Module complexe des enrobés et module réversible des matériaux granulaires pour le dimensionnement mécaniste-empirique des chaussées au Québec

Félix Doucet, ing. M.Sc.A., chargé de projets Maxime Laplante-Boivin, ing. jr., chargé de projets Bruno Auger, technicien spécialiste

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

Communication préparée pour la séance :

Caractérisation des sols et des matériaux de chaussée pour la conception mécaniste-empirique des chaussées

du Congrès de 2014 de l'Association des transports du Canada à Montréal (Québec)

RÉSUMÉ

Le ministère des Transports du Québec a élaboré des méthodes d'essai pour la détermination du module complexe des enrobés et du module réversible des matériaux granulaires. Le MTQ a également créé une banque de données de module complexe pour les enrobés et de module réversible pour les matériaux granulaires à partir des expertises réalisées au cours des sept dernières années. Cette banque de données a pour objectif d'aider les expertises sur les matériaux et le dimensionnement mécaniste-empirique des chaussées au MTQ. Elle pourrait également servir de guide pour optimiser les spécifications sur les enrobés et les matériaux granulaires, ainsi que le dimensionnement des chaussées au Québec.

L'article présente les méthodes d'essais, les valeurs de module complexe et de module réversible typiques obtenues, ainsi que les principales observations concernant les types de matériaux étudiés. La banque compte actuellement 76 enrobés formulés avec différentes granulométries et différents types de bitume, avec certains enrobés contenant des ajouts. La banque inclus également 54 matériaux granulaires de minéralogies et de granulométries différentes, avec certains matériaux granulaires incluant également des ajouts.

INTRODUCTION

Depuis plusieurs décennies, des chercheurs s'affairent à étudier, déterminer et modéliser le comportement mécanique des matériaux de chaussée dans le but d'effectuer le dimensionnement des chaussées selon une approche mécaniste. Le ministère des Transports du Québec (MTQ) désire tirer avantage des approches mécanistes-empiriques de dimensionnement, afin d'optimiser le dimensionnement des chaussées et les spécifications sur les matériaux.

Ainsi, le MTQ a entrepris il y a une dizaine d'années le développement de son expertise dans le domaine de la mécanique des matériaux de chaussées en laboratoire. Un rapport a été publié en 2010 sur la « Détermination du module complexe des enrobés au Ministère des Transports du Québec » (Doucet et Auger, 2010) complétait une première phase de développement. Un deuxième rapport publié en 2014 sur la « Détermination du module réversible des matériaux granulaires au Ministère des Transports du Québec » (Doucet et Auger, 2014 sur la « Détermination du module réversible des matériaux granulaires au Ministère des Transports du Québec » (Doucet et Auger, 2014) complète une deuxième phase du même volet de développement, soit la détermination du module de rigidité des matériaux de chaussées.

La Figure 1 présente le plan de développement des essais en laboratoire pour la détermination du comportement mécanique des matériaux de chaussées souples au MTQ. Le volet 1 sur la détermination du module de rigidité des matériaux de chaussées est donc complété pour le moment. Le volet 2 sur la détermination de la résistance à l'endommagement est présentement en cours, principalement en ce qui concerne la résistance à la fatigue des enrobés (phase 2a) et la résistance à la déformation permanente des matériaux granulaires (phase 2b).



MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX DE CHAUSSÉES SOUPLES

Figure 1 – Plan de développement du MTQ pour la détermination du comportement mécanique des matériaux de chaussées souples en laboratoire

Cet article résume la méthodologie utilisée au MTQ pour la détermination du module complexe des enrobés et du module réversible des matériaux granulaires. Il présente également les valeurs types d'une banque de données élaborée pour la réalisation à l'interne des expertises sur les matériaux et du dimensionnement mécaniste-empirique des chaussées. La banque de données contient actuellement 76 enrobés et 54 matériaux granulaires différents représentatifs de l'état de la pratique, sélectionnés parmi l'ensemble des matériaux caractérisés au cours des sept dernières années. Ces données pourraient éventuellement servir à optimiser les spécifications sur les enrobés et les matériaux granulaires, ainsi que le dimensionnement des chaussées selon une approche mécaniste-empirique au MTQ.

MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS

Module complexe

Le module complexe (E*) décrit la rigidité d'un matériau viscoélastique sous chargement cyclique, tel que les enrobés (Di Benedetto et coll, 2005). Le comportement mécanique d'un matériau viscoélastique dépend du temps de chargement (fréquence) et sa réaction est différée dans le temps (déphasage), contrairement à un matériau élastique dont la réaction est instantanée. L'enrobé est également un matériau thermosensible dont le comportement mécanique est fortement dépendant de la température.

La Figure 2 montre un cycle de sollicitation sinusoïdal en traction-compression sur une éprouvette d'enrobé. Lorsque la contrainte est divisée par la déformation pour déterminer le E^{*} du matériau à l'Équation 1, le retard de la déformation sur la contrainte introduit un déphasage qui s'exprime alors sous forme de nombre complexe (z=x+iy). Le E^{*} peut être divisé en deux composantes : le module dynamique ($|E^*|$) à l'Équation 2, qui est le rapport entre la contrainte totale et la déformation totale sans considérer le déphasage, et l'angle de phase (ϕ) à l'Équation 3, qui est le décalage dans le temps entre la contrainte et la déformation.



