

$$CA = \sum CA = \sum \frac{m_1}{m_2}$$



# CHAUSSÉE



Logiciel de dimensionnement  
des chaussées souples

DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL  
DES CHAUSSÉES SOUPLES AU MTQ :

LOGICIEL

## CHAUSSÉE 2



# CHAUSSÉE



## Version 2

Logiciel de dimensionnement  
des chaussées souples

**Dimensionnement structural  
des chaussées souples  
Logiciel – Chaussée 2  
(Formation – Janvier 2025)**

Direction générale du laboratoire des chaussées  
Direction des chaussées  
Secteur : Expertise en chaussées





## Dimensionnement des chaussées souples

Direction générale du laboratoire des chaussées  
Direction des chaussées



Janvier 2025

## Dimensionnement des chaussées souples

# CHAUSSÉE Version 2

Logiciel de dimensionnement  
des chaussées souples

<https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/entreprises-partenaires/entreprises-reseaux-routier/chaussées/Pages/logiciel-dimensionnement.aspx>

## Animateurs

### Direction générale du laboratoire des chaussées (DGLC)

- Denis St-Laurent, ing., M.Sc.  
[Denis.St-Laurent@transports.gouv.qc.ca](mailto:Denis.St-Laurent@transports.gouv.qc.ca)
- Olivier Sylvestre, ing., M.Sc.  
[Olivier.Sylvestre@transports.gouv.qc.ca](mailto:Olivier.Sylvestre@transports.gouv.qc.ca)
- Julie Roby, ing., M.Sc.  
[Julie.Roby@transports.gouv.qc.ca](mailto:Julie.Roby@transports.gouv.qc.ca)



## Objectifs du cours

- Être en mesure de faire toutes les étapes de la conception structurale et au gel d'une chaussée.
- Maîtriser l'utilisation du logiciel « Chaussée 2 ».
- Acquérir une meilleure compréhension des modèles et mécanismes reliés au gel des chaussées.



# Conception des chaussées

- Nombre
- Type
- Évolution



Trafic



Techniques  
Équipements

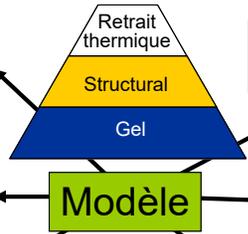


- Entretien
  - Préventif
  - Drainage



Matériaux

- Uniformité
- Évolution



Mise en oeuvre



- Tolérance (épaisseur)
- Méthode de travail
- Équipements
- Contexte
  - Automne
  - Circulation

Sol support

- Variabilité
- Variations saisonnières
- Niveau d'eau (saturation)



Climat

- Représentativité
- Événements extrêmes
- Évolution !

5

# Justificatif !

- Meilleure prise en compte des effets du gel
- Approche analytique
  - Basée sur la gélivité des sols
  - Les conditions hydriques



6

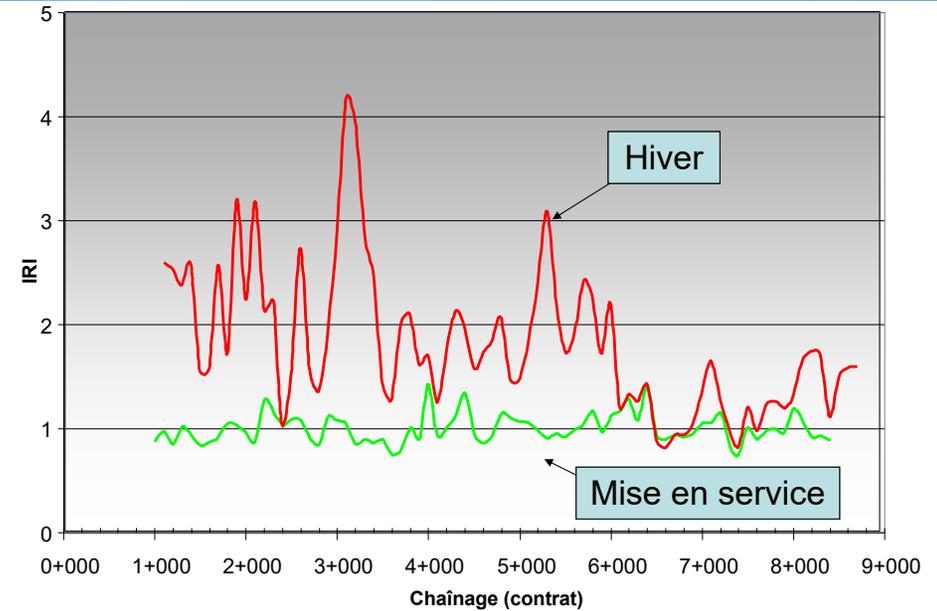
# Chaussée 2: Justification



2

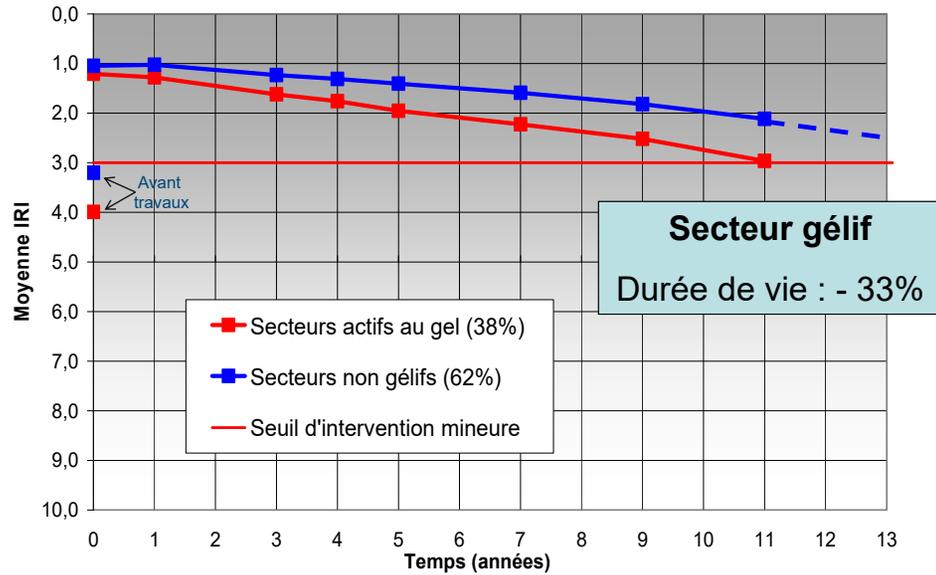
7

# Chaussée 2: Justification



8

## Chaussée 2: Justification



9

## Contenu de la formation – Partie 1 (Théorie)

- **8:30 - 10:00** Accueil des participants et plan du cours  
Survol du logiciel « Chaussée 2 »  
Méthode AASHTO 1993  
Propriétés mécaniques des matériaux
- **10:15 - 12:00** Trafic et agressivité des véhicules  
Dimensionnement au gel  
Traitement du climat  
Modélisation thermique  
Potentiel de ségrégation



10

## Contenu de la formation – Partie 2 (pratique)

- **13:00 - 14:45** Étapes de dimensionnement  
Exemple d'utilisation du logiciel  
Fermeture de remblai et infra-améliorée  
Exercice avec le logiciel
- **15:00 - 16:30** Exercice avec le logiciel (suite)  
Exemple: conception sur sol gélif  
Exemple: conception sur sol saturé  
Exercice: renforcement bitumineux  
Exemple: milieu non homogène



11



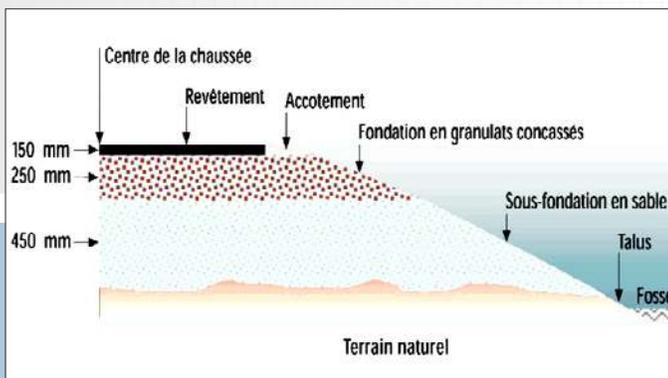
# LES CHAUSSÉES AU QUÉBEC

## LA CONCEPTION D'UNE CHAUSSÉE

La structure de la chaussée n'est simple qu'en apparence. En réalité, la conception d'une chaussée type fait appel à de nombreuses variables, ce qui en fait l'un des ouvrages les plus complexes du génie civil.

Il existe deux grandes catégories de chaussées. Elles se distinguent par leur comportement mécanique et par le type de matériau utilisé. La chaussée dite «rigide» se caractérise par une surface de roulement en béton. Elle réagit d'un seul bloc et se déforme peu sous la charge. La plus fréquente au Québec, la chaussée souple, est recouverte d'un enrobé, ou béton bitumineux, familièrement appelé «asphalte». Ce type de chaussée se déforme au passage du trafic pour reprendre presque entièrement sa forme originale après le passage des véhicules.

Les deux types de chaussées s'adaptent bien au contexte québécois. Les chaussées rigides sont plus coûteuses à construire, mais économiquement justifiées en présence d'un trafic lourd et intense. C'est ainsi que, sur les 30 600 km de routes sous la responsabilité du ministère des Transports, 88 % sont des chaussées souples en enrobé et 3 % sont des chaussées rigides en béton, le reste étant principalement des chaussées flexibles qui ont une surface de roulement en gravier.



Exemple de coupe type d'une chaussée.

La figure présente une coupe de chaussée pouvant convenir aux deux types de structures. Le choix de la structure la plus appropriée ainsi que sa conception dépendent de divers facteurs tels que l'intensité du trafic prévu, les types de sols, le climat, les coûts et la disponibilité locale des matériaux de construction.

Les revêtements de chaussée permettent un meilleur confort et contribuent à augmenter la capacité structurale des chaussées en réduisant l'impact des charges transmises aux couches sous-jacentes (fondation, sous-fondation et sols) en plus de limiter la pénétration de l'eau. La superposition d'épaisseur variable de différents matériaux tels que le sable, le gravier et la pierre concassée atténue également l'effet du gel sur les sols, tout en consolidant l'ouvrage.

La durée de vie de conception des chaussées souples est aujourd'hui améliorée de 10 ans, par rapport à ce qui se faisait au début des années 2000. Elles sont maintenant conçues pour une durée de vie de 25 à 30 ans. Des interventions de surface sont toutefois requises suivant un intervalle périodique de 10 à 20 ans. Lorsqu'elles sont effectuées assez tôt, avant que la chaussée ne soit trop fissurée, les interventions de surface sont plus durables. Elles peuvent se répéter plusieurs fois avant qu'une intervention plus coûteuse de remise en état soit nécessaire. Ces interventions permettent de maintenir la chaussée en utilisation bien au-delà de sa période de conception initiale. En général, les matériaux de la structure de chaussée sont recyclables et même les revêtements bitumineux font l'objet de nouveaux développements dans ce domaine.

Les épaisseurs et les types de matériaux à utiliser sont établis en fonction de la classe de route à construire, du trafic, des sols en place et des conditions climatiques particulières. La méthode de conception prévoit le recours à une série d'équations dont les facteurs sont bien adaptés au contexte québécois et qui tient compte des éléments suivants :

### L'intensité et les caractéristiques du trafic lourd.

En effet, le passage d'un camion chargé cause un dommage équivalent au passage de 30 000 à 40 000 automobiles. Par ailleurs, l'usure de surface est causée par le passage répété d'un grand nombre de véhicules tous types confondus.

### • Les conditions climatiques (température, humidité).

La période de dégel est critique : un même essieu de camion peut causer de 5 à 8 fois plus de dommages au printemps qu'en été.

### • Les caractéristiques des sols en place.

Les sols fins silteux et argileux nécessitent un recouvrement plus important afin d'empêcher les gonflements au gel et les déformations causées par le trafic.

Une fois les calculs terminés, les charges et les déformations susceptibles d'être transmises à chaque couche sont comparées à la capacité de chacune des couches. Des charges élevées imposées à des couches minces ou à des matériaux peu résistants peuvent causer des fissures aux revêtements ou des déformations permanentes à la chaussée. Par exemple, une augmentation de 20% des charges se traduit par un accroissement des dommages de plus de 100%, d'où l'importance d'un bon dimensionnement de chaussée et d'une bonne évaluation de l'évolution du trafic.

L'effet du gel sur les chaussées peut entraîner des gonflements qui affectent directement la qualité de roulement et l'état du revêtement. Une épaisseur suffisante de matériaux, peu sensibles aux effets du gel, peut s'avérer efficace dans de telles circonstances. Le recours à d'autres techniques d'isolation de chaussées est parfois requis lorsque les sols porteurs se déforment sous l'effet du gel. Enfin, une analyse des coûts des différentes options complète le processus.

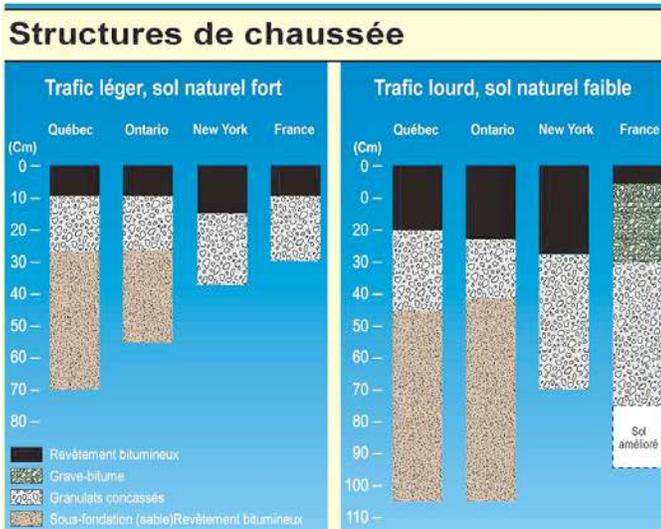
## ÉVOLUTION DES PRATIQUES

Il existe des différences marquées entre les structures de chaussées des différents pays (voir figure). Cette situation peut paraître surprenante de prime abord. Ces différences sont inévitables puisque les sols, le climat, le trafic, les matériaux utilisés et les coûts sont souvent très différents. La comparaison s'avère donc très hasardeuse, au même titre que l'importation des technologies sans une analyse approfondie.

Au Québec, les structures de chaussée ont besoin d'une sous-fondation et d'une fondation plus épaisse en raison du climat plus rigoureux et de sols défavorables.

Les méthodes de dimensionnement et les connaissances en matière de conception des chaussées sont en constante évolution. De nouvelles technologies et de nouveaux produits font leur apparition. Afin d'optimiser l'utilisation de ces nouveaux procédés et de réduire les risques de contre-performance, le Ministère a mis sur pied dès le début des années 90 un programme de suivi des performances des chaussées afin de documenter selon une approche rigoureuse l'évolution du comportement des chaussées dans le contexte québécois. Cette approche novatrice a permis d'établir une base de connaissance nous permettant d'améliorer les méthodes de conception et d'optimiser les interventions sur le réseau.

Plusieurs projets pilotes menés par le Ministère en collaboration avec des universités et des entreprises spécialisées ont permis de développer le potentiel d'utilisation de diverses techniques de construction et de réfection des chaussées. À titre d'exemple, nous pouvons mentionner l'amélioration des mélanges bitumineux, des techniques de mise en place et des méthodes de contrôle de la qualité. Nous pouvons mentionner aussi l'utilisation de plus en plus courante de techniques comprenant le recyclage des matériaux de chaussées, de même que l'usage plus répandu de techniques d'isolation thermique des chaussées pour réduire les effets du gel. Les ingénieurs sont aujourd'hui mieux outillés pour construire des ouvrages plus durables qu'auparavant.





# Dimensionnement structural des chaussées souples

## Survol du logiciel



# Chaussée 2: Domaines d'application

- Conception des structures de chaussées à revêtement en enrobé
- Complément TOME II
- Contexte Québécois
- Chargement « légal »
- Climat
- Sols et matériaux
- « construction » & « réfection »
- Milieu « rural » & « urbain »



Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

**Segment homogène**  
project characteristics

**Objectifs**

Type de route: Nationale

Classe de trafic (DJMA projeté): entre 5000 et 20000

Années: 30, ÉCAS (millions): 3,0

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

**Climat**

Station météorologique: Laprairie

Zone: Sud, T<sub>BB</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 6,5, I<sub>Gn</sub>: 901, σ<sub>IG</sub>: 209

Simulation: Climat, PR: 15, IG: 1215, IGs: 1215, n: 1,0

**Couches de matériaux**

| Matériau                       | H (mm) | F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | W18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------------|--------|------|-------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                       | 145    | 1,00 | 3592              | 0,47                  | 1,0 | 2,69 | 3,447             | 20,45                     |
| 2 MG 20                        | 200    | 1,00 | 148               | 0,1                   | 0,8 | 3,33 | 3,971             | 3,80                      |
| 3 MG 112 (excluant les sable)  | 575    | 1,00 | 87                | 0,09                  | 0,8 | 5,0  | 8,153             | 5,46                      |
| 4                              |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 5                              |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 6                              |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 7                              |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 8                              |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 9 SC fin (plus de 30 % passer) |        | 1,00 | 36                |                       |     |      |                   |                           |
| Total = 920                    |        |      |                   |                       |     |      |                   | 29,71                     |

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

→ Équivalences d'été (FAS = 0,84)  
Mr = 43 MPa  
CBR = 5,6

Réinitialiser les matériaux

Station météorologique

Station sélectionnée: 45,38°N, 73,43°O

Laprairie | Parcourir | 901 °C/ps | T<sub>ma</sub>: 6,5 °C | Zone: Sud (20,5°C) | Contenu: Climat

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène  
project characteristics

Objectifs  
Type de route: Nationale  
Classe de trafic (DJMA projeté): entre 5000 et 20000  
Années: 30, ÉCAS (millions): 3,0  
BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat  
Station météorologique: Laprairie  
Zone: Sud, T<sub>EB</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 6,5, I<sub>Gn</sub>: 901, σ<sub>IG</sub>: 209  
Simulation: Climat, PR: 15, IG: 1215, IG<sub>s</sub>: 1215  
n: 1,0

Couches de matériaux

| Matériau                       | H (mm) | STRUCTURAL | GEL  | GEL (1994) | SN  | W18 (en millions) | Coût (\$/m²) |
|--------------------------------|--------|------------|------|------------|-----|-------------------|--------------|
| 1 BB HRO                       | 145    | 1,00       | 3592 | 0,47       | 1,0 | 2,69              | 20,45        |
| 2 MG 20                        | 200    | 1,00       | 148  | 0,1        | 0,8 | 3,33              | 3,80         |
| 3 MG 112 (excluant les sable)  | 575    | 1,00       | 87   | 0,09       | 0,8 | 5,0               | 5,46         |
| 4                              |        |            |      |            |     |                   |              |
| 5                              |        |            |      |            |     |                   |              |
| 6                              |        |            |      |            |     |                   |              |
| 7                              |        |            |      |            |     |                   |              |
| 8                              |        |            |      |            |     |                   |              |
| 9 SC fin (plus de 30 % passer) |        | 1,00       | 36   |            |     |                   |              |
| Total = 920                    |        |            |      |            |     |                   | 29,71        |

Équivalences d'été (FAS = 0,84)  
Mr = 43 MPa  
CBR = 5,5

Réinitialiser les matériaux

16

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène  
Phase 1: 2+300 à 3+100  
Profil = T.N.  
Secteur "plat"

Objectifs  
Type de route: Nationale  
Classe de trafic (DJMA projeté): entre 5000 et 20000  
Années: 30, ÉCAS (millions): 3,0  
BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat  
Station météorologique: Sainte-Anne-de-la-Pérade  
Zone: Sud, T<sub>EB</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 4,2, I<sub>Gn</sub>: 1252, σ<sub>IG</sub>: 228  
Simulation: Climat, PR: 15, IG: 1595, IG<sub>s</sub>: 1595  
n: 1,0

Couches de matériaux

| Matériau                       | H (mm) | STRUCTURAL | GEL  | GEL (1994) | SN  | W18 (en millions) | Coût (\$/m²) |
|--------------------------------|--------|------------|------|------------|-----|-------------------|--------------|
| 1 BB HRO                       | 145    | 1,00       | 3592 | 0,47       | 1,0 | 2,69              | 20,45        |
| 2 MG 20                        | 200    | 1,00       | 148  | 0,1        | 0,8 | 3,33              | 3,80         |
| 3 MG 112 (excluant les sable)  | 575    | 1,00       | 87   | 0,09       | 0,8 | 5,0               | 5,46         |
| 4                              |        |            |      |            |     |                   |              |
| 5                              |        |            |      |            |     |                   |              |
| 6                              |        |            |      |            |     |                   |              |
| 7                              |        |            |      |            |     |                   |              |
| 8                              |        |            |      |            |     |                   |              |
| 9 SC fin (plus de 30 % passer) |        | 1,00       | 36   |            |     |                   |              |
| Total = 920                    |        |            |      |            |     |                   | 29,71        |

Protection partielle et transitions

FS: 1,00, FR: 1,00  
Sol de gélivité uniforme:   
Indice de liquidité (IL) < 0,9:   
Remblai, nappe éloignée ou autre condition favorable:

Épaisseur totale (mm): Requête 896, Actuelle 920

Réinitialiser les matériaux

17

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène  
Phase 1: 2+300 à 3+100  
Profil = T.N.  
Secteur "plat"

Objectifs  
Type de route: Nationale  
Classe de trafic (DJMA projeté): entre 5000 et 20000  
Années: 30, ÉCAS (millions): 3,0  
BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat  
Station météorologique: Sainte-Anne-de-la-Pérade  
Zone: Sud, T<sub>EB</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 4,2, I<sub>Gn</sub>: 1252, σ<sub>IG</sub>: 228  
Simulation: Climat, PR: 15, IG: 1595, IG<sub>s</sub>: 1595  
n: 1,0

Couches de matériaux

| Matériau                       | H (mm) | STRUCTURAL | GEL  | GEL (1994) | P d (t/m²) | Eau (%) | S <sub>Po</sub> (mm²/KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | Ku (W/mK) | Kf | Sr (%) | Lf (Wh/m²) | Coût (\$/m²) |
|--------------------------------|--------|------------|------|------------|------------|---------|--------------------------|------------------------|-----------|----|--------|------------|--------------|
| 1 BB HRO                       | 145    | 2,35       | 0,0  | 0,0        | 1,48       | 1,48    | 0                        | 1250                   | 20,45     |    |        |            |              |
| 2 MG 20                        | 200    | 2,2        | 4,0  | 0,0        | 1,77       | 1,89    | 52                       | 7897                   | 3,80      |    |        |            |              |
| 3 MG 112 (excluant les sable)  | 575    | 2,05       | 8,0  | 0,0        | 2,46       | 2,98    | 72                       | 14967                  | 5,46      |    |        |            |              |
| 4                              |        |            |      |            |            |         |                          |                        |           |    |        |            |              |
| 5                              |        |            |      |            |            |         |                          |                        |           |    |        |            |              |
| 6                              |        |            |      |            |            |         |                          |                        |           |    |        |            |              |
| 7                              |        |            |      |            |            |         |                          |                        |           |    |        |            |              |
| 8                              |        |            |      |            |            |         |                          |                        |           |    |        |            |              |
| 9 SC fin (plus de 30 % passer) |        | 1,8        | 16,0 | 2,0        | 10,0       | 1,88    | 2,58                     | 87                     | 24859     |    |        |            |              |
| Total = 920                    |        |            |      |            |            |         |                          |                        |           |    |        |            | 29,71        |

Graphes: Z (m) 2,293, h (m) 0,037

Réinitialiser les matériaux

18

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Projet - Gel et soulèvement

Segment homogène  
Phase 1: 2+300 à 3+100  
Profil = T.N.  
Secteur "plat"

Objectifs  
Type de route: Nationale  
Classe de trafic (DJMA projeté): entre 5000 et 20000  
Années: 30, ÉCAS (millions): 3,0  
BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat  
Station météorologique: Sainte-Anne-de-la-Pérade  
Zone: Sud, T<sub>EB</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 4,2, I<sub>Gn</sub>: 1252, σ<sub>IG</sub>: 228  
Simulation: Climat, PR: 15, IG: 1595, IG<sub>s</sub>: 1595  
n: 1,0

Couches de matériaux

| Matériau                       | H (mm) | STRUCTURAL | GEL  | GEL (1994) | P d (t/m²) | Eau (%) | S <sub>Po</sub> (mm²/KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | Ku (W/mK) | Kf | Sr (%) | Lf (Wh/m²) | Coût (\$/m²) |
|--------------------------------|--------|------------|------|------------|------------|---------|--------------------------|------------------------|-----------|----|--------|------------|--------------|
| 1 BB HRO                       | 145    | 2,35       | 0,0  | 0,0        | 1,48       | 1,48    | 0                        | 1250                   | 20,45     |    |        |            |              |
| 2 MG 20                        | 200    | 2,2        | 4,0  | 0,0        | 1,77       | 1,89    | 52                       | 7897                   | 3,80      |    |        |            |              |
| 3 MG 112 (excluant les sable)  | 575    | 2,05       | 8,0  | 0,0        | 2,46       | 2,98    | 72                       | 14967                  | 5,46      |    |        |            |              |
| 4                              |        |            |      |            |            |         |                          |                        |           |    |        |            |              |
| 5                              |        |            |      |            |            |         |                          |                        |           |    |        |            |              |
| 6                              |        |            |      |            |            |         |                          |                        |           |    |        |            |              |
| 7                              |        |            |      |            |            |         |                          |                        |           |    |        |            |              |
| 8                              |        |            |      |            |            |         |                          |                        |           |    |        |            |              |
| 9 SC fin (plus de 30 % passer) |        | 1,8        | 16,0 | 2,0        | 10,0       | 1,88    | 2,58                     | 87                     | 24859     |    |        |            |              |
| Total = 920                    |        |            |      |            |            |         |                          |                        |           |    |        |            | 29,71        |

Graphes: Z (m) 2,293, h (m) 0,037

Réinitialiser les matériaux

19

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène  
project characteristics

Objectifs  
Type de route  
Nationale  
Classe de trafic (DJMA projeté)  
entre 5000 et 20000  
Années ÉCAS (millions)  
30 3,0 Outil ÉCAS  
BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat  
Station météorologique  
Laprairie Choisir  
Zone T<sub>eb</sub> T<sub>ma</sub> IG<sub>n</sub> σ<sub>ig</sub>  
Sud 20,5 6,5 901 209  
Simulation PR IG  
Climat 15 1215  
IG<sub>s</sub> 1215

Couches de matériaux

| Matériau                      | H (mm)      | F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | W18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|-------------|------|-------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                      | 145         | 1,00 | 3592              | 0,47                  | 1,0 | 2,69 | 3,447             | 20,45                     |
| 2 MG 20                       | 200         | 1,00 | 148               | 0,1                   | 0,8 | 3,33 | 3,971             | 3,80                      |
| 3 MG 112 (excluant les sable  | 575         | 1,00 | 87                | 0,09                  | 0,8 | 5,0  | 8,153             | 5,46                      |
| 4                             |             |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 5                             |             |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 6                             |             |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 7                             |             |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 8                             |             |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 9 SC fin (plus de 30 % passer | Total = 920 | 1,00 | 36                |                       |     |      |                   |                           |

Équivalences d'été (FAS = 0,84)  
Mr = 43 MPa  
CBR = 5,5

CHAUSSEE

Réinitialiser les matériaux

20

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment Notice d'information : MG 112 (excluant les sables mal gradués "SP")

Le fuseau MG 112 spécifié au CCDG inclue les sables uniformes classifiés SP. Ces derniers sont structurellement plus faibles et rehaussent les épaisseurs requises pour une même performance. Le présent choix permet de tirer profit d'une situation où l'on sait qu'il n'y aura pas de sable uniforme sur le projet. En cas de doute, le calcul serait plus sécuritaire en choisissant le MG 112 avec fuseau entier.

Rappeler automatiquement ce message dans 1 jour

CHAUSSEE

Couches de matériaux

| Matériau                      | H (mm)      | P <sub>d</sub> (t/m <sup>2</sup> ) | Eau (%) | SP <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> /KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | K <sub>u</sub> (w/mk) | K <sub>f</sub> | S <sub>r</sub> (%) | L <sub>i</sub> (wh/m <sup>2</sup> ) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|-------------|------------------------------------|---------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|--------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                      | 145         | 2,35                               | 0,0     | 0,0                                   |                        | 1,48                  | 1,48           | 0                  | 1250                                | 20,45                     |
| 2 MG 20                       | 200         |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     | 3,80                      |
| 3 MG 112 (excluant les sable  | 575         |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     | 5,46                      |
| 4                             |             |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 5                             |             |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 6                             |             |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 7                             |             |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 8                             |             |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 9 SC fin (plus de 30 % passer | Total = 920 |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     | 29,71                     |

SP<sub>0</sub> = gélivité sans surcharge (voir guide sur le choix de cette valeur)  
a = nombre néphéon (2,71629)  
a = aSP = sensibilité au confinement (voir guide sur le choix de cette valeur)  
s = pression de confinement  
SP<sub>0</sub>min, SP<sub>0</sub>max, a<sub>min</sub>, a<sub>max</sub> = Plages de contrôle  
Si<sub>Critique</sub> = seuil d'apparition soulèvements interstitiels

Réinitialiser les matériaux

21

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Options

Options

Nom de l'utilisateur  
[poby]

Répertoire de travail (facultatif)  
[ ] Parcourir

Mode d'utilisation  
 Simple  
 Approfondi  
 Libérer les accès à tous les matériaux  
 Arrondir les épaisseurs calculées

- Nom de l'utilisateur (pour rapport d'impression)
- Répertoire de travail (facultatif)
- Mode d'utilisation
  - Simple
    - Accès limité aux paramètres les plus importants
  - Approfondi
    - Débloquer des paramètres secondaires disponibles en arrière plan
    - Permet d'élargir les plages autorisées (minimum, maximum), etc.
- Libérer les accès aux matériaux
- Arrondir les épaisseurs calculées

22

# Guide de l'utilisateur

Disponible à la fin du document

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

INTRODUCTION ..... 1

1 - CONFIGURATION MINIMALE REQUISE ..... 2

2 - NOUVEAUTÉS DANS LA VERSION ACTUELLE (version 2.0) ..... 3

3 - HISTORIQUE DES VERSIONS PRÉCÉDENTES ..... 3

4 - INSTALLATION DU LOGICIEL ..... 4

5 - SURVOL RAPIDE ..... 5

5.1 - PARTICULARITÉS DE L'INTERFACE UTILISATEUR ..... 8

6 - OBJECTIFS DE PERFORMANCE ET DE DURÉE DE VIE ..... 12

6.1 RECOMMANDATION SUR LE CHOIX DE LA DURÉE DE VIE ..... 13

7 - DÉBITS DE CIRCULATION ET TRAFIC LOURD ..... 14

7.1 - DISTRIBUTION DES CAMIONS SUR LES VOIES ..... 16

7.2 - COEFFICIENT D'AGRESSIVITÉ MOYEN (CAM) ..... 17

7.3 - COEFFICIENT D'AGRESSIVITÉ (CA) POUR UN CAMION DONT LA CHARGE EST CONNUE ..... 18

8 - CLIMAT ..... 21

8.1 ZONE CLIMATIQUE ET TEMPÉRATURE EFFECTIVE DU REVÊTEMENT ..... 21

8.2 - TEMPÉRATURES ET INDICES DE GEL ..... 22

8.2.1 Transfert de chaleur à la surface (facteur n) ..... 22

8.2.2 Édition d'un fichier CLM ..... 23

9 - CALCUL STRUCTURAL ..... 25

9.1 - ÉQUATION DE L'AASHTO ..... 25

9.2 - PRINCIPE D'APPLICATION DE L'ÉQUATION DE L'AASHTO ..... 27

9.3 - MODULE DE RÉSILIENCE (MR) ..... 29

9.3.1 - Variations saisonnières du module de résilience ..... 30

9.3.2 - Facteur d'étalement du module de résilience (FMr) ..... 32

23

Disponible  
à la fin du  
document

## TABLE DES MATIÈRES

|  |           |
|--|-----------|
| <b>10 - CALCUL DU GEL</b> .....  | <b>36</b> |
| 10.1 DIMENSIONNEMENT AU GEL ET SEUIL DE SOULÈVEMENT ADMISSIBLE .....   | 36        |
| 10.2 DESCRIPTION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE .....  | 37        |
| 10.3 – GÉLIVITÉ (SP) .....   | 39        |
| 10.3.1 <i>Indice de gélivité sans surcharge (SP<sub>0</sub>)</i> .....   | 40        |
| 10.3.2 <i>Coefficient de surcharge (a)</i> .....   | 42        |
| 10.3.3 <i>Sol argileux varvé ou ayant un indice de liquidité élevé (<math>I_L \geq 0,9</math>)</i> .....                   | 44        |
| 10.4 – CONDUCTIVITÉ THERMIQUE (K) .....  | 44        |
| 10.4.1 <i>Conductivité thermique (K<sub>s</sub>) et masse volumique des particules solides (<math>\rho_d</math>)</i> ..... | 45        |
| 10.5 – CHALEUR LATENTE DE FUSION (Lf) .....  | 46        |
| 10.6 – MASSES VOLUMIQUES ET VOLUMÉTRIE .....   | 46        |
| 10.7 - SURFACE SPÉCIFIQUE (Ss) ET TENEUR EN EAU GELÉE (Wf) OU NON GELÉE (Wu) .....   | 47        |
| 10.8 - ÉTALONNAGE DU CALCUL AVEC DES MESURES DE TERRAIN .....  | 48        |
| <b>11 - CRITÈRE DE GEL DE 1994</b> .....   | <b>50</b> |
| <b>12 - NORME POUR LES ROUTES À FAIBLE TRAFIC</b> .....  | <b>53</b> |
| <b>13 - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....  | <b>53</b> |
| <b>14 - POUR COMMUNIQUER AVEC NOUS</b> .....   | <b>56</b> |

# Dimensionnement structural des chaussées souples

L'essai AASHTO et la méthode de dimensionnement de l'AASHTO



Chaussée - [1-Nouvelle route]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

**Segment homogène**  
Exemple

**Objectifs**  
Type de route: Autoroute  
Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
Années: 30  
ECAS (millions): 52,012  
Outil ECAS:  Outil ECAS  
BB reporté à l'an prochain: 0 mm

**Climat**  
Station météorologique: L'Assomption (CDA)  
Zone: Sud  
T<sub>ee</sub>: 20,5  
T<sub>ma</sub>: 5,3  
IG<sub>n</sub>: 1140  
σ<sub>ig</sub>: 222  
Simulation: 15  
PR: 15  
IG: 1474  
IG<sub>s</sub>: 1474  
n: 1,0

**Revêtement à haute résistance à l'ornièrage requis**

**Couches de matériaux**

| Matériau                       | H (mm) | STRUCTURAL      |                             |                       |     | GEL  |        | W18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------------|--------|-----------------|-----------------------------|-----------------------|-----|------|--------|-------------------|---------------------------|
|                                |        | F <sub>mi</sub> | m <sub>effectif</sub> (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   |        |                   |                           |
| 1 BB                           | 295    | 1,00            | 3101                        | 0,44                  | 1,0 | 5,16 | 55,568 | 41,60             |                           |
| 2 MG 20                        | 300    | 1,00            | 110                         | 0,07                  | 0,8 | 5,82 | 52,465 | 5,70              |                           |
| 3 MG 112 (fuseau entier)       | 600    | 1,00            | 74                          | 0,08                  | 0,8 | 7,24 | 54,856 | 5,40              |                           |
| 4                              |        |                 |                             |                       |     |      |        |                   |                           |
| 5                              |        |                 |                             |                       |     |      |        |                   |                           |
| 6                              |        |                 |                             |                       |     |      |        |                   |                           |
| 7                              |        |                 |                             |                       |     |      |        |                   |                           |
| 8                              |        |                 |                             |                       |     |      |        |                   |                           |
| 9 SC fin (plus de 30 % passer) |        | 1,00            | 36                          |                       |     |      |        |                   |                           |
| Total = 1195                   |        |                 |                             |                       |     |      |        |                   | Total 52,70               |

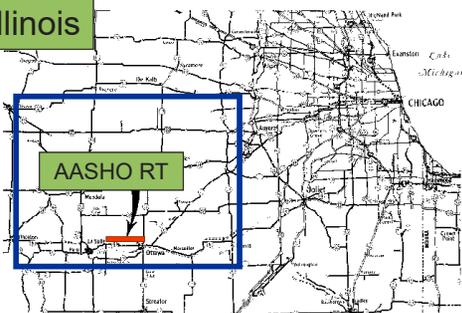
→ Équivalences d'été (FAS = 0,84)  
M<sub>r</sub> = 43 MPa  
CBR = 5,6

Réinitialiser les matériaux

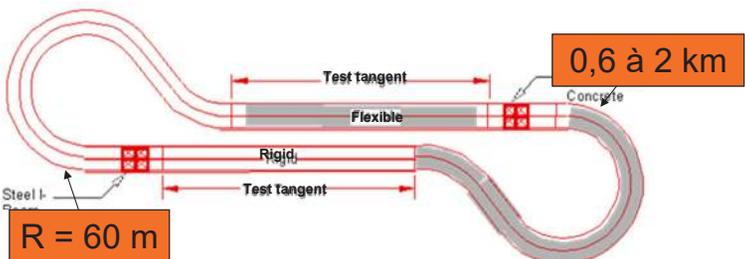
## L'essai routier AASHTO - vue d'un circuit



Ottawa, Illinois



AASHTO RT



## Méthode AASHTO: Nombre structural

- **Nombre structural requis (SN)**
- **ECAS** = Trafic cumulatif pendant la période de design
- **ΔPSI** = Diminution de l'indice de viabilité pendant la période de design
- **M<sub>R</sub>** = Module de résilience
- **R** = Fiabilité
- **S<sub>0</sub>** = Variabilité

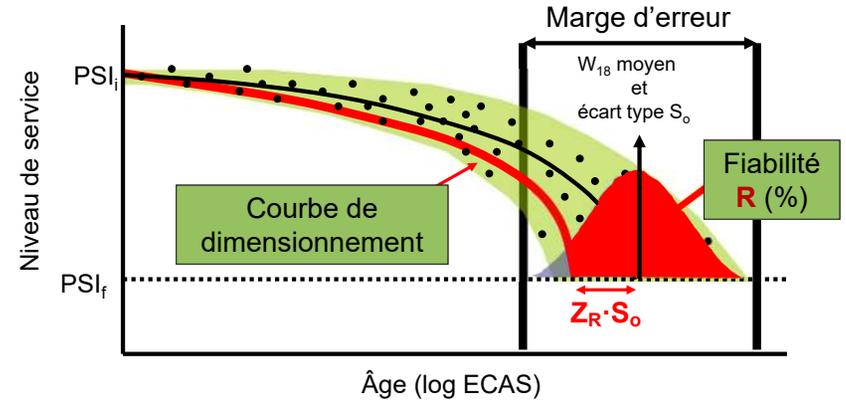


# Calcul structural

- Le nombre structural (SN) au-dessus de chaque couche doit être **suffisant** pour supporter le trafic sans déformation excessive durant toute la période de conception.
- La conception finale correspond à un **assemblage** de couches de matériaux d'épaisseurs définie qui résultent ainsi en un **% de chances** de conserver la chaussée en état à la fin de la période de conception pour le trafic anticipé.



# Niveau de confiance ou fiabilité « R »



**R** représente les chances que la chaussée présente un niveau de qualité supérieur ou égal à celui visé à la fin de la période de conception

# Variabilité S<sub>0</sub>

- Intègre la dispersion de toutes les données
  - Propriétés des matériaux
  - Épaisseur
  - Niveaux de qualité
  - Trafic
  - Drainage des couches
  - Caractéristiques du sol
  - Précision du modèle
- La valeur utilisée pour fins de conception dans le modèle AASHTO est de 0,45



# Objectifs de design

Transports Québec

NORME

STRUCTURES DE CHAUSSEE

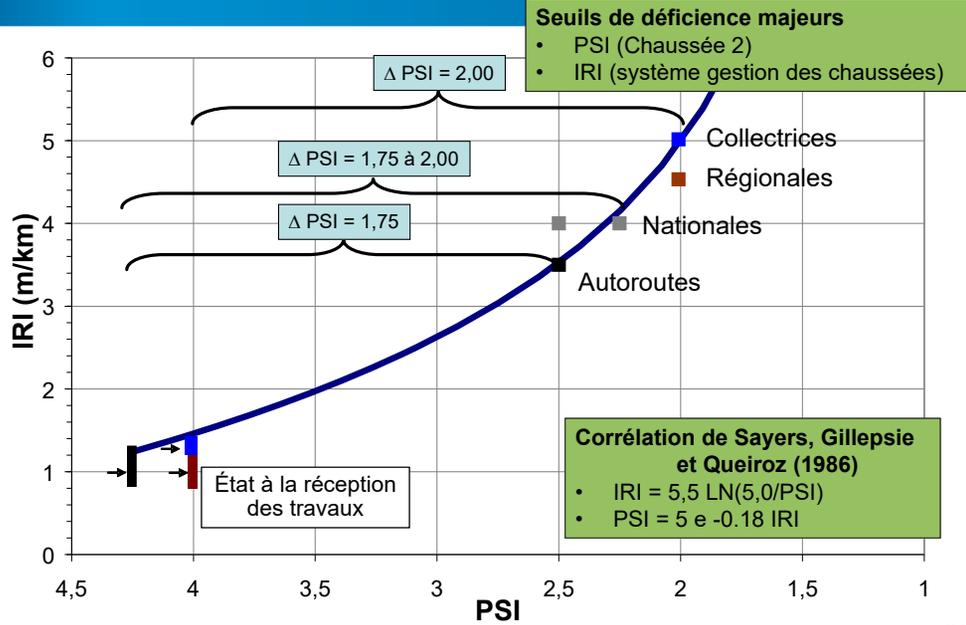
Tome II  
 Chapitre 2  
 Page 3  
 Date 2022 01 30

Tableau 2.4-1 Critères de conception – Chaussées souples neuves ou faisant l'objet d'un décohésionnement ou d'un remplacement complet du revêtement

| Classification de la route | DJMA projeté | Période de conception (années) | Structural <sup>(1)</sup>          |                                    | Soulèvement au gel <sup>(2)</sup> maximal (mm) |
|----------------------------|--------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|
|                            |              |                                | Perte de viabilité maximale (ΔPSI) | Fiabilité statistique minimale (%) |  |
| Locale                     | < 1000       | 25                             | 2,0                                | 66                                 | 70   |
|                            | > 1000       |                                |                                    | 70                                 |  |
| Collectrice et régionale   | < 2000       | 25                             | 2,0                                | 70                                 | 60   |
|                            | 2000–3000    |                                |                                    | 75                                 |  |
|                            | > 3000       |                                |                                    | 80                                 |  |
| Nationale                  | < 5000       | 25                             | 2,0                                | 80                                 | 55   |
|                            | 5000–20 000  | 30                             | 2,0                                | 85                                 |  |
|                            |              | 30                             | 1,75                               | 90                                 |  |
| Autoroute                  | < 20 000     | 30                             | 1,75                               | 90                                 | 50   |
|                            | > 20 000     |                                |                                    | 95                                 |  |

1. Perte de viabilité déterminée suivant l'indice de viabilité de l'AASHTO et le facteur de fiabilité R en assumant un écart type S<sub>0</sub> de 0,45.  
 2. Effets du gel admis pour une période de récurrence égale à la demi-période de conception.

# Niveau de Service (IRI vs PSI) - Δ PSI



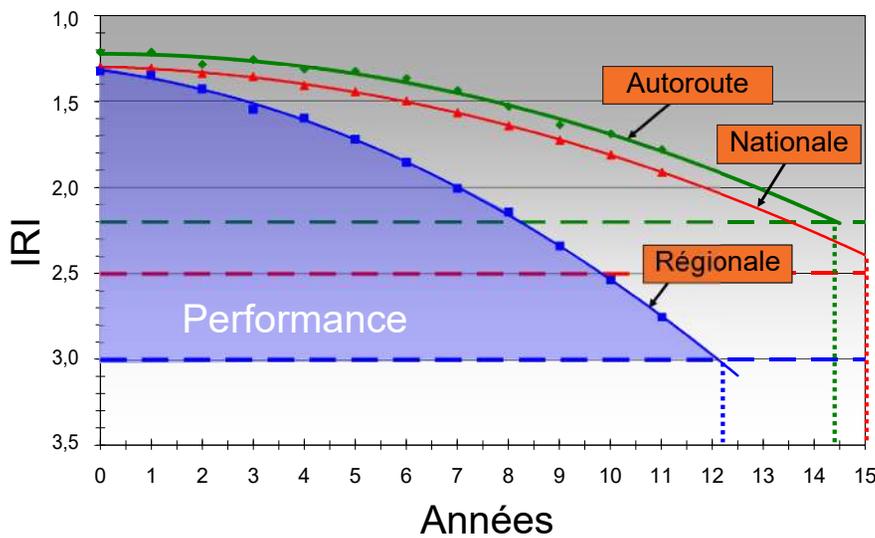
# Objectifs de design

Tableau 2.4-1 Critères de conception – Chaussées souples neuves ou faisant l'objet d'un décohésionnement ou d'un remplacement complet du revêtement

| Classification de la route | DJMA projeté | Période de conception (années) | Structural <sup>(1)</sup>          |                                    | Soulèvement au gel <sup>(2)</sup> maximal (mm) |
|----------------------------|--------------|--------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|
|                            |              |                                | Perte de viabilité maximale (ΔPSI) | Fiabilité statistique minimale (%) |  |
| Locale                     | < 1000       | 25                             | 2,0                                | 66                                 | 70   |
|                            | > 1000       |                                |                                    | 70                                 |  |
| Collectrice et régionale   | < 2000       | 25                             | 2,0                                | 70                                 | 60   |
|                            | 2000–3000    |                                |                                    | 75                                 |  |
|                            | > 3000       |                                |                                    | 80                                 |  |
| Nationale                  | < 5000       | 25                             | 2,0                                | 80                                 | 55   |
|                            | 5000–20000   | 30                             | 2,0                                | 85                                 | 55   |
|                            | > 20000      | 30                             | 1,75                               | 90                                 | 50   |
| Autoroute                  | < 20000      | 30                             | 1,75                               | 90                                 | 50   |
|                            | > 20000      |                                |                                    | 95                                 |  |

1. Perte de viabilité exprimée suivant l'indice de viabilité de l'AASHTO et le facteur de fiabilité R en assumant un écart type  $S_p$  de 0,45.  
2. Effets du gel admis pour une période de récurrence égale à la demi-période de conception.

# Courbe de performance Exemple de RP avec stabilisation



|   | F <sub>mi</sub> | m <sub>effectif</sub> (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | W18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |       |
|---|-----------------|-----------------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|---------------------------|-------|
| 1   | 1,00            | 3101                        | 0,44                  | 1,0 | 5,16 | 55,568            | 41,60                     |       |
| 2   | 1,00            | 110                         | 0,07                  | 0,8 | 5,82 | 52,465            | 5,70                      |       |
| 3   | 1,00            | 74                          | 0,08                  | 0,8 | 7,24 | 54,856            | 5,40                      |       |
| 4   |                 |                             |                       |     |      |                   |                           |       |
| 5   |                 |                             |                       |     |      |                   |                           |       |
| 6   |                 |                             |                       |     |      |                   |                           |       |
| 7   |                 |                             |                       |     |      |                   |                           |       |
| 8   |                 |                             |                       |     |      |                   |                           |       |
| 5   | 1,00            | 36                          |                       |     |      |                   |                           |       |
| → Équivalences d'été (FAS = 0,84)<br>M <sub>i</sub> = 43 MPa<br>CBR = 5,6 |                 |                             |                       |     |      |                   | Total                     | 52,70 |

# Méthode AASHTO: Nombre structural

## • Nombre structural requis (SN)

- **ECAS** = Trafic cumulatif pendant la période de design
- $\Delta PSI$  = Diminution de l'indice de viabilité pendant la période de design
- $M_R$  = Module de résilience
- **R** = Fiabilité
- $S_0$  = Variabilité



37

# Méthode AASHTO

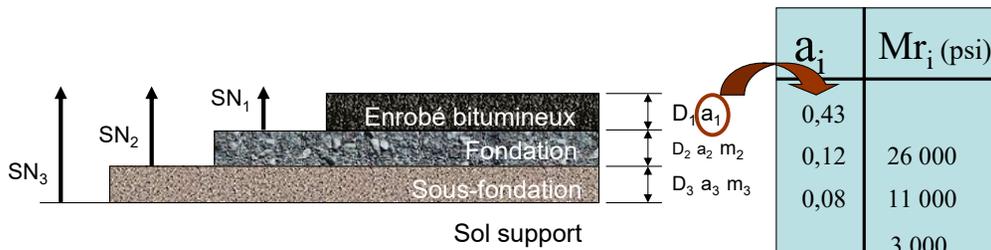


- $SN1 = a1 \cdot D1$
- $SN2 = a1 \cdot D1 + a2 \cdot m2 \cdot D2$
- $SN3 = a1 \cdot D1 + a2 \cdot m2 \cdot D2 + a3 \cdot m3 \cdot D3$
- $a_i$  = Coefficient structural = f (Module  $M_r$ )
- $D_i$  = Épaisseur de la couche
- $m_i$  = Coefficient de drainage



38

## Exemple

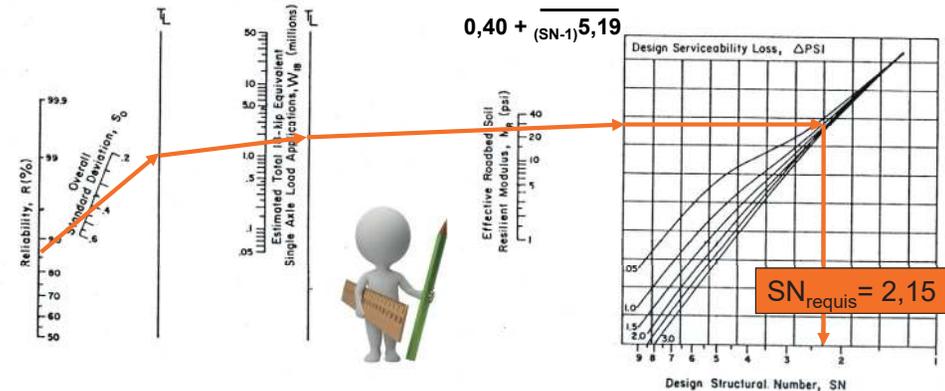


- ✓ R = 85% (route Nationale)
- ✓ ECAS total = 1,5 millions
- ✓  $M_r$  infra = 21 MPa (3000 psi)
- ✓  $\Delta PSI = 2,0$

39

## Abaque de dimensionnement pour une chaussée souple (couche 1)

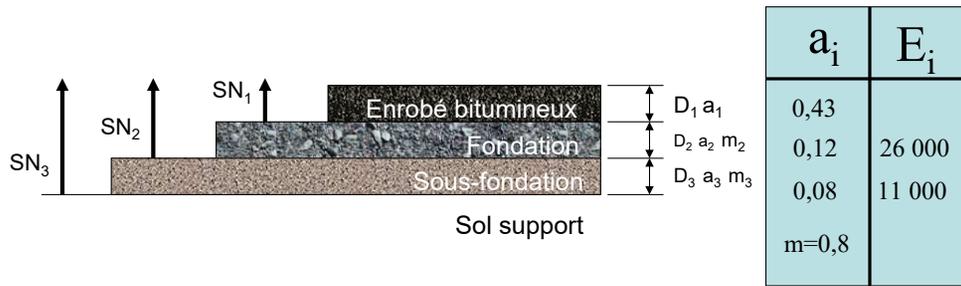
$$\log_{10} W_{18} = Z_r \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log_{10}(SN+1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4.2-1.5} \right] + 2,32 \cdot \log_{10} M_r - 8,07}{1094}$$



Exemple  
 $W_{18} = 1,5 \cdot 10^6$ ,  $R = 85\%$ ,  $S_0 = 0,45$ ,  $M_r = 26\ 000$  psi,  $\Delta PSI = 2$

40

# Exemple

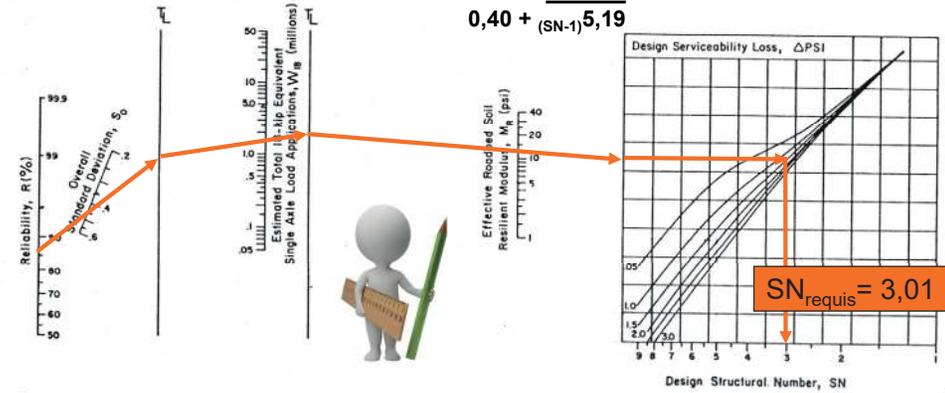


•  $SN_1 \text{ requis} = 2,15 = 0,43 \cdot D_1 \implies D_1 = 2,15/0,43 = \mathbf{5,0 \text{ po}}$



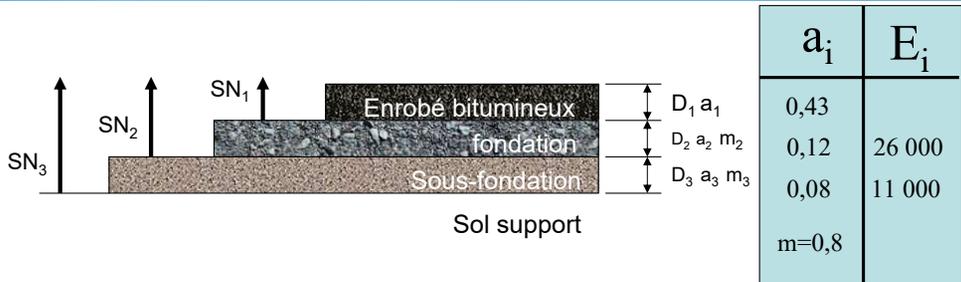
# Abaque de dimensionnement pour une chaussée souple (couche 2)

$$\log_{10} W_{18} = Z_r \cdot S_o + 9,36 \cdot \log_{10}(SN+1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[ \frac{\Delta PSI}{4.2-1.5} \right] \cdot 1094}{0,40 + (SN-1) \cdot 5,19} + 2,32 \cdot \log_{10} M_r - 8,07$$



Exemple  
 $W_{18} = 1,5 \cdot 10^6$ ,  $R = 85 \%$ ,  $S_o = 0,45$ ,  $M_r = 11\ 000 \text{ psi}$ ,  $\Delta PSI = 2$

# Exemple



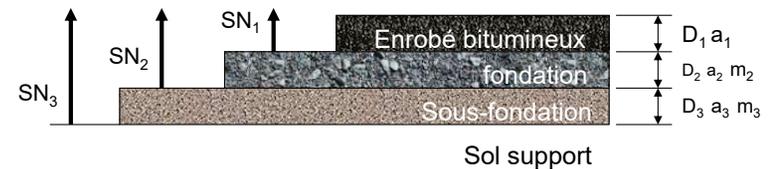
•  $SN_1 \text{ requis} = 2,15 = 0,43 \cdot D_1 \implies D_1 = 2,15/0,43 = \mathbf{5,0 \text{ po}}$

•  $SN_2 \text{ requis} = 3,01 \implies D_2 = \frac{3,01 - 2,15}{0,12 \cdot 0,8} = \mathbf{9 \text{ po}}$

•  $SN_3 \text{ requis} = 4,72 \implies D_3 = \frac{4,72 - 3,01}{0,08 \cdot 0,8} = \mathbf{27 \text{ po}}$



# Exemple



- Épaisseur structurale = 41 pouces (1040 mm)
- Épaisseur de protection partielle = 1250 mm

## STRUCTURE DE CHAUSSÉE FINALE

- Enrobé: 5 pouces (130 mm)
- Fondation: 9 pouces (230 mm)
- Sous-fondation: 1250 - 230 - 130 = 890 mm (900 mm)



Chaussée - [1-Nouvelle route]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

Exemple

Objectifs

Type de route: Autoroute

Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000

Années: 30

ÉCAS (millions): 52.012

Outil ÉCAS:

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: L'Assomption (CDA)

Zone: Sud

T<sub>ee</sub>: 20.5

T<sub>ma</sub>: 5.3

IGn: 1140

σ<sub>ig</sub>: 222

Simulation: PR

IG: 1474

Climat: 15

IGs: 1474

n: 1.0

CHAUSSEE

Revêtement à haute résistance à l'ornièrage requis

Couches de matériaux

Matériau

H (mm)

1 BB 295

2 MG 20 300

3 MG 112 (fuseau entier) 600

4

5

6

7

8

9 SC fin (plus de 30 % passer) Total = 1195

Réinitialiser les matériaux

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

| F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> )              | m   | SN   | W18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|------|-------------------|------------------------------------|-----|------|-------------------|---------------------------|
| 1.00 | 3101              | 0.44                               | 1.0 | 5.16 | 55,568            | 41.60                     |
| 1.00 | 110               | 0.07                               | 0.8 | 5.82 | 52,465            | 5.70                      |
| 1.00 | 74                | 0.08                               | 0.8 | 7.24 | 54,856            | 5.40                      |
|      |                   |                                    |     |      |                   |                           |
|      |                   |                                    |     |      |                   |                           |
|      |                   |                                    |     |      |                   |                           |
|      |                   |                                    |     |      |                   |                           |
|      |                   |                                    |     |      |                   |                           |
| 1.00 | 36                | -> Équivalences d'été (FAS = 0,84) |     |      |                   |                           |
|      |                   | Mr = 43 MPa                        |     |      |                   |                           |
|      |                   | CBR = 5,6                          |     |      |                   |                           |
|      |                   |                                    |     |      |                   | Total                     |
|      |                   |                                    |     |      |                   | 52.70                     |



# Dimensionnement structural des chaussées souples

## Propriétés mécanique de matériaux de chaussées



# Matériaux de chaussées

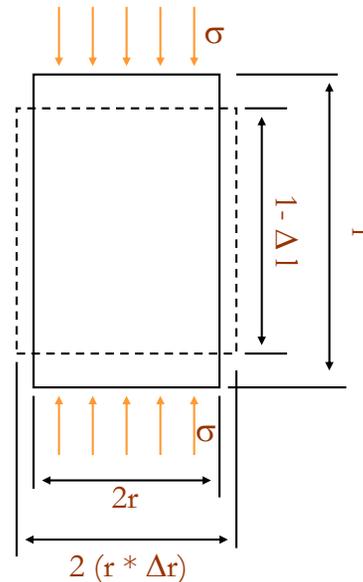


# Plan

- Types de matériaux
- Propriétés des matériaux (rappel)
  - Déformations et lois de comportement
  - Méthodes de mesure
  - Variations saisonnières
- Points importants
- Démonstration à l'aide du logiciel



# Déformation des matériaux



## Cas uniaxial

$$\epsilon_l = \frac{\Delta l}{l} \text{ Déformation}$$

$$\nu = \frac{\epsilon_r}{\epsilon_l} \text{ Coefficient de Poisson}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_l} \text{ Module de Young}$$

# Lois de comportement (Module)

- Thermo-visco-élastique (b. bitumineux):

$$M_r = 10^{(K_1 - K_2 \cdot T \cdot K_3)} + K_4$$

- K - theta (granulaire):

$$M_r = K_1 \theta^{K_2}$$

- Élastique (sols):

$$M_r = K_1$$

| Materiu                             | Modele | MRmin | MRmax | K1    | K2    | K3 | K4  |
|-------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|----|-----|
| BB                                  | 10     | 1000  | 7000  | 4.056 | 0.029 | 1  | 207 |
| MG 112 (fuseau entier)              | 30     | 75.8  | 110.3 | 7.1   | 0.6   |    |     |
| MG 20                               | 30     | 114   | 290   | 14    | 0.6   |    |     |
| SM fin (plus de 30 % passant 80 µm) | 20     |       |       | 45    |       |    |     |

Modele = choix de l'équation pour Mr:  
 10 => Béton bitumineux,  $M_r = 10^{(K_1 - K_2 \cdot T \cdot K_3)} + K_4$  lorsque  $H > 150$   
 20 => Élasticité pure,  $M_r = K_1$   
 30 => K-theta,  $M_r = K_1 \theta^{K_2}$   
 40 => Ln(theta),  $M_r = K_1 \ln(\theta) \cdot K_2$   
 MiMin et MiMax = Plage de contrôle

Le coefficient structural est fonction du Mr:

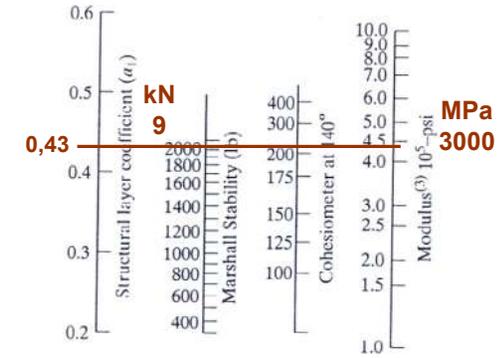
$$a = K_a \log(145,04 \cdot M_r) - K_b$$

|                                  | $K_a$ | $K_b$ |
|----------------------------------|-------|-------|
| Revêtement d'enrobé bitumineux : | 0,414 | 1,896 |
| Fondations granulaires :         | 0,249 | 0,977 |
| Sous-fondation granulaire :      | 0,227 | 0,839 |

# Stabilités Marshall (années 90)

- Enrobé bitumineux conventionnel

- Exigence norme 4201:  $S \geq 9kN$  (EB-20, EB-14, EB-10, EB-5)



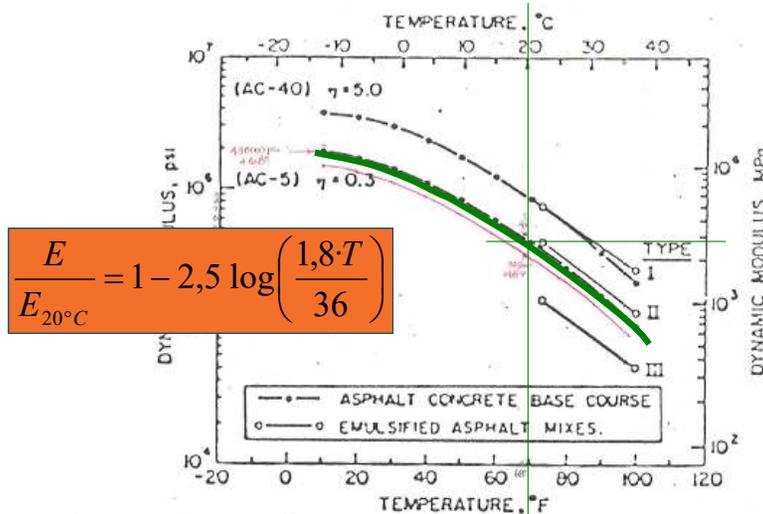
Module pour stabilité de 9 kN

$$M_{r_{20^\circ C}} = 10^{(0,07737 \cdot S + 4,959)} / 145 \approx 3000 MPa$$

# Variations saisonnières (BB)

- Exemple Montréal-Dorval

$z = 100 \text{ mm} / 3$   
 $M_r = 3000 \text{ MPa à } 20^\circ C$



Température à la profondeur z (tiers de la couche)

Formule de Witczak (1972) [en po et °F]:

$$T_{pav} = T_{air} \left( 1 + \frac{1}{z+4} \right) - \frac{34}{z+4} + 6$$

| Mois      | Tair  | Tpav | Mr    | FF   | FF · Mr |
|-----------|-------|------|-------|------|---------|
| Janvier   | -10.2 | -9.0 | 13352 | 0.07 | 965     |
| Février   | -9    | -7.6 | 13352 | 0.07 | 965     |
| Mars      | -2.5  | 0.2  | 13352 | 0.07 | 965     |
| Avril     | 5.7   | 9.9  | 5291  | 0.44 | 2304    |
| Mai       | 13    | 18.6 | 3241  | 1.13 | 3653    |
| Juin      | 18.3  | 24.9 | 2290  | 2.21 | 5063    |
| Juillet   | 20.9  | 28.0 | 1909  | 3.15 | 6009    |
| Août      | 19.6  | 26.4 | 2094  | 2.63 | 5508    |
| Septembre | 14.8  | 20.7 | 2886  | 1.41 | 4074    |
| Octobre   | 8.7   | 13.5 | 4289  | 0.65 | 2807    |
| Novembre  | 2     | 5.5  | 7205  | 0.24 | 1724    |
| Décembre  | -6.9  | -5.1 | 13352 | 0.07 | 965     |
| Somme     |       |      | 12.15 |      | 35005   |

Facteur de fatigue (FF)

$$FF = 10^{11,056 - 1,94 \log(145 \cdot M_r)}$$

Ref.: Basma et Al-Suleiman 1991

Von Quintus et al. 1980: FHWA-RD-81-154 et 155

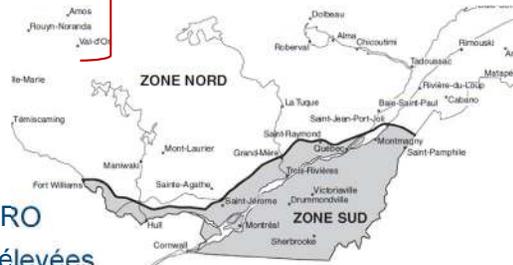
Mr\_eq = 35005/12.15

Mr\_eq = **2882 MPa**  
 a1 = 0.43

# Compilation sur plusieurs sites

- Moyenne zone sud – (TBB ≈ 20,5 °C)
  - $Mr_1 = 2900 - 3100$  MPa
  - $a_1 = 0,43 - 0,44$
- Moyenne zone nord – (TBB ≈ 17,5 °C)
  - $Mr_1 = 3550 - 3750$  MPa
  - $a_1 = 0,47 - 0,48$

Valeurs proches des nouveaux résultats labo (LC 26-700) pour un ESG-14 avec PG 58-34

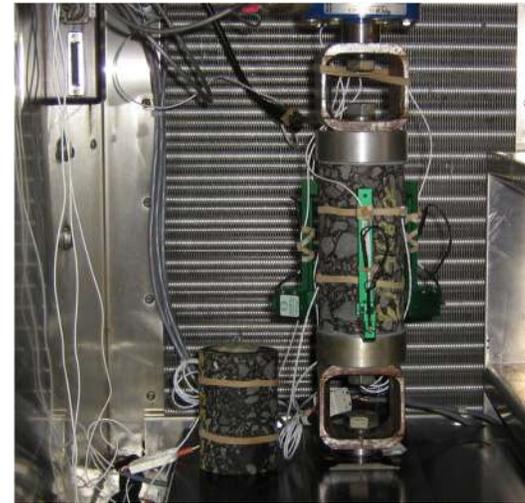


- Bitumes polymères, Enrobés HRO
  - Stabilités environ 30% plus élevées
  - Appliqué uniquement sur la couche de surface
  - $Mr_1 = 3600$  et  $4100$  MPa (zones sud et nord)

# Tension-compression cyclique

Méthode - LC 26-700 (depuis 2007)

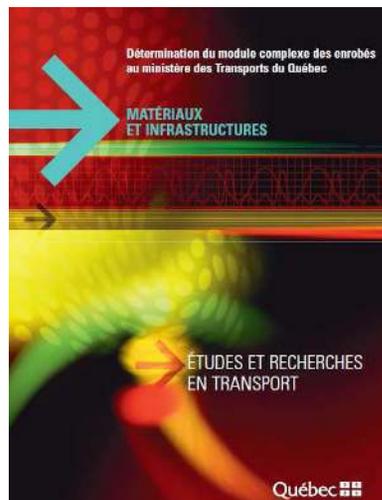
- Courbes de module et de fatigue des enrobés



# Module complexe – Rapport synthèse

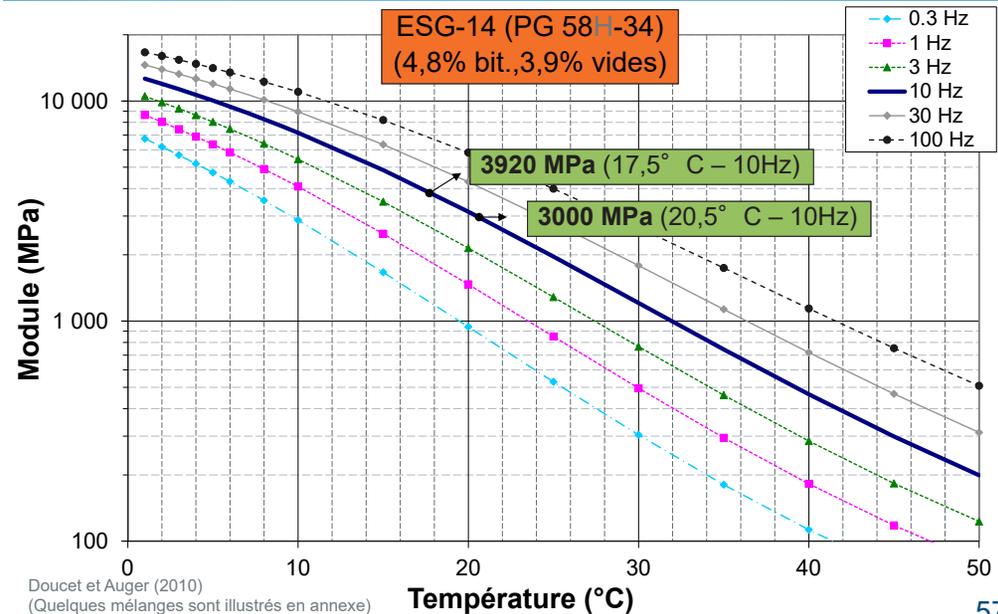
- Table des matières
  - Théorie
  - Essai TCD
  - Étude de répétabilité
  - Résultats individuels
  - Modèles généraux

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



Quelques résultats illustrés en annexe

# Module complexe d'un enrobé en fonction de la température et fréquence



# BB HRO

## Comparaison Chaussée 2 vs Méthode d'essai LC 26-700

### Zone nord (17,5°C, 10 Hz)

| Couche | Enrobé             | Bitume                  | Essai (MPa)<br>LC 26-700 | Combiné | CHAUSSEE<br>Version 2 | Écart |
|--------|--------------------|-------------------------|--------------------------|---------|-----------------------|-------|
| 50 mm  | ESG-10             | PG 64-34<br>(PG 58E-34) | 4400                     | 4158    | 4107                  | 1%    |
| 150 mm | ESG-14 ou<br>GB-20 | PG 58H-34               | 4080<br>(3922-4241)      |         |                       |       |

### Zone sud (20,5°C, 10 Hz)

| Couche | Enrobé             | Bitume                  | Essai (MPa)<br>LC 26-700 | Combiné | CHAUSSEE<br>Version 2 | Écart |
|--------|--------------------|-------------------------|--------------------------|---------|-----------------------|-------|
| 50 mm  | ESG-10             | PG 70-28<br>(PG 64E-28) | 5162                     | 3567    | 3592                  | -1%   |
| 150 mm | ESG-14 ou<br>GB-20 | PG 58H-34               | 3120<br>(2998-3243)      |         |                       |       |

Formule de Thenn de Barros  
(méthode des hauteurs équivalentes  
ou d'Odemark)

$$E_{\text{combiné}} = \left[ \frac{h_1^3 \sqrt{E_1} + h_2^3 \sqrt{E_2}}{h_1 + h_2} \right]^3$$

58

# Bilan enrobés 2019

Tableau 3 - Quantités d'enrobé

| 2019               |                   |                |
|--------------------|-------------------|----------------|
| Type d'enrobé      | Quantité (tonnes) | Proportion (%) |
| EC-5               | 10 762            | 0,4            |
| EC-10              | 178 935           | 6,4            |
| EG-5               | 3 175             | 0,1            |
| EG-10              | 224 753           | 8,1            |
| EGM-10             | 4 547             | 0,2            |
| ESG-5              | 3 278             | 0,1            |
| ESG-10             | 1 570 744         | 56,3           |
| ESG-14             | 183 897           | 6,6            |
| GB-20              | 575 350           | 20,6           |
| SMA-10             | 1 708             | 0,1            |
| Enrobés Marshall   | 31 621            | 1,1            |
| <b>Grand total</b> | <b>2 788 770</b>  | <b>100,0</b>   |

Tableau 5 - Prix moyens pondérés des enrobés en fonction du type d'enrobé

| 2019          |                       |                                 |                                 |
|---------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Type d'enrobé | Prix moyen (\$/tonne) | Prix minimum observé (\$/tonne) | Prix maximum observé (\$/tonne) |
| GB-20         | 107,75                | 97,33                           | 127,63                          |
| ESG-14        | 120,27                | 97,32                           | 198,78                          |
| EC-10         | 120,89                | 107,70                          | 150,06                          |
| ESG-10        | 112,68                | 103,10                          | 124,31                          |
| EG-10         | 115,32                | 94,90                           | 151,26                          |
| EGM-10        | 127,71                | 121,14                          | 188,50                          |
| ESG-5         | 130,24                | 105,00                          | 217,80                          |
| EG-5          | 141,24                | 138,50                          | 148,50                          |
| SMA-10        | 145,50                | 145,50                          | 145,50                          |
| EC-5          | 299,90                | 299,90                          | 299,90                          |
| <b>Global</b> | <b>112,85</b>         | <b>94,90</b>                    | <b>299,90</b>                   |

Tableau 9 - Quantités de bitume utilisées par classe de performance

| 2019             |                            |                             |  |
|------------------|----------------------------|-----------------------------|--|
| Classe de bitume | Quantité d'enrobé (tonnes) | Quantité de bitume (tonnes) | Proportion d'utilisation du bitume (%) |
| PG 52-40         | 6 638                      | 317                         | 0,2                                    |
| PG 58-28         | 43                         | 2                           | < 0,01                                 |
| PG 58-34         | 84 350                     | 4 328                       | 3,1                                    |
| PG 58-40         | 27 590                     | 1 319                       | 0,9                                    |
| PG 64-28         | 18 324                     | 850                         | 0,6                                    |
| PG 64-34         | 44 185                     | 2 163                       | 1,5                                    |
| PG 70-28         | 46 795                     | 2 504                       | 1,8                                    |
| PG 52V-40        | 17 698                     | 871                         | 0,6                                    |
| PG 58E-34        | 1 171 970                  | 58 622                      | 41,8                                   |
| PG 58H-34        | 876 196                    | 43 589                      | 31,0                                   |
| PG 58S-28        | 75 075                     | 4 055                       | 2,9                                    |
| PG 64E-28        | 349 800                    | 18 257                      | 13,0                                   |
| PG 64E-34        | 26 504                     | 1 359                       | 1,0                                    |
| PG 64H-28        | 12 094                     | 585                         | 0,4                                    |
| Non disponible   | 31 508                     | 1 577                       | 1,1                                    |
| <b>Total</b>     | <b>2 788 770</b>           | <b>140 401</b>              | <b>100,0</b>                           |

59

# Enrobés HRO

HRO = Haute résistance à l'orniérage

Désigne les enrobés rencontrant les exigences de la norme sur les enrobés à chaud (tome VII, chap. 4.2) pour l'essai à l'orniéreur (méthode d'essai LC 26-410).

