



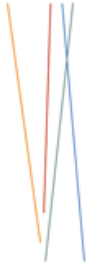
Performances rhéologiques des enrobés et des enrobés spéciaux



Yvan Paquin, ing.

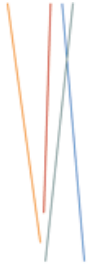
Directeur Technique
Construction DJL inc.

24 novembre 2010



Contenu de la présentation

1. Comportement rhéologique des enrobés
2. Approche mécanistique et performances des enrobés
3. Mesure de modules
4. Fatigue
5. Retrait empêché
6. Conclusions



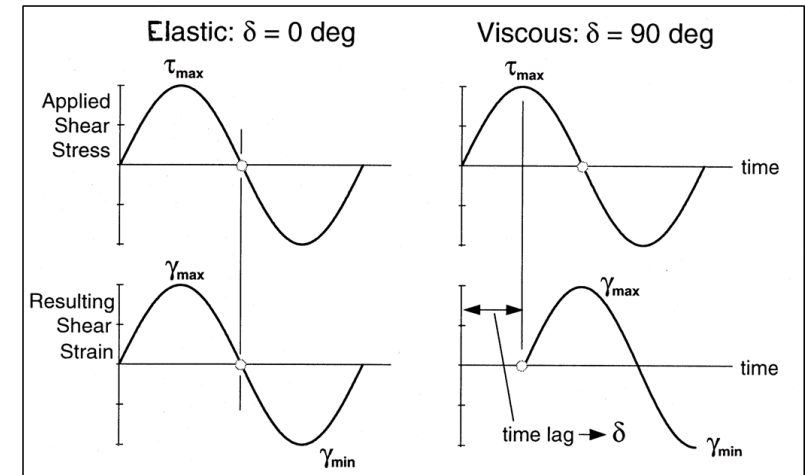
Comportement rhéologique des enrobés

- De convenance, le comportement rhéologique de l'enrobé (à formulation égale) est très fortement dicté par la rhéologie du liant
- Optimisation par la courbe granulaire et additifs

Comportement rhéologique des enrobés

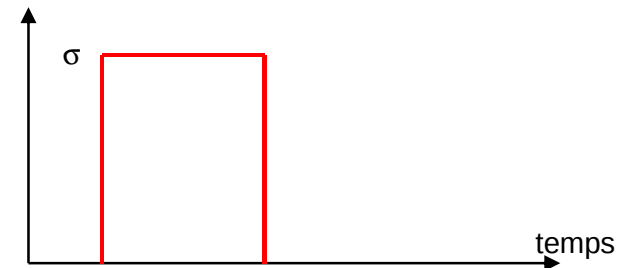
➤ Matériaux visco-élastiques

- Comportement visqueux (de liquide) à haute température et long temps de charge
 - module faible, angle de phase tend vers 90°
- Comportement élastique (de solide) à basse température et temps de charge rapide
 - modulé élevé, angle de phase tend vers 0°

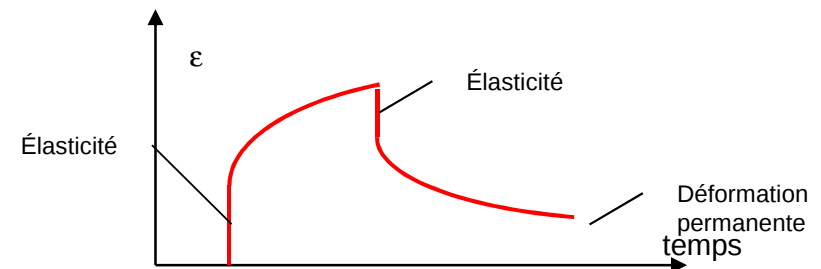


➤ Relaxation des charges

- Comportement
 - Élastique
 - Visqueux
 - Plastique

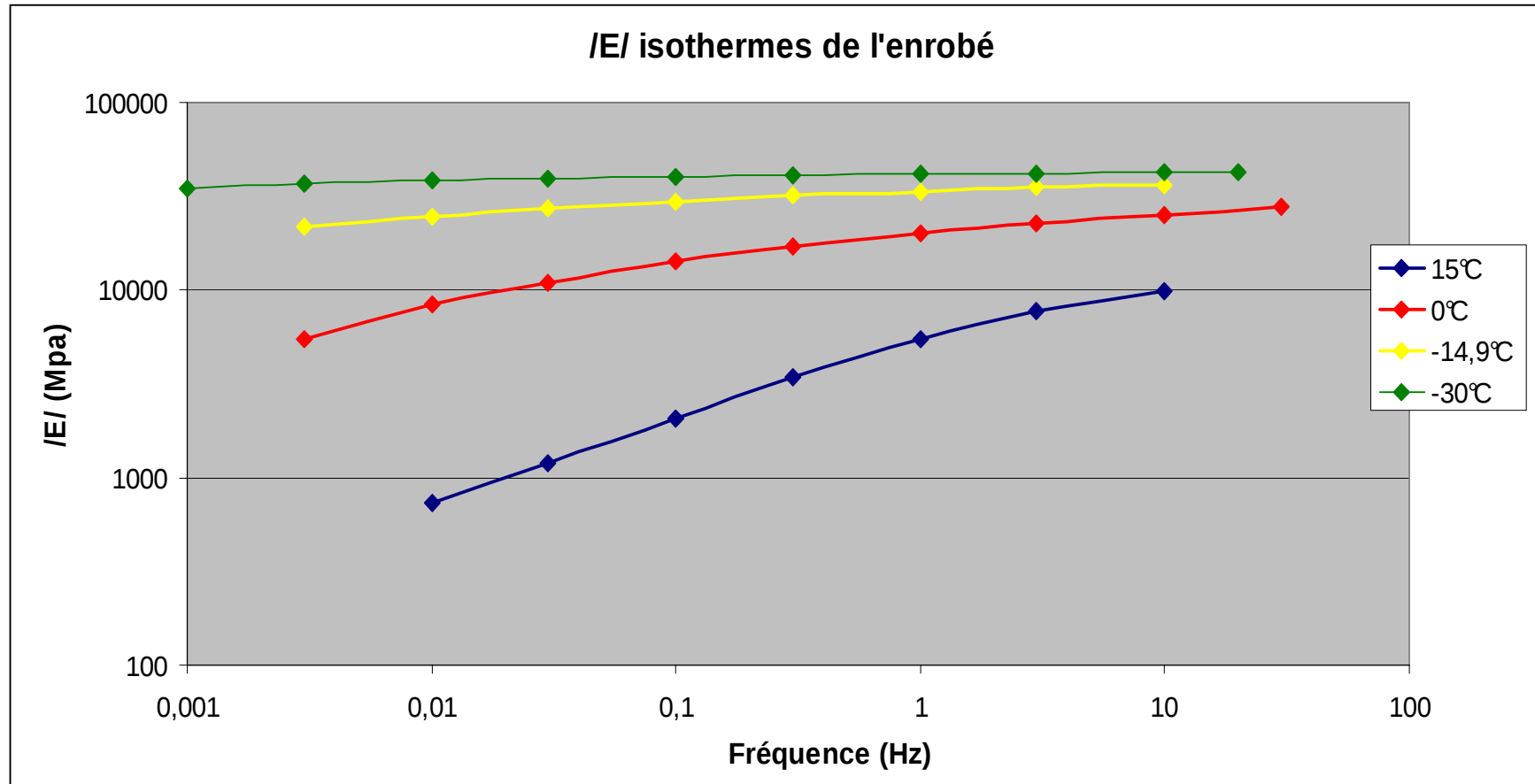


➤ Dépendant de la température et de la fréquence



Comportement rhéologique des enrobés

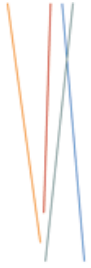
Évolution du module selon le temps de chargement



Temps de chargement lent

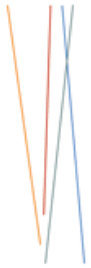


Temps de chargement rapide



Comportement rhéologique des enrobés

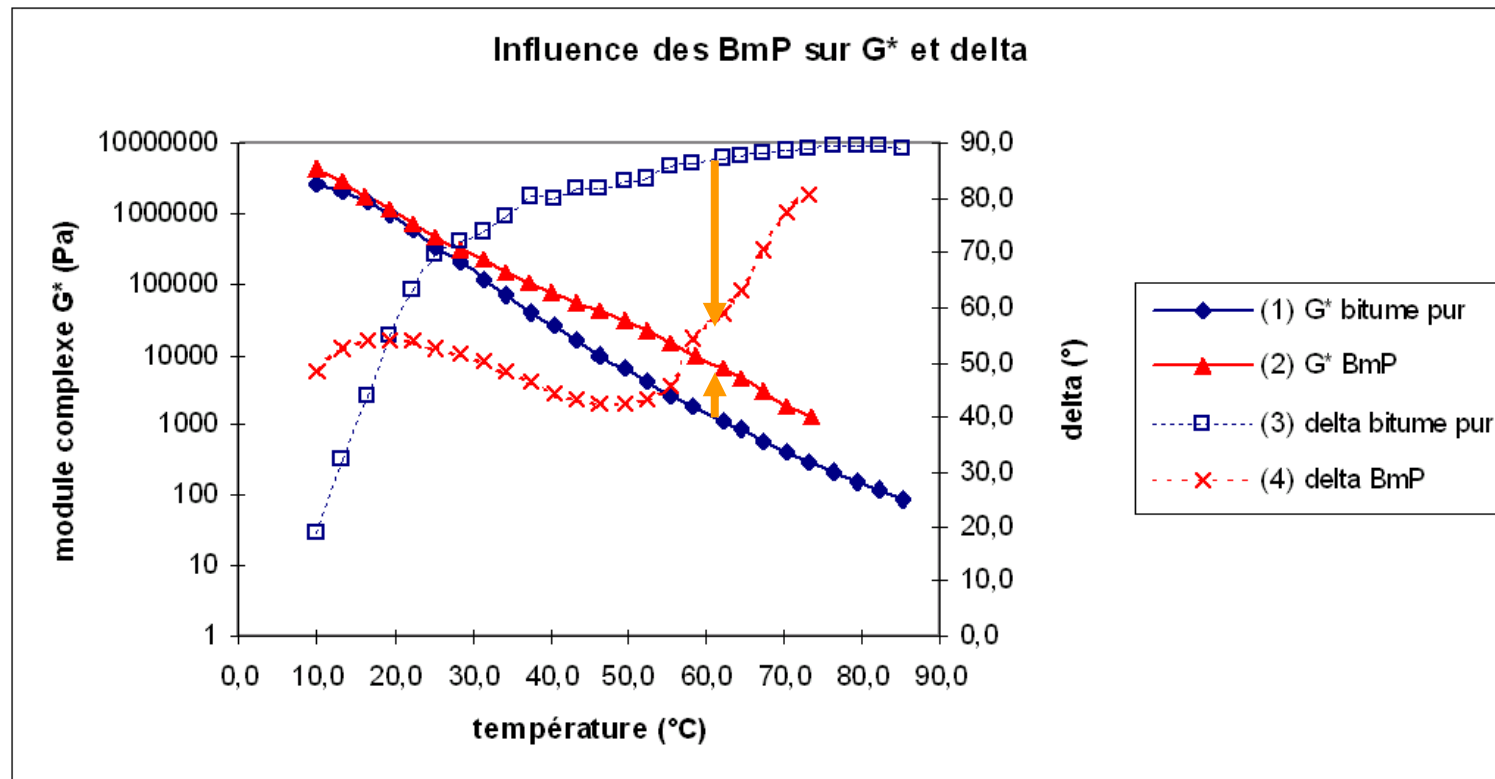
➤ Malheureusement, le bitume pur a un comportement rhéologique qui nécessite un compromis : il est rigide à basse température et mou à haute température alors qu'en service, on souhaite l'inverse

