

ANALYSE DE LA CAPACITÉ STRUCTURALE DES CHAUSSÉES MUNICIPALES

André Contant, ing., M.Sc.A.

Groupe Qualitas inc., membre du Groupe SNC-Lavalin inc.

Congrès INFRA 2012

Omni Mont-Royal, Montréal, du 19 au 21 novembre 2012

AGENDA

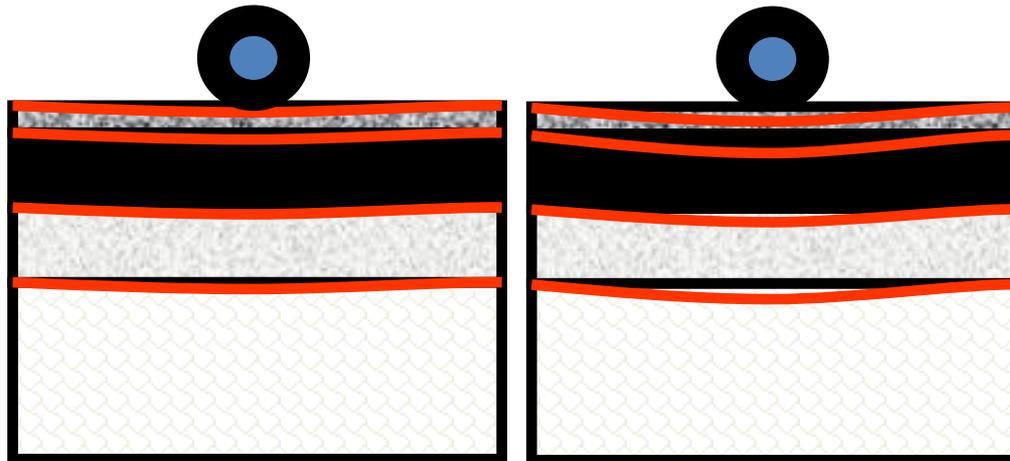
- › **Définition**
- › **Équipements de mesure**
- › **Contexte des mesures**
- › **Analyses et interprétation**
- › **Conclusions**

CAPACITÉ STRUCTURALE

- › **Aptitude de la chaussée à répartir les charges des véhicules lourds sur l'infrastructure sous-jacente**
 - › Évolution lente de sa condition
- › **La capacité structurale est souvent associée à la durée de vie résiduelle.**
- › **Durée de vie : structurale \neq fonctionnelle**

CAPACITÉ STRUCTURALE

- › **Capacité structurale → déformabilité**
 - › Déformations importantes associées à la fatigue et à la dégradation des matériaux



- › **Capacité structurale → mesures de déformation**

ÉQUIPEMENTS

- › Dans les « Classeurs chaussées » du Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CÉRIU), on présente trois techniques non destructives servant à caractériser le comportement structural d'une chaussée :
 - › Benkelman Beam (BB)
 - › Dynaflect
 - › Déflectomètre à masse tombante (*Falling Weight Deflectometer, FWD*)

ÉQUIPEMENTS

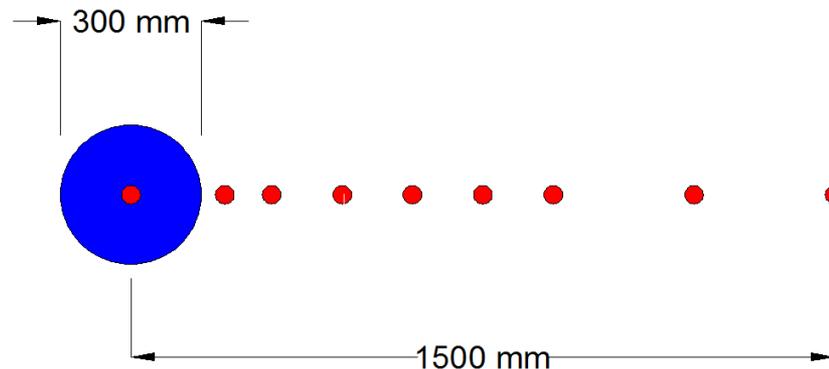
› *Falling Weight Deflectometer (FWD)*



ÉQUIPEMENTS

› FWD

- › Charge dynamique de type impulsion (7 à 300 kN)
- › Plaque circulaire de 300 mm
- › Mesure de la déflexion de surface en 7 à 9 points
- › Norme ASTM D4694 : *Deflections with a Falling-Weight Impulse Load Device*



CONTEXTE

- › **Niveau Réseau (gestion des chaussées)**
 - › Plan directeur
 - › Priorités et besoins d'entretien
 - › Budgétisation

- › **Niveau Projet (études de réhabilitation)**
 - › Diagnostic pour identifier les problèmes
 - › Conception de solutions adaptées



CONTEXTE

› Constat

- › Méthodologie de relevés non définie
 - › Nombre d'essais
- › Méthodologie d'analyse non définie
- › Qu'est-ce qu'on cherche à mesurer ?