- 4201 formulation Marshall
- 4202 formulation LC



60

# BB HRO – critères décisionnels

## • Critères dans le logiciel

| Classification de la route | DJMA projeté | Type d'enrobé |                                |
|----------------------------|--------------|---------------|--------------------------------|
|                            |              | Conventionnel | Haute résistance à l'orniérage |
| Collectrice et Régionale   | > 5000       | A             |                                |
|                            | < 5000       | A             |                                |
| Nationale                  | 5000-20000   | B             |                                |
|                            | > 20000      |               | B                              |
| Autoroute                  | < 20000      |               | B                              |
|                            | > 20000      |               | C                              |

## • Arrimage aux bitumes actuels

- Tableau « Choix des composants – Enrobés »
- DJMA < 5000; PG lettre S, H, V  
→ Norme Tome II chap. 2 (tableau 2.5-3)  
→ BB conventionnel
- DJMA > 5000, PG 70, lettre E  
→ BB conventionnel ou BB HRO



Méthode LC (norme 4202) - Bitumes PG

61

# Bitumes: Classification MSCR

Tableau 1 : Bitumes de remplacement pour chacune des zones climatiques

| Zone climatique | Avant 2019<br>(Classification AASHTO M320) | Bitumes de remplacement<br>(Classification AASHTO M332) |
|-----------------|--|---|
| 1               | PG 64-28<br>PG 70-28                       | PG 64H-28<br>PG 64E-28                                  |
| 2               | PG 58-34<br>PG 64-34                       | PG 58H-34<br>PG 58E-34                                  |
| 3               | PG 52-40<br>PG 58-40                       | PG 52V-40   |
| 1 et 2          | PG 58-28                                   | PG 58S-28   |

Jnr<sub>3,2</sub>: complaisance non recouvrable mesurée à 3,2 kPa

Tableau 2 : Définitions des niveaux de résistance à la sollicitation du trafic

| Niveau de sollicitation | Jnr <sub>3,2</sub> (kPa <sup>-1</sup> ) |
|-------------------------|---|
| S (standard)            | ≤ 4,50                                  |
| H (élevé)               | ≤ 2,00                                  |
| V (très élevé)          | ≤ 1,00                                  |
| E (extrême)             | ≤ 0,50                                  |

# Choix des composants – Enrobés (norme 4202)

ESG-10 – EG10<sup>1</sup> – EGM-10 – ESG14 – GB-20 – EC-10<sup>2</sup> – MUN-10 – EG-5

| Type de route            | Débit de circulation |             | Couche de surface   |                               |                               |                          |                          |                | Couche de base et autre couche |           |           |                          |                          |             |
|--------------------------|----------------------|-------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|--------------------------------|-----------|-----------|--------------------------|--------------------------|-------------|
|                          |                      |             | Bitume <sup>2</sup> |                               |                               | Catégorie gros granulats | Catégorie granulats fins | Essai exigé    | Bitume <sup>3</sup>            |           |           | Catégorie gros granulats | Catégorie granulats fins | Essai exigé |
|                          | DJMA                 | ECAS annuel | Zone 1 PG           | Zone 2 PG                     | Zone 3 PG                     |                          |                          |                | Zone 1 PG                      | Zone 2 PG | Zone 3 PG |                          |                          |             |
| Autoroute                | > 20 000             | > 1 000 000 | 64E-28 <sup>1</sup> | 58E-34                        | S.O.                          | 1a                       | 1                        | Ornièreur, CPP | 64E-28                         | 58E-34    | S.O.      | 2c                       | 1                        | Ornièreur   |
|                          | < 20 000             | < 1 000 000 | 64E-28              | 58E-34                        | S.O.                          | 1a                       | 1                        | Ornièreur, CPP | 64H-28                         | 58H-34    | S.O.      | 3c                       | 1                        | Ornièreur   |
|                          | > 5 000              | > 500 000   | 64E-28              | 58E-34                        | S.O.                          | 2b                       | 1                        | Ornièreur, CPP | 64H-28                         | 58H-34    | S.O.      | 3c                       | 2                        | Ornièreur   |
| Nationale                | > 20 000             | > 500 000   | 64E-28              | 58E-34                        | 52V-40<br>58H-34 <sup>1</sup> | 1a                       | 1                        | Ornièreur, CPP | 64H-28                         | 58H-34    | 52V-40    | 3c                       | 1                        | Ornièreur   |
|                          | < 20 000             | < 500 000   | 64E-28              | 58E-34                        | 52V-40<br>58H-34 <sup>1</sup> | 2b                       | 2                        | Ornièreur, CPP | 64H-28                         | 58H-34    | 52V-40    | 3c                       | 2                        | Ornièreur   |
|                          | > 5 000              | > 300 000   | 64H-28              | 58H-34                        | 52V-40<br>58H-34 <sup>1</sup> | 3c                       | 2                        |                | 64H-28                         | 58H-34    | 52V-40    | 3c                       | 2                        |             |
| Régionale et collectrice | > 20 000             | > 300 000   | 64E-28              | 58E-34                        | 52V-40<br>58H-34 <sup>1</sup> | 2b                       | 1                        | Ornièreur, CPP | 64H-28                         | 58H-34    | 52V-40    | 3c                       | 2                        | Ornièreur   |
|                          | < 20 000             | < 300 000   | 64E-28              | 58E-34                        | 52V-40<br>58H-34 <sup>1</sup> | 3b                       | 2                        | Ornièreur      | 64H-28                         | 58H-34    | 52V-40    | 3c                       | 2                        | Ornièreur   |
|                          | < 5 000              | < 150 000   | 64H-28 <sup>1</sup> | 58H-34<br>58S-28 <sup>1</sup> | 52V-40<br>58H-34 <sup>1</sup> | 3c                       | 2                        |                | 58S-28                         | 58H-34    | 52V-40    | 3c                       | 2                        |             |

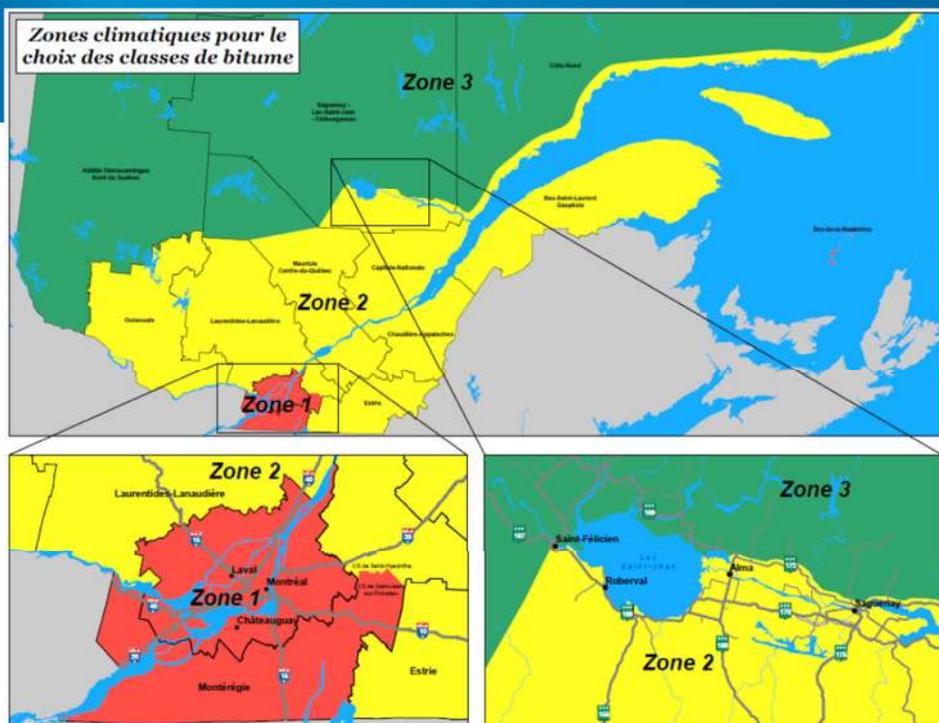
Décembre 2023

[Voir version pleine page en annexe]

Informations additionnelles:

<http://www.viabitume.com/include/pdf/2018/juillet/v13-n2.pdf> (p.8)

Zones climatiques pour le choix des classes de bitume



# Critères de sélection des enrobés

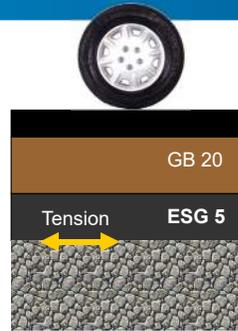
Enrobés formulés selon la méthode du Laboratoire des chaussées (MTQ – Tome VII Matériaux – 4202)

| USAGE PERFORMANCE ET ÉPAISSEUR  | TYPE D'ENROBÉ |        |        |       |        |        |        |      |      |        |
|---|---------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|------|------|--------|
|   | GB-20         | ESG-14 | ESG-10 | EG-10 | EGM-10 | MUN-10 | EC-10  | EC-5 | EG-5 | ESG-5  |
| <b>USAGE (1 : Sous réserve 2 : Adapté 3 : Recommandé)</b>               |               |        |        |       |        |        |        |      |      |        |
| <b>Chaussée</b>   |               |        |        |       |        |        |        |      |      |        |
| Couche de base  | 3             | 2      |        |       |        |        |        |      |      | 3(A)   |
| Couche unique   |               | 3      |        |       |        |        |        |      |      |        |
| Couche de surface   | 1(B,C)        | 2      | 3      | 3     | 3      | 3(D)   | 1(B,C) |      |      | 3(B,E) |
| Couche de correction  |               |        | 2      |       |        |        | 3      |      |      |        |
| Couche de correction - Dévers   | 3             | 3      | 3      |       |        |        | 3      |      |      |        |
| Rapiéçage mécanisé  |               |        | 3      |       |        |        | 3      |      |      |        |
| Rapiéçage manuel  |               |        |        |       |        |        | 3      | 2(F) |      |        |
| Voie cyclable   |               |        |        |       |        | 3      | 3(G)   |      |      |        |
| <b>Ouvrage d'art</b>  |               |        |        |       |        |        |        |      |      |        |
| Couche de surface   |               |        | 3      | 2(H)  |        |        |        |      |      | 3(B,E) |
| Couche de correction  |               |        | 3      |       |        |        | 3      |      |      |        |
| Rapiéçage mécanisé sous la membrane                                     |               |        |        |       |        |        | 3      |      |      |        |
| Rapiéçage manuel sous la membrane                                       |               |        |        |       |        |        | 3      |      |      |        |
| Enrobé temporaire   |               |        | 3      |       |        |        |        |      |      |        |
| <b>PERFORMANCE* (1 : Passable 2 : Moyenne 3 : Bonne 4 : Très bonne)</b> |               |        |        |       |        |        |        |      |      |        |
| Adhérence   | 3             | 3      | 3      | 4     | 4      | 3      | 1      | N/A  | 3    | N/A    |
| Résistance à l'ornièrage  | 4             | 3      | 3      | 3     | 3      | 2      | 2      | 1    | 3    | N/A    |
| Résistance à la fissuration   | 1             | 2      | 3      | 3     | 2      | 3      | 3      | 3    | 3    | 4      |
| Résistance à l'arrachement  | 2             | 3      | 4      | 4     | 2      | 4      | 3      | 3    | 4    | N/A    |
| Réduction du bruit pneu-chaussée  | N/A           | 2      | 3      | 3     | 3      | N/A    | N/A    | N/A  | 3    | N/A    |
| <b>ÉPAISSEUR DE POSE (mm)</b>   |               |        |        |       |        |        |        |      |      |        |
| Minimale  | 80            | 60     | 40     | 40    | 30(I)  | 40     | 20     | 10   | 25   | 50     |
| Optimale  | 100           | 70     | 60     | 50    | 40     | 50     | 30     | 20   | 30   | 60     |
| Maximale  | 120           | 80     | 70     | 60    | 50     | 60     | 40     | 30   | 40   | 70     |

Décembre 2023 (Voir agrandi en annexe)

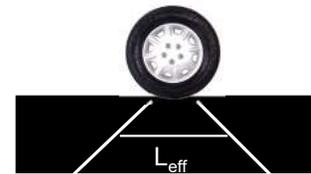
# Base antifatique – BAF (formule ESG-5)

- Bitume
- Module
- Résistance en fatigue ↑ en orniérage ↓
- Un calcul mécanisto-empirique permet de réduire le revêtement d'environ 10-15 mm pour une même espérance de vie
- Le coefficient structural (fonction du module) est le seul paramètre disponible dans la méthode AASHTO 1993.
  - 0,49 et 0,52 ont été introduits de façon à reproduire l'effet du calcul mécanisto-empirique



ESG-5 sur 30-35% de l'épaisseur (25% min.)  
 Vise les chaussées neuves avec revêtements de plus de 200 mm.  
 Nécessite au moins 120 mm d'enrobé par-dessus (pour éviter ornières de fluage).  
 Ce n'est pas une couche anti-remontée de fissures pour le recouvrement des enrobés fissurés.

# Prise en compte de la fréquence (vitesse) de sollicitation sur le module des enrobés



$$\text{durée} = \frac{L_{\text{eff}}}{\text{Vitesse}}$$

$$\text{fréquence} = \frac{1}{\text{durée}}$$

| Type de route     | Vitesse (km/h) | Fréquence estimée à mi-couche (Hz) |                    |                      |
|-------------------|----------------|------------------------------------|--------------------|----------------------|
|                   |                | Base (75-300 mm)                   | Surface (25-75 mm) | Combiné (100-300 mm) |
| Autoroute         | 100            | 10-25                              | 45-95              | 15-40                |
| Nationale         | 70             | 15-20                              | 35-70              | 10-30                |
| Rue résidentielle | 25             | 5-10                               | 10-25              | 5-10                 |
| Intersection      | 1              | 0.1-0.25                           | 0.5-1.0            | 0.1-0.5              |

NCHRP 1-37A, Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures, table 3.3.1, march 2004.

### Simplification suggérée:

- Plusieurs méthodes analytiques utilisent une fréquence « standard » de 10 Hz (France, Belgique, ...)
- Nous pouvons considérer que le ratio de fréquence correspond au ratio de vitesse, par exemple à 20-25 km/h on a une fréquence 3 fois plus faible qu'à 60-75 km/h (→ 10 Hz / 3 = 3,33 Hz)

# Coefficient structural en place

Guide, tableau 8

| Fissuration de la surface  | Coefficient structural |                      |
|--|------------------------|----------------------|
|  | Revêtement bitumineux  | Fondation stabilisée |
| Peu ou pas de carrelage  | 0,35 à 0,40            | 0,20 à 0,35          |
| Fissuration transversale de faible sévérité                          |                        |                      |
| < 10 % carrelage de faible sévérité                                  | 0,25 à 0,35            | 0,15 à 0,25          |
| < 1 fissure transversale tous les 6 m (sévérité moyenne et élevée)   |                        |                      |
| > 10 % carrelage de faible sévérité                                  |                        |                      |
| < 10 % fissuration de fatigue de sévérité moyenne                    | 0,20 à 0,30            | 0,15 à 0,20          |
| > 1 fissure transversale tous les 3-6 m (sévérité moyenne et élevée) |                        |                      |
| > 10 % carrelage de sévérité moyenne                                 |                        |                      |
| < 10 % carrelage de sévérité élevée                                  | 0,14 à 0,20            | 0,10 à 0,20          |
| > 1 fissure transversale tous les 3 m (sévérité moyenne et élevée)   |                        |                      |
| > 10 % carrelage de sévérité élevée                                  |                        |                      |
| > 1 fissure transversale tous les 3 m (sévérité élevée)              | 0,08 à 0,15            | 0,08 à 0,15          |

### Notes:

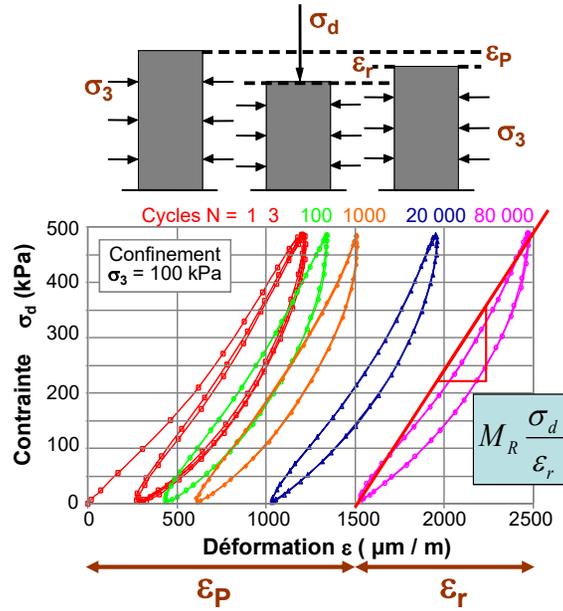
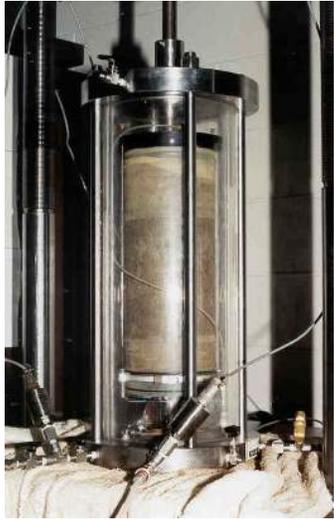
- Le remplacement des zones sévèrement fissurées est recommandé avant tout resurfaçage
- Les taux de fissuration à considérer sont ceux qui restent à la suite des réparations
- Carottage et essais recommandés pour évaluation des tous les matériaux et à plus forte raison dans le cas de couches stabilisées
- Les fondations ou sous-fondations granulaires dégradées ou contaminées par des particules peuvent avoir un coefficient structural inférieur à 0,1 et un coefficient de drainage réduit
- Le concepteur peut faire intervenir tout autre type de dégradation jugé approprié pour justifier l'ajustement du coefficient structural d'une couche

# Facteur d'ajustement du module

| Matériau                       | H (mm)       | F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | W18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------------|--------------|------|-------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|---------------------------|
| 1 BB HRD                       | 170          | 1,00 | 3592              | 0,47                  | 1,0 | 3,15 | 775,539           | 23,97                     |
| 2 BB fissuré                   | 150          | 1,00 | 1366              | 0,3                   | 1,0 | 4,9  | 38,767            | 0,00                      |
| 3 MG 20                        | 275          | 1,00 | 110               | 0,07                  | 0,8 | 5,51 | 34,893            | 5,23                      |
| 4 MG 112 (fuseau entier)       | 500          | 1,00 | 74                | 0,08                  | 0,8 | 6,69 | 29,382            | 4,50                      |
| 5                              |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 6                              |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 7                              |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 8                              |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 9 SC fin (plus de 30 % passer) | Total = 1095 | 1,00 | 36                |                       |     |      |                   | Total 33,70               |

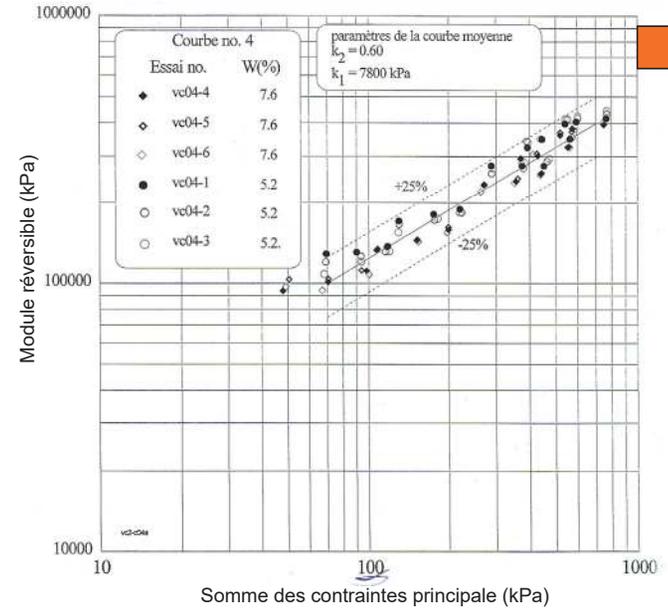
# Mat granulaires: triaxial cyclique

Norme - LC 22-400



70

# Résultat triaxial cyclique (ex: MG 20 granitique, Valcartier)

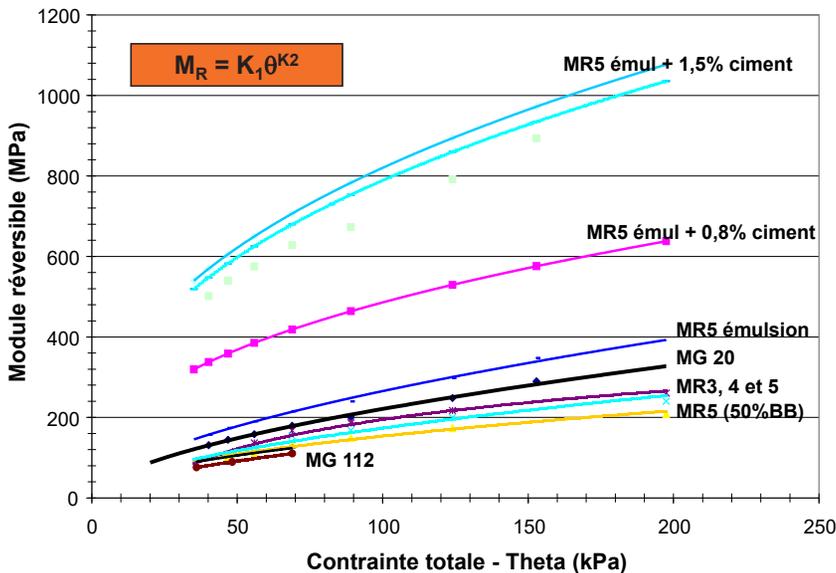


$$M_R = K_1 \theta^{K_2}$$

71

# Modules réversibles

Étalonnés pour la méthode AASHTO 1993



72

# Sols de support - Mr effectif

| Mois          | M <sub>r</sub> , MPa | u <sub>f</sub> |
|---------------|----------------------|----------------|
| Janvier       | 140                  | 0,01           |
|               | 140                  | 0,01           |
| Février       | 140                  | 0,01           |
|               | 140                  | 0,01           |
| Mars          | 140                  | 0,01           |
|               | 20,7                 | 1,01           |
| Avril         | 20,7                 | 1,01           |
|               | 21,7                 | 0,90           |
| Mai           | 23,3                 | 0,77           |
|               | 25,9                 | 0,60           |
| Juin          | 31,0                 | 0,39           |
|               | 38,8                 | 0,24           |
| Juillet       | 46,5                 | 0,15           |
|               | 49,6                 | 0,13           |
| Août          | 51,7                 | 0,12           |
|               | 51,7                 | 0,12           |
| Septembre     | 51,7                 | 0,12           |
|               | 51,7                 | 0,12           |
| Octobre       | 49,1                 | 0,14           |
|               | 45,5                 | 0,16           |
| Novembre      | 42,9                 | 0,19           |
|               | 41,4                 | 0,20           |
| Décembre      | 41,4                 | 0,20           |
|               | 140                  | 0,01           |
| Somme :       | 6,66                 |                |
| Moyenne :     | 0,28                 |                |
| M, effectif : | 36,1                 |                |

- Méthode du dommage équivalent (AASHTO 1993):
  - $U_f = 1,18 \cdot 10^8 (145,05 \cdot M_r)^{-2,32}$
- Exemple pour:
  - ML, ML-CL ou CL (IP ≤ 12)
  - Module effectif = 36,1 Mpa
  - (Maximum d'été = 51,7 MPa)
- Facteur d'ajustement saisonnier:
  - FAS = 36,1 / 51,7 = 0,70

73

# Exploiter les mesures disponibles

| Guide for Estimating Subgrade Soil Strengths (Fine-Grained Soils) |   |                                 |                                     |         |          |                       |                       |            |           |
|---|---|---------------------------------|-------------------------------------|---------|----------|-----------------------|-----------------------|------------|-----------|
| Estimated Consistency by:   |   | Test by:                        |                                     |         |          | Correlates to:        |                       |            |           |
| Feel  | Equipment/Visual                          | Standard Penetration Test (SPT) | Dynamic Cone Penetrometer (mm/blow) |         |          | Shear Strength, $c_u$ |                       | R Value    | CBR       |
|   |   |                                 | SC, SM, SP                          | CL      | CH       | (kPa)                 | (Kg/cm <sup>2</sup> ) |            |           |
| Very Soft   | Man standing sinks > 75mm                 | < 2                             | —                                   | —       | —        | < 12                  | < 0.122               | —          | < 0.4     |
| Soft  | Man walking sinks ~ 50 - 75mm             | 2 - 4                           | —                                   | —       | —        | 12 - 24               | 0.122 - 0.24          | < 0.36     | 0.4 - 0.8 |
| Medium  | Man walking sinks ~ 25mm                  | 4 - 8                           | —                                   | > 66    | —        | 24 - 48               | 0.24 - 0.49           | 0.36 - 2.5 | 0.8 - 1.6 |
| Stiff   | Pickup truck ruts ~ 12 - 25mm             | 8 - 15                          | > 100                               | 66 - 46 | —        | 48 - 96               | 0.49 - 0.98           | 2.5 - 6.8  | 1.6 - 3.2 |
| Very Stiff  | Loaded dump truck ruts ~ 25 - 75mm        | 15 - 30                         | 100 - 56                            | 46 - 33 | > 109    | 96 - 193              | 0.98 - 1.95           | 6.8 - 15.5 | 3.2 - 6.4 |
| Hard  | Insignificant ruts from loaded dump truck | > 30                            | 56 - 27                             | 33 - 23 | 109 - 54 | > 193                 | > 1.95                | > 15.5     | > 6.4     |

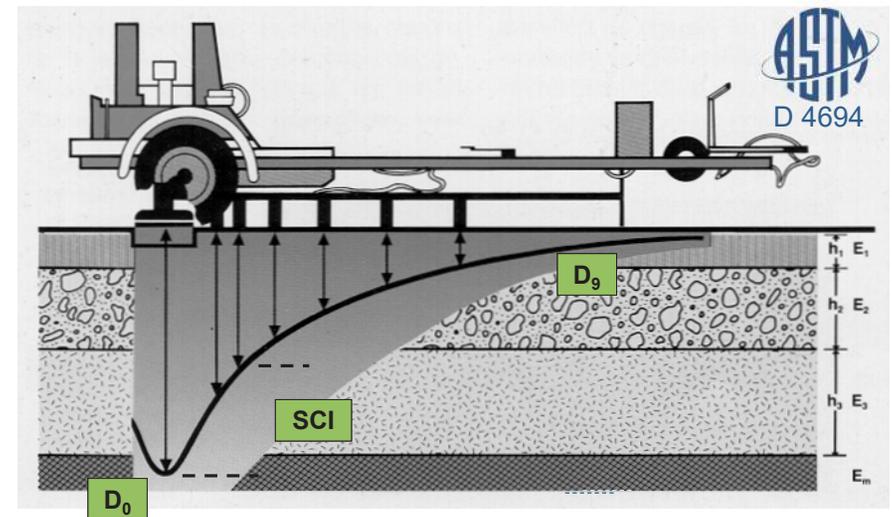
References: After Portland Cement Association, E.I. DuPont literature and McCarthy, David F., *Essentials of Soil Mechanics and Foundations*, 1977 & Tensar 1998. Webster, Personal Communication 2001, DCP vs. CBR Correlations. AASHTO, 1993 *Guide for Design of Pavement Structures*, Van Tilt et al., NCHRP 128.

Attention aux effets saisonniers!

$$M_r \approx 17,6 \cdot CBR^{0,64}$$

74

# Essais au déflectomètre FWD



75

Enrobés recyclés à froid (ERF)



Rubblizing



Polystyrène



Géosynthétiques

# Conclusion matériaux

- Modèles avec valeurs par défaut établis pour la plupart des usages courants
  - Vaste gamme de matériaux neufs et usagers
- Possibilité d'utiliser d'autres valeurs à volonté
  - Attention de bien maîtriser la démarche
    - Conditions d'opération (°C, Hz, état de contraintes, humidité, variations saisonnières, etc.)
    - BB contrôlé par bitume, température, vitesse...
    - MG contrôlé par eau/glace, état de contrainte...

La notion de gélivité sera traitée séparément



76

77

# CHAUSSÉE



## Version 2

Logiciel de dimensionnement  
des chaussées souples





# CRITÈRES DE SÉLECTION DES ENROBÉS

Enrobés formulés selon la méthode du laboratoire des chaussées (MTMD - Tome VII Matériaux – 4202)

| USAGE PERFORMANCE ET ÉPAISSEUR  | TYPE D'ENROBÉ      |        |        |                  |                   |                  |                    |                  |                    |                  |
|---|--------------------|--------|--------|------------------|-------------------|------------------|--------------------|------------------|--------------------|------------------|
|   | GB-20              | ESG-14 | ESG-10 | EG-10            | EGM-10            | MUN-10           | EC-10              | EC-5             | EG-5               | ESG-5            |
| <b>USAGE (1 : Sous réserve 2 : Adapté 3 : Recommandé)</b>               |                    |        |        |                  |                   |                  |                    |                  |                    |                  |
| <b>Chaussée</b>   |                    |        |        |                  |                   |                  |                    |                  |                    |                  |
| Couche de base  | 3                  | 2      |        |                  |                   |                  |                    |                  |                    | 3 <sup>(A)</sup> |
| Couche unique   |                    | 3      |        |                  |                   |                  |                    |                  |                    |                  |
| Couche de surface   | 1 <sup>(B,C)</sup> | 2      | 3      | 3                | 3                 | 3 <sup>(D)</sup> | 1 <sup>(B,C)</sup> |                  | 3 <sup>(B,E)</sup> |                  |
| Couche de correction  |                    |        | 2      |                  |                   |                  | 3                  |                  |                    |                  |
| Couche de correction - Dévers   | 3                  | 3      | 3      |                  |                   |                  | 3                  |                  |                    |                  |
| Rapiéçage mécanisé  |                    |        | 3      |                  |                   |                  | 3                  |                  |                    |                  |
| Rapiéçage manuel  |                    |        |        |                  |                   |                  | 3                  | 2 <sup>(F)</sup> |                    |                  |
| Voie cyclable   |                    |        |        |                  |                   | 3                | 3 <sup>(G)</sup>   |                  |                    |                  |
| <b>Ouvrage d'art</b>  |                    |        |        |                  |                   |                  |                    |                  |                    |                  |
| Couche de surface   |                    |        | 3      | 2 <sup>(H)</sup> |                   |                  |                    |                  | 3 <sup>(B,E)</sup> |                  |
| Couche de correction  |                    |        | 3      |                  |                   |                  | 3                  |                  |                    |                  |
| Rapiéçage mécanisé sous la membrane                                     |                    |        |        |                  |                   |                  | 3                  |                  |                    |                  |
| Rapiéçage manuel sous la membrane                                       |                    |        |        |                  |                   |                  | 3                  |                  |                    |                  |
| Enrobé temporaire   |                    |        | 3      |                  |                   |                  |                    |                  |                    |                  |
| <b>PERFORMANCE* (1 : Passable 2 : Moyenne 3 : Bonne 4 : Très bonne)</b> |                    |        |        |                  |                   |                  |                    |                  |                    |                  |
| Adhérence   | 3                  | 3      | 3      | 4                | 4                 | 3                | 1                  | N/A              | 3                  | N/A              |
| Résistance à l'orniérage  | 4                  | 3      | 3      | 3                | 3                 | 2                | 2                  | 1                | 3                  | N/A              |
| Résistance à la fissuration   | 1                  | 2      | 3      | 3                | 2                 | 3                | 3                  | 3                | 3                  | 4                |
| Résistance à l'arrachement  | 2                  | 3      | 4      | 4                | 2                 | 4                | 3                  | 3                | 4                  | N/A              |
| Réduction du bruit pneu-chaussée  | N/A                | 2      | 3      | 3                | 3                 | N/A              | N/A                | N/A              | 3                  | N/A              |
| <b>ÉPAISSEUR DE POSE (mm)</b>   |                    |        |        |                  |                   |                  |                    |                  |                    |                  |
| Minimale  | 80                 | 60     | 40     | 40               | 30 <sup>(I)</sup> | 40               | 20                 | 10               | 25                 | 50               |
| Optimale  | 100                | 70     | 60     | 50               | 40                | 50               | 30                 | 20               | 30                 | 60               |
| Maximale  | 120                | 80     | 70     | 60               | 50                | 60               | 40                 | 30               | 40                 | 70               |

Voir notes page suivante

Décembre 2023

# CRITÈRES DE SÉLECTION DES ENROBÉS

Enrobés formulés selon la méthode du laboratoire des chaussées (MTQ - Tome VII Matériaux – 4202)

\* La performance d'un enrobé est également tributaire des éléments suivants : la formulation, la fabrication, la mise en œuvre et la classe de performance du bitume. Les cotes de performance de chaque type d'enrobé ont été établies sur la base des informations disponibles lors de leur rédaction.

- (A) Couche de base anti-fissure pour les chaussées à durée de vie prolongée.
- (B) Suivre les prescriptions au devis type *Revêtement de chaussée en enrobé*.
- (C) Seulement pour utilisation temporaire en couche de roulement durant l'hiver.
- (D) Recommandé pour un DJMA inférieur à 2 000.
- (E) Recommandé pour un DJMA inférieur à 20 000.
- (F) Pour les corrections de 20 mm et moins, pour un usage à l'extérieur des pistes de roues ou une réparation de moins de 4 m<sup>2</sup>.
- (G) Enrobé pour voie cyclable, épaisseur de 50 mm (réf. Tome 1 ch. 15).
- (H) Couche sur membrane, épaisseur de 65 mm (réf. CCDG ch. 15).
- (I) Si formulé avec des classes granulaires 0-2,5 mm et 5-10 mm.

# CHOIX DES COMPOSANTS – ENROBÉS (Norme 4202)

ESG-10 • EG-10<sup>1</sup> • EGM-10 • ESG-14 • GB-20 • EC-10<sup>2</sup> • MUN-10 • EG-5<sup>1</sup>

Recommandations pour construction neuve, reconstruction et resurfaçage

| Type de route            | Débit de circulation |                          | Couche de surface   |                               |                               |                          |                          |                | Couche de base et autre couche |           |           |                          |                          |             |
|--------------------------|----------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|--------------------------------|-----------|-----------|--------------------------|--------------------------|-------------|
|                          |                      |                          | Bitume <sup>3</sup> |                               |                               | Catégorie gros granulats | Catégorie granulats fins | Essai exigé    | Bitume <sup>3</sup>            |           |           | Catégorie gros granulats | Catégorie granulats fins | Essai exigé |
|                          | DJMA                 | ECAS annuel              | Zone 1 PG           | Zone 2 PG                     | Zone 3 PG                     |                          |                          |                | Zone 1 PG                      | Zone 2 PG | Zone 3 PG |                          |                          |             |
| Autoroute                | > 20 000             | > 1 000 000              | 64E-28 <sup>4</sup> | 58E-34                        | S.O.                          | 1a                       | 1                        | Orniéreur, CPP | 64E-28                         | 58E-34    | S.O.      | 2c                       | 1                        | Orniéreur   |
|                          | < 20 000<br>> 5 000  | < 1 000 000<br>> 500 000 | 64E-28              | 58E-34                        | S.O.                          | 1a                       | 1                        | Orniéreur, CPP | 64H-28                         | 58H-34    | S.O.      | 3c                       | 1                        | Orniéreur   |
|                          | < 5 000              | < 500 000                | 64E-28              | 58E-34                        | S.O.                          | 2b                       | 1                        | Orniéreur, CPP | 64H-28                         | 58H-34    | S.O.      | 3c                       | 2                        | Orniéreur   |
| Nationale                | > 20 000             | > 500 000                | 64E-28              | 58E-34                        | 52V-40<br>58H-34 <sup>5</sup> | 1a                       | 1                        | Orniéreur, CPP | 64H-28                         | 58H-34    | 52V-40    | 3c                       | 1                        | Orniéreur   |
|                          | < 20 000<br>> 5 000  | < 500 000<br>> 300 000   | 64E-28              | 58E-34                        | 52V-40<br>58H-34 <sup>5</sup> | 2b                       | 2                        | Orniéreur, CPP | 64H-28                         | 58H-34    | 52V-40    | 3c                       | 2                        | Orniéreur   |
|                          | < 5 000              | < 300 000                | 64H-28              | 58H-34                        | 52V-40<br>58H-34 <sup>5</sup> | 3c                       | 2                        |                | 64H-28                         | 58H-34    | 52V-40    | 3c                       | 2                        |             |
| Régionale et collectrice | > 20 000             | > 300 000                | 64E-28              | 58E-34                        | 52V-40<br>58H-34 <sup>5</sup> | 2b                       | 1                        | Orniéreur, CPP | 64H-28                         | 58H-34    | 52V-40    | 3c                       | 2                        | Orniéreur   |
|                          | < 20 000<br>> 5 000  | < 300 000<br>> 150 000   | 64E-28              | 58E-34                        | 52V-40<br>58H-34 <sup>5</sup> | 3b                       | 2                        | Orniéreur      | 64H-28                         | 58H-34    | 52V-40    | 3c                       | 2                        | Orniéreur   |
|                          | < 5 000              | < 150 000                | 64H-28 <sup>6</sup> | 58H-34<br>58S-28 <sup>5</sup> | 52V-40<br>58H-34 <sup>5</sup> | 3c                       | 2                        |                | 58S-28                         | 58H-34    | 52V-40    | 3c                       | 2                        |             |

1. Les bitumes PG HE-L HRD ou THRD doivent être utilisés pour les enrobés EG-10 et EG-5 en zone 1 et 2. Le bitume PG 52V-40 HRD ou THRD doit être utilisé pour les enrobés EG-10 et EG-5 en zone 3.
2. L'enrobé EC-10 doit toujours être fabriqué avec le bitume de la couche de surface. Les catégories de granulats et les essais exigés sont ceux de l'usage prévu.
3. Les bitumes à haute résistance au désenrobage (HRD ou THRD) sont spécifiés par le MTMD pour toutes les classes de performance à l'exception des PG 58S-28 et PG 64H-28.
4. Le bitume PG 64U-28 THRD malaxé entre 156 °C et 170 °C est recommandé pour le recouvrement en enrobé de chaussées de béton ou pour les surfaces en enrobé fortement sollicitées par du trafic lourd stationnaire ou circulant à basse vitesse, incluant l'enrobé EG-10 malgré la note 1.
5. Classe de bitume recommandée lorsqu'il s'agit de resurfaçage.
6. Pour les routes régionales et les rues résidentielles faiblement sollicitées et sans réseau d'autobus, le bitume PG 58S-28 pourrait être utilisé en surface au lieu du PG 64H-28.

#### Commentaires :

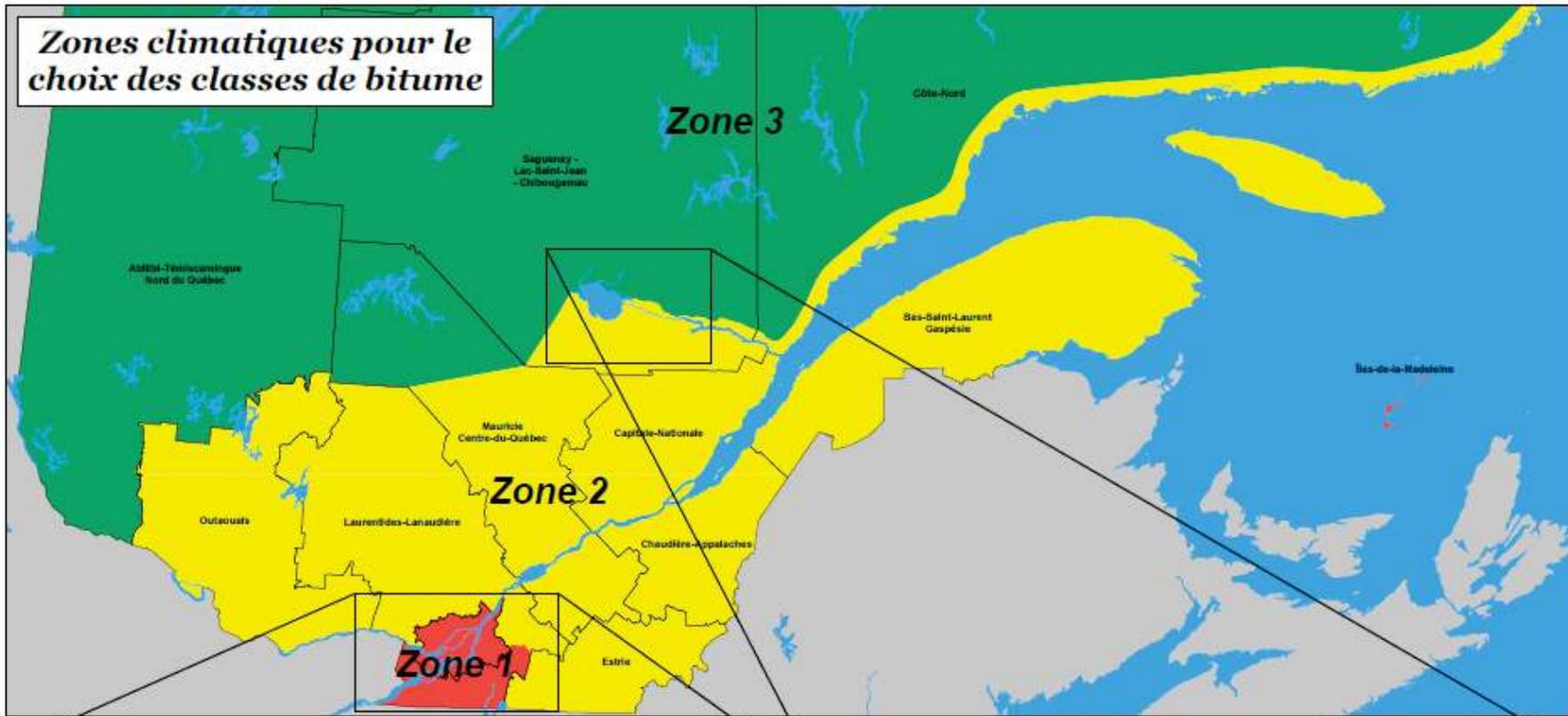
- L'utilisation d'un bitume différent en couche de base n'est pas recommandée si la quantité d'enrobé de cette couche est inférieure à 1 000 tonnes.
- Lorsque les valeurs de DJMA et de l'ECAS de la route ne correspondent pas à la même ligne dans le tableau, sélectionner la ligne qui correspond aux conditions les plus sévères.
- Un recueil d'inventaire annuel de données sur la circulation par numéro de route, de tronçon et de section est disponible auprès de la Direction des chaussées.
- Les classes de bitume sont définies dans la norme 4101 « Bitumes » et les catégories de granulats dans la norme BNQ 2560-114 « Travaux de génie civil – Granulats ».

#### Définitions :

**ECAS annuel** : Cumul du nombre Équivalent de Charge Axiale Simple (essieu normalisé de 8165 kg) anticipé pour la durée de vie au moment de la conception divisé par le nombre d'années correspondant. La voie la plus sollicitée est considérée.

**DJMA** : Débit Journalier Moyen Annuel. Cette valeur représente l'estimation de la moyenne journalière des débits véhiculaires (tous les types) ayant circulé annuellement sur un tronçon de route, toutes voies et directions confondues. Pour les autoroutes à chaussées divisées, le DJMA à utiliser doit être la moitié du DJMA officiel.

**Zones climatiques pour le choix des classes de bitume**



# POIDS RELATIF DES FACTEURS D'INFLUENCE DE LA PERFORMANCE DES ENROBÉS

| VARIATION DES FACTEURS D'INFLUENCE EN FONCTION DES EXIGENCES |                                 |            | QUALITÉ DE LA MISE EN ŒUVRE |             |                   |                          | PERFORMANCE DES ENROBÉS |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
|--|---------------------------------|------------|-----------------------------|-------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------|------------|--------------------------------------|
|  |                                 |            | Compacité                   | Ségrégation | Uni               | Résistance à l'ornièrage | Adhérence               | Résistance au ressuage | Résistance à l'arrachement | Résistance à la réflexion de fissures | Résistance à la dégradation de fissures | Résistance à la fatigue | Étanchéité | Absorption acoustique EG et drainant |
| BITUME   | PG H-L                          | H > requis | -2                          | 0           | -3                | +2                       | 0                       | +1                     | ?                          | ?                                     | -1                                      | ?                       | 0          | 0                                    |
|  |                                 | H < requis | +2                          | 0           | -1                | -2                       | 0                       | -1                     | ?                          | ?                                     | +1                                      | ?                       | 0          | 0                                    |
|  |                                 | L > requis | 0                           | 0           | 0                 | 0                        | 0                       | 0                      | ?                          | -1                                    | -1                                      | ?                       | 0          | 0                                    |
|  |                                 | L < requis | 0                           | 0           | 0                 | 0                        | 0                       | 0                      | ?                          | +1                                    | +1                                      | ?                       | 0          | 0                                    |
|  |                                 | H + L > 90 | 0                           | 0           | 0                 | +2                       | 0                       | +3                     | +3                         | +2                                    | +3                                      | +2                      | 0          | 0                                    |
| GRANULATS  | Gros granulats                  |            |                             |             |                   |                          |                         |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
|  | Caractéristiques intrinsèques   |            |                             |             |                   |                          |                         |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
|  | < minimum                       |            | 0                           | 0           | 0                 | -1                       | -2                      | 0                      | -2                         | 0                                     | -1                                      | -1                      | 0          | 0                                    |
|  | Caractéristiques de fabrication |            |                             |             |                   |                          |                         |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
|  | < minimum                       |            | +2                          | 0           | +2                | -3                       | -2                      | 0                      | -1                         | 0                                     | 0                                       | -1                      | +1         | 0                                    |
| ENROBÉS  | Granulats fins                  |            |                             |             |                   |                          |                         |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
|  | Catégorie                       |            |                             |             |                   |                          |                         |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
|  | < minimum                       |            | +2                          | 0           | +2                | -3                       | -1                      | 0                      | 0                          | 0                                     | -1                                      | -1                      | +1         | 0                                    |
| ENROBÉS  | CPP                             |            |                             |             |                   |                          |                         |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
|  | < minimum                       |            | 0                           | 0           | 0                 | 0                        | -3                      | 0                      | 0                          | 0                                     | 0                                       | 0                       | 0          | 0                                    |
| ENROBÉS  | Propreté                        |            |                             |             |                   |                          |                         |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
|  | > maximum                       |            | 0                           | 0           | 0                 | 0                        | 0                       | 0                      | -3                         | -1                                    | -2                                      | -2                      | 0          | 0                                    |
| ENROBÉS  | % de bitume                     |            |                             |             |                   |                          |                         |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
|  | > maximum                       |            | +3                          | 0           | -1                | -3                       | -3                      | -3                     | +2                         | +2                                    | +2                                      | +2                      | +3         | 0                                    |
|  | < minimum                       |            | -2                          | 0           | -1                | +1                       | +2                      | +3                     | -3                         | -3                                    | -3                                      | -2                      | -3         | 0                                    |
|  | % tamis supérieur               |            |                             |             |                   |                          |                         |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
|  | > maximum                       |            | -2                          | -3          | -2                | +2                       | +2                      | 0                      | -2                         | -2                                    | -2                                      | -1                      | -2         | -2                                   |
|  | % tamis 5 mm                    |            |                             |             |                   |                          |                         |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
|  | > maximum                       |            | +2                          | -2          | -1                | -1 <sup>(A)</sup>        | -2                      | +2                     | -1                         | +1                                    | -1                                      | -1                      | +1         | -1                                   |
|  | < minimum                       |            | -2                          | +2          | +1                | -1 <sup>(A)</sup>        | +2                      | -1                     | -1                         | -2                                    | -2                                      | -1                      | -3         | +1                                   |
|  | % tamis 80 µm                   |            |                             |             |                   |                          |                         |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
|  | > maximum                       |            | +2                          | 0           | -1                | +1                       | +1                      | +1                     | -2                         | -1                                    | -2                                      | -2                      | -1         | 0                                    |
|  | < minimum                       |            | -2                          | 0           | +1                | -2                       | -3                      | -2                     | +1                         | -1                                    | +1                                      | +1                      | +1         | 0                                    |
|  | % de vides                      |            |                             |             |                   |                          |                         |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
| > maximum  |                                 | -3         | 0                           | -1          | -2 <sup>(B)</sup> | +1                       | +1                      | -3                     | -2                         | -2                                    | -2                                      | -2                      | +2         |                                      |
| < minimum  |                                 | +3         | 0                           | -1          | -2                | -1                       | -2                      | +1                     | +1                         | +2                                    | +2                                      | +2                      | -2         |                                      |
| Épaisseur de pose  |                                 |            |                             |             |                   |                          |                         |                        |                            |                                       |   |                         |            |                                      |
| > maximum  |                                 | 0          | +3                          | -1          | -3 <sup>(B)</sup> | 0                        | 0                       | 0                      | +1                         | 0                                     | +3                                      | +2                      | +1         |                                      |
| < minimum  |                                 | -3         | -3                          | -3          | +1                | 0                        | 0                       | -3                     | -3                         | -3                                    | -3                                      | -2                      | -3         |                                      |

**LÉGENDE :** -3 = Influence très négative    -2 = Influence négative    -1 = Peu d'influence négative    0 = Aucune influence    (A) = Sauf EG    EG = Enrobé grenu    00-12-01  
+1 = Peu d'influence positive    +2 = Influence positive    +3 = Influence très positive    (B) = Post compactage

## Contexte

Une méthode d'essai a été élaborée par le Direction du laboratoire des chaussées pour la « Détermination du module complexe des enrobés » [Info DLC, vol. 16, n° 4], à la suite de quoi le module complexe ( $E^*$ ) d'enrobés typiquement utilisés au Québec a été déterminé afin de constituer une banque de données pour réaliser les expertises sur les enrobés et le dimensionnement des chaussées.

Ce projet a fait l'objet d'un rapport de recherche [Doucet et Auger 2010] et d'un article [Doucet 2010] dont les principaux résultats de module dynamique ( $|E^*|$ ) sont présentés. Seules les valeurs de  $|E^*|$  sont indiquées, soit l'intensité du  $E^*$ , puisqu'il s'agit du paramètre principal pour les expertises, et le dimensionnement.

## Module dynamique des enrobés

Le  $E^*$  de trois types d'enrobés formulés avec les cinq types de bitumes les plus utilisés au Québec a été déterminé afin d'étudier l'influence de la granulométrie de l'enrobé et de la classe de performance du bitume. Les enrobés étudiés sont un enrobé de surface ESG-10, un enrobé utilisé en couche intermédiaire (ou de base) ESG-14 et un enrobé de base GB-20. Les bitumes utilisés sont un PG 58-28, PG 58-34, PG 64-28, PG 64-34 et PG 70-28, pour un total de 15 enrobés.

Les courbes maîtresses de  $|E^*|$  des enrobés intermédiaires ESG-14 sont présentées en fonction de la température à la figure 1, pour une fréquence de référence de 10 Hz. La figure montre que le type de bitume influence la forme de la courbe maîtresse de  $|E^*|$  de l'enrobé et que cette influence augmente avec la température sur une échelle logarithmique. Le  $|E^*|$  des enrobés ESG-14 varie de 7 200 à 11 500 MPa à 10 °C et 10 Hz selon le type de bitume utilisé, avec un écart type important de 1 700 MPa.

La figure 1 montre également que le  $|E^*|$  des enrobés avec un bitume PG H-28 est généralement plus élevé à température intermédiaire ( $\approx 10$  °C) que celui des enrobés avec un bitume PG H-34. Le type de bitume influence également le  $|E^*|$  à haute température ( $>40$  °C), où l'enrobé avec un bitume PG 70-L a un  $|E^*|$  plus élevé que les enrobés avec un bitume PG 64-L, qui ont à leur tour un  $|E^*|$  plus élevé que les enrobés avec un bitume PG 58-L. Les enrobés avec le bitume PG 58-28 sont plus sensibles à la température que les autres enrobés. Ces observations sont similaires pour les enrobés ESG 10 et GB 20.

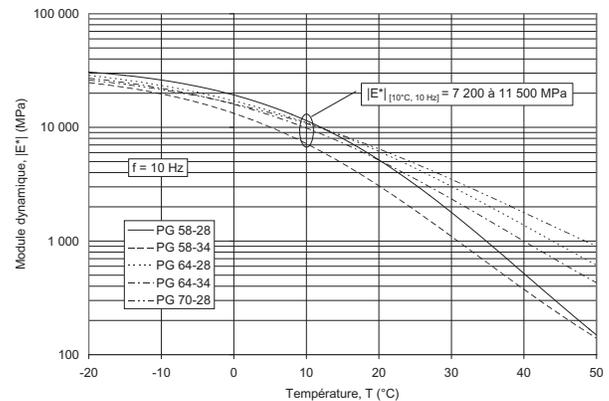


Figure 1 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés ESG-14 avec différents bitumes.

Les courbes maîtresses de  $|E^*|$  sont également présentées à la figure 2 pour les enrobés avec un bitume PG 58-34, la classe de performance de bitume la plus utilisée au Québec. La figure confirme que le type de bitume influence la forme de la courbe maîtresse, alors que la granulométrie influence son intensité (position). Le  $|E^*|$  varie de 6 300 à 7 700 MPa à 10 °C et 10 Hz selon le type d'enrobé, avec un écart type plus faible de 700 MPa.

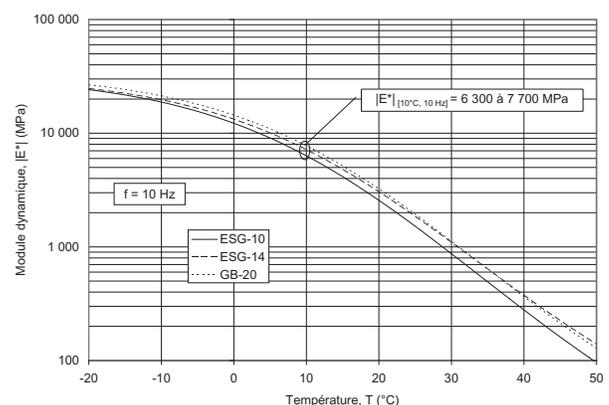
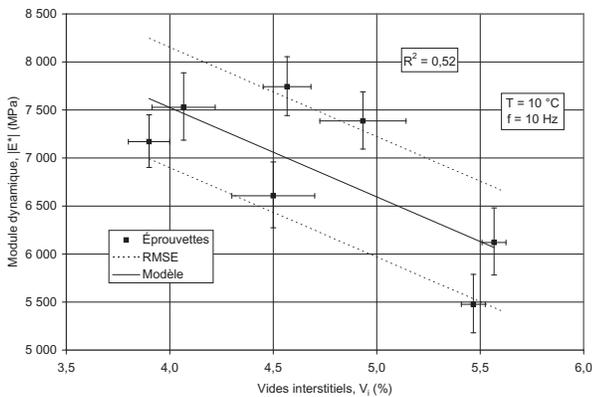


Figure 2 – Courbes maîtresses de module dynamique à 10 Hz des enrobés avec un bitume PG 58-34.

**Paramètres d'influence**

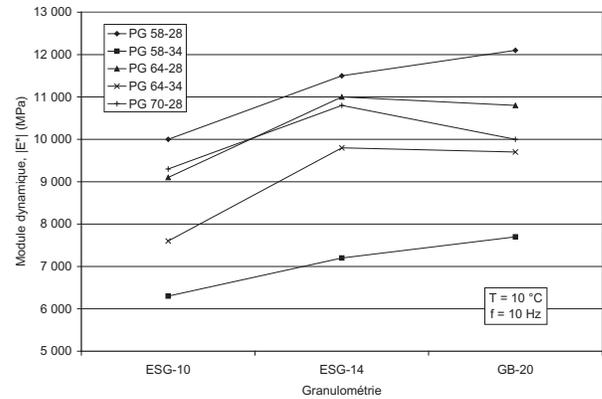
Les principaux paramètres qui influencent le  $E^*$  des enrobés sont la fréquence (vitesse) et la température, puisque le  $|E^*|$  varie en moyenne de 300 à 30 000 MPa entre 50 et -20 °C à 10 Hz. D'autre part, une étude de la répétabilité de l'essai démontre également que les vides interstitiels influencent le  $|E^*|$  des enrobés. La figure 3 montre l'influence des vides sur le  $|E^*|$  à 10 °C et 10 Hz d'un enrobé ESG-14 avec un bitume PG 58 34.

Le coefficient de détermination  $R^2$  de la relation entre les vides et le  $|E^*|$  est de 0,52, ce qui indique que la variation du  $|E^*|$  de l'enrobé dans le cadre de l'étude de répétabilité n'est pas uniquement expliquée par la variation des vides. Néanmoins, la relation indique que le  $|E^*|$  varie d'environ 930 MPa lorsque les vides varient de 1 %, soit une variation de 14 % pour une valeur moyenne de  $|E^*|$  de 6 800 MPa. L'influence des vides serait donc similaire à l'influence de la granulométrie.



**Figure 3 – Influence des vides sur le module dynamique à 10 °C et 10 Hz d'un enrobé ESG-14 avec PG 58-34.**

L'influence de la granulométrie de l'enrobé et l'influence du type de bitume sur le  $|E^*|$  à 10 °C et 10 Hz sont résumées à la figure 4 pour les 15 enrobés caractérisés. La température de 10 °C et la fréquence de 10 Hz sont considérées comme des paramètres moyens pour l'analyse de la fatigue sur autoroute. Ainsi, la figure montre que l'intensité du  $|E^*|$  tend à augmenter lorsque le diamètre nominal maximal de l'enrobé augmente et qu'il existe un écart entre les bitumes PG H-28 et PG H-34. Le  $|E^*|$  moyen est de 9 500 MPa avec un écart type de 1 600 MPa.



**Figure 4 – Influence de la granulométrie sur le module dynamique à 10 °C et 10 Hz des enrobés.**

Par ailleurs, les vides moyens des enrobés ESG-10 et GB-20 sont de 4,8 % alors que les vides moyens des enrobés ESG-14 sont de 3,9 %, ce qui semble augmenter la valeur du  $|E^*|$  des enrobés ESG-14 comparativement aux enrobés ESG-10 et GB-20. De même, les vides de l'enrobé GB-20 avec un bitume PG 70-28 sont de 6,1 %, ce qui diminue la valeur de  $|E^*|$ .

**Conclusion**

Le ministère des Transports du Québec a constitué une banque de données qu'il rend accessible pour la réalisation des expertises sur les enrobés et le dimensionnement des chaussées au Québec. Les résultats montrent que la forme de la courbe maîtresse de  $|E^*|$  dépend principalement du type de bitume utilisé, alors que la granulométrie et les vides interstitiels influencent l'intensité (position) de la courbe.

**Références**

DOUCET, F., et B. AUGER. (2010) *Détermination du module complexe des enrobés au ministère des Transports du Québec – Matériaux et infrastructures*, coll. Études et recherches en transport, Ministère des Transports du Québec, Québec.

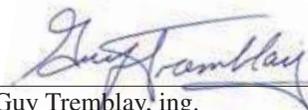
DOUCET, F. (2010) «*Dynamic modulus of asphalt mixes in Quebec*», Proceedings of the 55th annual conference, Canadian Technical Asphalt Association, Edmonton, Canada.

**RESPONSABLES :**

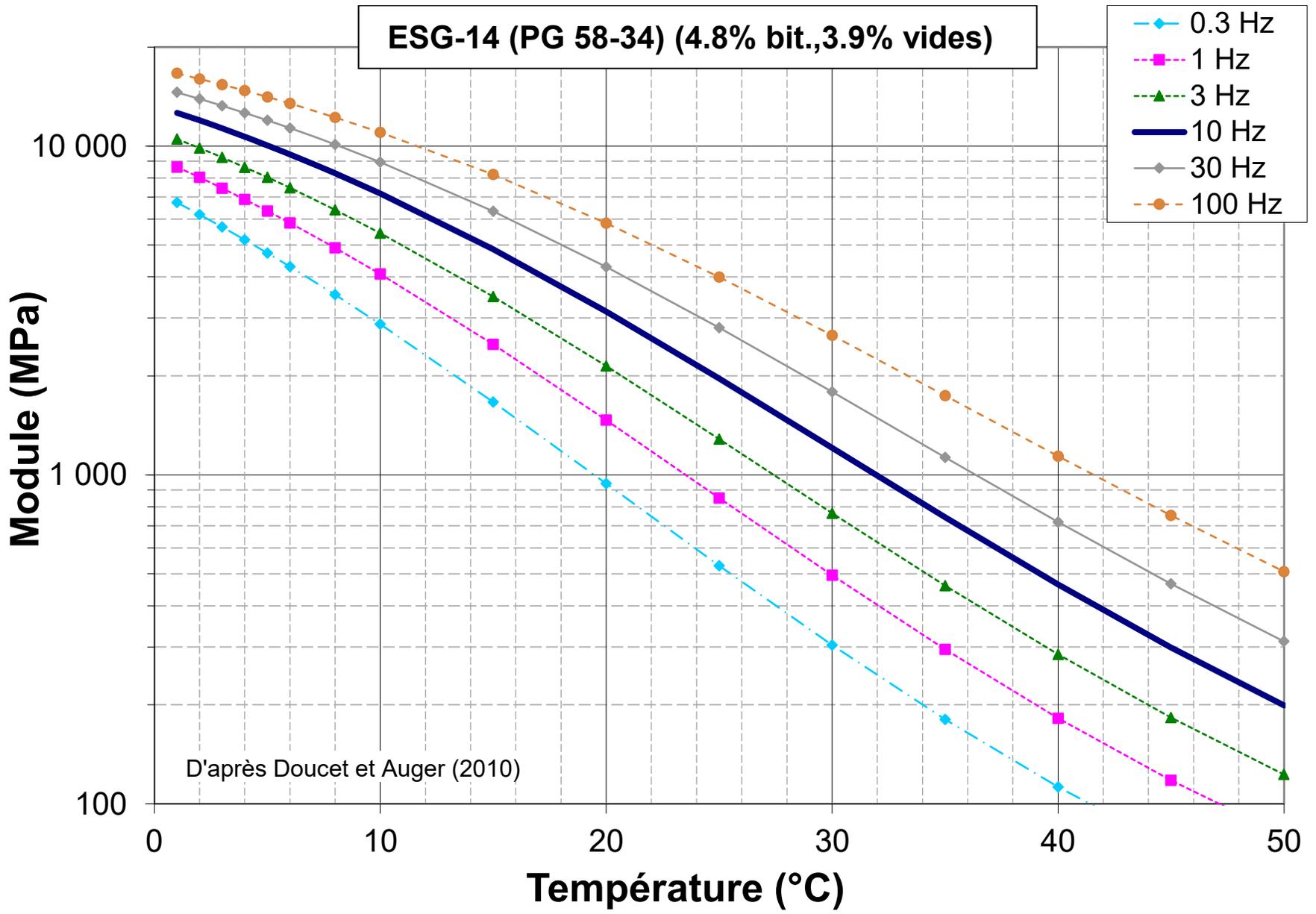
Félix Doucet, ing. M. Sc. A.  
Service des matériaux d'infrastructures

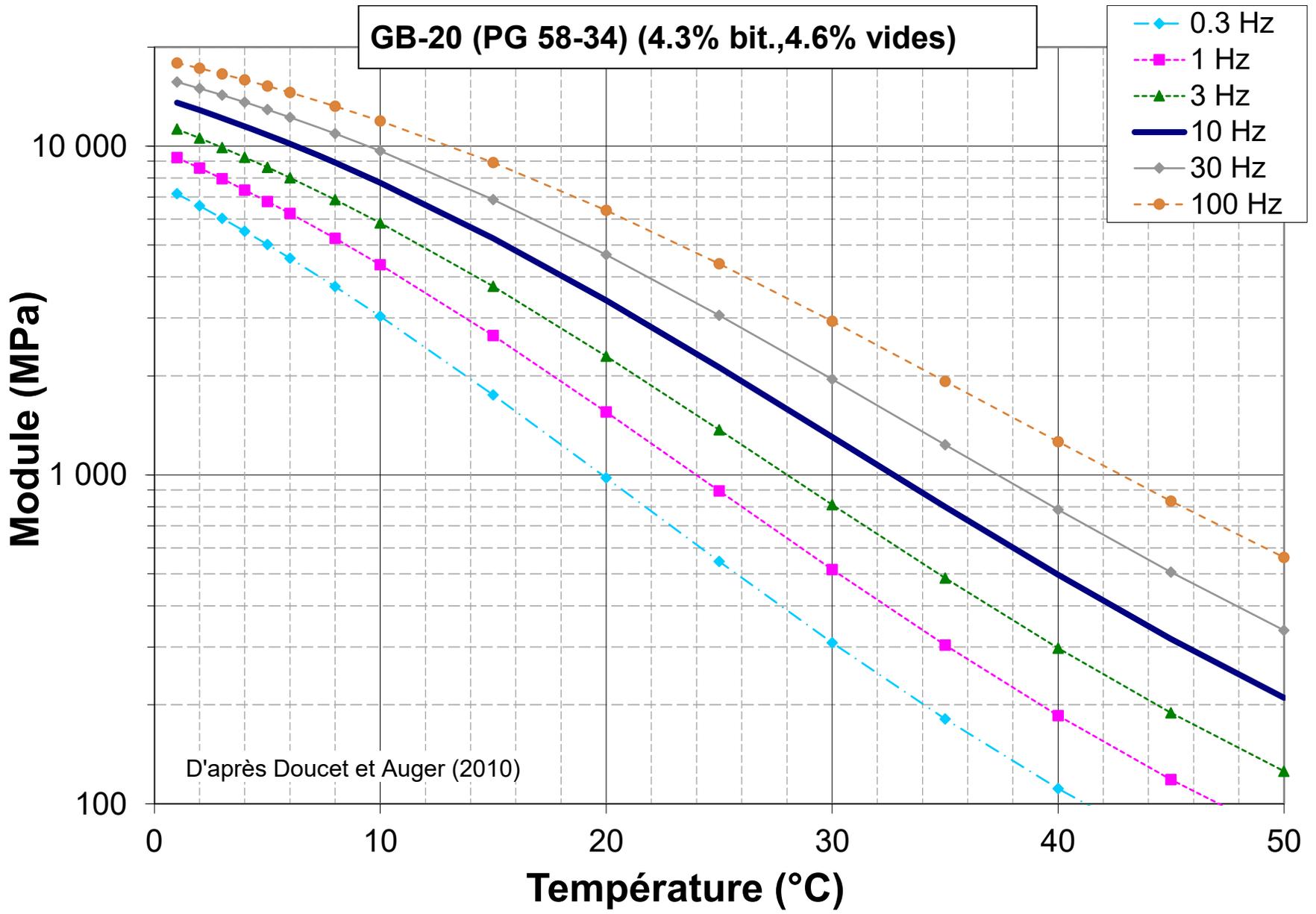
Bruno Auger, tech. spéc.  
Service des matériaux d'infrastructures

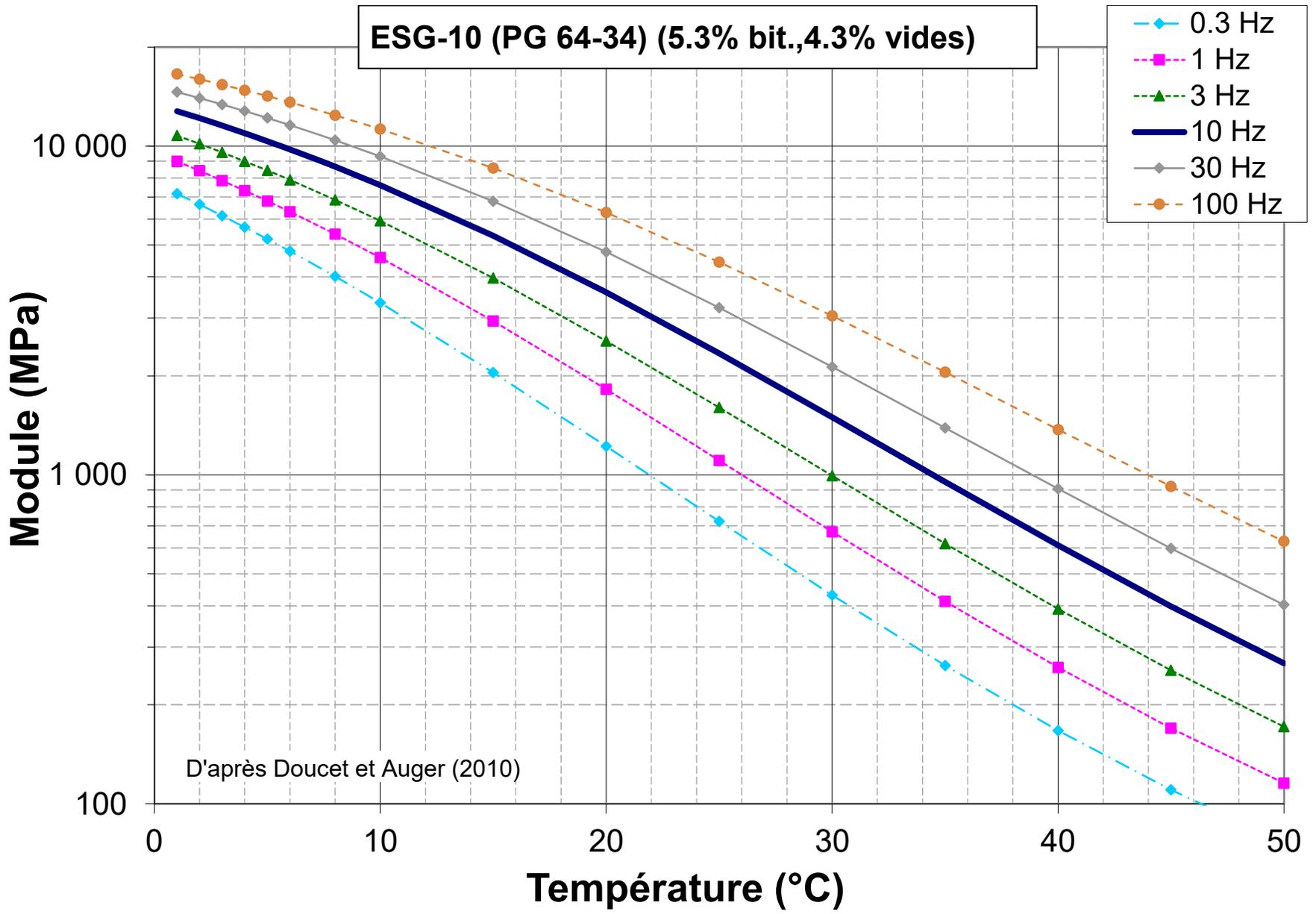
**DIRECTEUR :**

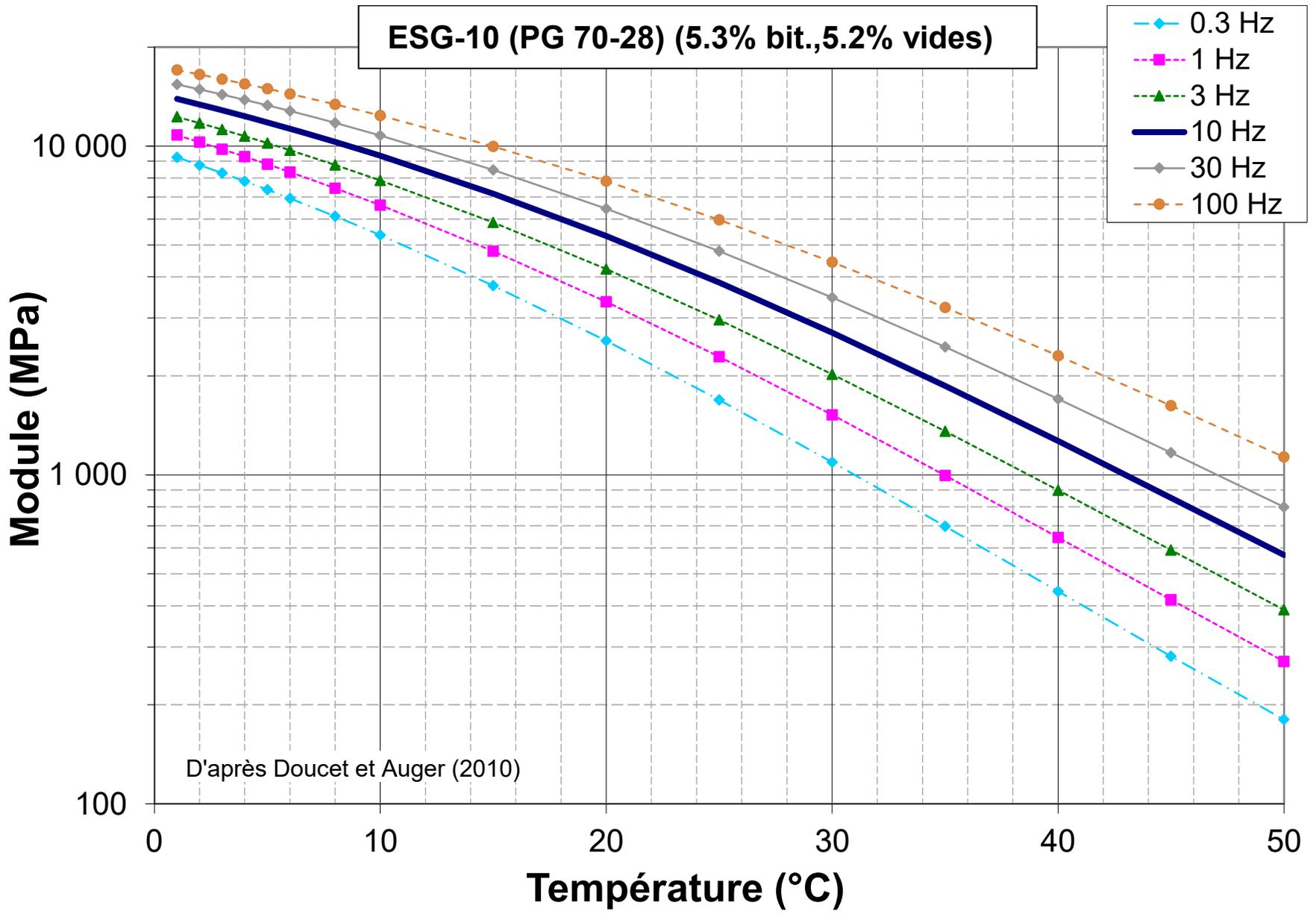
  
Guy Tremblay, ing.  
Direction du Laboratoire des chaussées

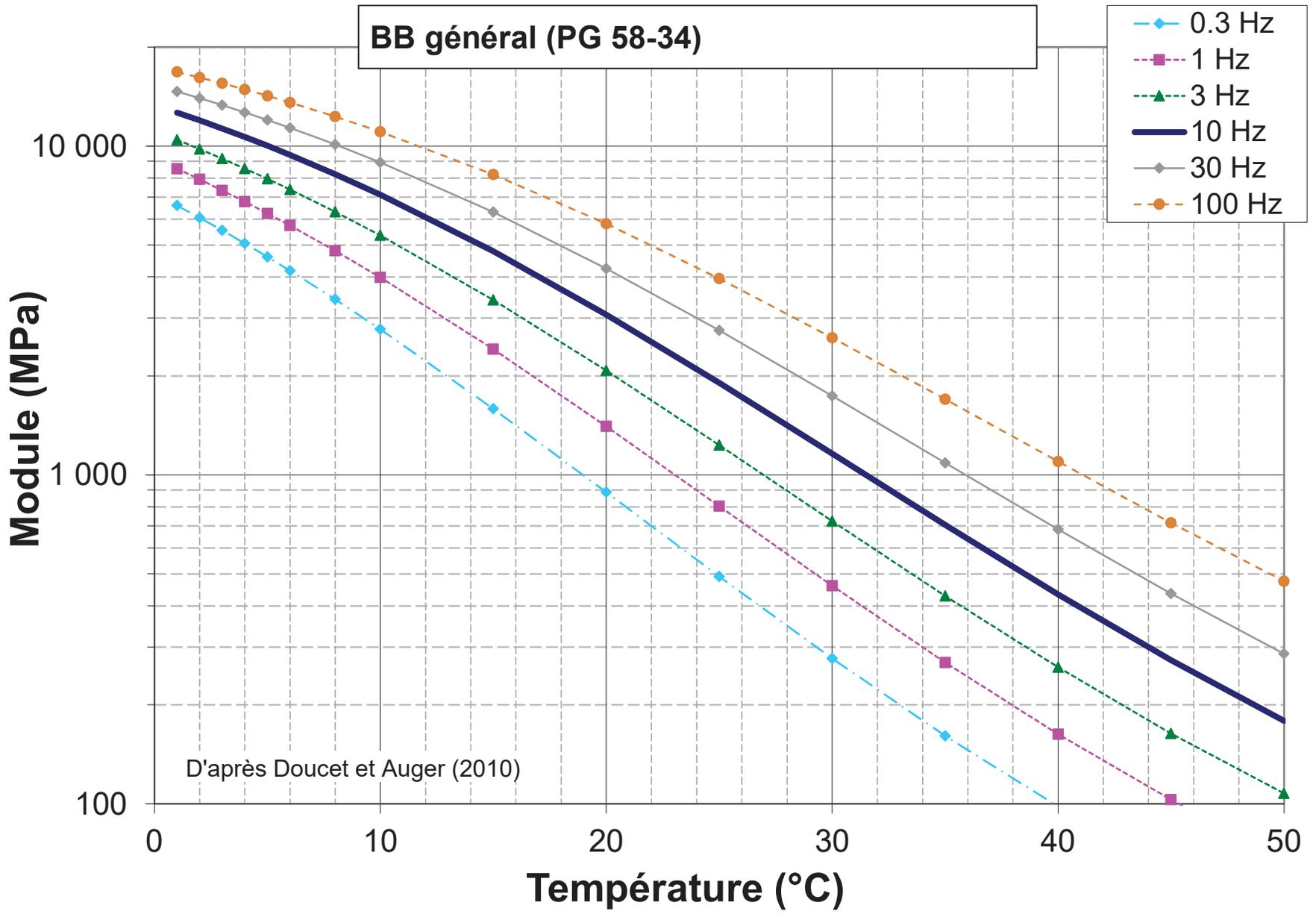


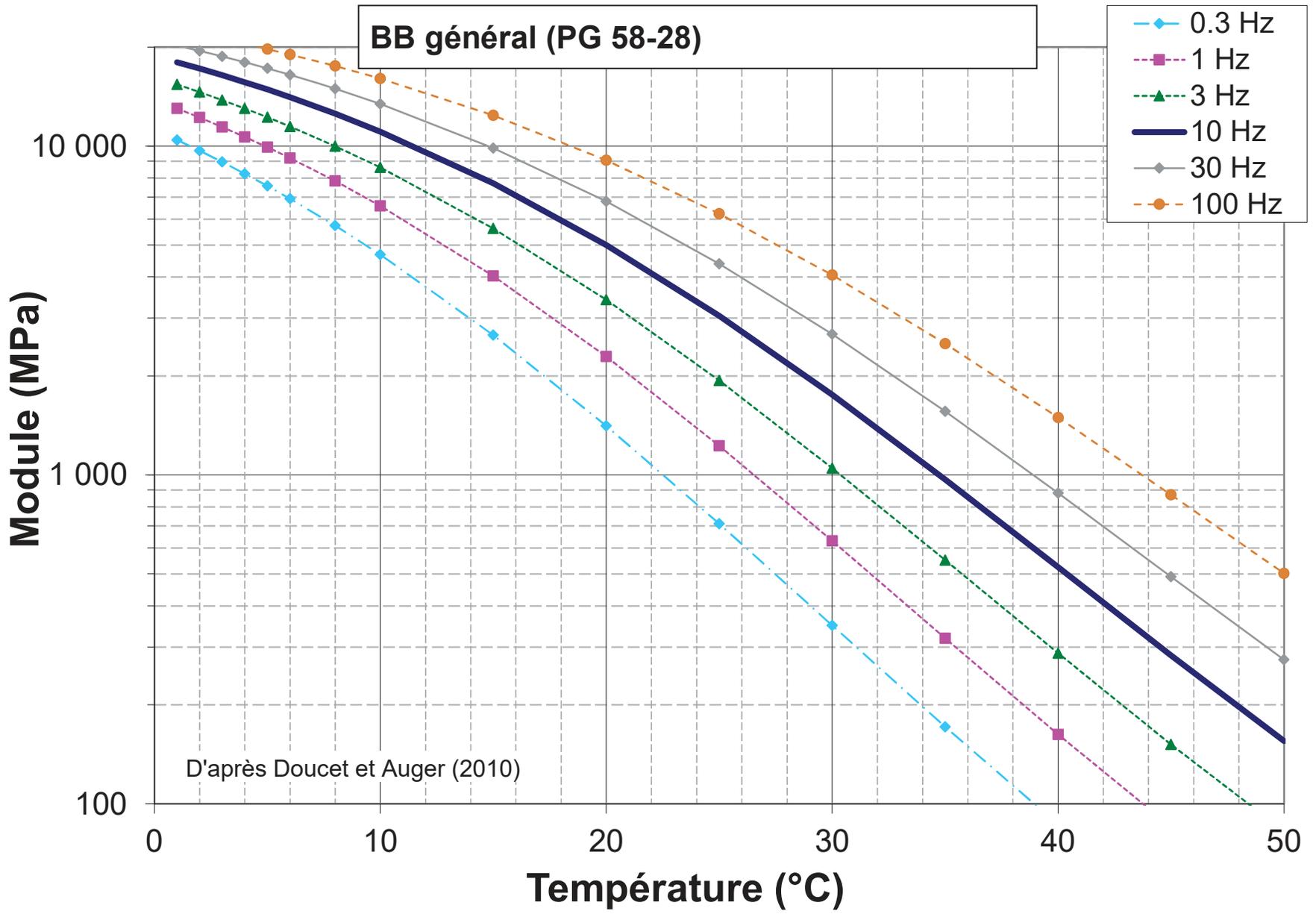


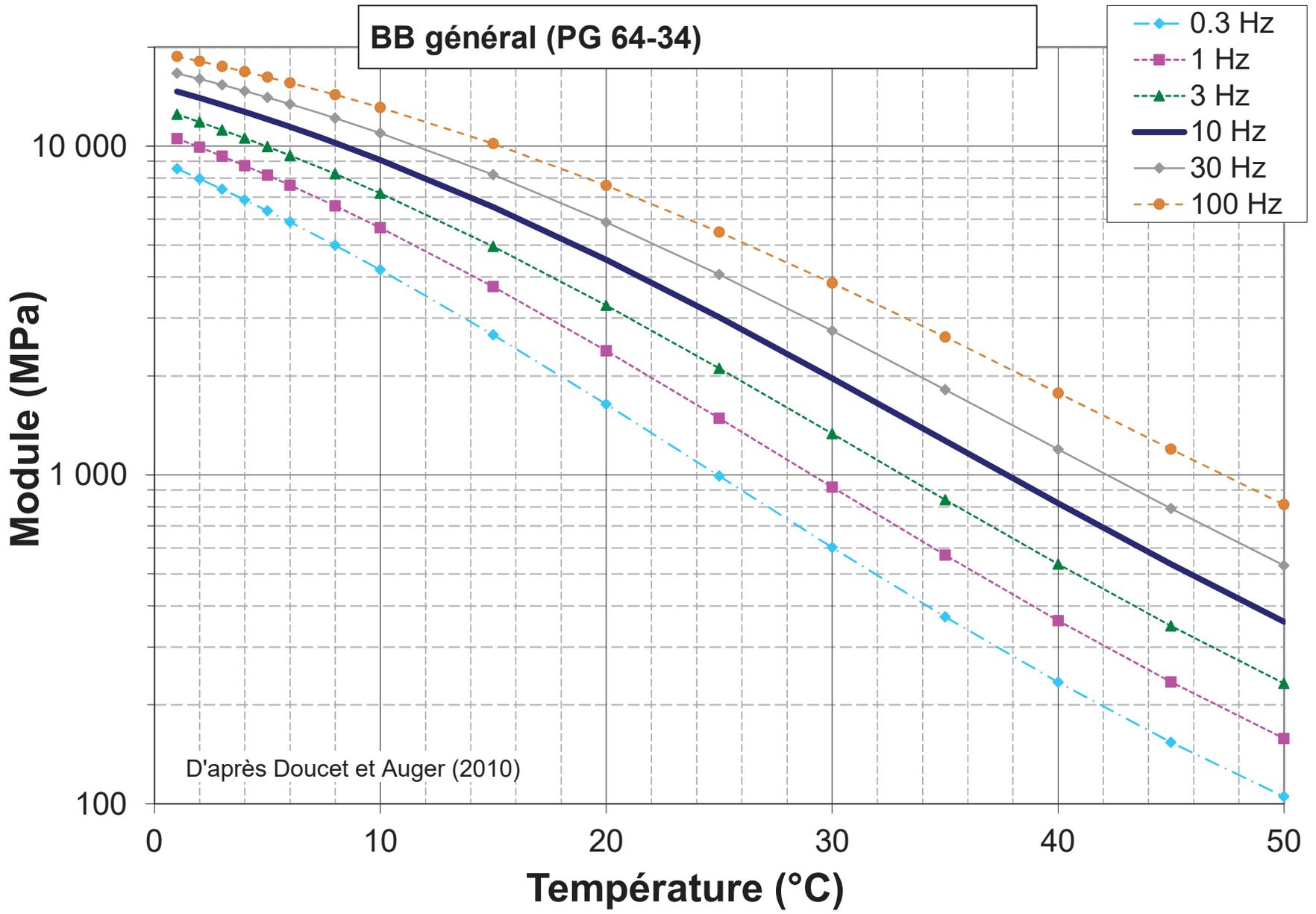


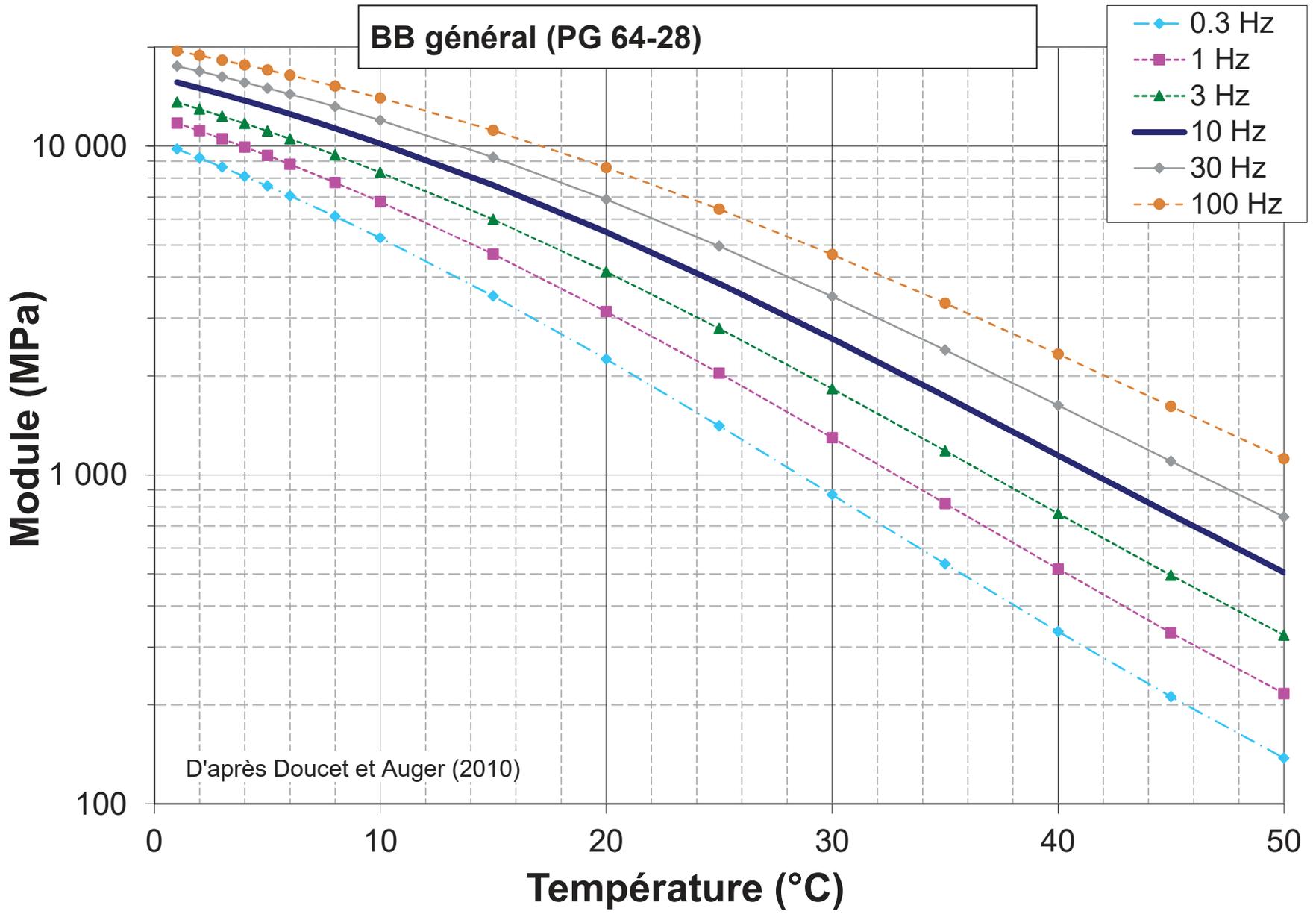


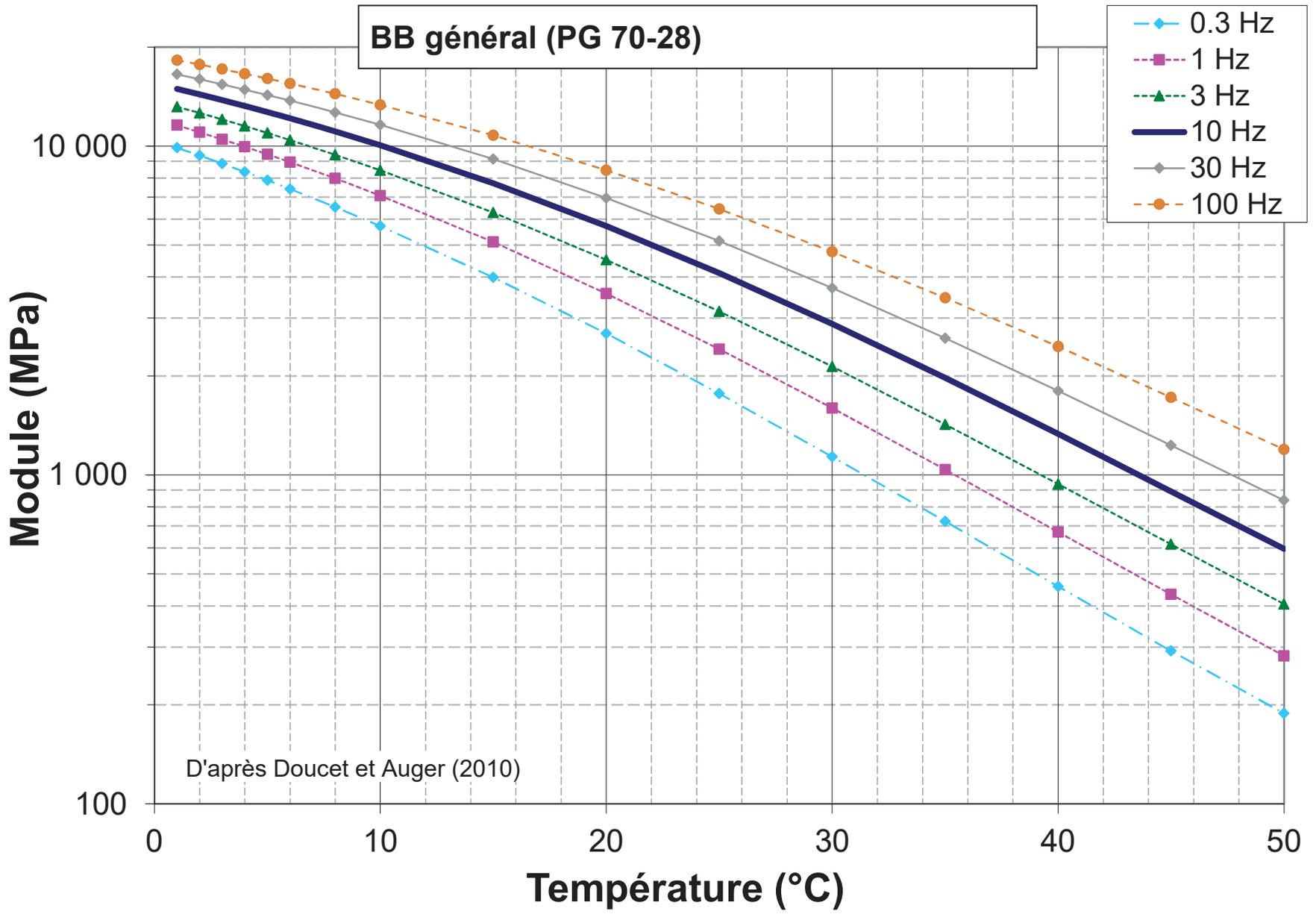














## PROBLÉMATIQUE

Le dimensionnement d'une chaussée selon une méthode mécaniste empirique requiert la détermination des propriétés mécaniques des matériaux de la chaussée. Cette approche permet de dimensionner l'épaisseur de chaque couche de la structure en fonction des contraintes et des déformations que subit la chaussée sous l'action du trafic et du climat (approche mécaniste), de même qu'en fonction des modèles d'endommagement des matériaux corrigés pour tenir compte des conditions *in situ* (approche empirique). Ce type d'approche permet d'évaluer la performance d'une chaussée avant sa construction, selon les matériaux utilisés et les sollicitations prévues.