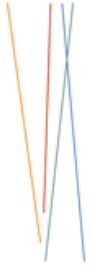


Comportement rhéologique des enrobés

➤ L'apport des polymères modifie la visco-élasticité du liant et réduit ainsi sa susceptibilité thermique

➤ Intérêt d'utilisation dans les enrobés spéciaux





Comportement rhéologique des enrobés

➤ En terme d'adaptation aux sollicitations thermiques, on considère 2 paramètres :

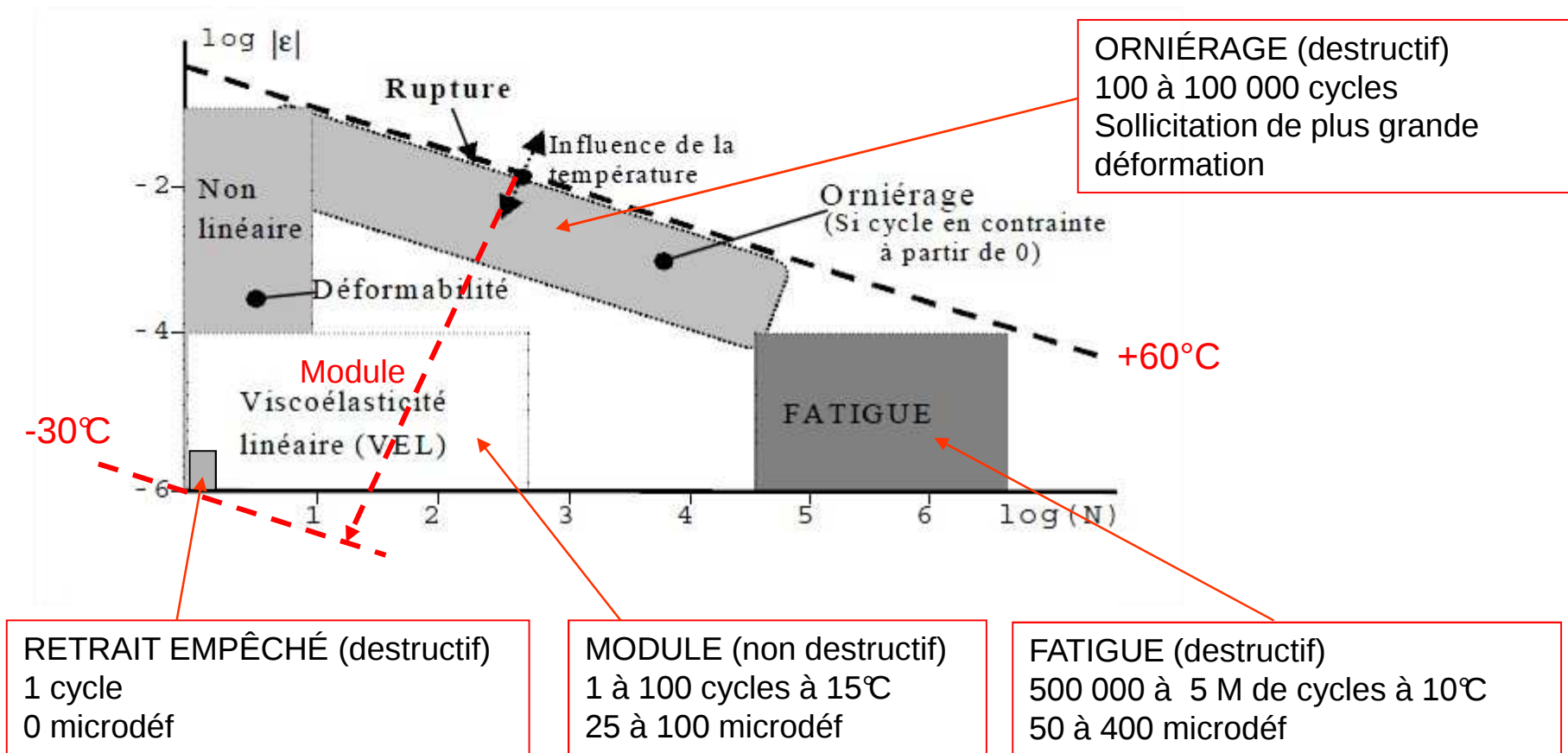
- Résistance à l'orniérage (déformation permanente)
- Résistance à basse température (fissuration de retrait)
 - Présentement régit par le grade du bitume
 - Essai sur enrobé (TSRST) encore peu normalisé

➤ En terme de dimensionnement structural, on recherche 2 éléments :

- Module (rigidité)
- Résistance à la fatigue (fissuration structurale)

Comportement rhéologique des enrobés

Les différents cas de figure de sollicitation



Approche mécanistique et performances des enrobés

➤ Approche française

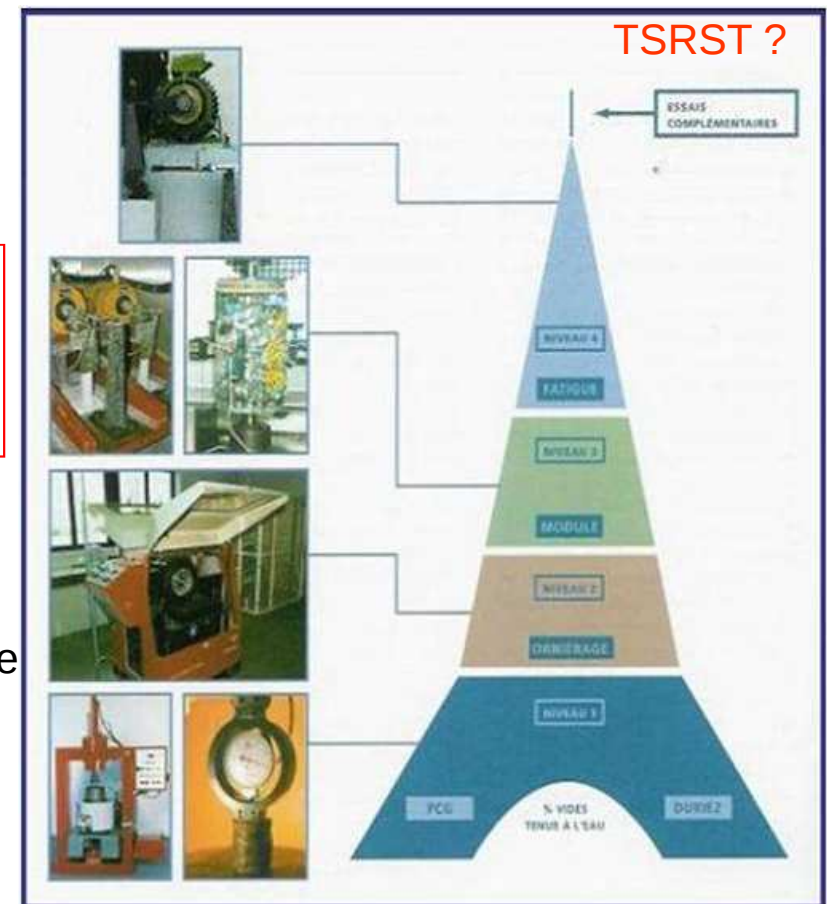
➤ Étapes selon les usages et objectifs

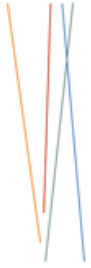
- Niveau 1: PCG + tenue à l'eau (Duriez)
- Niveau 2: + orniérage
- Niveau 3: + module
 - module E (15°C, 10Hz ou 0.02s)
- Niveau 4: + fatigue
 - tenue à la fatigue ϵ_6 (25°C, 10 Hz)

➤ Détermination des paramètres de dimensionnement

- Sensibilité : erreur de 30% sur le module = 1cm d'enrobé (économie globale)

➤ Respect des normes produits





Approche mécanistique et performances des enrobés

➤ La rhéologie permet de mettre en évidence des formulations spéciales plus performantes

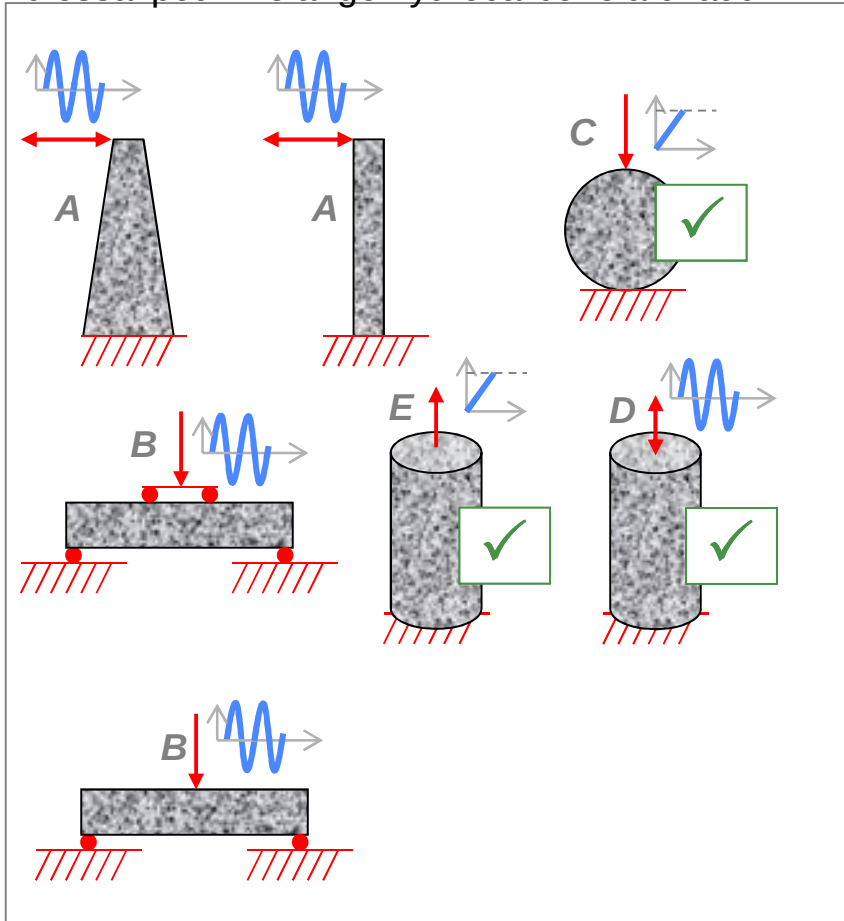
- Variation de la granulométrie
- Plus de fines
- Plus de bitume
- Bitume dur ou polymères spéciaux
- Ajout d'additif (fibres, caoutchouc, gilsonite...)