Figure 2 – Sollicitation sinusoïdale en traction-compression sur un enrobé

Équation 1 : $E^* = E_1 + iE_2 = \frac{\sigma \sin(\omega t)}{\varepsilon \sin(\omega t - \phi)}$

Équation 2 : $|E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

Équation 3 : $\phi = \omega t_{lag}$

où $E^* = module complexe (MPa),$ $|E^*| = module dynamique (MPa),$ $\phi = angle de phase (rad),$ $E_1 = partie réelle du module complexe [|E^*| cos \phi] (MPa),$ $E_2 = partie imaginaire du module complexe [|E^*| sin \phi] (MPa),$ $\sigma = contrainte (MPa),$ $\epsilon = déformation (m/m),$ $\omega = période (rad/s),$ t = temps de chargement (s), $t_{lag} = temps de déphasage entre <math>\sigma$ et ϵ (s).

Le $|E^*|$ est l'intensité du E^* qui peut être utilisé comme module élastique pour le dimensionnement des chaussées à l'aide d'un logiciel multicouche élastique. Le $|E^*|$ d'un enrobé varie généralement de 300 MPa à 30 000 MPa en fonction de la fréquence et de la température, soit par un facteur 100 pour les conditions d'utilisation d'une chaussée. Le ϕ d'un enrobé varie environ de 5° à basse température (fréquence rapide), à 45° à haute température (fréquence lente). À titre comparatif, il serait de 0° pour un matériau élastique et de 90° pour un matériau purement visqueux.

Méthode d'essai LC 26-700

Le MTQ a conçu la méthode d'essai LC 26-700 pour la « Détermination du module complexe des enrobés » à l'aide d'un essai de traction-compression directe sur une éprouvette cylindrique d'enrobé montré à la Figure 3. Les éprouvettes de 75 mm de diamètre sur 150 mm de hauteur sont obtenues par carottage horizontal dans une plaque d'enrobé de 100 mm d'épaisseur préparée à l'aide d'un compacteur de plaque à pneu roulant. Les enrobés sont malaxés en laboratoire et conditionnés 4 heures à l'étuve avant leur compactage, afin de reproduire la production en centrale, le transport et la mise en œuvre de l'enrobé. L'éprouvette est fixée aux ancrages de chargement sans créer de contrainte ou de déformation. La déformation axiale est mesurée par trois extensomètres installés à 120° à l'aide d'aimants sur des plots en acier collés sur l'éprouvette. Deux capteurs de températures sont collés à la surface de l'éprouvette.



Figure 3 – Photo de l'essai de traction-compression directe pour les enrobés

La méthode d'essai LC 26-700 est basée sur les méthodes décrites dans la norme AASHTO TP 62-07 « Standard Test Method for Determining the Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt » et la norme NF EN 12697–26 « Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélanges hydrocarbonés à chaud – Partie 26 : Module de rigidité ». Ainsi, le E* est déterminé à différentes fréquences (0,1 à 10 Hz) et températures (-20 à 40 °C), sous chargement cyclique à petite déformation (50 μ E), afin de déterminer le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé. Le Ministère a sélectionné l'essai de traction-compression directe pour sa distribution homogène du chargement à l'intérieur de l'éprouvette, ce qui permet une détermination directe des contraintes et des déformations dans l'axe de chargement. Le chargement est appliqué de façon uniaxiale en traction et compression alternée, ce qui permet de conserver une hauteur d'éprouvette constante au cours de l'essai.

Modélisation du module complexe

Les résultats de E^{*} peuvent être représentés dans le plan complexe de Cole et Cole ou dans l'espace de Black (Doucet et Auger, 2010). La Figure 4 montre les résultats de E^{*} d'un enrobé déterminés à différentes fréquences et températures dans le plan complexe de Cole et Cole, où la partie imaginaire du module complexe (E₂) est représentée en fonction de la partie réelle (E₁). La Figure 5 montre les mêmes résultats de E^{*} dans l'espace de Black, où ϕ est fonction du logarithme de |E^{*}|. Le |E^{*}| et le ϕ de l'enrobé sont illustrés sous forme polaire pour une température et une fréquence donnée dans le plan de Cole et Cole. L'espace de Black permet de visualiser le |E^{*}| et le ϕ maximum de l'enrobé.



Figure 4 – Module complexe d'un enrobé dans le plan de Cole et Cole



Figure 5 – Module complexe d'un enrobé dans l'espace de Black

Le E^{*} de l'enrobé est représenté à l'aide du modèle analogique de Huet-Sayegh présenté à l'Équation 4 (Huet, 1963, Sayegh, 1965). Les coefficients de régression du modèle sont associés à des comportements mécaniques simples tels que des ressorts (E₀, E_∞) et des amortisseurs paraboliques (k, h). Le modèle est fonction de la pulsation (ω) (fréquence) et du temps caractéristique (τ) qui est ajusté pour une température de référence selon le principe d'équivalence temps-température présenté à l'Équation 5. Le MTQ utilise la relation quadratique indiquée à l'Équation 6 pour décrire la relation entre le log a_T et la température.

