

Direction du
Laboratoire des chaussées

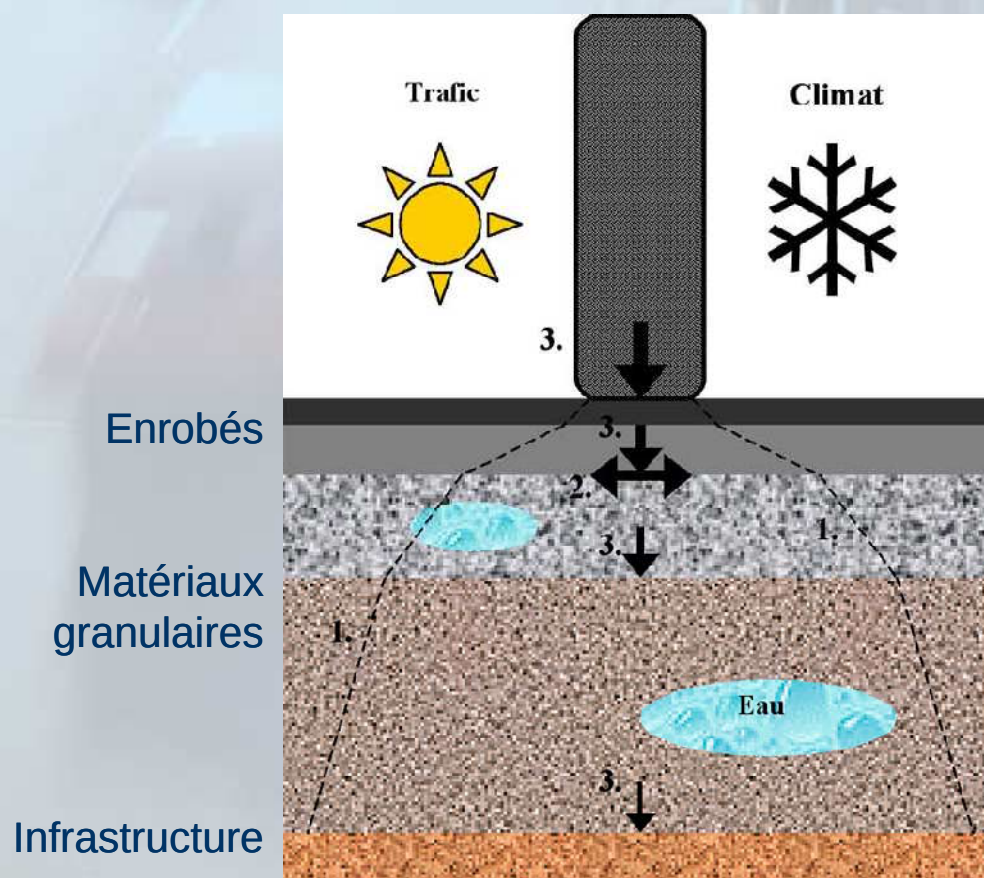
Détermination du comportement mécanique des matériaux pour le dimensionnement des chaussées souples au MTQ

Félix Doucet, ing. M.Sc.A.
Service des matériaux d'infrastructures
Direction du laboratoire des chaussées

Formation Technique Bitume Québec
Structures des chaussées souples
23 novembre 2010, Montréal

Mécanique des matériaux de chaussée

- **Mécanique des matériaux**
 - Relation contrainte-déformation (rigidité)
 - Modèles d'endommagement (performance)



- Module complexe
- Orniérage
- Fissuration thermique
- Fatigue
- Module réversible
- Déformation permanente
- Soulèvement gel

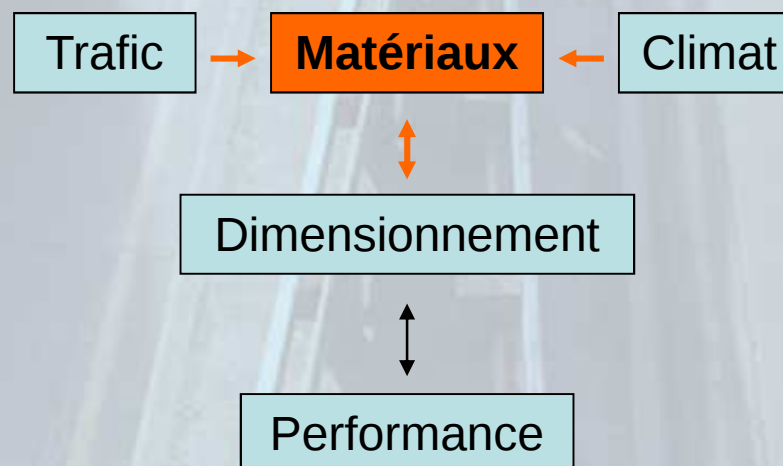
Dimensionnement des chaussées

- **Paramètres d'influence**

- Climat (température, eau, gel)
- Trafic (vitesse, charge)

- **Choix de l'ingénieur**

- Sélection des matériaux (comportement mécanique)
- Épaisseur des couches (dimensionnement)



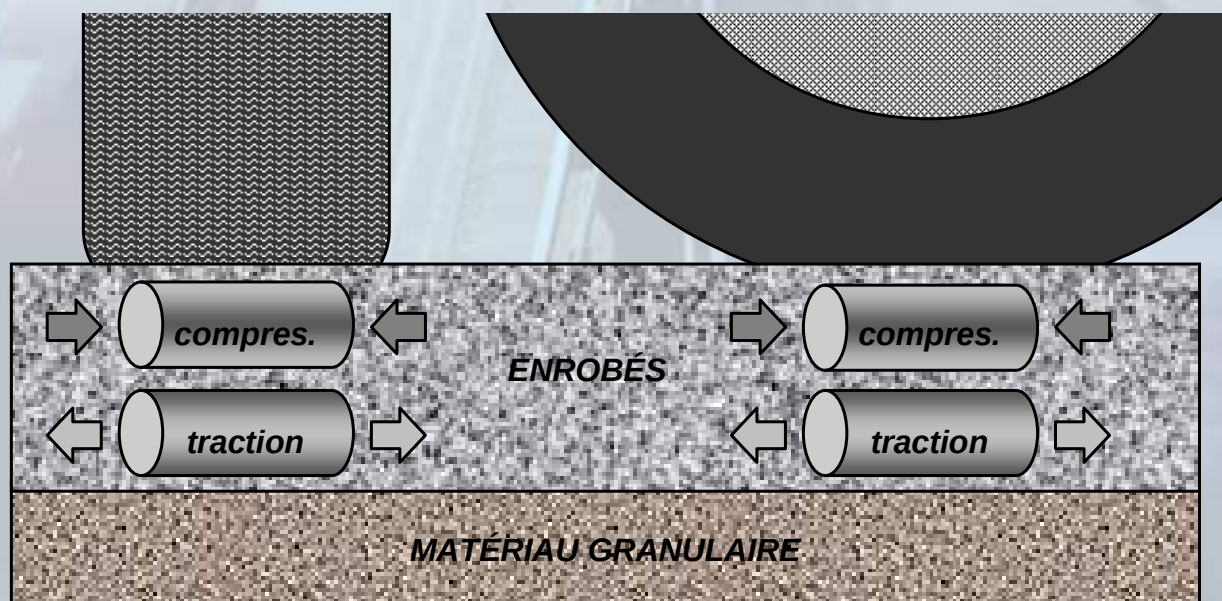
Essais comportement mécanique au MTQ

<i>Matériau</i>	<i>Comportement mécanique</i>	<i>Essai</i>
Enrobé	Module complexe	Traction-compression directe
	Résistance fatigue	Traction-compression directe
	Résistance orniérage	Orniéreur (contrôle)
	Résistance fissuration thermique	Retrait thermique empêché (contrôle)
Matériau granulaire	Module réversible	Triaxial à chargements répétés
	Résistance déformation permanente	Triaxial à chargements répétés
Infrastructure	Module réversible	In situ (DCP, FWD, autre)
	Soulèvement gel	Potentiel de ségrégation (SP)

Enrobés - Sollicitation sur la route

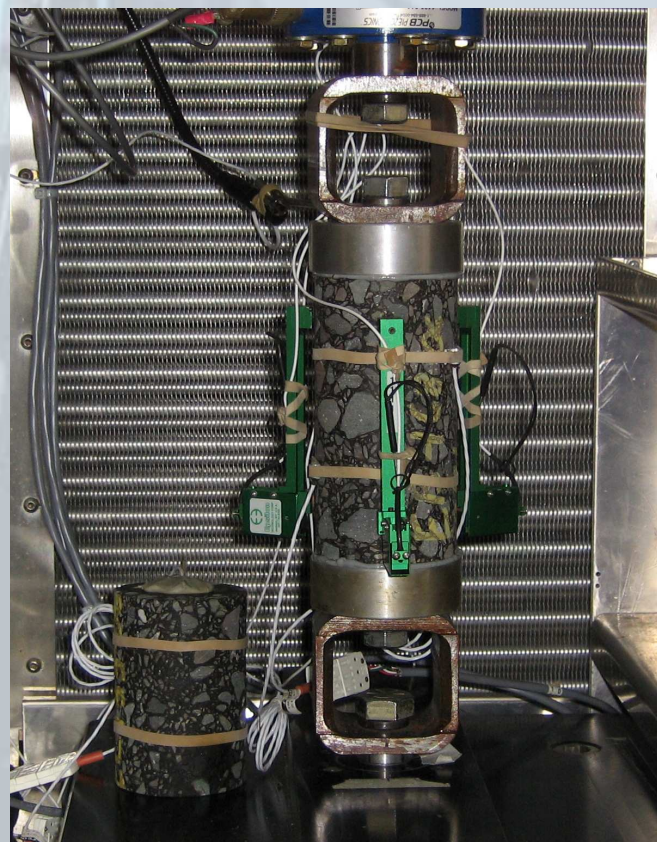
- **Sollicitation en flexion**

- Enrobé sollicité en flexion (matériau lié)
- Traction à la base et compression en surface
- Influence de la température et de la vitesse (viscoélastique)



