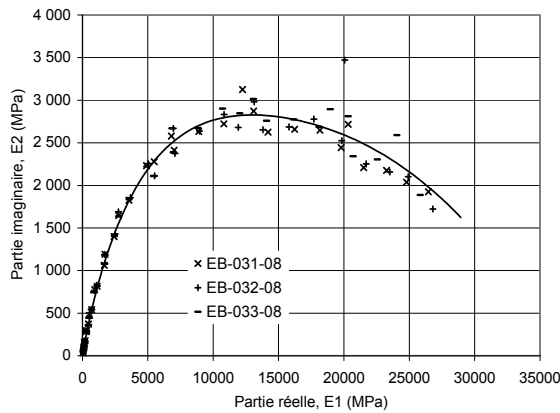
Projet : AM-017-08
Client : Félix Doucet, SMI

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

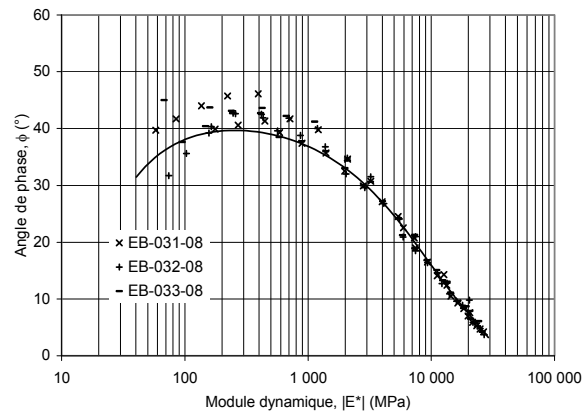
Teneur bitume : 4,8%
Teneur vides : 4,9%

Source enrobé : Laboratoire
Ajout :

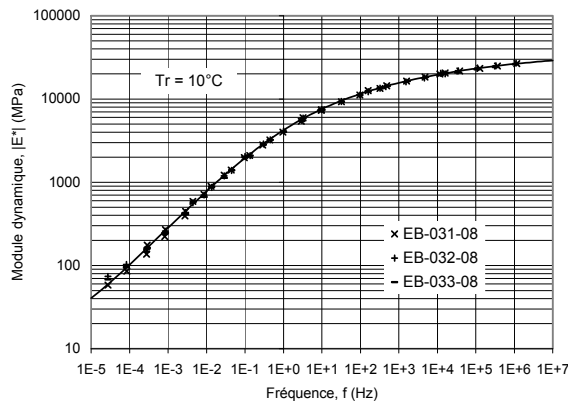
Module complexe dans le plan Cole et Cole



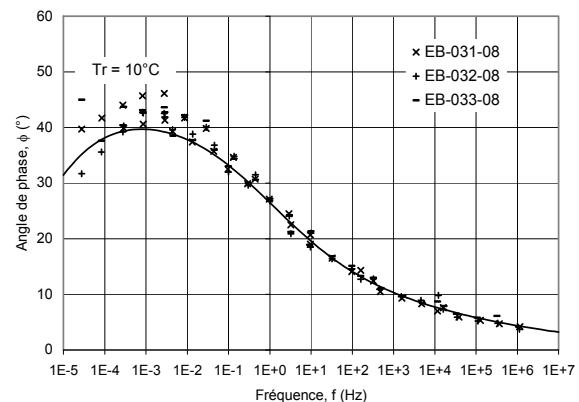
Module complexe dans l'espace de Black



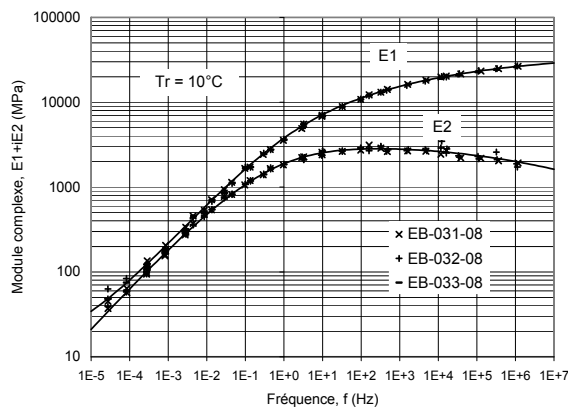
Courbe maîtresse Huet-Sayegh de module dynamique



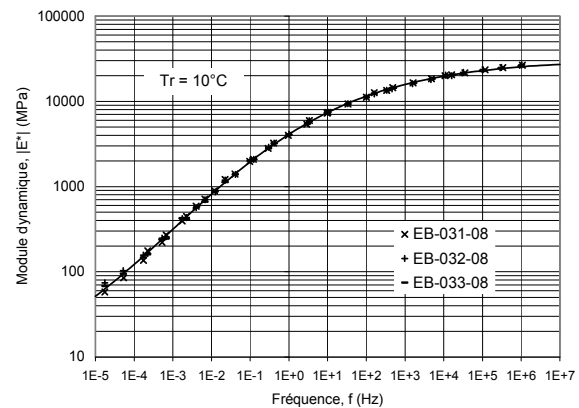
Courbe maîtresse Huet-Sayegh d'angle de phase



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