Équation 4 :
$$E^* = E_o + \frac{E_{\infty} - E_o}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$$

Équation 5 : $\tau = a_T \cdot \tau_o \iff \log \tau = \log \tau_o + \log a_T$

Équation 6: $\log a_T = a_1 (T - T_r) + a_2 (T - T_r)^2$

où $E^* = module complexe (MPa),$ $\tau = temps caractéristique (s),$ $a_T = facteur de translation (MPa),$ $i = nombre imaginaire (\sqrt{-1}),$ $\omega = pulsation (2\pi f) (rad/s),$ T = température (°C), $T_r = température de référence (10°C),$ $E_o, E_{\infty}, \delta, k, h, \tau_o, a_1, a_2 = coefficients de régression.$

Le E^{*} de l'enrobé est déterminé par balayage de fréquence à différentes températures. Selon le principe d'équivalence temps-température applicable aux matériaux thermo-rhéologiquement simples, la même valeur de $|E^*|$ peut être obtenue avec différents couples de fréquence et de température. Ainsi, les valeurs obtenues à différentes températures peuvent être transposées par translation à une température de référence en déterminant la fréquence équivalente pour obtenir la même valeur de $|E^*|$ à cette température, comme le montre la Figure 6. La courbe unique obtenue à la température de référence est dénommée courbe maîtresse.

La courbe maîtresse de $|E^*|$ est modélisée en fonction de la fréquence réduite (f_r) selon le modèle de Witczak (Witczak et Fonseca,1996) présenté à l'Équation 7. La f_r est déterminée à l'Équation 8 par le facteur de translation (a_T) qui est fonction de la température à l'Équation 9. Ainsi, la valeur $|E^*|$ de l'enrobé peut être prédite pour différentes fréquences et températures à partir des paramètres de régression (δ , α , β , γ , a_1 , a_2) déterminés par les essais de laboratoire.



Figure 6 – Construction de la courbe maîtresse de module dynamique d'un enrobé à 10 °C

Équation 7 : $\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \gamma \log f_r)}}$ Équation 8 : $f_r = a_T \cdot f \iff \log f_r = \log f + \log a_T$ Équation 9 : $\log a_T = a_1 (T - T_r) + a_2 (T - T_r)^2$ où $|E^*| = \text{module dynamique (MPa)},$ $f_r = \text{fréquence réduite (Hz)},$ f = fréquence (Hz), $a_T = \text{facteur de translation (Hz)},$ T = température (°C), $T_r = \text{température de référence (10 °C)},$ $\delta, \alpha, \beta, \gamma, a_1, a_2 = \text{coefficients de régression}$

Banque de module complexe

Une banque de données de module complexe a été élaborée à partir des enrobés les plus représentatifs de la pratique caractérisés au cours des sept dernières années. La banque compte actuellement 76 enrobés formulés avec différentes granulométries et différents types de bitume. Certains enrobés contiennent des ajouts, tel que des granulats bitumineux récupérés (GBR), des fibres, des additifs tièdes ou de haute résistance au désenrobage (HRD), et des bardeaux d'asphalte. Trois modes de fabrication différents des enrobés ont été utilisés.

Le Tableau 1 présente la moyenne (µ), l'écart type (σ), le coefficient de variation (CV) et le nombre d'enrobés analysés (n) pour différentes propriétés physiques et mécaniques des enrobés de la banque de module complexe. Les propriétés physiques présentées sont la teneur en bitume (T_b), la densité maximale (D_{max}) et la teneur en vides. Les propriétés mécaniques présentées pour une température de 10°C et une fréquence de 10 Hz sont le |E^{*}| déterminé à l'aide du modèle de Witczak, ainsi que le ϕ , le E₁ et le E₂ déterminés avec le modèle de Huet-Sayegh.

Dropriótó	Moyenne	Écart type	Coef. var.	Nombre
Fiophete	(µ)	(σ)	(CV)	(n)
Propriétés	physiques			
Teneur en bitume, T _b	5,1%	0,5%	9%	63
Densité maximal, D _{max}	2,55	0,08	3%	75
Teneur en vides	3,8%	1,0%	27%	75
Propriétés mécani	ques [10 °C	C, 10 Hz]		
Module dynamique, E* (MPa)	7 980	1 780	22%	76
Angle de phase, Φ (°)	17,6	3,6	20%	75
Module complexe réel, E1 (MPa)	7 840	1 770	23%	75
Module complexe imaginaire, E2 (MPa)	2 410	360	15%	75

Tableau 1 - Statistiques des propriétés physiques et mécaniques des enrobés de la banque de module complexe

La teneur en bitume moyenne de la banque de module complexe est de 5,1% avec un écart type faible de 0,5% indiqué par le CV de 9%, la densité maximale moyenne est de 2,55 avec un écart type faible de 0,08 indiqué par le CV de 3% et la teneur en vides moyenne est de 3,8% avec un écart type élevé de 1,0% indiqué par le CV de 27%. La teneur en vides des éprouvettes d'enrobé est donc significativement moins élevée que la teneur en vides maximale de 7% exigée au Québec, puisque les éprouvettes correspondent au cœur de l'enrobé compacté.

La valeur moyenne de $|E^*|$ de 7 980 MPa à 10°C et 10Hz avec un écart type de 1 780 MPa représente l'étendu des valeurs de $|E^*|$ des enrobés au Québec, indépendamment de la formulation de l'enrobé et des ajouts présents. La valeur moyenne de ϕ est de 17,6° avec un écart type de 3,6° et les valeurs moyennes de E₁ et de E₂ sont respectivement de 7 840 et 2 410 MPa avec des écarts type de 1770 et 360 MPa, ce qui représente des variations similaires selon leur CV.