CONTEXTE

› Niveau Réseau

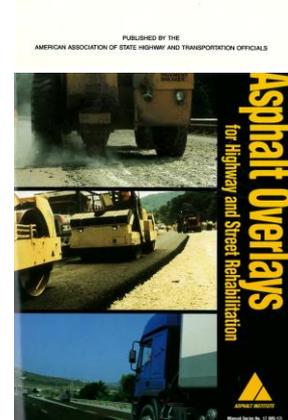
- › Informations limitées
- › Pas de forages
 - › Composition des chaussées souvent inconnue
- › Pas de comptage
 - › Volume et type de sollicitation souvent inconnus
- › Nombre limité d'essais par section de chaussée
 - › Généralement trois à cinq essais par section

→ Exclu les analyses de type mécanistique

ANALYSES ET INTERPRÉTATION

› Analyses de type empirique

- › Basées sur le comportement globale de la chaussée, soit sa déflexion sous charge
- › Basées sur une estimation du trafic
- › Méthodes utilisées :
 - › American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *Guide for Design of Pavement Structures*
 - › Asphalt Institute, *MS-17 Asphalt Overlays for Highway and Street Rehabilitation*



SOLLICITATION DU TRAFIC

- › **Nombre de passages de l'essieu de référence sur la période d'analyse**
- › **Équivalent de charge axiale simple (ÉCAS) de référence**
 - › Calculé
 - › Débit journalier moyen annuel (DJMA), %VL, répartition (direction et voie), coefficient d'agressivité moyen (CAM), durée de vie
 - › Estimé
 - › À partir de la classification fonctionnelle



SOLLICITATION DU TRAFIC

› Classification fonctionnelle

| Classe fonctionnelle | ÉCAS de référence |
|--------------------------|-------------------|
| Artères et industrielles | 5 000 000 |
| Collectrices | 2 500 000 |
| Locales avec autobus | 1 000 000 |
| Locales | 250 000 |

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASTHO)

› Module d'infrastructure (M_R)

- › Coefficient de Poisson
- › Charge appliquée
- › Distance du point de chargement
- › Déflexion maximale à la distance radiale r

$$M_R = \left[\frac{(-\mu^2) P}{\pi r d_r} \right] = \frac{0,24 P}{r d_r}$$

si $\mu=0,50$

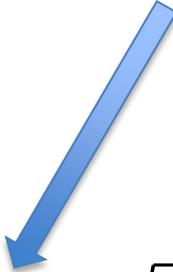
AASTHO

- › **Module de la structure de chaussée (E_p)**
 - › Pression sous la plaque de chargement
 - › Déflexion maximale
 - › **Épaisseur totale de la chaussée (D)**
 - › Estimé

$$d_0 = 1,5pa \times \left\{ \frac{1}{M_R \sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \sqrt[3]{\frac{E_p}{M_R}} \right)^2}} + \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{D}{a} \right)^2}} \right] / E_p \right\}$$

AASTHO

- › **Nombre structural effectif**
 - › Module de la structure de chaussée
 - › **Épaisseur totale de la chaussée (D)**

$$SN_{\text{eff}} = 0,0045 \times D \times \sqrt[3]{E_p}$$


AASTHO

› ÉCAS admissible

- › Nombre structural effectif
- › Module d'infrastructure

$$\log(\text{ÉCAS}) = \left[Z_R * S_0 \right] + \left[0,36 \times \log(\text{SN} + 1) \right] 0,20 + \left[\frac{\log\left(\frac{\Delta\text{PSI}}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(\text{SN} + 1)^{5,19}}} \right] + \left[0,32 \times \log(M_R) \right] 8,07$$

ÉCAS admissible / ÉCAS de référence x 20 = Durée de vie

AASHTO

› Nombre structural requis

- › Trafic de référence (ÉCAS)
- › Module d'infrastructure

$$\log(\text{ÉCAS}) = \left[F_R * S_0 \right] + \left[0,36 \times \log(\text{SN} + 1) \right] + 0,20 + \left[\frac{\log\left(\frac{\Delta\text{PSI}}{4,2 - 1,5}\right)}{0,40 + \frac{1094}{(\text{SN} + 1)^{5,19}}} \right] + \left[0,32 \times \log(M_R) \right] + 8,07$$




› Calcul du renforcement requis

$$H_{\text{revêtement}} = \frac{\text{SN}_{\text{requis}} - \text{SN}_{\text{effectif}}}{0,43}$$