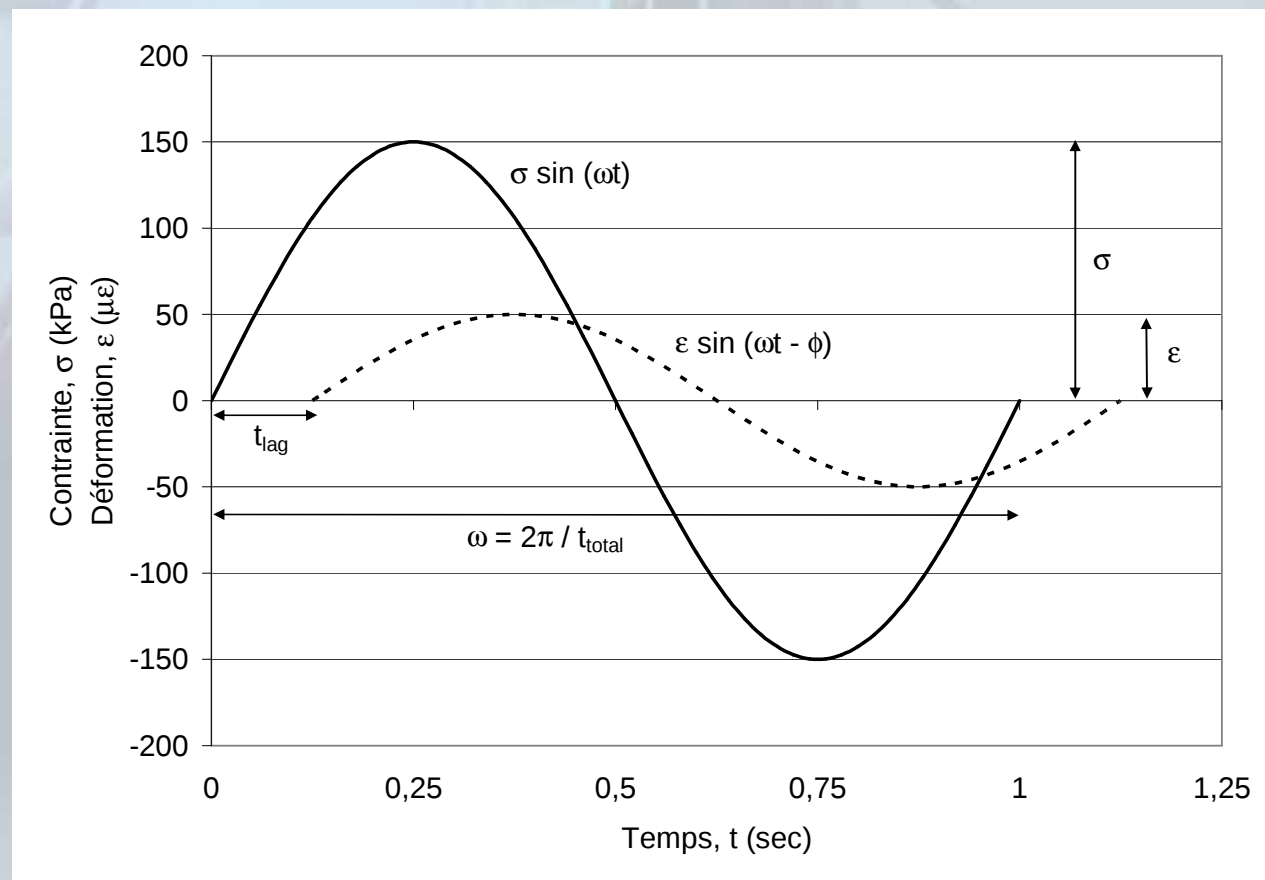
Enrobés – Essai de traction-compression directe

- **Essai homogène**
 - Contrainte et déformation uniformément distribuées
 - Détermination directe des contraintes et déformations



Enrobés – Chargement cyclique

- **Sollicitation sinusoïdale**
 - Déphasage entre la contrainte et la déformation (viscoélastique)



Enrobés – Module complexe

- **Module complexe**

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

- Déphasage entre la contrainte et la déformation (nombre complexe)
- Modèle de Huet-Sayegh (LCPC, France)

- **Module dynamique**

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

- Intensité du module complexe (module élastique)
- Modèle de Witczak (MEPDG, Etats-Unis)

Module complexe – Méthode LC 26-700

- **Paramètres d'essai**
 - Déformation = $50 \mu\epsilon$
 - Balayage de fréquence = 0.1, 0.3, 1, 3, 10 Hz
 - Températures = -20, -10, 0, 10, 20, 30, 40 °C

Transports Québec 	SECTEUR – ENROBÉS	Section 4
MÉTHODE D'ESSAI LC 26-700	DÉTERMINATION DU MODULE COMPLEXE DES ENROBÉS	Page 1 de 12
		Date 2007 12 15

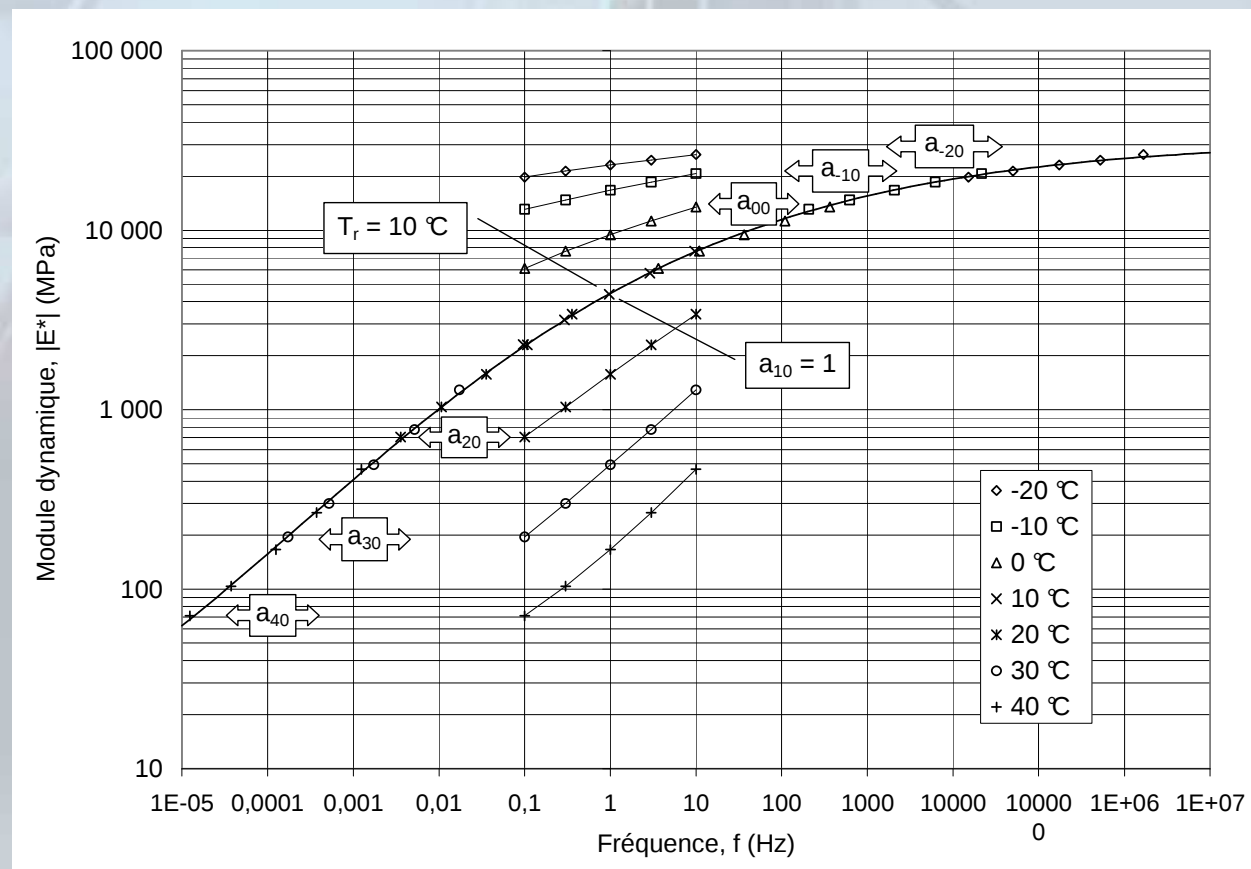
1. Objet

La présente méthode d'essai a pour objet la détermination du module complexe (E^*) des enrobés à l'aide d'un équipement de tension-compression cyclique. Le E^* est déterminé à différentes fréquences et températures afin de caractériser le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé. Le E^* est un nombre complexe, généralement défini selon deux paramètres, soit le module dynamique ($|E^*|$), qui est la norme de E^* , et l'angle de phase (ϕ), qui est l'argument de E^* . Le $|E^*|$ est généralement utilisé pour classer les matériaux selon leur comportement mécanique et pour effectuer le calcul des structures de chaussée. Le ϕ permet d'apprécier le comportement viscoélastique de l'enrobé.