Le Tableau 2 présente les données statistiques (μ , σ , CV, n) du |E^{*}| à 10 °C et 10 Hz en fonction du diamètre nominal maximal des granulats, du type de bitume, du mode de fabrication des enrobés et du type d'ajout. Le diamètre nominal maximal des enrobés de la banque de module complexe est de 10, 14 ou 20 mm (Norme 4202). Les types de bitume sont de PG 58-28, PG 58-34, PG 64-28, PG 64-34 ou PG 70-28 (Norme 4101). Les modes de fabrication des enrobés sont: malaxés en laboratoire, échantillonnés dans des boîtes ou carottés sur la route. Les types d'ajouts sont des granulats bitumineux récupérés (GBR) (minimum 15%), des fibres (synthétiques, minérales, cellulose), des additifs pour enrobés tièdes, des additifs pour haute résistance au désenrobage (HRD) ou des bardeaux d'asphalte.

Enrobé	Teneur en	Teneur en	Module	Module dynamique ¹ , E*		
Emobe	bitume	vides	μ	σ	CV	n
	Diamètre norr	ninal maxima	nl			
10 mm	5,3%	3,7%	7 500	1 540	21%	51
14 mm	4,8%	4,1%	9 390	1 820	19%	7
20 mm	4,4%	4,0%	9 300	1 930	21%	10
	Type de	bitume				
PG 58-28	5,1%	4,3%	10 470	1 660	16%	4
PG 58-34	5,0%	3,3%	7 390	1 520	21%	23
PG 64-28	4,7%	4,2%	10 420	880	8%	5
PG 64-34	5,3%	3,9%	7 300	1 270	17%	31
PG 70-28	5,0%	4,0%	10 240	660	6%	5
	Mode de fa	abrication				
Laboratoire	5,0%	3,8%	8 640	1 630	19%	39
Boîte	5,4%	3,5%	7 320	1 450	20%	26
Carotte	5,1%	4,6%	7 190	2 180	30%	11
Type d'ajout						
Granulats bitumineux récupérés	5,0%	2,7%	9 280	1 190	13%	11
Fibres	5,5%	3,3%	7 520	550	7%	10
Tiède	5,3%	3,3%	6 480	970	15%	8
Haute résistance au désenrobage	4,9%	3,3%	7 900	1 290	16%	5
Bardeaux d'asphalte	5,9%	4,0%	7 670	670	9%	4

Tableau 2 – Module dynamique des enrobés selon leur grosseur nominale maximale, le type de bitume, le mode de fabrication et le type d'ajout

¹ Module dynamique à 10 °C et 10 Hz

Le $|E^*|$ moyen des enrobés 10 mm (7 500 MPa) est beaucoup plus faible que celui des enrobés 14 mm (9 390 MPa) et 20 mm (9 300 MPa). Le nombre d'enrobé 10 mm (51) est largement plus élevé que le nombre d'enrobés 14 mm (7) et 20 mm (10), ce qui donne une moyenne générale (Tableau 1) plus près des enrobés 10 mm (7 980 MPa). De même, le $|E^*|$ moyen des enrobés avec un bitume PG H-34 (7 390 et 7 300 MPa) est plus beaucoup plus faibles et le nombre d'enrobé beaucoup plus élevé (23 et 31), que les enrobés avec un bitume PG H-28 (10 470, 10 420 et 10 240 MPa) dont le nombre d'enrobé est faible (4, 5 et 5). Les enrobés malaxés en laboratoire présentent un $|E^*|$ moyen plus élevé (8 640 MPa) que les enrobés échantillonnés dans des boîtes (7 320 MPa) et carottés sur la route (7 190 MPa), puisque les enrobés 14 et 20 mm ont tous été malaxés en laboratoire. Les enrobés carottés sur la route présente un $|E^*|$ moyen plus faible (7 190 MPa) puisque leur teneur en vides est plus élevée (4,6%), ce qui a généralement pour effet de diminuer la valeur de $|E^*|$ (Doucet et Auger, 2010).

Concernant les types d'ajout, les enrobés contenant des GBR ont un $|E^*|$ moyen très élevé (9 280 MPa) considérant que ces enrobés contenus dans la banque sont des 10 mm (7 500 MPa). Les enrobés tièdes ont un $|E^*|$ moyen faible (6 480 MPa) bien que ces enrobés sont des 10 mm échantillonnés dans des boîtes (7 320 MPa). Les enrobés avec bitume HRD ont également un $|E^*|$ moyen faible (7 520 MPa) considérant que ces enrobés sont principalement des enrobés 20 mm malaxés en laboratoire (9 300 MPa). Le $|E^*|$ moyen des enrobés 10 mm avec fibres (7 520 MPa) et avec bardeaux d'asphalte (7 670 MPa), correspondent au $|E^*|$ moyen des enrobés 10 mm (7 500 MPa). Par ailleurs, il est reconnu que l'ajout de bardeaux d'asphalte augmente le $|E^*|$ de l'enrobé, ce qui montre les limites d'utilisation de la banque.