➤ Chaque enrobé a donc son propre comportement en module/fatigue, ce qui n'est pas le cas dans la méthode AASHTO 1993

- méthode limitative

Mesures de module

EN 12697-26 - Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud



✓ Essai fiable et répétable

Normes sur les conditions d'essai EN 13108-20

		Température	Fréquence
Flexion 2 points (module complexe)	A	15°C	10Hz
Flexion 3 points	B	15°C	10Hz
Flexion 4 points	B	20°C	8Hz
Traction indirecte	C	20°C	124μs
Traction compression directe	D	15°C	10Hz
Traction directe (MAER)	E	15°C	0,02s

Essai maintenu en France

MTQ LC 26-700 (10°C, 10Hz)

Essai le plus utilisé en France

Normes produits (enrobés) EN 13108-1 – Bétons Bitumineux (spécifications sur le module minimal)

Mesures de module

➤ Récent rapport du MTQ (9 nov. 2010)

➤ Permet une correspondance avec E 15°C classiques français (ordre de grandeur)

Tableau 14 – Caractéristiques des bitumes

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

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

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

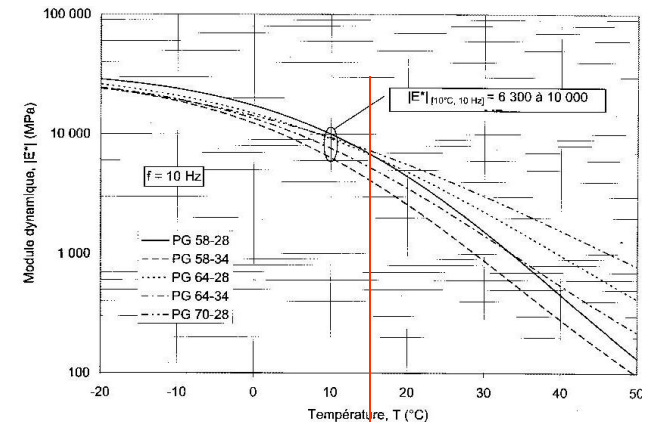


Figure 45 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés ESG-10

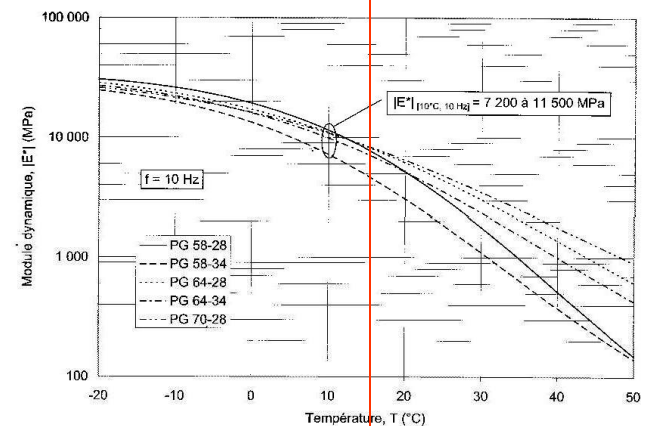


Figure 46 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés ESG-14

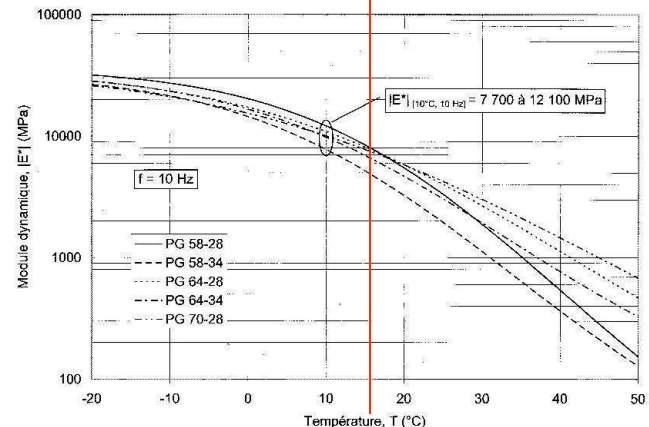


Figure 47 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés GB-20

Mesures de modules – Flexion 2 points

➤ Essai normalisé

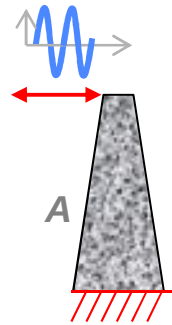
- EN 12697-26 annexe A
- NF P 98-260-2
 - Module complexe

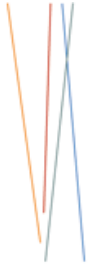
➤ Conditions d'essai

- Sur éprouvettes trapézoïdales (meilleure répartition des contraintes)
- En principe 15°C ,10 Hz (approche française)
- A différentes températures et fréquences
- Sollicitations sinusoïdales en tête d'éprouvettes à déformation ou contrainte imposée