AASTHO

Chaussée faible et trafic important : 5 000 000 (20 ans)



| Déflexions pour 40 kN (µm) | | | | | | | | | H rev (mm) | H fond (mm) | M _R (MPa) | E _p (MPa) | SN effectif | ÉCAS adm. (M) | Durée de vie |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|---------------|----------------|-------------------------|-------------------------|----------------|---------------------|-----------------|
| Distance du géophone (mm) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 200 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 | 1200 | 1500 | | | | | | | |
| 530 | 458 | 402 | 325 | 266 | 217 | 184 | 136 | 106 | 100 | 600 | 58 | 385 | 4,74 | 0,57 | 2 |
| | | | | | | | | | 100 | 300 | 58 | 600 | 3,14 | 0,04 | 0 |
| | | | | | | | | | 150 | 600 | 58 | 390 | 5,10 | 0,98 | 4 |
| | | | | | | | | | 150 | 300 | 58 | 565 | 3,46 | 0,07 | 0 |

AASTHO

Chaussée faible et trafic faible : 500 000 (20 ans)



| Déflexions pour 40 kN (μm) | | | | | | | | | H rev (mm) | H fond (mm) | M_R (MPa) | E_p (MPa) | SN effectif | ÉCAS adm. (M) | Durée de vie |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|-----------------|
| Distance du géophone (mm) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 200 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 | 1200 | 1500 | | | | | | | |
| 530 | 458 | 402 | 325 | 266 | 217 | 184 | 136 | 106 | 100 | 600 | 58 | 385 | 4,74 | 0,57 | 20 |
| | | | | | | | | | 100 | 300 | 58 | 600 | 3,14 | 0,04 | 1 |
| | | | | | | | | | 150 | 600 | 58 | 390 | 5,10 | 0,98 | 20 |
| | | | | | | | | | 150 | 300 | 58 | 565 | 3,46 | 0,07 | 3 |

AASTHO

Chaussée forte et trafic important : 5 000 000 (20 ans)



| Déflexions pour 40 kN (μm) | | | | | | | | | H rev (mm) | H fond (mm) | M_R (MPa) | E_p (MPa) | SN effectif | ÉCAS adm. (M) | Durée de vie |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|-----------------|
| Distance du géophone (mm) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 200 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 | 1200 | 1500 | | | | | | | |
| 275 | 227 | 191 | 147 | 116 | 90 | 72 | 50 | 36 | 100 | 600 | 139 | 715 | 5,83 | 19,79 | 20 |
| | | | | | | | | | 100 | 300 | 139 | 1025 | 3,75 | 0,87 | 3 |
| | | | | | | | | | 150 | 600 | 139 | 755 | 6,36 | 39,89 | 20 |
| | | | | | | | | | 150 | 300 | 139 | 1030 | 4,23 | 1,94 | 8 |

AASTHO

Chaussée forte et trafic faible : 500 000 (20 ans)



| Déflexions pour 40 kN (μm) | | | | | | | | | H rev (mm) | H fond (mm) | M_R (MPa) | E_p (MPa) | SN effectif | ÉCAS adm. (M) | Durée de vie |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|-----------------|
| Distance du géophone (mm) | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0 | 200 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 | 1200 | 1500 | | | | | | | |
| 275 | 227 | 191 | 147 | 116 | 90 | 72 | 50 | 36 | 100 | 600 | 139 | 715 | 5,83 | 19,79 | 20 |
| | | | | | | | | | 100 | 300 | 139 | 1025 | 3,75 | 0,87 | 20 |
| | | | | | | | | | 150 | 600 | 139 | 755 | 6,36 | 39,89 | 20 |
| | | | | | | | | | 150 | 300 | 139 | 1030 | 4,23 | 1,94 | 20 |

AASHTO

› Niveau réseau

- › Informations limitées
- › Composition de la chaussée inconnue
- › Sollicitations estimées
- › Nombre limité d'essais par section de chaussée

› Applicabilité de la méthode AASHTO limitée

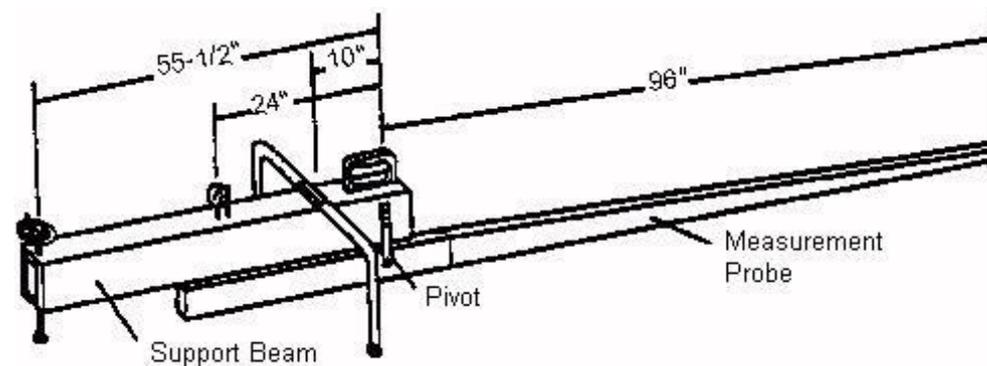
- › Impact important de l'épaisseur de la chaussée