Le comportement mécanique d'un matériau granulaire de chaussée est généralement défini par son module réversible ( $M_r$ ) et son coefficient de Poisson réversible ( $v_r$ ). Le ministère des Transports du Québec (MTQ) utilise un équipement triaxial à chargement déviatorique répété (figure 1) pour déterminer ces propriétés selon la méthode LC 22-400 (1).

## MODULE RÉVERSIBLE

Le comportement mécanique des matériaux granulaires est généralement considéré comme élasto-plastique non linéaire (figure 2). La déformation réversible est la déformation récupérée (élastique) à la suite de l'application de la contrainte sans considération de la déformation accumulée (plastique). Le  $M_r$  est le rapport entre la contrainte déviatorique ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ ) et la déformation axiale réversible ( $\epsilon_{1r}$ ), tel qu'il est présenté à l'équation [1], et le  $v_r$  est le rapport entre la déformation radiale réversible  $\epsilon_{3r}$  et  $\epsilon_{1r}$ , tel qu'il est présenté à l'équation [2] (figure 3).

$$M_r = \sigma_d / \epsilon_{1r} \quad [1] \quad v_r = \epsilon_{3r} / \epsilon_{1r} \quad [2]$$

Puisque  $\sigma_d$  est faible comparativement à la résistance du matériau granulaire et qu'il est répété plusieurs fois, la déformation est presque complètement récupérée. Ainsi, le  $M_r$  et le  $v_r$  sont utilisés comme propriétés élastiques pour le dimensionnement de chaussée.

## ESSAI TRIAXIAL À CHARGEMENT RÉPÉTÉ

L'équipement triaxial à chargement déviatorique répété est constitué d'une cellule triaxiale permettant d'appliquer une pression de confinement constante  $\sigma_3$  avec de l'air et d'une presse hydraulique permettant d'appliquer une contrainte axiale déviatorique  $\sigma_d$  de forme sinusoïdale uniquement en compression.

L'échantillon a une hauteur de 300 mm et un diamètre de 150 mm. Le  $\epsilon_{1r}$  est mesuré par deux capteurs de déplacement positionnés de part et d'autre le long de l'échantillon, à 50 mm des plateaux de chargement, donc espacés de 200 mm. Le  $\epsilon_{3r}$  est mesuré par un capteur de déplacement installé sur un câble ceinturant le centre de l'échantillon. Un capteur de succion matricielle peut être installé au centre de l'échantillon lors du compactage.

L'échantillon est densifié avec un marteau vibrant en 7 couches, 30 s de vibration par couche, à une teneur en eau supérieure d'environ 2 % à l'absorption. Le matériau granulaire est écrêté au tamis 31,5 mm et doit avoir moins de 20 % passant le tamis 80  $\mu\text{m}$  avec un indice de plasticité inférieur à 10. En moyenne, la masse volumique est environ 97 % de celle du proctor modifié avec 17 % de porosité et 27 % de saturation (2). L'échantillon est recouvert d'une membrane afin d'appliquer différentes pressions de confinement.

Le  $M_r$  et le  $v_r$  sont caractérisés à 15 états de contrainte (tableau 1), puisque le comportement mécanique des matériaux granulaires est non linéaire (figure 2), donc fonction de l'état de contrainte ou de déformation. Chaque état de contrainte est appliqué pendant 60 cycles et les 5 derniers cycles sont retenus pour déterminer les  $M_r$  et  $v_r$  moyens. Le temps de chargement est de 1 s suivi d'un temps de repos de 1 s. L'échantillon est conditionné par 10 000 cycles de chargement avant sa caractérisation. Le  $M_r$  et le  $v_r$  sont caractérisés à la teneur en eau initiale de compactage, à la teneur en eau du matériau saturé à environ 90 % et à la teneur en eau du matériau drainé par gravité. Le drainage est ouvert lors des essais.

## COMPORTEMENT NON LINÉAIRE

Le comportement non linéaire de  $M_r$  (fonction de l'état de contrainte) est généralement déterminé en fonction de la contrainte totale  $\theta$  par l'équation [3] où  $\theta = \sigma_d + 3\sigma_3$ . Le  $v_r$  est considéré comme constant pour le dimensionnement de chaussée.

$$M_r = 10^b \theta^a [3] \quad M_r = a \theta + b [4] \quad v_r = a \epsilon_{1r} + b [5]$$

La méthode LC 22-400 propose de déterminer le comportement non linéaire de  $M_r$  en fonction de  $\theta$  selon la relation [4] et de  $v_r$  en fonction de  $\epsilon_{1r}$  selon la relation [5] (2). La figure 4 présente un exemple de résultats de  $M_r$  obtenus à différentes teneurs en eau et indique l'effet de la succion matricielle (2). Une

diminution de la succion matricielle, donc une augmentation de la teneur en eau, entraîne une diminution de  $M_r$  (2).

## CONCLUSION

La méthode LC 22-400 permet la détermination du  $M_r$  et du  $v_r$  des matériaux granulaires de chaussée. Ces propriétés sont nécessaires pour le dimensionnement des chaussées, notamment pour analyser l'influence de l'intensité des charges répétées (trafic) et des variations saisonnières de teneur en eau (dégel) sur la fissuration par fatigue du revêtement bitumineux. Ces propriétés permettent également l'évaluation de la performance des matériaux granulaires avant leur mise en œuvre, la comparaison de la performance de différents matériaux granulaires, la validation des spécifications de ces matériaux, l'évaluation du préjudice encouru en cas de non-conformité et l'étude du comportement de nouveaux matériaux de fondation.

## RÉFÉRENCES

- (1) MTQ, *Méthode LC 22-400, Détermination du module réversible des matériaux granulaires*, Les Publications du Québec, décembre 2004, 15 p.
- (2) Doucet F. et G. Doré, *Module réversible et coefficient de Poisson réversible des matériaux granulaires C-LTPP*, 57<sup>e</sup> Congrès canadien de géotechnique, Québec, 2004.

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

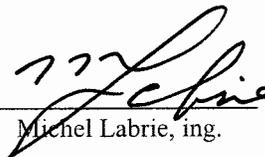
**DIRECTEUR :**   
Michel Labrie, ing.



Figure 1 : Équipement triaxial à chargement déviatorique répété

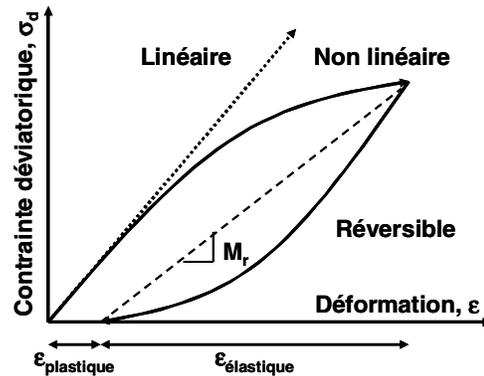


Figure 2 : Comportement réversible d'un matériau granulaire

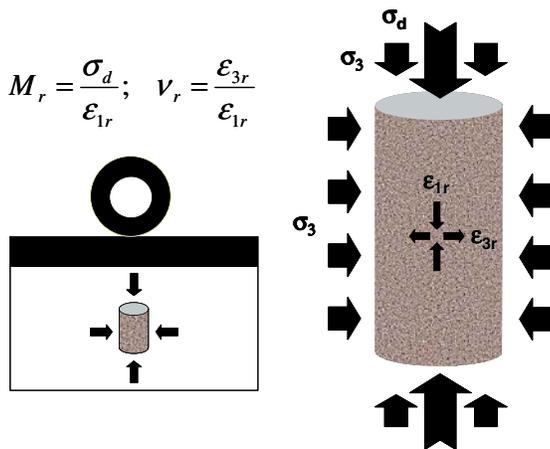


Figure 3 : Chargement triaxial des matériaux granulaires

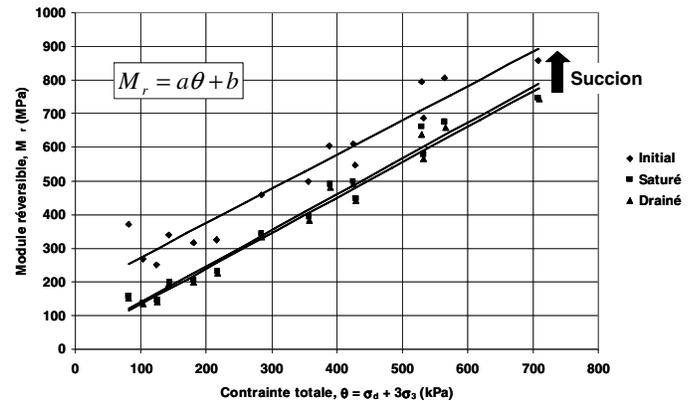


Figure 4 : Module réversible non linéaire

| $\sigma_3$ (kPa) | $\sigma_d$ (kPa) |     | $\theta$ (kPa) |     |     |
|------------------|------------------|-----|----------------|-----|-----|
| 20               | 40               | 60  | 80             | 100 | 120 |
| 35               | 70               | 105 | 140            | 175 | 210 |
| 70               | 140              | 210 | 280            | 350 | 420 |
| 105              | 105              | 210 | 385            | 420 | 525 |
| 140              | 140              | 280 | 525            | 560 | 700 |

Tableau 1 : États de contrainte pour la détermination du  $M_r$



## Dimensionnement structural des chaussées souples

Trafic et agressivité des véhicules



## Objectif: ECAS prévus

**Segment homogène**  
Exemple

**Objectifs**  
Type de route: Autoroute  
Classe de trafic (DJMA projeté): Supérieur à 20000  
Années ECAS (millions): 30 | 52 012 |  Outil ECAS

**Climat**  
Station météorologique: [L'Assomption (CDA)] Choisir  
Zone: Sud | T<sub>eq</sub>: 20,5 | T<sub>ma</sub>: 5,3 | I<sub>gn</sub>: 1140 |  $\sigma_g$ : 222  
Simulation: PR | IG: 1474  
Climat: n | IG<sub>s</sub>: 1474  
n: 1,0 | IG<sub>s</sub>: 1474

**Couches de matériaux**

|   | Matériau                     | H (mm)       | F <sub>Mi</sub> | M <sub>i</sub> effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | w <sub>18</sub> (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|---|------------------------------|--------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------|-----|------|-------------------------------|---------------------------|
| 1 | BB                           | 295          | 1,00            | 3101                          | 0,44                  | 1,0 | 5,16 | 55,568                        | 41,60                     |
| 2 | MG 20                        | 300          | 1,00            | 110                           | 0,07                  | 0,8 | 5,82 | 52,465                        | 5,70                      |
| 3 | MG 112 (fuseau entier)       | 600          | 1,00            | 74                            | 0,08                  | 0,8 | 7,24 | 54,856                        | 5,40                      |
| 4 |                              |              |                 |                               |                       |     |      |                               |                           |
| 5 |                              |              |                 |                               |                       |     |      |                               |                           |
| 6 |                              |              |                 |                               |                       |     |      |                               |                           |
| 7 |                              |              |                 |                               |                       |     |      |                               |                           |
| 5 | SC fin (plus de 30 % passer) | Total = 1195 | 1,00            | 36                            |                       |     |      |                               | Total                     |

→ Équivalences d'été (FAS = 0,84)  
M<sub>i</sub> = 43 MPa  
CBR = 5,6

## Agressivité des véhicules

- Facteurs affectant l'agressivité
  - Charges
  - Configuration des essieux (distances)
  - Pneus (arrangement, type, pression)
  - Chaussée
    - Uni (défauts)
    - Géométrie (pentes, devers, courbe, zones de freinage...)
    - Capacité de support



## Le trafic lourd

$$\text{Agressivité} = \left[ \frac{\text{Poids de l'essieu}}{\text{Poids de référence}} \right]^4$$

| Poids de référence (AASHTO) pour 1 ÉCAS |                       |  |
|---|-----------------------|--|
| Essieu simple                           | 8 165 kg (18 000 lbs) |  |
| Essieu tandem                           | 15 200 kg             |  |
| Essieu tridem                           | 21 800 kg             |  |
| Essieu quadrem                          | ≅ 28 500 kg           |  |



# Calcul de l'agressivité d'un camion 10 roues chargé

- Essieu avant: 8 000 kg
- Essieu tandem arrière: 20 000 kg
- Agressivité relative

$$\text{Essieu avant} = \left[ \frac{8000}{8165 \text{ kg}} \right]^4 = 0,92$$

$$\text{Essieu arrière} = \left[ \frac{20\,000}{15\,200 \text{ kg}} \right]^4 = 3,00$$

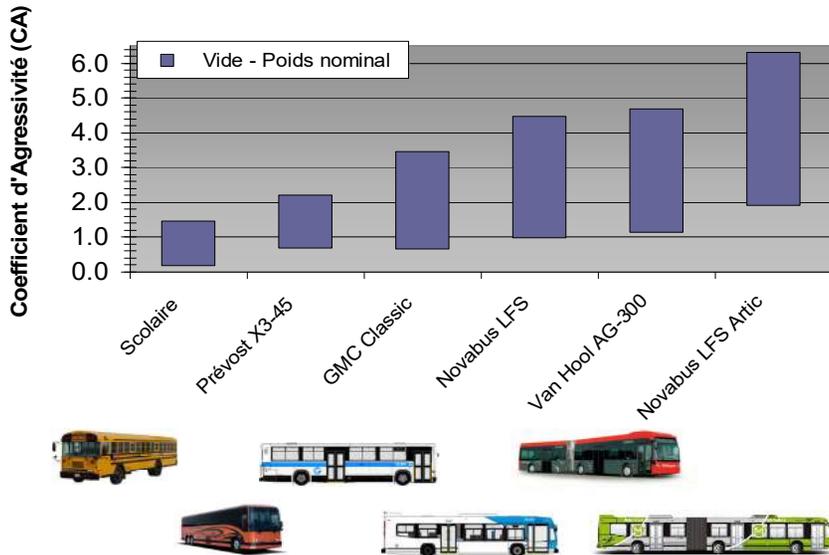
- Agressivité total = somme des essieux

$$\text{C.A} = 0.92 + 3.00 = 3.92 \text{ ECAS (W}_{18}\text{)}$$

# Classification des véhicules



# Les types d'autobus



Réf: Pierre Gauthier, ing. (2011)  
Ville de Québec

# Classification des véhicules (manuelle ou automatique)

Municipalité de: SHERBROOKE  
Localisation: 2,2 km à l'est de la 220 (100km/h)  
Station de comptage: 0601024500 (00010-03-025)  
Date de relevé: 2012-10-26 (Jeudi)

Somme des deux directions

Résultats pour l'ensemble de la collecte

|   |                  |
|---|------------------|
| Pourcentage de camions sur semaine:       | 8.84 ( 98 hres ) |
| Pourcentage de camions de fin de semaine: | 2.7 ( 48 hres )  |

Classification selon le standard FHWA

| Heure        | Moto-cycliste | Véhicul léger | Véhicul léger et remorque | Autobus | Camion, 1 unité 2 ess. | Camion, 1 unité 3 ess. | Camion, 1 unité 4 ess. | Camion, 2 unités 4 ess. | Camion, 2 unités 5 ess. | Camion, 2 unités 6 ess. | Camion, 3 unités 5 ess. | Camion, 3 unités 6 ess. | Camion, 3 unités 7 ess. | Non-classifiés | Total | % camions |
|--------------|---------------|---------------|---------------------------|---------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|-------|-----------|
| 00:00-01:00  | 0             | 158           | 12                        | 0       | 0                      | 0                      | 0                      | 0                       | 11                      | 3                       | 1                       | 0                       | 2                       | 0              | 187   |           |
| 01:00-02:00  | 0             | 65            | 4                         | 0       | 2                      | 1                      | 0                      | 2                       | 9                       | 7                       | 0                       | 0                       | 2                       | 2              | 96    |           |
| 02:00-03:00  | 0             | 41            | 4                         | 0       | 0                      | 0                      | 0                      | 0                       | 7                       | 6                       | 0                       | 0                       | 0                       | 2              | 60    |           |
| 03:00-04:00  | 0             | 37            | 8                         | 0       | 1                      | 2                      | 0                      | 2                       | 9                       | 11                      | 0                       | 0                       | 2                       | 3              | 75    |           |
| 04:00-05:00  | 0             | 68            |                           |         |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                | 141   |           |
| 05:00-06:00  | 1             | 216           |                           |         |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                | 355   |           |
| 06:00-07:00  | 0             | 891           | 15                        |         |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                | 1198  |           |
| 07:00-08:00  | 1             | 2385          | 23                        |         |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                | 2857  | 5.6       |
| 08:00-09:00  | 1             | 2162          | 20                        |         |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                | 2631  | 8.0       |
| 09:00-10:00  | 0             | 1213          |                           |         |                        |                        |                        |                         |                         |                         |                         |                         |                         |                | 1609  | 11.9      |
| 10:00-11:00  | 3             | 1078          | 171                       | 2       | 19                     | 51                     | 1                      | 12                      | 70                      | 55                      | 0                       | 0                       | 8                       | 41             | 1511  |           |
| 11:00-12:00  | 1             | 1144          | 164                       | 4       | 25                     | 42                     | 2                      | 20                      | 55                      | 60                      | 0                       | 0                       | 8                       | 36             | 1561  |           |
| 12:00-13:00  | 1             | 1209          | 132                       | 0       | 24                     | 26                     | 1                      | 20                      | 69                      | 56                      | 0                       | 0                       | 12                      | 32             | 1582  |           |
| 13:00-14:00  | 0             | 1245          | 190                       | 2       | 16                     | 34                     | 0                      | 19                      | 102                     | 38                      | 0                       | 0                       | 4                       | 60             | 1710  |           |
| 14:00-15:00  | 1             | 1432          | 189                       | 2       | 24                     | 34                     | 1                      | 13                      | 91                      | 43                      | 1                       | 0                       | 4                       | 45             | 1880  |           |
| 15:00-16:00  | 2             | 1908          | 225                       | 2       | 38                     | 31                     | 0                      | 20                      | 94                      | 39                      | 0                       | 0                       | 5                       | 74             | 2438  | 9.4       |
| 16:00-17:00  | 0             | 2646          | 306                       | 5       | 33                     | 18                     | 0                      | 11                      | 89                      | 37                      | 1                       | 0                       | 5                       | 83             | 3234  | 6.2       |
| 17:00-18:00  | 1             | 2464          | 226                       | 7       | 18                     | 11                     | 0                      | 10                      | 72                      | 24                      | 1                       | 0                       | 4                       | 80             | 2918  | 5.0       |
| 18:00-19:00  | 0             | 1434          | 132                       | 1       | 7                      | 9                      | 0                      | 3                       | 36                      | 18                      | 0                       | 0                       | 2                       | 36             | 1698  |           |
| 19:00-20:00  | 0             | 1050          | 115                       | 1       | 3                      | 4                      | 0                      | 1                       | 54                      | 16                      | 2                       | 0                       | 3                       | 31             | 1280  |           |
| 20:00-21:00  | 1             | 800           | 85                        | 3       | 6                      | 4                      | 0                      | 4                       | 57                      | 14                      | 0                       | 0                       | 6                       | 19             | 999   |           |
| 21:00-22:00  | 0             | 715           | 59                        | 0       | 3                      | 2                      | 0                      | 3                       | 36                      | 8                       | 2                       | 0                       | 2                       | 20             | 850   |           |
| 22:00-23:00  | 0             | 510           | 27                        | 0       | 3                      | 3                      | 0                      | 2                       | 33                      | 12                      | 1                       | 0                       | 2                       | 10             | 603   |           |
| 23:00-00:00  | 0             | 393           | 14                        | 0       | 5                      | 3                      | 0                      | 0                       | 24                      | 3                       | 1                       | 0                       | 1                       | 10             | 454   |           |
| Total-Jour   | 13            | 25264         | 2883                      | 43      | 361                    | 391                    | 6                      | 188                     | 1205                    | 657                     | 12                      | 0                       | 94                      | 810            | 31927 |           |
| Pourcent (%) | 0             | 79.1          | 9                         | 0.1     | 1.1                    | 1.2                    | 0                      | 0.6                     | 3.8                     | 2.1                     | 0                       | 0                       | 0.3                     | 2.5            |       | 9.3       |

\* : volumes estimés

## Calcul de l'agressivité totale pour la période de conception

$$W_{18} = \text{DJMA} \times \%D \times \%voie \times \%V.L. \times \text{C.A.M} \times N \text{ jrs} \times \text{f.a.}$$

- $W_{18}$  = Nombre total de passage d'essieu équivalent à un essieu de référence de 18 000 lbs (8.16 t) sur la voie la plus sollicitée
- **DJMA** = Débit journalier moyen annuel
- **%D** = Pourcentage de véhicules par direction
- **%voie** = Pourcentage de véhicules sur la voie la plus sollicitée
- **%V.L.** = Pourcentage de véhicules lourds

87

## Distribution des camions sur des routes à voies multiples

| DJMA projeté<br>(une direction) | Route à deux voies<br>(une direction) |        | Route à trois voies et plus<br>(une direction) |        |        |
|---------------------------------|---------------------------------------|--------|--|--------|--------|
|                                 | Gauche                                | Droite | Gauche   | Centre | Droite |
| 2 000                           | 6                                     | 94     | 6  | 12     | 82     |
| 4 000                           | 12                                    | 88     | 6  | 18     | 76     |
| 6 000                           | 15                                    | 85     | 7  | 21     | 72     |
| 8 000                           | 18                                    | 82     | 7  | 23     | 70     |
| 10 000                          | 19                                    | 81     | 7  | 25     | 68     |
| 15 000                          | 23                                    | 77     | 7  | 28     | 65     |
| 20 000                          | 25                                    | 75     | 7  | 30     | 63     |
| 25 000                          | 27                                    | 73     | 7  | 32     | 61     |
| 30 000                          | 28                                    | 72     | 8  | 33     | 59     |
| 35 000                          | 30                                    | 70     | 8  | 34     | 58     |
| 40 000                          | 31                                    | 69     | 8  | 35     | 57     |
| 50 000                          | 33                                    | 67     | 8  | 37     | 55     |
| 60 000                          | 34                                    | 66     | 8  | 39     | 53     |
| 70 000                          | ---                                   | ---    | 8  | 40     | 52     |
| 80 000                          | ---                                   | ---    | 8  | 41     | 51     |
| 100 000                         | ---                                   | ---    | 9  | 42     | 49     |

Source: DARTER et autres (1985)

88

## Calcul de l'agressivité totale pour la période de conception

$$W_{18} = \text{DJMA} \times \%D \times \%voie \times \%V.L. \times \text{C.A.M} \times N \text{ jrs} \times \text{f.a.}$$

- $W_{18}$  = Nombre total de passage d'essieu équivalent à un essieu de référence de 18 000 lbs (8.16 t) sur la voie la plus sollicitée
- **C.A.M.** = Coefficient d'agressivité moyen

## C.A.M. par défaut\*

| Classe de route                  | % de véhicules lourds |         |         |        |
|----------------------------------|-----------------------|---------|---------|--------|
|                                  | 0 - 10                | 10 - 20 | 20 - 30 | > 30 % |
| Locale                           | 0,8                   | 1,2     | -       | -      |
| Collectrice                      | 1,2                   | 1,9     | -       | -      |
| Régionale                        | 1,4                   | 2,6     | -       | -      |
| Nationale à autoroute ou urbaine | 1,2                   | 1,3     | -       | -      |
| Nationale rurale                 | 2,1                   | 3,1     | 3,7     | 5,3    |
| Autoroute urbaine                | 1,1                   | 1,3     | -       | -      |
| Autoroute péri-urbaine           | 1,7                   | 2,0     | -       | -      |
| Autoroute rurale                 | 2,1                   | 2,7     | 3,4     | -      |

\*À utiliser en l'absence de données sur la classification des véhicules

90

89

## Calcul de l'agressivité totale pour la période de conception

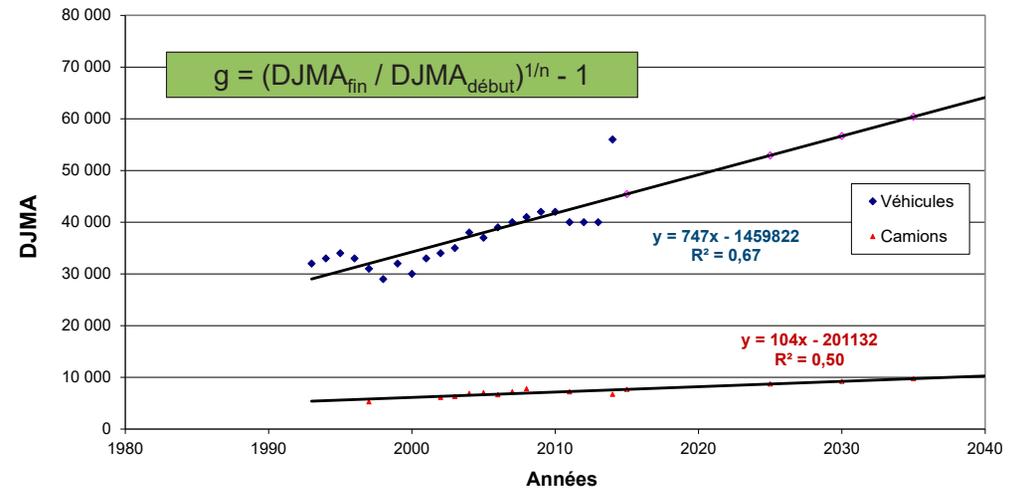
$$W_{18} = DJMA \times \%D \times \%voie \times \%V.L. \times C.A.M \times N \text{ jrs} \times f.a.$$

- **N jrs** = 300 jours, correspond à la proportion de véhicule lourd applicable durant l'année au Québec compte tenu de la méthodologie utilisée pour les comptages de trafic
- **f.a.** = facteur d'accroissement pour les véhicules lourds
  - $f.a. = ((1+g)^n) - 1) / g$
  - $g$  = taux d'accroissement (taux composé)
  - $n$  = période de design



91

## Calcul de l'accroissement du DJMA véhicule lourd



- À estimer pour mettre dans le logiciel
- Prévoir sur plusieurs décennies (industrie, réglementation, etc.)

92

## Autoroute 40 L'Assomption

- Données
  - DJMA = 50 000 avec 10% de camions (comptage 2019)
  - 4 voies, 2 directions
  - Accroissement annuel de 3%
  - Reconstruction prévue en 2021
  - Classification automatique datant de 2011
  - Dimensionnement 30 ans
  - 50% de véhicules lourds par direction

**EXEMPLE**

93

Transports Québec Classification automatique

de : 00040-04-052(4285) entrée voie de service sur Aut-40 (à l'est de la route-343) Direction 1 Calcul direction : +ST.9003\_V:01 +ST.9003\_V:02

à : 00040-04-081(5190) route 31-131

Municipalité : L'Assomption

Date de relevé : 2011-12-06 (Mardi) Classification : Classification selon le standard maison (HPM5)

| Heure        | Autos | Autos remor | Véh. Récré | Bus | 1un. 2ess. | 1un. 3ess. | 1un. 4ess. | 2un. 4ess. | 2un. 5ess. | 2un. 6ess. | 3un. 6ess. | 3un. 7ess. | Véh. Lourds | Motos | Diver | Total | % camion |
|--------------|-------|-------------|------------|-----|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------|-------|-------|----------|
| 00:00        |       |             |            |     |            |            |            |            |            |            |            |            |             |       |       |       |          |
| 01:00        |       |             |            |     |            |            |            |            |            |            |            |            |             |       |       |       |          |
| 02:00        |       |             |            |     |            |            |            |            |            |            |            |            |             |       |       |       |          |
| 03:00        |       |             |            |     |            |            |            |            |            |            |            |            |             |       |       |       |          |
| 04:00        |       |             |            |     |            |            |            |            |            |            |            |            |             |       |       |       |          |
| 05:00        |       |             |            |     |            |            |            |            |            |            |            |            |             |       |       |       |          |
| 06:00        | 580   | 9           | 1          | 5   | 26         | 19         | 1          | 7          | 60         | 86         | 1          | 6          | 3           | 0     | 0     | 804   | 26,7     |
| 07:00        | 1164  | 8           | 0          | 4   | 36         | 24         | 7          | 2          | 35         | 77         | 0          | 0          | 3           | 0     | 0     | 1360  | 13,8     |
| 08:00        | 1176  | 5           | 0          | 3   | 26         | 21         | 3          | 1          | 46         | 82         | 2          | 2          | 0           | 2     | 0     | 1369  | 13,7     |
| 09:00        | 825   | 7           | 0          | 7   | 42         |            |            |            |            |            |            |            |             |       |       | 1078  | 22,8     |
| 10:00        | 731   | 13          | 0          | 1   | 31         |            |            |            |            |            |            |            |             |       |       | 980   | 24,1     |
| 11:00        | 668   | 8           | 1          | 1   | 40         | 16         | 10         | 7          | 63         | 119        | 0          | 2          | 6           | 0     | 0     | 941   | 28,2     |
| 12:00        | 733   | 15          | 0          | 4   | 36         | 15         | 14         | 1          | 50         | 102        | 1          | 0          | 3           | 3     | 0     | 977   | 23,4     |
| 13:00        | 819   | 21          | 0          | 2   | 34         | 12         | 9          | 2          | 57         | 94         | 0          | 1          | 10          | 1     | 0     | 1062  | 20,9     |
| 14:00        | 1037  | 17          | 1          | 3   | 24         | 27         | 9          | 6          | 59         | 100        | 1          | 1          | 4           | 1     | 0     | 1290  | 18,3     |
| 15:00        | 1408  | 14          | 1          | 8   | 40         | 23         | 6          | 8          | 45         | 49         | 0          | 0          | 5           | 1     | 0     | 1608  | 11,6     |
| 16:00        | 1662  | 30          | 0          | 5   | 32         | 9          | 2          | 0          | 28         | 57         | 0          | 0          | 7           | 1     | 0     | 1833  | 7,7      |
| 17:00        | 1359  | 10          | 0          | 3   | 16         | 1          | 0          | 0          | 6          | 25         | 45         | 0          | 3           | 6     | 1     | 1475  | 7,2      |
| 18:00        | 975   | 9           | 1          | 2   | 12         | 3          | 0          | 4          | 22         | 46         | 0          | 0          | 2           | 3     | 0     | 1079  | 8,8      |
| 19:00        |       |             |            |     |            |            |            |            |            |            |            |            |             |       |       |       |          |
| 20:00        |       |             |            |     |            |            |            |            |            |            |            |            |             |       |       |       |          |
| 21:00        |       |             |            |     |            |            |            |            |            |            |            |            |             |       |       |       |          |
| 22:00        |       |             |            |     |            |            |            |            |            |            |            |            |             |       |       |       |          |
| 23:00        |       |             |            |     |            |            |            |            |            |            |            |            |             |       |       |       |          |
| Total-jour   | 13137 | 166         | 5          | 48  | 395        | 198        | 74         | 60         | 588        | 1081       | 6          | 18         | 66          | 14    | 0     | 15856 |          |
| Pourcent (%) | 82,9  | 1,0         | 0,0        | 0,3 | 2,5        | 1,2        | 0,5        | 0,4        | 3,7        | 6,8        | 0,0        | 0,1        | 0,4         | 0,1   | 0,0   | 0,0   | 16,1     |

Voir annexe pleine page

94

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

Exemple

Objectifs

Type de route: Autoroute

Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000

Années: 30

ÉCAs (millions): [ ]

Outil ÉCAs

Climat

Station météorologique: L'Assomption (CDA)

Zone: Sud

T<sub>se</sub>: 20,5

T<sub>ma</sub>: 5,3

IG<sub>n</sub>: 1140

σ<sub>ig</sub>: 222

Simulation: Climat

PR: 15

IG: 1474

IG<sub>s</sub>: 1474

BB report: [ ]

Outil optionnel pour calculer le nombre d'ÉCAs projeté

CHAUSSÉE

Revêtement à haute résistance à l'ornièrage requis

Couches de matériaux

| Matériau                       | H (mm) | F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m | SN | W18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|--------------------------------|--------|------|-------------------|-----------------------|---|----|-------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                       | 150    |      |                   |                       |   |    |                   | 21,15                     |
| 2 MG 20                        | 225    |      |                   |                       |   |    |                   | 4,28                      |
| 3 MG 112 (fuseau entier)       | 500    |      |                   |                       |   |    |                   | 4,50                      |
| 4                              |        |      |                   |                       |   |    |                   |                           |
| 5                              |        |      |                   |                       |   |    |                   |                           |
| 6                              |        |      |                   |                       |   |    |                   |                           |
| 7                              |        |      |                   |                       |   |    |                   |                           |
| 5 SC fin (plus de 30 % passer) |        |      |                   |                       |   |    |                   |                           |
| Total = 875                    |        |      |                   |                       |   |    |                   |                           |

Total: 29,93

Réinitialiser les matériaux

95

Outil de calcul du nombre d'ÉCAs

CHAUSSÉE

Prévision du trafic

Année du comptage: 2019

Année du projet: 2021

DJMA du comptage: 50 000

DJMA actualisé: 53 045

Durée de vie (en années): 30

g (%): 3,0

f.a.: 47,58

Nirs (jours/an): 300

Agressivité du trafic

Proportion de véhicules lourds (%): 10,0

Coefficient d'agressivité moyen (CAM)

Valeur par défaut

Classification

Saisie directe

CAM: [ ]

Répartition du trafic lourd sur les voies

Nombre de voies par direction: [ ]

1 voie  2 voies  3 voies

Direction 1

| Fraction du trafic en direction 1 (%) | DJMA projeté pour la direction 1 | Fraction par voie (%) | Trafic par voie (DJMA) | FS  | ÉCAs par voie (en millions) | Voie de référence            |
|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------|-----|-----------------------------|------------------------------|
| 50,0                                  | 42 061                           | 100,0                 | 42 061                 | 1,0 |                             | <input type="radio"/> Voie 1 |
|                                       |                                  |                       |                        |     |                             | <input type="radio"/> Voie 2 |
|                                       |                                  |                       |                        |     |                             | <input type="radio"/> Voie 3 |

Direction 2

| Fraction du trafic en direction 2 (%) | DJMA projeté pour la direction 2 | Fraction par voie (%) | Trafic par voie (DJMA) | FS | ÉCAs par voie (en millions) | Voie de référence                         |
|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------|----|-----------------------------|---|
| 50,0                                  | 42 061                           |                       |                        |    |                             | <input checked="" type="radio"/> Voie max |
|                                       |                                  |                       |                        |    |                             | <input type="radio"/> Voie 3              |
|                                       |                                  |                       |                        |    |                             | <input type="radio"/> Voie 2              |
|                                       |                                  |                       |                        |    |                             | <input type="radio"/> Voie 1              |

Norme pour faible trafic

DJMA corrigé: 84 121

DJMA projeté: 84 121

ÉCAs projeté (millions): [ ]

Fermer

96

Outil de calcul du nombre d'ÉCAs

Comptage et classification des véhicules lourds

|                                    | Nb véhicules | CA (véhicule) | Agressivité totale |
|------------------------------------|--------------|---------------|--------------------|
| Autobus                            | 48           | 1,10          | 52,80              |
| Camion 1 unité 2 essieux           | 395          | 0,30          | 118,50             |
| Camion 1 unité 3 essieux           | 198          | 1,40          | 277,20             |
| Camion 1 unité 4 essieux et plus   | 74           | 5,70          | 421,80             |
| Camion 2 unités 4 essieux et moins | 60           | 0,50          | 30,00              |
| Camion 2 unités 5 essieux          | 588          | 1,70          | 999,60             |
| Camion 2 unités 6 essieux et plus  | 1081         | 6,80          | 7350,80            |
| Camion 3 unités 5 essieux          | 6            | 1,70          | 10,20              |
| Camion 3 unités 6 essieux et plus  | 84           | 7,30          | 613,20             |

Réinitialiser les CA

**CAM =  $\sum$ agressivité totale /  $\sum$  Nb véhicules**

Coefficient d'agressivité moyen (CAM)

3,90

ECAs par camion: [ ]

Retour

97

Outil de calcul du nombre d'ÉCAs

CHAUSSÉE

Prévision du trafic

Année du comptage: 2019

Année du projet: 2021

DJMA du comptage: 50 000

DJMA actualisé: 53 045

Durée de vie (en années): 30

g (%): 3,0

f.a.: 47,58

Nirs (jours/an): 300

Agressivité du trafic

Proportion de véhicules lourds (%): 10,0

Coefficient d'agressivité moyen (CAM)

Valeur par défaut

Classification

Saisie directe

CAM: 3,90

Répartition du trafic lourd sur les voies

Nombre de voies par direction: [ ]

1 voie  2 voies  3 voies

Direction 1

| Fraction du trafic en direction 1 (%) | DJMA projeté pour la direction 1 | Fraction par voie (%) | Trafic par voie (DJMA) | FS  | ÉCAs par voie (en millions) | Voie de référence            |
|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------|-----|-----------------------------|------------------------------|
| 50,0                                  | 42 061                           | 68,7                  | 28 896                 | 1,0 | 101,337                     | <input type="radio"/> Voie 1 |
|                                       |                                  | 31,3                  | 13 165                 | 1,0 | 46,169                      | <input type="radio"/> Voie 2 |
|                                       |                                  |                       |                        |     |                             | <input type="radio"/> Voie 3 |

Direction 2

| Fraction du trafic en direction 2 (%) | DJMA projeté pour la direction 2 | Fraction par voie (%) | Trafic par voie (DJMA) | FS | ÉCAs par voie (en millions) | Voie de référence                         |
|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|------------------------|----|-----------------------------|---|
| 50,0                                  | 42 061                           |                       |                        |    |                             | <input checked="" type="radio"/> Voie max |
|                                       |                                  |                       |                        |    |                             | <input type="radio"/> Voie 3              |
|                                       |                                  |                       |                        |    |                             | <input type="radio"/> Voie 2              |
|                                       |                                  |                       |                        |    |                             | <input type="radio"/> Voie 1              |

Norme pour faible trafic

DJMA corrigé: 84 121

DJMA projeté: 84 121

ÉCAs projeté (millions): 101,337

Fermer

98

## Précision ou sensibilité

- Une erreur de 20% sur les ECAS aura un impact de l'ordre de 5 à 10 mm sur l'épaisseur de BB
- Une erreur de 100% sur les ECAS aura un impact de l'ordre de 25 mm sur l'épaisseur de BB



Section de trafic : 0004026900 (A)

Direction 1

de : 00040-04-052(4285) entrée voie de service sur Aut-40 (à l'est de la route-343)

Calcul direction : +ST:9003\_V:01 +ST:9003\_V:02

à : 00040-04-081(5190) route 31-131

Municipalité : L'Assomption

Date de relevé : 2011-12-06 (Mardi )

Classification : Classification selon le standard maison (HPMS)

| Heure        | Autos | Autos remor | Véh. Récréé | Bus | 1un. 2ess. | 1un. 3ess. | 1un. 4ess+ | 2un. 4ess | 2un. 5ess. | 2un. 6ess+ | 3un. 5ess- | 3un. 6ess. | 3un. 7ess+ | Véh. Lourds | Motos | Divers | Total | % camion |
|--------------|-------|-------------|-------------|-----|------------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------|--------|-------|----------|
| 00:00        |       |             |             |     |            |            |            |           |            |            |            |            |            |             |       |        |       |          |
| 01:00        |       |             |             |     |            |            |            |           |            |            |            |            |            |             |       |        |       |          |
| 02:00        |       |             |             |     |            |            |            |           |            |            |            |            |            |             |       |        |       |          |
| 03:00        |       |             |             |     |            |            |            |           |            |            |            |            |            |             |       |        |       |          |
| 04:00        |       |             |             |     |            |            |            |           |            |            |            |            |            |             |       |        |       |          |
| 05:00        |       |             |             |     |            |            |            |           |            |            |            |            |            |             |       |        |       |          |
| 06:00        | 580   | 9           | 1           | 5   | 26         | 19         | 1          | 7         | 60         | 86         | 1          | 6          | 3          | 0           | 0     | 0      | 804   | 26.7     |
| 07:00        | 1164  | 8           | 0           | 4   | 36         | 24         | 7          | 2         | 35         | 77         | 0          | 0          | 3          | 0           | 0     | 0      | 1360  | 13.8     |
| 08:00        | 1176  | 5           | 0           | 3   | 26         | 21         | 3          | 1         | 46         | 82         | 2          | 2          | 0          | 2           | 0     | 0      | 1369  | 13.7     |
| 09:00        | 825   | 7           | 0           | 7   | 42         | 15         | 5          | 6         | 47         | 116        | 1          | 3          | 4          | 0           | 0     | 0      | 1078  | 22.8     |
| 10:00        | 731   | 13          | 0           | 1   | 31         | 13         | 8          | 10        | 51         | 108        | 0          | 0          | 13         | 1           | 0     | 0      | 980   | 24.1     |
| 11:00        | 668   | 8           | 1           | 1   | 40         | 16         | 10         | 7         | 63         | 119        | 0          | 2          | 6          | 0           | 0     | 0      | 941   | 28.2     |
| 12:00        | 733   | 15          | 0           | 4   | 36         | 15         | 14         | 1         | 50         | 102        | 1          | 0          | 3          | 3           | 0     | 0      | 977   | 23.4     |
| 13:00        | 819   | 21          | 0           | 2   | 34         | 12         | 9          | 2         | 57         | 94         | 0          | 1          | 10         | 1           | 0     | 0      | 1062  | 20.9     |
| 14:00        | 1037  | 17          | 1           | 3   | 24         | 27         | 9          | 6         | 59         | 100        | 1          | 1          | 4          | 1           | 0     | 0      | 1290  | 18.3     |
| 15:00        | 1408  | 14          | 1           | 8   | 40         | 23         | 6          | 8         | 45         | 49         | 0          | 0          | 5          | 1           | 0     | 0      | 1608  | 11.6     |
| 16:00        | 1662  | 30          | 0           | 5   | 32         | 9          | 2          | 0         | 28         | 57         | 0          | 0          | 7          | 1           | 0     | 0      | 1833  | 7.7      |
| 17:00        | 1359  | 10          | 0           | 3   | 16         | 1          | 0          | 6         | 25         | 45         | 0          | 3          | 6          | 1           | 0     | 0      | 1475  | 7.2      |
| 18:00        | 975   | 9           | 1           | 2   | 12         | 3          | 0          | 4         | 22         | 46         | 0          | 0          | 2          | 3           | 0     | 0      | 1079  | 8.8      |
| 19:00        |       |             |             |     |            |            |            |           |            |            |            |            |            |             |       |        |       |          |
| 20:00        |       |             |             |     |            |            |            |           |            |            |            |            |            |             |       |        |       |          |
| 21:00        |       |             |             |     |            |            |            |           |            |            |            |            |            |             |       |        |       |          |
| 22:00        |       |             |             |     |            |            |            |           |            |            |            |            |            |             |       |        |       |          |
| 23:00        |       |             |             |     |            |            |            |           |            |            |            |            |            |             |       |        |       |          |
| Total-jour   | 13137 | 166         | 5           | 48  | 395        | 198        | 74         | 60        | 588        | 1081       | 6          | 18         | 66         | 14          | 0     | 0      | 15856 |          |
| Pourcent (%) | 82.9  | 1.0         | 0.0         | 0.3 | 2.5        | 1.2        | 0.5        | 0.4       | 3.7        | 6.8        | 0.0        | 0.1        | 0.4        | 0.1         | 0.0   | 0.0    |       | 16.1     |





## Dimensionnement structural des chaussées souples

### Dimensionnement au gel



## Considération du climat dans les modules du logiciel Chaussée (2.0)

- Module Structural
  - $E_{BB} = f(T_{BB}) \leftarrow$  Zone sud, zone nord
  - E autres matériaux = Précalculé avec l'approche du dommage équivalent (méthode AASHTO 1993)
- Module Gel 1994
  - $H_{tot} = f(\text{Indice de gel normal})$
- Module Gel
  - Réponse =  $f(T_{ma}, T_j)$ 
    - Température moyenne annuelle ( $T_{ma}$ )
    - Températures journalières ( $T_j$ )

## Protection contre le gel (3 degrés)

1. Protection partielle
  - Norme Structures de chaussées (tome II, chap. 2.4)
  - Abaque de 1994
2. Protection à soulèvement contrôlé
  - Amélioration (recommandée) de la protection partielle
3. Protection quasi-totale à totale
  - Norme Transitions (tome II, chap. 1.10) (Profondeur P)
  - Norme Drainage (tome II, chap. 3.5) (Profondeur de gel)
  - Mise hors gel (conduite, sol sensible, etc.)

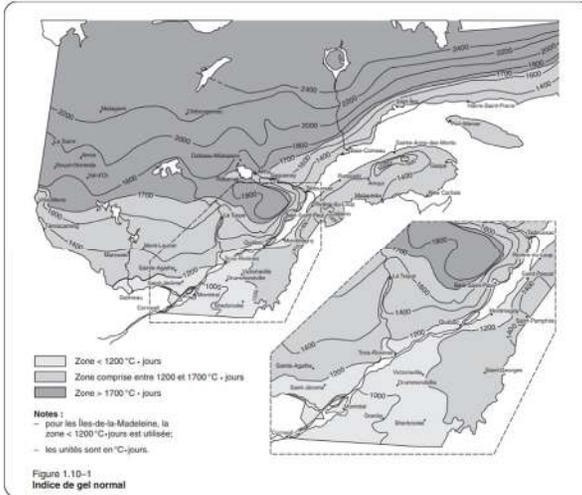


## Climat du Québec

- Températures typiquement de  $-30$  à  $+30^{\circ} \text{C}$
- Indices de gel:  $800$  à  $2200^{\circ} \text{C jours}$
- Profondeurs de gel:  $1,2$  à  $3,0 \text{ m}$
- Précipitations totales:  $800$  à  $1400 \text{ mm / an}$
- Variations reliées au fleuve St-Laurent



## Indices de gel moyens (°C jours)



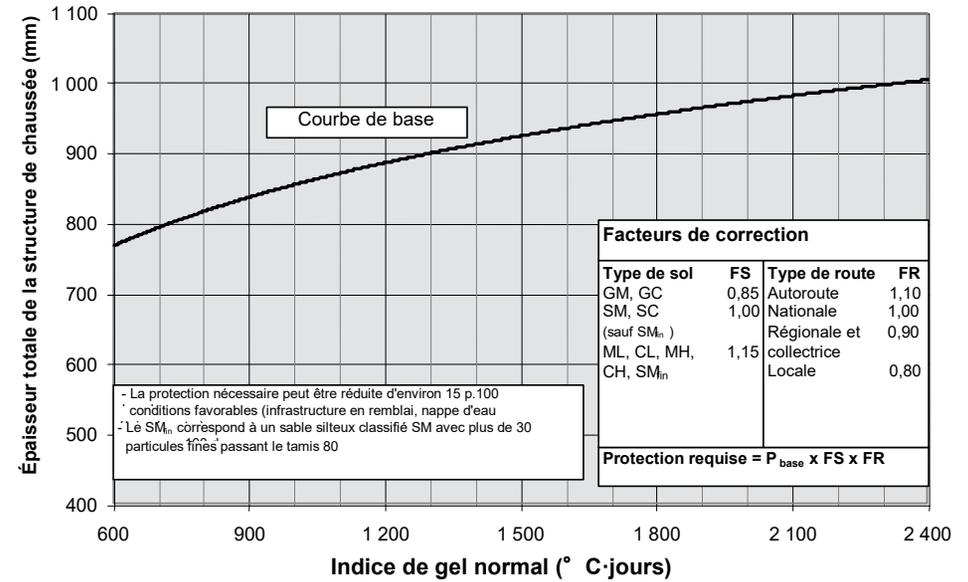
- Montréal 1000
- Québec 1200
- Chicoutimi 1500
- Amos 1900
- Toronto/Halifax 520
- Kingston (Ont.) 600
- Augusta (Maine) 585
- Minneapolis 920
- Bordeaux/Nantes 13
- Paris 36
- Strasbourg/Nancy 67
- Helsinki (Finlande) 610
- Moscou (Russie) 750

- Précipitations (mm)
  - Montréal - 1060
  - Minneapolis - 820

Transports  
Québec

104

## Protection partielle contre le gel (1994)



105

## Gel – Protection partielle (1994)

- Jugé valable, basé sur l'expérience
- Ne permet pas de traiter
  - Sols hétérogènes
  - Sols argileux humides avec  $IL > 0,9$
  - Argiles varvées
  - Isolant
  - Strates de sols de gélivité différente
- N'offre pas d'indicateur de performance
  - Impossible de décortiquer les variations



## Profondeur P pour transitions

Tableau 1.10-1

Profondeur de transition en fonction de l'indice de gel

| Indice de gel normal (°C-jours) | Profondeur de transition « P » <sup>(1)</sup> (m) |                                |              |
|---------------------------------|---|--------------------------------|--------------|
|                                 | Autoroute et route nationale                      | Route régionale ou collectrice | Route locale |
| < 1200                          | 2,0   | 1,8                            | 1,6          |
| 1200 – 1700                     | 2,25  | 2,0                            | 1,8          |
| > 1700                          | 2,5   | 2,25                           | 2,0          |

1. Mesurée à partir du profil final du revêtement.

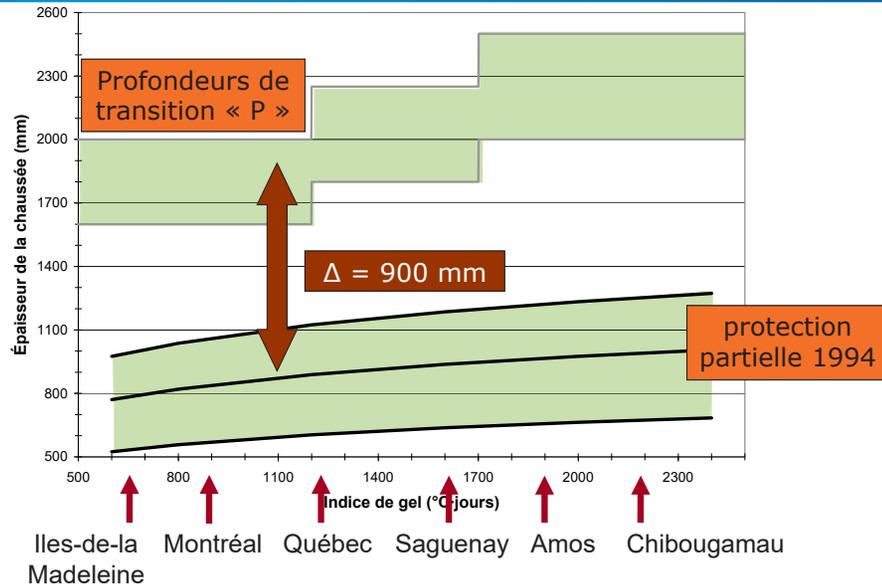


Réf.: Normes de construction routière, tome II, chap 1 « terrassements »

106

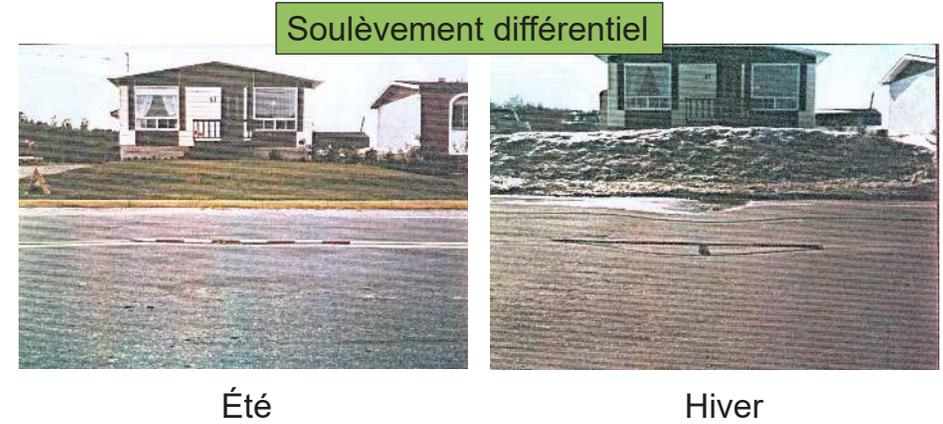
107

## Protection partielle et profondeur P



108

## Indicateur de performance au gel



109

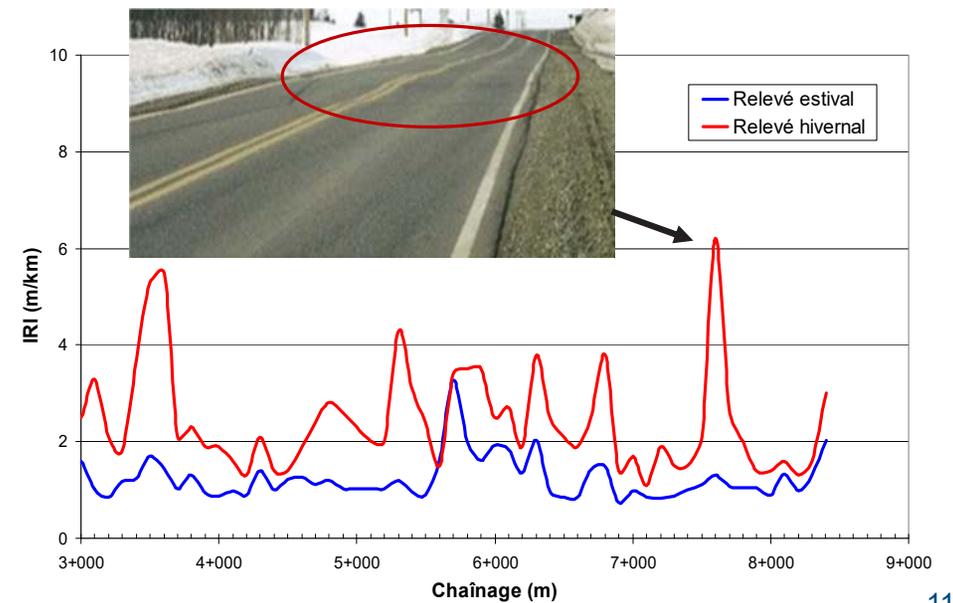
## Les soulèvements au gel

- Affectent le confort de roulement (et la sécurité)
- Augmentent les frais d'entretien
- Fissent le revêtement
- Diminuent la durée de vie de la chaussée



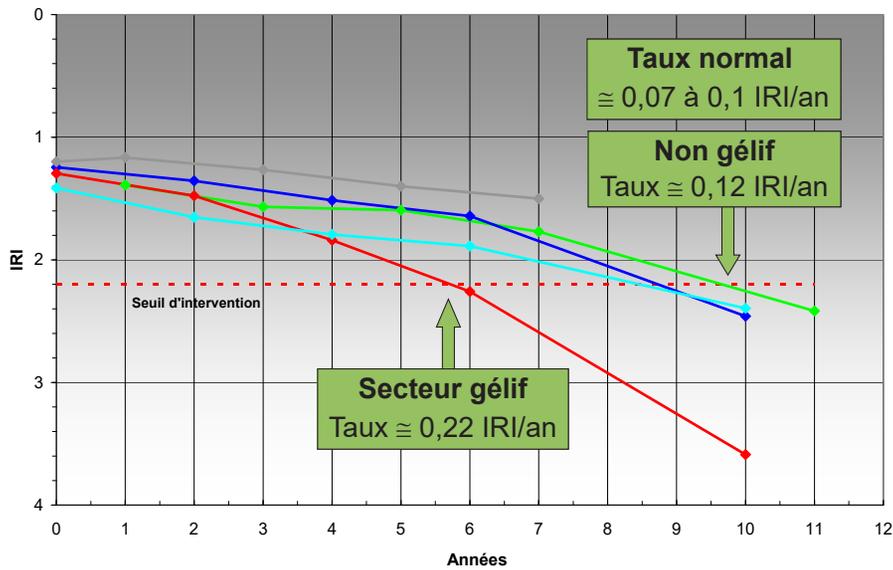
110

## Performance vs gélivité



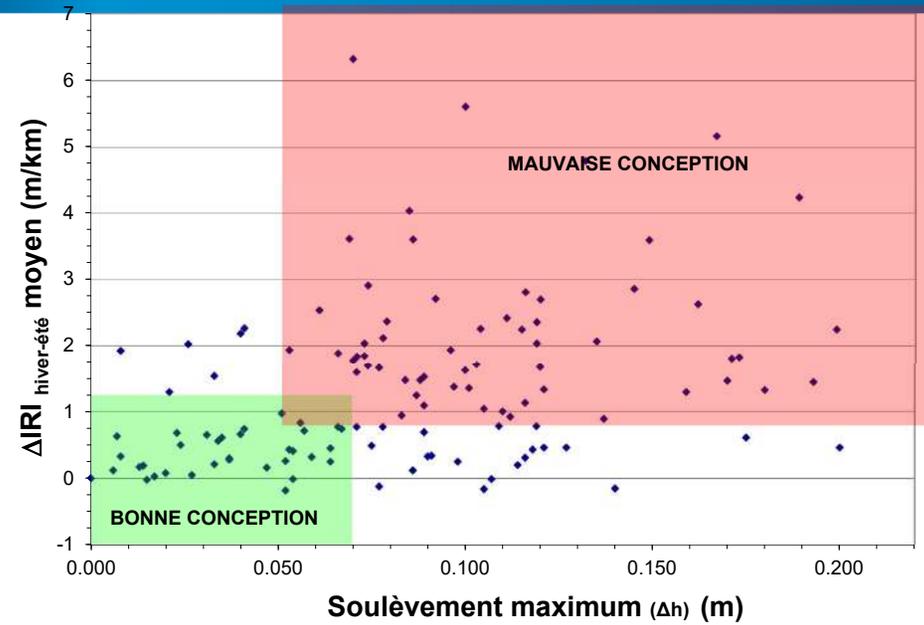
111

# Performance vs gélivité



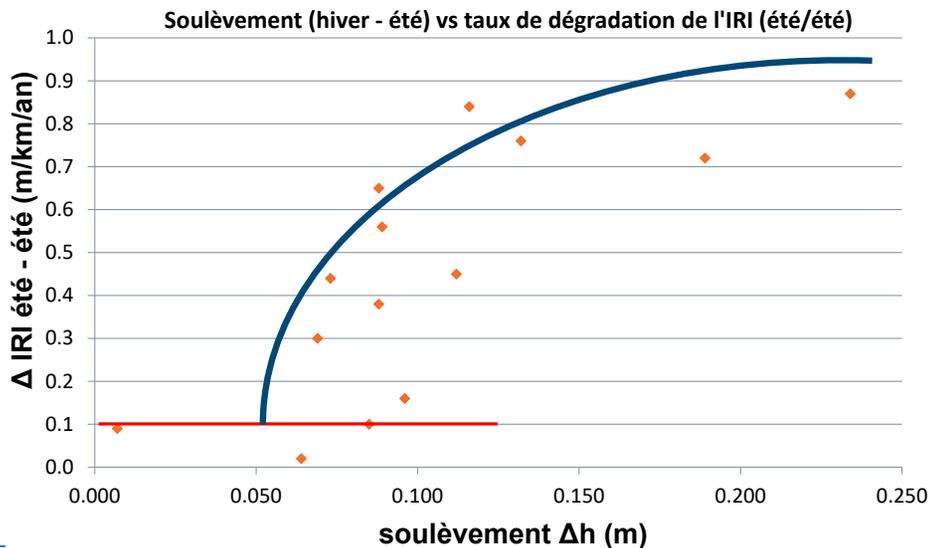
112

# Soulèvement ( $\Delta h$ ) vs $\Delta IRI_{\text{hiver-été}}$



113

# Soulèvement ( $\Delta h$ ) vs taux de dégradation IRI (été/été)

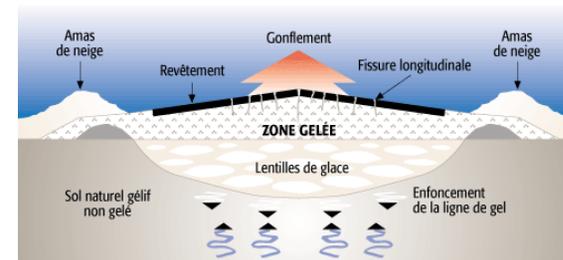


Développement d'un modèle: O. Sylvestre (2016)

# Soulèvements absolus

Seuils pour conserver le niveau de service et éviter la fissuration

- 30 à 60 mm selon le type de chaussée (Konrad 1998)
  - Il avait proposé un seuil de 75 mm en 1996
- 30 à 100 mm (Gustavson, Slunga et Saarelainen 1999)
- Expérience au SEC
  - Jamais vu de problèmes avec  $h < 50$  mm
  - $\Delta IRI_{\text{hiver-été}}$  et fissuration avec  $h > 80$  mm



115

# Critère de conception au gel

Seuils admis pour une probabilité de retour de 2 hivers durant la période de conception

Tableau 2.4-1  
Critères de conception – Chaussées souples neuves ou faisant l'objet d'un décohésionnement ou d'un remplacement complet du revêtement

| Classification de la route | DJMA projeté | Période de conception (années) | Structural <sup>(1)</sup>                   |                                    | Soulèvement au gel <sup>(2)</sup> maximal (mm) |
|----------------------------|--------------|--------------------------------|---|------------------------------------|--|
|                            |              |                                | Perte de viabilité maximale ( $\Delta$ PSI) | Fiabilité statistique minimale (%) |  |
| Locale                     | < 1000       | 25                             | 2,0   | 66                                 | 70   |
|                            | > 1000       |                                |   | 70                                 |  |
| Collectrice et régionale   | < 2000       | 25                             | 2,0   | 70                                 | 60   |
|                            | 2000-3000    |                                |   | 75                                 |  |
|                            | > 3000       |                                |   | 80                                 |  |
| Nationale                  | < 5000       | 25                             | 2,0   | 80                                 | 55   |
|                            | 5000-20000   |                                |   | 85                                 |  |
|                            | > 20000      |                                |   | 90                                 |  |
| Autoroute                  | < 20000      | 30                             | 1,75  | 90                                 | 50   |
|                            | > 20000      |                                |   | 95                                 |  |

1. Perte de viabilité exprimée suivant l'indice de viabilité de l'AASHTO et le facteur de fiabilité R en assumant un écart type  $S_0$  de 0,45.  
2. Effets du gel admis pour une période de récurrence égale à la demi-période de conception.

- Conserver la profondeur **P** pour l'épaisseur maximale (tome II)
- Conserver le critère de protection partielle de 1994 pour l'épaisseur minimale

# Épaisseur de sous-fondation

Tableau 2.5-1  
Épaisseur de sous-fondation en granulats naturels ou recyclés (MR) MG 112, chaussées souples où le DJMA projeté est inférieur à 5000

| Sol d'infrastructure <sup>(1)</sup>                                   | Classification de la route (DJMA projeté < 5000) | Indice de gel normal <sup>(2)</sup>             |                       |                           |
|---|--|---|-----------------------|---------------------------|
|   |  | Moyen   | Élevé                 | Très élevé                |
|   |  | Épaisseur de sous-fondation <sup>(3)</sup> (mm) |                       |                           |
| Constitué de 20,0% ou moins de particules fines passant le tamis 80µm | Locale   | 300-400   | 300-425               | 300-450                   |
|   | Collectrice et régionale                         | 300-425   | 300-475               | 300-525                   |
|   | Nationale  | 300-450   | 300-525               | 300-600                   |
| GM, GC  | Locale   | 300-400   | 300-475               | 300-650                   |
|   | Collectrice et régionale                         | 300-450   | 375-650               | 375-750                   |
|   | Nationale  | 375-475   | 375-700               | 375-825                   |
| SM, SC (sauf SM fin) <sup>(4)</sup>                                   | Locale   | 375-525   | 375-550               | 450-700                   |
|   | Collectrice et régionale                         | 375-525   | 450-700               | 450-850                   |
|   | Nationale  | 450-600   | 525-750               | 525-950                   |
| SM fin, croûte argileuse, MH, CH ou CL avec $I_p \geq 12$             | Locale   | 450-750   | 500-850               | 600-1050                  |
|   | Collectrice et régionale                         | 525-850   | 600-1000              | 700-1100                  |
|   | Nationale  | 600-950   | 700-1100              | 800-1200<br>(375+250+400) |
| CL avec $I_p < 12$  | Toutes classes                                   | 900   | 1100<br>(350+250+350) | 1300<br>(575+250+400)     |
|   | Toutes classes                                   | 1150<br>(450+250+300)                           | 1400<br>(400+300+350) | 1600<br>(375+500+400)     |
| Argiles varvées ou sensibles ( $I_p > 9$ )                            | Toutes classes                                   | 1400<br>(600+250+300)                           | 1700<br>(800+300+350) | 1950<br>(550+500+400)     |

Épaisseur déterminée selon les strates de sols présentes en dessous, dans la zone soumise au gel

# Protection contre le gel

- L'approche « Protection partielle contre le gel (1994) » est basé sur la connaissance historique du comportement des chaussées au Québec.
- L'évaluation des soulèvements s'**AJOUTE** à la pratique précédente et permet d'adapter la chaussée selon la gélivité des sols et le contexte hydrique.
- En mode réhabilitation, la conception est basée sur le comportement in-situ de la chaussée.







# Effet du soulèvement au gel sur la durée de vie des chaussées

Par **Olivier Sylvestre**, candidat à la maîtrise génie civil  
**Jean-Pascal Bilodeau**, ing., Ph. D.  
**Guy Doré**, ing., Ph. D.  
*Université Laval*

## 1. Introduction

Dans les régions nordiques, les mécanismes de dégradation reliés à l'action du gel induisent une augmentation notoire du taux d'endommagement des chaussées. Le gel saisonnier peut contribuer jusqu'à environ 75% de la dégradation des chaussées (Doré et al. 2005). Dans la province de Québec, des soulèvements au gel à la surface des chaussées pouvant atteindre jusqu'à 200 mm sont attribués au gonflement de la structure de chaussées et à la formation de glace de ségrégation au niveau du sol d'infrastructure (Doré 1997). À l'étape de la conception, il est difficile d'évaluer les répercussions sur la durée de vie utile des chaussées lorsque les valeurs de soulèvement théoriques sont inférieures, égales ou supérieures aux valeurs seuils admissibles établies par le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) en fonction des classes fonctionnelles de routes. Cet article présente le développement de modèles d'endommagement des chaussées flexibles qui met en relation la dégradation à long terme de l'uni, quantifiée par l'IRI (*International Roughness Index*), avec le soulèvement au gel et les divers mécanismes de dégradation des chaussées. Présentement, lorsqu'il est question de protection au gel, la méthode mécaniste-empirique proposée par le MTMDET utilise l'approche de Saarelainen-Konrad (St-Laurent 2012) pour comparer les valeurs théoriques de soulèvement au gel avec les seuils établis empiriquement. Par conséquent, les modèles développés dans le cadre de cette étude pourront être bénéfiques au stade de la conception pour évaluer les avantages ou les conséquences associés à un soulèvement au gel inférieur ou supérieur aux valeurs de seuil admissibles spécifiées par le MTMDET.

## 2. Méthodologie

Afin d'établir la relation entre la dégradation à long terme de l'IRI ( $\Delta IRI_{LT}$ , m/km·a) avec le soulèvement au gel et les mécanismes de détérioration de la chaussée, la première étape consiste à collecter des données structurales et de performance sur des chaussées en service. La base de données informatique comprend 44 sections représentatives de l'ensemble des classes de routes du réseau routier québécois. Toutes les sections retenues proviennent de la large base de données du MTMDET. Les sections recueillies comprennent des routes collectrices (19), régionales (20) ainsi que quelques routes nationales (2) et autoroutes (3). La base de données comprenait initialement plus de 50 sections, cependant

certaines sections aberrantes ont été écartées à l'aide de la distance de Cook (Cook and Douglas 1990), un outil statistique spécifique au développement de modèles de régression linéaires multiples. La deuxième étape a nécessité une analyse statistique afin d'établir un lien concret entre la détérioration à long terme de l'IRI et les différents paramètres à l'étude. Cette analyse de régression multivariée est réalisée en faisant intervenir les variables complexes indépendantes qui représentent les différents mécanismes impliqués dans la dégradation de l'uni d'une chaussée soumise à l'action du gel et à l'application répétée des charges lourdes. Comme démontré dans les travaux Hoerner et al. (1998), NCHRP 1-37A (2004) et Djonkamla et al. (2015), ces variables sont associées aux conditions climatiques et, par association, à l'action du gel et à la variabilité du sol d'infrastructure. Elles sont aussi associées aux effets du trafic, aux caractéristiques de la structure des chaussées et aux effets liés à la fissuration qui dépendent notamment de l'épaisseur du revêtement et de l'âge des sections considérées (Doré et Zubeck 2008). Par conséquent, la structure conceptuelle des deux modèles proposées est présentée à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta IRI_{LT} = x_1(\text{Variabilité des sols et Soulèvement au gel}) + x_2(\text{Trafic et Structure de la chaussée}) + x_3(\text{Fissuration}) + x_4(\text{IRI initial}) + x_5 \quad (1)$$

où chacun des  $x_i$  représente des coefficients de régression qui seront déterminés lors du développement mathématique des modèles.

## 3. Développement des modèles d'estimation

Après les manipulations sur les bases de données brutes, des outils statistiques ont permis de proposer deux modèles de régression linéaire multiple. Des variables indépendantes complexes ont été optimisées afin de maximiser la capacité prédictive des modèles proposés. Deux modèles ont été proposés, ceux-ci étant essentiellement différenciés par la façon de prendre en compte l'effet de la fissuration des chaussées sur la détérioration de l'uni. Le premier modèle utilise des mesures directes qui quantifient la fissuration de fatigue ( $IP_f$ ) et la fissuration transversale ( $IP_T$ ). Le second modèle utilise quant à lui l'épaisseur du revêtement de la chaussée et l'âge de la section pour estimer la fissuration indirectement.

Tel que présenté à la Figure 1, le premier modèle (a) qui décrit la dégradation annuelle de l'IRI est donné par

$$\Delta IRI_{LT} = -2,14 \cdot 10^{-7} \cdot IRI_0^{10} + 0,444 \cdot h^{0,14} \cdot CV_G^{0,047} + 0,292 \cdot \text{Log}(Age) + 3,21 \cdot 10^{-13} \left( \frac{\acute{E}CAS^2}{SN} \right) + 1,206 \cdot \left( \frac{|\Delta IP_F|^{0,02}}{|\Delta IP_T|^{0,005}} \right) - 2,054 \quad (2)$$

où h est le soulèvement au gel (mm),  $CV_G$  est l'indice de variabilité du sol d'infrastructure (Bilodeau et Doré 2013),  $IRI_0$  est la valeur d'IRI au début de la période considérée (m/km), l'âge est la durée de la période d'étude (années), SN est le nombre structural,  $\acute{E}CAS$  est l'équivalent de charge axiale simple d'un essieu standard annuel et les indices  $IP_F$  et  $IP_T$  (%) représentent respectivement les valeurs absolues du taux annuel de détérioration de l'indice de performance associé à la fissuration de fatigue et à la fissuration transversale.

Le second modèle (b) (Figure 1) est défini par l'équation suivante :

$$\Delta IRI_{LT} = -3,72 \cdot 10^{-7} \cdot IRI_0^{10} + 0,517 \cdot h^{0,14} \cdot CV_G^{0,047} + 0,033 \cdot \text{Log} \left( \frac{Age^{10}}{\sqrt{H_{BB}}} \right) + 3,48 \cdot 10^{-13} \cdot \left( \frac{\acute{E}CAS^2}{SN} \right) - 0,947 \quad (3)$$

où  $H_{BB}$  est l'épaisseur du revêtement en béton bitumineux (mm).

La figure 1 illustre la comparaison entre les valeurs prédites obtenues avec les deux modèles d'estimation par rapport aux valeurs mesurées.