➤ Avantages/Limitations

- Obtention des éprouvette
 - Coupe spéciale
 - Plaque d'enrobés

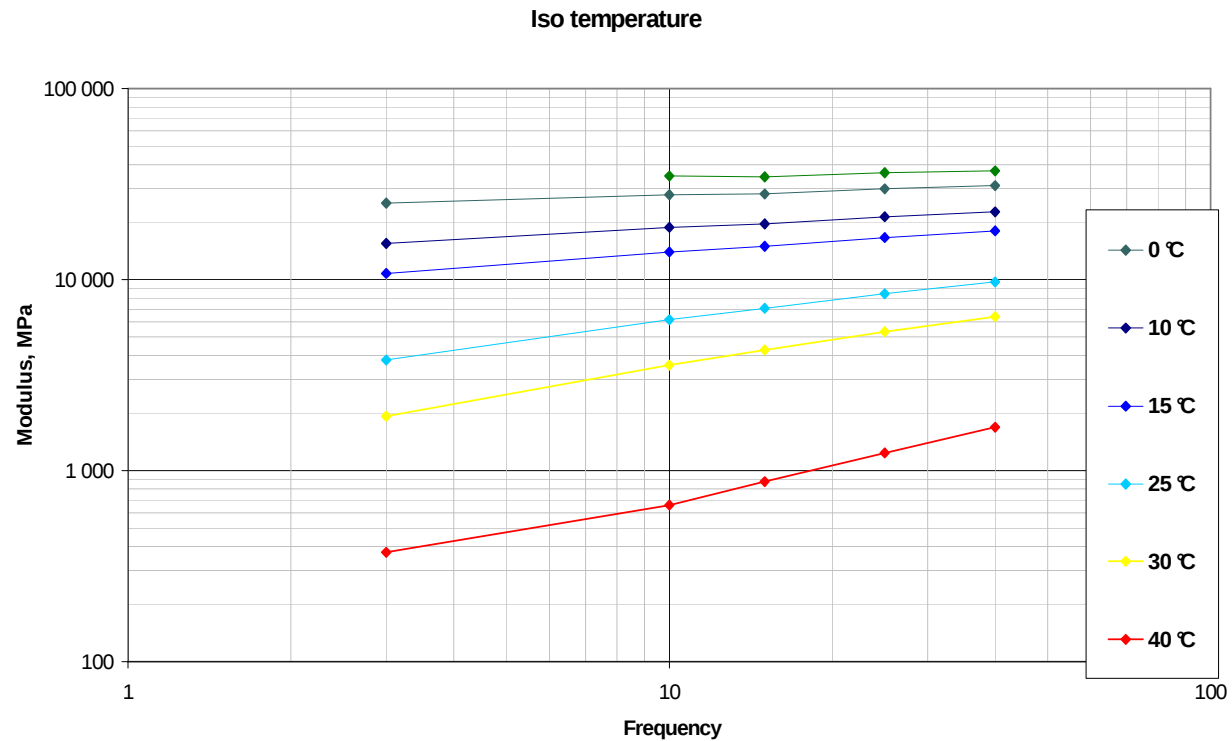




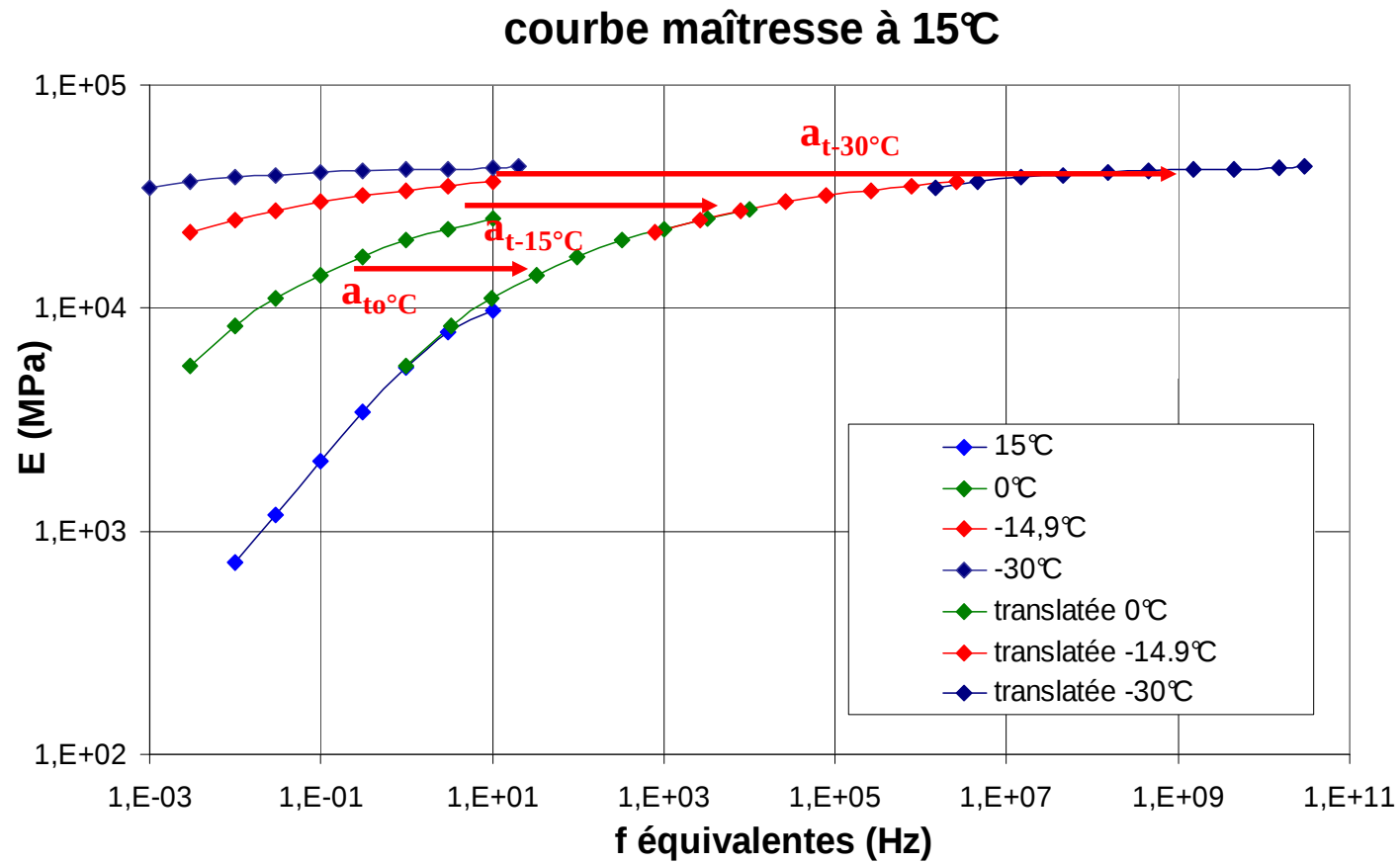
Mesures de modules – Flexion 2 points

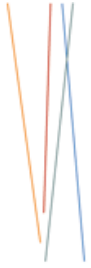
↗ Iso thermes et iso fréquences

- Norme du module en fonction de la fréquence ou de la température



Mesures de modules – Flexion 2 points

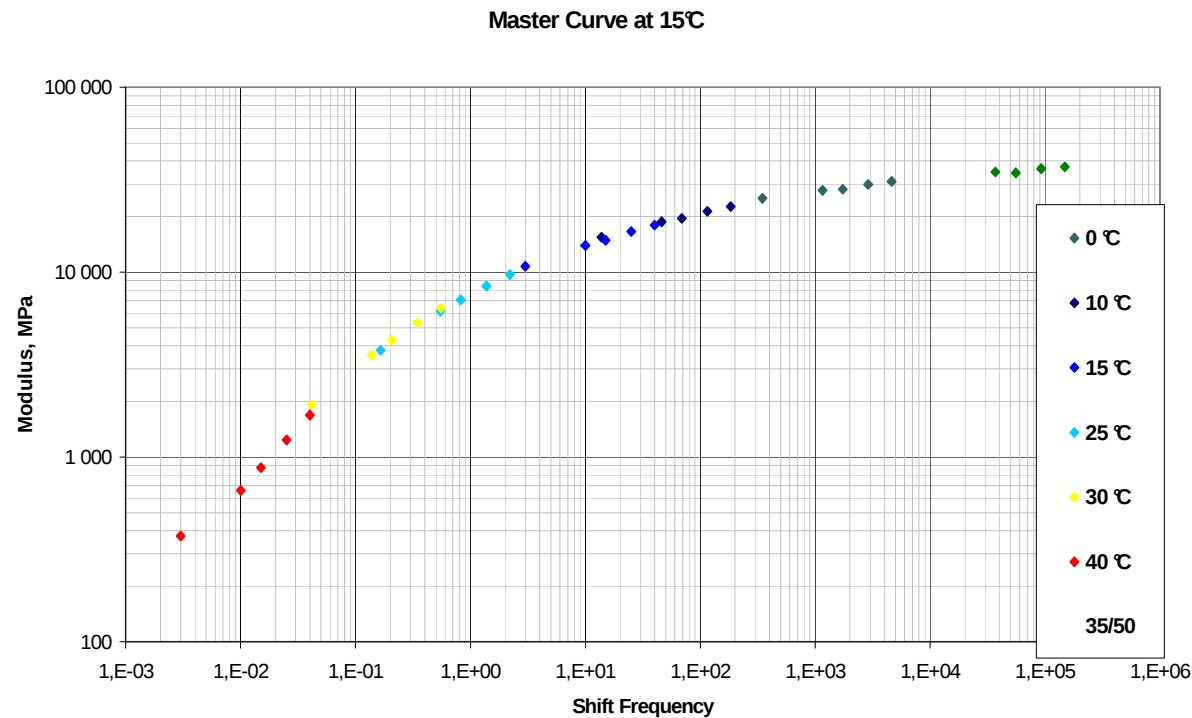


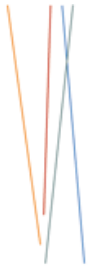


Mesures de modules – Flexion 2 points

↗ Courbe Maîtresse

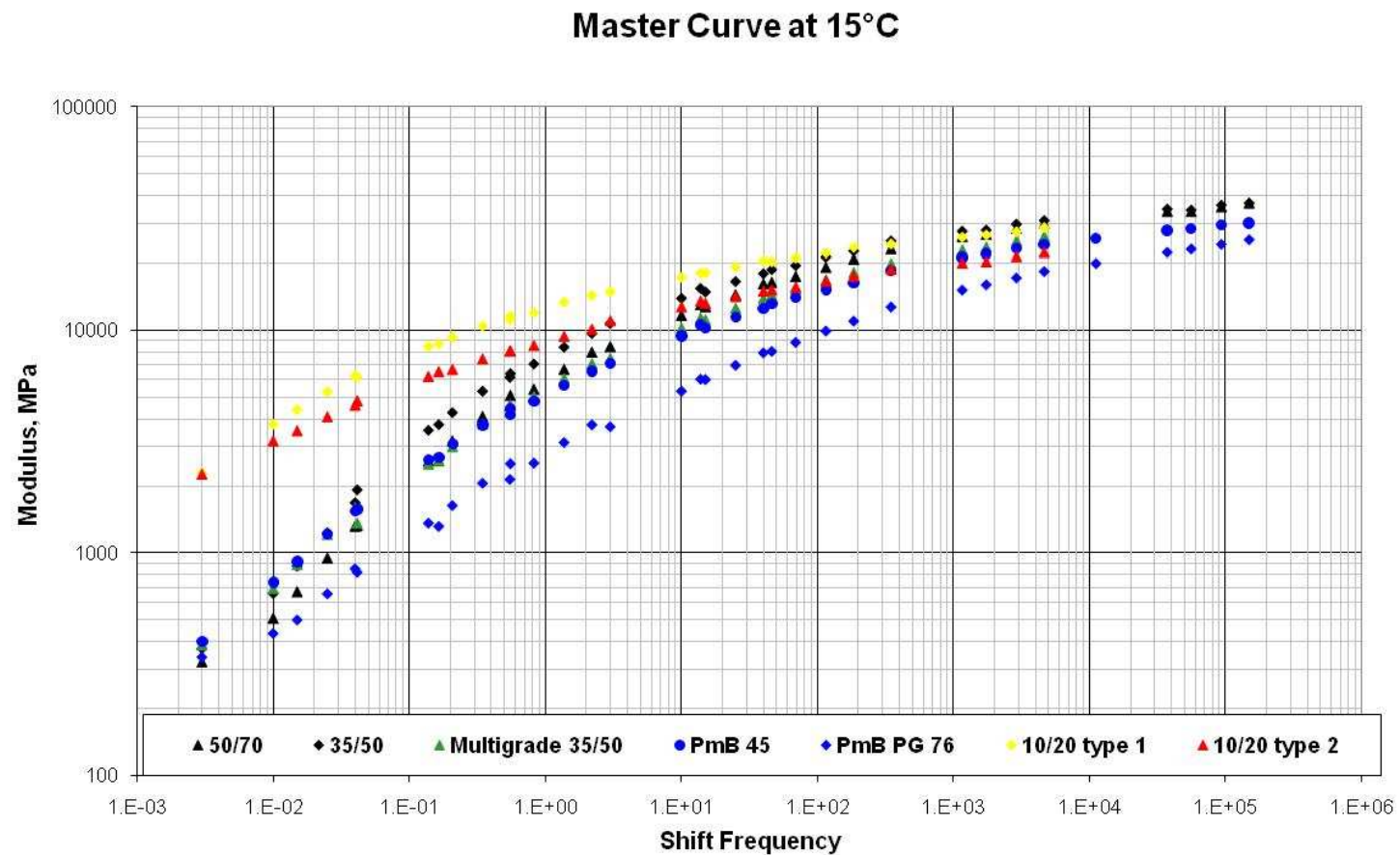
- ↗ Courbe unique de la norme du module
- ↗ Déterminer pour une température donnée
- ↗ Correspondance température / fréquence

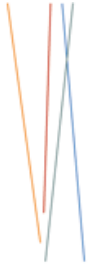




Mesures de modules – Flexion 2 points

Courbes maîtresses de différents enrobés



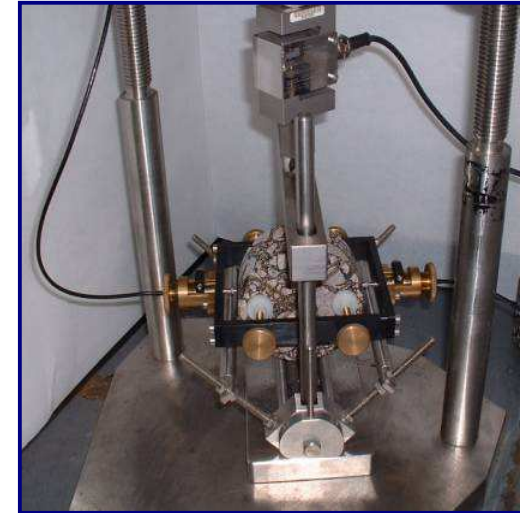
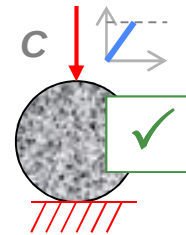


Mesures de modules – Traction indirecte

Indirect tension test (**NAT**)

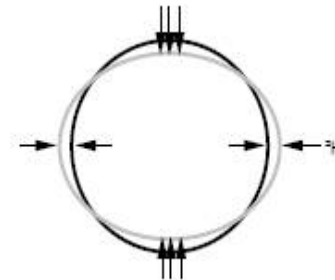
➤ Essai normalisé

- EN 12697-26 annexe C (AASHTO TP31)
- Détermine la résistance en traction



➤ Conditions d'essai

- Sur éprouvette cylindrique
 - Éprouvette Marshall ou PCG
 - Carotte du chantier
- En principe 20°C (approche anglaise)
- Sollicitations diamétrales par impulsion



➤ Avantages / Limitations

- Permet l'utilisation des carottes « chantier »
- Hypothèse sur la valeur du coefficient de Poisson

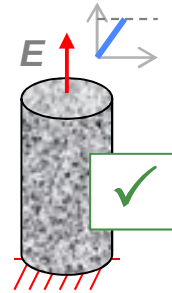
$$E = P(v+0,27)/h\Delta h$$



Mesures de modules – Traction directe

➤ Essai normalisé

- EN 12697-26 annexe E
- N FP 98-260-1 (MAER)



➤ Conditions d'essai

- Traction statique
- Sur éprouvette cylindrique
- À différentes températures et fréquences
- En principe 15°C, 0,02s (approche française)



➤ Avantages / Limitations

- Permet d'appréhender la perte de linéarité (à 0°C et long temps de charge)
- Corrélation avec module complexe