La méthode d'essai s'applique aux enrobés contenant un pourcentage maximal de 5 % de particules retenues sur le tamis de 20 mm.

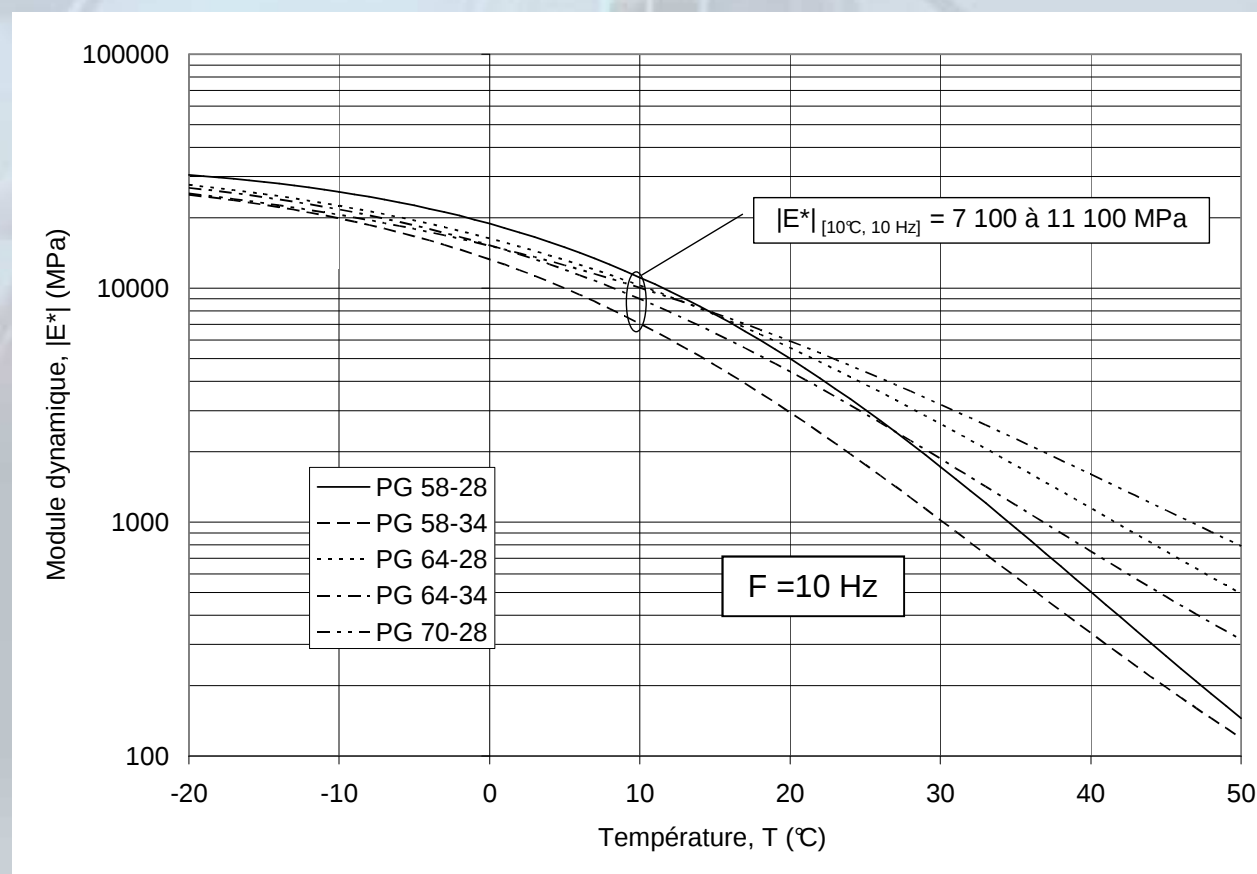
Module complexe – Courbe maîtresse $|E^*|$

- **Construction courbe maîtresse**
 - Courbe unique à une température de référence (10°C)
 - Principe d'équivalence fréquence-température



Module complexe – Influence du bitume

- **Courbes maîtresses générales**
 - Moyenne de trois enrobés (ESG-10, ESG-14, GB-20)
 - Courbe maîtresse générale par type de bitume



Module complexe – Rapport synthèse

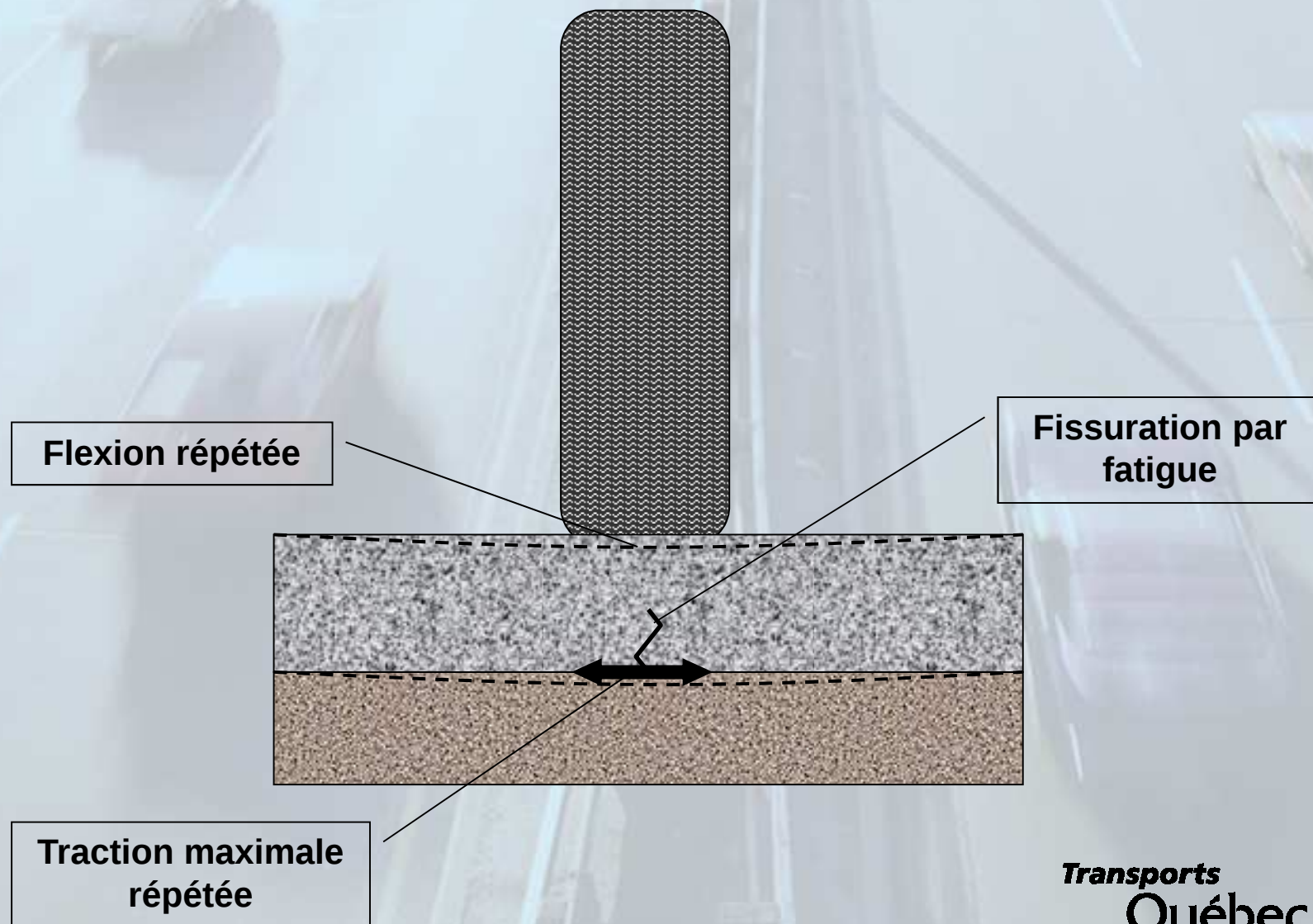
• Table des matières

- Théorie
- Essai TCD
- Étude de répétabilité
- Résultats individuels
- Modèles généraux

Bitumes	Enrobés		
	ESG-10	ESG-14	GB-20
PG 58-28	*	*	*
PG 58-34	*	Rep.	*
PG 64-28	*	*	*
PG 64-34	*	*	*
PG 70-28	*	*	*

