

Détermination du module complexe des enrobés

Contexte

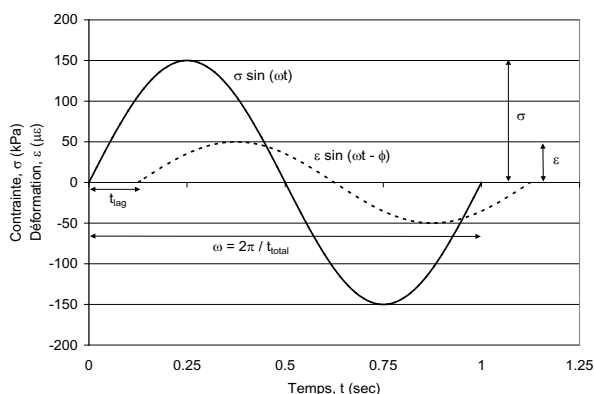
La Direction du laboratoire des chaussées élabore actuellement des méthodes d'essai pour déterminer le comportement mécanique des matériaux de chaussée en laboratoire. Parmi d'autres, une méthode d'essai a été mise au point pour la détermination du module complexe des enrobés.

Module complexe

Le module complexe (E^*) décrit la rigidité d'un matériau viscoélastique sous chargement cyclique, tel que les enrobés. 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 1 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. 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 1 – Sollicitation sinusoïdale en traction-compression sur un enrobé



$$E^* = \frac{\sigma \sin(\omega t)}{\varepsilon \sin(\omega t - \varphi)} = |E^*| \cos \varphi + i |E^*| \sin \varphi \quad [1]$$

$$|E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [2]$$

$$\varphi = \omega t_{lag} \quad [3]$$

- où
- E^* = module complexe (MPa),
 - $|E^*|$ = module dynamique (MPa),
 - φ = angle de phase (rad),
 - σ = contrainte totale (MPa),
 - ε = déformation totale (m/m),
 - ω = période ($2\pi f$) (rad/s),
 - t = temps (s),
 - t_{lag} = temps de déphasage entre σ et ε (s).

Le $|E^*|$ est l'intensité du E^* qui peut être utilisé comme module de Young (E) 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 (haute fréquence), à 45° à haute température (basse fréquence). À titre comparatif, il serait de 0° pour un matériau élastique et de 90° pour un matériau purement visqueux.

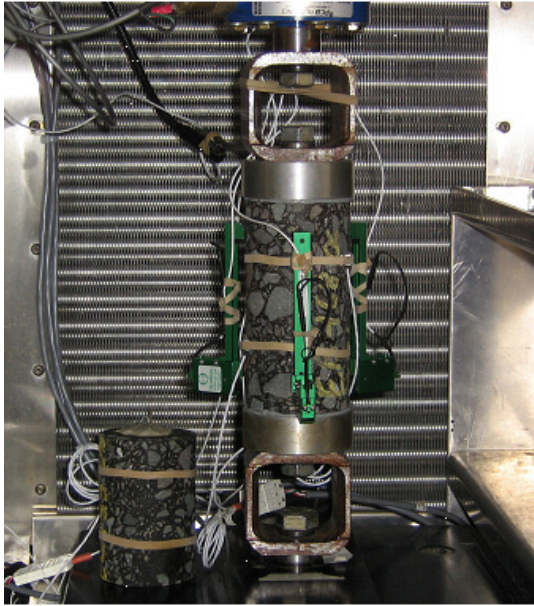
Méthode d'essai LC 26-700

Le Ministère a conçu la méthode d'essai LC 26-700 pour la « Détermination du module complexe des enrobés ». Le E^* est déterminé à l'aide d'un essai de traction-compression directe sur une éprouvette cylindrique d'enrobé de 75 mm de diamètre sur 150 mm de hauteur, comme montré à la figure 2. Les éprouvettes sont obtenues par carottage 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 avant leur compactage, afin de reproduire la production en centrale, le transport et la mise en œuvre de l'enrobé.

Le E^* est déterminé à différentes fréquences (0,1 à 10 Hz) et températures (-20 à 40°C), sous chargement cyclique à petite déformation ($50 \mu\text{e}$), afin de déterminer le comportement visco-

lastique 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 de déterminer directement les 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.

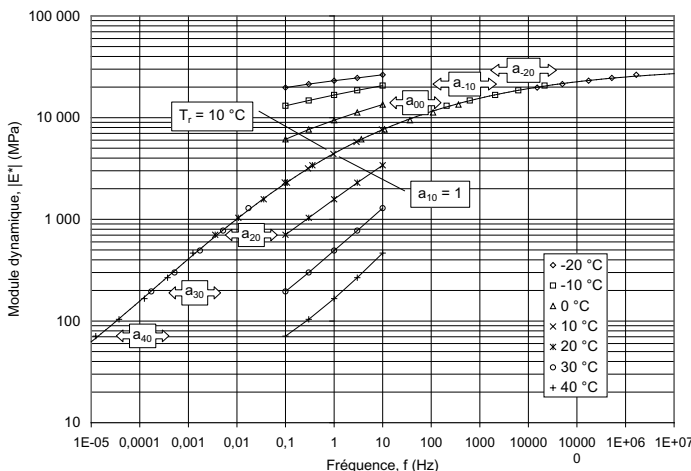
Figure 2 – Photo de l'essai de traction-compression directe



Courbe maîtresse de module dynamique

Le E* de l'enrobé est déterminé par balayage de fréquence à différentes températures. Selon le principe d'équivalence temps-température applicable aux matériaux thermorhéologiquement simple, la même valeur de |E*| peut être obtenue avec différents

Figure 3 – Construction de la courbe maîtresse de module dynamique d'un enrobé à 10 °C



couples de fréquence et de température. Ainsi, les valeurs obtenues à différentes températures peuvent être translatées à une température de référence en déterminant la fréquence équivalente pour obtenir la même valeur de |E*| à cette température, comme montré à la figure 3. 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) à l'équation 4. La f_r est déterminée à l'équation 5 par le facteur de translation (a_T) qui est fonction de la température à l'équation 6. 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, a₁, a₂) déterminés par les essais de laboratoire.

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{(\beta + \gamma \log f_r)}} \quad [4]$$

$$\log f_r = \log f + \log a_T \quad [5]$$

$$\log a_T = a_1 (T - T_r) + a_2 (T - T_r)^2 \quad [6]$$

- où E* = module complexe (MPa),
- f_r = fréquence réduite (Hz),
- a_T = facteur de translation (Hz),
- f = fréquence (Hz),
- T = température (°C),
- δ, α, β, γ, a₁, a₂ = paramètres de régression.

Conclusion

Une méthode d'essai est maintenant disponible au ministère des Transports du Québec pour la détermination du module complexe des enrobés. Cet essai vise à évaluer le comportement mécanique des enrobés en laboratoire et à effectuer le dimensionnement des chaussées selon une approche mécaniste-empirique.

Références

LC 26-700 «Détermination du module complexe des enrobés», *Recueil des méthodes d'essai LC*, Laboratoire des chaussées, Ministère des Transports du Québec, Les publications du Québec, Québec.

RESPONSABLES :

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

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

DIRECTEUR :

Guy Tremblay

Guy Tremblay, ing.
Direction du laboratoire des chaussées