MODULE RÉVERSIBLE DES MATÉRIAUX GRANULAIRES

Module réversible

Le comportement mécanique à petites déformations ($\epsilon < 0,1$ %) des matériaux granulaires est élastoplastique non-linéaire (Lekarp et coll, 2000). Lors du déchargement d'un matériau élastoplastique, la majorité de la déformation est réversible (déformation élastique), mais une déformation permanente peut subsister dans le matériau (déformation plastique). Le rapport entre la contrainte et la déformation est une constante dans le domaine linéaire, mais varie en fonction de l'état de contrainte (ou de déformation) dans le domaine non-linéaire. La Figure 7 schématise le chargement et le déchargement d'un matériau granulaire. La définition du module de Young linéaire (E) et non-linéaire (E_{nl}) sont représentés, ainsi que le module réversible (E_r) qui est le rapport entre la contrainte déviatorique (σ_d) appliquée et la déformation réversible (ϵ_r) obtenue.



Figure 7 – Module de Young linéaire, non-linéaire et réversible lors du chargement répété d'un matériau granulaire

La Figure 8 montre l'application d'une contrainte déviatorique répétée ($\Delta \sigma_d$) sur un matériau granulaire et la déformation réversible axiale (ϵ_{1r}) et radiale (ϵ_{3r}) mesurées. Une contrainte au repos (σ_{do}) est maintenue en tout temps afin de conserver un bon contact de chargement avec l'éprouvette. Le chargement répété est de la forme de la moitié d'un sinus verse en compression (σ (1-cos(ω t))/2).

En posant l'hypothèse que le matériau est homogène isotrope, les lois d'élasticité sont simplement définies en trois dimensions par le module de Young (E) et le coefficient de Poisson (v). Le module de Young réversible (E_r) et le coefficient de Poisson réversible (v_r) sont généralement utilisés comme paramètres élastiques pour le dimensionnement des chaussées. Lors de chargements répétés avec un confinement constant ($\Delta\sigma_3=0$), le E_r est le ratio entre la contrainte déviatorique répétée ($\Delta\sigma_d$) et la déformation axiale réversible (ϵ_{1r}) présenté à l'Équation 10. Le v_r est le ratio entre la déformation radiale réversible (ϵ_{3r}) et ϵ_{1r} présenté à l'Équation 11.



Figure 8 – Contrainte déviatorique répétée et déformation axiale et radiale réversible lors du chargement répété d'un matériau granulaire (LC 22-400)

Équation 10 :
$$E_r = \frac{\Delta \sigma_d}{\varepsilon_{1r}}$$

Équation 11 :
$$v_r = -\frac{\mathcal{E}_{3r}}{\mathcal{E}_{1r}}$$

où

 $\begin{array}{ll} {\sf E}_r & : \mbox{ module de Young réversible (kPa),} \\ \nu_r & : \mbox{ coefficient de Poisson réversible,} \\ \Delta \sigma_d & : \mbox{ contrainte déviatorique répétée } (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \mbox{ (kPa),} \\ \epsilon_{1r} & : \mbox{ déformation axiale réversible (m/m),} \\ \epsilon_{3r} & : \mbox{ déformation radiale réversible (m/m).} \end{array}$

Par ailleurs, lorsque que la contrainte de confinement est variable ($\Delta\sigma_3 \neq 0$), il est plus simple de séparer le comportement volumique du comportement en cisaillement pour l'analyse en déterminant le module volumique réversible (K_r) et le module de cisaillement réversible (G_r). Le K_r est le ratio entre la contrainte moyenne répétée (Δp) et la déformation volumique réversible (ϵ_{vr}) présenté à l'Équation 12, alors que le G_r est le ratio entre la contrainte de cisaillement réversible (ϵ_{sr}) présenté à l'Équation 12.

Équation 12 : $K_r = \frac{\Delta p}{\mathcal{E}_{vr}}$

Équation 13 : $G_r = \frac{\Delta q}{3\varepsilon_{rr}}$

où	K _r	: module volumique réversible (kPa),
	Gr	: module de cisaillement réversible (kPa),
	Δp	: contrainte moyenne répétée ($\Delta\sigma_1+2\Delta\sigma_3$)/3 (kPa),
	Δq	: contrainte de cisaillement répétée ($\Delta\sigma_1$ - $\Delta\sigma_3$) (kPa),
	ϵ_{vr}	: déformation volumique réversible (ϵ_{1r} + $2\epsilon_{3r}$) (m/m),
	ϵ_{sr}	: déformation de cisaillement réversible ((2/3)(ϵ_{1r} - ϵ_{3r})) (m/m).

Méthode d'essai LC 22-400

Le MTQ a élaboré la méthode d'essai LC 22-400 pour la « Détermination du module réversible des matériaux granulaires » à l'aide d'un équipement triaxial à chargement répété avec pression de confinement constante montré à la Figure 9. Une éprouvette de matériau granulaire de 150 mm de diamètre sur 300 mm de hauteur est compactée à l'aide d'un marteau vibrant en sept couches uniformes, à une teneur en eau de 2% supérieure à l'absorption du matériau. Le chargement répété est mesuré à l'aide d'une cellule de charge. La déformation axiale réversible (ϵ 1r) est mesurée à l'aide de deux capteurs de déplacement axiaux installés sur l'éprouvette et la déformation radiale réversible (ϵ 3r) est mesurée à l'aide d'un capteur de déplacement radial ceinturant l'éprouvette.