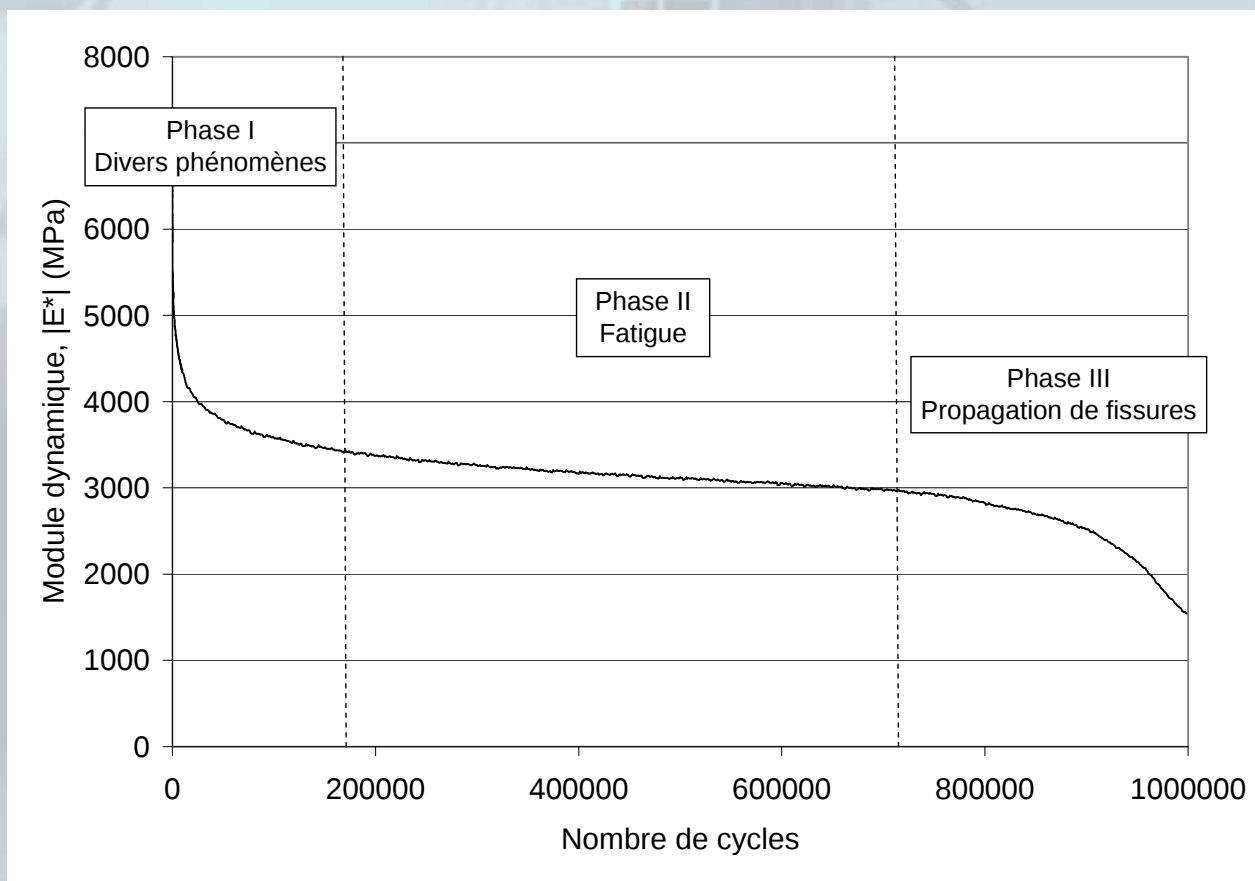


Enrobés – Endommagement par fatigue



Enrobés – Résistance à la fatigue

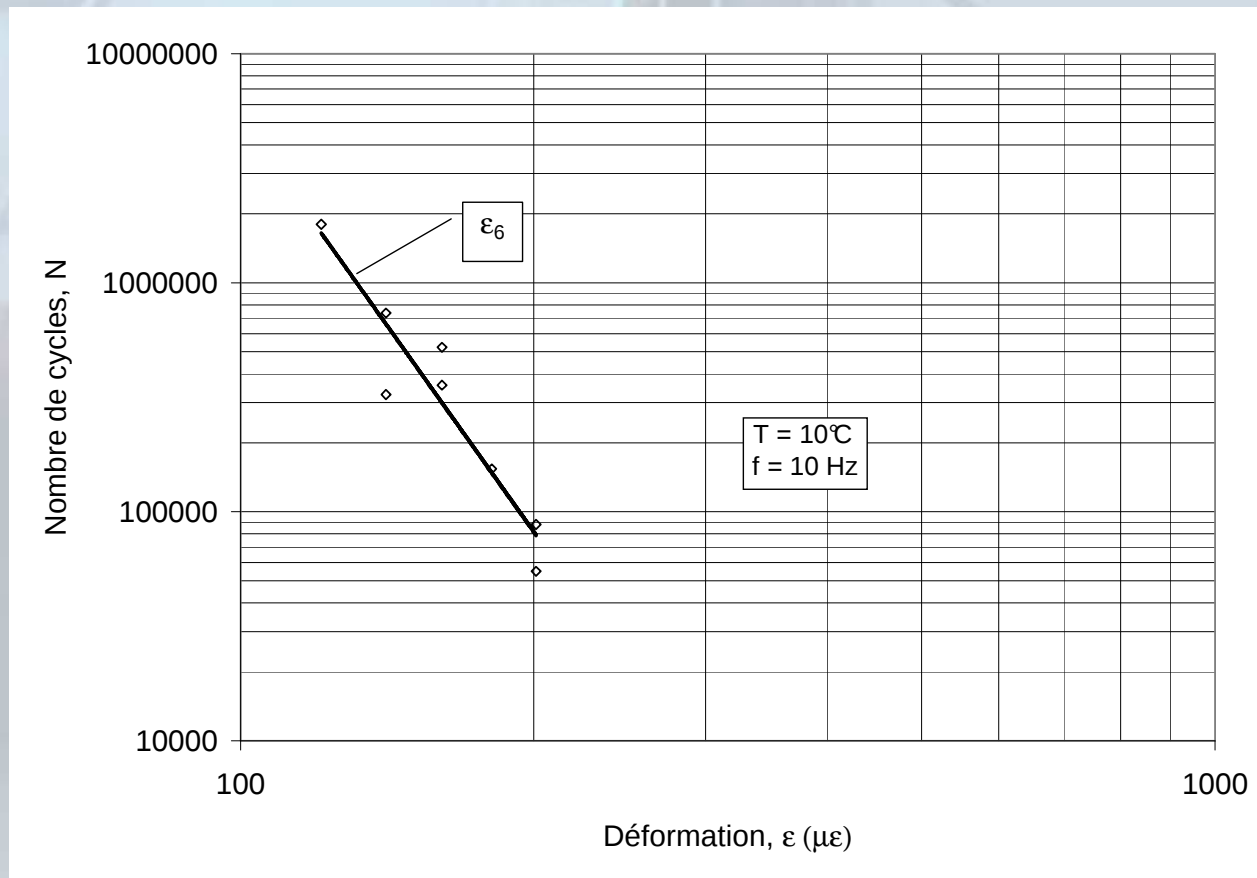
- **Courbe d'endommagement par fatigue**
 - Évolution de la fatigue pour une condition d'essai (10°C, 10 Hz)
 - Endommagement en 3 phases



Fatigue – Approche classique 50%

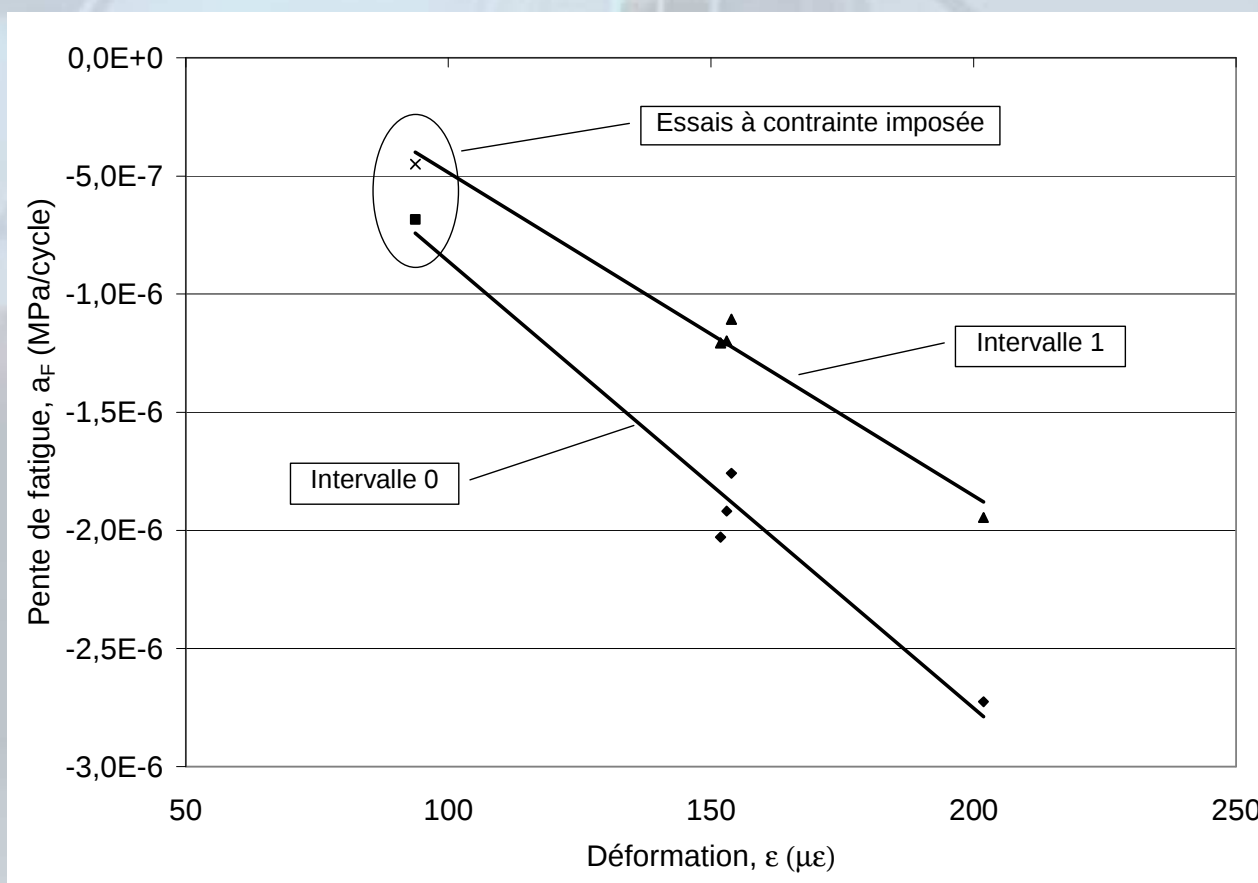
- **Droite de fatigue**

- Nombre de cycles pour que la rigidité chute de moitié (50%)
- Différents niveaux de contrainte ou déformation (contradictoire)