ASPHALT INSTITUTE

› Conversion FWD → Benkelman Beam (BB)

- › Mesure statique ponctuelle de la déflexion de la chaussée

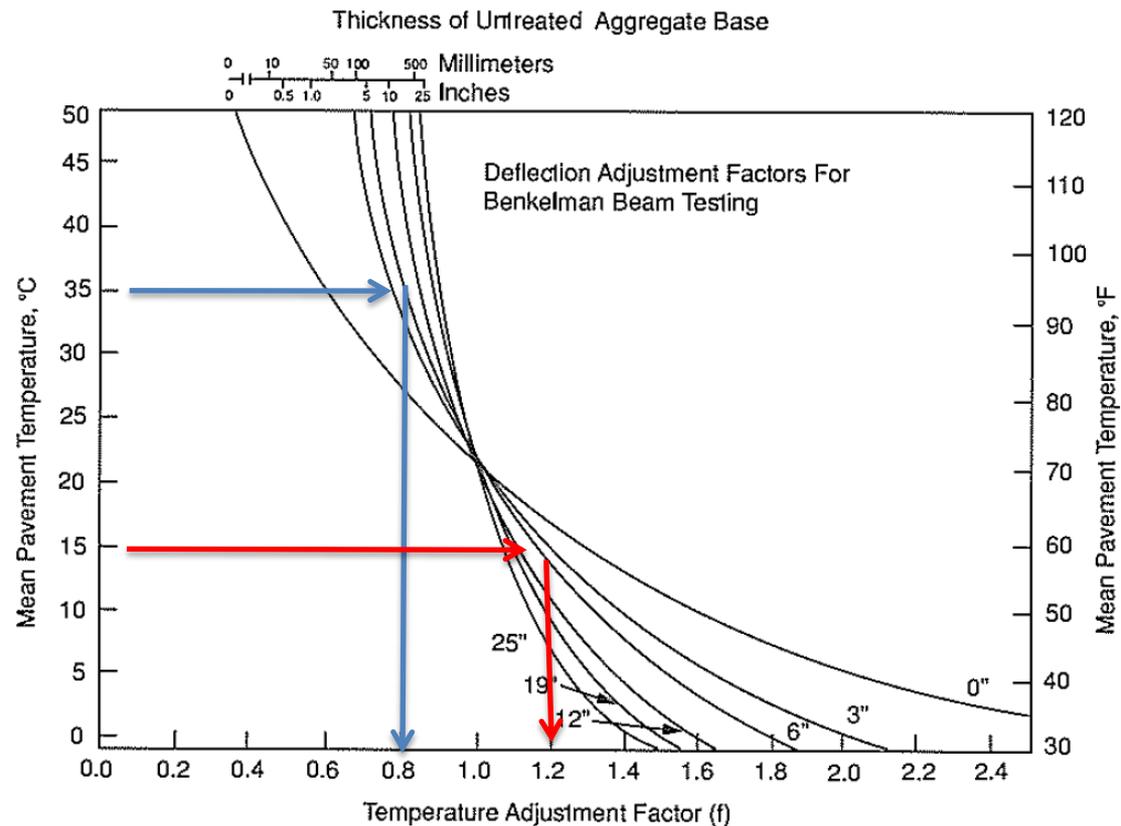
$$DEF_{\text{Benkelman}} = 1,61 \times DEF_{\text{FWD}}$$