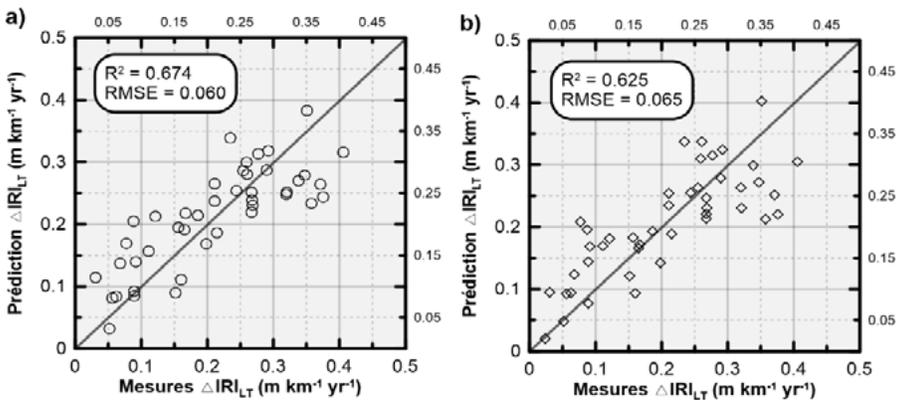


Figure 1 - Valeurs prédites en fonction des valeurs mesurées pour les deux modèles d'estimation

#### 4. Évaluation des performances des modèles

Le processus de détérioration de la condition des chaussées flexibles est un phénomène complexe qui implique de nombreux facteurs, ce qui rend difficile la modélisation. Par conséquent, les résultats obtenus pour la prédiction du taux de détérioration de l'IRI, avec des valeurs de coefficient de détermination  $R^2$  de 67,4 % et 62,5 % pour chaque modèle proposé, sont très satisfaisants en fonction de la complexité et du caractère aléatoire des phénomènes de dégradation, ainsi que des erreurs de mesure associées aux variables indépendantes. Les deux équations obtenues peuvent sembler semblables, mais comme elles considèrent différemment la contribution de la fissuration à la dégradation de l'uni des chaussées, il est suggéré de les utiliser à des fins différentes. Le premier modèle permet de calculer le taux de dégradation des chaussées en service en utilisant des indices de performance liés à la fissuration, au lieu d'utiliser l'âge et l'épaisseur du revêtement pour estimer l'évolution de la fissuration, ce qui peut être bénéfique pour déterminer la cause possible d'une dégradation accélérée du revêtement dans les régions où des enquêtes d'auscultation sont effectuées. Il est cependant difficile d'estimer les taux d'évolution des indices de performance liés à la fissuration lors de la conception d'une nouvelle route et c'est pourquoi le modèle a n'est donc pas pratique au

PLANAGE ■ PULVÉRISATION ■ STABILISATION ■ LOCATION




**DES SOLUTIONS, DES ROUTES DURABLES** Licence RBQ : 2237-5927-05

4915, rue Louis-B.-Mayer, Laval (Québec) Canada H7P 0E5 450 664-2818

Pour des économies de temps et d'argent et des techniques de pointe.

www.soter.com

stade de la conception. Le premier modèle permet également d'estimer la contribution des différents paramètres impliqués dans la dégradation des chaussées en service et, notamment, le gel. Au stade de la conception, le second modèle permet d'évaluer les avantages ou les conséquences associés à un soulèvement au gel inférieur ou supérieur aux valeurs de seuil admissibles spécifiées par le MTMDET. Cette formule répond aux besoins de l'industrie lors de la conception de routes en contexte nordique pour diverses raisons. Par exemple, pour certains sols et conditions climatiques, la méthode de calcul de la pénétration du gel utilisée par le MTMDET produit des structures de chaussées épaisses afin de respecter les seuils empiriques admissibles. Cependant, pour des raisons économiques ou dans un certain contexte (souvent urbain), des structures de chaussées plus épaisses peuvent ne pas être possibles ou pratiques. Dans ces cas, si d'autres options (telles que l'isolation des chaussées) ne sont pas possibles, les ingénieurs en conception doivent conseiller leurs clients sur les risques ou les avantages de respecter ou non les seuils admissibles de soulèvement et de déterminer l'effet sur la durée de vie des chaussées.

## 5. Conclusion

L'estimation de la dégradation à long terme de l'IRI est importante à quantifier lors de la conception des chaussées et ce, particulièrement lorsque le soulèvement au gel augmente considérablement le taux de dégradation des chaussées. Les travaux de recherche présentés dans cet article décrivent des modèles de dégradation de l'uni des chaussées développés à partir d'une analyse de régression linéaire multiple en utilisant les divers phénomènes et mécanismes de dégradation, notamment le soulèvement au gel. Il est difficile pour les ingénieurs de quantifier les avantages ou les conséquences du soulèvement au gel théorique sur la durée de vie des chaussées lorsque les valeurs calculées au stade de la conception sont inférieures, égales ou supérieures aux seuils admissibles, comme celles établies par le MTMDET selon les classifications fonctionnelles. Les résultats de ce projet permettront aux administrations routières et aux

entrepreneurs d'adapter les conceptions des chaussées soumises à l'action du gel en fonction de leurs besoins et de leurs objectifs de conception et de mieux comprendre l'effet du gel sur la détérioration de la chaussée.

## 6. Bibliographie

Bilodeau, J.-P., & Doré, G. (2013). Flexible pavement design for frost protection taking into account subgrade soils variability. Winnipeg, Manitoba: Article préparé pour la conférence annuelle de l'association des transports en 2013.

Cook, R. D., & Douglas, M. H. (1990). Unmasking Multivariate Outliers and Leverage Points. *Journal of the American Statistical Association*, 85, 640-644.

Djonkama, Y., Doré, G., & Bilodeau, J.-P. (2015). Développement d'un modèle mécaniste-empirique de prédiction de l'uni des chaussées flexibles. *GÉOQuébec* 2015, 6.

Doré, G., Drouin, P., Pierre, P., & Desrochers, P. (2005, Mai). Estimation of the Relationships of Road Deterioration to Traffic and Weather in Canada. Québec: Transport Canada.

Doré, G. (1997). *Détérioration des chaussées en conditions de gel; une nouvelle approche prévisionnelle*. Thèse de doctorat. Faculté des études supérieures, Université Laval, Québec, Canada.

Doré, G., & Zubeck, H. (2008). *Cold regions pavement engineering*. New-York: McGraw-Hill/ASCE press.

Hoerner, T. E., Darter, I., M., Khazanovich, & Titus-Glover, L. S. (2000). Improved prediction models for pcc pavement performance-related specifications. Rapport final, Federal Highway Administration, Washington, DC.

NCHRP 1-37A. (2004). Guide for mechanistic empirical pavement design of new and rehabilitated pavements. Extrait de <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/archive/mepdg/guide.htm>

St-Laurent, D. (2012). Routine Mechanistic Pavement Design against Frost Heave. *Cold Regions Engineering 2012: Sustainable Infrastructure Development*, 144-154.

**iPave**

- Un logiciel simple, flexible et intuitif
- Gérez vos matières premières, contrôle qualité, formulation et statistiques

**Venez nous visiter à la Journée Expo-Bitume!**  
Kiosque 510

**NEXSO.ca**  
TECHNOLOGIES



## ■ TSC-04 – ISOLATION DES CHAUSSEES ■ ■ ■

### 1. Isolation de la chaussée

Les couches isolantes ont pour effet de restreindre les échanges thermiques entre les couches adjacentes, ce qui a pour conséquence d'empêcher ou de réduire la propagation du gel. Les effets de l'action du gel, soit le soulèvement différentiel et la perte de portance au dégel, sont ainsi fortement réduits ou éliminés. Les performances observées sur plusieurs sections routières confirment que c'est une excellente solution de rechange aux méthodes traditionnelles de transitions utilisées pour réduire les effets du gel. Pour plus de détails sur ces méthodes traditionnelles, on peut consulter la collection Normes – Ouvrages routiers du ministère des Transports du Québec.

L'isolation est généralement limitée aux cas de soulèvements différentiels importants (caractéristiques des sols, des structures de chaussée hétérogène, blocs, tranchées transversales, etc.) ou de perte de portance au dégel. Les principaux cas où on conseille l'utilisation des techniques d'isolation sont les suivants :

- zones de déblais silteux ou argileux;
- présence d'un sol silteux ou argileux avec une gélivité ou un indice de liquidité élevé ( $I_L > 0,9$ ) à l'intérieur de la zone soumise aux cycles de gel et de dégel;
- chaussée ayant un mauvais comportement au gel;
- lorsque c'est une solution plus économique que la construction de transitions.

L'isolant doit être placé à une profondeur minimale de 450 mm mesurée à partir du dessous du revêtement bitumineux, pour réduire les risques de givrage différentiel du revêtement. Pour des raisons de sécurité liées au risque de givrage différentiel, il est nécessaire d'éviter d'entreprendre ou de terminer la mise en place d'un isolant aux endroits suivants :

- dans les zones de freinage, comme celles qui sont situées à moins de 100 m d'une intersection ou d'un passage à niveau;
- à l'intérieur d'une section en courbe incluant une longueur supplémentaire de 50 m à chaque extrémité de la courbe;
- au sommet d'une côte;
- dans les pentes abruptes.

Dans la mesure du possible, il faut poursuivre l'isolation jusqu'à une zone non gélive, comme un affleurement rocheux. Dans le cas contraire, la couche isolante doit être pourvue de transitions longitudinales, dans lesquelles on diminue progressivement l'épaisseur de l'isolant. Des transitions plus sophistiquées, comme une surexcavation en biseau de l'infrastructure, peuvent être construites dans certaines situations jugées problématiques lors de l'étude.

Tome II – Construction routière, chap. 1, section 1.7

Tome II – Construction  
routière, chap. 2,  
section 2.6  
Tome VII – Matériaux,  
chap. 14  
CCDG, art.19.9

Les caractéristiques de l'isolant à prescrire, de même que les précautions à prendre lors de la mise en oeuvre, sont décrites dans la collection Normes – Ouvrages routiers du ministère des Transports du Québec et dans le *Cahier des charges et devis généraux*. Il s'agit habituellement de panneaux de polystyrène extrudé à haute densité qu'on pose en épaisseurs de 25 à 75 mm. L'épaisseur doit être calculée de façon à fournir une protection totale de l'infrastructure contre le gel ou de façon à contrôler les soulèvements au gel en dessous d'un niveau prédéfini.

L'utilisation de produits de rechange, comme le polystyrène expansé, les résidus de bois et le béton isolant avec billes de polystyrène, peut aussi être considérée après une étude spécifique. Une vérification structurale doit également être effectuée pour s'assurer que les contraintes transmises sur l'isolant sont acceptables. Cette vérification n'est pas nécessaire avec le polystyrène normalisé (résistance en compression de 400 kPa), car dans ce cas l'épaisseur de matériaux granulaires imposée pour le critère de givrage fournit une protection adéquate.

L'utilisation d'une couche isolante doit donc faire l'objet d'une étude spécifique pour déterminer les caractéristiques des matériaux, la profondeur et l'épaisseur de la couche ainsi que pour établir le rapport coût/avantage de la technique. Le Service des chaussées peut être consulté pour déterminer les paramètres de conception.

## 2. Isolation de conduites ou d'ouvrages sous une chaussée

Les aqueducs sont généralement placés sous la ligne de pénétration maximale atteinte par le gel. Les profondeurs d'enfouissement recommandées au Québec se situent généralement entre 1,5 et 2,5 m, voire 3 m pour un indice de gel normal jusqu'à 1800 °C-jours, selon l'endroit et les caractéristiques du site (type de sol, teneurs en eau, etc.).

L'isolation thermique est nécessaire pour les conduites transportant de l'eau qui sont exposées à des températures inférieures à 0 °C. Ce type d'intervention est généralement requis pour des raisons d'économie, lorsqu'on abaisse le profil de la chaussée, lorsqu'on se retrouve en présence de roc, de risques de contamination ou d'autres obstacles ou contraintes empêchant l'excavation jusqu'à une profondeur hors d'atteinte du gel, ou encore lorsqu'on doit protéger de courts secteurs de conduites existantes sous la chaussée. Il peut également être nécessaire d'isoler certaines conduites d'égout pluvial ou certains ponceaux susceptibles d'amener le gel vers des conduites d'égout et d'aqueduc. Les conduites peuvent être isolées à l'aide de panneaux de polystyrène; certaines conduites sont aussi vendues sous forme pré-isolée. Les propriétés que doit avoir l'isolant sont décrites dans la collection Normes – Ouvrages routiers du ministère des Transports du Québec.

Dans le cas d'un ponceau à grand diamètre ( $d \geq 1$  m), on doit s'assurer qu'au moins le milieu de la conduite soit sous la ligne de gel, afin d'éviter son soulèvement. Une conduite placée légèrement au-dessus de la ligne de gel peut ne pas geler grâce à l'énergie provenant du transport de l'eau, mais des problèmes peuvent survenir si le débit est interrompu durant l'hiver.

### 2.1 Dimensionnement de l'isolation d'une conduite

La conception décrite dans la présente section vise à empêcher le gel d'atteindre la conduite, et ne couvre pas les travaux visant à atténuer d'éventuels problèmes de soulèvements dus au gel.

Tome VII – Matériaux,  
chap. 14

a) Épaisseur de l'isolant au-dessus d'une conduite

L'épaisseur de l'isolant thermique qui doit être installé dépend de la rigueur des hivers, des propriétés des matériaux (sols et chaussée), du type d'isolant et de la géométrie du problème.

La rigueur de l'hiver est prise en considération à l'aide de l'indice de gel normal. L'indice de gel normal ( $I_{g_n}$ ) varie en fonction de la région du Québec, et il peut être obtenu en se référant à la collection Normes – Ouvrages routiers du ministère des Transports du Québec. On peut également obtenir des valeurs précises auprès du ministère de l'Environnement, ou encore en utilisant le logiciel « Chaussée », disponible dans le site intranet de la Direction du Laboratoire des chaussées et dans le Internet du MTQ.

L'indice de gel normal représente une valeur moyenne calculée sur une période donnée. Pour les calculs d'isolation, on utilise habituellement une valeur majorée afin de tenir compte des hivers plus froids que la moyenne. À cette fin, on introduit dans le calcul l'indice de gel rigoureux ( $I_{g_r}$ ), calculé de façon à représenter un hiver correspondant à la moyenne des trois hivers les plus froids au cours d'une période de trente ans consécutifs.

$$I_g \approx I_{g_r} = 1,143 I_{g_n} + 220 \quad (\text{éq. 1})$$

Les courbes de la figure 1 permettent d'évaluer la résistance thermique requise en fonction de la profondeur de pénétration du gel acceptable (sable-gravier) sous l'isolant, ce qui correspond à la profondeur de la conduite mesurée à partir de la base de l'isolant. Cette résistance thermique (valeur RSI) est exprimée en  $m^2 \cdot ^\circ C/W$  et la valeur entre parenthèses indique l'épaisseur correspondante, en mm, pour l'isolant décrit dans la collection Normes – Ouvrages routiers du ministère des Transports du Québec ( $0,86 m^2 \cdot ^\circ C/W$  par 25 mm d'épaisseur).

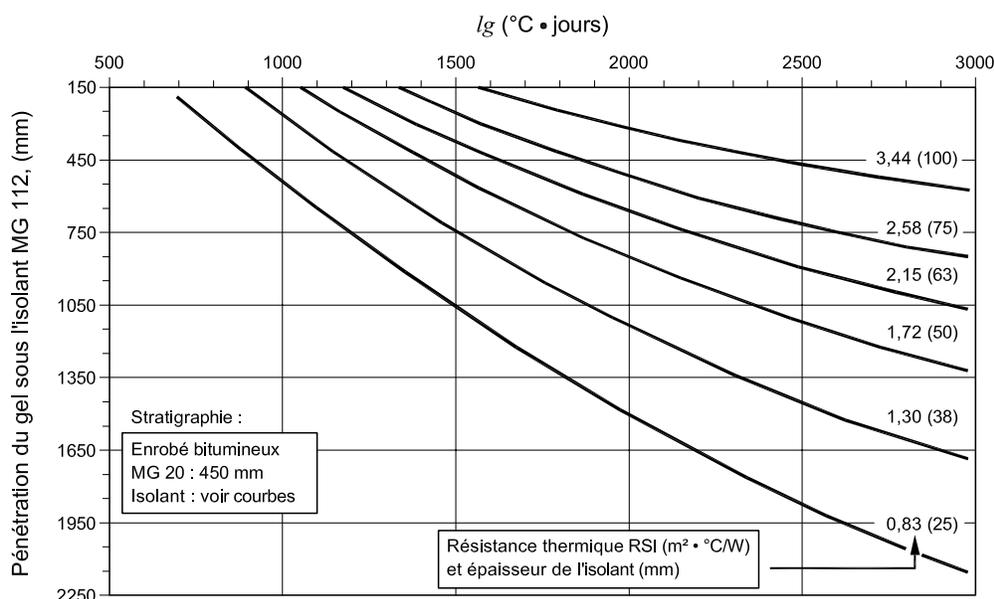


Figure 1 – Pénétration du gel dans une chaussée isolée

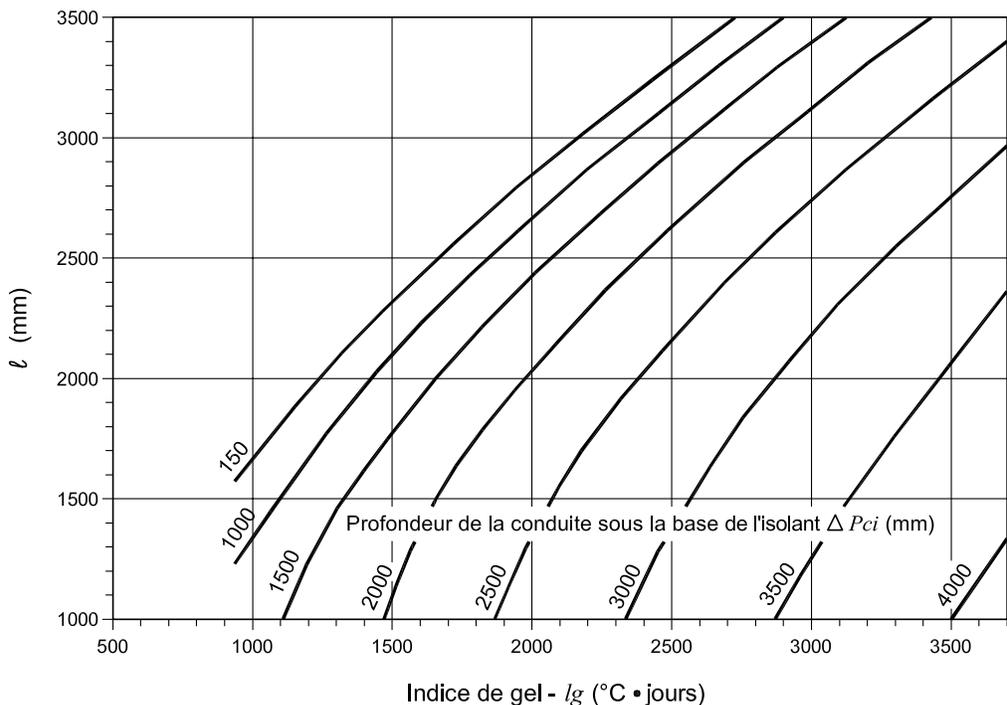
Tome II – Construction routière, chap. 1, fig. 1.7-1  
 Logiciel « Chaussée »  
<http://www.dlc/>  
<http://www.mtq.gouv.qc.ca>

Tome VII – Matériaux, chap. 14, norme 14301

La pénétration du gel indiquée (figure 1 et équation 2) n'est précise qu'en présence d'un matériau granulaire sablonneux; les calculs ont été réalisés pour un cas type comportant un MG 112 (masse volumique sèche de 1,95 tonnes/m<sup>3</sup> et teneur en eau de 11 %) sous la couche isolante. La pénétration du gel serait moindre dans le cas d'un matériau plus humide ou moins dense, et plus profonde en présence d'un matériau plus sec ou plus dense.

**b) Largeur de l'isolant de part et d'autre d'une conduite**

Lorsqu'on isole une conduite pour la protéger du gel, un excédent d'isolation doit être prévu de chaque côté afin d'éviter que le gel ne contourne l'isolant. La largeur de cet excédent ( $\ell$ ) peut être déterminée selon la figure 2.



Note : calcul fait pour un isolant à 600 mm de la surface.

**Figure 2 – Excédent d'isolation requis de part et d'autre d'une conduite**

Lorsque la profondeur de l'isolant est supérieure à 600 mm, il est possible de réaliser un calcul plus précis de cet excédent à l'aide de l'équation suivante :

$$\ell \geq \sqrt{(P_g - P_i)^2 - \Delta P_{ci}^2} \quad (\text{éq. 2})$$

où  $P_g$  : pénétration du gel dans les fondations granulaires (mm)

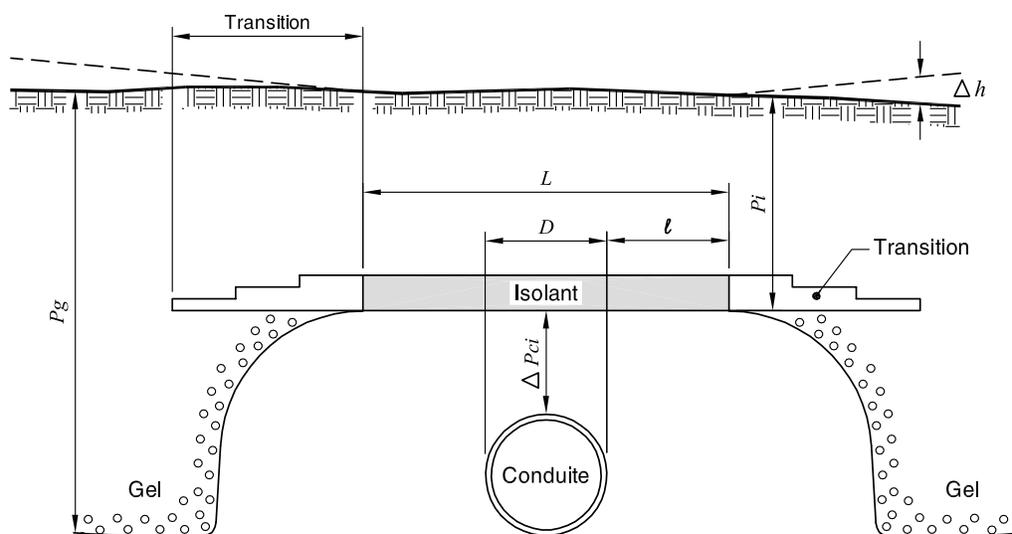
$$P_g = 89\sqrt{I_g} - 545 \approx 88\sqrt{I_{gn}}$$

$P_i$  : profondeur d'installation de l'isolant, mesurée entre la surface et la base de l'isolant (mm)

$\Delta P_{ci}$  : distance entre l'isolant et la conduite (minimum 150 mm)

La position de l'isolant par rapport à la conduite est indiquée sur la figure 3. Connaissant le diamètre extérieur de la conduite ( $D$ ), la largeur horizontale à isoler ( $L$ ) sera :

$$L = D + 2\ell \quad (\text{éq. 3})$$



Note : transitions requises si le surlèvement différentiel est supérieur à 20 mm ( $\Delta h > 20$  mm).

Figure 3 – Isolation d'une conduite (couche horizontale)

Il est aussi possible de réduire la largeur de la tranchée requise en adoptant une isolation en U renversé, comme le montre la figure 4. Dans ce cas,  $l$  est décomposé en  $l_1$  et  $l_2$  et le périmètre ( $L$ ) de cette protection doit être supérieur ou égal à  $D+2(l_1 + l_2)$ , à moins qu'on enrobe entièrement la conduite avec l'isolant. La base de ce U renversé doit être au moins aussi profonde que le dessous de la conduite.

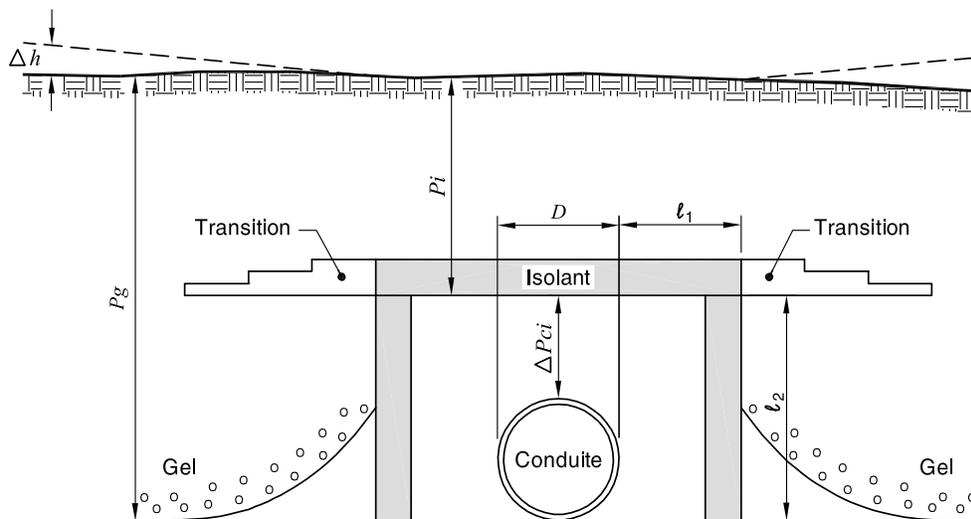


Figure 4 – Isolation d'une conduite (U renversé)

où  $l = l_1 + l_2$

$l$  satisfait l'équation 2 :  $l \geq \sqrt{(P_g - P_i)^2 - \Delta P_{ci}^2}$

$P_i + l_2 \geq P_i + \Delta P_{ci} + D$

**c) Transitions de l'isolant**

L'isolation à l'intérieur d'une structure de chaussée élimine ou réduit de façon importante le soulèvement de la surface sous l'effet du gel. Il est fréquent que le soulèvement dû au gel de la partie non isolée altère le confort de roulement lors du passage d'une zone isolée à non isolée (soulèvement différentiel). L'isolation d'une conduite peut donc causer ou accentuer des problèmes de soulèvements différentiels si le sol sous-jacent a tendance à gonfler sous l'effet du gel.

Pour y remédier, des transitions doivent être aménagées, comme il est indiqué dans la collection Normes – Ouvrages routiers du ministère des Transports du Québec, à moins que le soulèvement différentiel prévu soit inférieur à 20 mm. Dans le cas d'une réfection de chaussée, ce soulèvement peut être déterminé en comparant la mesure précise de l'élévation de la surface en été ou en automne avec la même mesure, prise exactement au même endroit vers la fin de l'hiver, avant le début du dégel. On peut aussi prendre en considération le soulèvement théorique calculé ou anticipé à partir de la connaissance du site des travaux, de la stratigraphie des couches et des propriétés des matériaux.

Le devis normalisé *Travaux de construction – Clauses techniques générales – Conduites d'eau et égouts* peut être consulté pour obtenir plus de détails sur les conditions de mise en place de l'isolant et les accessoires à utiliser. Le Service des chaussées peut également être consulté pour déterminer les paramètres de conception de l'isolation des chaussées et des conduites.

Tome II – Construction  
routière, chap. 2, section 2.6

NQ 1809-300



**Prise en compte du givrage  
dans la conception des chaussées  
comprenant un isolant thermique**

**PROBLÉMATIQUE**

L'isolation thermique est une technique utilisée par le ministère des Transports du Québec (MTQ) depuis le début des années 70. Cette technique permet de réduire la détérioration des chaussées sous l'effet du gel des sols d'infrastructures. Par contre, le refroidissement de surface plus intense consécutif à la mise en place d'un isolant favorise, dans certaines conditions climatiques, la formation et le dépôt de givrage différentiel. Le terme « givrage différentiel » désigne la formation de givre ou de gelée blanche à la surface des sections isolées alors que la surface des sections adjacentes sans isolant demeure sèche. Il est connu que plus l'isolant est placé profondément sous la surface, plus le risque de givrage différentiel est faible. La couche de matériaux granulaires placée sur l'isolant sert de tampon thermique avant que le gel n'atteigne l'isolant (*Info DLC*, vol. 5, n°11, novembre 2000). La pratique du MTQ de placer une couche de 450 mm de matériaux granulaires MG-20 sur la couche isolante (1) est étendue à l'ensemble du territoire québécois.

L'objectif de cette étude est de développer une approche régionale de conception de la couche de protection granulaire pour réduire au minimum le risque de formation de givrage différentiel sur les chaussées comportant un isolant thermique. Elle permettra d'améliorer la norme sur l'isolation (1).

**MÉTHODOLOGIE**

À partir d'une étude du givrage différentiel sur le terrain et d'une étude paramétrique effectuée à l'aide du logiciel de calcul thermique VERGLAS (2), une analyse régionale du risque de formation de givrage différentiel a été réalisée pour huit villes du territoire québécois (figure 1). Cette analyse a permis de constater que la température de surface d'une chaussée comportant un isolant thermique diminue progressivement par rapport à une chaussée sans isolant seulement après que l'isotherme 0 °C (front de gel) eut pénétré dans la couche isolante. L'analyse a également permis d'observer que la période où le risque de givrage différentiel est le plus élevé se situe à la fin de l'automne, la durée de cette période variant en fonction du climat régional. Pour réduire au minimum le risque de formation de givrage différentiel, la couche de protection granulaire doit donc être suffisamment épaisse pour que le gel ne pénètre la couche isolante qu'après la fin de la période à risque élevé. La conception régionale de l'épaisseur de la protection granulaire à l'aide de VERGLAS s'appuie aussi sur le temps nécessaire au gel pour pénétrer dans la couche isolante (3).

**RÉSULTATS**

Une série d'abaques de conception a été produite afin de déterminer l'épaisseur minimale ( $e_{MG-20}$ ) de la couche de protection granulaire nécessaire à la réduction du risque de givrage différentiel (figures 2 à 5). L'abaque adéquat est choisi en fonction de la conductivité thermique de la pierre de fondation  $k_s$  (tableau 1). L'épaisseur  $e_{MG-20}$  est obtenue en reportant la valeur de la température moyenne annuelle  $T_{ma}$  de la région étudiée sur la droite correspondant à l'épaisseur de la couche isolante  $e_{iso}$  utilisée sur le site (figure 4). Cette méthode est applicable à toutes les régions du Québec en utilisant la température moyenne annuelle ( $T_{ma}$ ). Par exemple, à Québec ( $T_{ma} = 4$  °C), avec une fondation en pierre granitique ( $k_s = 2,5$  W/m °C), il est requis d'étendre une couche de 430 mm de MG-20 au-dessus de l'isolant. Le  $T_{ma}$  varie généralement entre 0,9 °C (Sept-Îles) et 6,1 °C (Montréal). Une correction de  $e_{MG-20}$  en fonction de la teneur en eau peut aussi être faite lorsque la teneur en eau anticipée dans la fondation est différente de 3,5 % ( $w_f$  = teneur en eau massique dans la fondation) :

$$e_{MG-20(w)} = (1,16 - 0,044w_f) \times e_{MG-20(abaque)} - 52 \ln w_f + 66 \quad [\text{mm}]$$

**CONCLUSION**

Il est possible de dimensionner une chaussée comprenant un isolant thermique en tenant compte du climat régional afin de réduire le risque de formation de givrage différentiel. Cette méthode est plus économique au sud du Québec et plus sécuritaire au nord du Québec que celle qui consiste à placer 450 mm de MG-20 sur la couche isolante dans l'ensemble du territoire de la province. Elle permet d'élargir le domaine d'application des isolants thermiques.

**NOTE :** Ces travaux ont été réalisés par Jean Côté, Ph.D. attaché de recherche au Département de génie civil de l'Université Laval.

**RÉFÉRENCES**

- (1) Ministère des Transports du Québec, Tome II, Construction routière, chapitre 1 « Terrassement », Les Publications du Québec, Québec, 1995, 13 pages (collection Normes-Ouvrages routiers).
- (2) Côté, J. et J.M. Konrad, « A field study of hoarfrost formation on insulated pavement », *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 39, 2002, p. 547-560.
- (3) Côté, J. et J.M. Konrad, Une nouvelle approche régionale de conception des chaussées avec isolant thermique tenant compte

**RESPONSABLE :** Yves Savard, ing. M.Sc.  
Service des chaussées

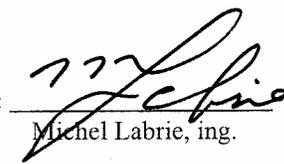
**DIRECTEUR :**   
Michel Labrie, ing.



Figure 1 : Villes du territoire couvert par l'étude

| Matériaux         | $\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ] | $k_s$ [W/m°C] |
|-------------------|-------------------------------|---------------|
| argile et silt    | 2,75                          | 2,8           |
| basalte           | 2,9                           | 1,7           |
| calcaire          | 2,7                           | 2,5           |
| dolomie           | 2,9                           | 3,8           |
| gneiss            | 2,75                          | 2,6           |
| gneiss granitique | 2,75                          | 2,5           |
| granite           | 2,75                          | 2,5           |
| grès dur          | 2,8                           | 2,5           |
| grès mou          | 2,1                           | 1,0           |
| marbre            | 2,8                           | 3,2           |
| schiste           | 2,65                          | <1,5          |
| shale             | 2,65                          | 2,0           |
| tourbe            | 1,3                           | 0,25          |
| trapp rock        | 2,9                           | 2,0           |

Tableau 1 : Conductivité thermique moyenne des particules solides des pierres et de certains sols

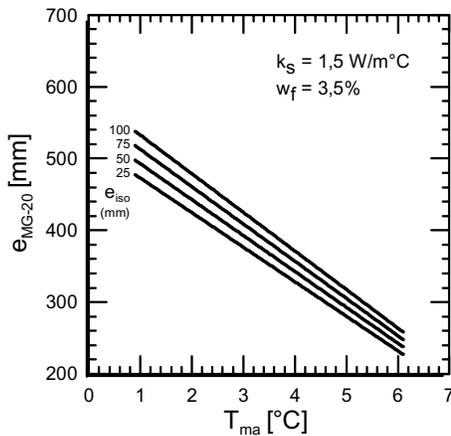


Figure 2 : Abaque de conception pour  $k_s = 1,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

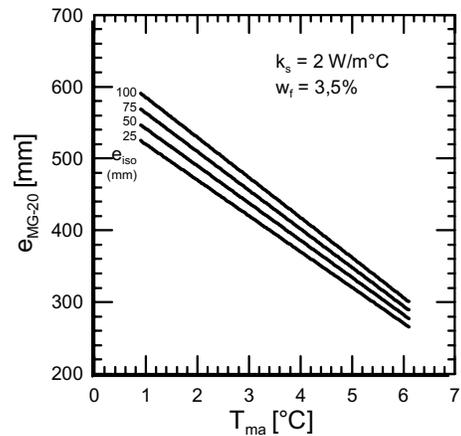


Figure 3 : Abaque de conception pour  $k_s = 2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

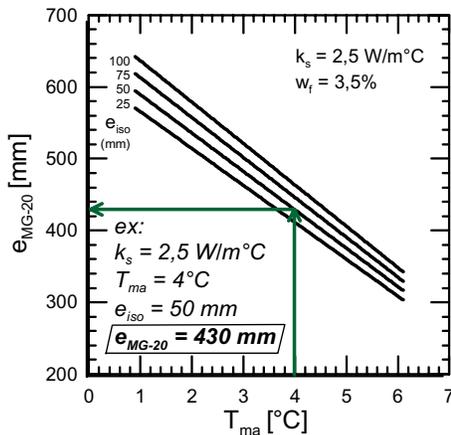


Figure 4 : Abaque de conception pour  $k_s = 2,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

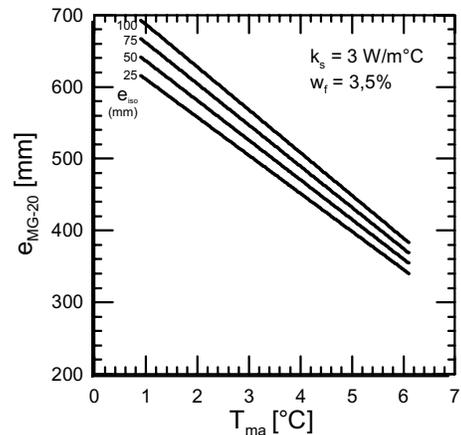


Figure 5 : Abaque de conception pour  $k_s = 3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$



## Dimensionnement structural des chaussées souples

Traitement du climat



## Traitement du climat

- Températures
- Indices de gels
- Variabilité et récurrence
- Transfert de chaleur à la surface

**Climat**  
Station météorologique

St-Célestin Choisir

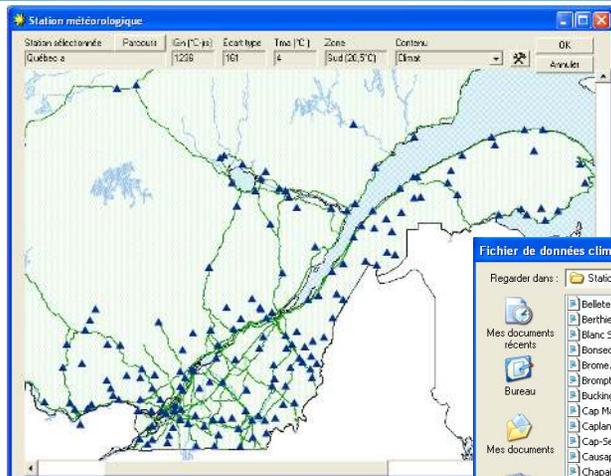
|      |                 |                 |                 |                 |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Zone | T <sub>BB</sub> | T <sub>ma</sub> | IG <sub>n</sub> | σ <sub>IG</sub> |
| Sud  | 20.5            | 5.5             | 1056            | 218             |

Simulation: Hiver 1999 PR IG

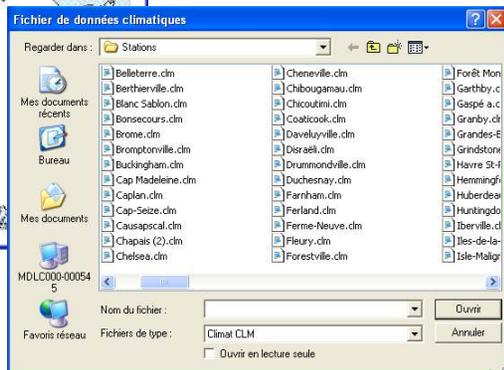
|     |                 |
|-----|-----------------|
| n   | IG <sub>s</sub> |
| 1.0 | 688             |

**CHAUSSEE**

## Choisir une station météorologique



- Sur la carte
- Sur le disque dur



## Environnement Canada

<http://climat.meteo.gc.ca/>

QUEBEC/JEAN LEBEAUC L'VTL  
QUÉBEC :

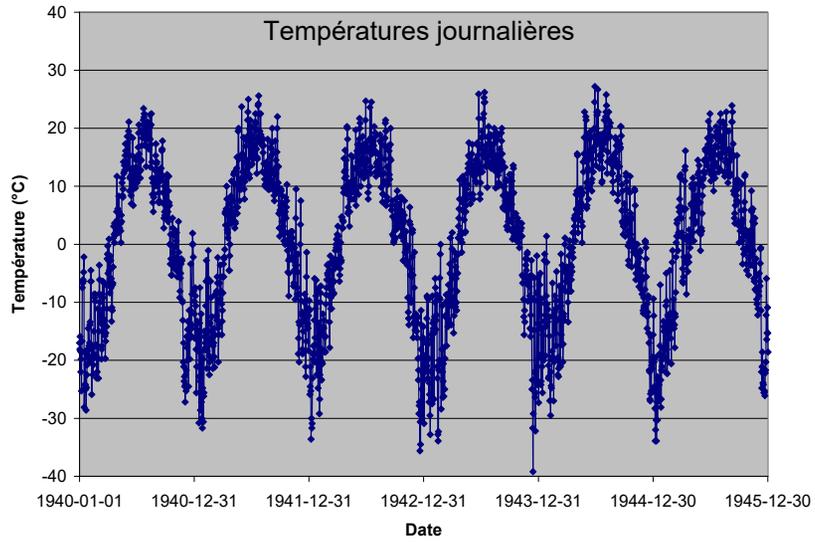
|                               |                           |                        |
|-------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Latitude: 46°41' 11.1"        | Longitude: -71°22'46.111" | Altitude: 91.11m       |
| Identification Climat: 413110 | Identification OSM: 41714 | Identification IG: 455 |

Les plus basses températures sur 10 jours :

|    | Temp. max. °C | Temp. min. °C | Temp. moy. °C | D20  | D25 | Pluie tot. mm | Neige tot. cm | Précip. tot. mm | Vitesse au sol cm | Dir. rat. 10's deg | Vit. rat. max. km/h |
|----|---------------|---------------|---------------|------|-----|---------------|---------------|-----------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| 21 | -4.0          | -10.0         | -6.5          | 20.5 | 0.0 | 0             | 0             | 0.0             | 0                 | 22                 | 41                  |
| 22 | -4.1          | -10.0         | -7.0          | 20.0 | 0.0 | 0             | 0             | 0.0             | 0                 | 20                 | 41                  |
| 23 | -4.1          | -10.3         | -6.5          | 18.5 | 0.0 | 0             | 0             | 0.4             | 4                 | 0                  | 33                  |
| 24 | -5.5          | -11.3         | -7.0          | 21.0 | 0.0 | 0             | 0             | 15.0            | 1                 | 6                  | 41                  |
| 25 | -4.3          | -13.7         | -4.0          | 13.0 | 0.0 | 0             | 0             | 0.7             | 13                | 27                 | 34                  |
| 26 | -             | -19.4         | -             | 0    | 0   | 0             | 0             | 0               | 15                | 0                  | 0                   |
| 27 | -             | -             | -             | 0    | 0   | 0             | 0             | 0               | 0                 | 0                  | 0                   |
| 28 | -6.0          | -13.0         | -4.5          | 15.5 | 0.0 | 0             | 0             | 1.2             | 10                | 0                  | 0                   |
| 29 | -7.0          | -18.0         | -3.1          | 11.1 | 0.0 | 0             | 0             | 3.0             | 0                 | 20                 | 33                  |
| 30 | -0.4          | -18.0         | -4.5          | 17.5 | 0.0 | 0             | 0             | 1.1             | 0                 | 27                 | 41                  |
| 31 | -6.7          | -10.3         | -4.5          | 15.5 | 0.0 | 0             | 0             | 1.8             | 0                 | 0                  | 0                   |



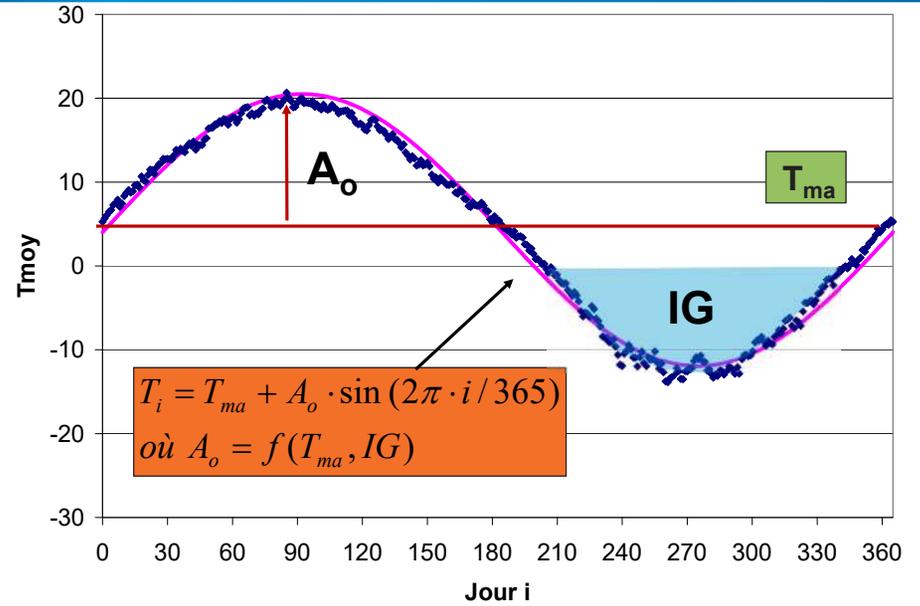
# Températures atmosphérique (Amos)



123

# Modèle sinusoidal

(Aéroport de Québec, moyennes de 1944 à 1995)

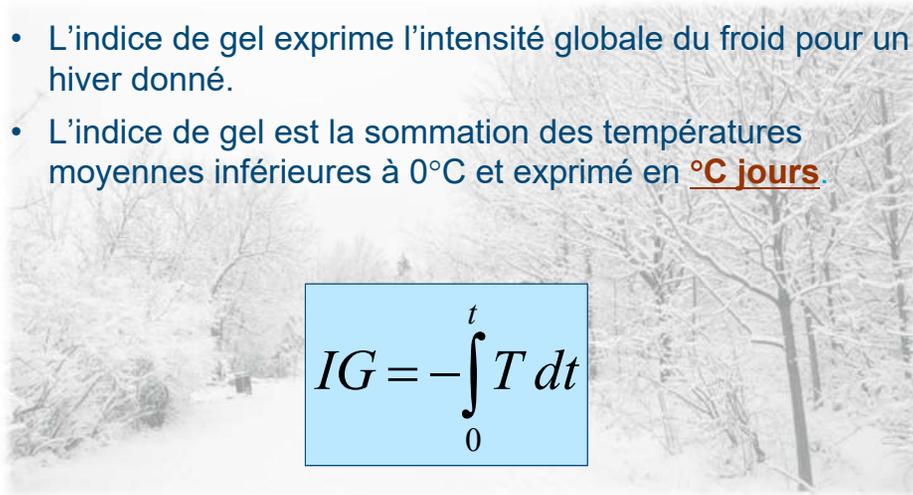


124

# Caractérisation d'un hiver - Indice de gel (IG)

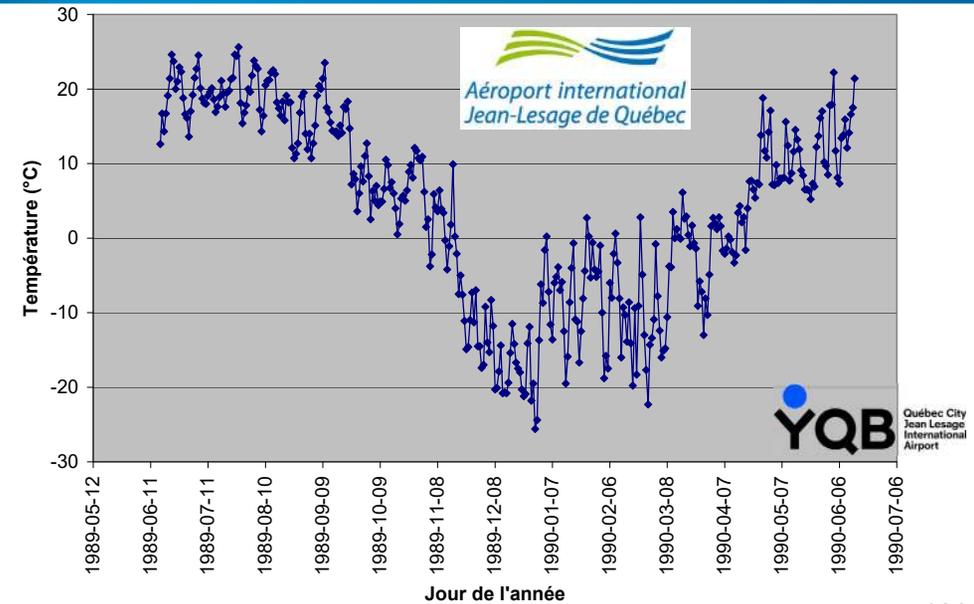
- L'indice de gel exprime l'intensité globale du froid pour un hiver donné.
- L'indice de gel est la sommation des températures moyennes inférieures à 0°C et exprimé en **°C jours**.

$$IG = -\int_0^t T dt$$



125

# Calcul d'un indice de gel (1)



126

# Calcul d'un indice de gel (2)

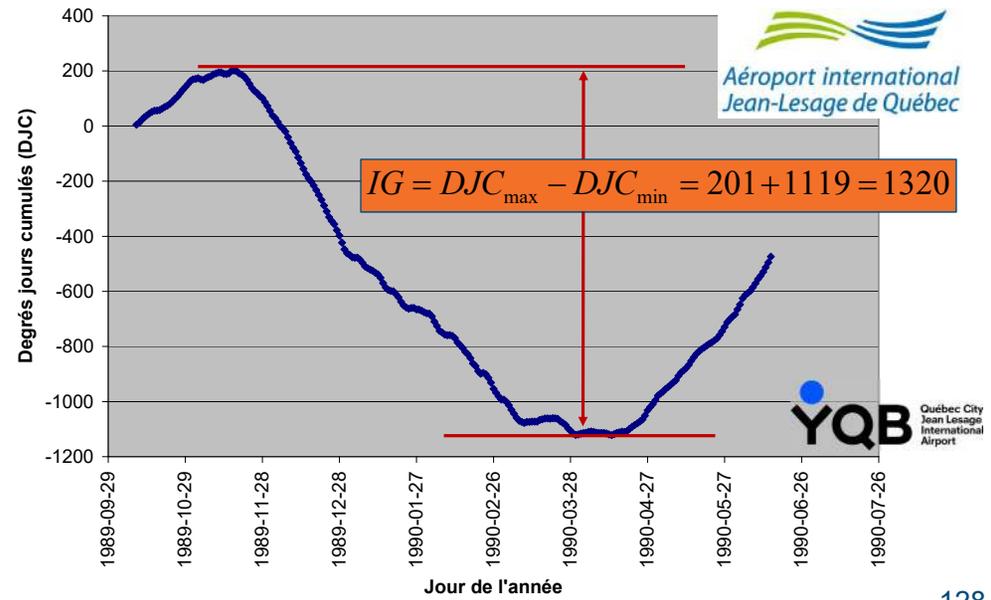
Degrés-jours cumulés

|     | B          | D    | E     |
|-----|------------|------|-------|
| 4   | Date       | T    | DJC   |
| 717 | 1998-12-14 | -1.1 | -1.1  |
| 718 | 1998-12-15 | 2.6  | 1.5   |
| 719 | 1998-12-16 | 0.7  | 2.1   |
| 720 | 1998-12-17 | -1.6 | 0.6   |
| 721 | 1998-12-18 | -7.6 | -7.0  |
| 722 | 1998-12-19 | -6.2 | -13.2 |
| 723 | 1998-12-20 | -7.0 | -20.2 |
| 724 | 1998-12-21 | -4.2 | -24.4 |
| 725 | 1998-12-22 | -6.0 | -30.4 |
| 726 | 1998-12-23 | 11.2 | -19.2 |

$$DJC_i = DJC_{i-1} + T_i$$

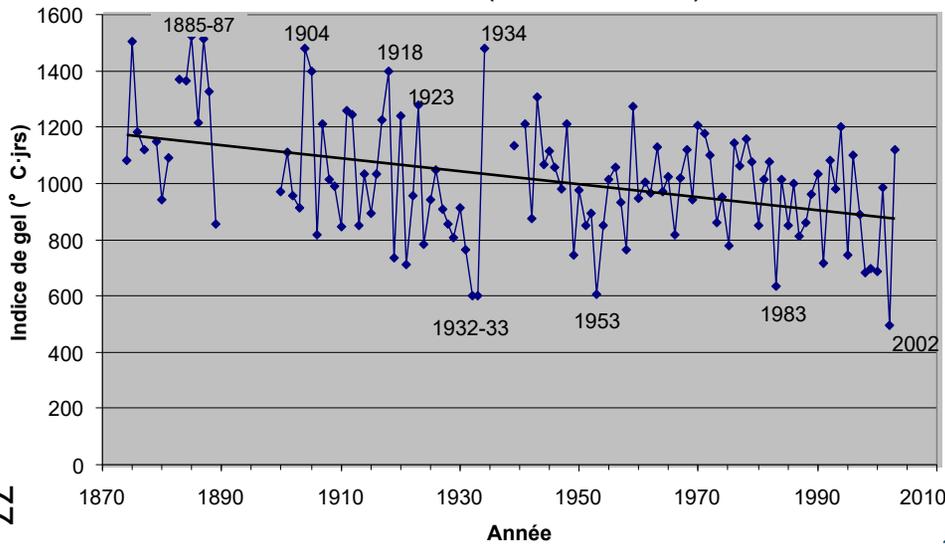


# Calcul d'un indice de gel (3)



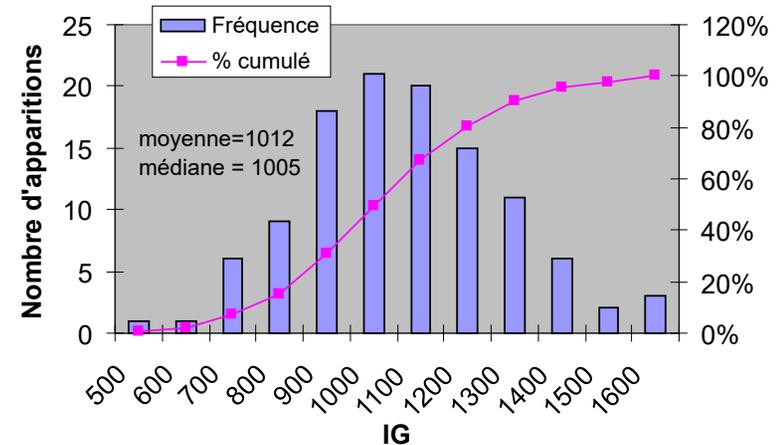
# Fluctuation des indices de gel

Ottawa (1874 à 2003)



# Variabilité aléatoire de l'IG

Distribution des indices de gel à Ottawa (1874 à 2003)



Distribution presque normale pouvant se représenter par une moyenne et un écart type

## Distribution normale - Tableau statistique standard

| R (%) | Z <sub>R</sub> |            | R (%)                           | Z <sub>R</sub> |            |        |
|-------|----------------|------------|---------------------------------|----------------|------------|--------|
| 50    | 0              | aux 2 ans  | 93                              | -1.476         | aux 20 ans |        |
| 60    | -0.253         |            | 94                              | -1.555         |            |        |
| 66    | -0.412         | aux 3 ans  | 95                              | -1.645         |            |        |
| 70    | -0.524         |            | 96                              | -1.751         |            |        |
| 75    | -0.674         |            | 97                              | -1.881         |            |        |
| 80    | -0.841         | aux 10 ans | 98                              | -2.054         |            |        |
| 85    | -1.037         |            | 99                              | -2.327         |            |        |
| 90    | -1.282         |            | 99.9                            | -3.090         |            |        |
| 91    | -1.340         |            | aux 100 ans<br>(aux 1000 ans !) | 99.99          |            | -3.750 |
| 92    | -1.405         |            |                                 |                |            |        |

Période de récurrence (PR) => R(%)

131

## Conventions d'indices de gel

- IG<sub>1990</sub>: valeur de l'hiver 1990 (hiver quelconque)
- IG<sub>n</sub>: valeur normale (moyenne)
- σ<sub>IG</sub>: écart type
- IG : valeur retenue pour analyse ou conception
  - On peut choisir une approche probabiliste, la période de récurrence (PR) permet de déterminer le nombre d'écart type à ajouter au IG<sub>n</sub>
    - PR = 1 fois aux **2** ans → IG = IG<sub>n</sub>
    - PR = 1 fois aux **10** ans → IG = IG<sub>n</sub> + 1,282 σ
- IGs : valeur transmise à la surface

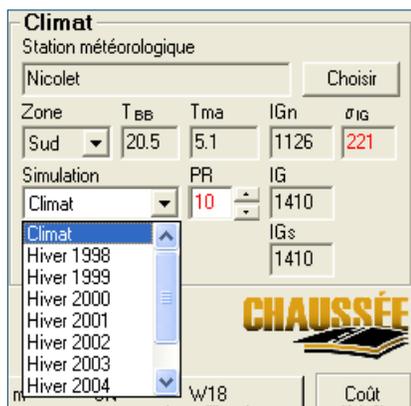
132

## Contrôle climatique - Fichier CLM

```

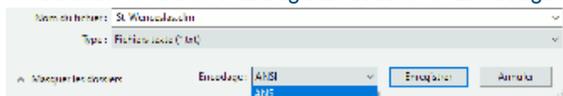
Nicolet.clm - Bloc...
Fichier Edition Format Affichage ?
[climat]
Station=7025440
IGN=1126
Tma=5.1
Latitude=46.2
Longitude=72.617
Elevation=30.4
ZoneBB=Sud
TBB=20.5

[Hiver 1998]
DateDebut = 1997/11/11
>Table: Températures
>Heures C
24 1.0
24 -3.5
24 -5.0
24 -7.5
24 -2.5
24 -3.5
24 -2.5
24 -5.0
24 -0.5
24 0.5
24 1.5
24 -4.0
24 -3.0
24 -2.5
24 -6.5
24 0.5
24 -6.5
24 -11.5
24 -8.5
24 -9.0
24 -4.0
24 -2.5
24 -6.0
24 -6.0
24 -1.5
24 -1.5
24 0.0
24 -9.0
    
```



Bloc-notes, depuis Windows 10.1903 :

- Nouvel encodage par défaut **UTF-8 incompatible**
- Solution : Fichier → Enregistrer sous... → Encodage: **ANSI**



133

## Conclusion

- L'utilisateur doit choisir la station météorologique la plus représentative.
- Le logiciel propose ensuite toutes les valeurs par défaut, incluant une période de récurrence sécuritaire pour la conception.
- L'utilisateur peut intervenir selon le contexte et le but de la simulation.
  - Il peut même alimenter sa base de données climatique.



134

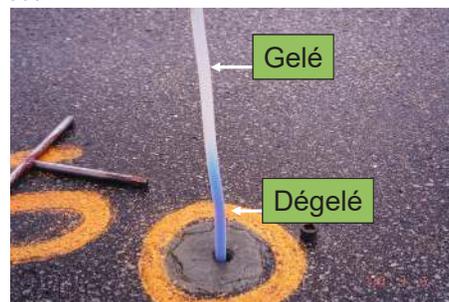


## Dimensionnement structural des chaussées souples

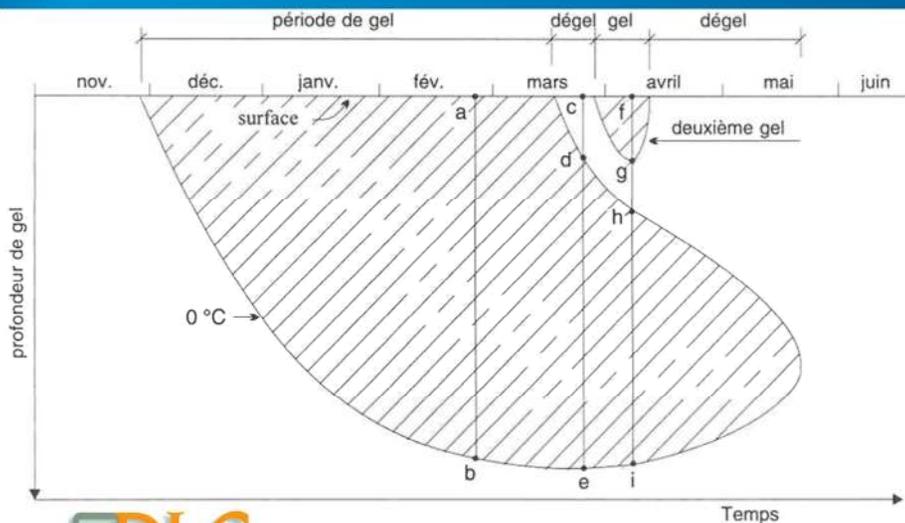
Modélisation thermique



## Gelmètres (tubes de gel)

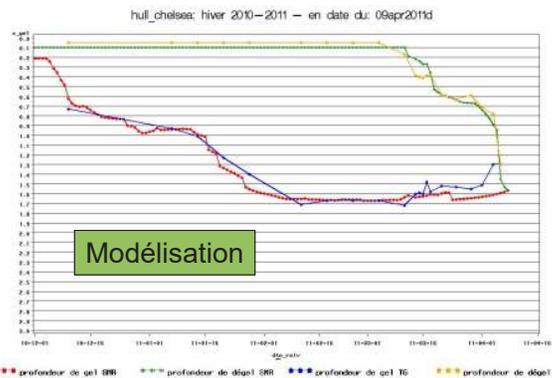


## Courbe de gel



## Remplacement des TG par des Station Météo Routière (SMR)

- Plus de 50 SMR en fonction
- Depuis 2015: 100% du réseau de TG à été délaissés
- Hiver 2015 – 2016: Suivi gel/dégel automatisée à 100 % avec SMR



## But de la modélisation

- A partir du climat en surface, il s'agit de **prédire** la propagation du gel, et ses effets, à l'intérieur de la chaussée
  - **Profondeur de gel (isotherme 0° C)**
  - **Soulèvement au gel**
- Ces réponses pourront ensuite servir au dimensionnement



139

## Introduction

- Pour chaque segment homogène, et chaque variante envisagée, l'utilisateur doit spécifier
  - Les objectifs (type de route → soulèvement admissible)
  - Le climat
  - Le type de sol
  - Les matériaux constituant chaque couche
  - Les épaisseurs
- Valeurs par défaut pour le reste
  - À remplacer avec les données disponibles

140

## Modèle de calcul (référence détaillée)

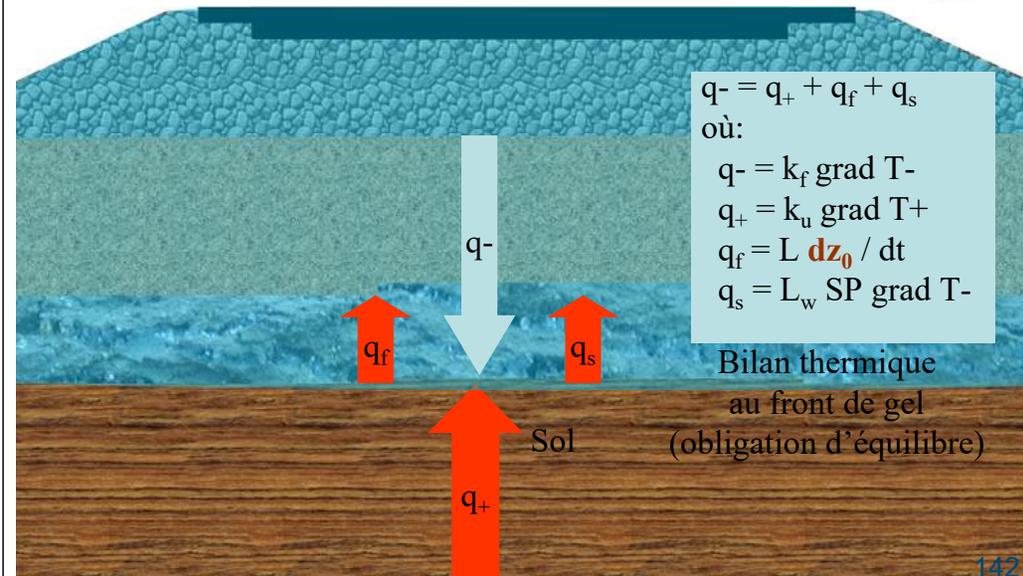
Saarelainen, Seppo (1992)

« Modelling frost heaving and frost penetration in soils at some observation sites in Finland. **The SSR model** » Espoo 1992, VTT, VTT publications 95, Technical research centre of Finland, 120 p.



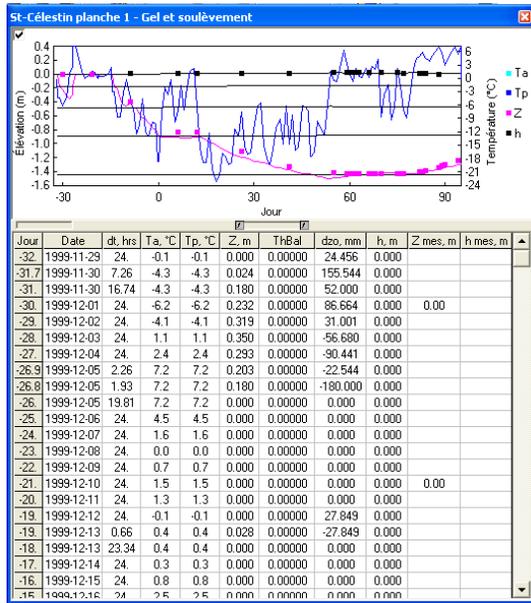
141

## Pénétration du gel et soulèvement



142

# Résultante avec bilan thermique résolu pour chaque jour de l'hiver



$dz_o$  tel que  
 $\sum q = 0$   
 (ThBal = 0)

# Pénétration du gel (Z)

- Facteurs influençant la pénétration du gel dans le sol
  - Températures à la surface
  - Chaleur emmagasinée dans le sol
  - Sols et matériaux
    - Conductivité thermique (kf et ku = gelé et non-gelé)
    - Chaleur latente de fusion de l'eau (Lf)
      - eau interstitielle en changement de phase :  $w_g = w - w_u$
      - eau de ségrégation (pompage pour la formation des lentilles de glace) :  $\Delta Vw = SP \text{ grad } T \cdot dt$
    - (Capacité calorifique)

# Conductivité thermique (K, W/m° C)

- Air: 0,024
- Polystyrène: 0,03-0,06
- Bitume: 0,17
- Mat organique: 0,25
- Eau: 0,60
- Glace: 2,24
- Granite, calcaire: 2,5
- Quartzite: 5
- Quartz: 7,69
- Acier: 46
- Le mélange dans un sol dépend de la
  - Composition
  - Compaction
  - Humidité
  - Granularité
  - Minéralogie
  - Température du sol

Tableau 11 : Variables et constantes associées aux constituants des matériaux

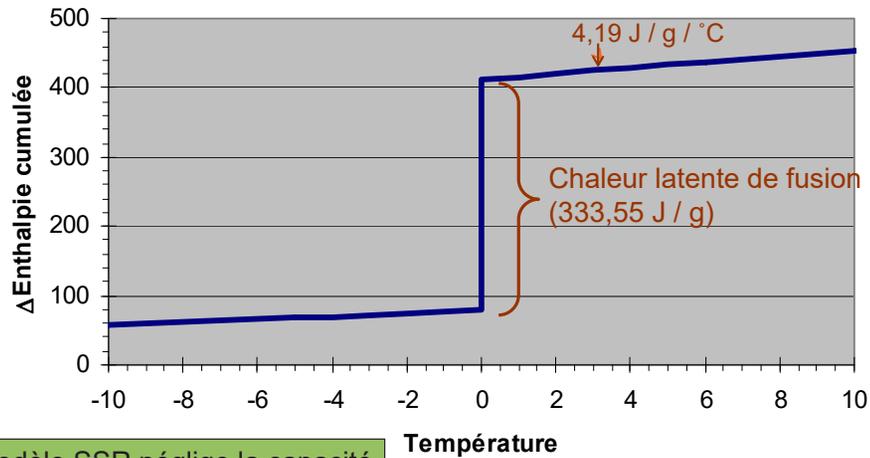
|                 | solides  | bitume          | eau          | glace                    | air          |
|-----------------|----------|-----------------|--------------|--------------------------|--------------|
| Masse volumique | $\rho_s$ | $\rho_b = 1,02$ | $\rho_w = 1$ | $\rho_i = \rho_w / 1,09$ | $\rho_a = 0$ |
| Proportion      | $\rho_d$ |                 | wu           | wf                       | n(1-Sr)      |
|                 | 1-n      | Vbe             |              |                          |              |

# Conductivité thermique (K, W/m° C)

- Références détaillées
  - Côté et Konrad (2005) "Thermal conductivity of base-course materials" Canadian Geotechnical Journal 42, pages 61-78
  - Côté et Konrad (2005) "A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials" Canadian Geotechnical Journal 42, pages 443-458



### Courbe enthalpie - température (eau pure)



Le modèle SSR néglige la capacité thermique, mais la chaleur latente y est un paramètre majeur.

147

- Dans certaines circonstances, la profondeur de gel peut servir directement de critère de dimensionnement
  - Conduite d'utilité publique
  - Recherche d'une protection totale (ou partielle)
- Dans les autres cas, le soulèvement constitue un indicateur de performance plus rationnel.

148



## Dimensionnement structural des chaussées souples

Le potentiel de ségrégation des sols



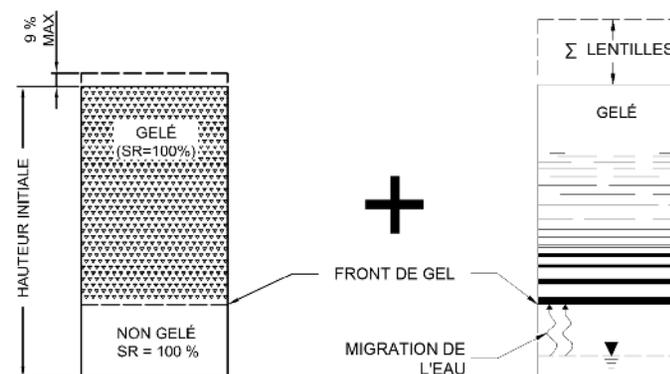
## Soulèvement au gel

Le soulèvement au gel est causé par :

Expansion volumétrique de l'eau en glace (9%)

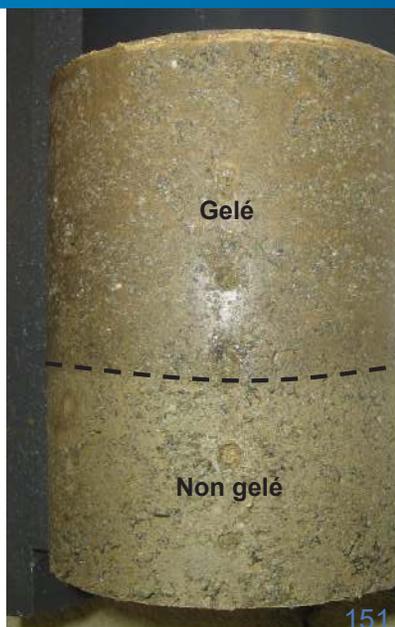
+

Formation de lentilles de glace



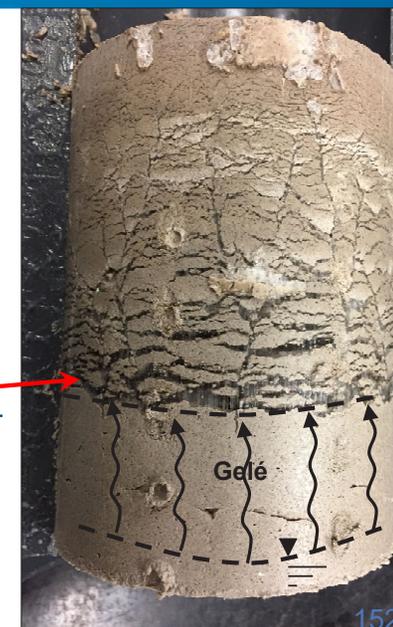
## Sol non gélif

- SP, SW, GM-GC, Pierre concassée, MG112
- Succion faible
- Peu de variation de la teneur en eau
- Gèle en bloc
- Gonflement léger (9 % lorsque saturé à 100 %)



## Sol gélif

- ML, CL, SC, SM, CH
- Capillaire et peu perméable, sans être trop imperméable
- Potentiel de soulèvement dépend de:
  - Granulométrie
  - Teneur en fines (< 80 µm)
  - Teneur en vide
  - Degré de saturation
  - Minéralogie des fines
  - Surcharge (poids des terres)
- Formation de lentilles de glace (suction - augmentation de teneur en eau)
- Gonflement élevé (jusqu'à 20 cm et +)



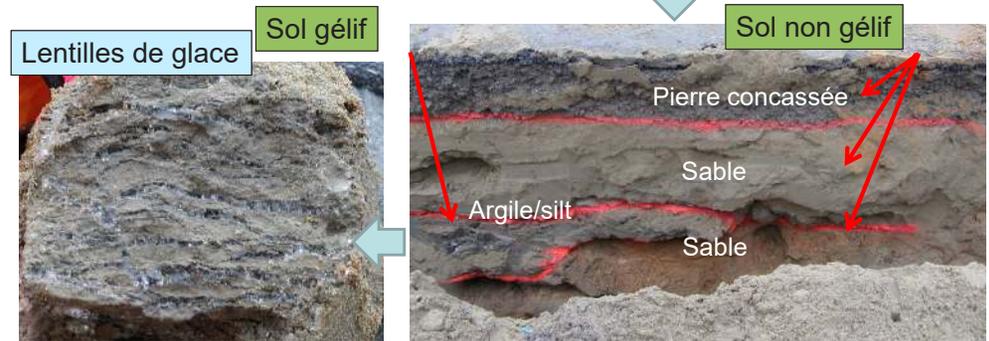
## Trois conditions requises

- Températures inférieures au point de congélation
- Source d'approvisionnement en eau
- Un sol gélif



Absence d'une condition = ↓ soulèvement

## Exemple de gélivité des sols



## Potentiel de ségrégation (SP)

$$\text{Vitesse d'écoulement} = \frac{\text{Vitesse de soulèvement}}{1,09}$$

$$SP = \frac{(dh/dt)}{1,09 \cdot \text{grad } T_f}$$

dh/dt = taux de soulèvement (mm/h)  
 grad T<sub>f</sub> = gradient thermique dans la frange gelée (° C/mm)  
 1,09 = Expansion volumétrique de l'eau en glace

## Soulèvement au gel

- Soulèvement interstitiel (d<sub>ho</sub>)
  - EAU + FROID
    - L'eau gonfle de 9% lorsqu'elle se transforme en glace
    - Affecte modérément les sols saturés
- Soulèvement de ségrégation (d<sub>hs</sub>)
  - EAU + FROID + GÉLIVITÉ
    - Succion d'eau vers le front de gel → formation et croissance de lentilles de glace
    - Soulèvement peut être important (> 150 mm)

$$h = \sum (d_{ho} + d_{hs})$$

## Détermination du SP

- **Ordre 1 – Mesure directe ou indirecte**
  - A) Essai de gel en laboratoire (LC 22-331)
  - B) Mesure in situ (Z et h)  
Étalonner modèle par calculs inverses
- **Ordre 2 – Corrélations empiriques**
  - A) Sédimentométrie, surface spécifique ( $S_s$ ) et  $w/w_L$  (Konrad, 2005)
  - B) Sédimentométrie et  $w_L$  (Rieke 1983 and Knutsson 1985)
- **Ordre 3 – Appréciation qualitative**  
Estimation selon la granulométrie et la classification des sols

9

157

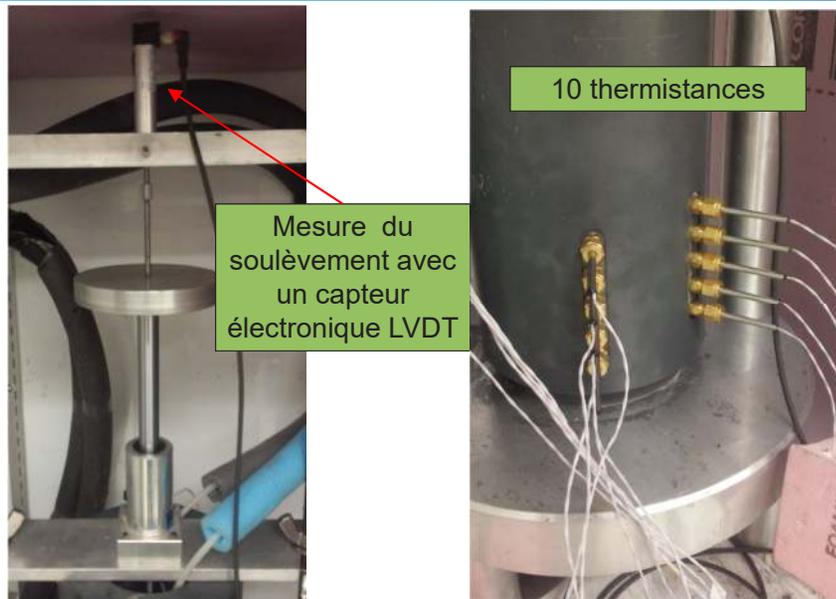
## Ordre 1A : Essai de gel

- Laboratoire central (LC 22-331)
  - Échantillon remanié ou non
  - Gradient thermique constant
  - Surcharge simulant le poids de la chaussée
  - Alimentation en eau
  - Durée de 2 à 4 semaines
- Résultats : SP ou SP<sub>0</sub>

INFLU  
DLC  
Vol. 7 , n° 2, 2002



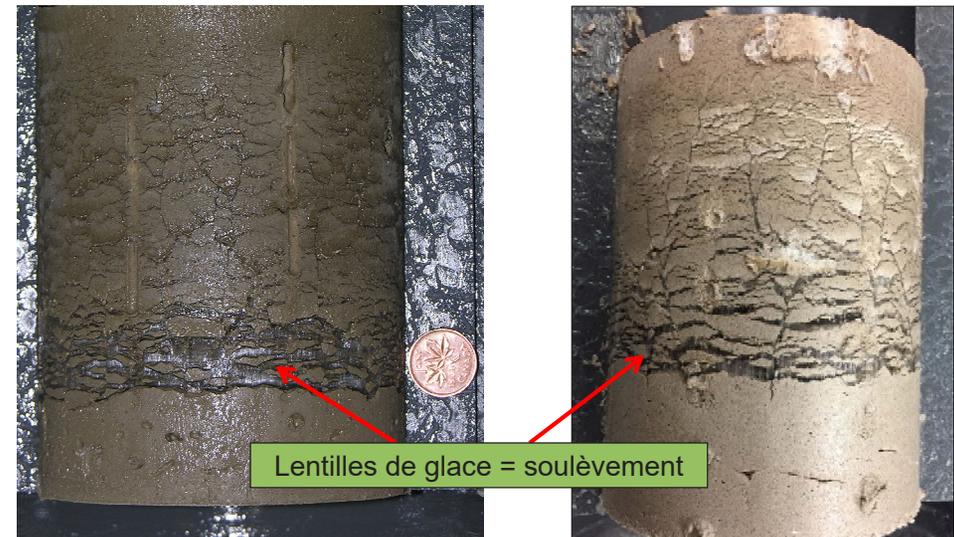
## Ordre 1A : Essai de gel



85  
11

159

## Ordre 1A : Essai de gel



12

160

# Effet de la surcharge

La pression de confinement d'un sol peut s'opposer à son soulèvement:

$$SP = SP_0 \cdot e^{-a \cdot \sigma}$$

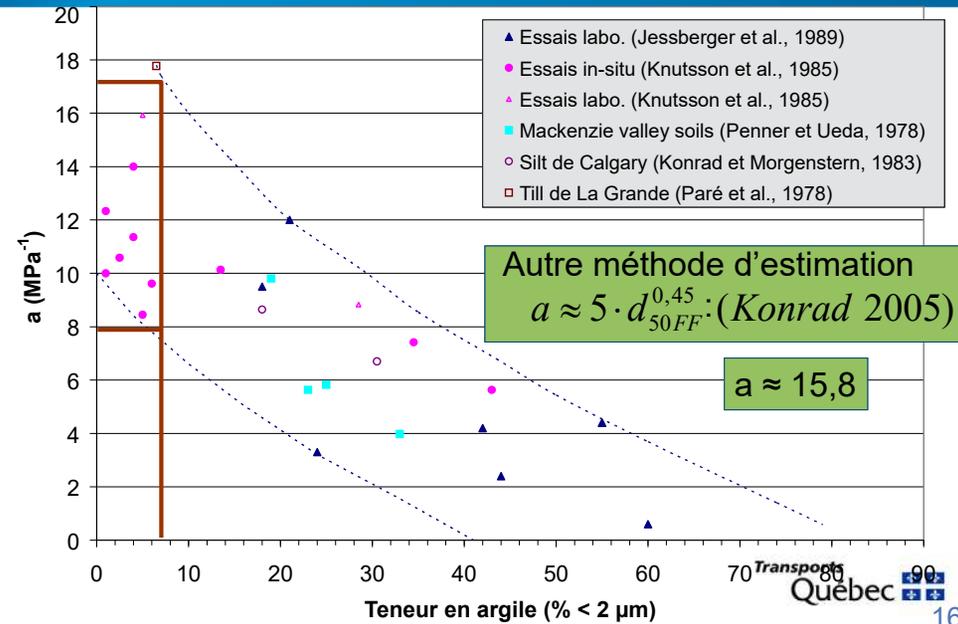
Avec :

$SP_0$  = gélimité sans surcharge

$a$  = coefficient de sensibilité à la surcharge (1/MPa)

$\sigma$  est la pression opposée au soulèvement (MPa)  
(poids des terres au dessus du front de gel)

# Coefficient de surcharge (a)



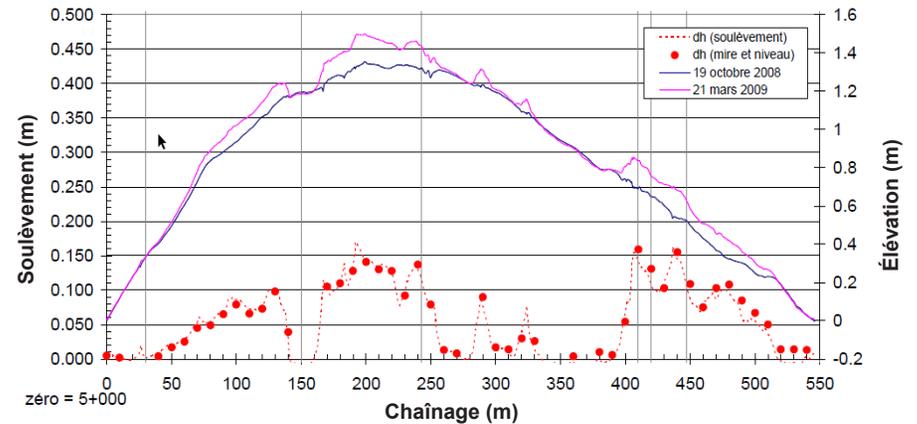
# Ordre 1B : Mesure in situ

Mesure des élévations – Hiver et été



# Ordre 1B : Mesure in situ

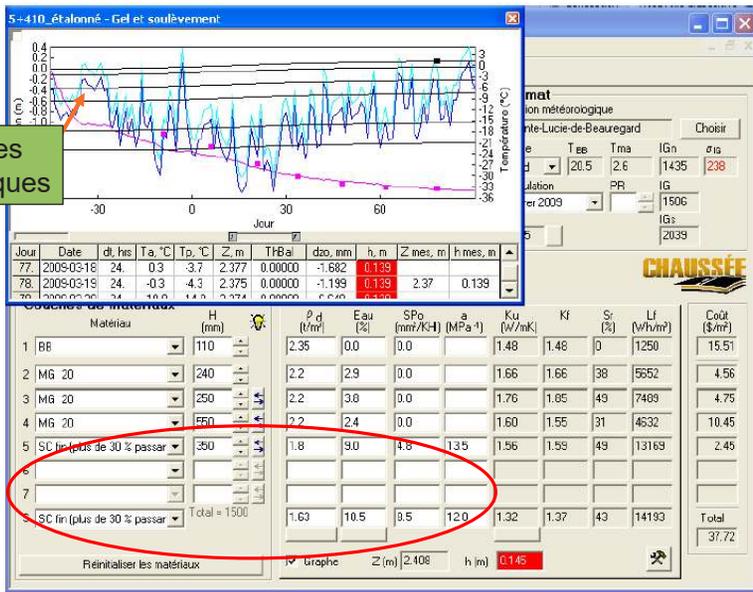
Mesure des élévations – Hiver et été



Soulèvements → Délimitation et  $\Delta h$  max

## Ordre 1B : Mesure in situ

Données climatiques

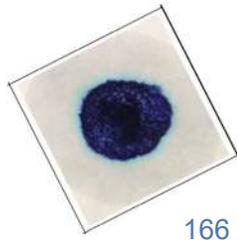


17

165

## Ordre 2 : Corrélations empiriques

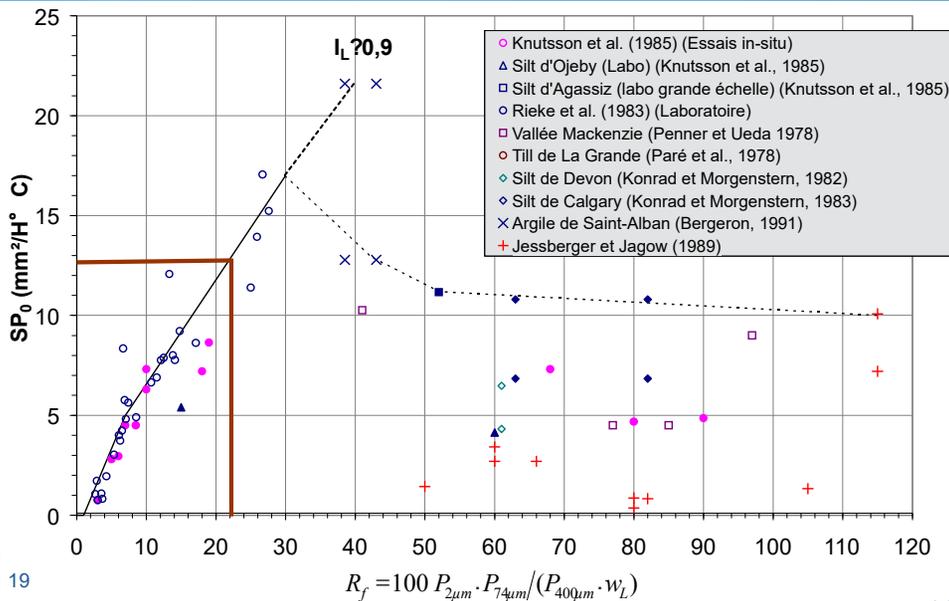
- Caractérisation physique (requiert des sondages):
  - Analyse granulométrique par tamisage et sédimentation (BNQ 2501-025)
  - Valeur au bleu de méthylène –fraction passant le tamis de 400µm (LC 21-255)
  - Limites d'Atterberg (CAN/BNQ 2501-092)
  - Teneur en eau naturelle (CAN/BNQ 2501-170)



18

166

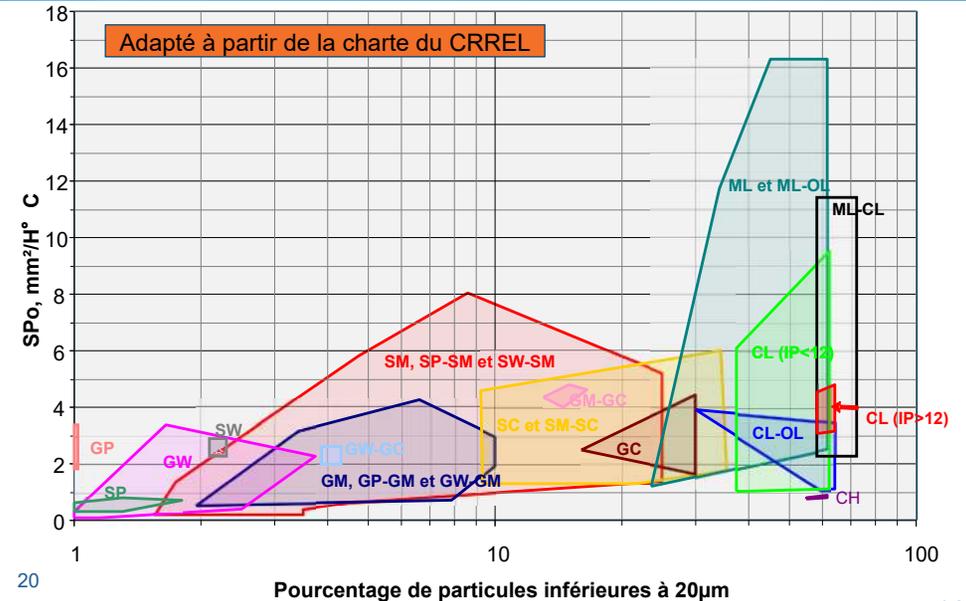
## Ordre 2 : Méthode de Rieke



87  
19

167

## Ordre 3 : Appréciation qualitative



20

168

## Échelle de gélimité (indicatif)

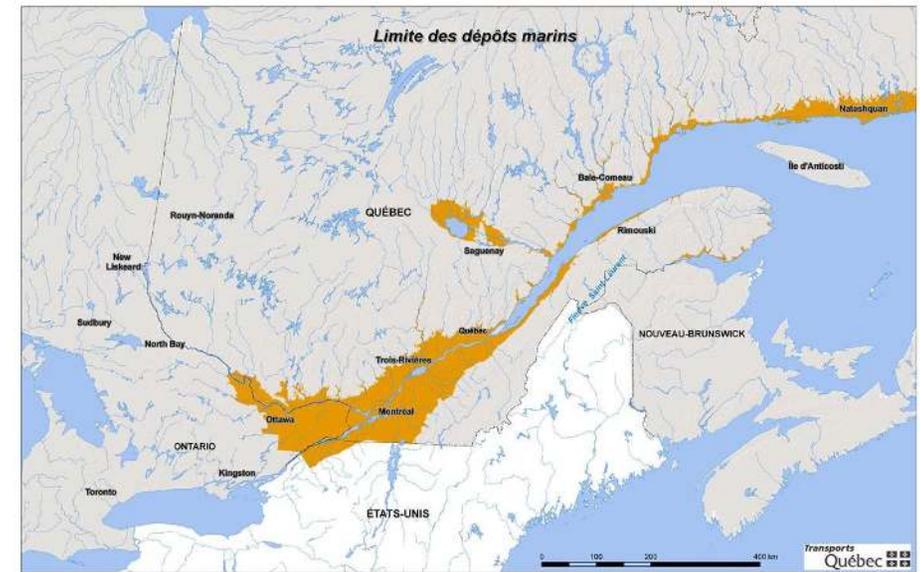
| Gélimité    | SP<br>mm <sup>2</sup> /°C·h |
|-------------|-----------------------------|
| Négligeable | < 0,5                       |
| Faible      | 0,5 à 1,5                   |
| Modérée     | 1,5 à 3,0                   |
| Élevée      | 3,0 à 8,0                   |
| Très élevée | > 8,0                       |

Note : mm<sup>2</sup>/°C·h = mm<sup>2</sup>/K·h

$$dhs = 1,09 SP grad T_ dt$$

21

## Dépôts argileux de la mer Champlain



22

170

## Sols avec $I_L > 0,9$

- Sols argileux compressibles et gorgés d'eau ( $w > w_L$ )
- Caractéristiques correspondantes à des sols qui n'ont jamais subi de gel
- Sols fréquents au Québec sous les déblais argileux, sous la croûte de surface.
  - Premier gel =  $\Delta h$  important ( $SP_o \approx 16-20$ )
  - Premier Dégel = tassement important
    - $\approx 30\%$  sous 25 kPa
    - $I_L$  diminue
    - SP diminue lors des cycles suivants

Croûte  
 $I_L < 0,9$

Intact  
 $I_L > 0,9$



171

## Déblai argileux $IL > 0,9$ (piste cyclable)



24

172

## SP: Points importants



- Pour les sols « gélifs »
  - Évaluer les propriétés in situ → *calcul à rebours avec le logiciel*
  - Estimation à partir d'essais en laboratoire
    - S'assurer de la représentativité de l'échantillon
    - Comparer avec les conditions de terrain
    - Horizon susceptible de geler
    - Teneur en eau
    - Évaluer les effets sur le dimensionnement en comparant avec les valeurs par défaut



## PROBLÉMATIQUE

La formation de lentilles de glace dans les sols d'infrastructure peut entraîner un soulèvement de la surface d'une chaussée. En période de dégel, la fonte de ces lentilles peut entraîner une perte de la capacité portante et un tassement du sol. La gélivité d'un sol, ou sa susceptibilité au gel, est appréciée par le potentiel de ségrégation SP, qui peut être déterminé selon trois méthodes différentes.