La méthode d'essai LC 22-400 est basée sur les méthodes décrites dans la norme AASHTO T307 « Standard Test Method for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials » et la norme NF EN 13286–7 « Mélanges avec et sans liant hydraulique – Méthodes d'essai – Partie 7 : Essai triaxial sous charge cyclique pour mélanges sans liant hydraulique ». Ainsi, le module réversible de l'éprouvette est déterminé à 15 états de contrainte, soit trois σ_d pour cinq σ_3 différents afin de modéliser le comportement non linéaire. Le module réversible est également déterminé à 3 teneurs en eau, soit la teneur en eau initiale de compactage (ω_{ini}), la teneur en eau lorsque le centre de l'éprouvette est saturé (ω_{sat}) et la teneur en eau lorsque l'éprouvette est daturation (ω_{dr}), afin d'évaluer l'influence du degré de saturation. Le E_r , v_r , K_r et G_r sont déterminés simultanément.



Figure 9 – Photo de l'essai triaxial à chargements répétés pour les matériaux granulaires

Modélisation du module réversible

L'état de contrainte est le paramètre le plus influant sur le comportement réversible des matériaux granulaires. Le E_r des matériaux granulaires est généralement représenté en fonction de la contrainte totale (θ), qui est la somme des contraintes appliquées. La Figure 10 montre les résultats de E_r obtenus pour un matériau granulaire à 15 états de contraintes avec une pression de confinement constante en fonction de θ . La droite montre bien que le E_r est fonction de la θ .

La Figure 11 montre les résultats de K_r et G_r obtenus lors des essais sur une éprouvette comparativement aux valeurs de E_r. Les valeurs de K_r et G_r sont un peu plus faibles, mais elles suivent la même tendance que le E_r lorsque la pression de confinement est constante. Le v_r varie aussi en fonction de l'état de contrainte, mais il est généralement considéré constant pour le dimensionnement des chaussées.



Figure 10 – Module de Young réversible d'un matériau granulaires à différents états de contrainte totale



Figure 11 – Module de Young, volumique et de cisaillement réversible d'un matériau granulaire à différents états de contrainte totale

Le E_r d'un matériau granulaire est représenté en fonction de l'état de contrainte selon le modèle de Uzan (1985) présentée à l'Équation 14. Ce modèle de puissance est fonction de la contrainte totale (θ) et de la contrainte de cisaillement octahédrique (τ_{oct}).

Équation 14 :
$$E_r = k_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{k_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{k_3}$$

où	Er	: module de Young réversible (Mpa),
	θ	: contrainte totale (σ_d +3 σ_3) (kPa),
	$ au_{oct}$: contrainte de cisaillement octaédrique (($\sqrt{2/3})\sigma_d$) (kPa),
	pa	: pression de normalisation (100 kPa),
	k_1, k_2, k_3	: paramètres de régression.

Le modèle de Boyce (1980) est utilisé par le MTQ pour modéliser la non-linéarité du K_r et G_r des matériaux granulaire (Doucet et Auger, 2014). Ce modèle représente bien les essais triaxiaux à chargements répétés avec confinement variable, mais il est difficile à appliquer aux essais avec confinement constant. Ainsi, les résultats de K_r et G_r sont représentés à l'aide du modèle proposé par Uzan pour cet article, tel que présenté à l'Équation 15 et à l'Équation 16.

Équation 15:
$$K_r = K_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{K_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{K_3}$$

Équation 16: $G_r = G_1 p_a \left(\frac{\theta}{p_a}\right)^{G_2} \left(\frac{\tau_{oct}}{p_a} + 1\right)^{G_3}$

Où	K _r	: module volumique réversible (Mpa),
	Gr	: module de cisaillement réversible (Mpa),
	θ	: contrainte totale (σ_d +3 σ_3) (kPa),
	τ_{oct}	: contrainte de cisaillement octaédrique (($\sqrt{2}/3$) σ_d) (kPa)
	Pa	: pression de normalisation (100 kPa),
	K ₁ , K ₂ , K ₃	: paramètres de régression,
	G ₁ , G ₂ , G ₃	: paramètres de régression.

Banque de module réversible

Une banque de données de module réversible a également été élaborée à partir des matériaux granulaires les plus représentatifs de la pratique caractérisés au cours des sept dernières années. La banque compte actuellement 54 matériaux granulaires de granulométries différentes provenant de diverses régions du Québec. Certains matériaux granulaires contiennent des ajouts, tel que des granulats bitumineux récupérés (GBR), des bardeaux d'asphaltes et du béton de ciment.

Le Tableau 3 montre la moyenne (μ), l'écart type (σ), le coefficient de variation (CV) et le nombre de matériaux granulaires analysés (n) pour différentes propriétés physiques et mécaniques des matériaux granulaires de la banque de module réversible. Les propriétés physiques présentées sont la teneur en eau de compactage (ω) et la masse volumique (ρ) des éprouvettes, ainsi que la teneur en eau et le degré de saturation saturés (ω_{sat} , S_{r sat}) et drainés $(\omega_{dr}, S_{r, dr})$. Les propriétés mécaniques présentées pour une contrainte de confinement (σ_3) de 35 kPa et déviatorique (σ_d) de 70 kPa à la teneur en eau saturée sont le $v_{r sat}$, ainsi que le $E_{r sat}$, le $K_{r sat}$ et le $G_{r sat}$ déterminés à l'aide du modèle d'Uzan. L'influence de la teneur en eau est présentée sous forme de ratio entre la teneur en eau drainée et saturée pour le E_r ($E_{r dr}/E_{r sat}$), le K_r ($K_r dr/K_r sat$) et le G_r ($G_r dr/G_r sat$).