<http://www.pavementinteractive.org/article/deflection/>

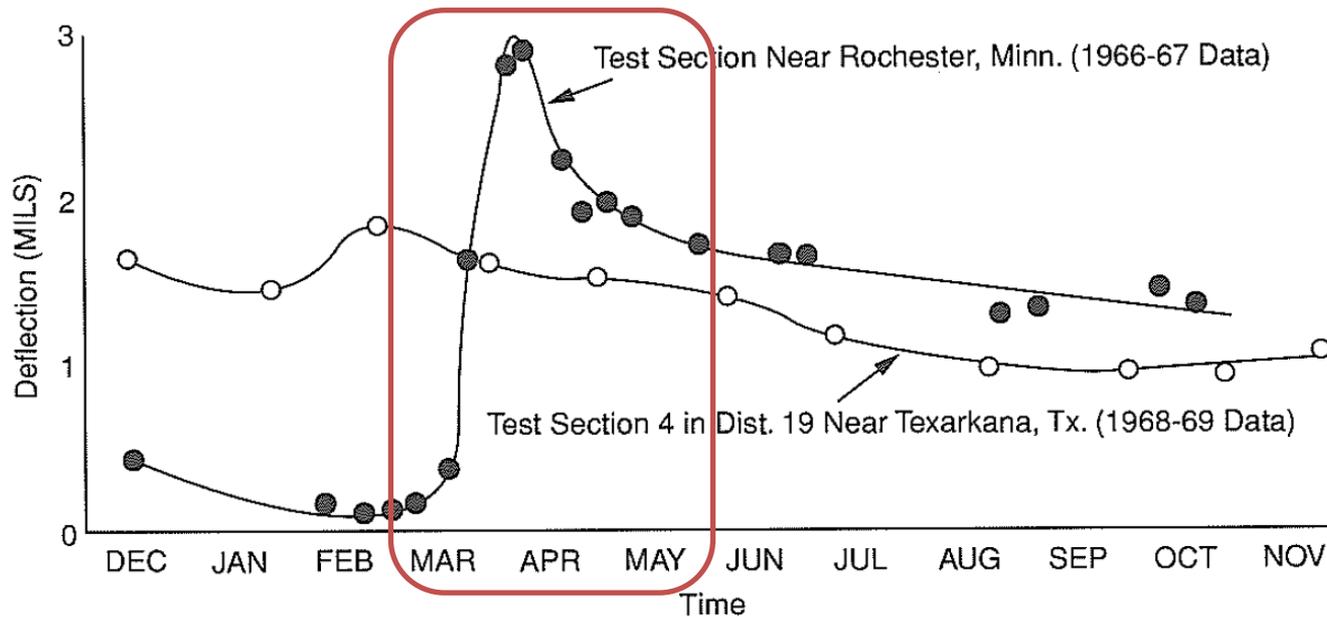
ASPHALT INSTITUTE

› Correction pour la température du revêtement



ASPHALT INSTITUTE

- › **Correction pour la saison**
 - › Affaiblissement lors du dégel printanier



ASPHALT INSTITUTE

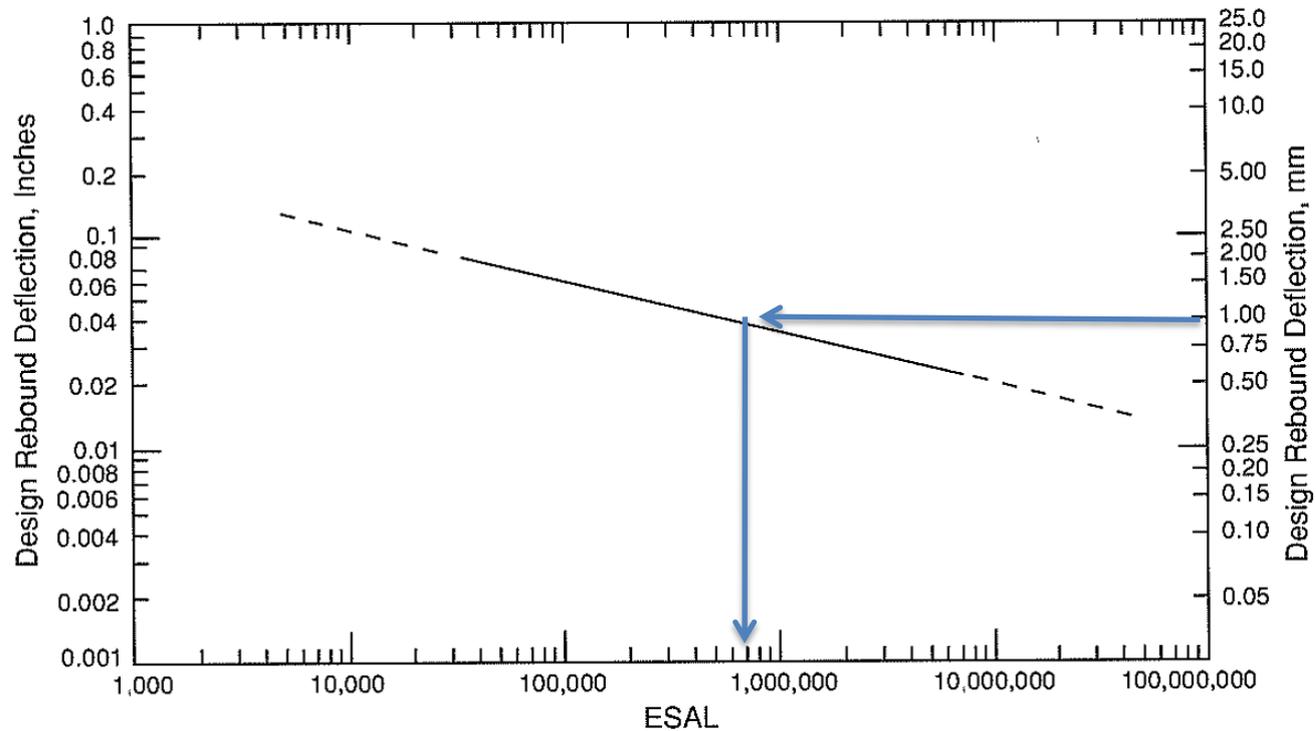
› Correction pour la saison

- › Épaisseur de la chaussée
- › Susceptibilité thermique du sol support
- › Indice de gel
- › Quantité de précipitation

| Épaisseur de la chaussée | Facteur de correction (C-SHRP) | |
|--------------------------|--------------------------------|------|
| 0 à 600 mm | 1,10 à 1,50 | 1,20 |
| 600 à 1000 mm | 1,10 à 1,30 | |
| > 1000 mm | 1,00 | |