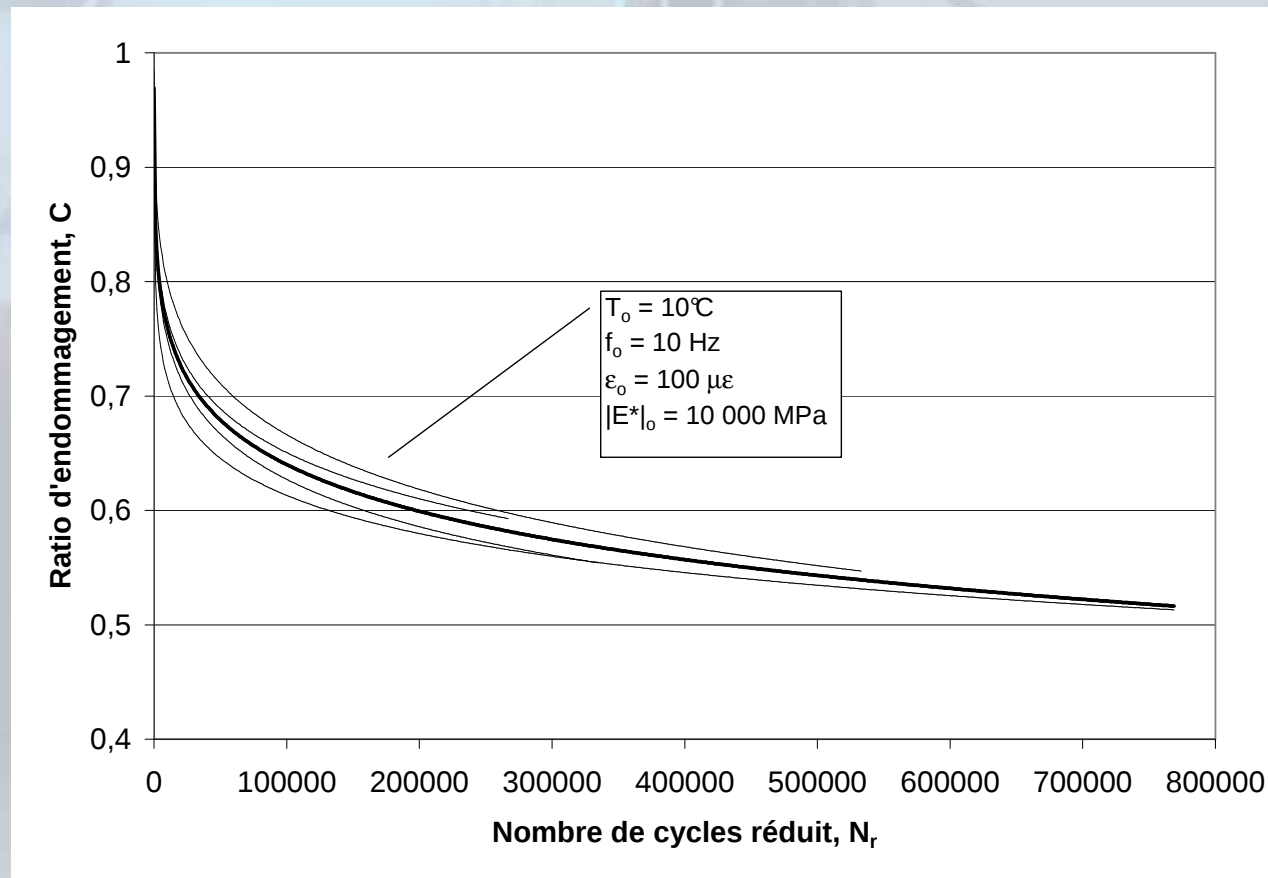
Fatigue – Taux d'endommagement

- **Di Benedetto et coll., ENTPE, France**
 - Pente corrigée de la phase II (fatigue)
 - Analyse unifiée des essais à contrainte et déformation imposées



Fatigue – Théorie de l'endommagement continu

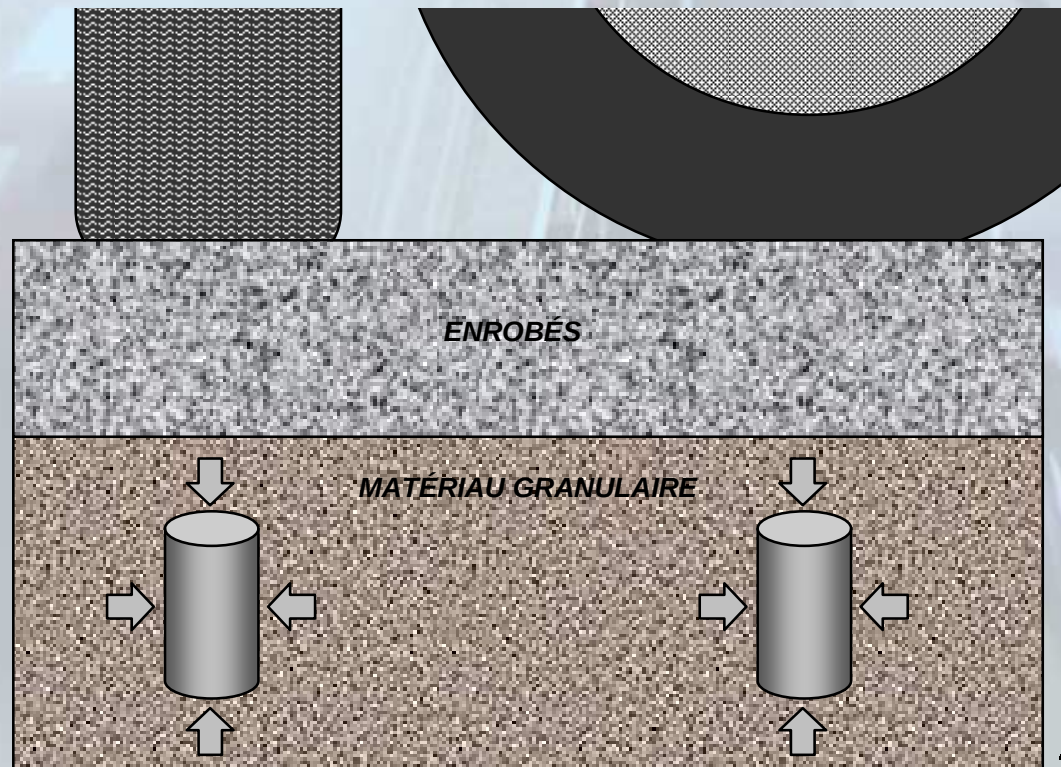
- **Kim et coll., NCSU, Etats-Unis**
 - Courbe de fatigue unique pour des conditions de référence
 - Permet de limiter le nombre d'essai



Matériaux granulaires – Sollicitation sur la route

- **Sollicitation triaxiale**

- Compression triaxiale répétée (matériau non-lié)
- Dépendant de l'état de contrainte (non-linéaire)
- Influence de la teneur en eau