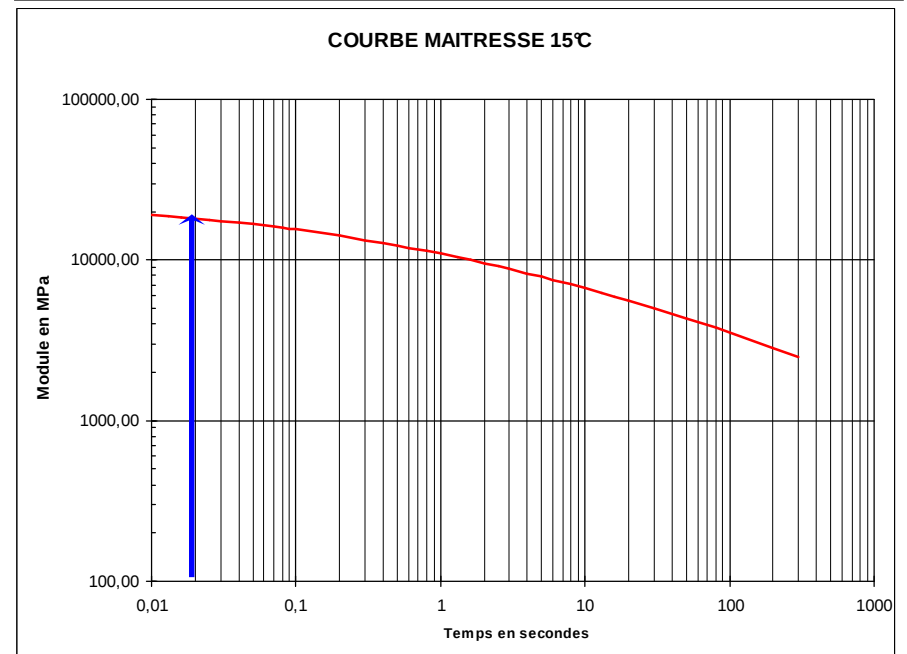
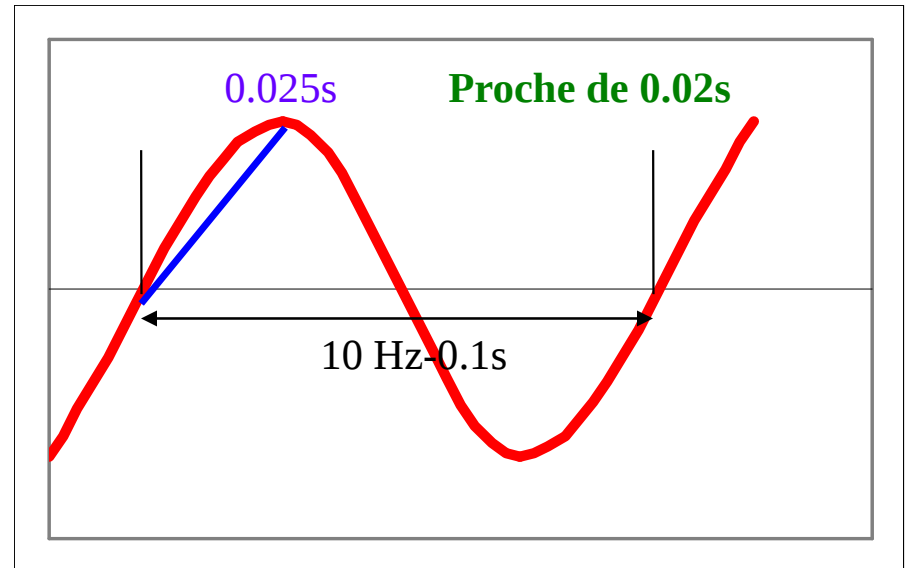


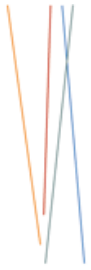
Mesures de modules – Traction directe

➤ Tracé de la courbe maîtresse

➤ Extrapolation du module

- À l'aide de l'équation de la courbe maîtresse, on va calculer le module à 0.02s (les presses permettent difficilement une traction fiable à une fréquence aussi rapide (50 Hz))
- Détermination du module à 15°C, 0.02s (normalisé)



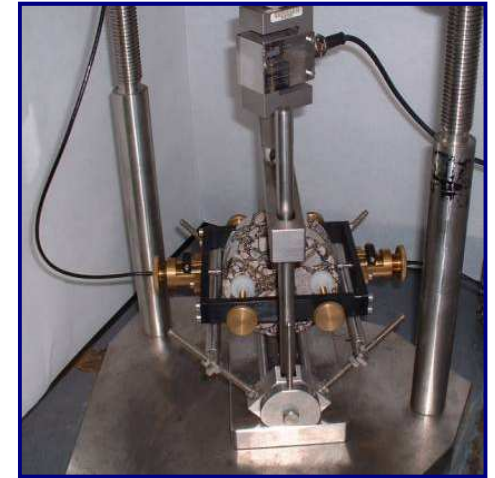
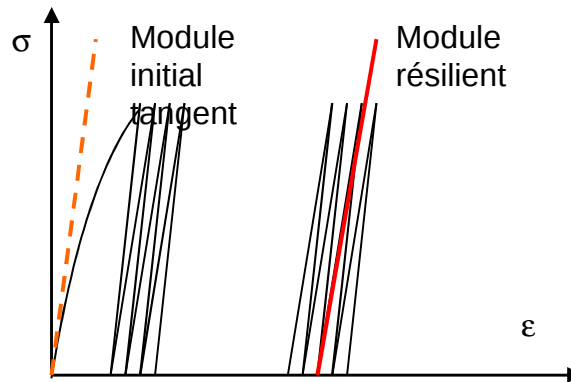


Mesures de modules – Module résilient

➤ Simulation du trafic sur les propriétés long terme

➤ Mesure de module sous chargements répétés

- Module résilient ou module réversible
- Rapport de la contrainte répétée sur la déformation réversible



➤ Parfois éloigné du comportement purement élastique

Mesures de modules – Module résilient

➤ Méthode AASHTO 1993

➤ ASTM D 4123

➤ Chaussée 2

The procedure described covers a range of temperatures, loads, loading frequencies, and load durations. The recommended test series consists of testing at 41, 77 (Note 1), and 104°F (5, 25 (Note 1), and 40°C) at one or more loading frequencies, for example, at 0.33, 0.5, and 1.0 Hz for each temperature. This recommended series will result in nine test values for one specimen which can be used to evaluate the overall resilient behavior of the mixture.

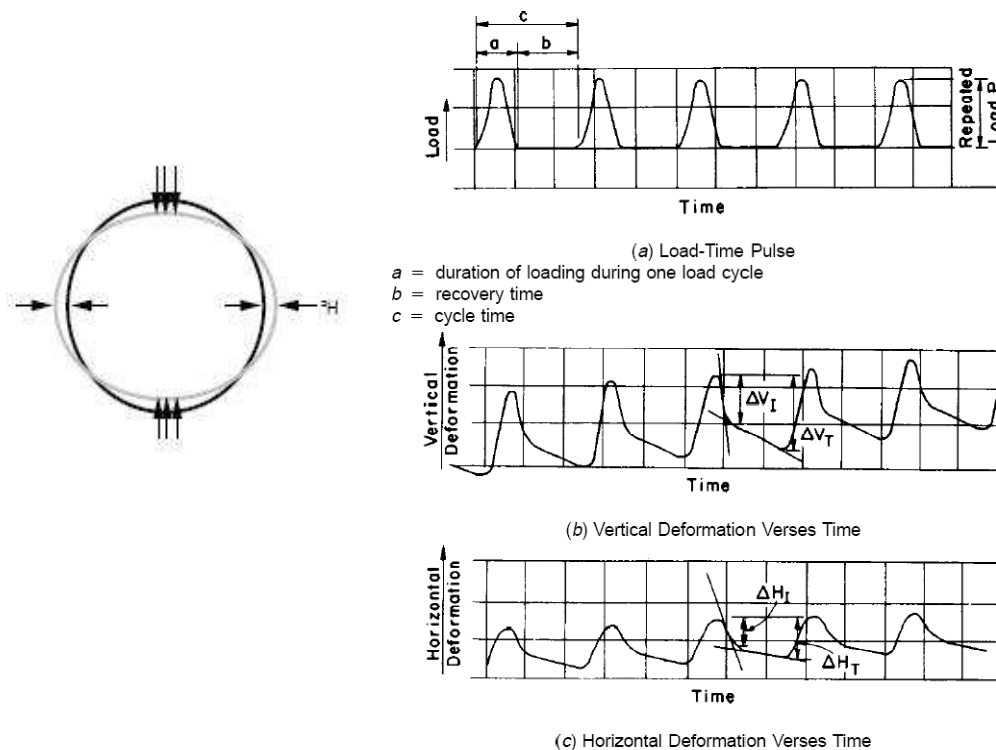


FIG. 2 Typical Load and Deformation Versus Time Relationships for Repeated-Load Indirect Tension Test

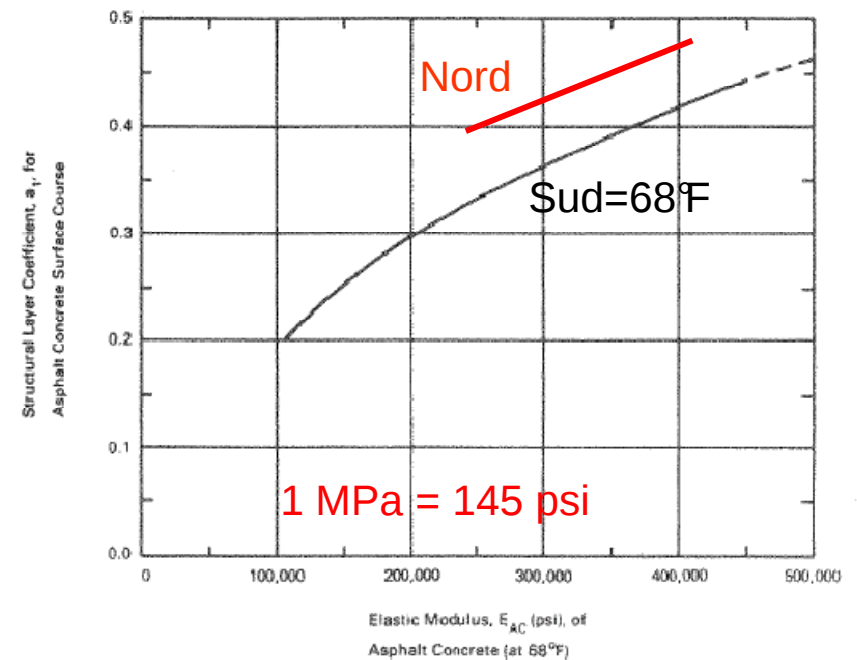
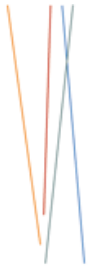


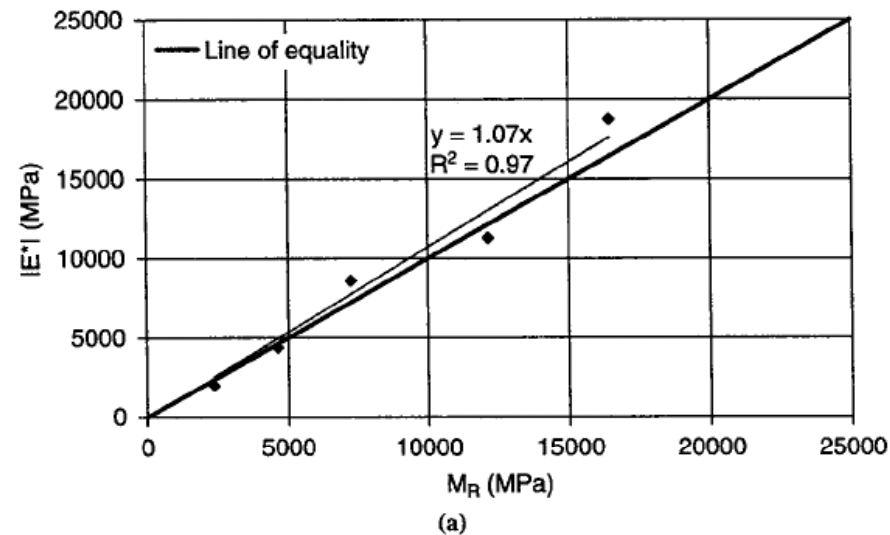
Figure 2.5. Chart for Estimating Structural Layer Coefficient of Dense-Graded Asphalt Concrete Based on the Elastic (Resilient) Modulus (3)