ASPHALT INSTITUTE

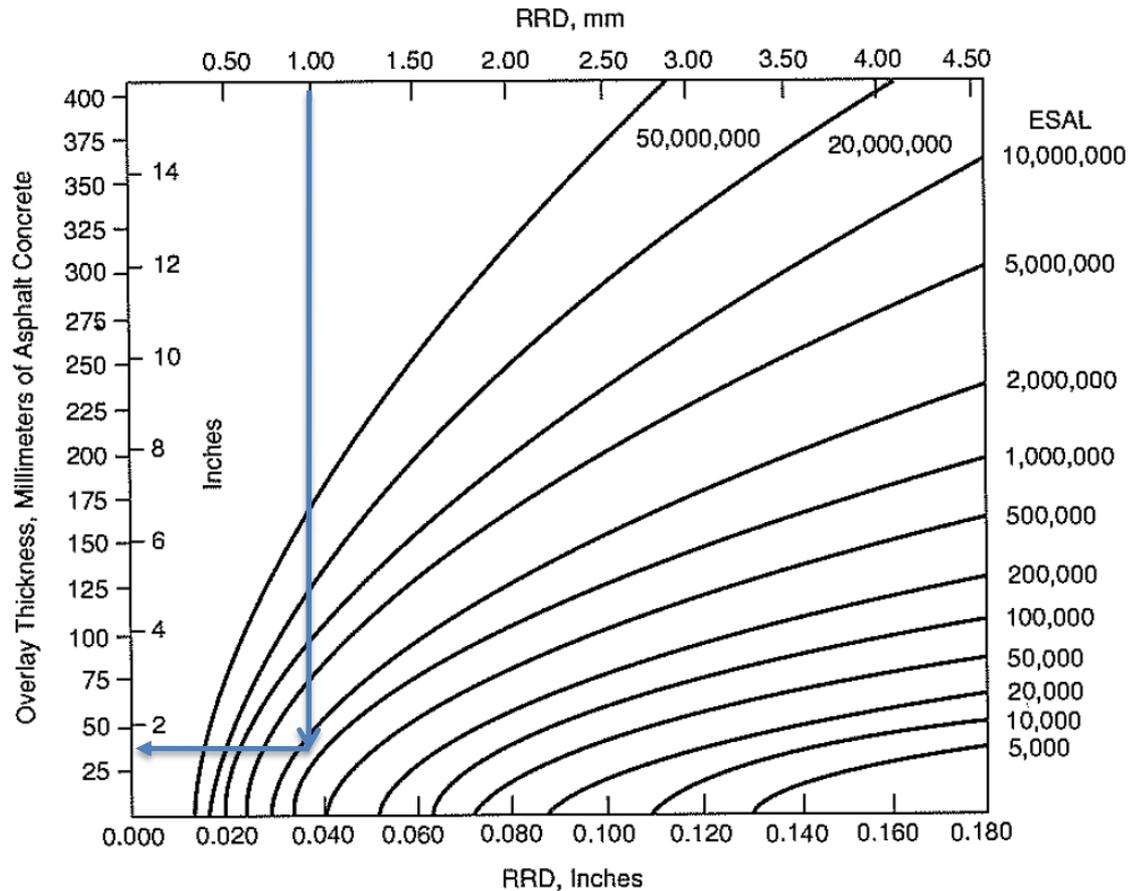
› ÉCAS admissible



ÉCAS admissible / ÉCAS de référence x 20 = Durée de vie

ASPHALT INSTITUTE

› Calcul du renforcement requis



ASPHALT INSTITUTE

Chaussée faible et trafic important : 5 000 000 (20 ans)

| Déflexions pour 40 kN (μm) | | | | | | | | | H rev (mm) | H fond (mm) | Durée de vie | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|---------------|----------------|--------------|----------------------|
| Distance du géophone (mm) | | | | | | | | | | | AASHTO | Asphalt Institute |
| 0 | 200 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 | 1200 | 1500 | | | | |
| 530 | 458 | 402 | 325 | 266 | 217 | 184 | 136 | 106 | 100 | 600 | 2 | 3 |
| | | | | | | | | | 100 | 300 | 0 | 3 |
| | | | | | | | | | 150 | 600 | 4 | 4 |
| | | | | | | | | | 150 | 300 | 0 | 4 |