Propriété	Moyenne	Ecart type	Coef. var.	Nombre
	(µ)	(σ)	(CV)	(n)
Propriétés p	hysiques			
Teneur en eau de compactage, ω	3,1%	0,9%	30%	54
Masse volumique, ρ (kg/m ³)	2060	144	7%	53
Teneur en eau saturée, ω _{sat}	9,7%	2,8%	29%	54
Degré de saturation saturé, S _{r sat}	81%	12%	15%	54
Teneur en eau drainée, ω _{dr}	4,6%	1,5%	32%	54
Degré de saturation drainé, S _{r dr}	33%	11%	34%	54
Propriétés mécaniques [σ ₃	= 35 kPa, o	o _d = 70 kPa]		
Coefficient de Poisson réversible, v _{r sat}	0,19	0,03	17%	54
Module de Young réversible, E _{r sat} (MPa)	266	78	29%	54
Module volumique réversible, K _{r sat} (MPa)	153	51	33%	54
Module de cisaillement réversible, G _{r sat} (MPa)	111	32	29%	54
Ratio de E _r , E _{r dr} /E _{r sat}	1,02	0,04	4%	54
Ratio de K _r , K _{r dr} /K _{r sat}	0,98	0,05	5%	54
Ratio de G _r , G _{r dr} /G _{r sat}	1,03	0,05	5%	54

Tableau 3 – Statistiques des propriétés physiques et mécaniques des matériaux granulaires de la banque de module réversible

La ω moyenne des éprouvettes est de 3,1% avec un écart type élevé de 0,9% indiqué par le CV de 30%. Par ailleurs, la ρ moyenne est de 2060 kg/m³ avec un écart type faible de 144 kg/m³ indiqué par le CV de 7%. La ω_{sat} moyenne est de 9,7% avec un écart type élevé de 2,8%, mais le S_{r sat} moyen de 80% varie moins avec un écart type de 12%. La ω_{dr} moyenne est de 4,6%, donc plus élevée que la ω de compactage, avec un écart type élevé de 1,5%, ce qui se traduit par un S_{r dr} moyen de 33% avec un écart type élevé de 11%.

Le v_{r sat} moyen est de 0,19 avec un écart type de 0,03, ce qui indique que le coefficient de Poisson réversible varie peu en fonction du type de matériau granulaire, tout comme il ne varie pas en fonction de la teneur en eau. Le $E_{r sat}$ moyen est de 266 MPa avec un écart type de 78 MPa, le K_{r sat} moyen est de 153 MPa avec un écart type de 51 MPa et le G_{r sat} moyen est de 111 MPa avec un écart type de 32 MPa, ce qui représente une variation similaire selon leur CV.

L'influence de la teneur en eau est très faible entre la teneur en eau saturée et drainée, puisque le $E_{r dr}/E_{r sat}$ moyen est de 1,02, le $K_{r dr}/K_{r sat}$ moyen est de 0,98 et le $G_{r dr}/G_{r sat}$ moyen est de 1,03, tous avec des écarts types très faibles. Le module réversible des matériaux granulaires conformes aux exigences du MTQ est donc peu influencé par la teneur en eau.

Le Tableau 4 présente les données statistiques (μ , σ , CV, n) du E_{r sat} pour un σ_3 de 35 kPa et un σ_d de 70 kPa en fonction du type de matériau granulaire et d'ajout. Les matériaux granulaires sont divisés en quatre groupes, soit les pierres concassées de type MG 20 (PC), les pierres concassées de type MG 20 avec plus de 5% de particules passant le tamis 80 µm (PCM), les

graviers concassés de type MG 20 (GC) et les sables de type MG 112 (S) (NQ 2560-114). Les types d'ajouts sont des granulats bitumineux récupérés (GBR), des bardeaux d'asphaltes et du béton de ciment.

Tableau 4 – Module de	Young révers	ible des	matériaux	granulaires	selon	le type	de	matériau
granulaire et d'ajout								

Matériau granulaire	Teneur	Masse vol.	Module de Young réversible ¹ , E _{r sat} (MF			_{sat} (MPa)
	en eau	(kg/m³)	μ	σ	CV	n
Ту	oe de mat	ériau granula	ire			
Pierre concassée, PC	2,9%	2097	321	85	27%	20
Pierre concassée fine, PCM	2,8%	2164	254	47	19%	11
Gravier concassé, GC	3,7%	2053	218	57	26%	16
Sable, S	2,9%	1809	239	46	19%	7
	Туре	e d'ajout				
Granulats bitumineux récupérés, GBR-PC	2,9%	2101	309	32	10%	3
Granulats bitumineux récupérés, GBR-GC	3,5%	2002	198	13	7%	5
Bardeaux d'asphalte	3,8%	2005	220	16	7%	2
Béton de ciment	5,8%	1819	324	37	11%	2
1						

¹ Module réversible à $\sigma_3 = 35$ kPa et $\sigma_d = 70$ kPa

Le E_r moyen des matériaux granulaires PC (321 MPa) est plus élevé que celui des PCM (254 MPa), qui est un peu plus élevé que celui des GC (218 MPa). Le E_r des sables S (239 MPa) se situent entre celui des PCM et des GC.