## PROCÉDURE D'ESSAI SP

L'Université Laval (1) a mis au point un essai permettant de mesurer la susceptibilité au gel des sols d'infrastructure et, ainsi, de prévoir les soulèvements. Le ministère des Transports du Québec (MTQ) a acquis une cellule de gel et élaboré une procédure d'essai semblables simulant le gel dans un sol. Le paramètre mesuré, le potentiel de ségrégation SP ( $\text{mm}^2/^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ ), traduit la réaction du sol à une sollicitation thermique. Il s'agit du rapport entre le taux de soulèvement du sol et le gradient thermique dans le sol gelé près de l'isotherme  $0^\circ\text{C}$  lorsque le front de gel devient quasistationnaire. Le soulèvement est dû, d'une part, à l'apport d'eau interstitielle qui migre vers un front de ségrégation (à quelques dixièmes de degré sous  $0^\circ\text{C}$ ) pour former une lentille de glace et, d'autre part, à la variation de volume de 9 % à l'occasion de la transformation de l'eau en glace. Le taux de soulèvement du sol est alors égal à  $1,09'v$ , où  $v$  représente la vitesse de l'écoulement de l'eau de migration.

Une éprouvette de sol saturé de 10 cm de diamètre sur 12 cm de hauteur est placée dans une enceinte à  $2^\circ\text{C}$ . Elle est soumise à une température de  $-4^\circ\text{C}$  à son sommet et à  $+1^\circ\text{C}$  à sa base. L'évolution de la température est mesurée à différentes élévations au moyen de thermistances, et le soulèvement est mesuré au sommet de l'éprouvette au moyen d'un capteur de déplacement. Ces données permettent de déterminer en tout temps la profondeur du front de gel. Les résultats présentés dans les figures ci-jointes proviennent d'un échantillon du site expérimental de Saint-Célestin (2). Le SP est calculé au point A (figure 1) au moment où le front de gel est quasistationnaire (à 20 heures dans le cas présent). À ce point, la tangente à la courbe de soulèvement en fonction du temps (figure 2) donne la valeur du taux de soulèvement ( $82,5 \times 10^{-3} \text{ mm/h}$ ). Le profil de température mesuré dans l'échantillon à 20 heures permet quant à lui de calculer le gradient de température ( $32,5 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/mm}$ ) en déterminant la pente

de la température en fonction de la profondeur dans la partie gelée de l'échantillon (figure 3). Le potentiel de ségrégation obtenu en appliquant le rapport indiqué plus haut est de  $2,5 \text{ mm}^2/^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ .

Les valeurs du SP déterminées au moyen de l'essai de laboratoire (1<sup>re</sup> méthode) sont généralement plus élevées que celles déterminées directement en chantier (2<sup>e</sup> méthode) à partir des soulèvements *in situ* (3). En effet, l'essai favorise la formation de lentilles de glace, ce qui crée un soulèvement plus important que sur le terrain.

L'essai SP peut durer une semaine; on peut toutefois l'arrêter dans la journée qui suit le début de l'essai, après que le front de gel soit devenu stationnaire.

## ESTIMATION EMPIRIQUE DU SP

Le SP peut aussi être estimé au moyen d'une corrélation empirique (3<sup>e</sup> méthode) à partir de la dimension des particules fines, de la teneur en eau, de la limite de liquidité et, depuis plus récemment (4), de la valeur au bleu de méthylène. La fiabilité de l'estimation s'améliore au fur et à mesure que la banque de données s'enrichit de nouveaux résultats d'essais. Cette estimation est utilisée pour des études courantes pour lesquelles on ne dispose pas de résultat de laboratoire ou de mesure de soulèvement *in situ*.

## UTILISATION DU SP POUR LE DIMENSIONNEMENT DE CHAUSSÉES

Le soulèvement au gel d'une chaussée construite sur un sol d'infrastructure caractérisé par une valeur de SP peut être pris en compte dans le dimensionnement d'une chaussée neuve ou réhabilitée. Le calcul consiste à simuler le soulèvement en fonction du SP, de l'indice de gel caractéristique et de la résistance thermique des couches composant la structure de la chaussée. La structure retenue doit satisfaire les exigences structurale et thermique. L'exigence thermique peut, entre autres choses, être exprimée en fonction du soulèvement maximal admissible. L'expérience actuelle indique que le comportement d'une chaussée est jugé acceptable lorsque le soulèvement n'excède pas 50 ou 60 mm. Le calcul peut se faire suivant diverses approches empiriques, analytiques ou numériques, incluant la méthode des éléments finis. Ces simulations peuvent être faites à rebours pour déterminer *in situ* la valeur SP de l'infrastructure d'une chaussée existante (2<sup>e</sup> méthode) lorsque celle-ci est instrumentée au moyen de tubes de gel et de repères de soulèvement.

## CRITÈRE DE GÉLIVITÉ

Le phénomène du gel dans les sols est complexe à décrire. Il a fait l'objet de nombreuses publications. La migration de l'eau interstitielle vers le front de gel et la formation de lentilles de glace qui s'ensuit sont les causes physiques les plus évidentes du soulèvement de la surface. Les effets du gel et la susceptibilité des sols au gel sont pris en compte différemment selon les organisations. Le MTQ calcule une épaisseur minimale de structure de chaussée en fonction de l'indice de gel, du type de route et du type de sol afin d'assurer une protection partielle (sol homogène) ou totale (sol hétérogène ou gélif). Les critères de gélivité les plus utilisés sont fondés sur la granulométrie ou les limites d'Atterberg. Une nouvelle échelle ou un nouveau critère de gélivité d'un sol associé au comportement de la chaussée québécoise est proposé dans le tableau suivant. L'indice de soulèvement est le rapport entre le soulèvement mesuré *in situ* et l'épaisseur de sol gelé en place.

| Susceptibilité au gel | Potentiel de ségrégation SP ( $\text{mm}^2/^\circ\text{C} \times \text{h}$ ) | Indice de soulèvement |
|-----------------------|--|-----------------------|
| Négligeable           | < 0,5  | < 0,01                |
| Faible                | de 0,5 à 1,5   | de 0,01 à 0,04        |
| Moyenne               | de 1,5 à 3   | de 0,04 à 0,08        |
| Élevée                | de 3 à 8   | de 0,08 à 0,2         |
| Très élevée           | > 8  | > 0,2                 |

## CONCLUSION

Le potentiel de ségrégation SP, qui caractérise la susceptibilité des sols au gel, est de plus en plus utilisé pour le dimensionnement des chaussées. Il l'était auparavant de manière empirique; sa

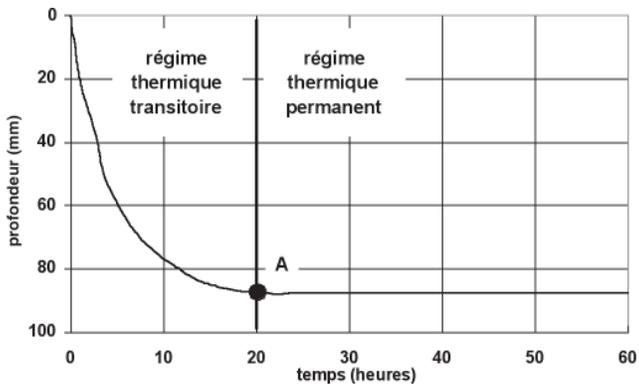


Figure 1 : Évolution de la profondeur du front de gel

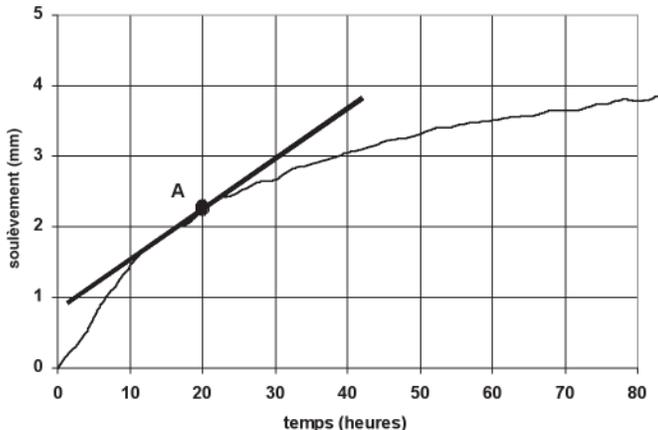


Figure 2 : Taux de soulèvement

détermination en laboratoire permet maintenant de trouver une valeur plus représentative du soulèvement de la surface de la chaussée et de mieux apprécier la gélivité d'un sol d'infrastructure.

**Note :** Le présent bulletin et les travaux de laboratoire ont été réalisés en partenariat avec Jean-Marie Konrad, professeur à l'Université Laval, à Québec.

## RÉFÉRENCES

- (1) Konrad, J.-M. 2000, « Assessment of Subgrade Frost Susceptibility from Soil Index Properties », *Recueil des communications*, 9<sup>th</sup> International Symposium on Ground Freezing, Louvain-La-Neuve, Belgique, 11-13 septembre 2000, p. 89-94.
- (2) Savard, Y., Rioux, N., Boutonnet, M., Corté, J.F. 1999, « La collaboration MTQ-LCPC », *Géoglobe*, n° 7, automne 1999, p. 18-22.
- (3) Doré, G., Rioux, N. 1999, « La recherche de solutions pratiques pour améliorer le comportement des chaussées soumises au gel », *Revue générale des routes*, Hors série n° 9, p. 108-109.
- (4) Konrad, J.-M., 2000, « Nouveau critère de gélivité des sols d'infrastructures », *Recueil des communications*, 35<sup>e</sup> congrès annuel de l'AQTR, Québec, 3 et 4 avril 2000, 18 pages.

**RESPONSABLES :** Louis Langevin, ing. M. Sc.  
Service des matériaux  
d'infrastructures  
Denis St-Laurent, ing. M.Sc.  
Service des chaussées

**DIRECTEUR :**

  
Michel Labrie, ing.

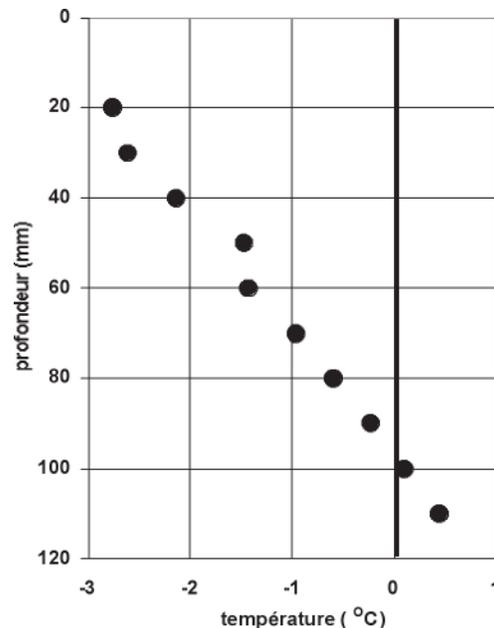


Figure 3 : Profil de température

## Étude de la gélivité sur chaussée existante

### Problématique

La plupart des techniques d'entretien ou d'amélioration ne peuvent connaître qu'un succès mitigé sur une structure de chaussée qui se déforme annuellement sous les effets du gel. Il est donc essentiel d'en tenir compte lors de la conception ou lors du choix du type d'intervention. Cela est plus facile dans le cas d'une chaussée existante puisqu'il suffit d'observer son comportement durant l'hiver, moyennant la collecte de quelques données de base complémentaires. Les problèmes de gel se manifestent par des soulèvements plus ou moins uniformes (figure 1). On les ressent principalement vers la fin de l'hiver lorsque la profondeur de gel est maximale. Ils sont causés par la formation de lentilles de glace produites par cryosuccion dans les sols gélifs. Ce phénomène est reproductible en laboratoire (*Info DLC*, vol. 7, n°2). Il existe également quelques méthodes théoriques permettant de le simuler dans un calcul en fonction du climat et des couches de matériaux (*Info DLC*, vol. 11, n° 6).

### Méthodologie

Les étapes de la méthode préconisée sont les suivantes :

1. Faire un relevé visuel et marquer les emplacements à mesurer. Privilégier une visite d'hiver (février-mars) pour cibler les endroits sensibles au gel.
2. Collecter les données stratigraphiques. On effectue en général quelques sondages et on caractérise quelques échantillons de sols (granulométrie, teneur en eau, limites d'Atterberg). Il est possible que ces données soient disponibles dans des rapports d'études antérieures.
  - a. En option : insérer un gélmètre dans l'un des sondages et effectuer des analyses de sols complémentaires (sédimentométrie, valeur au bleu de méthylène, potentiel de ségrégation).
3. Mesurer les élévations de la surface en hiver (février-mars) et en été (mai-novembre). La méthode la plus abordable consiste en un relevé d'arpentage avec mire et niveau (figure 1). Les mesures doivent être reprises exactement au même endroit, ce qui implique un marquage en conséquence (peinture, clous d'arpentage).

Elles doivent aussi être référencées par rapport à un repère fixe (roc, bâtiment ou structure) afin de permettre la soustraction des valeurs des deux relevés.

- a. En option : ajouter des relevés au profilomètre pour augmenter la densité de points (mesure en continu) et interpréter le confort de roulement ( $\Delta IRI = IRI_{\text{hiver}} - IRI_{\text{été}}$ ).
4. Tracer les résultats sur un graphique (figure 2). Délimiter les secteurs homogènes. Interpréter les résultats, tirer les conclusions, dégager les avenues de solution. Choisir les points caractéristiques pour les calculs de dimensionnement.
  5. Importer les données climatiques mesurées à l'étape 3. Les températures journalières sont publiées mensuellement sur le site Internet d'Environnement Canada. Le chapitre « 8.2.2 Édition d'un fichier CLM » du guide d'utilisation du logiciel Chaussée 2 décrit la procédure.
  6. Étalonner le logiciel Chaussée 2 pour assurer sa représentativité par rapport au site étudié.

Pour ce faire, choisir l'hiver de la mesure et entrer les autres données disponibles (matériaux, épaisseurs, teneurs en eau, masse volumique). Le pourcentage de saturation (Sr) est affiché par le logiciel afin d'assister le choix d'une masse volumique sèche compatible avec la teneur en eau utilisée. Il est aussi possible de subdiviser les strates de sol en fonction de leur nature ou de la position de la nappe phréatique. Ajuster au besoin le potentiel de ségrégation du sol de façon que les résultats du calcul soient représentatifs du comportement observé sur le site (profondeur de gel et soulèvement).

7. Retenir les caractéristiques du sol obtenues à l'étape précédente, choisir l'hiver de conception et simuler les variantes envisageables. Dimensionner ces variantes de façon à contrôler les soulèvements à l'intérieur du seuil acceptable. Le seuil se situe entre 50 et 70 mm, suivant le tableau 2.4-1 de la norme du MTQ (collection Normes-Ouvrages routiers, *Tome II – Construction routière*, chapitre 2).

## Étude de cas

Les mesures d'une étude réelle sont illustrées à la figure 2. On y trouve le tracé des profils longitudinaux d'été et d'hiver, ainsi que la différence entre les deux (soulèvement représenté en rouge). Les points rouges ont été mesurés à la mire et au niveau tandis que les traits continus proviennent d'un profilomètre portatif. Les lignes verticales illustrent l'emplacement des sondages pour lesquels on connaît la stratigraphie.

Plusieurs déductions peuvent être faites avant même d'utiliser Chaussée 2. Le sondage situé au chaînage 5+150 avait atteint le roc à 1,2 m de profondeur : le soulèvement y est nul – résultat logique –, et le tracé des soulèvements délimite exactement l'étendue (20 m) de cet affleurement de roc. La transition sol/roc y est jugée déficiente avec des pointes d'IRI<sub>10 mètres</sub> de 4,7 et 11,3 m/km en octobre et mars respectivement. L'IRI est mauvais en divers autres points où le profil s'avère irrégulier (p. ex. : 5+250, 5+300 et 5+400). Dans l'ensemble, les soulèvements au gel atteignent plus de 150 mm dans les pires endroits. Les fissures, distorsions et lézardes réapparaîtront sûrement l'hiver suivant si on se contente d'un retraitement en place ou de travaux d'asphaltage. L'élimination du problème nécessite une intervention plus lourde telle que la surexcavation ou l'insertion de panneaux isolants en polystyrène. La figure 2 fait ressortir l'emplacement d'endroits exempts de soulèvement, que l'on pourrait choisir pour amorcer et terminer la pose de polystyrène. Ces endroits pourraient correspondre aux deux extrémités du secteur étudié (5+050 à 5+520). Ils pourraient aussi être situés entre les différents secteurs « gélifs », dans le cas où le budget ne permettrait de réparer qu'une portion du projet.

Le logiciel Chaussée 2 permet enfin de dimensionner les variantes d'intervention. Aux fins de l'exercice, nous avons choisi le profil stratigraphique initial du sondage situé à 5+410, où nous avons mesuré, en date du 19 mars 2009, une profondeur de gel (Z) de 2,37 m et un soulèvement (h) de

139 mm. Le premier calcul est illustré à la figure 3. On y trouve les données du sondage, ainsi que les valeurs de potentiel de ségrégation (SP<sub>0</sub> de 4.8 et 8.5) qui permettent de reconstituer la profondeur de gel et le soulèvement au gel mesuré sur la route. On obtient de cette façon un modèle représentatif du comportement de la chaussée à cet endroit. Il ne reste plus qu'à sélectionner l'hiver de conception et à modifier la structure de chaussée conformément aux variantes envisagées. Le logiciel indiquera les conséquences attendues relativement au soulèvement au gel. Pour ce cas précis, l'étude suggère soit de rehausser la chaussée de près de 1 m (variante rejetée), soit de reconstruire jusqu'à 2,25 m de profondeur, ou de reconstruire jusqu'à 650 mm de profondeur pour insérer des panneaux de polystyrène de 50 mm d'épaisseur.

## Conclusion

La méthode proposée se base sur des paramètres couramment accessibles et conduit à des indicateurs de performance quantifiables. L'étalonnage du calcul avec des mesures de soulèvement *in situ* permet de garantir la représentativité de l'analyse au point de vue du système sol-chaussée-climat. L'approche nécessite un peu de planification à cause du suivi d'un hiver, mais elle est très prisée en raison de son efficacité pour aborder les problèmes de gel. Elle a été utilisée avec succès à plusieurs reprises au Ministère.

## RESPONSABLE :

Denis St-Laurent, ing., M. Sc.  
Service des chaussées

## DIRECTEUR :

  
Guy Tremblay, ing. M.Sc.A.

Figure 1 :  
Mesure des soulèvements  
au gel (mire et niveau et  
profilomètre portatif)



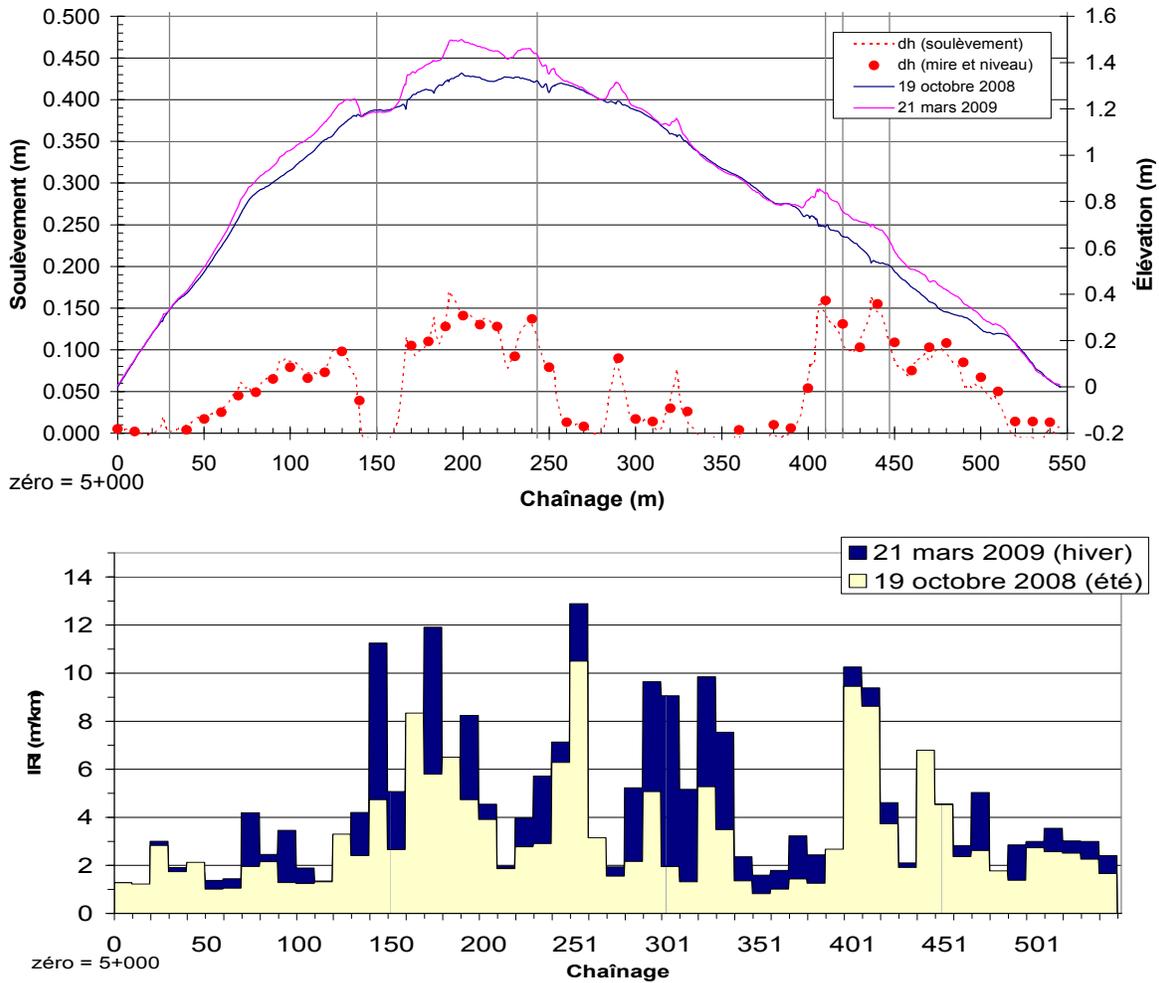


Figure 2 : Tracé des profils, soulèvements au gel et indices IRI

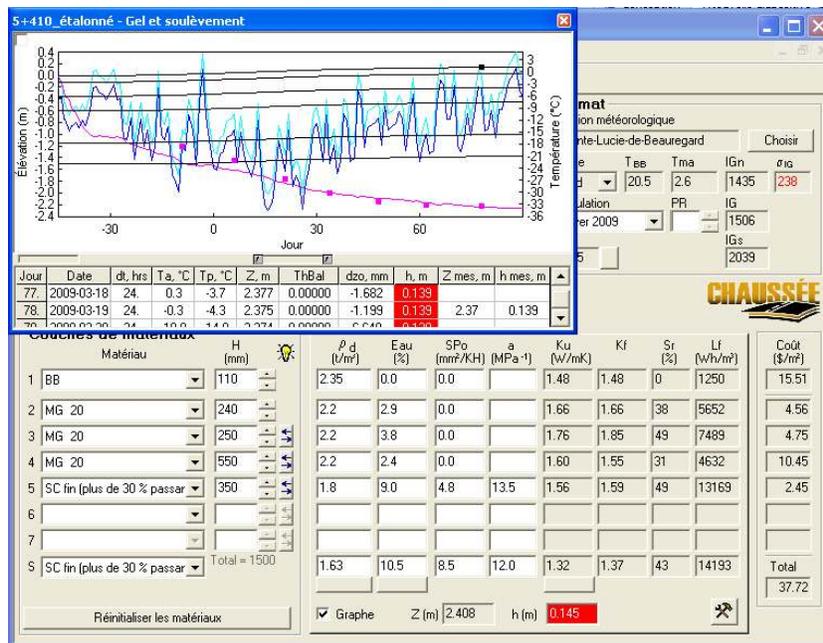


Figure 3 : Simulation Chaussée 2, étalonnée pour le sondage 5+410





# Dimensionnement structural des chaussées souples

Les étapes de dimensionnement



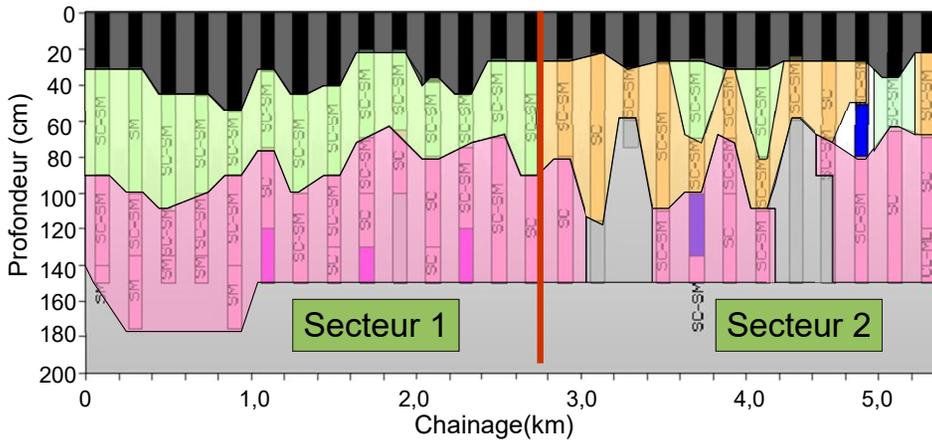
## 1ère étape

- Segmenter en secteurs homogènes
  - La route est en 3-D
    - Profondeur
    - Longueur
    - Largeur
  - Le logiciel est en 1-D (profondeur)
    - Faire autant de calculs que nécessaire pour couvrir la variabilité dans les 2 autres dimensions (longueur et largeur)

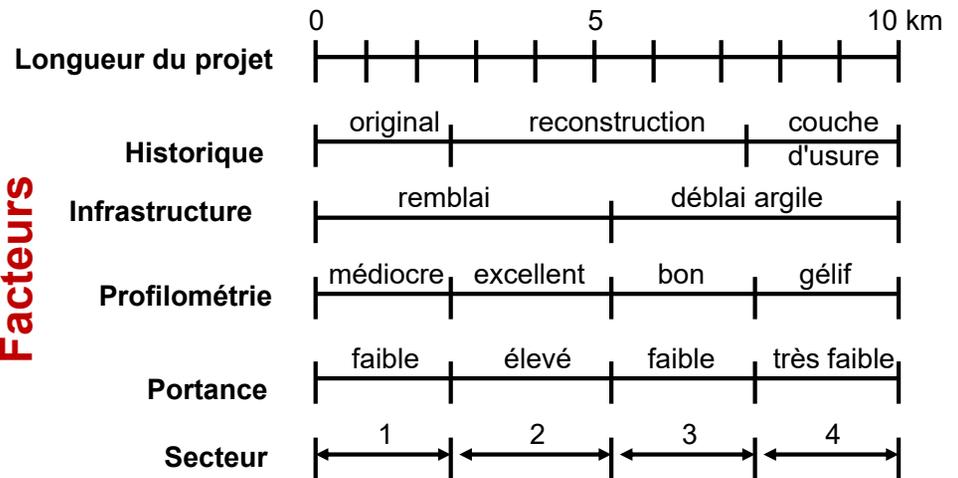


## Segmentation en regard des sondages

- |                     |                         |                            |
|---------------------|-------------------------|----------------------------|
| ■ Enrobé bitumineux | ■ Bloc ou cailloux      | ■ 21 à 30% passant 80µm    |
| ■ Sol-ciment        | ■ 0 à 12% passant 80 µm | ■ 31% et plus passant 80µm |
| ■ Roc friable       | ■ 12 à 20% passant 80µm | ■ CL (31% et plus)         |



## Segmentation: exemple



## 2<sup>e</sup> étape

- **Objectifs de conception**
  - Choisir le type de route et la classe de DJMA projeté
  - Entrer les ECAS anticipés durant la période de conception (avec ou sans l'outil ECAS)
- **Climat**
  - Sélectionner la station climatique la plus représentative
  - Ajuster, si requis, l'intensité de l'hiver (période de récurrence)



178

## 3<sup>e</sup> étape

- **Couches de matériaux**
  - Sélectionner le sol de support (couche n)
  - Sélectionner le type de revêtement bitumineux (couche 1)
    - Surveiller si la haute résistance à l'orniérage (HRO) est requise (indicateur au-dessus des matériaux)
  - Sélectionner ensuite les autres couches de haut en bas
    - Il est encouragé de subdiviser le sol d'infrastructure en plusieurs couches (croûte, zone non-saturée et saturée, etc.)



179

## 4<sup>e</sup> étape

- **Onglet structural**
  - Ajuster le module du sol en fonction des données de portance disponibles (facteur F Mr)
  - Déterminer l'épaisseur minimale de chaque couche, telles que  $W18 \geq ECAS$  (de haut en bas)
    - Éteindre les lumières rouges



180

## 5<sup>e</sup> étape

- **Onglet gel**
  - Ajuster la gélivité de chaque couche (SPo et a) en fonction des données disponibles (sédimentométrie, valeur au bleu, etc.)
  - Ajuster la masse volumique et teneur en eau de chaque couche en fonction des données disponibles
    - Sous la nappe:  $Sr = 100\%$
    - Éteindre les lumières oranges
  - Ajuster l'épaisseur de la chaussée pour limiter le soulèvement au gel (tout en conservant les exigences de l'onglet structural)
    - Éteindre les lumières rouges



181

## 6<sup>e</sup> étape

- Onglet gel 1994
  - S'assurer qu'on respecte la protection partielle contre le gel
- Avant de conclure
  - Réviser pour que les exigences des trois onglets restent respectées à la fin du processus



182

## 7<sup>e</sup> étape

- Variantes de conception
  - Pour chaque segment homogène
    - Retenir des conditions jugées représentatives ou sécuritaires
  - Vérifier les diverses variantes admissibles pour le projet avec ou sans
    - Recyclage, stabilisation, isolant, infra-améliorée, etc.
  - Choisir la variante appropriée



183





## Dimensionnement structural des chaussées souples

Exemple d'utilisation du logiciel



## Exemple La Prairie - Données

- Autoroute à 4 voies (2 voies par direction)
- Dimensionnement pour 36 millions d'ECAS
  - DJMA= 25 000 (comptage 2012)
  - Travaux prévus en 2014
  - 15 % de camions
    - Coefficient d'agressivité moyen = 2,0
    - Croissance de 2%/an
- Endroit: La Prairie
- Sol support: argile très plastique (CH) ( $I_L < 0,9$ )



## Exemple La Prairie - ECAS

**Outil de calcul du nombre d'ECAS**

**Prévision du trafic**  
 Année du comptage: 2012 | Année du projet: 2014  
 DJMA du comptage: 25 000 | DJMA actualisé: 26 010  
 Durée de vie (en années): 30 | f.a. (%): 2,0 | Nirs (jours/an): 40,57 | 300

**Aggressivité du trafic**  
 Proportion de véhicules lourds (%): 15,0  
**Coefficient d'agressivité moyen (CAM)**  
 Valeur par défaut |  Classification |  Saisie directe  
 CAM: 2,00

**Répartition du trafic lourd sur les voies**  
 Nombre de voies par direction: 2 voies

| Direction   | Fraction par voie (%) | Trafic par voie (DJMA) | FS  | ECAS par voie (en millions) | Voie de référence |
|-------------|-----------------------|------------------------|-----|-----------------------------|-------------------|
| Direction 1 | 50,0                  | 13 348                 | 1,0 | 36,04                       | Voie 1            |
|             | 24,1                  | 4 238                  | 1,0 | 11,443                      | Voie 2            |
| Direction 2 | 50,0                  | 13 348                 | 1,0 | 36,04                       | Voie 3            |
|             | 24,1                  | 4 238                  | 1,0 | 11,443                      | Voie 2            |

**Norme pour faible trafic**  
 DJMA corrigé: 52 759 | DJMA projeté: 35 173 | ECAS projeté (millions): 36,04

## Exemple La Prairie

**Chaussée - [Exemple 1]**

**Segment homogène**

**Objectifs**  
 Type de route: Autoroute  
 Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
 Années ECAS (millions): 30 | 36,04 | Outil ECAS

**Climat**  
 Station météorologique: La Prairie  
 Zone: Sud | T<sub>eb</sub>: 20,5 | T<sub>ma</sub>: 6,5 | I<sub>gn</sub>: 901 | σ<sub>ic</sub>: 209  
 Simulation: PR | IG: 1215  
 Climat: 15 | IG<sub>s</sub>: 1215  
 n: 1,0

**Couches de matériaux**

| Matériau                  | H (mm) | F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | W18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------|--------|------|-------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                  | 265    | 1,00 | 3592              | 0,47                  | 1,0 | 4,91 | 39,157            | 37,37                     |
| 2 MG 20                   | 300    | 1,00 | 110               | 0,07                  | 0,8 | 5,57 | 37,878            | 5,70                      |
| 3 MG 112 (fuseau entier)  | 1100   | 1,00 | 74                | 0,08                  | 0,8 | 8,18 | 37,634            | 9,90                      |
| 4                         |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 5                         |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 6                         |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 7                         |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| CH (I <sub>L</sub> < 0,9) |        | 1,00 | 20                |                       |     |      |                   | 52,97                     |

Equivalences d'été (FAS = 0,65)  
 Mr = 31 MPa  
 CBR = 3,5  
 Cu = 105 kPa

# Exemple La Prairie - Variante

**Segment homogène**  
Variante avec Base antifatigue  
(Recommandée car BB requis > 200 mm)

**Objectifs**  
Type de route: Autoroute  
Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
Années ECAS (millions): 30 | 36.04 | Outil ECAS  
BB reporté à l'an prochain: 0 mm

**Climat**  
Station météorologique: Laprairie  
Zone: Sud | T<sub>es</sub>: 20.5 | T<sub>ma</sub>: 6.5 | IG<sub>n</sub>: 901 | σ<sub>ig</sub>: 209  
Simulation: PR | IG: 1215  
Climat: 15 | IG<sub>s</sub>: 1215  
n: 1.0

**Couches de matériaux**

| Matériau                   | H (mm)       | F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | W18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|--------------|------|-------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|---------------------------|
| 1   BB HRO et BAF          | 255          | 1.00 | 4021              | 0.49                  | 1.0 | 4.93 | 40.191            | 37.15                     |
| 2   MG 20                  | 275          | 1.00 | 110               | 0.07                  | 0.8 | 5.53 | 36.09             | 5.23                      |
| 3   MG 112 (fuseau entier) | 1100         | 1.00 | 74                | 0.08                  | 0.8 | 8.14 | 36.281            | 9.90                      |
| 4                          |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 5                          |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 6                          |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 7                          |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| S   CH (IL < 0.9)          | Total = 1630 | 1.00 | 20                |                       |     |      |                   | Total 52.28               |

→ Equivalences d'été (FAS = 0.65)  
Mr = 31 MPa  
CBR = 3.5  
Cu = 105 kPa

188

# Exemple La Prairie - Parachèvement

**Segment homogène**  
Variante avec Base antifatigue  
(Recommandée car BB requis > 200 mm)

**Objectifs**  
Type de route: Autoroute  
Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
Années ECAS (millions): 30 | 36.04 | Outil ECAS  
BB reporté à l'an prochain: 50 mm

**Climat**  
Station météorologique: Laprairie  
Zone: Sud | T<sub>es</sub>: 20.5 | T<sub>ma</sub>: 6.5 | IG<sub>n</sub>: 901 | σ<sub>ig</sub>: 209  
Simulation: PR | IG: 1215  
Climat: 15 | IG<sub>s</sub>: 1215  
n: 1.0

**Couches de matériaux**

| Matériau                   | H (mm)       | F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | W18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|--------------|------|-------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|---------------------------|
| 1   BB HRO et BAF          | 260          | 1.00 | 4021              | 0.49                  | 1.0 | 5.03 | 41.002            | 37.88                     |
| 2   MG 20                  | 275          | 1.00 | 110               | 0.07                  | 0.8 | 5.63 | 36.417            | 5.23                      |
| 3   MG 112 (fuseau entier) | 1100         | 1.00 | 74                | 0.08                  | 0.8 | 8.24 | 36.663            | 9.90                      |
| 4                          |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 5                          |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 6                          |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 7                          |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| S   CH (IL < 0.9)          | Total = 1635 | 1.00 | 20                |                       |     |      |                   | Total 53.01               |

→ Equivalences d'été (FAS = 0.65)  
Mr = 31 MPa  
CBR = 3.5  
Cu = 105 kPa

189

# Exemple La Prairie - Gel

**Segment homogène**  
Variante avec Base antifatigue  
(Recommandée car BB requis > 200 mm)

**Objectifs**  
Type de route: Autoroute  
Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
Années ECAS (millions): 30 | 36.04 | Outil ECAS  
BB reporté à l'an prochain: 50 mm

**Climat**  
Station météorologique: Laprairie  
Zone: Sud | T<sub>es</sub>: 20.5 | T<sub>ma</sub>: 6.5 | IG<sub>n</sub>: 901 | σ<sub>ig</sub>: 209  
Simulation: PR | IG: 1215  
Climat: 15 | IG<sub>s</sub>: 1215  
n: 1.0

**Couches de matériaux**

| Matériau                   | H (mm)       | ρ <sub>d</sub> (t/m <sup>3</sup> ) | Eau (%) | SPo (mm <sup>2</sup> /KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | Ku (W/mK) | Kf   | Sr (%) | Lf (W/h/m <sup>2</sup> ) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|--------------|------------------------------------|---------|---------------------------|------------------------|-----------|------|--------|--------------------------|---------------------------|
| 1   BB HRO et BAF          | 260          | 2.35                               | 0.0     | 0.0                       |                        | 1.48      | 1.48 | 0      | 1250                     | 37.88                     |
| 2   MG 20                  | 275          | 2.2                                | 4.0     | 0.0                       |                        | 1.77      | 1.89 | 52     | 7897                     | 5.23                      |
| 3   MG 112 (fuseau entier) | 1100         | 1.92                               | 8.0     | 0.0                       |                        | 2.10      | 2.49 | 56     | 14018                    | 9.90                      |
| 4                          |              |                                    |         |                           |                        |           |      |        |                          |                           |
| 5                          |              |                                    |         |                           |                        |           |      |        |                          |                           |
| 6                          |              |                                    |         |                           |                        |           |      |        |                          |                           |
| 7                          |              |                                    |         |                           |                        |           |      |        |                          |                           |
| S   CH (IL < 0.9)          | Total = 1635 | 1.3                                | 40.0    | 1.5                       | 7.0                    | 1.26      | 2.12 | 99     | 36690                    | Total 53.01               |

h (m) 0.017

190

# Exemple La Prairie - Gel 1994

**Segment homogène**  
Variante avec Base antifatigue  
(Recommandée car BB requis > 200 mm)

**Objectifs**  
Type de route: Autoroute  
Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
Années ECAS (millions): 30 | 36.04 | Outil ECAS  
BB reporté à l'an prochain: 50 mm

**Climat**  
Station météorologique: Laprairie  
Zone: Sud | T<sub>es</sub>: 20.5 | T<sub>ma</sub>: 6.5 | IG<sub>n</sub>: 901 | σ<sub>ig</sub>: 209  
Simulation: PR | IG: 1215  
Climat: 15 | IG<sub>s</sub>: 1215  
n: 1.0

**Couches de matériaux**

| Matériau                   | H (mm)       | F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | W18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|----------------------------|--------------|------|-------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|---------------------------|
| 1   BB HRO et BAF          | 260          | 1.00 | 4021              | 0.49                  | 1.0 | 5.03 | 41.002            | 37.88                     |
| 2   MG 20                  | 275          | 1.00 | 110               | 0.07                  | 0.8 | 5.63 | 36.417            | 5.23                      |
| 3   MG 112 (fuseau entier) | 1100         | 1.00 | 74                | 0.08                  | 0.8 | 8.24 | 36.663            | 9.90                      |
| 4                          |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 5                          |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 6                          |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 7                          |              |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| S   CH (IL < 0.9)          | Total = 1635 | 1.00 | 20                |                       |     |      |                   | Total 53.01               |

Protection partielle et transitions

FS 1.15  
FR 1.10

■ Courbe de base  
■ Partiel requis  
■ Transition P  
■ Actuel

Epaisseur (mm) vs Indice de gel normal (°C x jour)

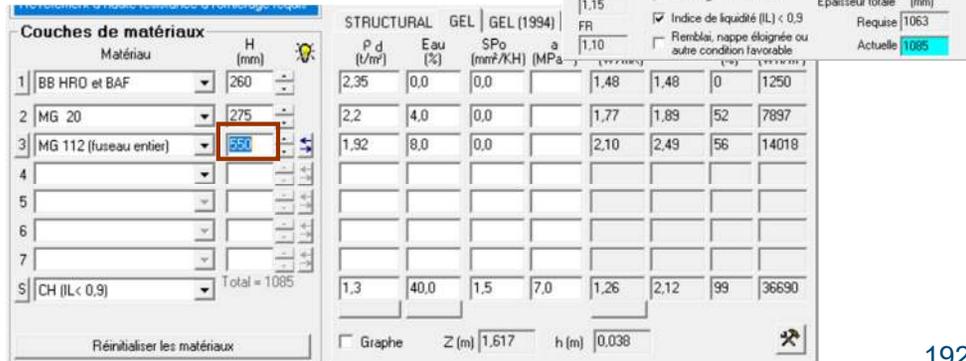
FS Sol de gélivité uniforme  
FR Indice de liquidité (IL) < 0.9  
Remblai, nappe éloignée ou autre condition favorable

Epaisseur totale (mm) Requête 1063  
Actuelle 1635

191

## Exemple La Prairie

- L'aspect structural pour cet exemple est beaucoup plus exigeant que l'aspect gel
- Une sous-fondation de 550 mm au lieu de 1100 aurait suffi à respecter les deux modules de gel en limitant les soulèvements à 40 mm



192

## Sols de faible consistance

- Les sols mous (surtout lorsque  $C_u < 50$  kPa) tendent à causer des problèmes de mise en œuvre
  - Consulter à cet effet le Guide d'utilisation des géosynthétiques de séparation et de renforcement des chaussées
- En Abitibi et à quelques endroits au Québec, il arrive que le  $C_u$  des argiles soit aussi faible que 12-18 kPa, dans les cas les plus extrêmes
- Dans ces cas, l'épaisseur de sous-fondation demandée par la méthode AASHTO amène un poids pouvant causer des tassements dans le sol
  - Une expertise par la Direction de la géotechnique, puis par la Direction des chaussées, peut s'avérer requise

193

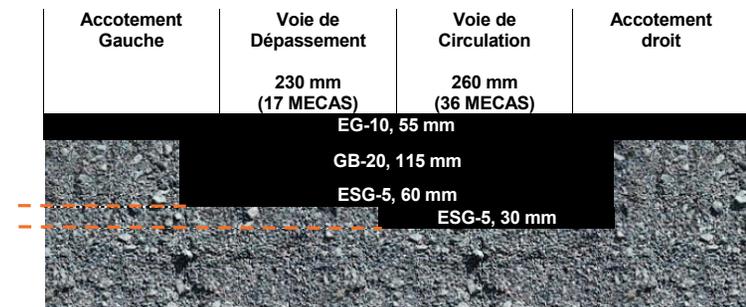
## Exemple La Prairie - Exercice

- À partir de l'exemple précédent, on vous demande de proposer un moyen de réduire l'épaisseur de revêtement, sachant que les matériaux granulaires sont bon marché.



## Exemple La Prairie - Exercice

- L'épaisseur de 260 mm correspond à 76% du trafic lourd (voie 1). Il y aurait possibilité de réduire l'épaisseur dans la voie rapide, considérant qu'il y circule moins de camions. La voie 2 pourrait par exemple être dimensionnée pour 36% du trafic lourd avec une épaisseur de BB de 230 mm



194

195

# Exemple La Prairie - Exercice

- À partir de l'exemple précédent, faire une recommandation pour un secteur homogène bien drainé en sable silteux avec 35% de particules fines (SM)



196

**Chaussée - [Projet1]**

Objetifs  
 Type de route: Autoroute  
 Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
 Années: 30, ECAS (millions): 36,04  
 BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat  
 Station météorologique: Laprairie  
 Zone: Sud, T<sub>EB</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 6,5, IG<sub>n</sub>: 901, σ<sub>IG</sub>: 209  
 Simulation: PR 15, IG: 1215  
 Climat: 1215, IG<sub>s</sub>: 1215

**Couches de matériaux**

| Matériau                     | H (mm)      |
|------------------------------|-------------|
| 1 BB HRO et BAF              | 255         |
| 2 MG 20                      | 275         |
| 3 MG 112 (fuseau entier)     | 400         |
| 4                            |             |
| 5                            |             |
| 6                            |             |
| 7                            |             |
| 8 SM fin (plus de 30% passe) | total = 930 |

Revêtement à haute résistance à l'ornièrage requis

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

Protection partielle et transitions

Épaisseur (mm) vs Indice de gel normal (°C x jour)

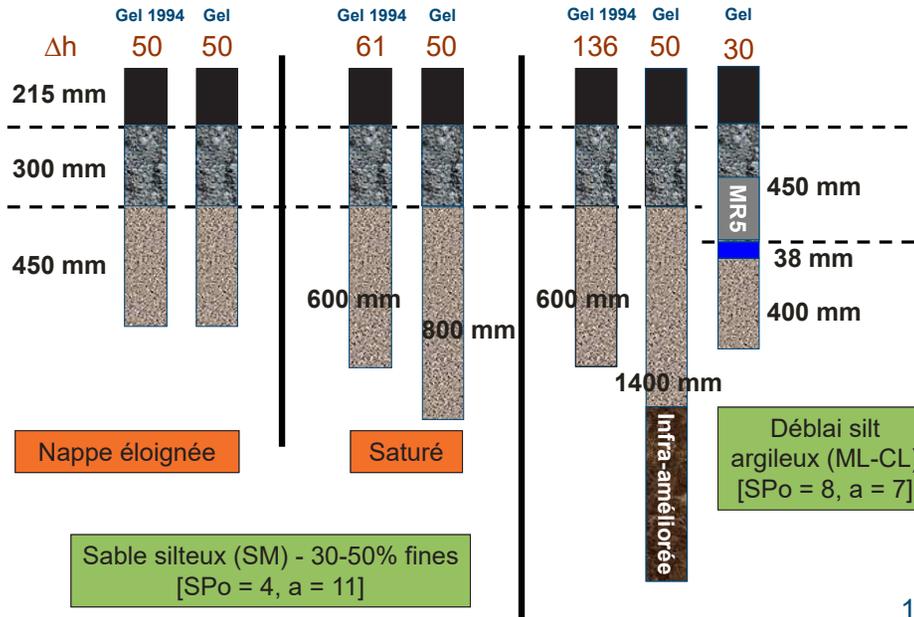
FS: 1,15 (Sol de gélivité uniforme), 1,10 (Remblai, nappe éloignée ou autre condition favorable)

Épaisseur totale (mm): Requête 903, Actuelle 930

Coût (\$/m²): 37,15, 5,23, 3,60, Total 45,98

19

# Exemple comparatif (Trois-Rivières) Autoroute DJMA 20 000 (14,56 MECAS en 20 ans)



198

100



## Dimensionnement structural des chaussées souples

Infrastructure-améliorée et fermeture de remblai



## CCDG 2011 à 2019 (article 11.6)

- Obligation de mettre en place 300 mm de matériaux avec moins de 20 % de particules fines sous le niveau de l'infrastructure en remblai;
- Obligation de réserver les matériaux de déblais contenant moins de 30 % de particules fines disponibles en chantier pour les derniers 700 mm sous le niveau des matériaux contenant moins de 20 % de fines.

- Limité aux déblais et grands projets de terrassement
- Manque d'encadrement,
- Nombreux débats en chantiers
- Comité Fermeture de remblais 2016-2019

## CCDG 2020 (déblais)

### 11.4.3.2 Destination des matériaux de déblais de première classe

Tous les matériaux provenant des déblais de première classe doivent être employés en respectant l'ordre de priorité de réutilisation suivant :

1. Infra-structure améliorée;
2. Fermeture des remblais;
3. Remblais;
4. Fondations de chaussée.

Toutefois, si la pierre est de la qualité et de la dimension requises, l'entrepreneur peut l'utiliser pour la construction d'enrochements, de gabions et d'autres ouvrages de maçonnerie et de revêtement en pierres prévus aux plans et devis.

Si des matériaux sont perdus par la faute de l'entrepreneur, il doit, si nécessaire, les remplacer à ses frais par un volume équivalent de matériaux permettant de respecter l'ordre de priorité de réutilisation et respectant les exigences de la couche pour laquelle ce volume sera utilisé.

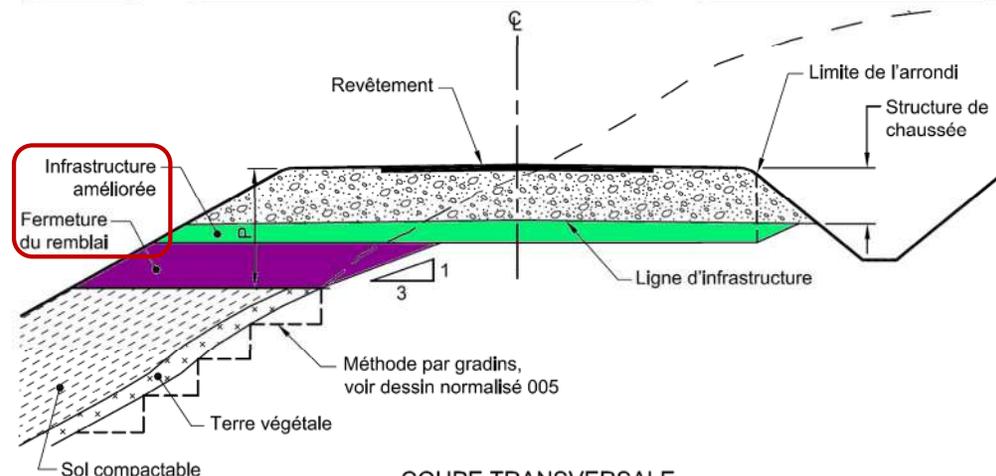


|          |            |
|----------|------------|
| Tome     | II         |
| Chapitre | 1          |
| Numéro   | 016        |
| Date     | 2020 01 30 |

### DESSIN NORMALISÉ

TRANSITION TRANSVERSALE  
DÉBLAI-REMBLAI ET SOL-SOL

NORME



COUPE TRANSVERSALE

# Infra-améliorée (IA) - s'arrimer au CCDG (2020)

## 11.7 INFRASTRUCTURE AMÉLIORÉE

Les derniers 300 mm sous la ligne d'infrastructure sont composés de matériaux d'infrastructure améliorée, autant en déblais qu'en remblais.

### 11.7.1 MATÉRIAUX

Les matériaux compactables utilisés pour l'infrastructure améliorée doivent respecter les exigences granulométriques suivantes :

| Tamis (mm) | % passant  |
|------------|------------|
| 125 mm     | 100        |
| 80 µm      | 0,0 – 20,0 |

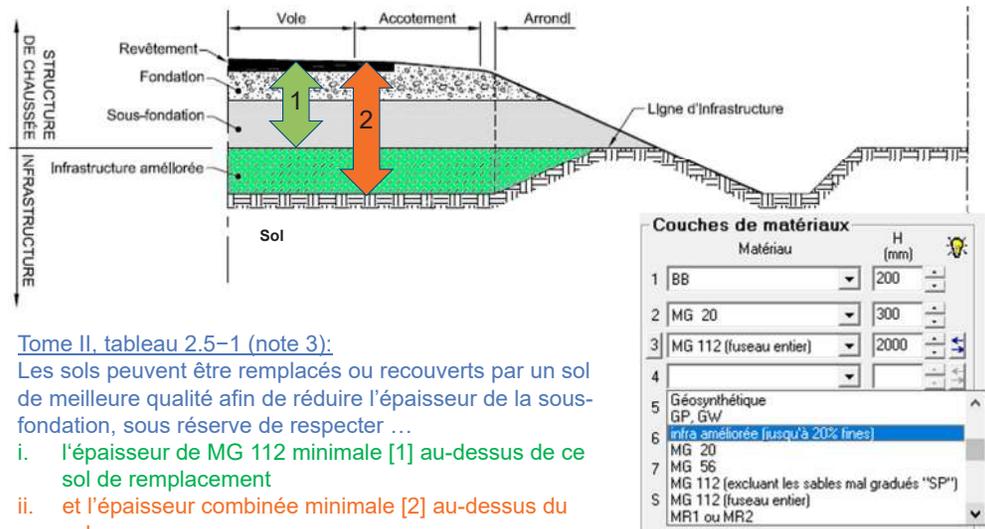
**IMPORTANT:** Si la conception implique une IA supérieure à 300 mm, alors cette épaisseur devra être exigée aux plans et devis.

300 mm exigé au CCDG.

Emprunt requis si pas disponible dans les déblais (doit être prévu au contrat).

Voir aussi :  
Norme Tome II Chap. 1.6 (extrait annexé)

# DÉBLAI: Sous-profil en Infra-améliorée (IA)

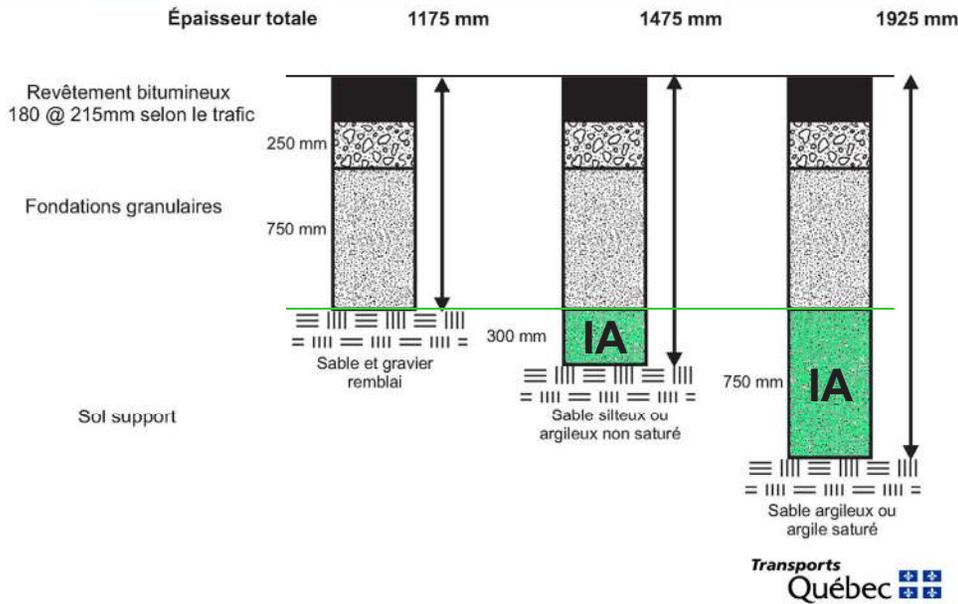


- Tome II, tableau 2.5-1 (note 3):  
Les sols peuvent être remplacés ou recouverts par un sol de meilleure qualité afin de réduire l'épaisseur de la sous-fondation, sous réserve de respecter ...
- l'épaisseur de MG 112 minimale [1] au-dessus de ce sol de remplacement
  - et l'épaisseur combinée minimale [2] au-dessus du sol.

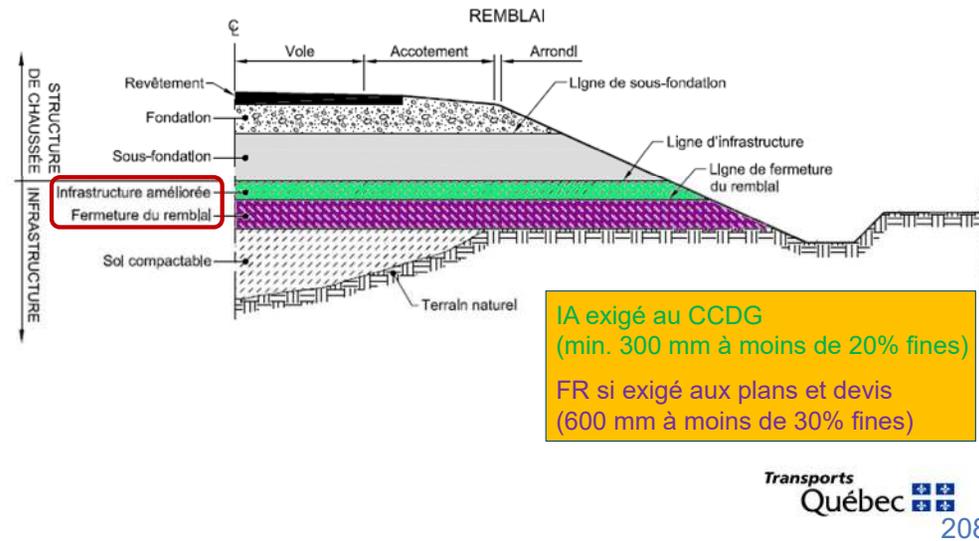
## i) Épaisseur minimale au dessus de l'IA Protection partielle, onglet « Gel (1994) »

## ii) Épaisseur min. combinée au dessus du sol Onglet GEL

# Exemple R175 Parc des Laurentides (déblais)



# REMBLAI: FR + IA



# CCDG 2020 (remblais)

## 11.6 REMBLAIS

Les remblais sont construits sous les chaussées. Les travaux de fermeture de remblai sont inclus dans les remblais.

### 11.6.1 MATÉRIAUX

Les remblais sont construits avec les matériaux provenant des déblais de première classe ou de deuxième classe, des excavations pour ouvrages d'art ou des matériaux d'emprunt.

Une partie des matériaux moins gélifs (déblais de première classe et sols contenant moins de 30,0% de particules fines) doit être réservée pour la fermeture du remblai. Le matériau de fermeture du remblai doit être homogène pour ne pas causer de comportements différentiels.

[couche SM grossier] À exiger aux plans et devis si requis dans la conception (estimation qtés et zones). Voir aussi : Norme Tome II Chap. 1.5.3 (extrait annexé)

La mise en œuvre de la fermeture des remblais doit être réalisée sur une épaisseur minimale de 600 mm.

# Exemple: MG112 + IA + FR sur ML-CL

Chaussée - [1-Nouvelle route]

Objectifs: Type de route Nationale, Classe de trafic (DJMA projeté) entre 5000 et 20000, Années ÉCAS (millions) 30, 19.0, BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat: Station météorologique Mont-Apica, Zone Nord, T<sub>EB</sub> 17.5, T<sub>ma</sub> 1.1, I<sub>GN</sub> 1730, σ<sub>IG</sub> 143, Simulation PR, Climat 15, IG 1945, n 1.0, IGz 1945

| Couches de matériaux | Matériau                      | H (mm)       | P d (t/m <sup>3</sup> ) | Eau (%) | SPo (min/KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | Ku (W/mK) | Kf   | Sr (%) | Lf (W/h/m <sup>2</sup> ) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|----------------------|-------------------------------|--------------|-------------------------|---------|--------------|------------------------|-----------|------|--------|--------------------------|---------------------------|
| 1                    | BB                            | 200          | 2.35                    | 0.0     | 0.0          |                        | 1.48      | 1.48 | 0      | 1250                     | 28.20                     |
| 2                    | MG 20                         | 300          | 2.2                     | 4.0     | 0.0          |                        | 1.77      | 1.89 | 52     | 7897                     | 5.70                      |
| 3                    | MG 112 (fuseau entier)        | 750          | 1.92                    | 8.0     | 0.0          |                        | 2.10      | 2.49 | 56     | 14018                    | 6.75                      |
| 4                    | infra améliorée (jusqu'à 20%) | 500          | 1.8                     | 12.0    | 1.6          | 15.0                   | 2.01      | 2.68 | 67     |                          |                           |
| 5                    | SM grossier (moins de 30%)    | 600          | 1.8                     | 14.0    | 2.0          | 15.0                   | 1.90      | 2.45 | 77     |                          |                           |
| 6                    |                               |              |                         |         |              |                        |           |      |        |                          |                           |
| 7                    |                               |              |                         |         |              |                        |           |      |        |                          |                           |
| 8                    | ML, ML-CL (IL < 0.9)          | Total = 2350 | 1.45                    | 30.0    | 8.0          | 7.0                    | 1.36      | 2.17 | 94     |                          |                           |

STRUCTURAL GEL GEL (1994)

h (m) 0.054

Stratigraphie (GEL), tout en respectant l'épaisseur minimale au dessus de l'IA (GEL 1994)

ports Québec 210

# Conclusion



## Infra-améliorée < 20 % fines

- **300 mm obligatoire au CCDG** (remblai et déblai) (sauf remblai de pierre: chaussée sur roc)
- Spécifier aux plans et devis si conception avec > 300 mm
- Source: déblais ou emprunts (estimation quantités et zones)

## Fermeture de remblai < 30% fines

- Meilleurs matériaux sur le dessus
- **600 mm si disponible** à même le chantier [ $SM_{\text{grossier}}$ ]
  - Sinon sol compactable, potentiellement plus gélif (SF plus épaisse)
- Conception-Préparation : Évaluation plus précise des matériaux récupérables (quantités et zones)
- Surveillance : Faire respecter CCDG art 11.4 (l'ordre de priorité)



## Fermeture des remblais

Alexandre Labbé, ing.  
Direction des normes et des documents d'ingénierie  
Direction générale de la gestion des actifs routiers et de l'innovation

*Jusqu'au début des années 2000, des chaussées nouvellement construites ont affiché de piètres performances liées à l'apparition de soulèvements au gel, ce qui a nécessité des travaux majeurs pour permettre leur remise en état. Des travaux d'expertise réalisés sur ces chaussées ont permis d'établir que la cause principale de ces mauvais comportements était liée à la nature des matériaux utilisés pour la fermeture des remblais. Fait surprenant, ces contre-performances se sont produites à la suite de travaux jugés conformes aux exigences contractuelles alors en vigueur. Pour la fermeture de ces remblais, l'utilisation de matériaux dits compactables s'est traduite par la mise en place de matériaux hétérogènes, différents de ceux anticipés lors de la conception. La pratique de l'époque ne permettait pas aux concepteurs d'évaluer la nature et l'homogénéité des matériaux qui allaient être utilisés pour la construction de la partie supérieure du remblai, laquelle est soumise au gel lorsque la chaussée est en service. Cet état de fait représente un risque important de contre-performance de la chaussée.*

Pour ces raisons, les autorités ministérielles ont demandé qu'une solution soit mise de l'avant afin d'éviter que de telles situations se reproduisent. Au cours des années 2004 à 2010, des conceptions de chaussées à durée de vie prolongée ont alors été réalisées dans le cadre de projets d'envergure, notamment les projets des routes 175 et 185. Ces conceptions introduisaient une protection accrue contre le gel par l'utilisation de sous-profils composés d'un matériau comportant moins de 20,0% de particules fines (passant le tamis de 80  $\mu\text{m}$ ), et ce, dans les secteurs jugés plus sensibles au gel. Ce matériau, nommé *infrastructure améliorée*, a aussi été intégré dans la banque de matériaux du logiciel Chaussée 2 lors de sa publication en 2006, ce qui introduisait à ce moment un nouveau module de calcul des effets du gel sur les chaussées.

À la suite des bonnes performances observées sur ces chaussées nouvellement conçues, une première réflexion a été menée par le Ministère sur les façons de faire dans le cadre des travaux de

terrassément. Ce processus a conduit à l'adoption, au *Cahier des charges et devis généraux – Construction et réparation* (CCDG, 2011), de deux nouvelles exigences concernant la fermeture des remblais, soit :

1. L'obligation de mettre en place une épaisseur de 300 mm de matériaux comportant moins de 20,0% de particules fines sous la ligne d'infrastructure;
2. L'obligation de réserver les matériaux de déblais contenant moins de 30,0% de particules fines

disponibles en chantier pour les 700 derniers mm sous le niveau des matériaux comportant moins de 20,0% de particules fines.

L'objectif était de favoriser une meilleure gestion des matériaux de déblais afin d'optimiser leur utilisation dans les ouvrages routiers. Par contre, aucun encadrement contractuel ou normatif n'était disponible, ce qui rendait l'application de cette clause sujette à interprétation lors de la préparation et de la réalisation de travaux. D'ailleurs, on note que l'application de cette pratique a fait l'objet de nombreux débats en chantier. Ainsi, pour ces raisons, l'application de ces nouvelles exigences s'est limitée à quelques projets, notamment ceux comportant des terrassements importants.

Afin d'implanter l'usage de cette approche dans la pratique courante, la table de normalisation Terrassement, drainage, fondations et granulats (TDFG) a été mandatée pour traiter ce dossier. Le comité sur la fermeture des remblais a été mis sur pied en 2016 afin d'élaborer une solution intégrée tenant compte de tous les aspects contractuels et normatifs applicables dans un tel contexte.

### **Prise en compte par les concepteurs**

Dès 2016, une note adressée aux concepteurs et portant sur les matériaux à utiliser pour la fermeture des remblais a été produite afin d'encadrer leurs tâches et responsabilités. Selon cette directive, les concepteurs doivent évaluer, à la suite de l'étude de reconnaissance des sols, les quantités de matériaux de déblais conformes aux exigences et prévoir la quantité de matériaux d'emprunt et les adaptations nécessaires à la structure de chaussée. Les concepteurs doivent également évaluer les zones où se trouvent des matériaux répondant aux exigences susmentionnées pour la fermeture des remblais (moins de 30,0% et moins de 20,0% de particules fines).

### **Changements apportés en 2020 au CCDG et aux normes**

Les travaux du comité se sont poursuivis jusqu'à l'automne 2019. Les recommandations du comité ont permis de couvrir l'ensemble des documents ministériels et tous les aspects liés à ces exigences, qu'il s'agisse de l'assurance de la qualité, de la mise en œuvre et du mode de paiement.

Une vingtaine de propositions de modifications ont été déposées à la table TDFG et elles ont été traitées conformément au processus de normalisation en vigueur. Au total, neuf articles du CCDG sont visés par ces modifications, et plusieurs sont apportées au *Tome II – Construction routière*, soit la création de deux nouvelles

sections (1.5.3 «Fermeture du remblai» et 1.6 «Infrastructure améliorée») et l'ajout de nouveaux dessins normalisés (DN) relativement aux chaussées (DN II-1-016 au chapitre 1 ainsi que DN II-2-001A et DN II-2-001B au chapitre 2). La figure 1 à la page suivante illustre la nouvelle terminologie relative aux chaussées. Dans le *Lexique* de la collection Normes – Ouvrages routiers, les définitions de «fermeture du remblai» et de «ligne de fermeture du remblai» ont été ajoutées; celles d'«infrastructure améliorée», de «remblai» et de «sols» ont été modifiées et celle de «sol compactable» a été retirée.

Auparavant, les matériaux comportant moins de 20,0% de particules fines étaient nommés différemment s'ils étaient utilisés en remblai ou en déblai («fermeture du remblai» et «infrastructure améliorée»). La nouvelle terminologie prévoit que tous ces matériaux constituent maintenant l'infrastructure améliorée, indépendamment du fait qu'ils soient en remblai ou en déblai. Un nouvel article a d'ailleurs été ajouté au CCDG afin d'encadrer les exigences relatives à ces matériaux. Le terme «fermeture du remblai» se limite maintenant à la couche de matériaux comportant moins de 30,0% de particules fines située sous l'infrastructure améliorée (ligne de fermeture du remblai). Pour les couches de matériaux à utiliser pour la fermeture

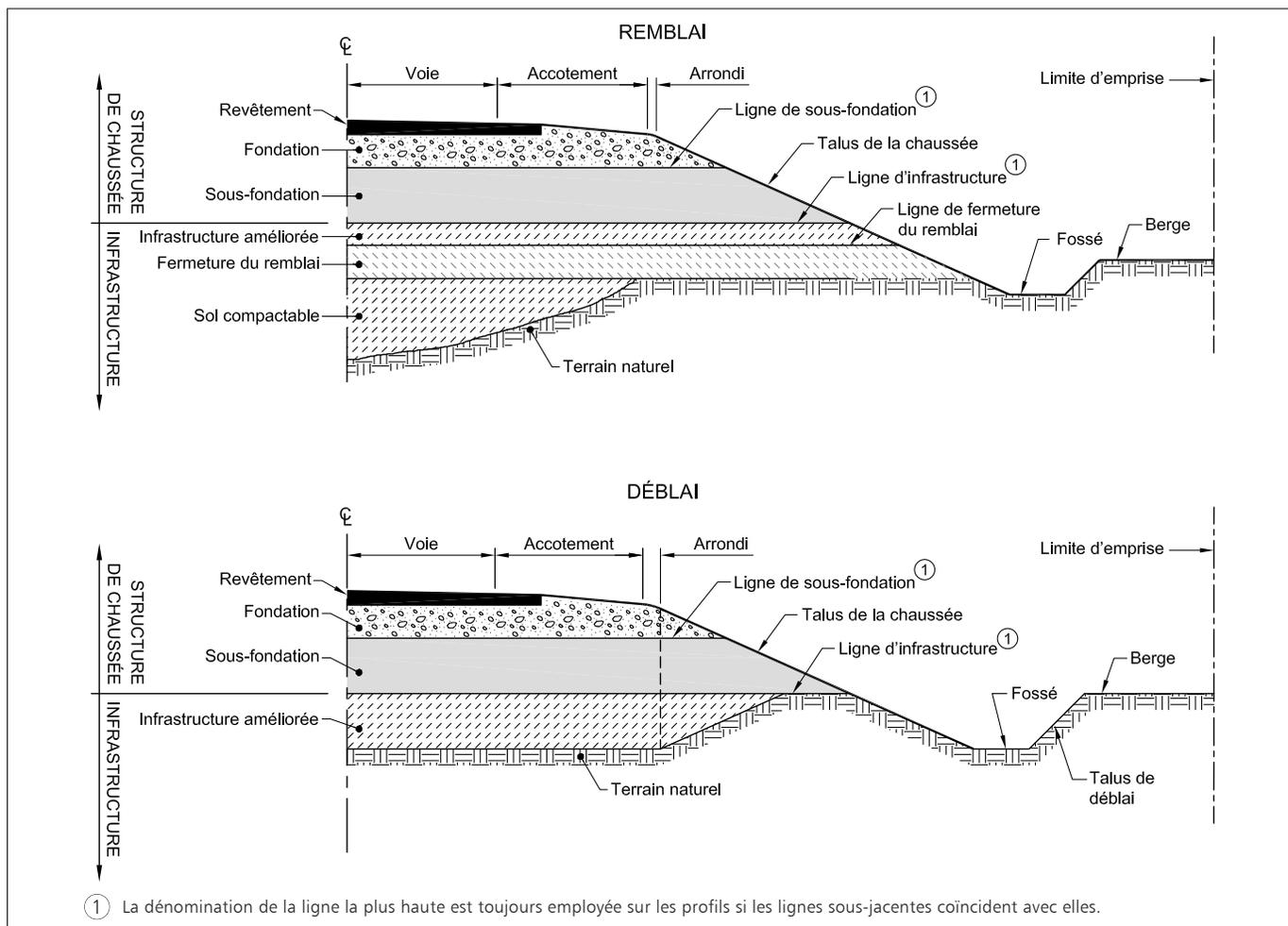


Figure 1 – Extrait du DN II-2-001A « Terminologie relative aux chaussées »

du remblai, on précise, à la section 1.5.3 « Fermeture du remblai » du *Tome II – Construction routière*, que si les matériaux provenant des déblais et contenant moins de 30,0% de particules fines ne sont pas disponibles en quantité suffisante pour combler en tout ou en partie les besoins du projet, la fermeture des remblais peut être réalisée avec des matériaux compactables contenant plus de 30,0% de particules fines et provenant des déblais ou des matériaux d'emprunt.