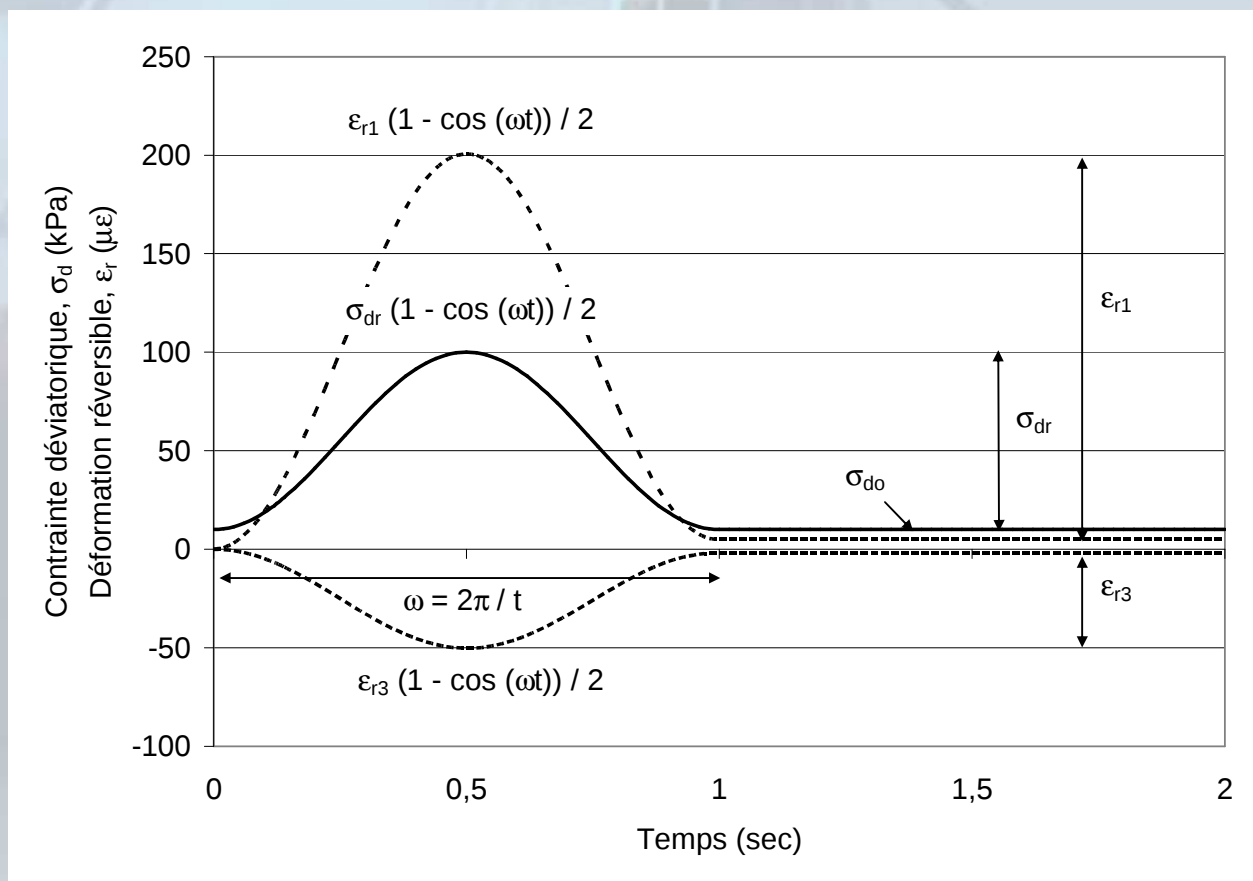
Mat. granulaires – Essai triaxial à chargement répétés

- **Essai homogène**
 - Confinement statique (air)
 - Chargement axial répété (presse hydraulique asservie)



Mat. granulaires – Chargement répété

- **Sollicitation répétée**
 - Contrainte déviatorique répétée (axiale)
 - Analyse du retour élastique (réversible)



Mat. granulaires – Module réversible

- **Module réversible**

$$E_r = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_{1r}}$$

$$K_r = \frac{p}{\varepsilon_{vr}}$$

$$G_r = \frac{q}{3\varepsilon_{sr}}$$

- Rapport entre la contrainte et la déformation réversible
- Modèle de Uzan (MEPDG, États-Unis)
- Modèle de Boyce (LCPC, France)

- **Coefficient de Poisson réversible**

$$\nu_r = -\frac{\varepsilon_{3r}}{\varepsilon_{1r}}$$

- Rapport entre les déformations réversibles
- Considéré constant (MEPDG, États-Unis)

Module réversible – Méthode LC 22-400

- **Paramètres d'essai**
 - 5 pressions de confinement statique
 - 3 contraintes déviatoriques par confinement (15 contraintes)
 - 3 teneurs en eau (initiale, saturée, drainée)

Transports Québec 	SECTEUR – SOLS ET FONDATIONS	Section 2
MÉTHODE D'ESSAI LC 22-400	DÉTERMINATION DU MODULE RÉVERSIBLE DES MATÉRIAUX GRANULAIRES	Page 1 de 14
		Date 2007 12 15

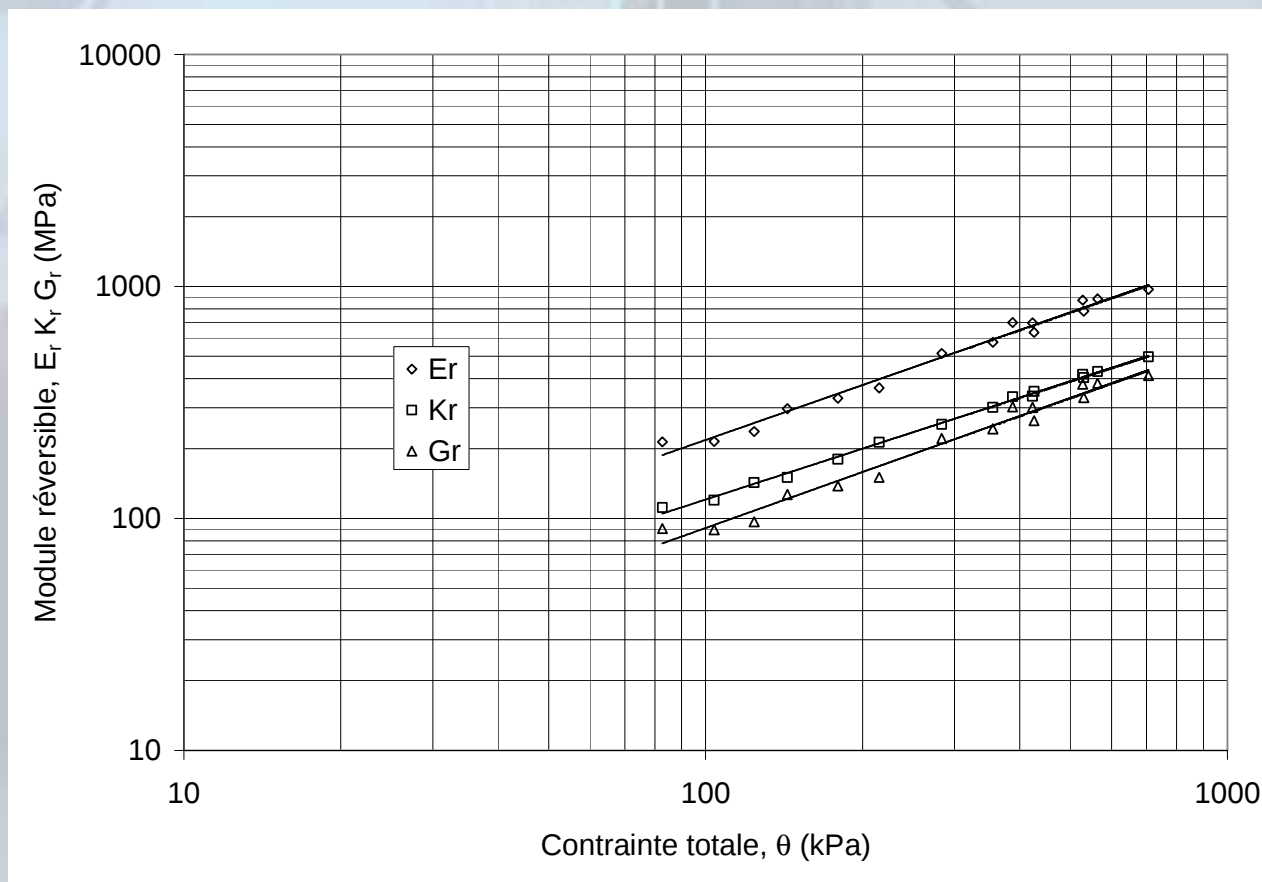
1. Objet

La présente méthode d'essai a pour objet la détermination du module réversible (E_r) des matériaux granulaires à l'aide d'un équipement triaxial à chargement répété. Le E_r est déterminé à différents états de contrainte et à différentes teneurs en eau, afin de caractériser le comportement réversible non linéaire du matériau granulaire et l'influence du degré de saturation. Le coefficient de Poisson réversible (ν_r) est déterminé simultanément. Les E_r et ν_r sont généralement utilisés pour classer les matériaux selon leur comportement mécanique et pour effectuer le calcul des structures de chaussée.

La méthode d'essai s'applique aux matériaux granulaires non liés, écrêtés au tamis 31,5 mm et contenant un pourcentage maximal de 20 % de particules passant le tamis de 80 μm . L'indice de plasticité I_p doit être inférieur à 10.