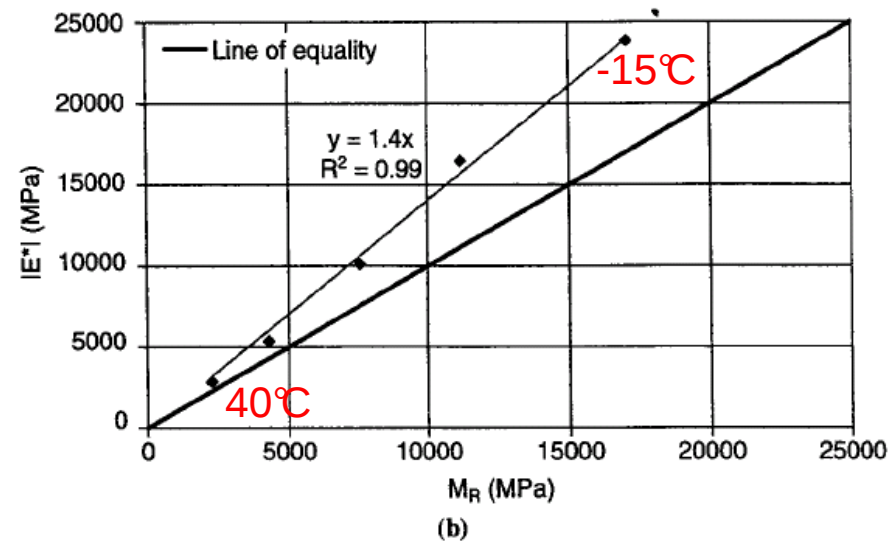
Mesures de modules – Module résilient

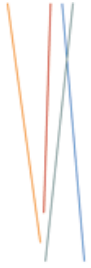
Module résilient à 5 Hz versus Module dynamique à 5.2 Hz (0.03s)

SM-9.5A mm mix



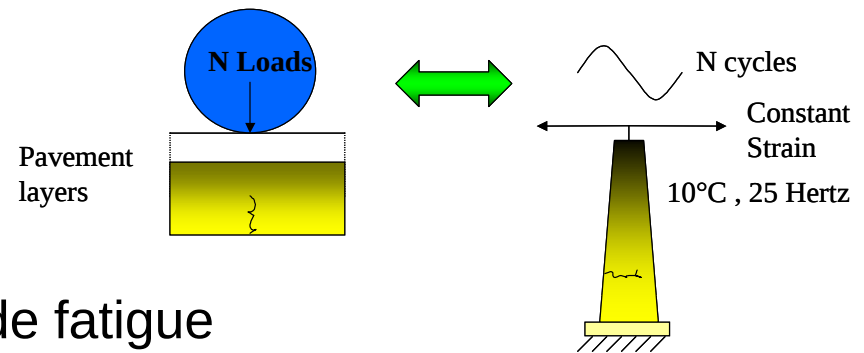
BM-25.0mm mix





Fatigue

- Sous la répétition de chargement, le matériau perd de sa rigidité jusqu'à la rupture

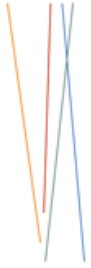


- Détermination de la courbe de fatigue

- Évalué à travers

- Perte de module
- Ou dissipation d'énergie

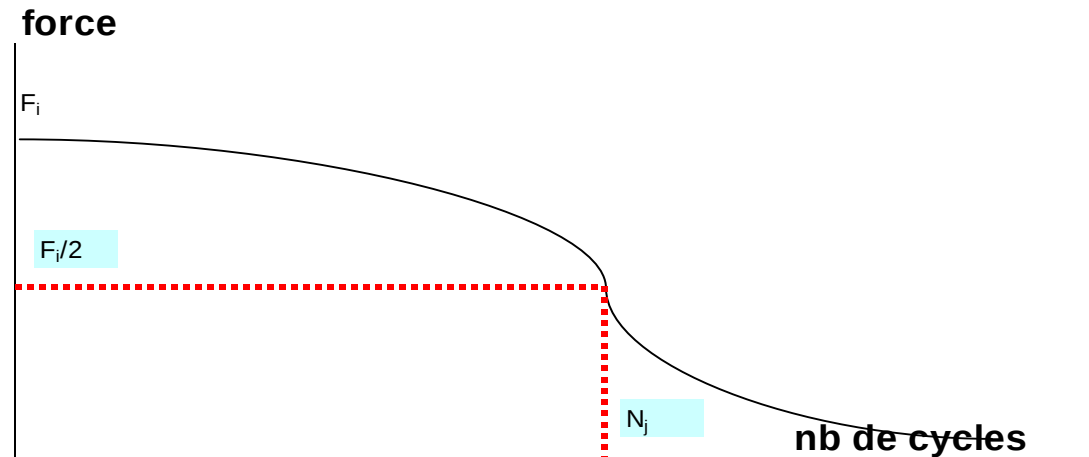
- Initiation et propagation du phénomène de fissuration



Fatigue

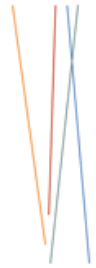
➤ Critère de rupture

- Pour chaque éprouvette l'on effectue un suivi de la force pendant toute la durée de l'essai



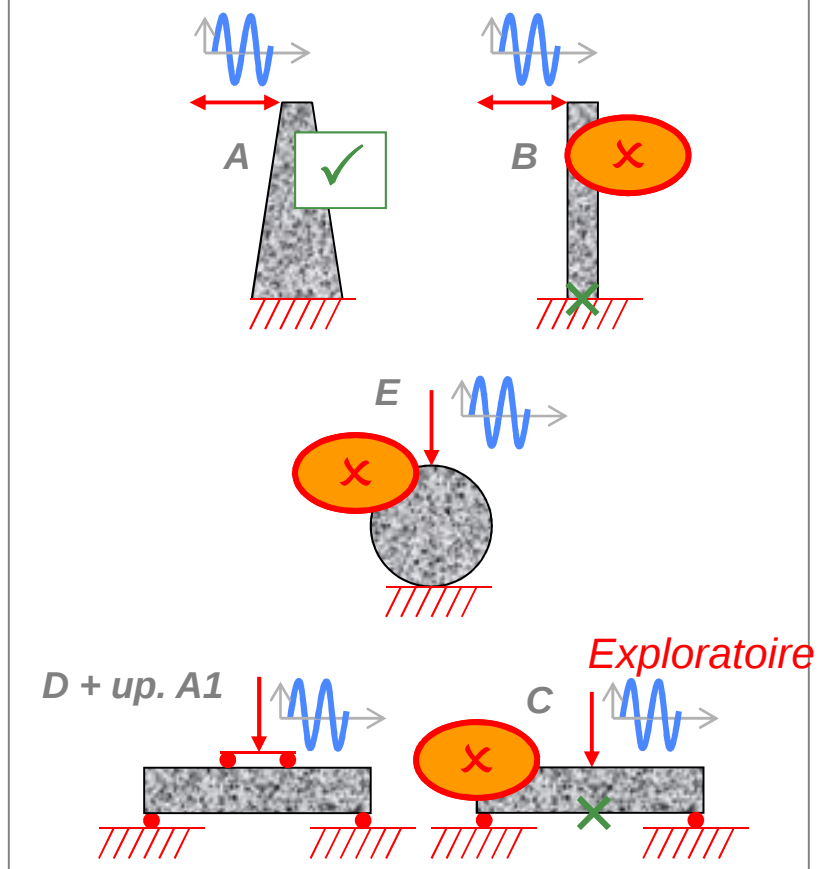
- On mesure la force initiale F_i au début de l'essai, et l'éprouvette est considérée comme rompue à $F_i/2$

- On relève à $F_i/2$, le nombre de cycles écoulés .



Fatigue

↗ Fatigue EN 12697-24 + A1



✓ Essai fiable et répétable
 ✗ Essai à éviter



figure 19: Appareil de l'essai de flexion 2 points (LCPC-Nantes – France)

Fatigue

➤ Essai normalisé

- EN 12697-24, AASHTO TP321
- N FP 98-261-1

➤ Conditions d'essai

- Réponse à un chargement cyclique
 - À déformations imposées
 - 10°C, 25 Hz
 - Avec période de repos ou non

➤ Avantages / Limitations

- Essai très long
- Obtention des éprouvettes

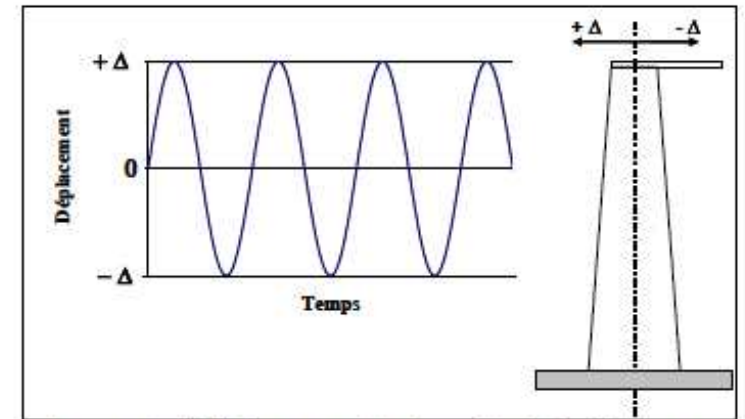
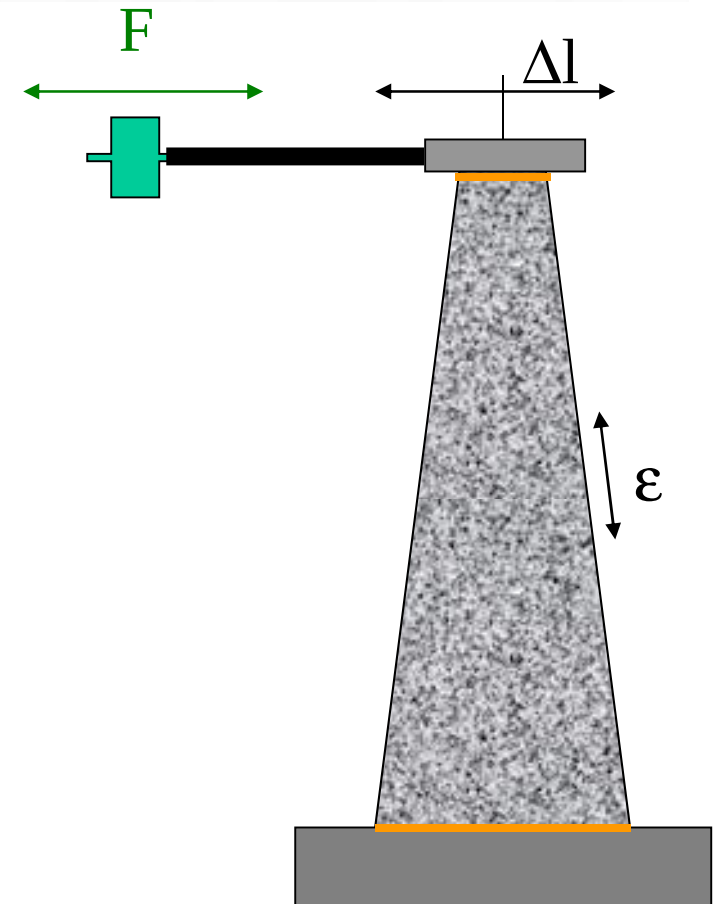