La nouvelle terminologie développée permet de nommer clairement les matériaux nécessaires dans la fermeture du remblai et du déblai.

Pour les couches de matériaux à utiliser pour l'infrastructure améliorée, on précise, à la section 1.6 « Infrastructure améliorée » du même tome, que si les besoins en matériaux ne peuvent pas être comblés, en tout ou en partie, par les matériaux de déblais, l'utilisation de matériaux d'emprunt satisfaisant aux exigences des matériaux d'infrastructure améliorée doit être prévue. De plus, on mentionne qu'en situation de déblai, si les matériaux en place contiennent moins de 20,0% de particules fines, aucune infrastructure améliorée n'est requise dans ces secteurs.

Le concepteur doit donc indiquer clairement, à la suite des études de reconnaissance des sols, les zones où l'on peut trouver des matériaux satisfaisant aux exigences des matériaux de fermeture du remblai et d'infrastructure améliorée et en évaluer les quantités. Ces informations doivent apparaître aux plans et devis.

Quelques changements ont également été apportés en ce qui a trait aux exigences en vigueur depuis 2011 (CCDG). D'abord, l'épaisseur de la couche de fermeture des remblais est passée de 700 à 600 mm. Ensuite, la couche

d'infrastructure améliorée de 300 mm de matériaux comportant moins de 20,0% de particules fines est dorénavant exigée en déblai. Finalement, un ordre de priorité de réutilisation des déblais de première classe a été ajouté à l'article 11.4 du CCDG afin d'assurer l'optimisation de la réutilisation des matériaux de bonne qualité disponibles en chantier. Ainsi, les déblais de première classe doivent dorénavant être réutilisés de façon à respecter l'ordre de priorité suivant :

1. Infrastructure améliorée;
2. Fermeture des remblais;
3. Remblais;
4. Fondations de chaussée.

### **Surveillance et assurance de la qualité**

Il est important de préciser que l'infrastructure améliorée fait déjà partie des travaux de remblai lorsque la fermeture du remblai est constituée exclusivement de remblais de pierre. Dans ce cas, les exigences des remblais de pierre s'appliquent, incluant le mode de paiement prévu pour les remblais.

L'infrastructure améliorée est composée de matériaux compactables provenant des déblais de première ou deuxième classe, des excavations pour ouvrages d'art ou de matériaux compactables d'emprunt. Ces matériaux compactables doivent respecter les exigences granulométriques montrées au tableau 1.

Tableau 1 – Exigences granulométriques

| Tamis  | Passant (%) |
|--------|-------------|
| 125 mm | 100         |
| 80 µm  | 0-20,0      |

De plus, les matériaux de l'infrastructure améliorée doivent être homogènes transversalement et longitudinalement pour ne pas causer de comportement différentiel. Lorsque l'infrastructure améliorée est composée exclusivement de déblais de première classe, aucune exigence d'assurance de la qualité n'est spécifiée au CCDG. Le mode d'assurance de la qualité retenu pour les matériaux d'infrastructure améliorée est l'attestation de conformité. Son contenu doit être le même que l'attestation de conformité d'un matériau de sous-fondation de chaussée, avec les précisions suivantes :

- des analyses granulométriques doivent être réalisées par l'entrepreneur, conformément à la méthode d'essai LC 21-040, selon une cadence minimale d'un essai par 3 000 m<sup>3</sup> de matériaux compactables avec un nombre minimal de trois essais pour chaque source de matériau d'infrastructure améliorée;
- les essais sur les caractéristiques intrinsèques et complémentaires ne s'appliquent pas.

Pour répondre aux exigences granulométriques, tous les résultats individuels doivent respecter les exigences des matériaux de l'infrastructure améliorée.

Si le surveillant a des doutes par rapport au fait que le matériau en chantier n'est pas le même que celui ayant fait l'objet de l'attestation de conformité, il peut, conformément à l'article 4.3 du CCDG, prendre des échantillons et faire réaliser les essais requis.

### **Mise en œuvre**

Dans le cas où les matériaux d'infrastructure améliorée font l'objet d'un traitement (concassage, lavage, ajout et tamisage), ils doivent être mis en réserve conformément aux exigences de l'article sur la mise en réserve des matériaux de fondation de chaussée.

Chaque couche de matériaux d'infrastructure améliorée mise en place doit respecter le critère de rétention des particules des couches adjacentes, conformément aux exigences de la norme 2104 «Matériaux filtrants» du Ministère. Les couches doivent être épandues selon une épaisseur uniforme n'excédant pas 300 mm, à l'exception des matériaux classifiés SP selon la norme 1101 «Classification des sols» du Ministère. Ces matériaux

peuvent être épanchés par couches d'une épaisseur n'excédant pas 600 mm. Le compactage de l'infrastructure améliorée doit, quant à lui, respecter les exigences indiquées à l'article 11.10 sur le compactage des matériaux.

Les exigences sur la préparation et la stabilisation de l'infrastructure ainsi que celles liées à l'essai de portance ont été modifiées pour inclure la surface de la fermeture de remblai, en plus de celle de l'infrastructure améliorée et des couches supérieures.

### **Paieiment**

Les remblais, y inclus leur fermeture, ne font l'objet d'aucun article au bordereau. Tous les frais pour la réalisation de cet ouvrage sont compris dans le prix des déblais et des emprunts.

Concernant l'infrastructure améliorée, un nouveau mode de paiement (tonne ou m<sup>3</sup>) a été ajouté pour couvrir tous les frais liés à cet ouvrage, indépendamment de la provenance des matériaux, soit des déblais ou des emprunts. En zone de déblai, si les sols supports demeurent en place parce qu'ils répondent aux exigences des matériaux de l'infrastructure améliorée, aucune quantité n'est payable.

### **Aspects économique et environnemental**

Pour bon nombre de projets, l'intégration d'une infrastructure améliorée dans la conception des chaussées permettra de diminuer les coûts de construction en optimisant la récupération

des matériaux de bonne qualité disponibles en chantier. Le gain découle principalement du fait que l'infrastructure améliorée permet de réduire, en conception, l'épaisseur des matériaux de sous-fondation de chaussée et que les exigences granulométriques des matériaux d'infrastructure améliorée sont moins difficiles à respecter que celles des matériaux de sous-fondation.

La figure 2 illustre le cas type d'une chaussée nouvellement reconstruite, pour laquelle l'ajout d'une infrastructure améliorée aurait permis d'améliorer le comportement au gel et d'éviter l'apparition rapide de dégradations. Les coûts de réparation d'un tel défaut dépassent largement les coûts qui auraient pu être engendrés par la pose d'une infrastructure améliorée.



Figure 2 – Chaussée SANS infrastructure améliorée : route 175, fissuration prématurée

L'ajout d'un mode de paiement unique pour l'infrastructure améliorée, indépendamment de la provenance des matériaux, devrait également favoriser la réutilisation des déblais de bonne qualité disponibles en chantier et ainsi réduire les volumes d'emprunt, réduisant par le fait même les coûts et les impacts environnementaux des projets.

## Conclusion

Les principaux ajouts et modifications apportés aux documents contractuels et normatifs du Ministère relativement à la fermeture des remblais ont pour but de veiller à une utilisation plus optimale des matériaux de déblais qui visent à assurer un meilleur comportement des chaussées au regard des effets du gel saisonnier. Cette approche contribue implicitement à prolonger la durée de vie des chaussées.

Les changements apportés aux pratiques apportent un cadre d'utilisation à l'ensemble des intervenants travaillant à la préparation, à la conception et à la surveillance de travaux d'infrastructures routières.



|                           |
|---------------------------|
| Tome<br><b>II</b>         |
| Chapitre<br><b>1</b>      |
| Page<br><b>4</b>          |
| Date<br><b>2020 01 30</b> |

# TERRASSEMENTS

## NORME

- le remblai est de plus de 2 m de hauteur<sup>1</sup> et construit sur des sols argileux;
- le remblai est construit sur un terrain incliné à 1V:4H ou plus.

### 1.5.2 Élargissement de remblai

Lors d'un élargissement de remblai, il est recommandé d'utiliser un matériau identique à celui en place. Une variation dans la densité ou la nature du matériau peut entraîner un comportement différentiel qui se traduit souvent par des fissures au sommet du remblai. Dans tous les cas, à l'exception des remblais de roc, où les pentes du remblai existant sont plus abruptes que 1V:3H, la méthode par gradins décrite au dessin normalisé 005 doit être utilisée.

Dans le cas de l'élargissement d'un remblai avec un matériau moins perméable, on doit assurer un drainage adéquat du remblai à travers l'élargissement. Dans le cas de l'élargissement d'un remblai de roc, il faut en plus respecter le critère de rétention des particules, conformément aux exigences de la norme 2104 « Matériaux filtrants » du *Tome VII – Matériaux*.

Un élargissement inférieur à 2 m en largeur d'un remblai de plus de 2 m de hauteur construit sur un dépôt d'argile ne doit pas être aménagé avec des pentes plus abruptes que celles du remblai existant.

Une étude géotechnique doit être réalisée dans les cas suivants :

- élargissement d'un remblai muni de contrepoids;
- élargissement supérieur à 2 m en largeur et en hauteur<sup>1</sup> d'un remblai construit sur des sols argileux;

- élargissement d'un remblai construit sur des sols argileux dont au moins une valeur de la résistance au cisaillement non drainée mesurée au scissomètre est inférieure à 10 kPa;
- élargissement d'un remblai construit sur un terrain incliné à 1V:4H ou plus;
- élargissement sur des sols organiques.

### 1.5.3 Fermeture du remblai

Les matériaux moins gélifs contenant moins de 30 % de particules fines (inférieures à 80 µm) doivent être réservés pour les derniers 600 mm de remblai (fermeture du remblai) situés sous l'infrastructure améliorée afin de limiter la sensibilité au gel de la chaussée.

À la suite de l'étude de reconnaissance des sols, les quantités et la localisation des matériaux de déblais contenant moins de 30 % de particules fines et pouvant être utilisés pour la construction de la fermeture du remblai doivent être identifiées clairement.

Si les matériaux provenant des déblais et contenant moins de 30 % de particules fines ne sont pas disponibles en quantité suffisante pour combler en tout ou en partie les besoins du projet, la fermeture des remblais peut être réalisée avec des matériaux compactables contenant plus de 30 % de particules fines et provenant des déblais ou des matériaux d'emprunt.

La présence de matériaux contenant moins de 30 % de particules fines doit être considérée lors du dimensionnement structural de la chaussée si la quantité, la qualité et la disponibilité de ces matériaux sont suffisantes.

Lorsque l'utilisation des déblais de première classe est prévue pour la fermeture du remblai, cette exigence doit être précisée aux plans et devis.

1. Hauteur mesurée à partir du fond du fossé.

### **1.6 Infrastructure améliorée**

L'infrastructure améliorée est une couche de matériaux compactables contenant moins de 20 % de particules fines (inférieures à 80 µm) prévue sous la ligne d'infrastructure, autant en remblai qu'en déblai. Il peut s'agir du sol en place si ce dernier présente moins de 20 % de particules fines. L'épaisseur minimale de cette couche est de 300 mm et son épaisseur doit être ajustée en fonction de la nature des matériaux présents sur le projet.

Cette couche de matériaux située immédiatement sous la ligne d'infrastructure vise à réduire la sensibilité au gel, en remplaçant les sols plus gélifs par des sols moins gélifs, et à uniformiser le comportement de la chaussée.

La mise en place d'une infrastructure améliorée peut également servir à limiter l'épaisseur nécessaire de la sous-fondation, sous réserve de respecter l'épaisseur de sous-fondation minimale au-dessus de ce sol de remplacement et l'épaisseur combinée minimale au-dessus du sol.

La présence de l'infrastructure améliorée doit être considérée lors de la conception de la chaussée. La réutilisation des matériaux issus des déblais doit être favorisée lorsque cela est possible, en considérant les coûts liés à la mise en réserve et au traitement des matériaux pour satisfaire aux exigences granulométriques des matériaux d'infrastructure améliorée.

À la suite de l'étude de reconnaissance des sols, les quantités des matériaux de déblais pouvant être utilisés pour la construction de l'infrastructure améliorée doivent être précisées. Les zones où l'on peut trouver des matériaux et les volumes disponibles doivent être identifiés clairement. Si les besoins en matériaux ne peuvent pas être comblés, en tout ou en partie, par les matériaux de déblais, l'utilisation de matériaux d'emprunt répondant aux exigences des matériaux d'infrastructure améliorée doit être prévue.

En situation de déblai, si les matériaux en place contiennent moins de 20 % de particules fines, aucune infrastructure améliorée n'est à prévoir dans ces secteurs. Toujours en situation de déblai, l'épaisseur ainsi que la nécessité et la possibilité de drainer les matériaux d'infrastructure améliorée, en fonction de la nature des matériaux et des conditions de réalisation, doivent être évaluées. Il faut garder à l'esprit que plusieurs matériaux, hormis la pierre, sont difficiles à mettre en œuvre en condition non drainée.

### **1.7 Élargissement de chaussée**

L'élargissement de la chaussée sans rehaussement de profil est applicable dans le cas où le comportement de la route existante est adéquat. Cet élargissement est alors exécuté en conformité avec le dessin normalisé 006. Ce dessin s'applique lorsque les caractéristiques de la structure de chaussée sous l'accotement existant répondent aux exigences de la section 2.5 « Structure de chaussée souple » du chapitre 2 du présent tome.

Il est cependant nécessaire d'excaver les 100 premiers millimètres de fondation à la surface des accotements gravelés, car ces matériaux sont la plupart du temps contaminés ou de mauvaise qualité. Une pente de 1V:3H taillée à même la structure de chaussée existante est nécessaire afin d'uniformiser le comportement de la chaussée lorsque la surface de contact entre l'ancienne et la nouvelle structure de chaussée se trouve sous les futures surfaces revêtues. Les matériaux peuvent être réutilisés suivant leur qualité.

Dans les autres cas ainsi que dans le cas d'un rehaussement du profil existant, une étude géotechnique est nécessaire.

## Dimensionnement structural des chaussées souples

Exercices avec le logiciel



## Technique de recyclage des enrobés

À chaud

À froid

MR



En centrale



En place



## Retraitement en place

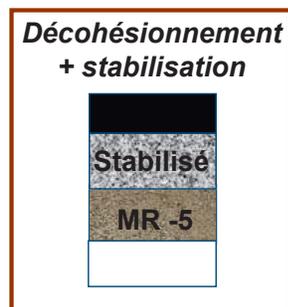
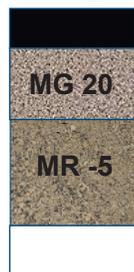
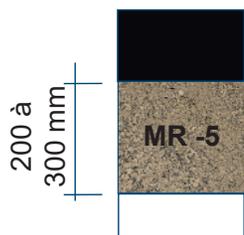


TYPE 2

Décohéssionnement + rechargement

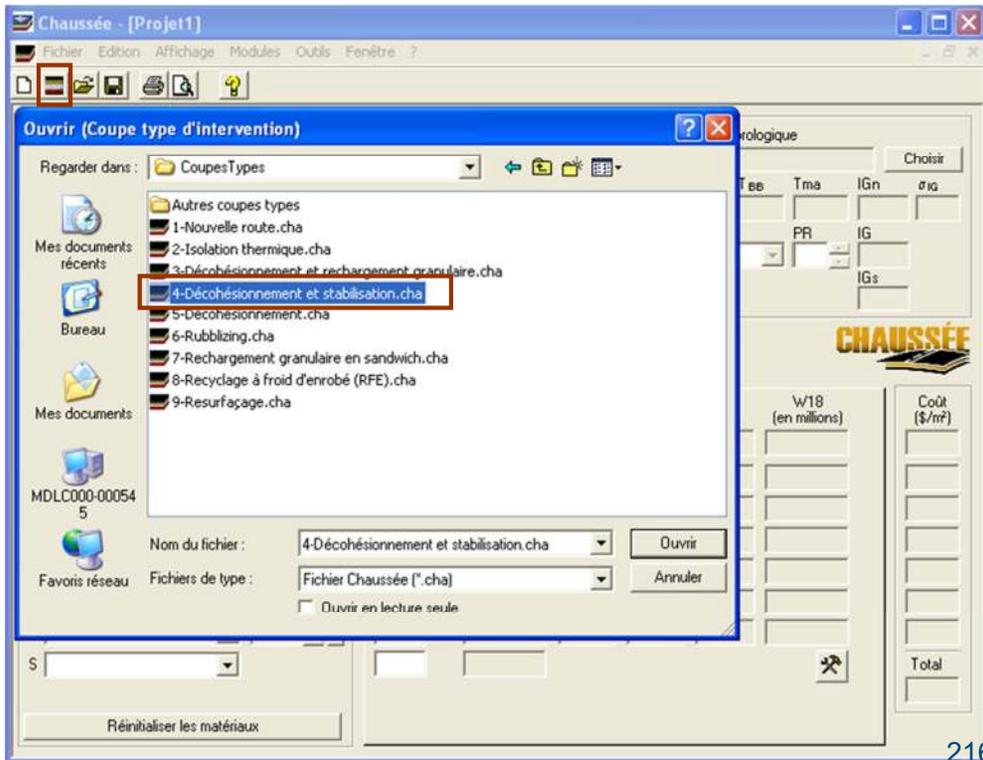
Décohéssionnement + revêtement

Décohéssionnement + stabilisation

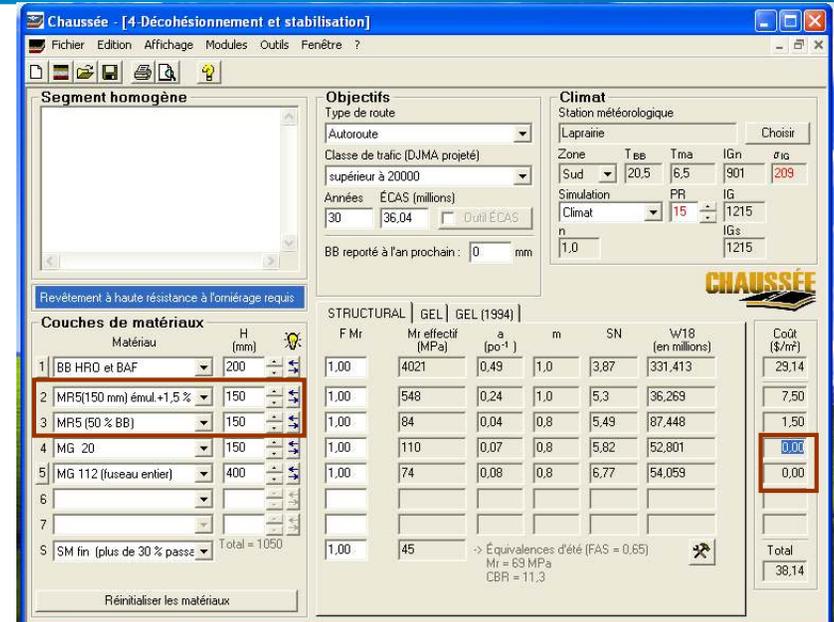


## Exercice (Décohésionnement + Stabilisation)

- À partir des objectifs de conception de l'Exemple 1 (La Prairie, Aut. DJMA > 20 000, 36 MECAS)
  - Soit une chaussée existante dont les couches en place sont les suivantes
    - 270 mm de EB fissuré
    - 300 mm de MG 20
    - 400 mm de MG 112 en place
    - SM<sub>fin</sub> bien drainé
- Proposer une nouvelle structure de chaussée pour un scénario de décohéssionnement et stabilisation.
  - Note: Un planage sera requis pour obtenir une fondation avec un maximum de 50% de granulats bitumineux (MR5)



## Exemple de solution (réfection) Planage 130 mm, décohésionnement et stabilisation



## Exercice: Recyclage à froid des enrobé (RFE), Type 1

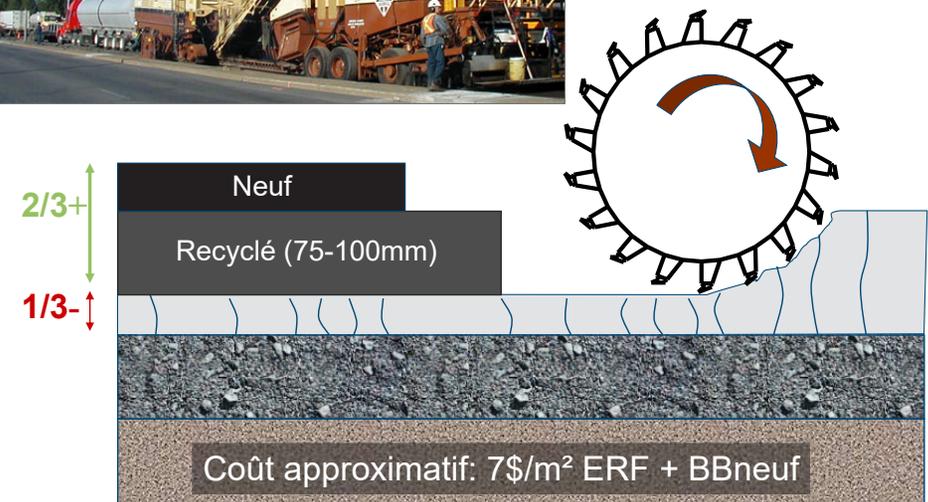
- Route Nationale, rurale à Lambton
  - DJMA=4000, 21% de camions (accroissement nul)
  - 2 voies (1 par direction)
  - CAM=3,65
- Structure de chaussée en place:
  - EB: 230 mm, MG 20 250 mm, MG 112 600 mm
  - Sol: SM (35% de fines), nappe à 2,5 m et plus
- BB fissuré en pistes de roues, relevé FWD →  $Mr_{\text{enrobé}} \approx 1300 \text{ MPa}$
- Pas de problématique de gel ( $\Delta IRI < 0,7 \text{ m/km}$ )

Dimensionner le revêtement pour un RFE de 100 mm



218

## Recyclage du pavage et nouvelle couche de roulement



219

# Guide Tableau 8

| Fissuration de la surface  | Coefficient structural |                      |
|--|------------------------|----------------------|
|  | Revêtement bitumineux  | Fondation stabilisée |
| Peu ou pas de carrelage<br>Fissuration transversale de faible sévérité   | 0,35 à 0,40            | 0,20 à 0,35          |
| < 10 % carrelage de faible sévérité<br>< 1 fissure transversale tous les 6 m (sévérité moyenne et élevée)  | 0,25 à 0,35            | 0,15 à 0,25          |
| > 10 % carrelage de faible sévérité<br>< 10 % fissuration de fatigue de sévérité moyenne<br>> 1 fissure transversale tous les 3-6 m (sévérité moyenne et élevée) | 0,20 à 0,30            | 0,15 à 0,20          |
| > 10 % carrelage de sévérité moyenne<br>< 10 % carrelage de sévérité élevée<br>> 1 fissure transversale tous les 3 m (sévérité moyenne et élevée)                | 0,14 à 0,20            | 0,10 à 0,20          |
| > 10 % carrelage de sévérité élevée<br>> 1 fissure transversale tous les 3 m (sévérité élevée)   | 0,08 à 0,15            | 0,08 à 0,15          |

Voir notes et commentaires dans le guide

220

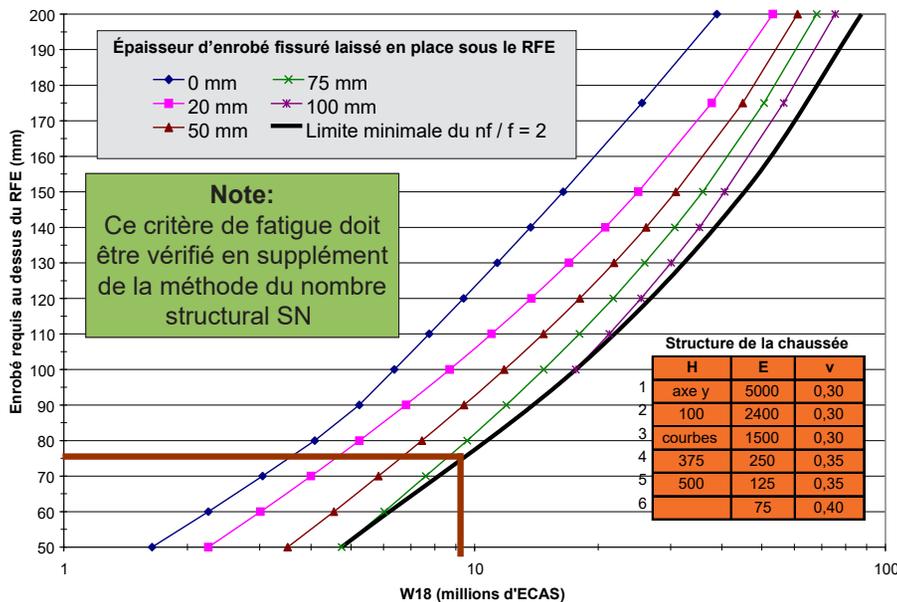
# Premiers éléments de solution

- RFE - Conception raccourcie à 20 ans à cause de la remontée des fissures (voir coupe type 8-RFE)
  - 9,2 MECAS
- Enrobé bitumineux
  - 230 mm en place - 100 mm recyclé = 130 mm de vieux BB fissuré potentiellement laissé en place
  - Selon Chaussée 2 : 75 mm de BB neuf au dessus du RFE
  - $nf/f = (100+75)/130 = 1,35$  (inférieur à 2)
  - Planage préalable d'environ 45 mm permet un  $nf/f > 2$
  - $(100+75)/85 = 2,05$



221

# Fatigue de l'enrobé avec un recyclage à froid de 100 mm (Théorie des couches élastiques, interfaces bien collés)



222

Chaussée - [Projet3]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

**Segment homogène**

Planage préalable de 45 mm pour ramener à  $nf/f \geq 2$

**Objectifs**

Type de route: Nationale  
 Classe de trafic (DJMA projeté): inférieur à 5000  
 Années: 20, ÉCAS (millions): 9.198, Outil ÉCAS:   
 BB reporté à l'an prochain: 0 mm

**Climat**

Station météorologique: Lambton  
 Zone: Sud, T<sub>BB</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 4,3, I<sub>Gr</sub>: 1195, σ<sub>IG</sub>: 225  
 Simulation: Climat, PR: 10, IG: 1484, I<sub>Gs</sub>: 1484

**Couches de matériaux**

| Matériau                      | H (mm) | F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | W18 (en millions) | Coût (\$/m²) |
|-------------------------------|--------|------|-------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|--------------|
| 1 BB                          | 74     | 1,00 | 2894              | 0,43                  | 1,0 | 1,26 | 9,305             | 10,43        |
| 2 ERF émuls. + 0,5% ciment    | 100    | 1,00 | 1400              | 0,3                   | 1,0 | 2,44 | 360,576           | 7,00         |
| 3 BB fissuré                  | 85     | 0,95 | 1298              | 0,29                  | 1,0 | 3,41 | 13,115            | 0,00         |
| 4 MG 20                       | 250    | 1,00 | 125               | 0,08                  | 0,8 | 4,07 | 12,252            | 4,75         |
| 5 MG 112 (fuseau entier)      | 600    | 1,00 | 74                | 0,08                  | 0,8 | 5,49 | 33,445            | 5,40         |
| 6                             |        |      |                   |                       |     |      |                   |              |
| 7                             |        |      |                   |                       |     |      |                   |              |
| 8 SM fin (plus de 30 % passe) |        | 1,00 | 45                |                       |     |      |                   |              |

Total = 1109

→ Équivalences d'été (FAS = 0,65)  
 Mr = 69 MPa  
 CBR = 11,3

Réinitialiser les matériaux

CHAUSSEE

Total Coût: 27,58

223





## Dimensionnement structural des chaussées souples

Conception sur sol gélif



## Étude de réfection sol gélif

Construction 2012 présentant six soulèvements ponctuels ( $\pm 50-80\text{m}$ ) au gel après 2 ans

- Autoroute 50, Papineauville, milieu rural
- DJMA 2014 = 10 000, 20 % camions

Devis du contrat précédent:

- 200 mm enrobé (PG 58-34 en surface)
- 150 mm MG-20, 225 mm MG-56 (construction sur roc)

Problématique :

- Soulèvement aux transitions sol/roc



## Mandat et contraintes

Proposer une solution d'ici au printemps prochain pour éliminer le problème

- Nous sommes à l'été 2014
- Chaussée contiguë
- 1 voie par direction
- Pas de chemin de déviation possible



## Étapes (plan d'action)

### 1. Collecte de données supplémentaires

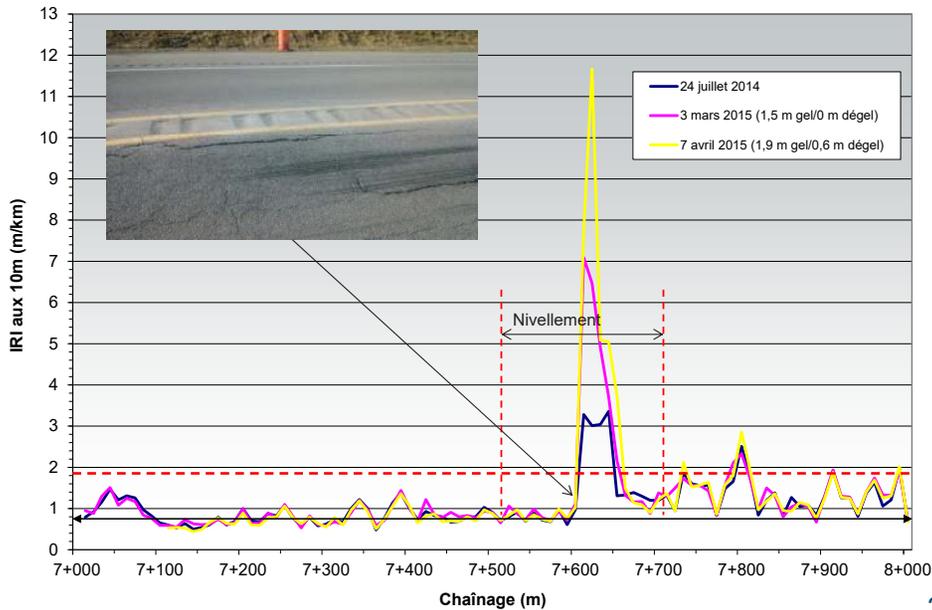
- **Comportement de la chaussée**



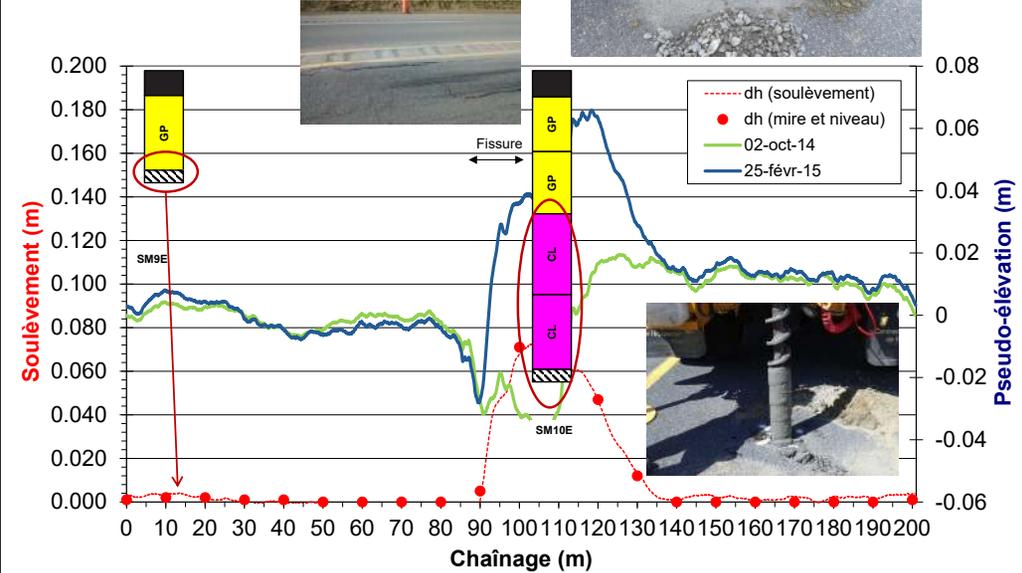
### 2. Simuler la chaussée existante

- Étalonner le modèle avec les données disponibles
- Évaluer son comportement théorique

### 3. Modifier la structure de chaussée pour obtenir une prévision acceptable (Solution)



228



229

## Étapes (plan d'action)

- Collecte de données supplémentaires
  - Comportement de la chaussée
- Simuler la chaussée existante
  - Étalonner le modèle avec les données disponibles
  - Évaluer son comportement théorique
- Modifier la structure de chaussée pour obtenir une prévision acceptable (Solution)



230

## Chaussée existante

- Sondage #1 (sur roc)**
  - 200 mm BB
  - 150 mm MG-20 (3,7% passant 80µm, 1,0% teneur en eau)
  - 450 mm MG-56 (4,6% passant 80µm, 0,9% teneur en eau)
  - Roc atteint à 800 mm de profondeur
- Sondage #2 (secteur problématique)**
  - 200 mm BB
  - 150 mm MG-20 (3,7% passant 80µm, 1,0% teneur en eau)
  - 800 mm MG-56 (4,6% passant 80µm, 0,9% teneur en eau)
  - CL (80% passant 80µm, 20% teneur en eau,  $I_p = 25\%$ ,  $IL = 0,4$ )
  - Roc atteint à 2400 mm de profondeur

Climat : Montebello (Sedbergh)

231

# Chaussée existante

1. Station météo
2. Couches matériaux existantes
3. % eau labo

Mais on a mesuré 74 mm le 25 février 2015 !!!

**Segment homogène**  
Existant: Sondage H2 (secteur problématique)  
h=74mm le 25 février 2015

**Objectifs**  
Type de route: Autoroute  
Classe de trafic (DJMA projeté): inférieur à 20000  
Années: ECAS (millions): 0,0

**Climat**  
Station météorologique: Montebello (Sedbergh)  
Zone: Sud, T<sub>ee</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 4,7, IGn: 1128, sig: 175  
Simulation: PR, IG: 1318  
Climat: Hiver 2015, IGs: 1318

**Couches de matériaux**

| Matériau                     | H (mm) | P d (t/m <sup>2</sup> ) | Eau (%) | SPo (mm <sup>2</sup> /KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | Ku (W/mK) | Kf   | Sr (%) | Lf (Wh/m <sup>2</sup> ) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|------------------------------|--------|-------------------------|---------|---------------------------|------------------------|-----------|------|--------|-------------------------|---------------------------|
| 1 BB HRD                     | 200    | 2,35                    | 0,0     | 0,0                       |                        | 1,48      | 1,48 | 0      | 1250                    | 28,20                     |
| 2 MG 20                      | 150    | 2,2                     | 1,0     | 0,0                       |                        | 1,29      | 1,16 | 13     | 1774                    | 2,85                      |
| 3 MG 56                      | 800    | 2,22                    | 1,0     | 0,0                       |                        | 1,33      | 1,20 | 14     | 1790                    | 15,20                     |
| 4 CL avec Ip > 12 (IL < 0,9) | 1250   | 1,3                     | 20,0    | 3,0                       | 7,0                    | 0,89      | 1,12 | 49     | 15378                   | 8,75                      |
| 5                            |        |                         |         |                           |                        |           |      |        |                         |                           |
| 6                            |        |                         |         |                           |                        |           |      |        |                         |                           |
| 7                            |        |                         |         |                           |                        |           |      |        |                         |                           |
| 8 Roc brisé                  |        | 2,0                     | 2,0     | 0,0                       |                        | 0,85      | 0,85 | 15     | 3468                    |                           |
| <b>Total</b>                 |        |                         |         |                           |                        |           |      |        |                         | <b>55,00</b>              |

STRUCTURAL GEL GEL (1994)  
Grapher Z (m) 1,642 h (mm) 0,060

# Créer l'hiver 2015

Gouvernement du Canada / Government of Canada  
Rechercher dans Canada.ca

Emplois Immigration Voyage Entreprises Prestations Santé Impôts Autres services

Accueil → Environnement et ressources naturelles → Météo, climat et catastrophes naturelles

**Données climatiques historiques**

<http://climat.meteo.gc.ca/>

<http://climat.meteo.gc.ca/>

1. Prendre les données historiques quotidiennes de 2015 (moyenne de chaque journée)
2. Entrer les données dans le fichier texte de la station climatique du logiciel (lecteur D:)
3. Sélectionner à nouveau la station à partir du logiciel
4. L'hiver 2015 devrait apparaître dans le menu « simulation »



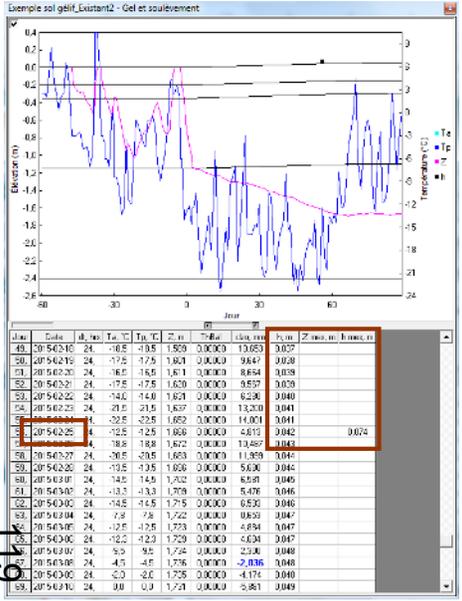
**Climat**  
Station météorologique: Montebello (Sedbergh)  
Zone: Sud, T<sub>ee</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 4,7, IGn: 1128, sig: 175  
Simulation: PR, IG: 1318  
Climat: Hiver 2015, IGs: 1318

[C] Climat  
IGn=1128  
IG\_sigma\_par\_defaut=175  
Tma=4,7  
Latitude=45,7  
Longitude=74,93  
Elevation=197  
ZoneBB=5ud  
TBB=20,5

[Hiver 2015]  
DateDebut = 2014/11/01  
>Table: Températures  
-Heures: °C

|    |        |
|----|--------|
| 24 | 2,5    |
| 24 | 2,5    |
| 24 | 2      |
| 24 | 5      |
| 24 | 8,5    |
| 24 | 2,5    |
| 24 | 0,3    |
| 24 | 2      |
| 24 | 2,5    |
| 24 | 6,5    |
| 24 | -3     |
| 24 | 0,5    |
| 24 | -3     |
| 24 | -2,75  |
| 24 | -4,75  |
| 24 | -4,625 |
| 24 | -4,5   |
| 24 | -5,5   |
| 24 | 4,25   |
| 24 | 10,5   |
| 24 | -3     |
| 24 | -3     |
| 24 | -6     |

# Étalonner le logiciel



1. Entrer le soulèvement mesuré à la bonne date
2. S'il y a une différence avec le soulèvement prédit, ajuster les paramètres de gel des matériaux
3. Valider que le soulèvement mesuré correspond à celui prédit

# Étalonner le logiciel

Exemple sol\_géif\_Existant2 - Gel et soulèvement

**Couches de matériaux**

| Matériau                     | H (mm) | P d (t/m <sup>2</sup> ) | Eau (%) | SPo (mm <sup>2</sup> /KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | Ku (W/mK) | Kf   | Sr (%) | Lf (Wh/m <sup>2</sup> ) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|------------------------------|--------|-------------------------|---------|---------------------------|------------------------|-----------|------|--------|-------------------------|---------------------------|
| 1 BB HRD                     | 200    | 2,35                    | 0,0     | 0,0                       |                        | 1,48      | 1,48 | 0      | 1250                    | 28,20                     |
| 2 MG 20                      | 150    | 2,2                     | 1,0     | 0,0                       |                        | 1,29      | 1,16 | 13     | 1774                    | 2,85                      |
| 3 MG 56                      | 800    | 2,22                    | 1,0     | 0,0                       |                        | 1,33      | 1,20 | 14     | 1790                    | 15,20                     |
| 4 CL avec Ip > 12 (IL < 0,9) | 1250   | 1,3                     | 20,0    | 3,0                       | 7,0                    | 0,89      | 1,12 | 49     | 15378                   | 8,75                      |
| 5                            |        |                         |         |                           |                        |           |      |        |                         |                           |
| 6                            |        |                         |         |                           |                        |           |      |        |                         |                           |
| 7                            |        |                         |         |                           |                        |           |      |        |                         |                           |
| 8 Roc brisé                  |        | 2,0                     | 2,0     | 0,0                       |                        | 0,85      | 0,85 | 15     | 3468                    |                           |
| <b>Total</b>                 |        |                         |         |                           |                        |           |      |        |                         | <b>55,00</b>              |

STRUCTURAL GEL GEL (1994)  
Grapher Z (m) 1,735 h (mm) 0,074

En faisant passer le SP de 3,0 à 5,0 on obtient le même soulèvement que celui mesuré

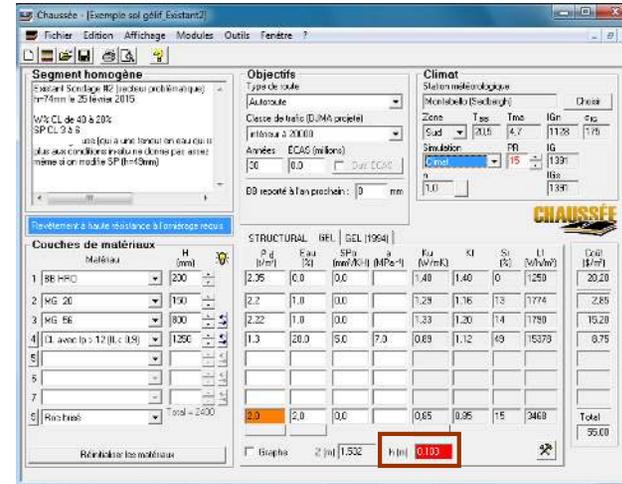
# Étapes (plan d'action)

1. Collecte de données supplémentaires
  - Comportement de la chaussée
2. Simuler la chaussée existante
  - Étalonner le modèle avec les données disponibles
  - Évaluer son comportement théorique
3. **Modifier la structure de chaussée pour obtenir une prévision acceptable (Solution)**

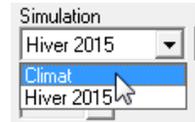


236

# À partir du modèle étalonné



On revient à une simulation d'un climat sur une période de récurrence



On est passé de 60 à 103 mm une fois étalonné!

237

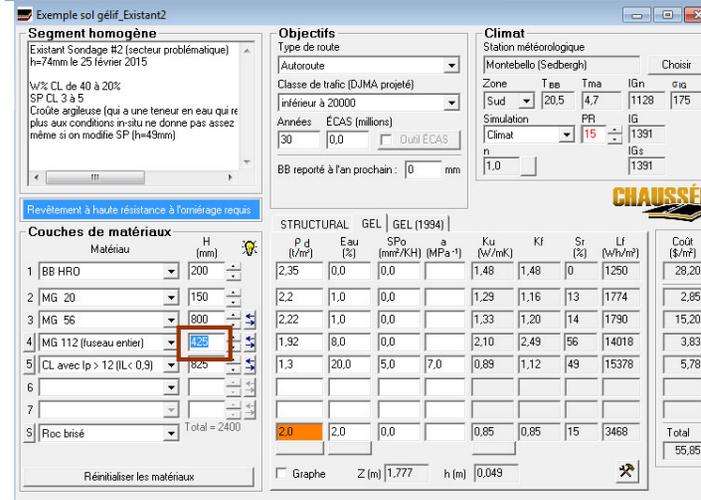
# Recherche de solution

- Simuler les variantes possibles
  - Rehaussement non envisageable
  - Remplacer les matériaux gélifs?
  - Isolation au polystyrène?
  - Construction 2012, pression populaire : réduire le risque d'une contre-performance
  - Considérer le recyclage des matériaux
  - Pas de chemin de déviation possible



238

# Recherche de solution

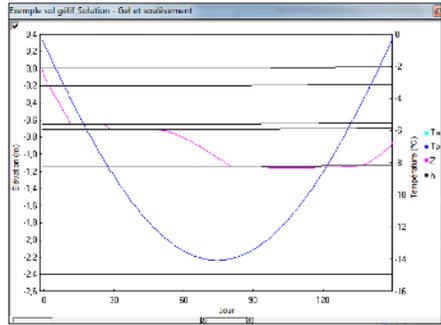


425 mm de MG-112 pour h ≤ 50mm (excaver à 1575 mm)

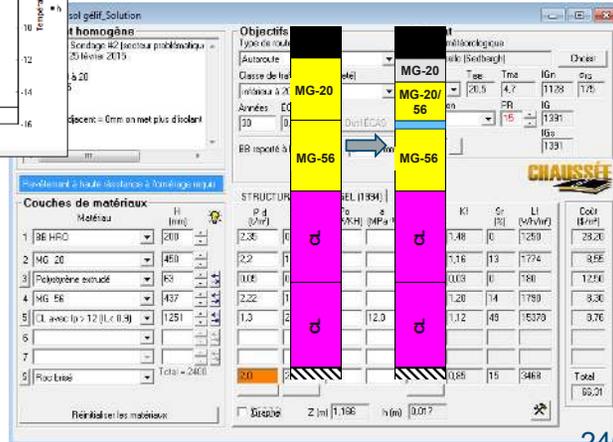
- Travaux en demie-chaussée
- Fond de coupe irrégulier
- Modification des conditions de drainage

239

# Solution finale



Poser 63mm d'isolant recouvert de 450mm de granulaire (excaver à 713 mm)



- Plus d'isolant pour arriver plus près des soulèvements adjacents
- Limite les risques d'une contre-performance
- Épaisseur de la structure de chaussée semblable à existant
- Cylindrage sur MG-56 existant

# Isolation au polystyrène

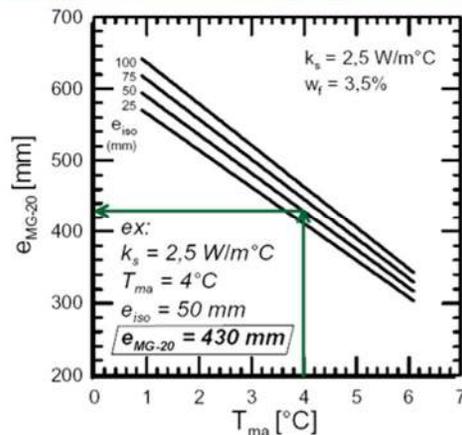
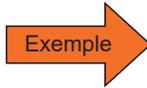
- Consulter l'annexe III du Guide
  - Références normatives
  - Protection contre le givrage
  - Vérification structurale (contrainte sur l'isolant)
  - Amélioration de la zone de transition
- Devis type



# Précaution contre le givrage

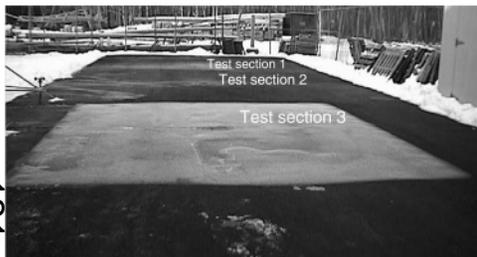
## Critère classique (norme)

- Minimum de 450 mm de MG au-dessus de l'isolant



## Calcul d'optimisation

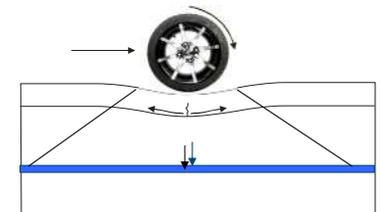
- Voir: **DGLC** (Direction générale du laboratoire des chaussées, Vol. 8, n° 12, 2003)



# Contrainte sur l'isolant

- Profondeur minimale ( $Z_{min}$ )

$$Z_{min} = \left[ \frac{P / (\pi \cdot \sigma_0)}{[1 - \sigma_a / \sigma_0]^{2/3} - 1} \right]^{1/2}$$



- Aucun dommage sur l'isolant lorsque la contrainte n'excède pas 10% de la résistance en compression de l'isolant ( $\sigma_a = 0,1 \cdot R_c$ )

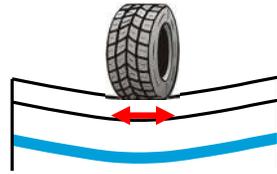
| Rc      | Zmin (mm) | BB minimum avec 450 mm de granulaire |
|---------|-----------|--------------------------------------|
| 250 kPa | 900       | 225                                  |
| 400 kPa | 700       | 125                                  |

Équivalence  $\approx$  2:1 entre MG-20 et BB

# Ajustement de l'épaisseur d'enrobé

**Polystyrène** = matériau très compressible (E = 10-15 MPa)

- Logiciels mécaniques (éléments finis ou multicouches) indiquent une légère augmentation de l'élongation ( $\epsilon_t$ ) à la base de l'enrobé.
- Pas pris en compte dans la méthode AASHTO93 (Chaussée 2)
- Mesure compensatoire suggérée: calcul mécanique ou **ajout d'une épaisseur forfaitaire d'enrobé (+10 mm)**



21

244

# Alternative d'isolation avec du béton

- Matériau très rigide (E ≈ 2500 MPa)
- Permet de diminuer l'épaisseur d'enrobé (environ -20 mm)
- Plus épais que polystyrène pour même pouvoir isolant (plus cher \$\$)
- Utilisation lorsque sol très mou (aspect structural critique)



Béton léger isolant (BLI)  
A55 Melbourne (Pouliot et Savard, 2002)

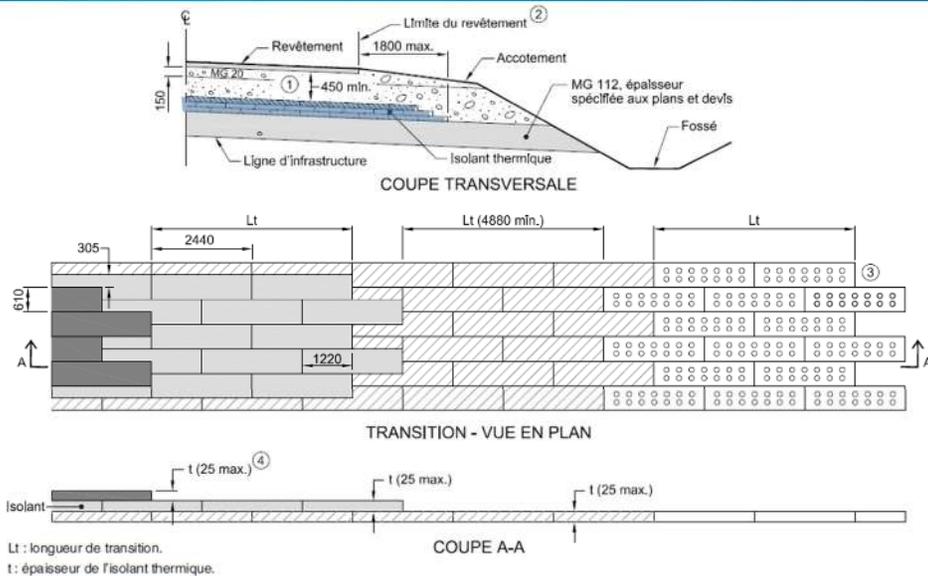
22



Figure n° 4 - Les couches de la structure de chaussée en déblai.  
Dalle de béton sur panneaux de polystyrène  
A30 Montréal (Michel Vaillancourt, 2012):

245

# Isolation au polystyrène - transition



122

246



# Dimensionnement structural des chaussées souples

Nappe phréatique et sols saturés



# Effet de la teneur en eau

- Dimensionnement pour une autoroute
- Localisation: Laurierville
- DJMA > 20 000, 53,65 millions d'ECAS
- Sol d'infrastructure =  $SM_{fin}$ 
  - Teneur en eau supposée = 15% ( $S_r = 82\%$ )
  - Teneur en eau réelle = 18% ( $S_r = 100\%$ )

Quel est l'incidence sur le soulèvement au gel et sur le dimensionnement



Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

**Segment homogène**  
NE PAS OUBLIER:  
- Objectifs et Climat  
- Durée de vie recommandée = valeur par défaut  
- Sol de support  
- Valider la stratigraphie  
- Paramètres des matériaux  
- Épaisseurs requises (STRUCTURAL ET GEL)

**Objectifs**  
Type de route: Autoroute  
Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
Années: 30, ECAS (millions): 53,65, Outil ECAS:

**Climat**  
Station météorologique: Laurierville  
Zone: Sud, T<sub>BB</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 4,4, I<sub>Gn</sub>: 1203, σ<sub>IG</sub>: 226  
Simulation: PR, IG: 1542  
Climat: 15, IGs: 1542  
n: 1,0

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

**Revêtement à haute résistance à l'ornièrage requis**

**Couches de matériaux**

| Matériau                      | H (mm)      | F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | W18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|-------------|------|-------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|---------------------------|
| 1 BB                          | 100         | 1,00 | 2894              | 0,43                  | 1,0 | 1,7  | 0,232             | 14,10                     |
| 2 MG 20                       | 200         | 1,00 | 203               | 0,14                  | 0,8 | 2,55 | 0,28              | 3,80                      |
| 3 MG 112 (fuseau entier)      | 500         | 1,00 | 78                | 0,08                  | 0,8 | 3,83 | 0,34              | 4,50                      |
| 4                             |             |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 5                             |             |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 6                             |             |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 7                             |             |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 8 SM fin (plus de 30 % passe) | Total = 800 | 1,00 | 45                |                       |     |      |                   |                           |

→ Équivalences d'été (FAS = 0,65)  
Mr = 69 MPa  
CBR = 11,3

Total: 22,40

Réinitialiser les matériaux

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

**Segment homogène**  
NE PAS OUBLIER:  
- Objectifs et Climat  
- Durée de vie recommandée = valeur par défaut  
- Sol de support  
- Valider la stratigraphie  
- Paramètres des matériaux  
- Épaisseurs requises (STRUCTURAL ET GEL)

**Objectifs**  
Type de route: Autoroute  
Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
Années: 30, ECAS (millions): 53,65, Outil ECAS:

**Climat**  
Station météorologique: Laurierville  
Zone: Sud, T<sub>BB</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 4,4, I<sub>Gn</sub>: 1203, σ<sub>IG</sub>: 226  
Simulation: PR, IG: 1542  
Climat: 15, IGs: 1542  
n: 1,0

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

**Revêtement à haute résistance à l'ornièrage requis**

**Couches de matériaux**

| Matériau                      | H (mm)      | F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | W18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|-------------|------|-------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|---------------------------|
| 1 BB HRD                      | 280         | 1,00 | 3592              | 0,47                  | 1,0 | 5,19 | 57,822            | 39,48                     |
| 2 MG 20                       | 300         | 1,00 | 110               | 0,07                  | 0,8 | 5,85 | 54,444            | 5,70                      |
| 3 MG 112 (fuseau entier)      | 400         | 1,00 | 74                | 0,08                  | 0,8 | 6,79 | 55,574            | 3,60                      |
| 4                             |             |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 5                             |             |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 6                             |             |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 7                             |             |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 8 SM fin (plus de 30 % passe) | Total = 980 | 1,00 | 45                |                       |     |      |                   |                           |

→ Équivalences d'été (FAS = 0,65)  
Mr = 69 MPa  
CBR = 11,3

Total: 48,78

Réinitialiser les matériaux

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

NE PAS OUBLIER:

- Objectifs et Climat
- Durée de vie recommandée = valeur par défaut
- Sol de support
- Valider la stratigraphie
- Paramètres des matériaux
- Épaisseurs requises (STRUCTURAL ET GEL)

Objectifs

Type de route: Autoroute

Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000

Années: 30 ÉCAS (millions): 53.65

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Laurierville

Zone: Sud T<sub>BB</sub>: 20.5 T<sub>ma</sub>: 4.4 I<sub>GN</sub>: 1203 σ<sub>IG</sub>: 226

Simulation: PR IG

Climat: 15 I<sub>GS</sub>: 1542

n: 1.0 I<sub>GS</sub>: 1542

CHAUSSEE

Revêtement à haute résistance à l'ornièrage requis

Couches de matériaux

| Matériau                      | H (mm) | P <sub>d</sub> (t/m <sup>2</sup> ) | Eau (%) | SP <sub>o</sub> (mm <sup>2</sup> /KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | K <sub>u</sub> (W/mK) | K <sub>f</sub> | S <sub>r</sub> (%) | L <sub>f</sub> (Wh/m <sup>2</sup> ) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|--------|------------------------------------|---------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|--------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                      | 280    | 2.35                               | 0.0     | 0.0                                   |                        | 1.48                  | 1.48           | 0                  | 1250                                | 39.48                     |
| 2 MG 20                       | 300    | 2.2                                | 4.0     | 0.0                                   |                        | 1.77                  | 1.89           | 52                 | 7897                                | 5.70                      |
| 3 MG 112 (fuseau entier)      | 400    | 1.92                               | 8.0     | 0.0                                   |                        | 2.10                  | 2.49           | 56                 | 14018                               | 3.60                      |
| 4                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 5                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 6                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 7                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 8 SM fin (plus de 30 % passe) |        | 1.8                                | 15.0    | 4.0                                   | 11.0                   | 1.85                  | 2.39           | 82                 | 21802                               |                           |
| Total = 980                   |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     | 48.78                     |

Z (m): 2,112 h (m): 0,052

Réinitialiser les matériaux

251

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

NE PAS OUBLIER:

- Objectifs et Climat
- Durée de vie recommandée = valeur par défaut
- Sol de support
- Valider la stratigraphie
- Paramètres des matériaux
- Épaisseurs requises (STRUCTURAL ET GEL)

Objectifs

Type de route: Autoroute

Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000

Années: 30 ÉCAS (millions): 53.65

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Laurierville

Zone: Sud T<sub>BB</sub>: 20.5 T<sub>ma</sub>: 4.4 I<sub>GN</sub>: 1203 σ<sub>IG</sub>: 226

Simulation: PR IG

Climat: 15 I<sub>GS</sub>: 1542

n: 1.0 I<sub>GS</sub>: 1542

CHAUSSEE

Revêtement à haute résistance à l'ornièrage requis

Couches de matériaux

| Matériau                      | H (mm) | P <sub>d</sub> (t/m <sup>2</sup> ) | Eau (%) | SP <sub>o</sub> (mm <sup>2</sup> /KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | K <sub>u</sub> (W/mK) | K <sub>f</sub> | S <sub>r</sub> (%) | L <sub>f</sub> (Wh/m <sup>2</sup> ) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|--------|------------------------------------|---------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|--------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                      | 280    | 2.35                               | 0.0     | 0.0                                   |                        | 1.48                  | 1.48           | 0                  | 1250                                | 39.48                     |
| 2 MG 20                       | 300    | 2.2                                | 4.0     | 0.0                                   |                        | 1.77                  | 1.89           | 52                 | 7897                                | 5.70                      |
| 3 MG 112 (fuseau entier)      | 450    | 1.92                               | 8.0     | 0.0                                   |                        | 2.10                  | 2.49           | 56                 | 14018                               | 4.05                      |
| 4                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 5                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 6                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 7                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 8 SM fin (plus de 30 % passe) |        | 1.8                                | 15.0    | 4.0                                   | 11.0                   | 1.85                  | 2.39           | 82                 | 21802                               |                           |
| Total = 1030                  |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     | 49.23                     |

Z (m): 2,122 h (m): 0,050

Réinitialiser les matériaux

252

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

NE PAS OUBLIER:

- Objectifs et Climat
- Durée de vie recommandée = valeur par défaut
- Sol de support
- Valider la stratigraphie
- Paramètres des matériaux
- Épaisseurs requises (STRUCTURAL ET GEL)

Objectifs

Type de route: Autoroute

Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000

Années: 30 ÉCAS (millions): 53.65

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Laurierville

Zone: Sud T<sub>BB</sub>: 20.5 T<sub>ma</sub>: 4.4 I<sub>GN</sub>: 1203 σ<sub>IG</sub>: 226

Simulation: PR IG

Climat: 15 I<sub>GS</sub>: 1542

n: 1.0 I<sub>GS</sub>: 1542

CHAUSSEE

Revêtement à haute résistance à l'ornièrage requis

Couches de matériaux

| Matériau                      | H (mm) | P <sub>d</sub> (t/m <sup>2</sup> ) | Eau (%) | SP <sub>o</sub> (mm <sup>2</sup> /KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | K <sub>u</sub> (W/mK) | K <sub>f</sub> | S <sub>r</sub> (%) | L <sub>f</sub> (Wh/m <sup>2</sup> ) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|--------|------------------------------------|---------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|--------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                      | 280    | 2.35                               | 0.0     | 0.0                                   |                        | 1.48                  | 1.48           | 0                  | 1250                                | 39.48                     |
| 2 MG 20                       | 300    | 2.2                                | 4.0     | 0.0                                   |                        | 1.77                  | 1.89           | 52                 | 7897                                | 5.70                      |
| 3 MG 112 (fuseau entier)      | 450    | 1.92                               | 8.0     | 0.0                                   |                        | 2.10                  | 2.49           | 56                 | 14018                               | 4.05                      |
| 4                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 5                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 6                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 7                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 8 SM fin (plus de 30 % passe) |        | 1.8                                | 18.0    | 4.0                                   | 11.0                   | 1.94                  | 2.83           | 98                 | 26812                               |                           |
| Total = 1030                  |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     | 49.23                     |

Z (m): 2,059 h (m): 0,070

Réinitialiser les matériaux

253

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

NE PAS OUBLIER:

- Objectifs et Climat
- Durée de vie recommandée = valeur par défaut
- Sol de support
- Valider la stratigraphie
- Paramètres des matériaux
- Épaisseurs requises (STRUCTURAL ET GEL)

Objectifs

Type de route: Autoroute

Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000

Années: 30 ÉCAS (millions): 53.65

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Laurierville

Zone: Sud T<sub>BB</sub>: 20.5 T<sub>ma</sub>: 4.4 I<sub>GN</sub>: 1203 σ<sub>IG</sub>: 226

Simulation: PR IG

Climat: 15 I<sub>GS</sub>: 1542

n: 1.0 I<sub>GS</sub>: 1542

CHAUSSEE

Revêtement à haute résistance à l'ornièrage requis

Couches de matériaux

| Matériau                      | H (mm) | P <sub>d</sub> (t/m <sup>2</sup> ) | Eau (%) | SP <sub>o</sub> (mm <sup>2</sup> /KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | K <sub>u</sub> (W/mK) | K <sub>f</sub> | S <sub>r</sub> (%) | L <sub>f</sub> (Wh/m <sup>2</sup> ) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|--------|------------------------------------|---------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|--------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                      | 280    | 2.35                               | 0.0     | 0.0                                   |                        | 1.48                  | 1.48           | 0                  | 1250                                | 39.48                     |
| 2 MG 20                       | 300    | 2.2                                | 4.0     | 0.0                                   |                        | 1.77                  | 1.89           | 52                 | 7897                                | 5.70                      |
| 3 MG 112 (fuseau entier)      | 825    | 1.92                               | 8.0     | 0.0                                   |                        | 2.10                  | 2.49           | 56                 | 14018                               | 7.43                      |
| 4                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 5                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 6                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 7                             |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 8 SM fin (plus de 30 % passe) |        | 1.8                                | 18.0    | 4.0                                   | 11.0                   | 1.94                  | 2.83           | 98                 | 26812                               |                           |
| Total = 1405                  |        |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     | 52.61                     |

Z (m): 2,145 h (m): 0,049

Réinitialiser les matériaux

254

# Prise en compte de la position de la nappe phréatique

- Conditions de site identiques
- Variante: nappe phréatique à 500 mm sous la ligne d'infrastructure

Quel sera l'incidence sur le dimensionnement



255

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

**Segment homogène**

NE PAS OUBLIER:  
 - Objectifs et Climat  
 - Durée de vie recommandée = valeur par défaut  
 - Sol de support  
 - Valider la stratigraphie  
 - Paramètres des matériaux  
 - Épaisseurs requises (STRUCTURAL ET GEL)

**Objectifs**

Type de route: Autoroute  
 Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
 Années: 30, ECAS (millions): 53,65, Outil ECAS:   
 BB reporté à l'an prochain: 0 mm

**Climat**

Station météorologique: Laurierville  
 Zone: Sud, T<sub>EB</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 4,4, IG<sub>n</sub>: 1203, σ<sub>IG</sub>: 226  
 Simulation: 15, PR: IG, Climat: 1542, n: 1,0, IG<sub>s</sub>: 1542

**Couches de matériaux**

| Matériau                      | H (mm)       | P <sub>d</sub> (t/m <sup>2</sup> ) | Eau (%) | SP <sub>o</sub> (mm <sup>2</sup> /KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | K <sub>u</sub> (W/mK) | K <sub>f</sub> | S <sub>r</sub> (%) | L <sub>f</sub> (Wh/m <sup>2</sup> ) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|--------------|------------------------------------|---------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|--------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                      | 280          | 2,35                               | 0,0     | 0,0                                   |                        | 1,48                  | 1,48           | 0                  | 1250                                | 39,48                     |
| 2 MG 20                       | 300          | 2,2                                | 4,0     | 0,0                                   |                        | 1,77                  | 1,89           | 52                 | 7897                                | 5,70                      |
| 3 MG 112 (fuseau entier)      | 450          | 1,92                               | 8,0     | 0,0                                   |                        | 2,10                  | 2,49           | 56                 | 14018                               | 4,05                      |
| 4                             |              |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 5                             |              |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 6                             |              |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 7                             |              |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 8                             |              |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 9 SM fin (plus de 30 % passe) | Total = 1030 | 1,8                                | 15,0    | 4,0                                   | 11,0                   | 1,85                  | 2,39           | 82                 | 21802                               | Total 49,23               |

Reinitialiser les matériaux

Graphe Z (m) 2,122 h (m) 0,050

256

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

**Segment homogène**

NE PAS OUBLIER:  
 - Objectifs et Climat  
 - Durée de vie recommandée = valeur par défaut  
 - Sol de support  
 - Valider la stratigraphie  
 - Paramètres des matériaux  
 - Épaisseurs requises (STRUCTURAL ET GEL)

**Objectifs**

Type de route: Autoroute  
 Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
 Années: 30, ECAS (millions): 53,65, Outil ECAS:   
 BB reporté à l'an prochain: 0 mm

**Climat**

Station météorologique: Laurierville  
 Zone: Sud, T<sub>EB</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 4,4, IG<sub>n</sub>: 1203, σ<sub>IG</sub>: 226  
 Simulation: 15, PR: IG, Climat: 1542, n: 1,0, IG<sub>s</sub>: 1542

**Couches de matériaux**

| Matériau                      | H (mm)       | P <sub>d</sub> (t/m <sup>2</sup> ) | Eau (%) | SP <sub>o</sub> (mm <sup>2</sup> /KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | K <sub>u</sub> (W/mK) | K <sub>f</sub> | S <sub>r</sub> (%) | L <sub>f</sub> (Wh/m <sup>2</sup> ) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|--------------|------------------------------------|---------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|--------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                      | 280          | 2,35                               | 0,0     | 0,0                                   |                        | 1,48                  | 1,48           | 0                  | 1250                                | 39,48                     |
| 2 MG 20                       | 300          | 2,2                                | 4,0     | 0,0                                   |                        | 1,77                  | 1,89           | 52                 | 7897                                | 5,70                      |
| 3 MG 112 (fuseau entier)      | 450          | 1,92                               | 8,0     | 0,0                                   |                        | 2,10                  | 2,49           | 56                 | 14018                               | 4,05                      |
| 4 SM fin (plus de 30 % passe) | 500          | 1,8                                | 15,0    | 4,0                                   | 11,0                   | 1,85                  | 2,39           | 82                 | 21802                               | 3,50                      |
| 5                             |              |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 6                             |              |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 7                             |              |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 8                             |              |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 9 SM fin (plus de 30 % passe) | Total = 1530 | 1,8                                | 18,0    | 4,0                                   | 11,0                   | 1,94                  | 2,83           | 98                 | 26812                               | Total 52,73               |

Reinitialiser les matériaux

Graphe Z (m) 2,065 h (m) 0,059

257

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

**Segment homogène**

NE PAS OUBLIER:  
 - Objectifs et Climat  
 - Durée de vie recommandée = valeur par défaut  
 - Sol de support  
 - Valider la stratigraphie  
 - Paramètres des matériaux  
 - Épaisseurs requises (STRUCTURAL ET GEL)

**Objectifs**

Type de route: Autoroute  
 Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
 Années: 30, ECAS (millions): 53,65, Outil ECAS:   
 BB reporté à l'an prochain: 0 mm

**Climat**

Station météorologique: Laurierville  
 Zone: Sud, T<sub>EB</sub>: 20,5, T<sub>ma</sub>: 4,4, IG<sub>n</sub>: 1203, σ<sub>IG</sub>: 226  
 Simulation: 15, PR: IG, Climat: 1542, n: 1,0, IG<sub>s</sub>: 1542

**Couches de matériaux**

| Matériau                      | H (mm)       | P <sub>d</sub> (t/m <sup>2</sup> ) | Eau (%) | SP <sub>o</sub> (mm <sup>2</sup> /KH) | a (MPa <sup>-1</sup> ) | K <sub>u</sub> (W/mK) | K <sub>f</sub> | S <sub>r</sub> (%) | L <sub>f</sub> (Wh/m <sup>2</sup> ) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|--------------|------------------------------------|---------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------|--------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                      | 280          | 2,35                               | 0,0     | 0,0                                   |                        | 1,48                  | 1,48           | 0                  | 1250                                | 39,48                     |
| 2 MG 20                       | 300          | 2,2                                | 4,0     | 0,0                                   |                        | 1,77                  | 1,89           | 52                 | 7897                                | 5,70                      |
| 3 MG 112 (fuseau entier)      | 625          | 1,92                               | 8,0     | 0,0                                   |                        | 2,10                  | 2,49           | 56                 | 14018                               | 5,63                      |
| 4 SM fin (plus de 30 % passe) | 500          | 1,8                                | 15,0    | 4,0                                   | 11,0                   | 1,85                  | 2,39           | 82                 | 21802                               | 3,50                      |
| 5                             |              |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 6                             |              |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 7                             |              |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 8                             |              |                                    |         |                                       |                        |                       |                |                    |                                     |                           |
| 9 SM fin (plus de 30 % passe) | Total = 1705 | 1,8                                | 18,0    | 4,0                                   | 11,0                   | 1,94                  | 2,83           | 98                 | 26812                               | Total 54,31               |

Reinitialiser les matériaux

Graphe Z (m) 2,112 h (m) 0,049

258

125



## Dimensionnement structural des chaussées souples

Exemple renforcement bitumineux



## Autoroute existante

- Zone sud, 4 voies (2 par direction)
- Environs 1 million d'ÉCAS par année
  - DJMA = 25 000, 12 % de camions
    - Coefficient d'agressivité moyen = 2.7 (milieu rural)
    - Accroissement de 0,6 % / an
- **EB** (200 mm): Fissure transversale aux 10 m et fissuration longitudinale en pistes de roues sévérité faible à moyenne.
- **MG-20** (300 mm) et **MG-112** (600 mm): Qualité conforme aux normes
- **Sol**: Sable silteux avec 20% de particules fines
- Délais insuffisants pour essais de déflexion FWD

Déterminez l'épaisseur de recouvrement requise



**Chaussée - [9\_Resurfacement]**

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

**Segment homogène** Objectifs Climat

NE PAS OUBLIER: Objectifs et Climat

- Durée de vie recommandée =
  - > Valeur par défaut sur chaussée intacte
  - > 15 ans sur chaussée fissurée
  - > 10 ans sur chaussée extrêmement fissurée
  - > ajouter 5 ans avec membrane élastomère et ECF
- Sol de support
  - Valider la stratigraphie
  - Paramètres des matériaux

**15 ans (typique)**

**Couche de matériaux**

| Matériau                 | H (mm)      |
|--------------------------|-------------|
| 1 BB                     | 45          |
| 2 BB fissuré             | 150         |
| 3 MG 20                  | 225         |
| 4 MG 112 (fuseau entier) | 300         |
| 5                        |             |
| 6                        |             |
| 7                        |             |
| CL, ML, CH, MH (IL>=0,9) | Total = 720 |

Réinitialiser les matériaux

**Ouvrir (Coupe type d'intervention)**

Regarder dans : CoupesTypes

- 1-Nouvelle route.cha
- 2-Isolation thermique.cha
- 3-Décohésionnement et rechargement granulaire.cha
- 4-Décohésionnement et stabilisation.cha
- 5-Décohésionnement.cha
- 6-Rubblizing.cha
- 7-Rechargement granulaire en sandwich.cha
- 8-Recyclage à froid d'enrobé (RFE).cha
- 9-Resurfacement.cha

Nom du fichier: [ ] Ouvrir

Fichiers de type: Fichier Chaussée (\*.cha) Annuler

Ouvrir en lecture seule

## ÉCAS

**Outil de calcul du nombre d'ÉCAS**

**Prévision du trafic**

Année du comptage: 2012 | Année du projet: 2014

DJMA du comptage: 25 000 | DJMA actualisé: 25 301

Durée de vie (en années): 15 | g (%): 0.6 | f.a. (jours/an): 15.65 | Nirs: 300

**Agressivité du trafic**

Proportion de véhicules lourds (%): 12.0

**Coefficient d'agressivité moyen (CAM)**

Valeur par défaut | Rural | Autoroute

Classification |  Saisie directe | CAM: 2.70

**Répartition du trafic lourd sur les voies**

Nombre de voies par direction: [ ]

1 voie |  2 voies |  3 voies

|                                       | Fraction par voie (%) | Trafic par voie (DJMA) | FS  | ÉCAS par voie (en millions) | Voie de référence                         |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------|-----|-----------------------------|---|
| <b>Direction 1</b>                    |                       |                        |     |                             |   |
| Fraction du trafic en direction 1 (%) | 50.0                  | 78.3                   | 1.0 | 15.065                      | <input type="radio"/> Voie 1              |
| DJMA projeté pour la direction 1      | 21.7                  | 2 863                  | 1.0 | 4.175                       | <input type="radio"/> Voie 2              |
| <b>Direction 2</b>                    |                       |                        |     |                             |   |
| Fraction du trafic en direction 2 (%) | 50.0                  | 78.3                   | 1.0 | 15.065                      | <input type="radio"/> Voie 3              |
| DJMA projeté pour la direction 2      | 21.7                  | 2 863                  | 1.0 | 4.175                       | <input type="radio"/> Voie 2              |
|                                       |                       | 78.3                   | 1.0 | 15.065                      | <input checked="" type="radio"/> Voie max |

**Norme pour faible trafic**

DJMA corrigé: 31 670

DJMA projeté: 26 392 | ÉCAS projeté (millions): 15.065

Fermer

# Enrobé fissuré

| Fissuration de la surface  | Coefficient structural |                      |
|--|------------------------|----------------------|
|  | Revêtement bitumineux  | Fondation stabilisée |
| Peu ou pas de carrelage  |                        |                      |
| Fissuration transversale de faible sévérité                          | 0,35 à 0,40            | 0,20 à 0,35          |
| < 10 % carrelage de faible sévérité                                  |                        |                      |
| < 1 fissure transversale tous les 6 m (sévérité moyenne et élevée)   | 0,25 à 0,35            | 0,15 à 0,25          |
| > 10 % carrelage de faible sévérité                                  |                        |                      |
| < 10 % fissuration de fatigue de sévérité moyenne                    | 0,20 à 0,30            | 0,15 à 0,20          |
| > 1 fissure transversale tous les 3-6 m (sévérité moyenne et élevée) |                        |                      |
| > 10 % carrelage de sévérité moyenne                                 |                        |                      |
| < 10 % carrelage de sévérité élevée                                  | 0,14 à 0,20            | 0,10 à 0,20          |
| > 1 fissure transversale tous les 3 m (sévérité moyenne et élevée)   |                        |                      |
| > 10 % carrelage de sévérité élevée                                  |                        |                      |
| > 1 fissure transversale tous les 3 m (sévérité élevée)              | 0,08 à 0,15            | 0,08 à 0,15          |

Notes :

- Le remplacement des zones sévèrement fissurées est recommandé avant tout resurfaçage.
- Les taux de fissuration à considérer sont ceux qui restent à la suite des réparations.
- Carottage et essais recommandés pour évaluation de tous les matériaux et à plus forte raison dans le cas des couches stabilisées.
- Les fondations ou sous-fondations granulaires dégradées ou contaminées par des particules fines peuvent avoir un coefficient structural inférieur à 0,1 et un coefficient de drainage réduit.
- Le concepteur peut faire intervenir tout autre type de dégradation jugé approprié pour justifier l'ajustement du coefficient structural d'une couche.