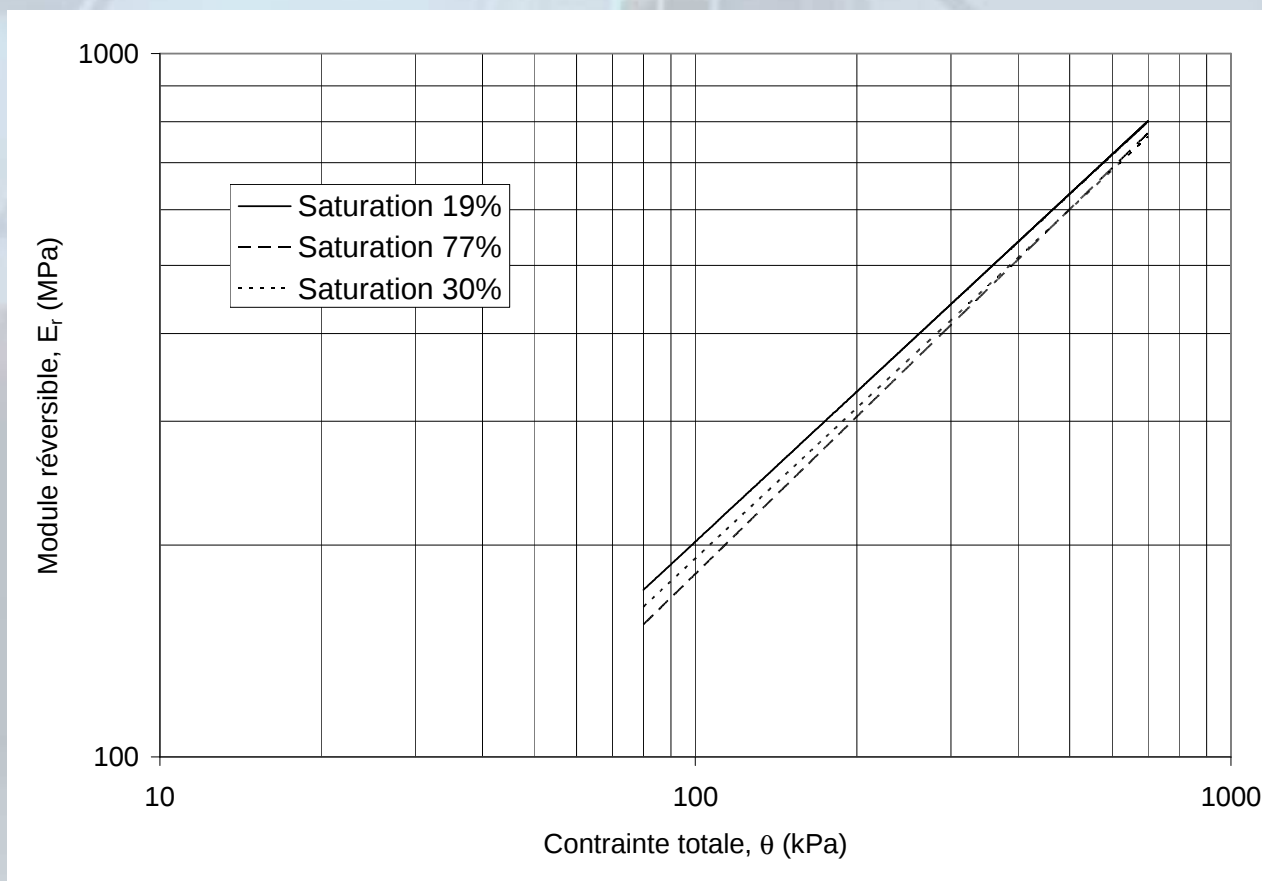
Module réversible – Modèles de E_r

- **Modèles de puissance**
 - Fonction de l'état de contrainte (non-linéaire)
 - Divers types de module réversible pour l'analyse



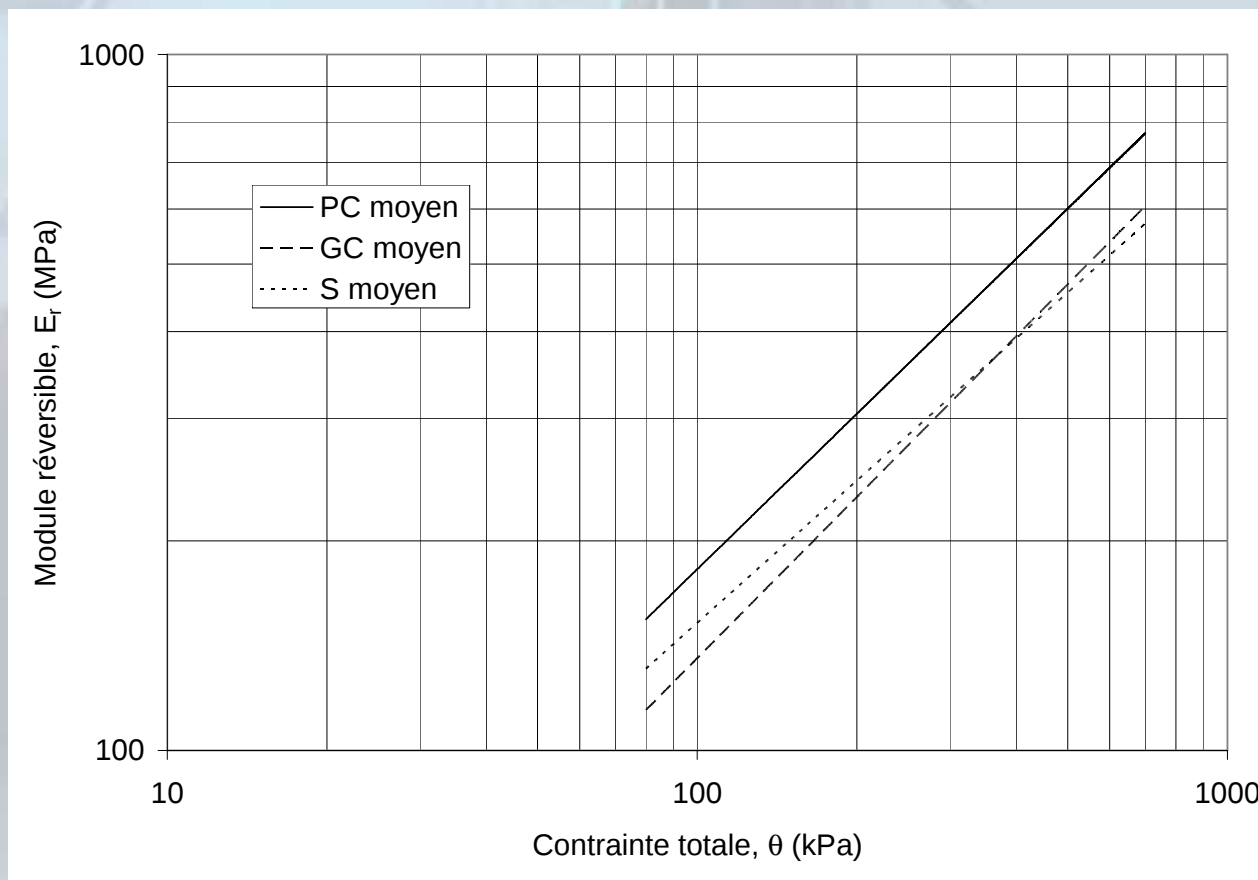
Module réversible – Influence de teneur en eau

- **Influence du degré de saturation**
 - Trois degrés de saturation (initial, saturé, drainé)
 - Influence générale de la saturation (pierre concassée MG-20)



Module réversible – Modèles généraux

- **Module réversible général**
 - Teneur en eau saturée (succion matricielle nulle)
 - Modèles généraux (pierres concassée, gravier concassé, sable)



Module complexe – Rapport synthèse

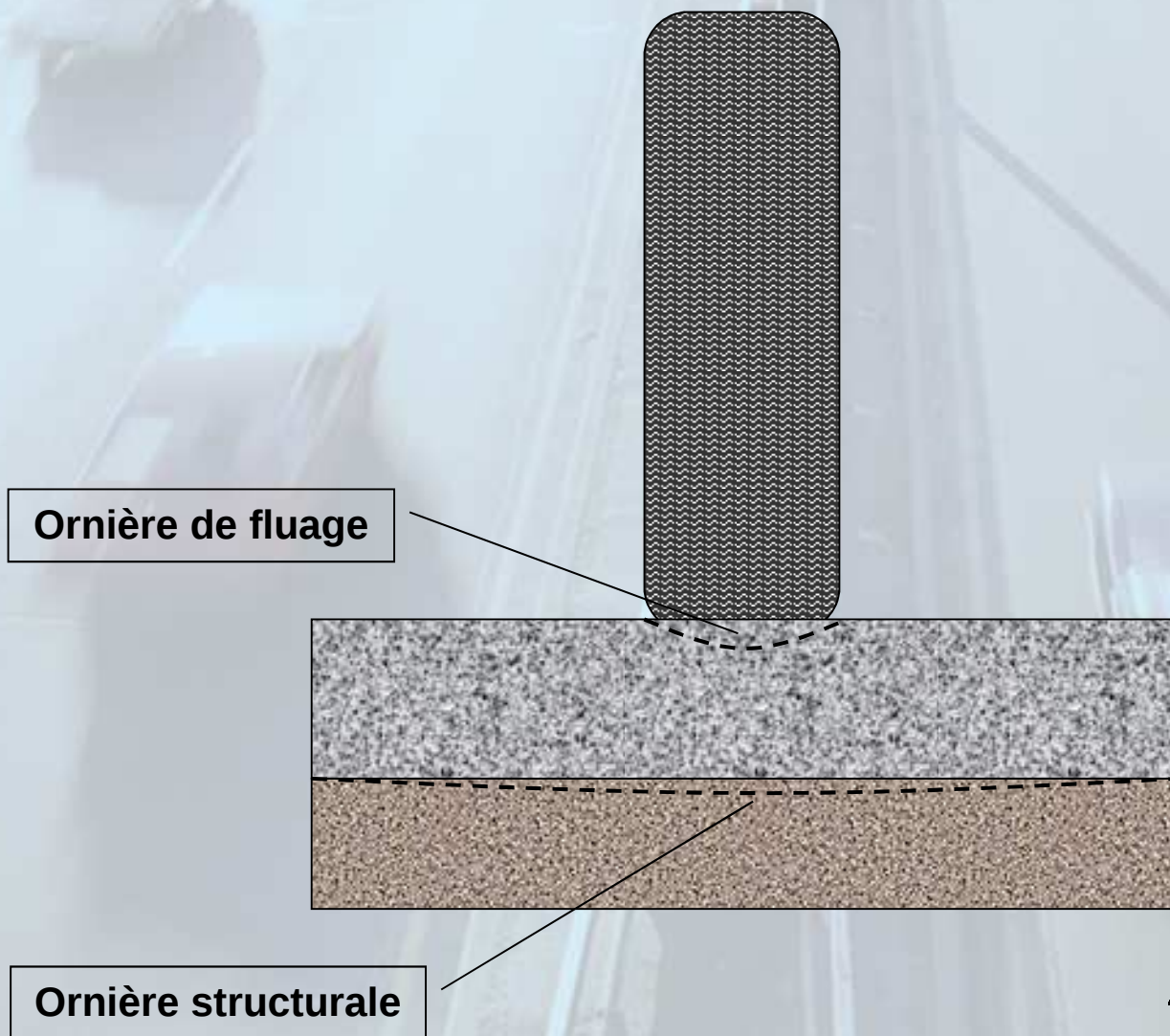
• Table des matières

- Théorie
- Essai TCR
- Étude de répétabilité
- Résultats individuels
- Modèles généraux