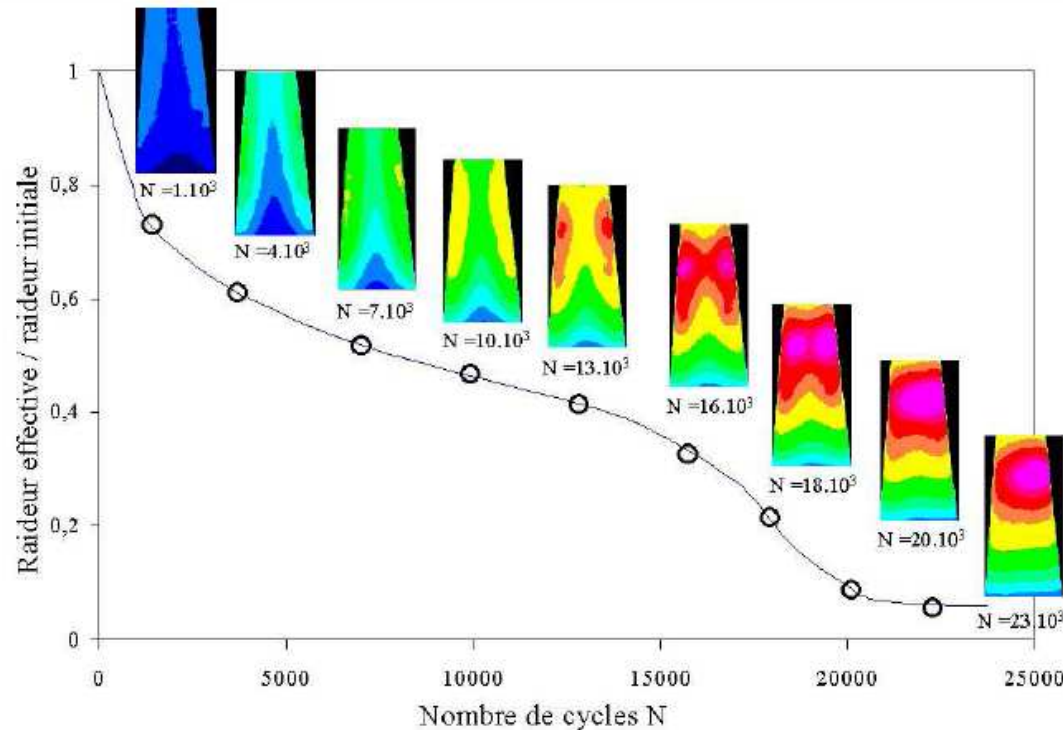
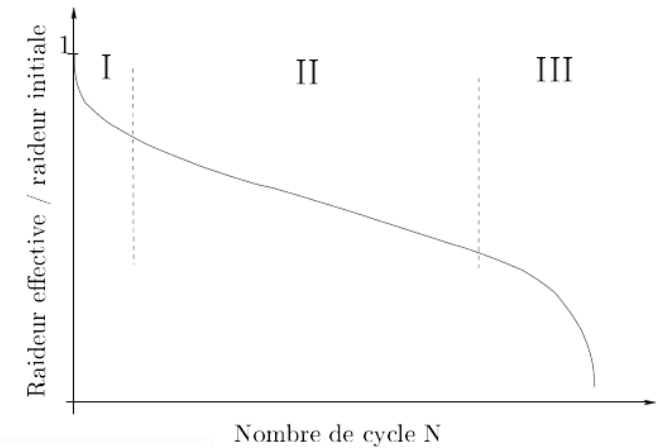
Figure 1.6 : signal de déplacement symétrique imposé à la petite base de l'éprouvette.



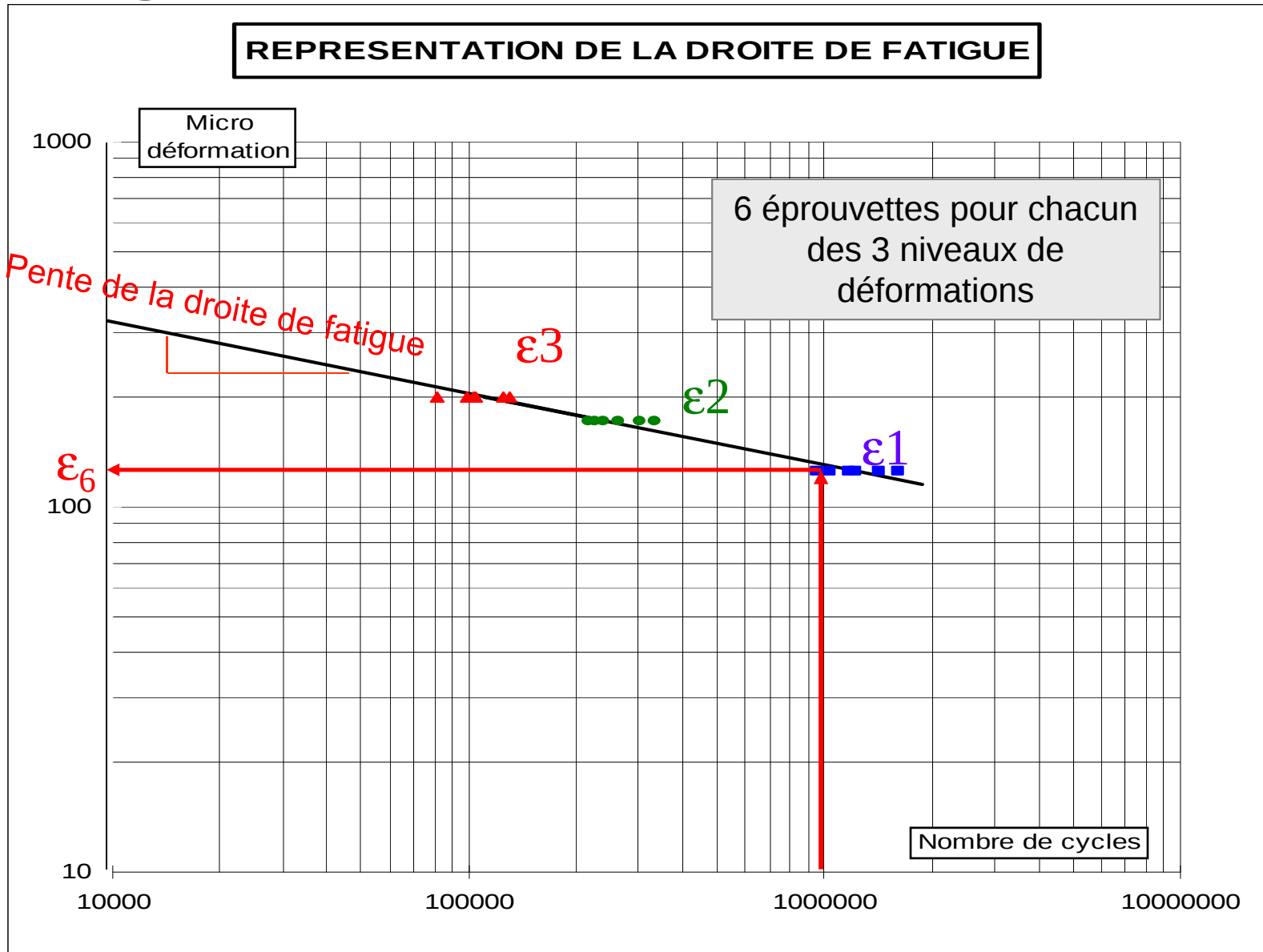
Fatigue

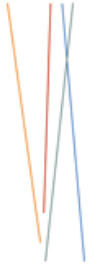
➤ Les 3 phases de l'essai de fatigue

- I : baisse de module lié au réchauffement interne de l'éprouvette
- II : endommagement progressif / fatigue
- III : localisation de l'endommagement & rupture Essai normalisé