263

# Recouvrement

**Segment homogène**

NE PAS OUBLIER:  
 - Objectifs et Climat  
 - Durée de vie recommandée =  
 -> Valeur par défaut sur chaussée intacte  
 -> 15 ans sur chaussée fissurée  
 -> 10 ans sur chaussée extrêmement fissurée  
 -> ajouter 5 ans avec membrane élastomère  
 - Sol de support  
 - Valider la stratigraphie  
 - Paramètres des matériaux

**Objectifs**

Type de route: Autoroute  
 Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
 Années: 15, ÉCAS (millions): 15.065, Outil ÉCAS:

**Climat**

Station météorologique: Sorel  
 Zone: Sud, T<sub>bb</sub>: 20.5, T<sub>ma</sub>: 5.44, I<sub>Gn</sub>: 1099, σ<sub>IG</sub>: 223  
 Simulation: PR, IG: 1338  
 n: 1.0, IG<sub>s</sub>: 1338

**Couches de matériaux**

| Matériau                      | H (mm) | F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | w18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|--------|------|-------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                      | 80     | 1.00 | 3592              | 0.47                  | 1.0 | 1.11 | 2.831             | 8.46                      |
| 2 BB fissuré                  | 200    | 1.00 | 1573              | 0.32                  | 1.0 | 3.65 | 7.173             | 0.00                      |
| 3 MG 20                       | 300    | 1.00 | 123               | 0.08                  | 0.8 | 4.42 | 7.468             | 0.00                      |
| 4 MG 112 (fuseau entier)      | 600    | 1.00 | 74                | 0.08                  | 0.8 | 5.84 | 58.528            | 0.00                      |
| 5                             |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 6                             |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 7                             |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 8 SM grossier (moins de 30 %) |        | 1.00 | 76                |                       |     |      |                   |                           |

Total = 1160

Équivalences d'été (FAS = 0.85)  
 Mr = 83 MPa  
 CBR = 17.8

264

# Renforcement requis

**Segment homogène**

NE PAS OUBLIER:  
 - Objectifs et Climat  
 - Durée de vie recommandée =  
 -> Valeur par défaut sur chaussée intacte  
 -> 15 ans sur chaussée fissurée  
 -> 10 ans sur chaussée extrêmement fissurée  
 -> ajouter 5 ans avec membrane élastomère  
 - Sol de support  
 - Valider la stratigraphie  
 - Paramètres des matériaux

**Objectifs**

Type de route: Autoroute  
 Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000  
 Années: 15, ÉCAS (millions): 15.065, Outil ÉCAS:

**Climat**

Station météorologique: Sorel  
 Zone: Sud, T<sub>bb</sub>: 20.5, T<sub>ma</sub>: 5.44, I<sub>Gn</sub>: 1099, σ<sub>IG</sub>: 223  
 Simulation: PR, IG: 1338  
 n: 1.0, IG<sub>s</sub>: 1338

**Couches de matériaux**

| Matériau                      | H (mm) | F Mr | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | w18 (en millions) | Coût (\$/m <sup>2</sup> ) |
|-------------------------------|--------|------|-------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|---------------------------|
| 1 BB HRO                      | 80     | 1.00 | 3592              | 0.47                  | 1.0 | 1.67 | 24.186            | 12.69                     |
| 2 BB fissuré                  | 200    | 1.00 | 1573              | 0.32                  | 1.0 | 4.21 | 15.794            | 0.00                      |
| 3 MG 20                       | 300    | 1.00 | 117               | 0.08                  | 0.8 | 4.92 | 15.655            | 0.00                      |
| 4 MG 112 (fuseau entier)      | 600    | 1.00 | 74                | 0.08                  | 0.8 | 6.35 | 110.16            | 0.00                      |
| 5                             |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 6                             |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 7                             |        |      |                   |                       |     |      |                   |                           |
| 8 SM grossier (moins de 30 %) |        | 1.00 | 76                |                       |     |      |                   |                           |

Total = 1190

Équivalences d'été (FAS = 0.85)  
 Mr = 83 MPa  
 CBR = 17.8

265

# Dimensionnement structural des chaussées souples

Conception en milieu « Non homogène »

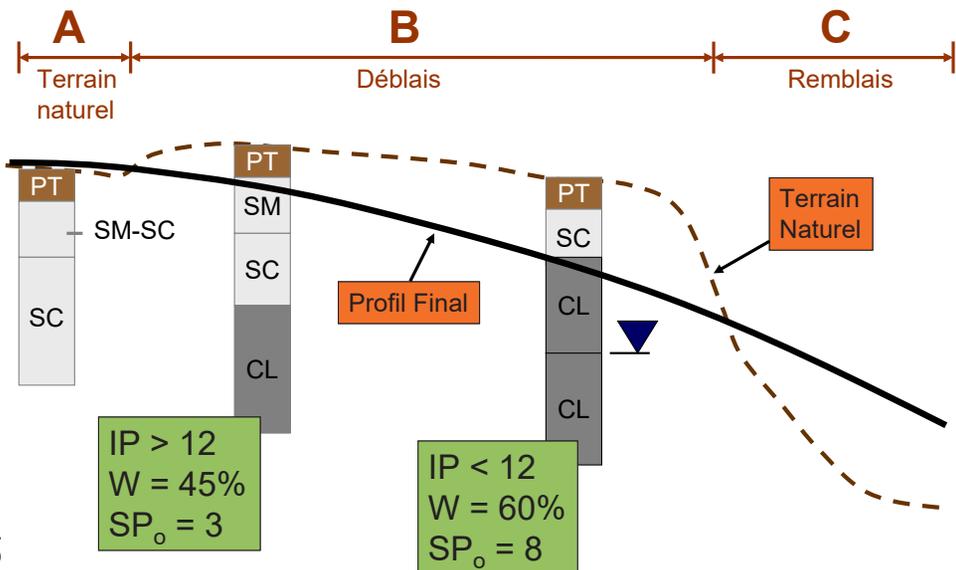


## Données

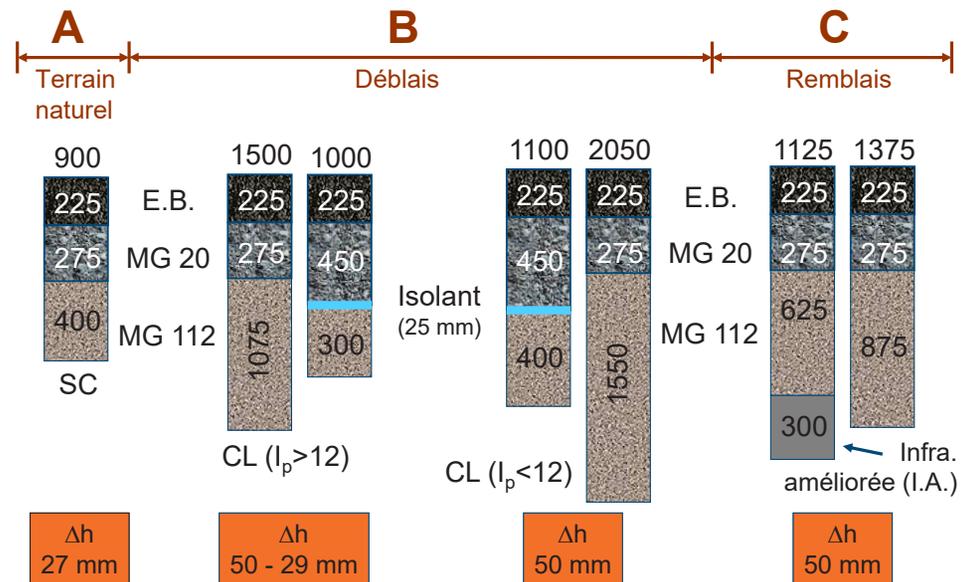
- Route Nationale
- $ECAS_{30ans} = 23,5$  Millions
- DJMA = 10 000
- $\Delta h_{admissible} = 50$  mm (secteur en pente)
- $I_g \text{ normal} = 1252$  °C·j
- $I_g \text{ conception} = 1559$  °C·j (1/15 ans)



## Profil



## Structures possibles



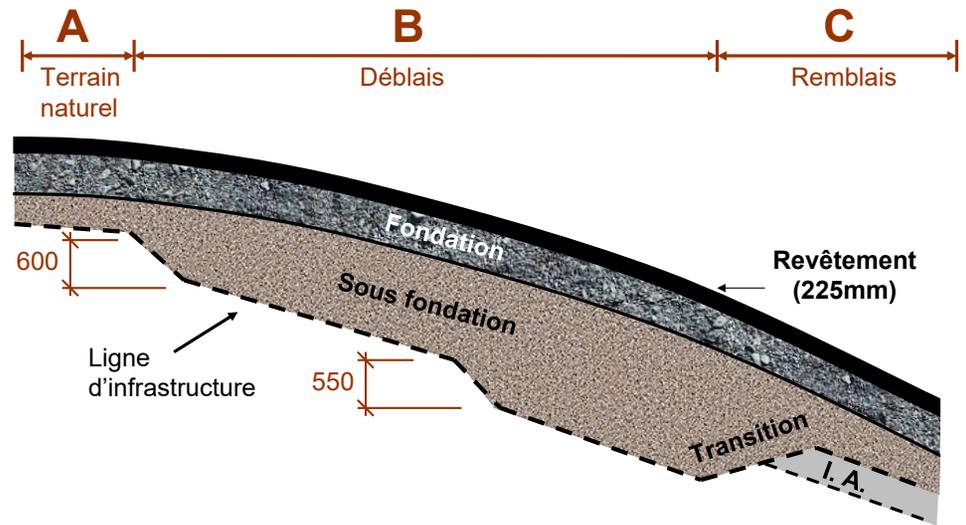
## Points à considérer

- Profondeur des fossés
- Transitions entre les segments en déblai et en remblai
- Disponibilité et coûts des matériaux
- Faisabilité des interventions proposées
- Quantité de remblais/déblais



270

## Option 1



271

## Option 1

- Plus grande quantité de remblais/déblais
- Grande disponibilité de MG 112
- Stabilité des talus (secteur B)
- Drainage du fond de coupe
- Faisabilité: Plus difficile sous trafic



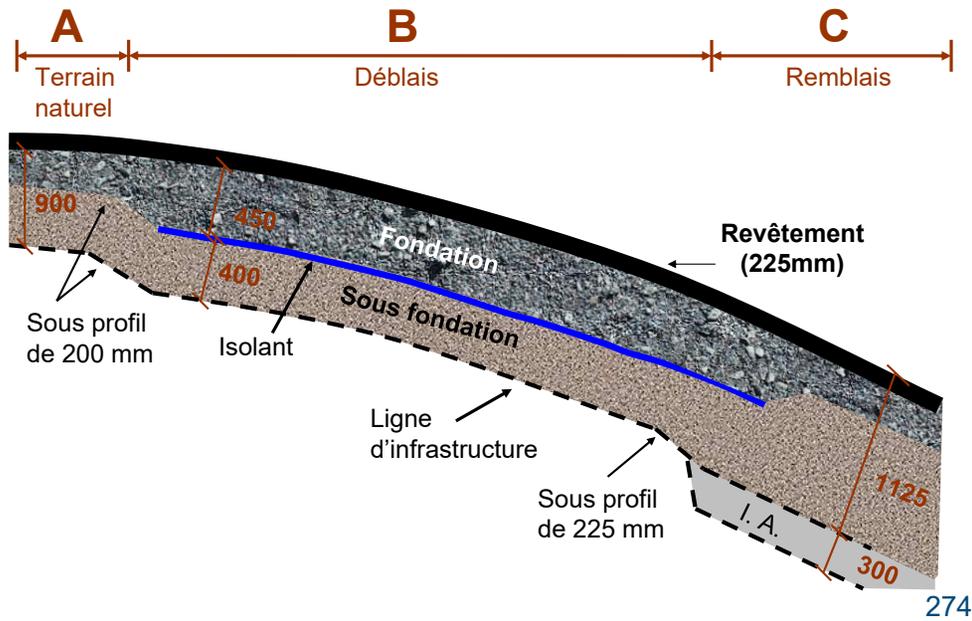
272

## Option 1



273

## Option 2



274

## Option 2



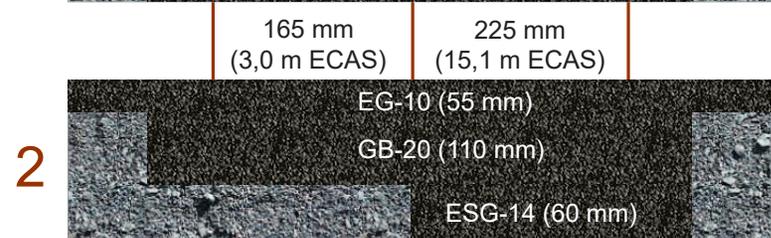
275

## Option 2

- Faible quantité de remblais/déblais (terrassement similaire p/r secteurs adjacents)
- Coût élevé pour le MG 112
- Plus grande stabilité des talus (secteur B) pendant les travaux
- Faisabilité
  - Pas de terrassement en milieu saturé
  - Travaux possibles sous trafic

## Chaussée asymétrique

| Accotement gauche | Voie gauche             | Voie droite             | Accotement droit |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|
|                   | 215 mm<br>(11,7 m ECAS) | 215 mm<br>(11,7 m ECAS) |                  |



Économie: 8-10 %

Augmentation durée de vie: 30 %

276

277

## Chaussée asymétrique



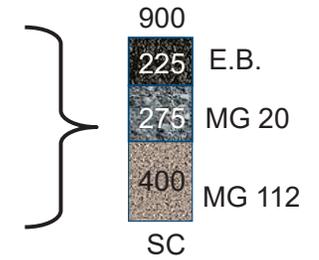
278

## Conclusion

- Faire une conception par secteur homogène

- Considérer les aspects:

- Faisabilité/coût
- Remblai/déblai
- Disponibilité des matériaux
- Drainage



- Potentiel d'une chaussée asymétrique

- 2 voies/direction
- Secteur en pente (voie pour les camions)

279





# Direction générale du Laboratoire des chaussées



Guide de l'utilisateur

Denis St-Laurent, ing. M. Sc.  
Ministère des Transports du Québec  
Direction des chaussées

Québec, le 12 juillet 2006  
Date de mise à jour : 26 août 2019.

## TABLE DES MATIÈRES

### LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

|  |           |
|--|-----------|
| INTRODUCTION .....   | 1         |
| <b>1 - CONFIGURATION MINIMALE REQUISE .....</b>  | <b>2</b>  |
| <b>2 - NOUVEAUTÉS DANS LA VERSION ACTUELLE (version 2.0) .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>3 - HISTORIQUE DES VERSIONS PRÉCÉDENTES.....</b>  | <b>3</b>  |
| <b>4 - INSTALLATION DU LOGICIEL.....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>5 - SURVOL RAPIDE.....</b>  | <b>5</b>  |
| 5.1 - PARTICULARITÉS DE L'INTERFACE UTILISATEUR .....  | 8         |
| <b>6 - OBJECTIFS DE PERFORMANCE ET DE DURÉE DE VIE.....</b>  | <b>12</b> |
| 6.1 RECOMMANDATION SUR LE CHOIX DE LA DURÉE DE VIE .....   | 13        |
| <b>7 - DÉBITS DE CIRCULATION ET TRAFIC LOURD .....</b>   | <b>14</b> |
| 7.1 - DISTRIBUTION DES CAMIONS SUR LES VOIES .....   | 16        |
| 7.2 - COEFFICIENT D'AGRESSIVITÉ MOYEN (CAM).....   | 17        |
| 7.3 - COEFFICIENT D'AGRESSIVITÉ (CA) POUR UN CAMION DONT LA CHARGE EST CONNUE .....                                  | 18        |
| <b>8 - CLIMAT .....</b>  | <b>21</b> |
| 8.1 ZONE CLIMATIQUE ET TEMPÉRATURE EFFECTIVE DU REVÊTEMENT.....  | 21        |
| 8.2 - TEMPÉRATURES ET INDICES DE GEL .....   | 22        |
| 8.2.1 <i>Transfert de chaleur à la surface (facteur n)</i> .....   | 22        |
| 8.2.2 <i>Édition d'un fichier CLM</i> .....  | 23        |
| <b>9 - CALCUL STRUCTURAL.....</b>  | <b>25</b> |
| 9.1 - ÉQUATION DE L'AASHTO .....   | 25        |
| 9.2 - PRINCIPE D'APPLICATION DE L'ÉQUATION DE L'AASHTO .....   | 27        |
| 9.3 - MODULE DE RÉSILIENCE (MR) .....  | 29        |
| 9.3.1 <i>Variations saisonnières du module de résilience</i> .....   | 30        |
| 9.3.2 <i>Facteur d'étalonnage du module de résilience (FMr)</i> .....  | 32        |
| <b>10 - CALCUL DU GEL .....</b>  | <b>36</b> |
| 10.1 DIMENSIONNEMENT AU GEL ET SEUIL DE SOULÈVEMENT ADMISSIBLE .....   | 36        |
| 10.2 DESCRIPTION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE .....  | 37        |
| 10.3 – GÉLIVITÉ (SP).....  | 39        |
| 10.3.1 <i>Indice de gélivité sans surcharge (SP<sub>0</sub>)</i> .....   | 41        |
| 10.3.2 <i>Coefficient de surcharge (a)</i> .....   | 43        |
| 10.3.3 <i>Sol argileux varvé ou ayant un indice de liquidité élevé (I<sub>L</sub> ≥ 0,9)</i> .....                   | 45        |
| 10.4 – CONDUCTIVITÉ THERMIQUE (K).....   | 45        |
| 10.4.1 <i>Conductivité thermique (K<sub>s</sub>) et masse volumique (ρ<sub>s</sub>) des particules solides</i> ..... | 46        |
| 10.5 – CHALEUR LATENTE DE FUSION (Lf) .....  | 47        |
| 10.6 – MASSES VOLUMIQUES ET VOLUMÉTRIE.....  | 47        |
| 10.7 - SURFACE SPÉCIFIQUE (Ss) ET TENEUR EN EAU GELÉE (WF) OU NON GELÉE (WU).....                                    | 48        |
| 10.8 - ÉTALONNAGE DU CALCUL AVEC DES MESURES DE TERRAIN .....  | 49        |
| <b>11 - CRITÈRE DE GEL DE 1994 .....</b>   | <b>51</b> |
| <b>12 - NORME POUR LES ROUTES À FAIBLE TRAFIC .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>13 - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>14 - POUR COMMUNIQUER AVEC NOUS .....</b>   | <b>58</b> |

### ANNEXES :

- I. Recyclage à froid des enrobés (RFE)
- II. Caractérisation de sol en laboratoire - Instructions pour évaluer la gélivité
- III. Isolation des chaussées

## LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\sigma$ :           | pression ou contrainte (MPa ou kPa)   |
| $\sigma_{IG}$ :      | écart type de l'indice de gel ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{jours}$ )           |
| $\gamma$ :           | poids volumique ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )                                      |
| $\rho$ :             | masse volumique ( $\text{t}/\text{m}^3$ )                                       |
| $\rho_d$ :           | masse volumique sèche ( $\text{t}/\text{m}^3$ )                                 |
| $\rho_s$ :           | masse volumique des particules solides ( $\text{t}/\text{m}^3$ )                |
| $\nu$ :              | coefficient de Poisson  |
| $\Delta\text{PSI}$ : | écart de PSI admis entre l'état initial et l'état final d'une chaussée          |
| $a$ :                | coefficient structural  |
| $a$ :                | coefficient de surcharge pour le potentiel de ségrégation ( $\text{MPa}^{-1}$ ) |
| $a$ :                | rayon de la plaque de chargement d'un essai de déflexion (mm)                   |
| AASHTO :             | American Association of State Highway and Transportation Officials              |
| ASTM :               | American Standard of Testing Materials  |
| BAF:                 | base anti-fatigue   |
| BB :                 | béton bitumineux ou enrobé bitumineux   |
| BNQ :                | Bureau de normalisation du Québec   |
| CA :                 | coefficient d'agressivité (ÉCAS)  |
| CAM :                | coefficient d'agressivité moyen (ÉCAS)  |
| CBR :                | indice de portance californien ( <i>California bearing ratio</i> )              |
| CCDG :               | Cahier des charges et devis généraux  |
| Chi :                | paramètre $\chi$ pour la modélisation de la conductivité thermique              |
| CRREL :              | U.S. Army, Cold Regions Research Engineering Laboratory                         |
| $C_u$ :              | résistance au cisaillement non drainé (kPa)                                     |
| $d_{50FF}$ :         | diamètre moyen des particules fines (passant $80\mu\text{m}$ )                  |
| Dir :                | fraction du camionnage dans une direction                                       |
| DJMA :               | débit journalier moyen annuel   |

|              |   |
|--------------|---|
| $d_r, D_r$ : | déflexion (mm et $\mu\text{m}$ )  |
| dt :         | intervalle de temps (heures)  |
| dVi :        | gonflement du volume interstitiel   |
| dz :         | avancée du front de gel (mm)  |
| dzo :        | avancée du front de gel avant prise en compte du soulèvement (mm)   |
| E :          | module de Young ou d'élasticité (MPa)   |
| ÉCAS :       | équivalent de charge axiale simple de 8160 kg   |
| Eta :        | paramètre $\eta$ pour la modélisation de la conductivité thermique  |
| fa :         | facteur d'accroissement   |
| FAS :        | facteur d'ajustement saisonnier   |
| FMr :        | facteur d'ajustement du module de résilience  |
| FR :         | facteur de route (critère de gel de 1994)   |
| FS :         | facteur de sol (critère de gel de 1994) ou facteur de sécurité (Outil ÉCAS)   |
| g :          | taux d'accroissement annuel (%)   |
| grad T- :    | gradient de refroidissement au front de gel ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ )   |
| grad T+ :    | gradient géothermique ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ )   |
| H :          | épaisseur d'une couche (mm) ou heures   |
| h :          | soulèvement au gel (m)  |
| ho :         | soulèvement au gel causé par le gonflement interstitiel (m)   |
| hs :         | soulèvement au gel causé par la ségrégation des lentilles de glace (m)  |
| HRO :        | haute résistance à l'orniérage  |
| IG :         | indice de gel ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{jours}$ )   |
| IGn :        | indice de gel normal ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{jours}$ )  |
| IGs :        | indice de gel transmis à la surface ( $^{\circ}\text{C}\cdot\text{jours}$ )   |
| $I_L$ :      | indice de liquidité   |
| $I_p$ :      | indice de plasticité  |
| IRI :        | indice de roulement international (m/km)  |
| K :          | Kelvin (identique à Celcius dans les échelles d'unités multiples, ex : $\text{mm}^2/\text{KH} = \text{mm}^2\text{CH}$ ) |

|                  |  |
|------------------|--|
| K1 à K4          | constantes de modélisation du module de résilience   |
| Ka et Kb         | constantes de détermination du coefficient structural  |
| Kappa :          | paramètre $\kappa$ pour la modélisation de la conductivité thermique                                   |
| Kf :             | conductivité thermique à l'état gelé (W/mK)  |
| Ks :             | conductivité thermique des particules solides (W/mK)   |
| Ku :             | conductivité thermique à l'état non gelé (W/mK)  |
| Lf :             | chaleur latente de fusion (Wh/m <sup>3</sup> )   |
| m :              | coefficient de drainage (méthode de l'AASHTO)  |
| MPa :            | mégapascal   |
| Mr :             | module de résilience (MPa)   |
| MTQ :            | Ministère des Transports du Québec   |
| n :              | période de conception en années, porosité ou facteur de transfert de chaleur entre l'air et la surface |
| P :              | profondeur d'une transition (m)  |
| PR :             | période de récurrence de l'indice de gel (années)  |
| PSI :            | indice de viabilité d'une chaussée (échelle de 0 à 5)  |
| q :              | flux de chaleur (W/m <sup>2</sup> ), ou fraction du volume en quartz                                   |
| qf :             | flux de chaleur de fusion (W/m <sup>2</sup> )  |
| qm :             | flux de refroidissement (W/m <sup>2</sup> )  |
| qp :             | flux géothermique (W/m <sup>2</sup> )  |
| qs :             | flux de chaleur de ségrégation (W/m <sup>2</sup> )   |
| Qu :             | teneur en eau non gelée contenue dans le sol gelé (% du volume)  |
| R :              | fiabilité (%) ou résistance thermique (m <sup>2</sup> K/W)   |
| Rf :             | facteur de fines de Rieke et autres (1983)   |
| S :              | coefficient d'intensité du gradient géothermique   |
| S <sub>0</sub> : | erreur standard (écart type)   |
| SN :             | nombre structural (méthode de l'AASHTO)  |
| SP :             | potentiel de ségrégation (indice de gélivité en mm <sup>2</sup> /KH)                                   |

|                    |   |
|--------------------|---|
| SP <sub>0</sub> :  | potentiel de ségrégation sans surcharge (indice de gélivité en mm <sup>2</sup> /KH) |
| Sr :               | degré de saturation   |
| SrCritique :       | seuil de saturation de déclenchement du gonflement interstitiel                     |
| Ss :               | surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)  |
| Ss <sub>FF</sub> : | surface spécifique de la fraction fine (passant 80 µm)                              |
| T :                | température (°C ou K)   |
| t :                | temps (secondes, minutes, heures ou années) ou tonnes métriques                     |
| Ta :               | température de l'air (°C)   |
| T <sub>BB</sub> :  | température effective du revêtement (°C)  |
| Tf :               | température de congélation (°C)   |
| ThBal :            | bilan thermique au front de gel (zéro à l'équilibre)                                |
| Tma :              | température moyenne annuelle de l'air (°C)  |
| Tp :               | température à la surface, module GEL (°C)   |
| Ts :               | température à la surface, module climatique (°C)                                    |
| uf :               | dommage saisonnier unitaire (méthode de l'AASHTO)                                   |
| USACE :            | U.S. Army Corps of Engineers  |
| USCS :             | système de classification unifié des sols   |
| VB :               | valeur au bleu de méthylène   |
| Vbe :              | volume de bitume effectif   |
| VL :               | pourcentage de véhicules lourds   |
| w :                | teneur en eau (% du sol sec)  |
| W <sub>18</sub> :  | durée de vie structurale (ÉCAS)   |
| w <sub>L</sub> :   | limite de liquidité   |
| w <sub>p</sub> :   | limite de plasticité  |
| wu :               | teneur en eau non gelée contenue dans le sol gelé (% du sol sec)                    |
| Z :                | profondeur de gel (m)   |
| Z <sub>R</sub> :   | déviations normale associée à la fiabilité  |

## INTRODUCTION

Le logiciel CHAUSSÉE a pour objectif de faciliter l'analyse et la conception des structures de chaussées à revêtement bitumineux. Il vise principalement les applications courantes au ministère des Transports du Québec, en tant que complément au tome II du recueil des normes sur les Ouvrages routiers.

Il comprend un module de calcul structural (méthode AASHTO, 1993) et deux modules d'analyse du gel. Le logiciel prévoit des intrants pour définir le contexte de la chaussée (classe de route, débit de circulation, camionnage lourd, information climatique, propriétés du sol de support) et un environnement convivial permettant de spécifier un scénario de structure de chaussée pouvant comprendre jusqu'à huit couches de matériaux différents, en incluant une ou plusieurs couches de sol de support.

Le logiciel calcule la durée de vie structurale (en nombre d'essieux lourds admissibles), ainsi que les effets du gel (profondeur et soulèvement). Il appartient à l'utilisateur de choisir des paramètres représentatifs et de retenir le scénario qui satisfait aux objectifs de faisabilité et de performance visés.

Le présent document fournit quelques renseignements de base essentiels à la compréhension et à l'utilisation du logiciel. Les références complémentaires sont listées dans la section intitulée « Références bibliographiques ».

Le logiciel comprend une bibliothèque de valeurs par défaut prédéfinies pour faciliter la prise en compte des conditions routières qui prévalent au Québec. Il permet aussi de modifier ces valeurs en fonction des renseignements disponibles.

## 1 - CONFIGURATION MINIMALE REQUISE

La version 2 du logiciel CHAUSSÉE a été mise au point pour des ordinateurs personnels respectant les spécifications suivantes :

### Systeme d'exploitation

- Windows 98 ou Me avec MDAC v2.5, DCOM98 v1.3 et Internet Explorer v4.01 ou supérieure
- Windows NT4 SP5 avec Internet Explorer v4.01 ou supérieure, ou
- Windows 2000 ou XP

### Matériel

- Processeur Pentium 200 MHz ou compatible (Pentium II 400 MHz recommandé)
- 64 Mo de mémoire vive (128 Mo recommandés)
- 20 Mo d'espace libre sur le disque dur
- Carte vidéo de 4 Mo et moniteur de 800 x 600 pixels

## 2 - NOUVEAUTÉS DANS LA VERSION ACTUELLE (version 2.0)

La version 2 comporte principalement l'ajout d'un module de prévision de la profondeur du gel et des soulèvements, afin de permettre un dimensionnement au gel de type mécanisto-empirique.

Autres nouveautés :

- Notices d'information sur les matériaux.
- Accès direct aux paramètres avancés (double-clic).
- Ajout de matériaux dans la bibliothèque : revêtements avec base antifatigue (BAF), isolant en polystyrène, enrobé recyclé à froid, dalle concassée par résonance (*rubblizing*), infrastructure améliorée pour sous-profils, sol argileux ayant un indice de liquidité supérieur à 0,9.
- Facteur de capacité portante variable pour chaque couche.
- Prise en compte des revêtements en parachèvement.
- Durées de vie prolongées.
- Révision des variations saisonnières.
- Mise à jour des coefficients d'agressivité par défaut.
- Actualisation du DJMA d'un comptage avec l'année de construction.
- Carte géographique pour la sélection des stations météorologiques.
- Traitement statistique de la variation des hivers.

## 3 - HISTORIQUE DES VERSIONS PRÉCÉDENTES

Il est possible de vérifier si votre version est à jour en ouvrant la fenêtre *À propos de Chaussée*, à partir du menu d'aide (symbole « ? »). Cette fenêtre indique le numéro de la version en cours et possède un lien conduisant directement au site de téléchargement du logiciel. Ce site indique le numéro de la dernière version. Voici la liste des versions précédentes.

### 10 FÉVRIER 2003 :

Mise à jour du logiciel avec révisions mineures : CHAUSSÉE version 1.2

### 31 JANVIER 2001 :

Lancement officiel du logiciel sur l'Internet : CHAUSSÉE version 1.1

### 16 NOVEMBRE 1999 :

Lancement officiel du logiciel sur l'intranet du ministère des Transports : DDLC version 1.0.

## 4 - INSTALLATION DU LOGICIEL

Veillez noter que la version 2 peut cohabiter sans problème avec la version 1, mais il ne doit y avoir qu'une seule version 2 d'installée sur le poste de travail. Voici les indications à suivre après avoir téléchargé le fichier d'installation sur votre ordinateur :

1. Si une autre copie du logiciel CHAUSSÉE 2 est déjà présente sur votre poste de travail, alors il faut la désinstaller au préalable.
  - Pour ce faire, cliquez sur le bouton « Démarrer », allez dans le panneau de configuration et choisissez « ajout/suppression de programmes ». Sélectionnez ensuite le programme CHAUSSÉE 2 et cliquez sur « Supprimer ».
  
2. Lancez l'installation en double cliquant sur le fichier portant l'extension « .MSI » ou « .EXE »
  - L'installateur devrait détecter la présence d'une autre version 2 si vous ne l'avez pas désinstallée. Il faut alors choisir de la désinstaller et relancer ensuite l'installation. **Ne pas** choisir le bouton « REPAIR » qui ne fait que restaurer l'ancienne version.
  - L'utilisateur doit bénéficier de tous les droits administrateur (lecture et écriture de fichiers) à l'intérieur du répertoire d'installation du logiciel. Dans le cas contraire le logiciel ne fonctionnera pas intégralement.
  
3. Il est possible que certains privilèges d'accès au registre du système d'exploitation (Windows) et aux répertoires systèmes du disque dur soient nécessaires pour réussir l'installation. Communiquez avec votre administrateur informatique si le fichier d'installation échoue à la suite d'un message faisant état de privilèges insuffisants.

## 5 - SURVOL RAPIDE

Le logiciel CHAUSSÉE effectue essentiellement une prédiction théorique du comportement d'une structure de chaussée définie par la nature et l'épaisseur des couches de matériau qui la composent, en tenant compte des sollicitations par le trafic lourd, des conditions climatiques et de la nature du sol de support. Un effort d'apprentissage peut s'avérer nécessaire pour l'acquisition du niveau de connaissance permettant de réaliser et d'interpréter les calculs avec habileté et confiance. La responsabilité de l'utilisateur ne couvre pas seulement l'usage qu'il en fait, mais aussi la planification, la réalisation et l'analyse des relevés et activités techniques complémentaires devant être réalisés au cours de la préparation d'un projet routier. La présente section propose un rapide survol des instructions de base qui permettent de résumer le mode opératoire du logiciel CHAUSSÉE 2. Il est possible d'ouvrir directement une coupe type prédéfinie dans le menu Fichier – Nouveau (Ouvrir une coupe type). Le sous-répertoire « Exemples », situé dans le répertoire d'installation du logiciel, contient aussi une série d'exemples de feuilles de calcul.

Figure 1 : Écran principal

The screenshot shows the main interface of the CHAUSSÉE software. It includes a menu bar (Fichier, Edition, Affichage, Modules, Outils, Fenêtre), a toolbar, and several input panels. The 'Segment homogène' panel shows 'Variante avec Base antifatigue'. The 'Objectifs' panel includes 'Type de route' (Autoroute), 'Classe de trafic' (supérieur à 20000), and 'Années' (30). The 'Climat' panel shows 'Station météorologique' (Laprairie) and various climate parameters. The 'Couches de matériaux' panel lists 5 layers with their thicknesses and materials. A table below shows structural parameters for each layer, and a 'Total' cost of 53.48 \$/m² is displayed.

| Couches de matériaux |                        | H (mm)       | STRUCTURAL   GEL   GEL (1994) |                   |                       |     |      |                   | Coût (\$/m²) |
|----------------------|------------------------|--------------|-------------------------------|-------------------|-----------------------|-----|------|-------------------|--------------|
|                      | Matériau               |              | F Mr                          | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> ) | m   | SN   | W18 (en millions) |              |
| 1                    | BB HRO et BAF          | 260          | 1.00                          | 4021              | 0.49                  | 1.0 | 5.03 | 41.002            | 37.88        |
| 2                    | MG 20                  | 300          | 1.00                          | 110               | 0.07                  | 0.8 | 5.68 | 39.508            | 5.70         |
| 3                    | MG 112 (fuseau entier) | 1100         | 1.00                          | 74                | 0.08                  | 0.8 | 8.29 | 38.92             | 9.90         |
| 4                    |                        |              |                               |                   |                       |     |      |                   |              |
| 5                    |                        |              |                               |                   |                       |     |      |                   |              |
| 6                    |                        |              |                               |                   |                       |     |      |                   |              |
| 7                    |                        |              |                               |                   |                       |     |      |                   |              |
| 8                    |                        |              |                               |                   |                       |     |      |                   |              |
| 9                    | CH (IL < 0.9)          | Total = 1660 | 1.00                          | 20                |                       |     |      |                   |              |

Équivalences d'été (FAS = 0.65)  
 Mr = 31 MPa  
 CBR = 3.5  
 Cu = 105 kPa

Total Coût: 53.48 \$/m²

## 1- Segment homogène

- Les structures de chaussées occupent dans la réalité un espace tridimensionnel, soit la profondeur verticale, la longueur et la largeur. Le logiciel ne comprend que des modèles unidimensionnels délimités par des épaisseurs de couches.

Il incombe au concepteur de faire autant de calculs que nécessaire pour tenir compte de l'aspect tridimensionnel. Il est possible de sauvegarder autant d'analyses qu'il faut pour un projet donné.

L'approche privilégiée consiste à diviser le projet en segments homogènes et à analyser une situation jugée représentative et sécuritaire à l'intérieur de chaque segment. Il est aussi possible de faire les calculs de soulèvements au gel pour deux points adjacents afin de déterminer si la différence justifie l'aménagement d'une transition ou d'une disposition particulière.

## 2- Objectifs

- Choisir le type de route et la classe de DJMA (débit de circulation journalier moyen annuel).
  - Le logiciel utilise ce choix pour définir les objectifs de performance par défaut, mais l'utilisateur a la possibilité de les modifier selon ses besoins spécifiques.
- Entrer les ÉCAS anticipés durant la période de conception. Si nécessaire, l'outil ÉCAS permet de calculer cette valeur à partir des données de circulation.

## 3- Climat

- Choisir la station météorologique la plus représentative du contexte climatique qui règne sur le site étudié.
- Ajuster si requis l'intensité de l'hiver à considérer pour l'analyse du gel en modifiant la période de récurrence (PR) de l'indice de gel, ou conserver la valeur par défaut.

## 4- Couches de matériaux

- Sélectionner en premier lieu le type de sol de support (couche « S » en bas à gauche).
- Sélectionner ensuite le type de revêtement bitumineux (couche 1), tout en prenant soin de surveiller si la haute résistance à l'orniérage (HRO) est requise (indicateur au-dessus des matériaux).
- Sélectionner ensuite les autres couches de haut en bas (fondations, sous-fondation, strates de sol).

Les matériaux sont souvent indiqués à l'aide d'abréviations standardisées ou faciles à retenir. Une « info-bulle » fournit plus d'information sur un matériau sélectionné, lorsqu'on le pointe durant environ deux secondes avec le curseur de la souris.

La sélection d'un matériau ajoute une couche avec les paramètres par défaut définis à l'intérieur de la bibliothèque de référence. Il est ensuite possible de modifier les paramètres à partir des contrôles de saisie.

- Ajuster les propriétés des matériaux de façon à refléter les conditions réelles aussi fidèlement que possible. Le module de résilience « Mr » du sol (onglet STRUCTURAL), ainsi que les valeurs de teneur en eau et gélivité (onglet GEL) constituent les principaux ajustements typiques; il est recommandé d'ajouter autant de couches que nécessaire pour représenter les différentes strates de sol dans la zone de pénétration du gel. Dans la mesure du possible, les différentes couches devraient refléter la position de la nappe phréatique en différenciant les zones non saturées ( $S_r < 85\%$ ) et saturées ( $S_r \approx 100\%$ ). Le module GEL permet de vérifier la porosité ( $n$ ) ainsi que la saturation ( $S_r$ ) afin de guider le choix des paramètres, l'apparition de cases orange signifiant que l'agencement des valeurs est irréaliste et qu'il nécessite un réajustement.

### 5- Onglet STRUCTURAL

- Ajuster le module des couches en fonction des données de portance disponibles (en faisant varier le facteur « F Mr »).
- Déterminer les épaisseurs minimales permettant de rencontrer la durée de vie structurale visée : W18 doit être supérieur à ÉCAS pour chaque couche. Aucun voyant rouge ne doit donc être maintenu dans la colonne W18 située à droite. Cette étape est plus facile si l'on procède couche par couche de haut en bas, et en revenant à la couche 1 si nécessaire.

### 6- Onglet GEL

- Ajuster la gélivité de chaque couche ( $SP_o$  et  $a$ ) en fonction des données disponibles (essai de gel, sédimentométrie, valeur au bleu, profondeurs de gel et soulèvements mesurés, etc.).
- Ajuster la masse volumique sèche et la teneur en eau de chaque couche en fonction des données disponibles
  - Sous la nappe phréatique, le sol devrait être considéré comme saturé ( $S_r \approx 100\%$ ).
  - Certaines cases deviennent orange lorsque les données volumétriques sont incohérentes entre elles. (Les paramètres choisis peuvent être considérés comme cohérents à la condition qu'aucun voyant orange ne soit visible).
- Augmenter l'épaisseur d'une des couches de la chaussée pour limiter le soulèvement au gel en dessous du seuil admissible. Cela équivaut à éteindre le voyant rouge pouvant apparaître dans la case du soulèvement ( $h$  en bas à droite).

### 7- Onglet GEL (1994)

- Vérifier l'applicabilité des cases à cocher affichées sous le graphique.

- Ajuster au besoin les épaisseurs de la chaussée, pour que l'épaisseur totale respecte le critère de protection partielle contre le gel.

## 8- Révision des onglets STRUCTURAL, GEL et GEL (1994)

- La conception doit respecter toutes les exigences à la fois pour l'analyse structurale et l'analyse du gel. Il faut donc réviser tous les onglets en conséquence.

## 9- Variantes de conception

- Le logiciel permet de comparer le potentiel d'utilisation de différents matériaux de construction (avec ou sans recyclage, avec ou sans stabilisation, etc.) Cette approche permet de connaître différentes variantes offrant une performance identique à un coût différent. Cela implique la production d'une feuille de calcul pour chaque variante recommandée pour chaque segment homogène. Il faut par contre tenir compte des contraintes d'exécution sur le chantier.
- Sauvegarder et imprimer les scénarios retenus sous la forme de fichiers d'extension *.cha*.

## 5.1 - Particularités de l'interface utilisateur

L'interface du logiciel CHAUSSÉE est conçue de façon à afficher les paramètres de base les plus élémentaires sur l'écran principal. Les modules de calcul STRUCTURAL, GEL et GEL (1994) sont toutefois répartis sur trois onglets distincts.

Le contrôle le plus répandu à travers le logiciel est illustré à la Figure 2. Contrairement à la version 1, la mise à jour des calculs ne s'effectue qu'après confirmation de la saisie des nouvelles valeurs. Cela peut se faire en frappant la touche *Entrée*, la touche *Tab*, ou en sélectionnant un autre objet de la feuille. La saisie d'une entrée invalide se traduira par un bip accompagné d'un refus de refaire les calculs.

**Figure 2 : Contrôle d'affichage ou de saisie interactive**



La couleur de l'arrière-plan de ce contrôle a une signification destinée à l'utilisateur :

Gris : Paramètre protégé ou inactif

Blanc : Invitation à la saisie ou à la modification des entrées

Orange : Valeurs entrées incohérentes à modifier

Rouge : Objectifs de performance non atteints par la structure de chaussée

Lorsqu'il est disponible, l'incrémenteur manuel permet de modifier une valeur numérique sans la dactylographier. Il réagit à la souris et aux flèches de clavier ainsi qu'aux touches *Page précédente* et *Page suivante*. La vitesse d'incrémentation peut être réduite lorsqu'on appuie en même temps sur la touche *Ctrl*, ou accélérée avec la touche *Maj*. Les saisies faites avec l'incrémenteur déclenchent immédiatement la mise à jour des calculs, sans qu'il soit nécessaire de frapper la touche *Entrée*.

Le bouton de recherche automatique ne sert qu'à déterminer plus rapidement l'épaisseur minimale d'une couche de matériau. La méthode la plus efficace consiste à débiter avec l'onglet STRUCTURAL en suivant les couches de haut en bas. Le logiciel cherchera l'épaisseur minimale favorisant l'atteinte de la durée de vie structurale spécifiée comme objectif de performance ( $W_{18} \geq \text{ÉCAS}$ ). Il ne regarde toutefois que la durée de vie de la couche visée. Il peut donc arriver que l'utilisateur ait besoin de l'augmenter manuellement pour compenser une limite d'épaisseur imposée sur une autre couche. La recherche dans le module STRUCTURAL ne tient pas compte de la protection contre le gel. Il faut donc ensuite ouvrir l'un des onglets GEL et demander une nouvelle recherche sur la couche choisie pour combler la protection contre le gel. Toutes les recherches d'épaisseur se limitent aux bornes minimales et maximales attribuées à chaque matériau. Le menu *Outils – Options* permet de spécifier si l'on préfère que les épaisseurs soient arrondies ou affichées au millimètre près.

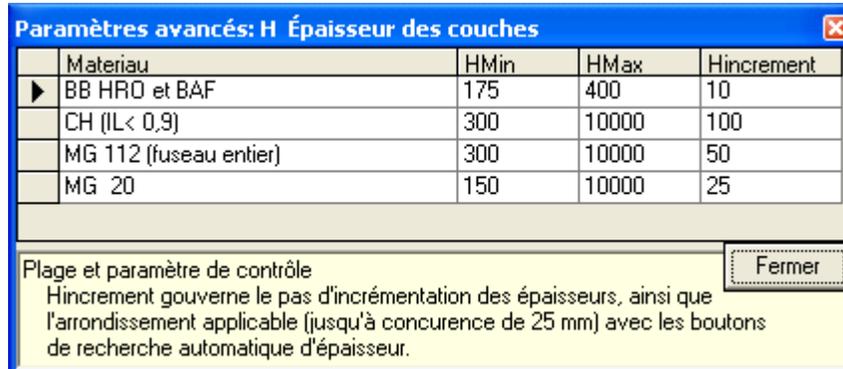
**Paramètres avancés** : Certains paramètres ne sont pas directement présentés sur l'écran principal afin d'alléger l'interface et de mieux concentrer l'attention de l'utilisateur sur les éléments les plus importants.

L'accès aux paramètres avancés peut se faire uniquement lorsque le niveau d'utilisation *Approfondi* est sélectionné dans l'onglet UTILISATEUR de la fenêtre de dialogue des *Options* (menu *Outils – Options*). Cela fait alors apparaître certains boutons donnant accès à des boîtes de dialogue supplémentaires.

En ce qui concerne les matériaux, le niveau d'utilisation *Approfondi* active aussi un accès vers d'autres paramètres avancés disponibles en double-cliquant sur la case de la variable concernée, ce qui fait apparaître une grille de saisie tirée de la bibliothèque de référence. Par exemple, la grille affichée sur la Figure 3 apparaît lorsqu'on double-clique sur la case de saisie de l'épaisseur d'une couche. Elle permet de modifier l'épaisseur minimale et maximale des couches ou le pas d'incrémentation des épaisseurs. Les modifications n'affectent que la copie appartenant à la feuille de calcul en cours. Il faut noter que les matériaux apparaissent dans un ordre qui ne correspond pas nécessairement à leur positionnement dans la structure de la chaussée, et qu'un matériau utilisé dans plusieurs couches n'y apparaît qu'en un seul

exemplaire, commun à chacune des couches concernées. La même démarche peut être suivie pour tous les paramètres avancés inventoriés dans le Tableau 1.

**Figure 3 : Exemple d'une grille de saisie pour paramètres avancés**



**Tableau 1 : Liste des paramètres pour les matériaux**

| Thème   | Paramètre de base      | Paramètre intermédiaire                            | Paramètre avancé (double-clic pour grille similaire à la Figure 3)                     |
|---|------------------------|--|--|
| Épaisseur   | H                      |  | Hmin, Hmax et Hincement  |
| Module de résilience  | F Mr                   |  | FMRmin et FMRmax   |
|   | Mr                     |  | Modèle, MRmin, MRmax, K1, K2, K3, K4   |
| Coefficient structural et de drainage   | a                      |  | amin, amax, Ka et Kb   |
|   | m                      |  | m  |
| Densités et volumétrie en relation avec les particules et autres constituants (air, eau, glace, bitume) | $\rho_d$               | n  | nmin et nmax   |
|   |                        | $\rho_s$   | MVsolidesMin et MVsolidesMax   |
|   |                        | Vbe  | VbeMin et VbeMax   |
|   | % eau                  | Ss   | SsMin et SsMax   |
|   |                        | Wu   | <i>Alternance Wu/Qu (massique/volumique) en cliquant sur le titre de la colonne Wu</i> |
| Sr  |                        | <i>Sr doit toujours se situer entre 0 et 100 %</i> |  |
| Gélinivité  | SPo                    |  | SPoMin, SPoMax, aSPMin, aSPMax, SrCritique, Tf   |
|   | a (MPa <sup>-1</sup> ) |  |  |
| Conductivité thermique  | Ku                     |  | OptKu, KappaKu, Chi, Eta, Ku   |
|   | Kf                     |  | OptKf, KappaKf, Chi, Eta, Kf   |
|   |                        | Ks   | KsMin, KsMax   |
| Chaleur latente   | Lf                     |  | LfMin  |

**Bibliothèque de référence** : Les valeurs par défaut sont définies dans une base de données Microsoft Access ®. Il s'agit du fichier CHAUSSEE2.MDB situé dans le même dossier que l'exécutable (.exe).

**Coût unitaire des matériaux** : La commande « Edition – Coûts unitaires par défaut » permet de spécifier les prix unitaires à l'intérieur de la bibliothèque de référence. Les valeurs peuvent être exprimées en \$/tonne, en \$/m<sup>2</sup> ou en \$/m<sup>3</sup>. Il est recommandé de réviser ces valeurs en fonctions des coûts typiques à chaque région.

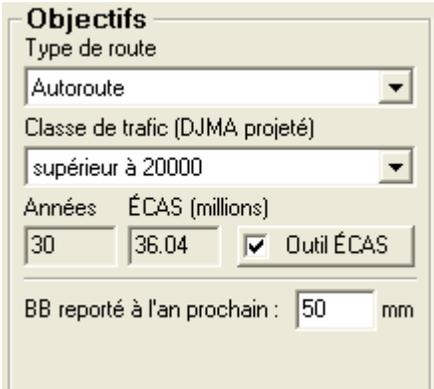
**Coût unitaire de la structure de chaussée** : Le coût unitaire de la structure de chaussée (en \$/m<sup>2</sup>) simulée est affiché à la droite de l'écran principal, en tenant compte de l'épaisseur des couches, de leur masse volumique et de leur coût unitaire.

Il est possible de désactiver le calcul du coût d'une couche quelconque en maintenant la touche « Control » (CTRL) du clavier pendant qu'on clique sur la case de coût. Cela est utile par exemple pour évaluer le coût d'une réfection superficielle pour laquelle certaines couches de matériaux sont déjà en place et ne représentent aucune dépense pour la réalisation des travaux.

Le coût affiché représente uniquement celui des voies de roulement et ne vise qu'à faciliter la première estimation du coût d'une variante type de structure de chaussée. Les coûts liés aux travaux de terrassement (volumes de déblai et de remblai), à la géométrie de la chaussée de même qu'à la coupe transversale (largeur des accotements, pente des talus de fossé) ne sont pas considérés par le logiciel. Également, les frais rattachés à la signalisation de chantier, aux dispositifs de retenue et autres accessoires, de même que la disposition des rebuts pendant les travaux constituent d'autres exemples de coûts qui ne sont pas considérés par le logiciel. Une estimation plus détaillée doit donc être effectuée pour comparer certaines variantes ainsi que pour estimer le coût des travaux.

## 6 - OBJECTIFS DE PERFORMANCE ET DE DURÉE DE VIE

Tout calcul de conception nécessite au préalable l'établissement des objectifs de performance en ce qui a trait au niveau de service et à la durée de vie. Le logiciel CHAUSSÉE prescrit une série d'objectifs en fonction du type de route et de la classe de DJMA. L'utilisateur doit aussi caractériser l'intensité du trafic lourd à supporter à l'intérieur de la section des objectifs. Les objectifs de performance et de durée de vie sont les suivants :



**Tableau 2 : Liste des objectifs de performance**

| Module de calcul                                  | Objectif de performance   |
|---|---|
| Outil ÉCAS (trafic lourd)                         | Durée de vie (en années)  |
| Climat (période de récurrence de l'indice de gel) |   |
| Calcul STRUCTURAL                                 | Durée de vie (en ÉCAS)<br>Seuil de détérioration (Indice $\Delta$ PSI)<br>Niveau de confiance (R) |
| Calcul du GEL                                     | Soulèvement au gel admissible (h)   |
| Critère de GEL de 1994                            | Facteur de route (FR) et facteur de sol (FS)  |

Le type de route et la classe de DJMA sont aussi utilisés par l'outil ÉCAS afin de fournir un coefficient d'agressivité moyen par défaut. Toutes les valeurs par défaut sont configurées dans la bibliothèque de référence.

Il est aussi possible d'inscrire une épaisseur de roulement qu'on prévoit mettre en place l'année suivant la pose de la couche de base du revêtement. (Pavages en parachèvement.) Cette épaisseur doit être incluse dans l'épaisseur de revêtement spécifiée lors du choix des matériaux. Elle permet de corriger le calcul structural en tenant compte des surplus de dommages causés durant l'année où la chaussée est en service malgré ce déficit.

## 6.1 Recommandation sur le choix de la durée de vie

La durée de vie par défaut représente l'objectif recommandé pour un revêtement neuf posé sur une fondation stable et exempte de tout patron de fissuration. Plusieurs considérations appuient le bien-fondé d'une durée de vie structurale prolongée par rapport aux critères de 1994 (St-Laurent et Langlois, 2006) :

- Un meilleur comportement thermique des enrobés depuis l'adoption des classes de bitumes PG adaptés aux divers contextes climatiques québécois. (Savard et autres, 2004) Cela se traduit par un nombre moins élevé de fissures transversales sur les revêtements « neufs ».
- Une amélioration de la conception au gel avec la méthode des soulèvements contrôlés qui assure ainsi une meilleure stabilité de la chaussée en période hivernale et en période de dégel.
- Les divers progrès (conception, matériaux, mise en œuvre) peuvent prolonger la durée de vie des chaussées à condition que la période de conception structurale soit prolongée en conséquence. C'est l'analogie d'une rupture au chaînon le plus faible.
- La remontée des fissures à la suite d'un recouvrement bitumineux limite la performance des resurfaçages. Ce maillon faible n'existe pas dans le cas d'une chaussée neuve. La stratégie recommandée consiste à dimensionner la chaussée neuve selon une durabilité qui dépasse celle de la couche de roulement, pour que les resurfaçages, se faisant sur une chaussée exempte de bris structuraux, soient plus durables.
- Le rehaussement de la durée de vie structurale représente une faible fraction du coût des constructions neuves, considérant qu'on double les ÉCAS admissibles sur un revêtement neuf à chaque ajout d'environ 25 mm d'enrobé.
- L'analyse avantage-coût indique qu'une chaussée à longue durée de vie (40 ans et plus) est rentable même si le surcoût initial correspond à celui d'un resurfaçage de 70 mm. Le domaine de rentabilité est potentiellement plus grand si l'on ajoute les coûts aux usagers (délais de files d'attente) ainsi que diverses autres considérations environnementales ou stratégiques.

La durée de vie structurale doit cependant être revue à la baisse dans les cas suivants :

- Resurfaçages d'un revêtement fissuré. La remontée des fissures laissées dans le vieux revêtement limite la durée de vie des resurfaçages à un maximum de l'ordre de 10 à 15 ans.
- La durée de vie d'un resurfaçage peut être augmentée d'environ 5 ans lorsque l'intervention est bonifiée par le recyclage à froid d'une fraction significative du vieil enrobé, ou le recours à une autre technique équivalente pour ralentir la remontée des fissures (p. ex. : membrane élastomère avec enrobé coulé à froid).
- Réhabilitations dans un contexte favorisant la formation de soulèvements au gel supérieurs aux seuils recommandés.
- Contextes spéciaux où la réalisation d'autres travaux de réfection ou de démolition est prévisible.

- Secteur en milieu urbain où l'état (et l'âge) des services souterrains requiert potentiellement des travaux d'excavation avec tranchées.

## 7 - DÉBITS DE CIRCULATION ET TRAFIC LOURD

Le débit de circulation est exprimé en termes de débit journalier moyen annuel (DJMA), lequel inclut la somme de tous les véhicules circulant dans les deux directions et toutes les voies de circulation (sauf mention contraire). Le DJMA est une moyenne établie pour les jours ouvrables normaux.

Le DJMA évolue en général dans le temps, selon un certain taux d'accroissement annuel. La moyenne à l'intérieur d'une période de temps correspondant à la période de conception est appelée le DJMA projeté. Considérant un taux de croissance annuel constant et similaire à celui d'un taux d'intérêt composé, nous pouvons déduire le DJMA projeté comme étant égal à :

$$\text{DJMA}_{\text{projeté}} = \text{DJMA}_{\text{initial}} \cdot \text{fa} / \text{n}$$

Équation 1

Le calcul structural traite la durée de vie comme étant le nombre total d'essieux ( $W_{18}$ ) exprimés en équivalent de charge axiale simple (ÉCAS) que la chaussée peut supporter avant d'atteindre son seuil de détérioration terminal. Par définition, l'ÉCAS correspond à un essieu normalisé de 8165 kg (18 000 lb) muni de pneus doubles (quatre pneus au total). La durée de vie structurale est considérée comme adéquate lorsque le nombre d'essieux admissibles ( $W_{18}$ ) est supérieur ou égal au nombre d'essieux prévus ( $N_{18}$ ) durant la période de conception.

L'agressivité du trafic pendant la période de conception, exprimée en ÉCAS, peut être calculée à l'aide de l'outil ÉCAS (équation suivante) ou entrée directement dans la case de saisie (écran principal).

$$N_{18} = \text{DJMA}_{\text{initial}} \cdot \text{VL} \cdot \text{Dir} \cdot \text{Voie} \cdot \text{CAM} \cdot \text{N} \cdot \text{fa}$$

Équation 2

où :

**$N_{18}$**  : nombre total d'ÉCAS prévus durant la période de conception;

**$\text{DJMA}_{\text{initial}}$**  : débit journalier moyen annuel de véhicules de tous les types, au début de la mise en service;

**VL** : pourcentage de véhicules lourds;

**Dir** : fraction du camionnage dans la direction analysée;

**Voie** : fraction du camionnage sur la voie analysée;

**CAM** : coefficient d'agressivité moyen des véhicules lourds (ÉCAS par camion);

**N** : 300 jours, correspond au nombre de jours de camionnage durant l'année, après soustraction des jours fériés et en considérant que les samedis et dimanches ne comptent que pour l'équivalent d'une demi-journée normale;

**fa** = : facteur d'accroissement pour les véhicules lourds

$$fa : ((1+g)^n - 1)/g,$$

**g** : taux d'accroissement (taux composé),

**n** : période de conception en années.

Figure 4 : Outil ÉCAS

**Prévision du trafic**

Année du comptage: 2005    Année du projet: 2007  
 DJMA du comptage: 25 000    DJMA actualisé: 26 010

Durée de vie (en années): 30    g (%): 2.0    f.a.: 40.57    Nirs (jours/an): 300

**Agressivité du trafic**

Proportion de véhicules lourds (%): 15.0

**Coefficient d'agressivité moyen (CAM)**

Valeur par défaut: Péri-urbain    Autoroute  
 Classification  
 Saisie directe    CAM: 2.00

**Répartition du trafic lourd sur les voies**

Nombre de voies par direction:

1 voie     2 voies     3 voies

|                                       | Fraction par voie (%) | Trafic par voie (DJMA) | FS     | ÉCAS par voie (en millions) | Voie de référence |   |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------|-----------------------------|-------------------|---|
| <b>Direction 1</b>                    |                       |                        |        |                             |                   |   |
| Fraction du trafic en direction 1 (%) | 50,0                  | 75,9                   | 13 348 | 1,0                         | 36,04             | <input type="radio"/> Voie 1              |
| DJMA projeté pour la direction 1      | 17 586                | 24,1                   | 4 238  | 1,0                         | 11,443            | <input type="radio"/> Voie 2              |
|                                       |                       |                        |        |                             |                   | <input type="radio"/> Voie 3              |
| <b>Direction 2</b>                    |                       |                        |        |                             |                   |   |
| Fraction du trafic en direction 2 (%) | 50,0                  |                        |        |                             |                   | <input checked="" type="radio"/> Voie max |
| DJMA projeté pour la direction 2      | 17 586                | 24,1                   | 4 238  | 1,0                         | 11,443            | <input type="radio"/> Voie 3              |
|                                       |                       | 75,9                   | 13 348 | 1,0                         | 36,04             | <input type="radio"/> Voie 2              |
|                                       |                       |                        |        |                             |                   | <input type="radio"/> Voie 1              |

**Norme pour faible trafic**

DJMA corrigé: 52 759    DJMA projeté: 35 173    ÉCAS projeté (millions): 36,04

Fermer

## 7.1 - Distribution des camions sur les voies

La réalisation d'un comptage représente la meilleure façon de connaître la répartition du trafic lourd dans chacune des voies. À défaut de pouvoir réaliser un tel relevé, les valeurs du Tableau 3 sont recommandées. Ce tableau est intégré dans l'outil ÉCAS. Par défaut, le dimensionnement s'effectue pour la voie la plus sollicitée.

**Tableau 3 : Distribution des camions sur des routes à voies multiples**

| DJMA projeté<br>(une direction) | Route à deux voies<br>(une direction) |        | Route à trois voies et plus<br>(une direction) |        |        |
|---------------------------------|---------------------------------------|--------|--|--------|--------|
|                                 | Gauche                                | Droite | Gauche   | Centre | Droite |
| 2 000                           | 6                                     | 94     | 6  | 12     | 82     |
| 4 000                           | 12                                    | 88     | 6  | 18     | 76     |
| 6 000                           | 15                                    | 85     | 7  | 21     | 72     |
| 8 000                           | 18                                    | 82     | 7  | 23     | 70     |
| 10 000                          | 19                                    | 81     | 7  | 25     | 68     |
| 15 000                          | 23                                    | 77     | 7  | 28     | 65     |
| 20 000                          | 25                                    | 75     | 7  | 30     | 63     |
| 25 000                          | 27                                    | 73     | 7  | 32     | 61     |
| 30 000                          | 28                                    | 72     | 8  | 33     | 59     |
| 35 000                          | 30                                    | 70     | 8  | 34     | 58     |
| 40 000                          | 31                                    | 69     | 8  | 35     | 57     |
| 50 000                          | 33                                    | 67     | 8  | 37     | 55     |
| 60 000                          | 34                                    | 66     | 8  | 39     | 53     |
| 70 000                          | ---                                   | ---    | 8  | 40     | 52     |
| 80 000                          | ---                                   | ---    | 8  | 41     | 51     |
| 100 000                         | ---                                   | ---    | 9  | 42     | 49     |

Source : DARTER et autres (1985)

Dans le cas où un dimensionnement adapté aux sollicitations de chacune des voies est prévu, il est recommandé d'allouer une marge de sécurité en ce qui a trait au trafic anticipé dans les voies de dépassement (gauche et centre). L'outil ÉCAS prévoit la possibilité d'entrer un facteur de sécurité (FS) à cet effet.

## 7.2 - Coefficient d'agressivité moyen (CAM)

Le coefficient d'agressivité moyen exprime le nombre d'ÉCAS attribué pour chaque camion. Il peut être entré directement dans l'outil ÉCAS (saisie directe), déterminé à partir des résultats d'un relevé de comptage avec classification des camions, ou estimé à partir de valeurs par défaut établies dans la bibliothèque de référence.

Un recensement avec pesage des camions est la meilleure façon de connaître l'agressivité du trafic lourd. La section 7.3 décrit une méthode pour déterminer le coefficient d'agressivité (CA) d'un camion dont le chargement et la configuration des essieux sont connus.

Un recensement avec classification des types de camions est la solution de rechange à privilégier en l'absence de pesage. L'outil ÉCAS offre une fenêtre de compilation des données de classification pour le calcul du coefficient d'agressivité moyen (Figure 5). Des valeurs typiques de coefficient d'agressivité pour chaque classe de camions sont proposées; ces dernières peuvent être modifiées selon l'information disponible.

Figure 5 : Fenêtre de compilation d'une classification des véhicules lourds

|                                    | Nb véhicules | CA (véhicule) | Agressivité totale |
|------------------------------------|--------------|---------------|--------------------|
| Autobus                            | 194          | 1,10          | 213,40             |
| Camion 1 unité 2 essieux           | 611          | 0,30          | 183,30             |
| Camion 1 unité 3 essieux           | 232          | 1,40          | 324,80             |
| Camion 1 unité 4 essieux et plus   | 30           | 5,70          | 171,00             |
| Camion 2 unités 4 essieux et moins | 100          | 0,50          | 50,00              |
| Camion 2 unités 5 essieux          | 1487         | 1,70          | 2527,90            |
| Camion 2 unités 6 essieux et plus  | 1338         | 6,80          | 9098,40            |
| Camion 3 unités 5 essieux          | 6            | 1,70          | 10,20              |
| Camion 3 unités 6 essieux et plus  | 185          | 7,30          | 1350,50            |

Réinitialiser les CA

**Coefficient d'agressivité moyen (CAM)**

3,33 ECAS par camion ? Retour

### 7.3 - Coefficient d'agressivité (CA) pour un camion dont la charge est connue

Le calcul simplifié du coefficient d'agressivité (CA) d'un véhicule en équivalent de charge axiale simple (ÉCAS) normalisé à 8,16 tonnes se fait de la façon suivante :

$$CA = \sum CA_i = \sum \left( \frac{m_i}{m_{ref}} \right)^4$$

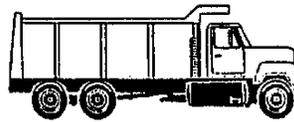
Équation 3

Où :  $m_i$  = poids de l'essieu ou du groupe d'essieux  $i$ ,  
 $m_{ref}$  = poids de l'essieu ou du groupe d'essieux de référence équivalent à 1 ÉCAS :  
= 8,16 tonnes pour un essieu simple  
= 15,20 tonnes pour un essieu double  
= 21,80 tonnes pour un essieu triple

(1 T = 1000 kg)

Voici une série d'exemples courants.

**Camion de catégorie A.2 (10 roues, 1 unité, 3 essieux) :**



|                |      |   |      |   |       |
|----------------|------|---|------|---|-------|
| Tare :         | 7,7  | + | 5,5  | = | 13,2  |
| Charge utile : | 10,3 | + | 1,75 | = | 12,05 |
| Total :        | 18   | + | 7,25 | = | 25,25 |

CA à pleine charge :

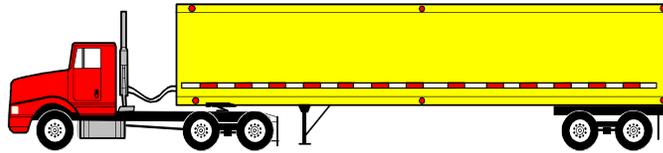
$$CA_p = \left( \frac{18}{15,2} \right)^4 + \left( \frac{7,25}{8,16} \right)^4 = 2,59 \text{ ÉCAS}$$

CA à vide :

$$CA_v = \left( \frac{7,7}{15,2} \right)^4 + \left( \frac{5,5}{8,16} \right)^4 = 0,27 \text{ ÉCAS}$$

**Camion de catégorie A.12 (18 roues, 2 unités, 5 essieux) :**

Ce camion représente plus de 42 % des camions semi-remorques sur le réseau québécois :



B.21

|                |     |   |      |   |      |   |      |
|----------------|-----|---|------|---|------|---|------|
| Tare :         | 5,5 | + | 4,8  | + | 4,8  | = | 15,1 |
| Charge utile : | 0   | + | 13,2 | + | 13,2 | = | 26,4 |
| Total :        | 5,5 | + | 18   | + | 18   | = | 41,5 |

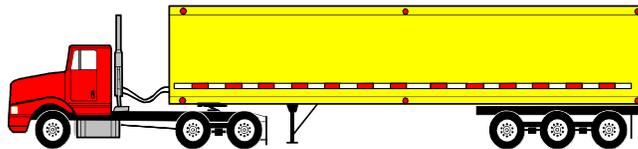
CA à pleine charge :

$$CA_p = \left(\frac{5,5}{8,16}\right)^4 + 2 \left(\frac{18}{15,2}\right)^4 = 4,14 \text{ ÉCAS}$$

CA à vide :

$$CA_v = \left(\frac{5,5}{8,16}\right)^4 + 2 \left(\frac{4,8}{15,2}\right)^4 = 0,23 \text{ ÉCAS}$$

**Camion de catégorie A.42 (22 roues, 2 unités, 6 essieux) :**



B.32

|                |     |   |    |   |    |   |      |
|----------------|-----|---|----|---|----|---|------|
| Tare :         | 5,5 | + | 5  | + | 7  | = | 17,5 |
| Charge utile : | 0   | + | 13 | + | 17 | = | 30,0 |
| Total :        | 5,5 | + | 18 | + | 24 | = | 47,5 |

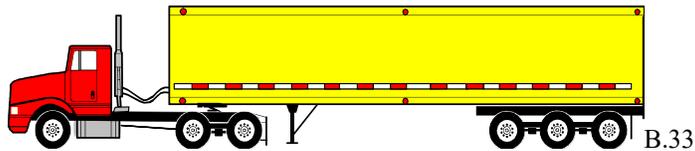
CA à pleine charge :

$$\left(\frac{5,5}{8,16}\right)^4 + \left(\frac{18}{15,2}\right)^4 + \left(\frac{24}{21,8}\right)^4 = 3,64 \text{ ÉCAS}$$

CA à vide :

$$\left(\frac{5,5}{8,16}\right)^4 + \left(\frac{5}{15,2}\right)^4 + \left(\frac{7}{21,8}\right)^4 = 0,23 \text{ ÉCAS}$$

**Camion de catégorie A.44 (22 roues, 2 unités, 6 essieux) :**



|                |     |   |    |   |      |   |      |
|----------------|-----|---|----|---|------|---|------|
| Tare :         | 5,5 | + | 5  | + | 7,2  | = | 17,7 |
| Charge utile : | 0   | + | 13 | + | 18,8 | = | 31,8 |
| Total :        | 5,5 | + | 18 | + | 26   | = | 49,5 |

CA à pleine charge :

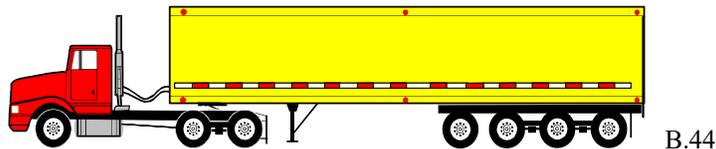
$$\left(\frac{5.5}{8.16}\right)^4 + \left(\frac{18}{15.2}\right)^4 + \left(\frac{26}{21.8}\right)^4 = 4.19 \text{ ÉCAS}$$

CA à vide :

$$\left(\frac{5.5}{8.16}\right)^4 + \left(\frac{5}{15.2}\right)^4 + \left(\frac{7.2}{21.8}\right)^4 = 0.23 \text{ ÉCAS}$$

**Camion de catégorie A.66 avec groupe arrière de type B.44**

Cette configuration est typique pour un camion semi-remorque forestier :



|                |     |   |    |   |      |   |      |
|----------------|-----|---|----|---|------|---|------|
| Tare :         | 5,5 | + | 5  | + | 7,8  | = | 18,3 |
| Charge utile : | 0   | + | 14 | + | 23,2 | = | 37,2 |
| Total :        | 5,5 | + | 18 | + | 32   | = | 55,5 |

CA à pleine charge :

$$\left(\frac{5.5}{8.16}\right)^4 + \left(\frac{18}{15.2}\right)^4 + \left(\frac{32}{21.8}\right)^4 = 6.81 \text{ ÉCAS}$$

CA à vide :

$$\left(\frac{5.5}{8.16}\right)^4 + \left(\frac{5}{15.2}\right)^4 + \left(\frac{7.8}{21.8}\right)^4 = 0.23 \text{ ÉCAS}$$

## 8 - CLIMAT

La prise en compte du climat s'effectue sur la base des données climatiques provenant des stations météorologiques réparties sur l'ensemble de la province. Les données climatiques de chaque station sont inscrites dans un fichier CLM portant le nom de l'emplacement de la station. Le choix d'un fichier CLM peut s'effectuer directement sur la carte interactive ou avec l'explorateur de fichier standard de Windows (bouton « Choisir » avec le clic gauche ou droit de la souris). Un bouton « Parcourir » est aussi affiché au-dessus de la carte.

**Climat**  
Station météorologique

Laprairie

| Zone | T <sub>BB</sub> | T <sub>ma</sub> | IG <sub>n</sub> | σ <sub>IG</sub> |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Sud  | 20.5            | 6.5             | 901             | 209             |

Simulation PR IG

Climat 15 1215

n 1.0 IG<sub>s</sub> 1215

### 8.1 Zone climatique et température effective du revêtement

La zone climatique (nord ou sud), comme définie dans la norme (tome II, chapitre 2, Figure 2.5-1) est utilisée pour déterminer la température effective du revêtement ( $T_{BB}$ ) nécessaire au calcul de son module de résilience ( $M_r$ ). La température effective typique est de 20,5 °C dans la zone sud et de 17,3 °C dans la zone nord.

Figure 6 : Enrobé bitumineux, délimitation zone nord – zone sud



Notes :

- la ligne de délimitation, pour la partie nord du fleuve, correspond au début de la zone montagneuse;
- les Îles-de-la-Madeleine sont situées dans la zone nord.

## 8.2 - Températures et indices de gel

L'indice de gel exprime la sommation des températures journalières en dessous de 0 °C pendant la période de gel, soit typiquement de novembre à mars selon la région visée. Cet indice permet de quantifier la froidure globale d'un hiver.

Le module GEL 1994 est basé uniquement sur l'indice de gel normal (IGn) qui représente la moyenne des hivers compilés pour une station météorologique.

Le module GEL prévoit l'utilisation des intrants suivants basés sur l'historique des données climatiques de la station : la température moyenne annuelle (Tma), l'indice de gel normal (IGn) et l'écart type sur l'indice de gel ( $\sigma_{IG}$ ). Lorsqu'il est inscrit en caractères rouges, l'écart type utilisé provient d'une estimation indirecte basée sur l'indice de gel normal.

La période de récurrence (PR) sert à spécifier le niveau de confiance visé pour le choix de l'indice de gel de conception (IG). Un certain nombre d'écart types est ajouté à la moyenne, conformément à une distribution statistique normale (Tableau 5). Par exemple, une période de récurrence de 10 ans correspond à un niveau de confiance R de 90 % (prévision sécuritaire pour 9 hivers sur 10), ce qui conduit à l'utilisation de l'indice de gel moyen auquel on ajoute 1,282 fois l'écart type.

### 8.2.1 Transfert de chaleur à la surface (facteur n)

Les températures transmises à la surface (Ts) ne sont pas identiques aux températures de l'air (Ta). L'écart dépend des conditions atmosphériques (heures d'ensoleillement, couvert nuageux, vent, humidité, pollution, etc.), de la capacité d'absorption de la couche de surface (albédo, couleur, texture, exposition au soleil, inclinaison, orientation, etc.) et du régime thermique sous la surface. Le calcul du gel se fait à partir des températures journalières de la surface, d'où l'apparition d'un l'indice de gel transmis à la surface (IGs). Le rapport entre l'indice de gel de surface et l'indice de gel de l'air est désigné par le facteur « n ».

$$n = \frac{IGs}{IG}$$

**Équation 4**

À cause des variables précédemment énumérées, le facteur n varie d'un site à l'autre, ainsi que d'une année à l'autre. Il ne peut être modifié qu'en mode d'utilisation de niveau *Approfondi* (menu *Outils – Options*). Un bouton gris apparaît dans ce cas à côté du facteur n, pour accéder au panneau de contrôle réservé à cet effet. Les modes suivants sont disponibles :

**1-  $IGs = n \cdot IG + b$**  : Cette méthode permet d'appliquer directement un facteur  $n$  prédéfini par l'utilisateur. L'ordonnée à l'origine «  $b$  » peut aussi être modifiée.

**2-  $Ts = n \cdot Ta + c$**  : Cette méthode applique un facteur  $n$  (et une ordonnée à l'origine «  $c$  ») individuellement sur chaque température journalière.

Le facteur  $n$  peut être différencié pour les températures sous le point de congélation (gel) et au-dessus (dégel). Les validations faites en comparant le logiciel aux données de plusieurs sites d'essais indiquent que la version actuelle du calcul du gel fournit de meilleures prévisions lorsqu'on pose  $n \approx 1$  (écart type  $\approx 0,12$ )

### 8.2.2 Édition d'un fichier CLM

Tous les fichiers CLM comportent la section [Climat] contenant les données générales utilisées par les modules d'analyse STRUCTURAL, GEL et GEL 1994. Il est aussi possible d'y ajouter des séries d'indices de gel mensuels ou de températures journalières, pour simuler la pénétration du gel et les soulèvements au cours d'un hiver en particulier. Il faut dans ce cas inscrire les données directement dans le fichier, à l'aide d'un éditeur de texte tel que le Bloc-notes de Windows.

Il faut alors respecter un format et une orthographe d'écriture conformes à l'exemple montré dans le Tableau 4 (exemple tiré du fichier « (program files)\Chaussee2\Stations\Québec a.clm »). Les titres débutant par le mot « Hiver » et par « DJG » apparaissent ainsi dans la liste de simulation lorsque le fichier CLM est choisi. C'est ce qui permet de sélectionner les séries de données correspondantes. Ces séries de données additionnelles ne sont utilisées que par le module GEL.

**Tableau 4 : Exemple d'un fichier CLM**

| <b>Extrait du fichier CLM</b>  | <b>Explication</b>  |
|--|---|
| [Climat]<br>CodeStation=7016294<br>IGn=1236<br>IG_sigma=160.6<br>Tma=4<br>Latitude=46.8<br>Longitude=71.38<br>Elevation=74<br>ZoneBB=Sud<br>TBB=20.5 | [Climat] (en-tête obligatoire)<br><br>La présence de l'indice de gel normal (IGn) est obligatoire. Les autres champs sont ignorés ou remplacés par une valeur par défaut lorsqu'ils sont absents. |

|   |  |
|---|--|
| [DJG 2004]<br>DateDebut = 2003/11/30<br>>Table: DegrésJours<br>>Jours   °C·jours<br>1        2<br>31      197<br>31      528<br>29      281<br>25      127  | [Titre d'une série de degrés-jours de gel (doit débuter par les lettres « DJG »)]<br>Date de début de la série<br>>Nom du tableau (facultatif)<br>>En-tête des colonnes (facultatif)<br>Durée (en jours) et intensité du gel (en °C·jours sous zéro)<br><br>Le module GEL convertit les indices de gel en températures moyennes.   |
| [Hiver 2004]<br>DateDebut = 2003/11/30<br>>Table: Températures<br>>Heures        °C<br>24      -2,1<br>24      -4,4<br>24      -11,2<br>24      -9<br>24      -12,8<br>24      -14,1<br>24      -9<br>24      -3,4<br>.<br>.<br>. | [Titre d'une série de températures (doit débuter par le mot « Hiver »)]<br>Date de début de la série<br>>Nom du tableau (facultatif)<br>>En-tête des colonnes (facultatif)<br>Durées (24 heures) et températures journalières<br><br>(Il faut obligatoirement entrer des intervalles de 24 heures.)<br><br>Les températures sont publiées par Environnement Canada dans le site Internet suivant : <a href="http://www.climat.meteo.gc.ca">http://www.climat.meteo.gc.ca</a> |

## 9 - CALCUL STRUCTURAL

Le calcul structural se fait selon la méthode empirique établie par l'AASHTO en 1986 et rééditée en 1993. La section qui suit décrit les notions tirées de ce guide et programmées dans le logiciel CHAUSSÉE.

| STRUCTURAL |                   |                                    |     |      |                   |
|------------|-------------------|------------------------------------|-----|------|-------------------|
| F Mr       | Mr effectif (MPa) | a (po <sup>-1</sup> )              | m   | SN   | W18 (en millions) |
| 1.00       | 4021              | 0.49                               | 1.0 | 5.03 | 41.002            |
| 1.00       | 110               | 0.07                               | 0.8 | 5.68 | 39.508            |
| 1.00       | 74                | 0.08                               | 0.8 | 8.29 | 38.92             |
|            |                   |                                    |     |      |                   |
|            |                   |                                    |     |      |                   |
|            |                   |                                    |     |      |                   |
|            |                   |                                    |     |      |                   |
| 1.00       | 20                | -> Équivalences d'été (FAS = 0.65) |     |      |                   |
|            |                   | Mr = 31 MPa                        |     |      |                   |
|            |                   | CBR = 3.5                          |     |      |                   |
|            |                   | Cu = 105 kPa                       |     |      |                   |

### 9.1 - Équation de l'AASHTO

La méthode de l'AASHTO est basée sur une corrélation statistique dérivée des observations de l'essai routier AASHTO qui a eu lieu durant les années 60. L'équation pour les chaussées bitumineuses est la suivante :

$$\log W_{18} = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \log (SN + 1) - 0,20 + \frac{\log \left[ \frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log (145,04 Mr) - 8,07$$

Équation 5

Elle exprime un lien entre la durée de vie en nombre d'essieux lourds admissibles ( $W_{18}$ ) et la détérioration du niveau de service ( $\Delta PSI$ ). Les caractéristiques de la chaussée qui entrent en jeu sont le nombre structural (SN), qui représente l'épaisseur structurale de la chaussée, et le module de résilience (Mr), qui correspond à la rigidité du sol qui la supporte. Le comportement des chaussées est en réalité bien plus complexe et fait intervenir d'autres facteurs. Il existe ainsi une certaine dispersion exprimée par la variable ( $S_0$ ). L'équation en tient compte de façon probabiliste en faisant intervenir un multiple ( $Z_R$ ) de la dispersion qui dépend du degré de risque toléré.

Les principaux paramètres se définissent plus précisément comme suit :

**W<sub>18</sub>** : prédiction de la durée de vie de la chaussée, exprimée en nombre total admissible de passages d'essieux simple à pneus jumelés et supportant une charge de 8 165 kg (18 000 lb);

**S<sub>0</sub>** : erreur standard de la prédiction, attribuable à la dispersion de toutes les données (propriétés des matériaux, épaisseur, niveau de qualité, conditions du chantier, prédiction du trafic, drainage des couches, caractéristiques du sol, précision du modèle). La valeur recommandée aux fins de conception est de 0,45;

**Z<sub>R</sub>** : déviation normale associée au risque de calcul (1-R). Une table statistique standard (Tableau 5) sert à déterminer directement le Z<sub>R</sub> à utiliser en fonction du niveau de confiance (R) visé;

**R** : niveau de confiance, ou fiabilité. Pourcentage de probabilité que la chaussée présente un niveau de qualité supérieur ou égal à celui qui est visé à la fin de la période de conception. Inversement, 1-R représente le risque du calcul, c'est-à-dire le risque d'obtenir une durée de vie plus courte que prévu ou l'étendue (en pourcentage de la longueur de la chaussée) qui devrait avoir atteint le seuil établi à la fin de la durée de vie;

**Tableau 5 : Déviation normale Z<sub>R</sub> en fonction du niveau de confiance R**

| R (%) | Z <sub>R</sub> | R (%) | Z <sub>R</sub> |
|-------|----------------|-------|----------------|
| 50    | 0              | 93    | -1.476         |
| 60    | -0.253         | 94    | -1.555         |
| 66    | -0.412         | 95    | -1.645         |
| 70    | -0.524         | 96    | -1.751         |
| 75    | -0.674         | 97    | -1.881         |
| 80    | -0.841         | 98    | -2.054         |
| 85    | -1.037         | 99    | -2.327         |
| 90    | -1.282         | 99.9  | -3.090         |
| 91    | -1.340         | 99.99 | -3.750         |
| 92    | -1.405         |       |                |

**PSI** : indice de viabilité de la chaussée. C'est un indice de qualité globale de la chaussée qui s'échelonne de 0 à 5. Le ΔPSI est la différence de PSI entre une chaussée neuve et une chaussée « à refaire ». Dans cette équation, l'écart admis par le concepteur pour les deux états dits initiaux et terminaux est mis en rapport avec les valeurs de référence qui sont 4,2 et 1,5 respectivement;

**Mr** : module de résilience effectif du sol de support (MPa). Le module de résilience sert à quantifier la rigidité d'un matériau. Comme on le verra plus loin, il faut procéder par strates, et ce module est nécessaire pour chacune des couches qui servent tour à tour de support à la structure

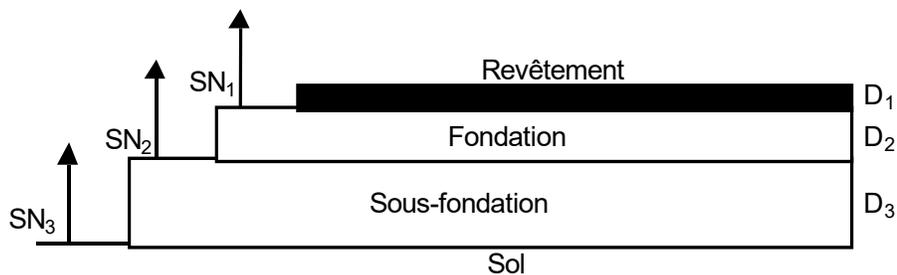
sus-jacente. Le module de résilience de chaque couche est aussi utilisé pour déterminer le nombre structural. Il faut utiliser une valeur effective tenant compte des variations saisonnières;

**SN** : nombre structural qui exprime l'épaisseur effective de la structure de la chaussée dont on évalue la portance.

## 9.2 - Principe d'application de l'équation de l'AASHTO

Le nombre structural au-dessus de chaque couche doit être suffisant pour supporter le trafic sans déformation excessive durant toute la période de conception. La conception finale correspond alors à un assemblage de couches de matériaux et d'épaisseurs définies qui résultent ainsi en un pourcentage de chances de conserver la chaussée en état à la fin de la période de conception pour tout le trafic anticipé.