L'ajout de GBR à des matériaux granulaires PC (309 MPa) et GC (198 MPa) diminue un peu le E_r . L'ajout de bardeaux d'asphalte à un matériau granulaire PC (220 MPa) diminue davantage la valeur de E_r mais l'écart semble un peu surévalué. Les matériaux granulaires avec du béton de ciment donne un E_r moyen similaire au PC (324 MPa).

CONCLUSION

Le MTQ a élaboré des méthodes d'essai pour la détermination du module complexe des enrobés et du module réversibles matériaux granulaires. Le Tableau 5 résume les différents paramètres mécaniques déterminés pour décrire le module de rigidité des enrobés et des matériaux granulaires. Une banque de données de module complexe et de module réversible ont également été créées à partir des matériaux représentatifs de la pratique caractérisés au cours des sept dernières années. Ces banques de données sont utiles à l'interne pour réaliser les expertises sur les matériaux et le dimensionnement mécaniste-empirique des chaussées. Les banques pourraient éventuellement servir à optimiser les spécifications sur les enrobés et les matériaux granulaires, ainsi que le dimensionnement des chaussées au MTQ.

Le |E*| d'un enrobé au Québec est en moyenne de 8 000 MPa à 10 °C et 10 Hz, avec un écart type de 1 800 MPa. Le |E*| de l'enrobé augmente avec le diamètre nominal maximal de l'enrobé. De même, le |E*| des enrobés avec un bitume PG H-28 est plus élevé que celui des enrobés avec un bitume PG H-34. L'utilisation de GBR augmente le |E*| des enrobés, alors que l'utilisation de techniques tièdes et HRD le diminue. L'utilisation de fibres et de bardeaux d'asphalte modifie peu le |E*| des enrobés.

Le E_r d'un matériau granulaire au Québec est en moyenne de 270 MPa pour un σ_3 de 35 kPa et un σ_d de 70 kPa, avec un écart type de 80 kPa. Le E_r est peu influencé par la teneur en eau. Le E_r des matériaux granulaires en pierres concassées (PC) est plus élevé que celui des autres matériaux granulaires qui sont davantage similaires. L'utilisation de GBR ou de bardeaux d'asphalte dans les matériaux granulaires diminue le E_r. L'utilisation de béton de ciment donne un E_r plus élevé.

Ces observations générales se limitent évidemment aux banques de données présentées. L'utilisation de ces banques pour les expertises sur les matériaux et le dimensionnement des chaussées demandent une certaine expérience avec ce type de données, puisque la quantité d'informations demeure limitée et ne représente pas nécessairement l'ensemble des matériaux de chaussée utilisés au Québec.

Tableau 5 – Paramètres mécaniques déterminés au MTQ pour décrire le module de rigidité des enrobés et des matériaux granulaires

Paramètre	Unité	Description			
		Enrobés			
E*	MPa	Module complexe			
E1	MPa	Partie réelle du module complexe			
E ₂	MPa	Partie imaginaire du module complexe			
E*	MPa	Module dynamique			
φ	deg	Angle de phase			
Matériaux granulaires					
Er	MPa	Module de Young réversible			
ν _r		Coefficient de Poisson réversible			
K _r	MPa	Module volumique réversible			
Gr	MPa	Module de cisaillement réversible			

RÉFÉRENCES

AASHTO T 307-99 (2007). « Standard Method of Test for Determining the Resilient Modulus of Soils and Aggregate Materials », *Standard Specifications for Transportation and Methods of Sampling and Testing*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., USA.

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

BOYCE, H.R. (1980). « A Non-Linear Model for the Elastic Behaviour of Granular Materials Under Repeated Loading », International Symposium on soils under cyclic and Transient Loading, Swansea.

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

DOUCET, FELIX et BRUNO AUGER (2010). *Détermination du module complexe des enrobés au ministère des Transports du Québec*, Matériaux et infrastructures, coll. Études et recherches en transports, ministère des Transports du Québec, Québec.

DOUCET, FELIX et BRUNO AUGER (2014). *Détermination du module réversible des matériaux granulaires au ministère des Transports du Québec*, Matériaux et infrastructures, coll. Études et recherches en transports, ministère des Transports du Québec, Québec.

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

EN 13286-7 (2004). « Partie 7 : Essai triaxial sous charge cyclique pour mélanges sans liant hydraulique », *Mélanges avec ou sans liant hydraulique,* Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, Belgique.

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 22-400 (2013). « Détermination du module réversible des matériaux granulaires », *Recueil des méthodes d'essai LC*, Laboratoire des chaussées, ministère des Transports du Québec, Les Publications du Québec, Canada.

LC 26-700 (2009). « 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.

LEKARP, FREDRICK, ULF ISACSSON and ANDREW DAWSON (2000). «State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates», Journal of Transportation Engineering, Vol. 126, No. 1, ASCE. USA, p. 66-75.

NORME 4101 (2014). « 4.1 Liants bitumineux — Bitumes », *Tome VII — Matériaux, Normes ouvrages routiers*, ministère des Transports du Québec, Les Publications du Québec, Canada.

NORME 4202 (2013). « 4.2 Enrobés à chaud — Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées », *Tome VII — Matériaux, Normes ouvrages routiers*, ministère des Transports du Québec, Les Publications du Québec, Canada.

NQ 2560-114 (2013). « Granulats », *Travaux de génie civil*, Bureau de normalisation du Québec, Québec.

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.

UZAN, JACOB (1985). « Characterization of Granular Material », Transportation Research record 1022, TRB, NRC, Washington, D.C., USA.

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