Fatigue

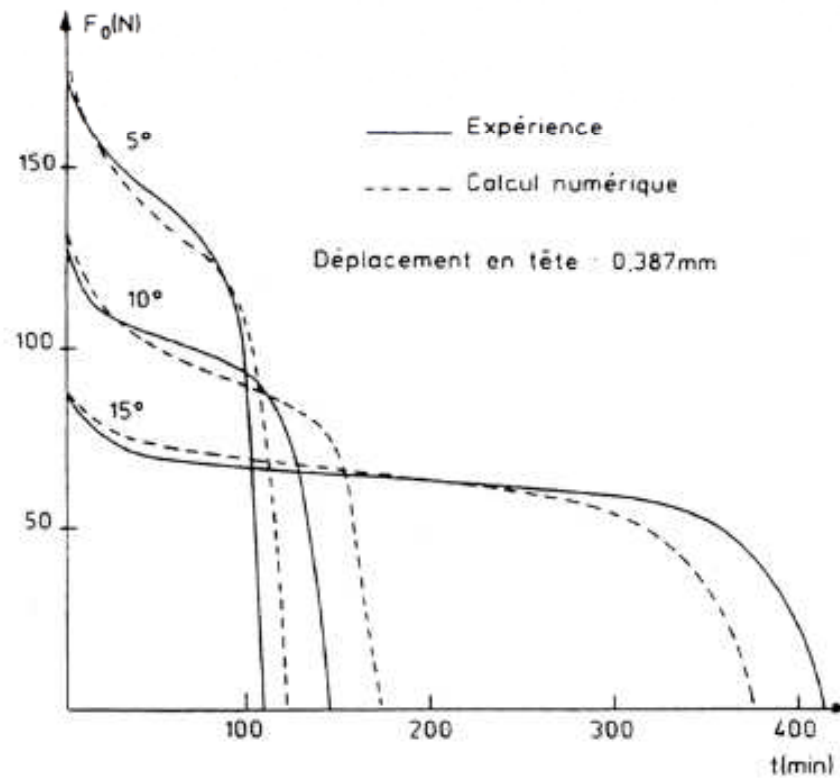




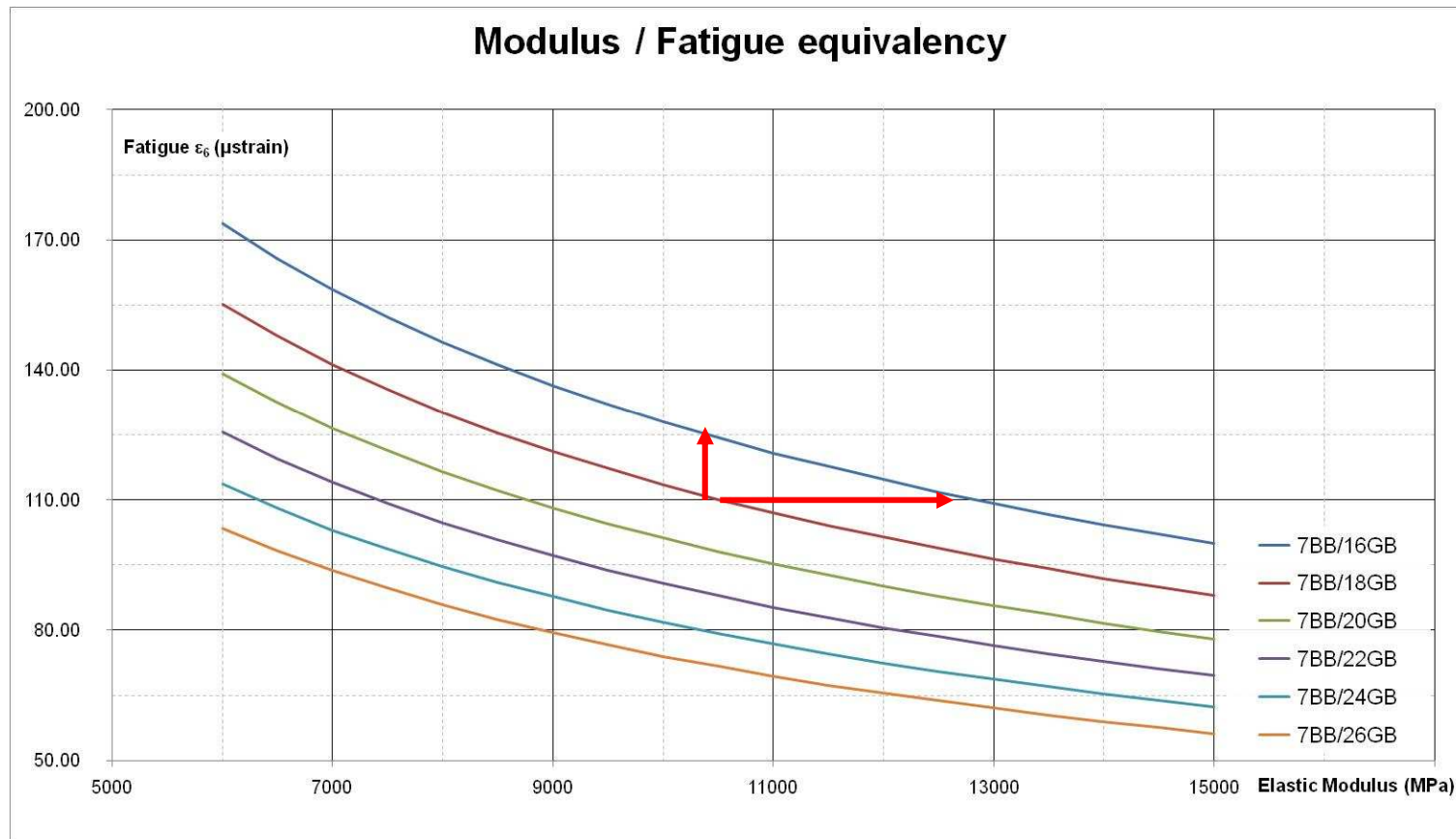
Fatigue

➤ Impact de la température sur la performance en fatigue

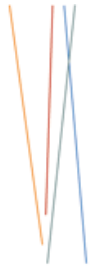
- Peu de conclusions définitives sur ce paramètre



Influence du module et de la fatigue



+2,000 MPa sur le module → -2 cm
+15 μstrain sur la fatigue → -2 cm



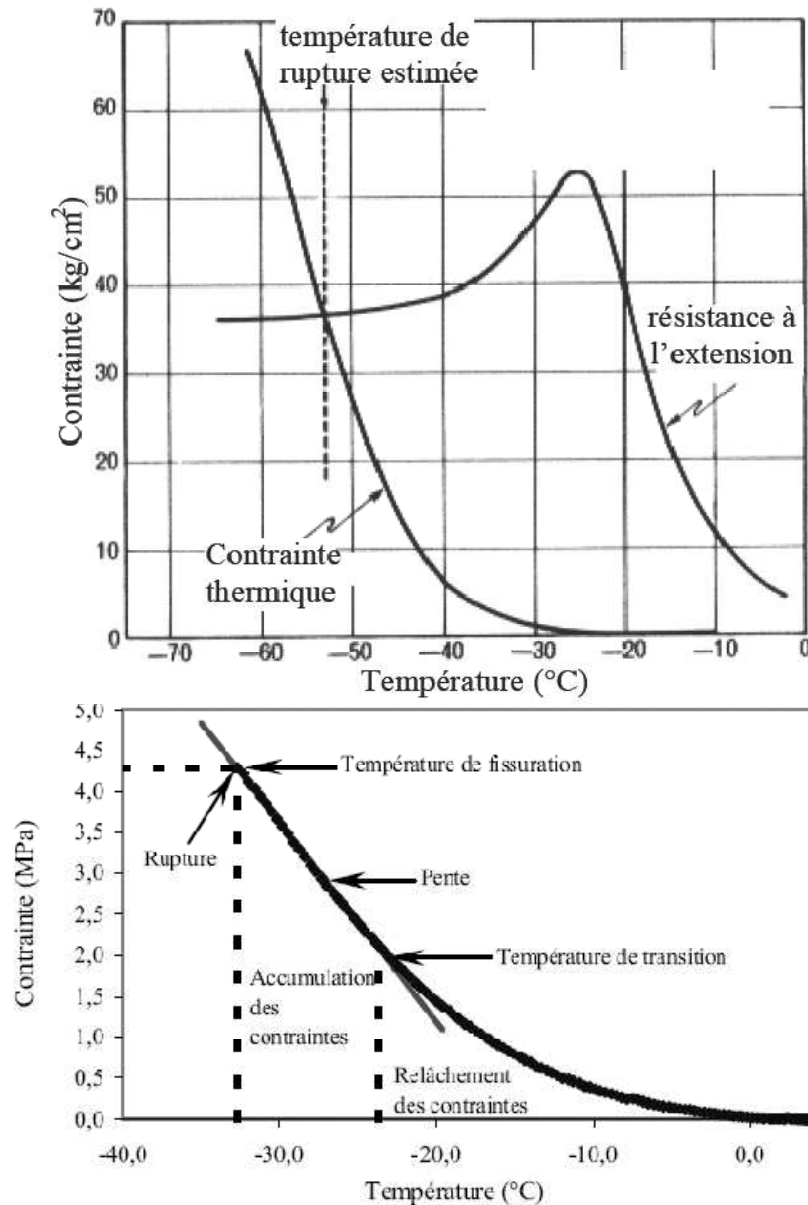
Paramètres influents sur module/fatigue

Intérêt des enrobés spéciaux

	Paramètre	Module	Résistance à la Fatigue
Bitume			
Pénétrabilité			
Vieillissement			
Enrobés			
Taux de liant		 5-6% 	
% de fines		 8-9% 	Effet indirect par taux de liant
D			Effet indirect par taux de liant
% de vides			

Besoin d'une étude de formulation complète

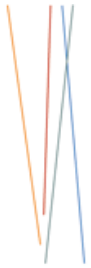
Retrait empêché



-10°C/h, 0 microdéf

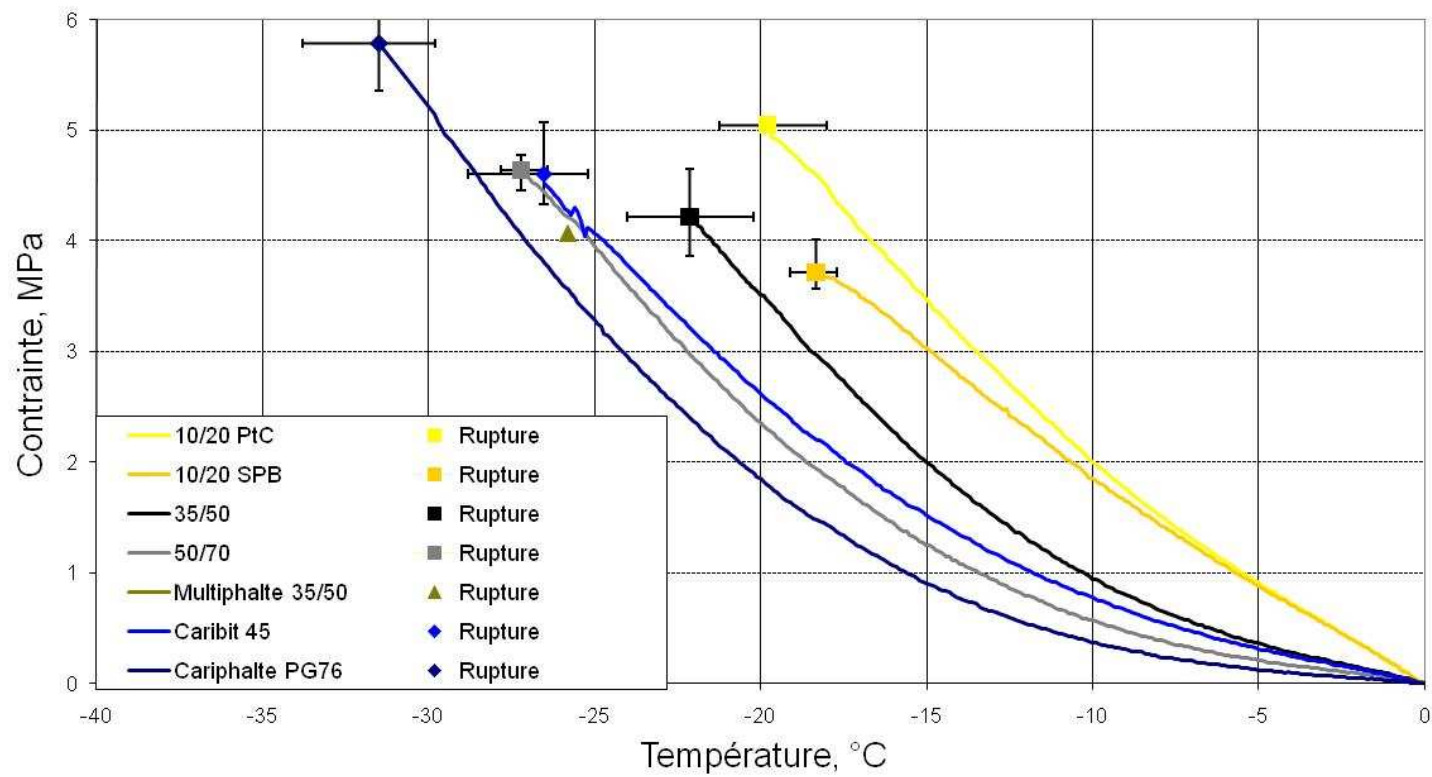
On tire sur l'enrobé qui tend à se contracter avec le refroidissement

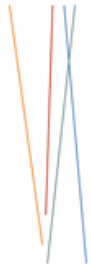
AASHTO TP10



Retrait empêché

Synthèse sur différents bitumes - Résultats TSRST





Conclusions

- Comportement complexe des enrobés = matériaux visco élastiques
 - Température / fréquence
 - Adaptation intuitive : charge lente (ville) = réduction du module (-30%)
- Module élastique des enrobés = performance mécanique
 - En relation avec le dimensionnement de chaussée
 - Mais aussi balance entre module et fatigue
- Équipements coûteux (100 à 300K \$)
 - Presse + métrologie
 - Scie
 - Carotteuse
 - Banc de compactage
- Essais longs et mobilisants
- MTQ : Méthode mécanistique non pleinement reconnue pour l'instant
 - Variante non accessible
 - Matériaux nouveaux difficiles à mettre en valeur
- Approche plus complète en développement