Matériaux	Description	Nombre
MG 20	Pierre concassée	22
MG 20	Gravier concassé	8
MG 112	Sable	6

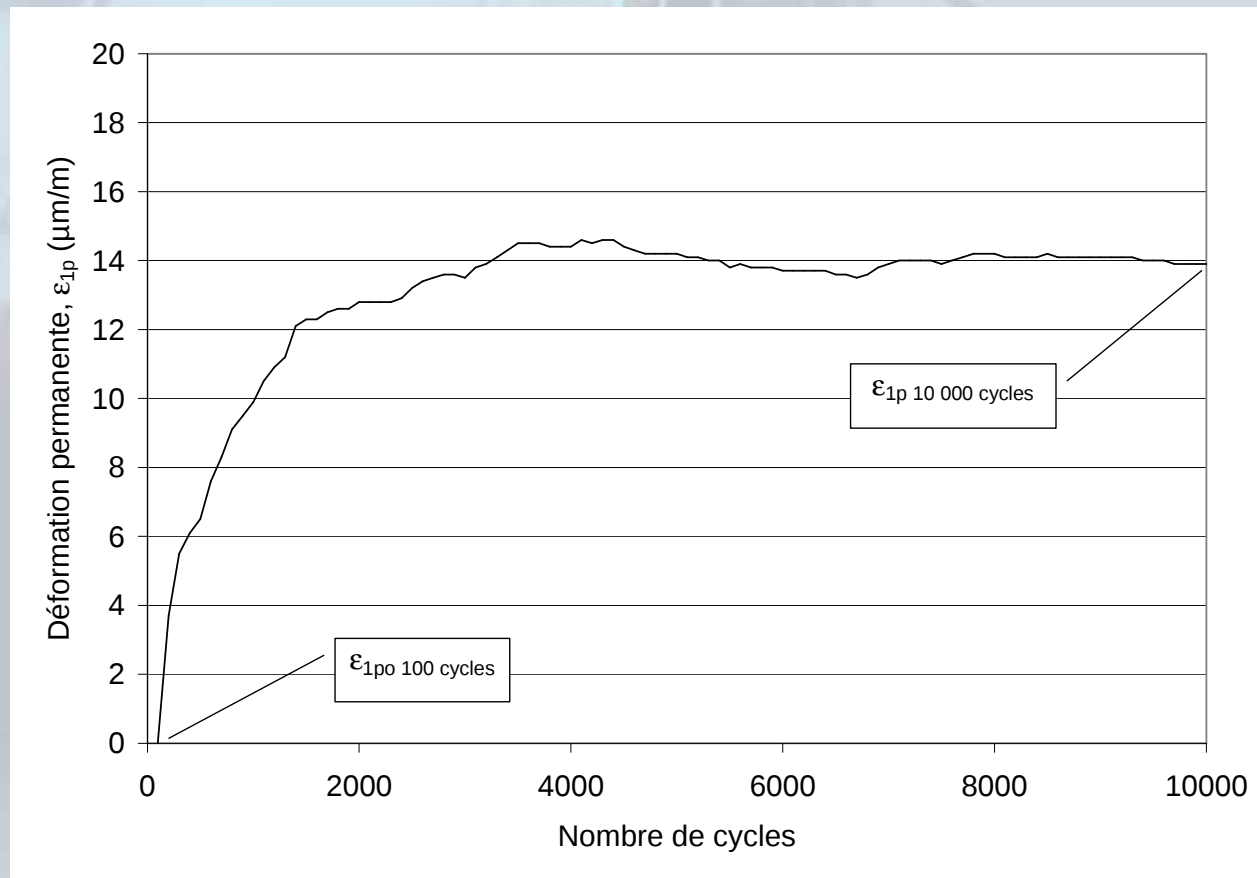


Enrobés – Endommagement par orniérage



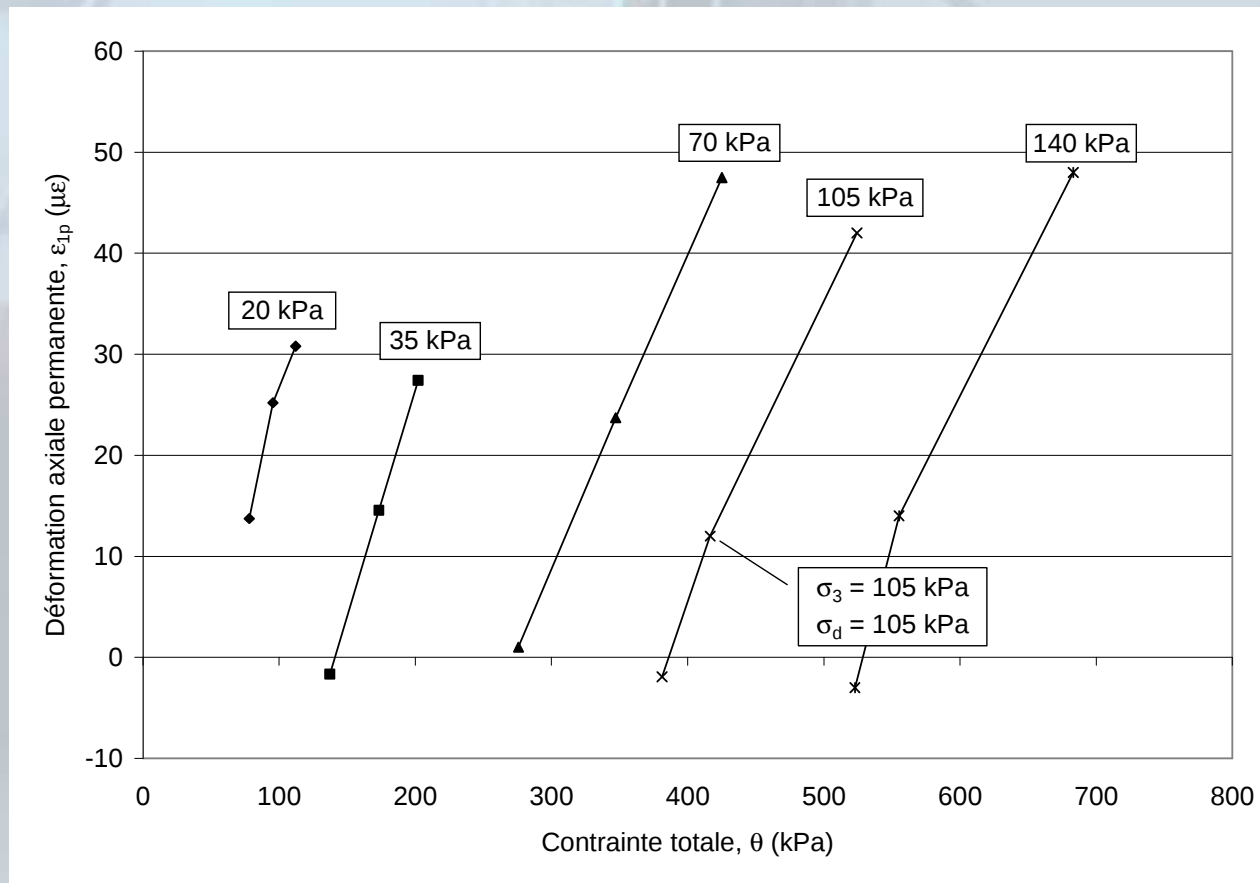
Mat. Granulaires – Résistance à la déformation permanente

- **Courbe d'endommagement par déformation permanente**
 - Évolution de la déformation permanente pour une condition d'essai
 - Comportement tend à se stabiliser avec le nombre de cycles



Mat. granulaires – Déformation permanente

- **Lytton et coll., Texas A&M, États-Unis**
- **Hornych et coll., LCPC, France**
 - Différents états de contrainte à 10 000 cycles



Développement mécanique des matériaux au MTQ

<i>Matériau</i>	<i>Comportement mécanique</i>	<i>État du développement</i>
Enrobé	Module complexe	Développement complété [100%]
	Résistance fatigue	Développement en cours [50%]
	Résistance orniérage	À développer (essai de contrôle existant)
	Résistance fissuration thermique	À développer (essai de contrôle existant)
Matériau granulaire	Module réversible	Rapport synthèse en rédaction [80%]
	Résistance déformation permanente	À développer (aucun essai) [20%]
Infrastructure	Module réversible	Approches in situ existantes
	Résistance gel	Article à écrire [90%]

État de la situation

- **Développement de méthodes d'essai mécanique**
 - Évaluation de préjudice (non-conformité)
 - Évaluation de nouveaux produits (nouvelles techniques)
 - Développement des spécifications (mise à jour)
- **Études axés sur la performance**
 - Expertises à l'interne (court terme)
 - R&D à l'interne (moyen terme)
 - Recherche universitaire (long terme)



MERCI