ASPHALT INSTITUTE

Chaussée faible et trafic faible : 500 000 (20 ans)

| Déflexions pour 40 kN (μm) | | | | | | | | | H rev (mm) | H fond (mm) | Durée de vie | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|---------------|----------------|--------------|----------------------|
| Distance du géophone (mm) | | | | | | | | | | | AASHTO | Asphalt Institute |
| 0 | 200 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 | 1200 | 1500 | | | | |
| 530 | 458 | 402 | 325 | 266 | 217 | 184 | 136 | 106 | 100 | 600 | 20 | 20 |
| | | | | | | | | | 100 | 300 | 1 | 20 |
| | | | | | | | | | 150 | 600 | 20 | 20 |
| | | | | | | | | | 150 | 300 | 3 | 20 |

ASPHALT INSTITUTE

Chaussée forte et trafic important : 5 000 000 (20 ans)

| Déflexions pour 40 kN (μm) | | | | | | | | | H rev (mm) | H fond (mm) | Durée de vie | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|---------------|----------------|--------------|----------------------|
| Distance du géophone (mm) | | | | | | | | | | | AASHTO | Asphalt Institute |
| 0 | 200 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 | 1200 | 1500 | | | | |
| 275 | 227 | 191 | 147 | 116 | 90 | 72 | 50 | 36 | 100 | 600 | 20 | 20 |
| | | | | | | | | | 100 | 300 | 3 | 20 |
| | | | | | | | | | 150 | 600 | 20 | 20 |
| | | | | | | | | | 150 | 300 | 8 | 20 |

ASPHALT INSTITUTE

Chaussée forte et trafic faible : 500 000 (20 ans)

| Déflexions pour 40 kN (μm) | | | | | | | | | H rev (mm) | H fond (mm) | Durée de vie | |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|---------------|----------------|--------------|----------------------|
| Distance du géophone (mm) | | | | | | | | | | | AASHTO | Asphalt Institute |
| 0 | 200 | 300 | 450 | 600 | 750 | 900 | 1200 | 1500 | | | | |
| 275 | 227 | 191 | 147 | 116 | 90 | 72 | 50 | 36 | 100 | 600 | 20 | 20 |
| | | | | | | | | | 100 | 300 | 20 | 20 |
| | | | | | | | | | 150 | 600 | 20 | 20 |
| | | | | | | | | | 150 | 300 | 20 | 20 |

ASPHALT INSTITUTE

› Niveau réseau

- › Informations limitées
- › Composition de la chaussée inconnue
- › Sollicitations estimées
- › Nombre limité d'essais par section de chaussée

› Méthode Asphalt Institute mieux adaptée

- › Moins d'intrants inconnus requis
- › Résultats plus uniformes

DURÉE DE VIE

- › La capacité structurale associée à la durée de vie résiduelle

| Capacité structurale | Durée de vie résiduelle estimée | |
|----------------------|---------------------------------|-------------|
| Forte | ≥ 20 ans | ≥ 25 ans |
| Adéquate | 15 – 19 ans | 20 – 24 ans |
| Faible | 5 – 14 ans | 5 – 19 ans |
| Très faible | < 5 ans | < 5 ans |

CÉRIU

› Guide de gestion de l'entretien pour la conservation des chaussées municipales

| État | Capacité structurale | Cote | Durée de vie résiduelle |
|---------------------|---|------|-------------------------|
| Excellent | Capacité structurale très forte E_0 de plus de 1000 MPa | 1 | > 35 ans |
| Bon | Capacité structurale forte E_0 entre 500 à 1000 MPa | 2 | 25 – 35 ans |
| Moyen | Capacité structurale moyenne E_0 entre 300 à 500 MPa | 3 | 10 – 25 ans |
| Mauvais | Capacité structurale faible E_0 entre 100 à 300 MPa | 4 | 5 – 10 ans |
| Très mauvais | Capacité structurale très faible E_0 de moins de 100 MPa | 5 | < 5 ans |

› Module de surface (E_0)

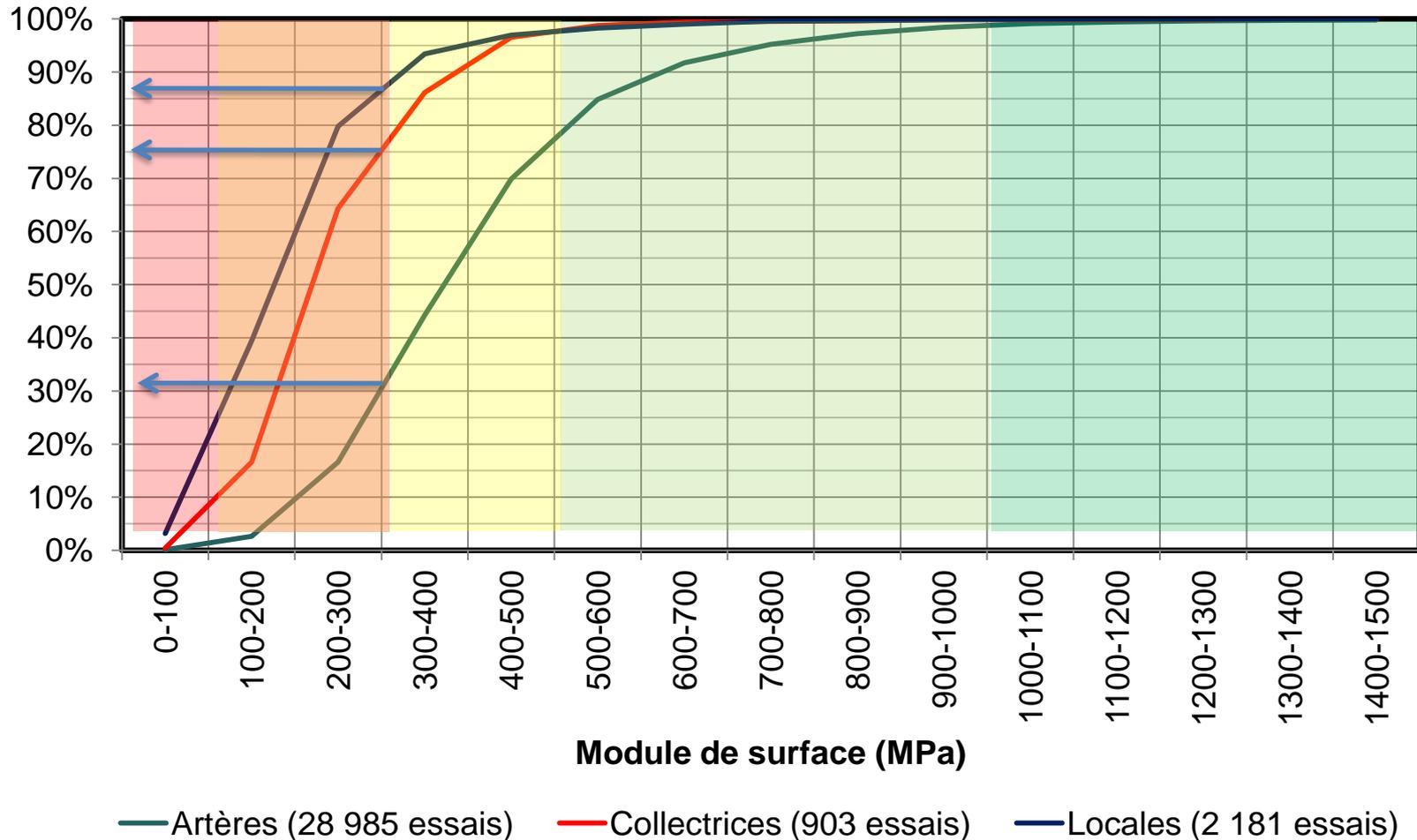
MODULE DE SURFACE

- › **Comportement élastique linéaire (monocouche)**
- › **Qui tient compte :**
 - › des caractéristiques de la chaussée
 - › des caractéristiques du sol support

$$E_0 = \left[\frac{2(1-\mu^2) p a}{d_0} \right] = \frac{1,5 p a}{d_0}$$

si $\mu=0,50$

MODULE DE SURFACE



MODULE DE SURFACE

| Classe fonctionnelle | | Artères | Collectrices | Locales avec bus | Locales |
|----------------------|-------------|-----------|--------------|------------------|---------|
| ÉCAS | | 5 000 000 | 2 500 000 | 1 000 000 | 250 000 |
| | | MPa | | | |
| Capacité structurale | Très forte | > 800 | > 700 | > 500 | > 400 |
| | Forte | 600-800 | 500-700 | 400-500 | 300-400 |
| | Moyenne | 400-600 | 300-500 | 250-400 | 200-300 |
| | Faible | 200-400 | 150-300 | 125-250 | 100-200 |
| | Très faible | < 200 | < 150 | < 125 | < 100 |

CONCLUSIONS

- › **Mesure de la capacité structurale dans le cadre des études réseau des chaussées municipales :**
 - › Associée à la durée de vie résiduelle (structurale)
 - › Analyses de base (type empirique)
 - › Outil de diagnostic et non pas un indicateur de performance
 - › Élaboration des plans directeurs / besoins d'entretien
 - › Conservation vs réhabilitation
 - › Budgétisation préliminaire

CONCLUSIONS

› Donneurs d'ouvrages

- › Mieux définir les besoins et objectifs visés
- › Préciser les relevés de terrains
 - › Pas de mesure
 - › Nombre d'essais
- › Préciser la méthode d'analyse
- › Meilleure connaissance des sollicitations de trafic
 - › Débit
 - › Composition



ANALYSE DE LA CAPACITÉ STRUCTURALE DES CHAUSSÉES MUNICIPALES

André Contant, ing., M.Sc.A.

Groupe Qualitas inc., membre du Groupe SNC-Lavalin inc.

Congrès INFRA 2012

Omni Mont-Royal, Montréal, du 19 au 21 novembre 2012