Figure 7 : Principe d'un système multicouche (guide AASHTO 1993, p. II-36)



On doit résoudre l'équation de l'AASHTO (équation 1) pour chacune des composantes structurales en considérant de façon cumulative chaque couche à partir de la surface avec le matériau juste au-dessous. Ainsi, pour la première couche, l'équation de l'AASHTO peut être vérifiée en prenant le SN<sub>1</sub> avec le Mr de la couche 2 où :

$$SN_1 = a_1 D_1 / 25,4$$

où :

- SN<sub>1</sub>** : nombre structural au-dessus de la fondation
- D<sub>1</sub>** : épaisseur du revêtement (en mm)
- a<sub>1</sub>** : coefficient structural du revêtement = f (Mr<sub>1</sub>)

On doit ensuite résoudre la même équation 1 en prenant le SN<sub>2</sub> avec le Mr de la couche 3 où :

$$SN_2 = (a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2) / 25,4$$

où :

- SN<sub>2</sub>** : nombre structural au-dessus de la sous-fondation
- D<sub>2</sub>** : épaisseur de la fondation
- a<sub>2</sub>** : coefficient structural de la fondation = f (Mr<sub>2</sub>)
- m<sub>2</sub>** : coefficient de drainage de la fondation

Le calcul se fait ainsi de suite, jusqu'à la fin :

$$\mathbf{SN_n = (a_1 D_1 + \dots + a_i m_i D_i + \dots + a_n m_n D_n) / 25,4}$$

**Équation 6**

où :

- SN<sub>n</sub>** : nombre structural composé pour **n** couches
- D<sub>i</sub>** : épaisseur de la couche **i**
- a** : coefficient structural de la couche **i** = f (Mr<sub>i</sub>)
- m<sub>i</sub>** : coefficient de drainage de la couche **i**

Les coefficients structuraux (a<sub>i</sub>) sont des valeurs qui expriment la rigidité d'une couche en épaisseur effective d'apport structural pour chaque tranche de 25,4 mm (1 pouce) de matériau. Ils peuvent être déduits directement à partir des modules de résilience (Mr en MPa) :

$$a_i = K_a \log (145,04 \times Mr) - K_b$$

**Équation 7**

Les coefficients K<sub>a</sub> et K<sub>b</sub> dépendent du type de matériau. Typiquement, les paramètres suivants sont recommandés.

|                                  | <b>K<sub>a</sub></b> | <b>K<sub>b</sub></b> |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| Revêtement d'enrobé bitumineux : | 0,414                | 1,896                |
| Fondations granulaires :         | 0,249                | 0,977                |
| Sous-fondation granulaire :      | 0,227                | 0,839                |

Le coefficient de drainage (m<sub>i</sub>) est introduit pour les couches non liées dont la portance est modifiée par la présence d'eau de ruissellement ou provenant de la nappe phréatique. Il a pour fonction de corriger les coefficients structuraux en vue de tenir compte de la capacité des couches à drainer l'eau. Le coefficient de drainage varie donc suivant la perméabilité du matériau, la porosité effective, les pentes et les

distances à drainer ainsi que l'épaisseur des couches. Son choix est basé sur le temps nécessaire pour drainer 50 % de l'eau libre dans la fondation et la sous-fondation. Dans les conditions climatiques du Québec, une valeur de 0,8 est proposée aux fins de conception.

### **9.3 - Module de résilience ( $M_r$ )**

La rigidité des matériaux qui composent chaque couche de la chaussée est exprimée par le module de résilience ( $M_r$ ) déduit sur la courbe de déformation en fonction de la contrainte appliquée. Le module est la pente de cette courbe et son utilisation reste valable tant que la sollicitation des matériaux de la chaussée reste dans le domaine élastique, c'est-à-dire tant que les tassements permanents sont négligeables par rapport à la partie élastique.

Le module de résilience varie selon le type de matériau, ses caractéristiques intrinsèques, la quantité d'eau qu'il contient et le degré de compaction. Le module d'un même matériau peut aussi varier sous l'effet de facteurs externes comme la température et l'état de contrainte auquel il est soumis. La durée d'application de la charge a aussi un effet sur la déformation et le module d'un matériau visqueux tel qu'un matériau bitumineux. Le module d'un même matériau dans une chaussée aura donc des variations saisonnières et même journalières.

Il existe différents types de modèles de comportement du module de résilience qui peuvent être associés à chaque type de matériau. Le choix du modèle et de ses paramètres doit s'appuyer non seulement sur des essais de laboratoire, mais aussi sur des études de terrain et des simulations mathématiques permettant de représenter les conditions réelles de mise en service et de variations saisonnières. Le Tableau 6 montre les modèles utilisés par le logiciel CHAUSSÉE 2. Ces paramètres de modélisation sont cependant visibles uniquement en mode d'utilisation de niveau *Approfondi*, lorsqu'on double-clique sur une case d'affichage du module de résilience.

**Tableau 6 : Modèles de modules de résilience pour les matériaux de chaussées**

| Nom du modèle   | Forme de l'équation  | Explication   |
|-----------------|--|---|
| BB              | $Mr = 10 (K_1 - K_2 T^{K_3}) + K_4$ « + K4 » seulement si épaisseur > 150 mm | Le module est fonction de la température en °C.<br>C'est le cas des revêtements bitumineux, à cause du comportement visqueux du bitume. Cette équation est appliquée à partir de la température effective qui dépend de la zone climatique.   |
| Élastique (pur) | $Mr = K_1$   | Le module est constant.<br>C'est le cas le plus simplifié. Les sols et les matériaux de chaussées n'obéissent presque jamais à cette loi, mais son utilisation est pratique et se justifie plus facilement lorsque les matériaux sont soumis à un état de contrainte qui varie peu, comme dans le cas des sols supports que l'on trouve à une plus grande profondeur. |
| K-theta         | $Mr = K_1 \theta^{K_2}$ où $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$         | Le module dépend de la contrainte de confinement totale $\theta$ .<br>Ce modèle est souvent utilisé dans le cas des matériaux granulaires. Ceux-ci sont dits « écouissants », c'est-à-dire que le module augmente lorsque $\theta$ augmente ( $K_2$ est positif). Le modèle élastique pur est le cas particulier où $K_2 = 0$ .                                       |

### 9.3.1 - Variations saisonnières du module de résilience

Le module de résilience modélisé à l'aide des équations du Tableau 6 et affiché dans le module de calcul STRUCTURAL est directement considéré comme étant la valeur effective tenant compte de toutes les variations saisonnières. La méthode de l'AASHTO (1993) prescrit la méthode de détermination du Mr effectif en tenant compte du dommage attribuable à chaque période de l'année (Tableau 7).

**Tableau 7 : Mr effectif selon la méthode du dommage équivalent (AASHTO 1993)**

a) Exemple pour sol de type ML,  
 ML-CL ou CL (IP≤12)

| Mois                 | Mr, MPa | u <sub>f</sub>  |
|----------------------|---------|-----------------|
| Janvier              | 140     | 0,01            |
|                      | 140     | 0,01            |
| Février              | 140     | 0,01            |
|                      | 140     | 0,01            |
| Mars                 | 140     | 0,01            |
|                      | 20,7    | 1,01            |
| Avril                | 20,7    | 1,01            |
|                      | 21,7    | 0,90            |
| Mai                  | 23,3    | 0,77            |
|                      | 25,9    | 0,60            |
| Juin                 | 31,0    | 0,39            |
|                      | 38,8    | 0,24            |
| Juillet              | 46,5    | 0,15            |
|                      | 49,6    | 0,13            |
| Août                 | 51,7    | 0,12            |
|                      | 51,7    | 0,12            |
| Septembre            | 51,7    | 0,12            |
|                      | 51,7    | 0,12            |
| Octobre              | 49,1    | 0,14            |
|                      | 45,5    | 0,16            |
| Novembre             | 42,9    | 0,19            |
|                      | 41,4    | 0,20            |
| Décembre             | 41,4    | 0,20            |
|                      | 140     | 0,01            |
| Somme :              |         | 6,66            |
| Moyenne :            |         | 0,28            |
| <b>Mr effectif :</b> |         | <b>36,1 MPa</b> |

b) formulaire vierge

| Mois                 | Mr, MPa | u <sub>f</sub> |
|----------------------|---------|----------------|
| Janvier              |         |                |
| Février              |         |                |
| Mars                 |         |                |
| Avril                |         |                |
| Mai                  |         |                |
| Juin                 |         |                |
| Juillet              |         |                |
| Août                 |         |                |
| Septembre            |         |                |
| Octobre              |         |                |
| Novembre             |         |                |
| Décembre             |         |                |
| Somme :              |         |                |
| Moyenne :            |         |                |
| <b>Mr effectif :</b> |         |                |

$$u_f = 1,18 \cdot 10^8 (145,05 \cdot Mr)^{-2,32}$$

$$u_f = 1,18 \cdot 10^8 (145,05 \cdot Mr)^{-2,32}$$

Les coefficients K1, K2, K3 et K4 contenus dans la bibliothèque de référence ont été étalonnés conformément à cette approche, de façon à utiliser directement le résultat dans l'équation de l'AASHTO (Équation 5).

L'utilisation du Tableau 7 permet aussi de définir un facteur d'ajustement saisonnier (FAS) décrivant le rapport entre le Mr effectif annuel et la valeur maximale d'été :

$$FAS = \frac{Mr_{\text{effectif}}}{Mr_{\text{été}}} \quad \text{Exemple du Tableau 7 : } FAS = \frac{36,1}{51,7} = 0,70$$

**Équation 8**

Ce facteur FAS intègre l'effet des variations saisonnières dans un seul paramètre. Il a la propriété d'être indépendant de toute augmentation ou réduction du Mr d'un matériau lorsque celle-ci respecte la même proportion durant l'ensemble de l'année. À défaut de paramétrer explicitement tout le détail des variations saisonnières, la bibliothèque de référence contient le facteur d'ajustement saisonnier (FAS). Cela permet de simplifier le logiciel en même temps que de reconstituer le module d'été des sols et matériaux non liés.

### 9.3.2 - Facteur d'étalonnage du module de résilience (FMr)

Le facteur de module réversible (FMr) est un commutateur qui permet de modifier le Mr effectif d'une couche de matériau sans intervenir dans le modèle décrit dans le Tableau 6 et le Tableau 7. Il est sous-entendu que ce facteur est constant durant toute l'année car il multiplie directement le module effectif. Les effets se propagent alors dans le calcul du coefficient structural (a), du nombre structural (SN) et de la durée de vie structurale ( $W_{18}$ ).

Ce facteur peut être utile pour étalonner le module ou le coefficient structural avec la valeur déterminée à la suite d'un essai de déflexion, d'un essai de laboratoire, ou même d'un relevé visuel. L'expérience indique qu'un revêtement existant est affaibli lorsqu'il est fissuré dans les sentiers de roues (Tableau 8), et qu'il en est de même pour une fondation granulaire non conforme, dégradée, contaminée par des particules fines ou mal drainée. Il est donc préférable de mesurer la résilience des matériaux existants, y inclus le sol de support, et d'en tenir compte avec le facteur FMr.

**Tableau 8 : Coefficient structural approximatif d'après le niveau de fissuration**

Adaptation du guide AASHTO (1993, p. III-105)

| Fissuration de la surface  | Coefficient structural (a) |                      |
|--|----------------------------|----------------------|
|  | Revêtement bitumineux      | Fondation stabilisée |
| Peu ou pas de carrelage<br>Fissuration transversale de faible sévérité   | 0,35 à 0,40                | 0,20 à 0,35          |
| < 10 % carrelage de faible sévérité<br>< 1 fissure transversale tous les 6 m (sévérité moyenne et élevée)  | 0,25 à 0,35                | 0,15 à 0,25          |
| > 10 % carrelage de faible sévérité<br>< 10 % fissuration de fatigue de sévérité moyenne<br>> 1 fissure transversale tous les 3-6 m (sévérité moyenne et élevée) | 0,20 à 0,30                | 0,15 à 0,20          |
| > 10 % carrelage de sévérité moyenne<br>< 10 % carrelage de sévérité élevée<br>> 1 fissure transversale tous les 3 m (sévérité moyenne et élevée)                | 0,14 à 0,20                | 0,10 à 0,20          |
| > 10 % carrelage de sévérité élevée<br>> 1 fissure transversale tous les 3 m (sévérité élevée)   | 0,08 à 0,15                | 0,08 à 0,15          |

Notes :

- Le remplacement des zones sévèrement fissurées est recommandé avant tout resurfaçage.
- Les taux de fissuration à considérer sont ceux qui restent à la suite des réparations.
- Carottage et essais recommandés pour évaluation de tous les matériaux et à plus forte raison dans le cas des couches stabilisées.
- Les fondations ou sous-fondations granulaires dégradées ou contaminées par des particules fines peuvent avoir un coefficient structural inférieur à 0,1 et un coefficient de drainage réduit.
- Le concepteur peut faire intervenir tout autre type de dégradation jugé approprié pour justifier l'ajustement du coefficient structural d'une couche.
- Les essais de déflexion FWD réalisés au MTQ sur des chaussées abondamment fissurées dans les pistes de roues conduisent en général vers des coefficients structuraux situés entre 0,25 et 0,35 pour le revêtement, et rarement en dessous de 0,2.

En plus des essais de laboratoire disponibles, la résilience des couches existantes peut être déterminée à l'aide d'essais de déflexion (déflectomètre FWD, norme d'essai ASTM D 4694) ou de divers essais de pénétration ou de résistance. Il faut noter que les modules de résilience compatibles avec le guide AASHTO (1993) ne correspondent pas nécessairement aux modules utilisés selon les méthodes d'analyse basées sur la théorie de l'élasticité. Cela provient du fait que la méthode AASHTO a été développée à partir de modules déterminés en laboratoire suivant un protocole particulier. Von Quintus et Killingsworth (1997a et 1997b) proposent des facteurs de correspondance à cet effet.

Dans le cas du sol de support, l'Équation 9 (a, b, ou c) est recommandée pour déterminer le  $M_r$  à partir d'un bassin de déflexion mesuré avec un deflectomètre FWD.

a)  $M_r = 6,89476 \times 10^{(40,894 - 0,0092D_0 + 0,022 D_{305} - 0,19 D_{914})/25,4}$  (Thompson, 1989)

b)  $M_r = 172,608 - 1,42385 D_{914} + 0,0030607 D_{914}^2$  (Hall et Elliot, 1992)

c)  $M_r = C \cdot E = \frac{C \cdot (1-\nu^2) \sigma_0 a^2}{r \cdot d_r} = \frac{C \cdot (1-\nu^2) P}{r \cdot d_r \cdot \pi} = \frac{C \cdot S_f \cdot P}{r \cdot d_r}$  (Boussinesq, 1885 et AASHTO, 1993)

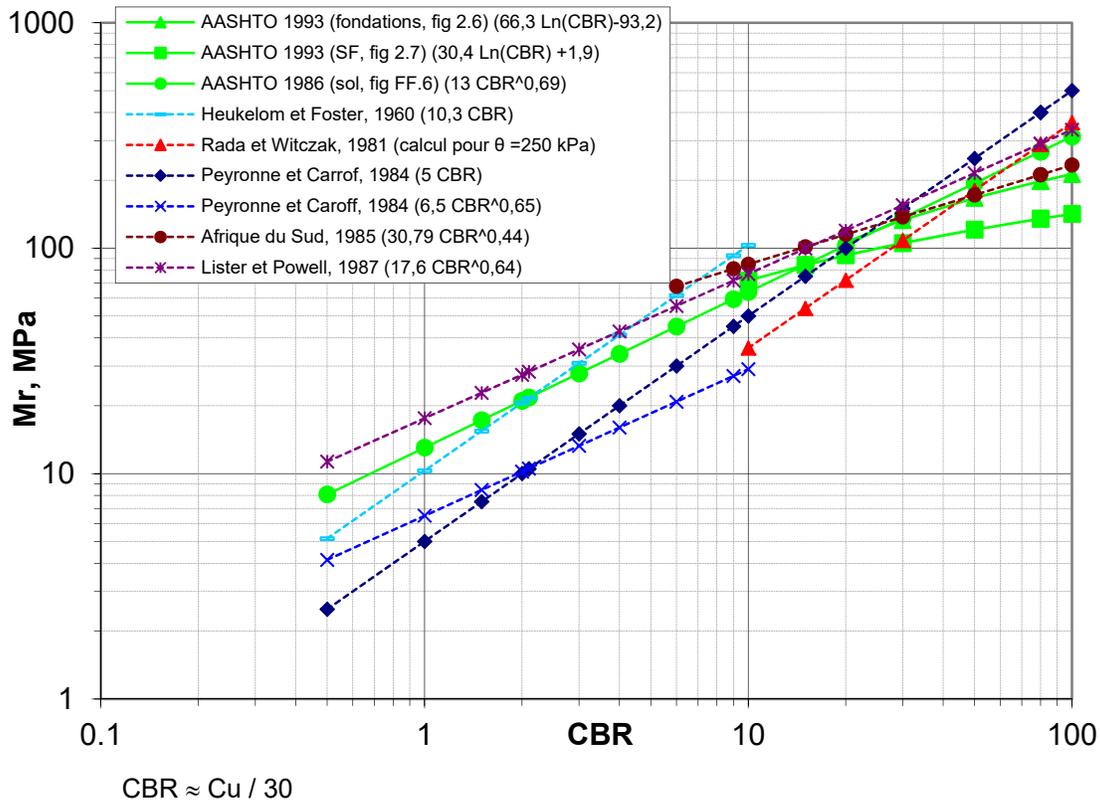
#### Équation 9

- $D_0, D_{305}, D_{914}$  = déflexions ( $\mu\text{m}$ ) à 0 ; 305 et 914 mm du centre de la charge, pour un essai FWD avec charge de 40 000 N d'intensité et 150 mm de rayon)
- $a$  = rayon de la plaque de chargement (mm)
- $\sigma_0$  = contrainte appliquée en surface (MPa)
- $P$  = charge appliquée en surface (N)
- $r$  = distance par rapport au centre de la charge (mm)
  - Le guide AASHTO décrit comment choisir la distance  $r$  optimale. Une distance de l'ordre de 900 mm est généralement acceptable.
- $d_r$  = déflexion (mm) mesurée à la distance  $r$
- $\nu$  = coefficient de Poisson
- $S_f$  = facteur de prédiction du module du sol
  - Le guide AASHTO propose  $S_f = 0,24$ , ce qui revient à utiliser l'équation de Boussinesq en posant  $\nu \approx 0,5$ .
- $C$  = Coefficient de correspondance entre  $E$  et  $M_r$ 
  - Von Quintus et Killingsworth (1997b) proposent un coefficient pour divers contextes. La valeur recommandée pour des sols fins est de l'ordre de 0,33.
- $E$  = Module d'élasticité apparent du sol de support (MPa)
- $M_r$  = module de résilience apparent du sol de support pour une contrainte déviatorique ( $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ ) de l'ordre de 43 kPa. (MPa)

La Figure 7 montre par ailleurs une série d'exemples de corrélation qui permettent d'estimer le module de résilience d'un sol ou d'un matériau à partir de sa résistance exprimée selon l'indice de portance californien (CBR). Dans le cas des sols cohérents, il est aussi possible de récupérer des données d'études géotechniques à l'aide de l'Équation 10. Il faut tenir compte que le paramètre  $S_0$  de l'Équation 5 prévoit la dispersion globale des différentes variables d'un segment homogène. Il faut aussi penser aux variations saisonnières avant de comparer une mesure ponctuelle avec la valeur effective pour l'ensemble de l'année. Le logiciel affiche le facteur d'ajustement saisonnier proposé (FAS) et s'en sert pour afficher

une conversion du  $M_r$  effectif du sol de support en valeur maximale d'été, ajoutant aussi l'équivalence pour l'indice CBR et la résistance au cisaillement.

**Figure 7 : Corrélation entre le module de résilience et l'indice CBR**



**Équation 10**

- CBR = indice de portance californien  
Méthode d'essai : ASTM D 1883 ou AASHTO T 193
- Cu = résistance au cisaillement non drainée (kPa)  
Méthodes d'essai (sols cohérents) :  
  - scissomètre de chantier, norme BNQ-2501-200
  - scissomètre portatif (Serota et Jangle, 1972)
  - cône suédois, norme BNQ-2501-110

Plusieurs argiles intactes de l'est du Canada sont particulièrement sensibles au remaniement, notamment lorsque l'indice de liquidité est élevé ( $I_L > 0,5$ ). L'absence de précautions adéquates peut amener une perte drastique de résistance, et même à la liquéfaction. Les calculs de dimensionnement supposent toutefois que les matériaux conservent leur intégrité pendant la construction. Le *guide d'utilisation des géosynthétiques de séparation et de renforcement des chaussées* (Transports Québec, 2004) propose des solutions et une méthode de conception pour protéger les sols faibles avant la pose du revêtement. Ce guide fournit aussi des informations complémentaires sur la résistance typique des sols et matériaux non-liés.

## 10 - CALCUL DU GEL

### 10.1 Dimensionnement au gel et seuil de soulèvement admissible

Certains projets particuliers peuvent demander un dimensionnement thermique conçu pour empêcher le gel d'atteindre un point précis. Cela peut être le cas par exemple lorsqu'il s'agit d'isoler une conduite d'aqueduc ou de protéger un sol extrêmement sensible (argile varvée ou ayant un  $I_L > 0,9$ ). L'utilisateur peut dans ce cas se servir de la profondeur du gel ( $Z$ ) comme critère de conception.

| STRUCTURAL                      |            | GEL                                      |                           | GEL (1994)               |                |                       |  |
|---------------------------------|------------|--|---------------------------|--------------------------|----------------|-----------------------|--|
| $\rho_d$<br>(t/m <sup>3</sup> ) | Eau<br>(%) | SP <sub>0</sub><br>(mm <sup>2</sup> /KH) | a<br>(MPa <sup>-1</sup> ) | K <sub>u</sub><br>(W/mK) | K <sub>f</sub> | S <sub>r</sub><br>(%) | L <sub>f</sub><br>(Wh/m <sup>2</sup> ) |
| 2.35                            | 0.0        | 0.0                                      |                           | 1.48                     | 1.48           | 0                     | 1250                                   |
| 2.2                             | 4.0        | 0.0                                      |                           | 1.77                     | 1.89           | 52                    | 7897                                   |
| 1.92                            | 8.0        | 0.0                                      |                           | 2.10                     | 2.49           | 56                    | 14018                                  |
|                                 |            |  |                           |                          |                |                       |  |
|                                 |            |  |                           |                          |                |                       |  |
|                                 |            |  |                           |                          |                |                       |  |
|                                 |            |  |                           |                          |                |                       |  |
| 1.3                             | 40.0       | 1.5                                      | 0.0                       | 1.26                     | 2.12           | 99                    | 36690                                  |

Graphe    Z (m) 1.880    h (m) 0.019

Par contre, dans la majorité des projets routiers, le dimensionnement au gel est dicté par le besoin d'éviter l'endommagement du revêtement. Cet endommagement peut prendre la forme de fissures de gel (lézardes) ou de déformations de la surface. Ces lézardes et déformations sont directement causées par les soulèvements au gel, et plus particulièrement par les variations de soulèvements (soulèvements différentiels). Le soulèvement ( $h$ ) constitue un indicateur directement relié aux dommages ou à la performance au gel.

L'analyse des soulèvements différentiels nécessite une analyse tridimensionnelle de la chaussée, alors que les logiciels disponibles sont actuellement unidimensionnels. Il faudrait donc multiplier les analyses pour plusieurs points distincts (idéalement pour chaque sondage ou chaque point de raccordement d'une transition) et compiler les différents soulèvements obtenus. Il faut noter que le cahier des charges (CCDG, 2018, art. 13.3.4.7) tolère des déviations de profil de 5 mm sous une poutre rectiligne de 3 m pour l'acceptation d'une nouvelle surface de revêtement bitumineux. Les suivis de comportement de chaussées en service indiquent que le différentiel d'IRI entre l'été et l'hiver ( $\Delta IRI_{\text{hiver-été}}$ ) se retrouve entre 0,3 et 0,7 m/km sur les chaussées neuves correctement construites. Le seuil exigé pour les contrats assortis d'une garantie de performance est de 1 m/km.

Le défi ultime du concepteur consiste donc à estimer le confort de roulement hivernal et la fissuration du revêtement à partir des variations de soulèvement entre les différents sondages ou points d'analyse. Il est à tout le moins évident qu'un soulèvement globalement plus faible a plus de probabilité de conduire vers des soulèvements différentiels plus faibles. Les Finlandais Gustavsson et autres (1999) considèrent qu'un seuil de soulèvement global situé entre 30 et 100 mm constitue un préalable pour maintenir un niveau de service acceptable et prévenir la fissuration du revêtement. Du côté des chercheurs de l'Université Laval,

Konrad (1998) estime que les soulèvements acceptables semblent se situer entre 30 et 60 mm selon le type de chaussée, alors que Doré et autres (2005) proposent un abaque définissant un seuil modulé en fonction de l'épaisseur de la fondation granulaire à la jonction d'une tranchée non gélive. L'expérience accumulée depuis l'an 2000 à l'intérieur de la Direction des chaussées indique que les soulèvements différentiels sont peu perceptibles lorsque le soulèvement global est limité à moins de 50 mm, et qu'ils peuvent être problématiques avec des soulèvements de plus de 80 mm. La bibliothèque de référence du logiciel propose donc un seuil par défaut variant de 50 à 70 mm, selon la classe de route.

L'usage des critères de protection au gel de 1994 (chapitre 11) est recommandé pour baliser les épaisseurs minimales (protection partielle) et maximales (profondeur P pour transition, Norme II-1.8, Tableau 1.8-1) de la chaussée en complémentarité avec le critère de soulèvement admissible. Ce dernier est toutefois le seul à pouvoir servir lorsque la zone soumise aux cycles de gel et de dégel se retrouve en présence d'un isolant thermique, d'un sol argileux varvé ou ayant un indice de liquidité élevé ( $I_L \geq 0,9$ ), ou de plusieurs couches de sol de gélivité différente.

## 10.2 Description du modèle mathématique

Le calcul du gel est basé sur le modèle SSR, mis au point en Finlande par Saarelainen (1992), en utilisant le concept du potentiel de ségrégation de Konrad et Morgenstern (1980). Il consiste à calculer la profondeur du gel (Z) et le soulèvement (h). Le calcul de la profondeur du gel se base sur l'équilibre du bilan thermique au front de gel. L'équation décrivant l'équilibre des flux de chaleur ( $W/m^2$ ) au front de gel est la suivante :

$$q_m = q_p + q_f + q_s$$

**Équation 11**

où :

$q_m = k_f \text{ grad } T_-$  : flux de chaleur qui s'échappe du front de gel vers la surface, en traversant la couche gelée,  $W/m^2$

$q_p = k_u \text{ grad } T_+$  : flux de chaleur du sol non gelé vers le front de gel (flux géothermique),  $W/m^2$

$q_f = L \, dz_0 / dt$  : flux de chaleur généré par le changement de phase de l'eau interstitielle lorsqu'elle se transforme en glace,  $W/m^2$

$q_s = L_w \, SP \, \text{grad } T_-$  : flux de chaleur généré par l'eau supplémentaire de ségrégation au moment de la formation de lentilles de glace,  $W/m^2$

$dz_0$  : pénétration du front de gel durant un incrément de temps  $dt$ , m

SP : potentiel de ségrégation,  $m^2/^\circ K h$

Lw : chaleur latente de fusion de l'eau = 92 778 Wh/m<sup>3</sup>

kf : conductivité thermique du sol gelé, au front de gel, W/°Cm

ku : conductivité thermique du sol non gelé, au front de gel, W/°Cm

L : chaleur latente de fusion du sol gelé, au front de gel, Wh/m<sup>3</sup>

Rfz =  $\Sigma(z_i/kf_i)$  : résistance thermique des couches gelées, m<sup>2</sup>K/W

z<sub>i</sub> : épaisseur de la sous-couche gelée i, m

kfi : conductivité thermique de la sous-couche gelée i, W/°Cm

grad T+ : gradient géothermique, °C/m

Saarelainen (1992) fourni une estimation empirique pour les conditions routières scandinaves :

$$\text{grad T+} \approx 1,16 \cdot S \cdot (0,43 \cdot Tma + 1)$$

S : coefficient d'intensité qui prend la valeur de 1,0 en novembre et décroît pour atteindre 0,7 en avril.

Côté et Konrad (2009, et communications personnelles – 2006), proposent un modèle de remplacement pour le flux géothermique, appliqué aux conditions routières canadiennes.

Ce dernier est utilisé par défaut dans le logiciel :

$$qp = \left\{ \frac{(250 - t)[9.62 + 1.44 \ln(Tma)]}{250 + [5.78 - 1.62 \ln(Tma)] \cdot t} + 1.2 \right\} \cdot C_q$$

t : nombre de jours écoulés depuis la date moyenne de début du gel

C<sub>q</sub> : facteur de correction en présence d'une couche d'isolation en polystyrène, dépendant de l'emplacement du front de gel:

- Au-dessus de l'isolant:  $\log(C_q) = -4.5 \alpha^{0.8}$
- En dessous de l'isolant:  $C_q = 1.0$
- $\alpha$  = épaisseur de polystyrène extrudé ( $\leq 0.1$  m,  $k=0.03$  W/m°C).

grad T- = (Tf-Tp) / z\* : gradient de température du sol gelé au front de ségrégation, °C/m

Tf : température de congélation, °C

Tp : température à la surface du sol au temps dt, °C

Tma : température moyenne annuelle de l'air, (0.8 à 8°C)

$$z^* = kf \cdot Rfz + 0,5 dz_0$$

L'équation doit être résolue de façon itérative pour déterminer l'avancée du front de gel (dz<sub>0</sub>) permettant de maintenir l'équilibre des flux thermiques. Le calcul du soulèvement se fait ensuite suivant deux composantes :

- Le soulèvement dû à l'augmentation de volume de l'eau lorsqu'elle se transforme en glace, m;

$$dh_0 = dVi \cdot w_f \rho_d / \rho_w \cdot dz_0 \approx dVi \cdot (Sr \cdot n) \cdot dz_0$$

**Équation 12**

où : dVi : gonflement du volume interstitiel :  $dVi = (Sr - Sr_{Critique})$  (Limité de 0 à 0,09)

Sr : saturation en eau (décimal)

SrCritique : seuil de déclenchement du gonflement interstitiel (Typiquement 0,85 à 0,9)

w<sub>f</sub> : teneur en eau gelée, kg/kg;

ρ<sub>d</sub> : masse volumique sèche du sol gelé, t/m<sup>3</sup>;

ρ<sub>w</sub> : masse volumique de l'eau, t/m<sup>3</sup>.

- Le soulèvement dû à la formation des lentilles de glace, m;

$$dh_s = 1,09 SP gradT_- dt = 1,09 SP (T_f - T_p) dt / (k_{fz} R_{fz})$$

où SP : potentiel de ségrégation, m<sup>2</sup>/°CH

**Équation 13**

Le calcul doit se répéter pour chaque donnée de température (Tp) comprise dans l'hiver. On doit alors incrémenter la profondeur du gel et le soulèvement à chaque boucle en plus de corriger la profondeur du gel (Z) en fonction du soulèvement :

$$dh = dh_s + dh_0; \quad h = \sum(dh) \quad dz = dz_0 + dh; \quad z = \sum(dz)$$

**Équation 14**

### 10.3 – Gélivité (SP)

Le soulèvement au gel d'un sol peut se diviser en deux composantes fondamentales :

- le soulèvement causé par le gonflement de l'eau interstitielle (h<sub>0</sub>);
- le soulèvement de ségrégation issu de la formation des lentilles de glace (h<sub>s</sub>).

Le gonflement interstitiel (h<sub>0</sub>) est dû à l'augmentation de volume de l'eau lorsqu'elle se transforme en glace. Cela se produit uniquement pour les sols saturés ou quasi saturés, soit lorsque le degré de saturation (Sr) est supérieur à un seuil critique de l'ordre de 85 à 90 %. Ce phénomène se produit dans tous les sols saturés même si leur indice SP est nul.

L'indice de gélivité d'un sol quantifie sa propension à former des lentilles de glace sous l'effet du gel. Le potentiel de ségrégation (SP) quantifie ce phénomène (Konrad et Morgenstern, 1980; Info DLC, 2002). Ce paramètre varie en fonction l'état de contrainte du sol. Plus précisément, le potentiel de ségrégation est calculé à partir de la valeur sans surcharge (SP<sub>0</sub>) et du coefficient de surcharge (a), en utilisant la relation suivante :

$$SP = SP_0 e^{-a \cdot \sigma} \quad \text{où } \sigma \text{ est la surcharge appliquée sur le sol (en MPa).}$$

**Équation 15**

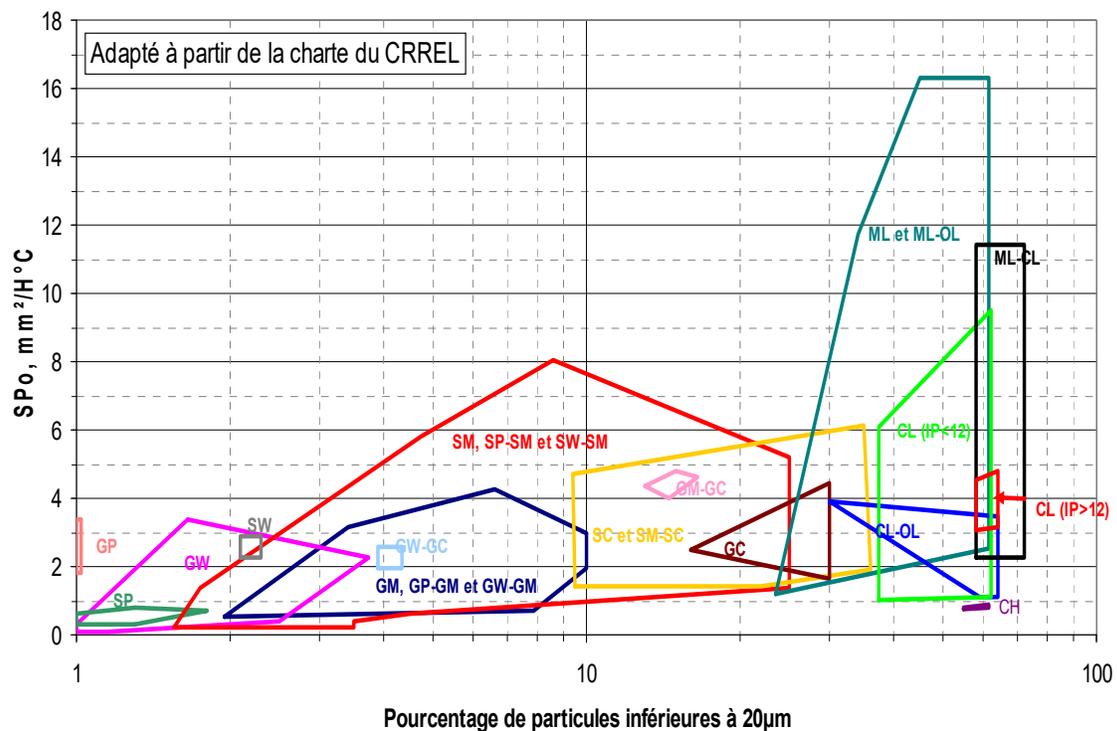
À l'intérieur du logiciel, l'affichage du coefficient de surcharge ne se fait que lorsque la valeur  $SP_0$  est supérieure à zéro.

Tableau 9 : Échelle de gélivité

| Gélivité    | SP                        |                           |  | CRREL, 1981<br>mm/jour | indice de soulèvement<br>$\Delta h / h_{gel}$ |
|-------------|---------------------------|---------------------------|--|------------------------|---|
|             | mm <sup>2</sup> /°C·heure | mm <sup>2</sup> /°C·jours | (x10 <sup>-3</sup> )mm <sup>2</sup> /°Csec |                        |   |
| Négligeable | < 0,5                     | < 12                      | < 14                                       | < 0,5                  | < 0,01  |
| Faible      | 0,5 à 1,5                 | 12 à 35                   | 14 à 40                                    | 0,5 à 2                | 0,01 à 0,04                                   |
| Moyenne     | 1,5 à 3                   | 35 à 75                   | 40 à 87                                    | 2 à 4                  | 0,04 à 0,08                                   |
| Élevée      | 3 à 8                     | 75 à 200                  | 87 à 230                                   | 4 à 8                  | 0,08 à 0,20                                   |
| Très élevée | > 8                       | > 200                     | > 230                                      | > 8                    | > 0,2   |

Le Tableau 9 présente des équivalences de gélivité pour faciliter les conversions entre les systèmes les plus courants. Le logiciel travaille en mm<sup>2</sup>/°C·heure et contient une bibliothèque de valeurs initiales en fonction du type de sol. La valeur réelle pour un même type de sol peut par contre être très variable comme en témoigne la Figure 8, adaptée de la charte du Laboratoire de recherche en région froide (CRREL) du Corps des ingénieurs de l'armée américaine (USACE). Cette figure montre que les silts (ML et ML-CL) peuvent présenter un indice de gélivité très élevé.

Figure 8 : Charte du CRREL convertie pour l'indice  $SP_0$



### 10.3.1 Indice de gélivité sans surcharge (SP<sub>0</sub>)

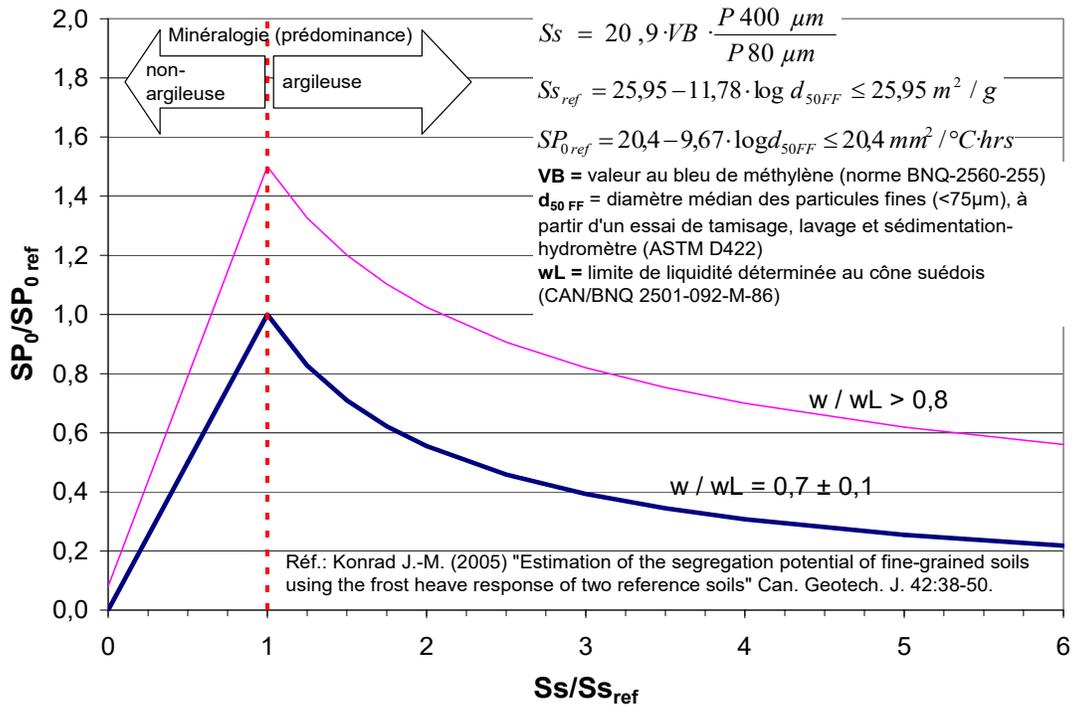
La Figure 8 montre que la classification unifiée ne permet pas une évaluation précise de la gélivité. Voici les différentes approches qui permettent de déterminer l'indice de gélivité. Plusieurs de ces approches peuvent aussi être combinées pour plus de fiabilité.

L'approche fondamentale pour déterminer la gélivité d'un échantillon de sol consiste à réaliser un essai de congélation (méthode d'essai LC 22-331), lequel peut être fait par la Direction des matériaux du ministère des Transports dans un délai d'environ une semaine.

Une autre approche très performante, et plus pratique sur les routes existantes, consiste à mesurer *in situ* les profondeurs du gel et les soulèvements, et à étalonner le logiciel de façon à ce qu'il reproduise fidèlement les mesures prises sur le terrain (Info DLC, 2010). La section 10.8 décrit les fonctions spéciales prévues dans le logiciel pour permettre de procéder de cette façon.

La troisième approche consiste à utiliser les corrélations empiriques disponibles. Il y a d'une part celle proposée par Konrad (2005), à partir des essais de caractérisation habituels auxquels on ajoute une caractérisation des particules fines par sédimentométrie et un essai au bleu de méthylène. Cette approche est résumée à la Figure 9 et détaillée en annexe II sous la forme d'instructions de travail à l'intention des personnes en charge des études de sols. Cette approche caractérise spécifiquement le potentiel de ségrégation de la fraction fine. Les sols avec une matrice de particules grossières peuvent être moins gélifs (voir Figure 8).

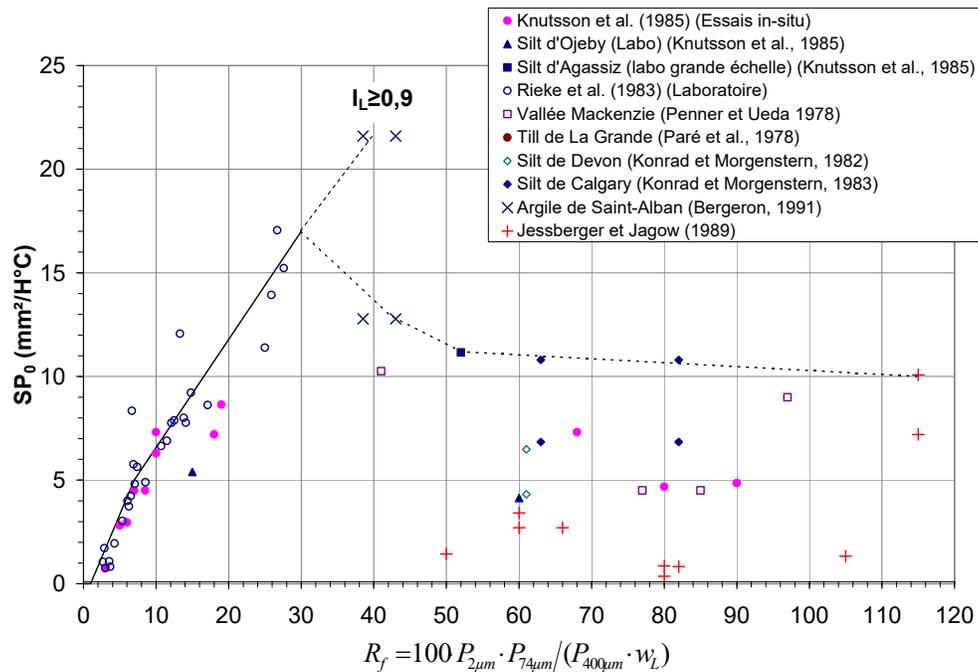
Figure 9 : Estimation indirecte de la gélivité des particules fines (Konrad, 2005)



La Figure 10 montre une approche similaire pour le cas où l'essai au bleu de méthylène ne serait pas disponible. Il est recommandé de toujours l'utiliser en parallèle pour délimiter la zone de confiance. De par la dispersion des points, cette dernière s'avère imprécise lorsque le facteur de fines (Rf) est supérieur à 30.

L'expérience indique que les valeurs  $SP_0$  obtenus en laboratoire apparaissent souvent plus élevées que sur le terrain. Konrad et Roy (1999) expliquent comment le  $SP_0$  diminue au-dessus de la nappe phréatique, sous l'effet de la montée capillaire et des conditions non-saturées. L'utilisateur doit choisir des valeurs  $SP_0$  appropriées puisque ces effets ne sont pas modélisés dans le logiciel.

Figure 10 : Estimation indirecte de la gélivité (d'après Rieke et autres, 1983 et Knutsson et autres, 1985)



### 10.3.2 Coefficient de surcharge (a)

Le coefficient de surcharge varie typiquement entre 1 et 20 MPa<sup>-1</sup> et peut être mesuré sur demande pendant l'essai de congélation LC 22-331. La Figure 11 montre que le gonflement au gel des sols plus grossiers tend à être plus sensible à la surcharge. La relation suivante, proposée par Konrad (2005), permet de tirer un constat similaire pour différents assemblages de particules fines :

$$a \approx 5 \cdot d_{50FF}^{0,45}$$

Équation 16

où  $d_{50FF}$  : diamètre moyen des particules fines (passant 80µm)

La Figure 12, qui n'est qu'une représentation graphique de l'Équation 15, montre l'effet du coefficient de surcharge sur l'indice SP. On peut y lire par exemple qu'un coefficient de 10 MPa<sup>-1</sup> a pour effet de réduire la gélivité de 40 % sous une pression de 50 kPa, c'est-à-dire lorsque le sol est surmonté d'une structure de chaussée d'environ 2 m d'épaisseur totale.

Figure 11 : Valeurs typiques du coefficient de surcharge en fonction de la teneur en argile (Adapté de Knutsson et autres 1985)

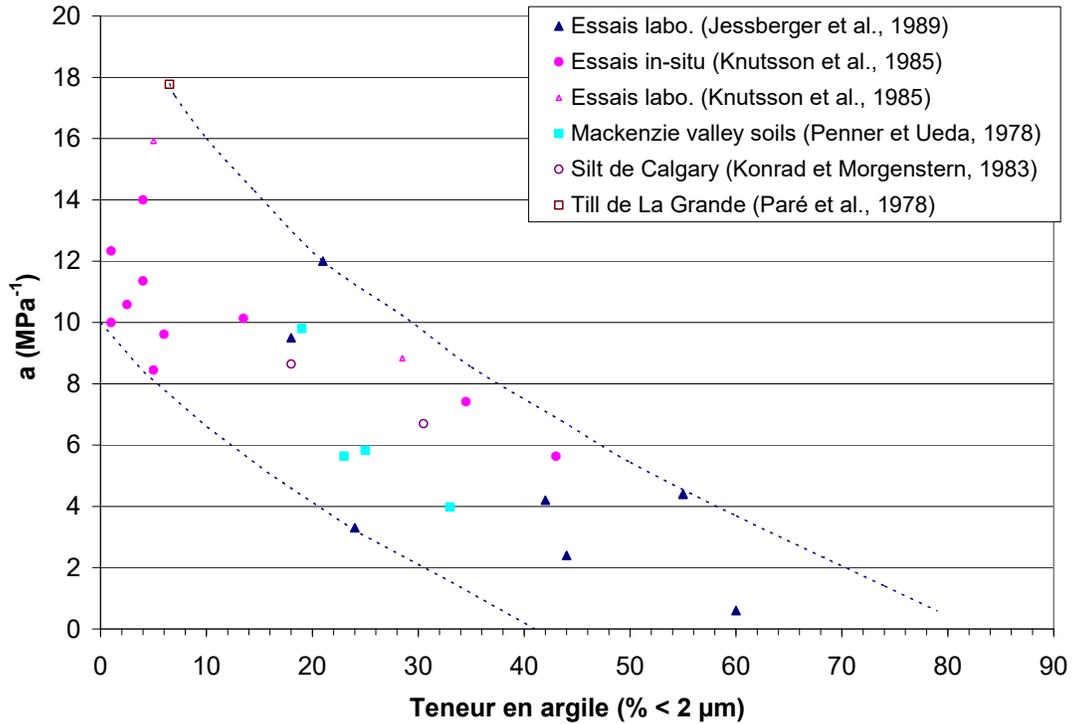
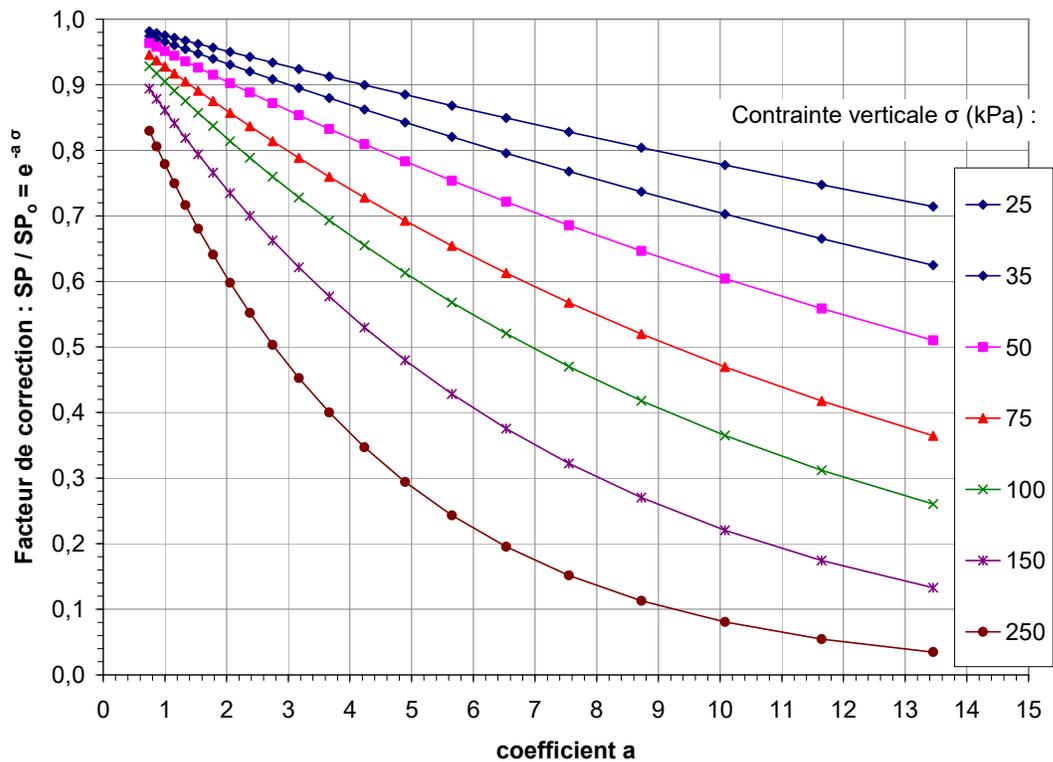


Figure 12 : Effet du coefficient de surcharge sur la gélivité



### 10.3.3 Sol argileux varvé ou ayant un indice de liquidité élevé ( $I_L \geq 0,9$ )

L'indice de liquidité d'un sol se définit par  $I_L = (w-w_p)/(w_L-w_p)$ . Les sols dont l'indice de liquidité avoisine une valeur de 0,9 et plus sont très structurés et gorgés d'eau. Ce sont des sols qui n'ont jamais connu de cycle de gel-dégel depuis leur déposition initiale. Ils sont relativement fréquents dans les déblais argileux du Québec, en dessous de la croûte de surface. De tels sols ont un indice de gélivité extrêmement élevé ( $SP_0 \approx 16$  à  $20 \text{ mm/H}^\circ\text{C}$ ), et occasionnent des tassements importants durant leur premier dégel.

Le tassement au premier dégel est de l'ordre de 30 %, sous une pression de 25 kPa (Bergeron, 1991). Cette problématique peut justifier le dimensionnement d'une protection totale contre le gel. Il faut noter qu'avec ce tassement, le premier cycle de gel-dégel fait baisser sensiblement l'indice de liquidité. Le potentiel de ségrégation peut se trouver réduit de moitié après le premier cycle de gel-dégel, et tend à se stabiliser à environ 25 % de sa valeur initiale après quatre cycles. Les premiers cycles de gel-dégel ont donc pour effet de stabiliser le sol, et démarrent en quelque sorte la formation d'une nouvelle croûte de surface.

Pour cette raison, il est recommandé de laisser geler ces sols durant un hiver avant de construire le revêtement d'une chaussée. Il faut alors prévoir de déneiger la surface durant l'hiver, et idéalement de charger la structure granulaire au plus tôt durant le printemps ou le dégel.

## 10.4 – Conductivité thermique (K)

La conductivité thermique (K) est une constante qui caractérise le comportement des matériaux au moment du transfert de chaleur par conduction, c'est-à-dire sans déplacement appréciable de matière. Elle représente la chaleur transférée par unité de surface, dans une unité de temps sous un gradient de température ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ).

La valeur pour un sol dépend de la conductivité de chacun de ses constituants (minéraux, eau, glace, air, bitume, etc.) et de leur proportion volumétrique respective. On sépare la conductivité thermique du sol non gelé ( $K_u$ ) de celle du sol gelé ( $K_f$ ) à cause de la différence importante séparant l'eau ( $K_w=0,6$ ) de la glace ( $K_g=2,24$ ).

La conductivité thermique se mesure directement en laboratoire, mais l'utilisation d'un modèle empirique est en pratique jugée satisfaisante. Le logiciel CHAUSSÉE 2 supporte une série de modèles dont celui de Kerstern (1949) qui est le plus connu et le plus répandu. La bibliothèque de données par défaut contient toutefois une configuration axée sur les modèles de Côté et Konrad (2005a et 2005b) qui sont dorénavant jugés comme étant mieux adaptés et plus précis.

#### 10.4.1 Conductivité thermique (Ks) et masse volumique ( $\rho_s$ ) des particules solides

Le modèle de Côté et Konrad (2005a et 2005b) permet de tenir compte de la conductivité thermique des grains solides (Ks) lorsqu'on connaît leur composition minéralogique. La masse volumique des solides ( $\rho_s$ ) permet quant à elle de préciser les calculs de porosité et de saturation au moment de séparer les différents constituants du matériau (minéraux, eau, glace, air, bitume).

Ces deux paramètres sont accessibles en mode d'utilisation de niveau *Approfondi*, lorsqu'on appuie sur les boutons gris situés sous les colonnes Ku et  $\rho_d$  du module GEL. Le Tableau 10 présente une liste de valeurs de conductivité thermique (Ks) et de masse volumique ( $\rho_s$ ) qui permet de tenir compte de la minéralogie des particules solides. Il est utile de savoir que près des deux tiers des pierres concassées du Québec sont de nature calcaire. Il faut noter par contre que les dolomies, grès, quartzites et autres roches riches en quartz auront tendance à augmenter la pénétration du gel. Il est aussi possible d'utiliser l'approximation de Johansen (1975) lorsque la fraction en quartz (q) est connue (Équation 17). Une moyenne géométrique peut aussi être faite à l'extérieur du logiciel pour déterminer un Ks qui tienne compte de tous les minéraux. (Consulter Côté et Konrad, 2005)

$$K_s = 2^{(1-q)}7,7^q \text{ lorsque } q > 0,2$$

$$K_s = 3^{(1-q)}7,7^q \text{ lorsque } q \leq 0,2$$

Équation 17

**Tableau 10 : Conductivité thermique et masse volumique des particules solides**

| Matériau                         | $\rho_s$<br>t/m <sup>3</sup> | ks<br>W/m°C |
|----------------------------------|------------------------------|-------------|
| <b>Roches</b>                    |                              |             |
| Anorthosite                      | 2,73                         | 1,8         |
| Basalte                          | 2,90                         | 1,7         |
| Diabase                          | 2,98                         | 2,3         |
| * Dolomie                        | 2,90                         | 3,8         |
| * Dolomie (St-Eustache)          | 2,85                         | 3,3         |
| Gabbro                           | 2,92                         | 2,2         |
| Gabbro (St-Joseph-de-Beauce)     | 2,95                         | 2,2         |
| Gneiss                           | 2,75                         | 2,6         |
| Granodiorite                     | 2,73                         | 2,6         |
| <b>Granite</b>                   | <b>2,75</b>                  | <b>2,5</b>  |
| Granite (Valcartier)             | 2,75                         | 2,6         |
| Granite (Lac-St-Charles)         | 2,65                         | 2,6         |
| <b>Calcaire</b>                  | <b>2,70</b>                  | <b>2,5</b>  |
| Calcaire (St-Marc-des-Carières)  | 2,67                         | 2,3         |
| * Marbre                         | 2,80                         | 3,2         |
| * Péridotite                     | 2,95                         | 3,6         |
| * Quartz monzonite (34 % quartz) | 2,68                         | 3,0         |
| * Quartzite                      | 2,65                         | 5,0         |
| * Quartzite (Rimouski)           | 2,65                         | 5,0         |
| * Grès                           | 2,80                         | 3,0         |

|                                    |      |      |
|------------------------------------|------|------|
| * Grès (St-Anaclet)                | 2,67 | 3,4  |
| Schiste                            | 2,65 | 1,5  |
| Shale                              | 2,65 | 2,0  |
| Syénite                            | 2,80 | 2,0  |
| Syénite (Mont St-Hilaire)          | 2,73 | 1,6  |
| Tonalite (28 % quartz)             | 2,77 | 2,6  |
| Trap rock                          | 2,90 | 2,0  |
| <b>Sols et matières organiques</b> |      |      |
| Charbon                            | 1,35 | 0,26 |
| Tourbe                             | 1,50 | 0,25 |
| Silt et argile (Québec)            | 2,75 | 2,90 |
| Sable du Bouclier laurentien       | 2,65 | 4,00 |
| Sable des Appalaches               | 2,67 | 3,55 |

## 10.5 – Chaleur latente de fusion (Lf)

La chaleur latente de fusion est la quantité d'énergie nécessaire à une quantité de matière pour qu'elle passe de l'état solide à l'état liquide, ou la quantité d'énergie dégagée au cours du processus inverse. Cette transformation a lieu à température et pression constantes. La chaleur latente de fusion de l'eau ( $L_w$ ) est de 334MJ/m<sup>3</sup> (92778 Wh/m<sup>3</sup>). Le logiciel CHAUSSÉE 2 calcule la valeur  $L_f$  à considérer pour chaque couche en fonction de la quantité d'eau qui gèle dans le sol :

$$L_f = (w_f) \cdot L_w \rho_d / \rho_w$$

Équation 18

## 10.6 – Masses volumiques et volumétrie

Le module GEL considère les matériaux comme un milieu poreux composé d'un assemblage de particules solides, d'eau, de glace, d'air et de bitume. Les paramètres classiques d'ingénierie et de mécanique des sols sont retenus à la place du volume d'occupation de chaque constituant.

**Tableau 11 : Variables et constantes associées aux constituants des matériaux**

|                 | solides  | bitume          | eau          | glace                    | air              |
|-----------------|----------|-----------------|--------------|--------------------------|------------------|
| Masse volumique | $\rho_s$ | $\rho_b = 1,02$ | $\rho_w = 1$ | $\rho_i = \rho_w / 1,09$ | $\rho_a = 0$     |
|                 | $\rho_d$ |                 |              |                          |                  |
| Proportion      | 1-n      | Vbe             | wu           | wf                       | $n \cdot (1-Sr)$ |

Les intrants au logiciel sont les suivants :

$\rho_d$  = masse volumique sèche (tonnes/m<sup>3</sup>) (solides + bitume vs volume total)

$\rho_s$  = masse volumique des particules solides (tonnes/m<sup>3</sup>)

w = teneur en eau, lorsque le sol n'est pas gelé (kg eau/kg solides)

V<sub>be</sub> = volume de bitume effectif, excluant le volume de bitume absorbé par les granulats et exprimé en pourcentage par rapport au volume sans vides interstitiels (Langlois, 2003).

Les calculs affichés sont les suivants :

n = porosité (proportion du volume interstitiel total : air + eau)

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s + V_{be}(\rho_b - \rho_s)}$$

Équation 19

S<sub>r</sub> = saturation (proportion du volume interstitiel occupé par l'eau)

$$S_r = \frac{w \cdot \rho_d}{n \cdot \rho_w} \leq 1$$

Équation 20

w<sub>u</sub> = teneur en eau non gelée (kg/kg) (voir l'Équation 21)

w<sub>f</sub> = teneur en eau gelée (kg/kg) (voir l'Équation 21)

Par ailleurs, la somme des fractions volumiques de chaque constituant doit physiquement être toujours égale à 1 (100 % du volume total). Cela implique que la porosité et le degré de saturation calculés doivent être compris entre 0 et 100 % et que la masse volumique sèche doit être compatible avec la masse volumique des particules solides. Les matériaux sont aussi soumis à d'autres contraintes physiques comme une plage de porosité limitée par la granulométrie et la forme des particules. Le logiciel fait ces vérifications et colorie les cases problématiques en orange lorsqu'une combinaison de données paraît clairement irréaliste. L'utilisateur doit alors ajuster au moins un de ces paramètres pour rétablir la situation de façon à éteindre les lumières orange.

## 10.7 - Surface spécifique (S<sub>s</sub>) et teneur en eau gelée (w<sub>f</sub>) ou non gelée (w<sub>u</sub>)

La subdivision de la teneur en eau (W) en portions gelée et non gelée (W<sub>f</sub> et W<sub>u</sub>) s'applique au sol en condition gelée. Ce n'est pas nécessairement toute l'eau contenue dans un sol qui gèle lorsque sa température descend sous le point de congélation. Le film d'eau adsorbée que l'on trouve dans les sols fins est plus difficile à geler que l'eau libre. La quantité d'eau gelée dépend de la surface spécifique du sol (S<sub>s</sub>) et de sa température. Le logiciel CHAUSSÉE 2 utilise à cet effet la relation empirique mise au point par Anderson et Tice (1972) :

$$w_u = 0,01 \cdot e^{(0,2618 + 0,5519 \cdot \ln(S_s) - 1,449 \cdot \ln(-T) \cdot S_s^{-0,264})} \leq w$$
$$w_f = w - w_u$$

Équation 21

Une température fixe de -3°C est utilisée pour les sols gelés, considérant que seuls les sols de support possèdent un film d'eau adsorbée significatif. Les teneurs en eau gelée et non gelée interviennent dans le calcul de la conductivité thermique du sol gelé (Kf), dans le calcul de la chaleur latente de fusion (Lf) ainsi que dans le calcul du gonflement interstitiel ( $h_0$ ).

La surface spécifique et la teneur en eau non gelée sont visibles en mode d'utilisation de niveau *Approfondi*, lorsqu'on appuie sur le bouton situé sous la colonne des teneurs en eau. Il ne faut pas confondre la surface spécifique du sol ( $S_s$ ) utilisée à cet endroit et la surface spécifique des particules fines ( $S_{sFF}$ ) pouvant servir au calcul de l'indice de gélivité ( $SP_0$ ). Il est possible de basculer entre la teneur en eau non gelée massique ( $W_u$ ) et volumique ( $Q_u$ ) lorsqu'on clique sur l'étiquette de titre de cette colonne.

## 10.8 - Étalonage du calcul avec des mesures de terrain

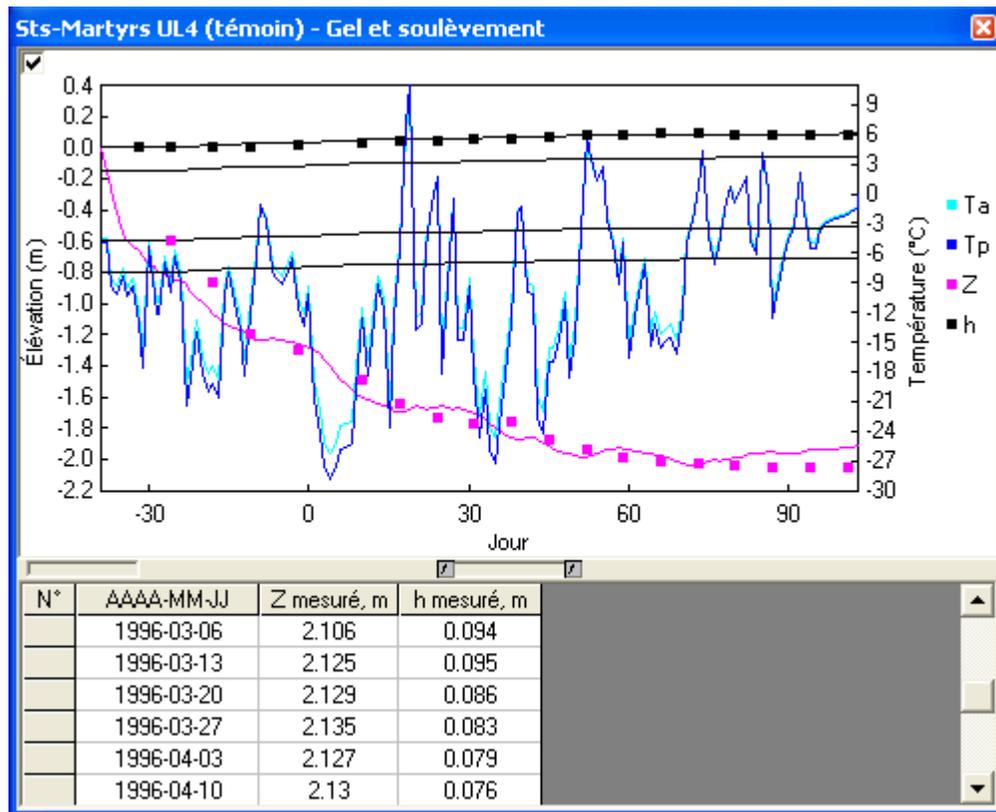
Le code de calcul du logiciel et la bibliothèque de paramètres par défaut ont été minutieusement préparés et validés pour réduire les imprécisions dans les limites du possible. La simulation théorique peut tout de même présenter certains écarts avec la réalité d'un site donné.

Il est possible d'effectuer un étalonage spécifique à partir du comportement réel sur le terrain. Il s'agit dans ce cas d'entrer toutes les informations connues sur les matériaux et sur le climat (voir section 8.2.2), et de déduire les inconnues par tâtonnement de façon que la simulation reproduise fidèlement des mesures de profondeur du gel et de soulèvement. On désigne ce procédé sous le nom de calcul inverse ou rétrocalcul. Cela permet d'augmenter la fiabilité des calculs ultérieurs, où l'on modifie les données climatiques et la structure de la chaussée en fonction des scénarios d'intervention envisagés. La procédure recommandée a été résumée dans un bulletin d'information technique à l'intention des chargés de projets (Info DLC, 2010).

En plus d'allouer la modification des paramètres, le logiciel permet d'afficher les résultats en parallèle avec des mesures de profondeur du gel et de soulèvement. Cet affichage se fait à l'intérieur du graphe, visible lorsqu'on active la case « Graphe » située dans le coin inférieur gauche de l'onglet GEL. Ce

graphe (Figure 13) affiche les données de températures de l'hiver simulé, la ligne de pénétration du gel, ainsi que le soulèvement de la surface et de toutes les interfaces des couches de la chaussée. Un bouton muni de deux petites flèches situé au centre de la barre grise sous le graphique permet aussi d'afficher un tableau déroulant pouvant contenir les mesures de profondeur du gel et de soulèvement. Les mesures, inscrites par l'utilisateur à l'intérieur de ce tableau, s'affichent sur le graphe sous la forme de points discontinus, permettant de visualiser l'arrimage entre les mesures réelles et la simulation théorique. La section 8.2.2 explique comment entrer et choisir les données de températures pour l'hiver durant lequel les mesures ont été prises. Un autre bouton situé à gauche de la barre grise permet d'alterner entre le tableau de saisie des mesures et le tableau de rapport journalier du modèle de calcul.

Figure 13 : Graphe d'affichage du module GEL

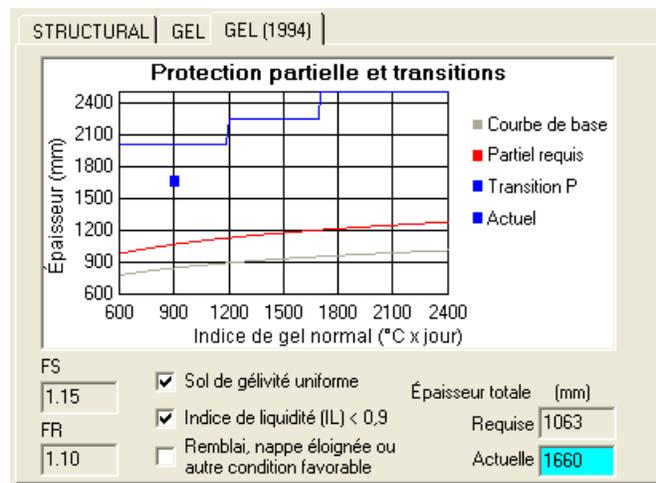


## 11 - CRITÈRE DE GEL DE 1994

L'usage des critères de protection au gel de 1994 est recommandé pour baliser les épaisseurs de la chaussée en complémentarité avec le critère de soulèvement admissible issu du chapitre précédent.

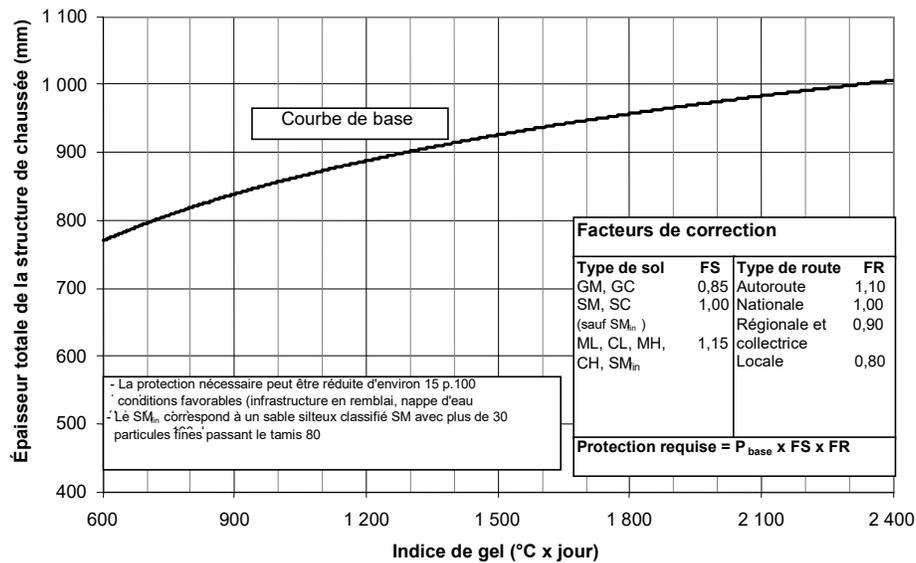
Le critère de protection partielle fournit l'épaisseur totale minimale de la structure de chaussée. La règle de détermination des profondeurs « P » pour transitions, Norme II-1.8 (Tableau 1.8-1), y est aussi mise en parallèle

pour fins de comparaison. Cette profondeur P n'est pas encore une protection totale, mais l'expérience indique qu'elle est suffisante pour remédier à pratiquement tous les problèmes de soulèvements différentiels, y inclus par exemple les sols hétérogènes et les situations délicates où il faut raccorder la chaussée sur un point immobile comme une coupe de roc ou un tablier de pont. Une protection plus grande peut toutefois être nécessaire en présence d'une argile varvée ou ayant un indice de liquidité élevé ( $I_L \geq 0,9$ ).



Le critère de gel de 1994 conduit vers une protection partielle, considérant qu'une protection totale serait trop coûteuse avec les grandes profondeurs atteintes par le gel dans l'ensemble du Québec. Ce critère consiste en une règle d'expérience, établie à partir de la méthode de protection contre le gel de Travaux Publics Canada (1992). Il s'agit d'une courbe, initialement développée au début des années 50, permettant d'estimer une protection partielle correspondant à environs la moitié de la profondeur de pénétration du gel (Armstrong et al., 1963). Ce critère s'avère depuis longtemps efficace pour permettre de récolter un comportement au gel raisonnablement acceptable pour la plupart des cas (Rioux, 1999). L'adaptation du MTQ reprend une variante de cette courbe de base (Figure 14) qui précise l'épaisseur totale de chaussée exigée en fonction de l'indice de gel normal. Le résultat de cette courbe est ensuite multiplié par un facteur en fonction du type de route (FR) et un facteur en fonction du type de sol (FS). La méthode prévoit aussi la possibilité de réduire l'épaisseur de 15 % lorsque des conditions favorables existent sur le site (infrastructure en remblai, nappe d'eau éloignée, etc.).

Figure 14 : Protection partielle contre le gel (approche de 1994)



### Protection contre le gel

L'expérience indique que la Figure 14 conduit à des comportements au gel qui étaient jugés acceptables dans la majorité des cas, avec des périodes de conception de 15-20 ans, avec des sols homogènes et en excluant les argiles varvées ou à fort indice de liquidité. Elle ne fournit, par contre, aucune indication sur les soulèvements au gel. La protection est qualifiée de partielle étant donné qu'elle indique une épaisseur de chaussée inférieure à la profondeur de pénétration du gel. Le tableau suivant indique le pourcentage de protection typique qu'on peut déduire lorsqu'on divise l'épaisseur de la chaussée par la profondeur du gel.

Tableau 12 : Pourcentages de protection contre le gel (méthode de 1994)

| Indice de gel<br>normal<br>(°C x jours) | Route<br>locale<br>(%) | Autoroute<br>(%) |
|---|------------------------|------------------|
| 800                                     | 60                     | 80               |
| 1 200                                   | 50                     | 70               |
| 2 000                                   | 40                     | 60               |

**IMPORTANT :** Si le sol de support comporte des poches de sol très sensibles au gel, mais de faible étendue, elles doivent être déblayées pendant les travaux de construction, sur une profondeur d'au moins un mètre, mais de préférence, sur toute la profondeur de pénétration du gel. Les matériaux de remblai utilisés doivent être de nature semblable à ceux du sol environnant. Des transitions doivent être réalisées

lorsqu'il se produit un changement dans la gélivité du sol de support pouvant causer des soulèvements différentiels<sup>1</sup>.

Une étude plus approfondie est nécessaire dans les zones en déblai lorsque l'infrastructure est constituée de sols argileux humides présentant un indice de liquidité ( $I_L$ ) supérieur à 0,9, ou lorsque des argiles varvées sont présentes dans les sols d'infrastructure.

Notons que si des risques de remontée de particules fines en provenance des sols d'infrastructure existent en raison de la granulométrie des matériaux de sous-fondation, une couche anticontaminante ou une membrane géotextile peut être nécessaire au-dessus des sols d'infrastructure.

La protection contre le gel peut être omise pour certaines routes temporaires, ou lorsque le sol de support est composé de sable ou de gravier contenant moins de 10 % de matériau passant le tamis de 80 $\mu$ m.

---

<sup>1</sup> Une case « Sol homogène » a été ajoutée dans le logiciel CHAUSSÉE 2 pour rendre cette directive plus évidente. Lorsque décochée, la courbe de protection partielle disparaît de sorte que la courbe de profondeur P, pour transitions, devient alors effective.

## 12 - NORME POUR LES ROUTES À FAIBLE TRAFIC

Dans le cas des routes à faible trafic, il est possible d'utiliser les tableaux 2.5-1 à 2.5-4 de la norme II-2.5 au lieu du logiciel. Cela est possible lorsque toutes les conditions suivantes sont remplies :

- DJMA projeté < 5 000
- Véhicules lourds / jour / voie < 250
- ÉCAS / an / voie < 150 000

Il n'y a quand même aucune contre-indication à utiliser le logiciel CHAUSSÉE lorsque cette situation se présente. Les deux méthodes peuvent toutefois conduire à un résultat différent. Le logiciel permet de tenir compte d'un plus grand nombre de variables particulières au projet, ce qui permet une conception plus optimisée. Il faut aussi noter que la norme est calculée avec le logiciel CHAUSSÉE. Cela implique qu'il peut y avoir des périodes de transition durant lesquelles la mise à jour du logiciel est en avance. Les critères de conception normalisés sont spécifiés dans le tableau 2.4-1 de la norme.

L'outil ÉCAS du logiciel peut aussi être utilisé pour effectuer le calcul du « DJMA projeté » ainsi que du « DJMA projeté et corrigé » comme définis dans le tableau 2.5-4 de cette norme.

La norme est publiée en ligne sur le site Internet des Publications du Québec : [www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca](http://www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca), dans Produits en ligne → Ouvrages routiers → Collection Normes – Ouvrages routiers → Tome II - Construction routière → chapitre 2 - Structures de chaussées.

## 13 - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Principaux liens utiles du ministère des Transports (normes, devis types, documents contractuels, guides, manuels, bulletins Info DLC, etc.) :

- <https://www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca> (section Produits en Ligne → Ouvrages routiers)
- <https://www.transports.gouv.qc.ca> (section Entreprise → Zones des fournisseurs)

1. AASHO (1962) *Special Report 61A-61G : AASHO Road Test*. HRB, National Research Council, Washington DC..
2. AASHTO (1986, 1993) *Guide for Design of Pavement Structures*. Washington DC..
3. ARMSTRONG, M.D. et T.I. CSATHY (1963) *Frost Design Practice in Canada* Highway Research Record no 33, 1963, pp 170-201.

4. BOUSSINESQ, J. (1885) "Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques." Gauthier Villars, Paris, France.
5. CAMTECH CONSULTANTS INC. (2001) « Étude d'impact des restrictions de charge en période de dégel sur l'économie du Québec », CAMTECH consultants inc., Groupe Conseil Génivar.
6. ANDERSON, D.M., et A.R.TICE (1972). « Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements », *Highway Research Record*, 393, 12-18.
7. BERGERON, G. (1991). « Effet des cycles de gel-dégel sur la capacité portante et la structure interne d'un sol argileux », mémoire de maîtrise, Université Laval.
8. CORBIN G., et G. GONTHIER (1998). « Étude d'impact des nouvelles normes de charges et dimensions de 1998 sur le camionnage lourd au Québec », Ministère des Transports, Gouvernement du Québec, décembre 1998.
9. CÔTÉ, J., et J.-M. KONRAD (2005a). « Thermal conductivity of base-course materials » NRC Canada, *Canadian Geotechnical Journal*, n°42, p. 61-78 : [http://pubs.nrc-cnrc.gc.ca/cgi-bin/rp/rp2\\_abst\\_e?cgj\\_t04-081\\_42\\_ys\\_yf\\_cgj1-05](http://pubs.nrc-cnrc.gc.ca/cgi-bin/rp/rp2_abst_e?cgj_t04-081_42_ys_yf_cgj1-05)
10. CÔTÉ, J., et J.-M. KONRAD (2005b). « A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials », NRC Canada, *Canadian Geotechnical Journal*, n°42, p. 443-458 : [http://pubs.nrc-cnrc.gc.ca/cgi-bin/rp/rp2\\_abst\\_e?cgj\\_t04-106\\_42\\_ns\\_nf\\_cgj2-05](http://pubs.nrc-cnrc.gc.ca/cgi-bin/rp/rp2_abst_e?cgj_t04-106_42_ns_nf_cgj2-05)
11. CÔTÉ, J., et J.-M. KONRAD (2009). "Un modèle régional de flux thermique sous le front de gel pour le design thermique des chaussées en conditions nordiques", Rapport CREIG-S10, Chaire de Recherche sur l'Exploitation des Infrastructures soumises au Gel, Département de Génie civil, Université Laval, Janvier 2009.
12. DARTER, M.I., et autres (1985). *Portland Cement Concrete Pavement Evaluation System (COPES)*, NCHRP Report 277, Transportation Research Board.
13. DORÉ, G., et autres (2005). « Méthode de conception des chaussées en milieu municipal : développement de critères et application dans une méthode mécanisto-empirique », Congrès Infra 2005, Montréal, Québec.
14. ENVIRONNEMENT CANADA : [www.climat.meteo.gc.ca](http://www.climat.meteo.gc.ca)
15. GUSTAVSSON, H., E. SLUNGA et S. SAARELAINEN. (1999). « Finnish frost design concept of roads », Geotechnical engineering for transportation infrastructure. Proceedings of the 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Amsterdam, June 2: 1359-1366.
16. HALL, K. D., et R. P. ELLIOT. (1992). « ROADHOG - A Flexible Pavement Overlay Design Procedure ». *Transportation Research Record*, Washington DC, TRB.1374, p. 9-18.
17. Info DLC (2002). « Le potentiel de ségrégation et la gélivité des sols » *Bulletin d'information technique*, vol. 7, n° 2, février 2002, Ministère des Transports du Québec.

18. Info DLC (2003). « Prise en compte du givrage dans la conception des chaussées comprenant un isolant thermique », *Bulletin d'information technique*, vol. 8, n° 12, décembre, Ministère des Transports du Québec.
19. Info DLC (2010). « Étude de la gélivité sur chaussée existante » *Bulletin d'information technique*, vol. 15, n° 4, décembre 2010, Ministère des Transports du Québec.
20. JOHANSEN, O. (1975) « Thermal conductivity of soils » Ph.D. thesis, University of Trondheim, Norway, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, CRREL Draft English Translation 637.
21. KERSTERN, M.S. (1949) « Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils » Research Laboratory Investigations, Engineering Experiment Station, University of Minnesota, Minneapolis, Technical report 23.
22. KNUTSSON S., L. DOMASCHUK et N. CHANDLER (1985). « Analysis of large scale laboratory and in situ frost heave tests » Proc. Of the 4th Int. Symp. On ground freezing, Sapporo, p.65-70.
23. KONRAD, J.-M. (1998). « Méthodologie pour la conception de chaussées urbaines sur sols gélifs » *Revue Géoglobe*, Automne 1998, pp. 12-15.
24. KONRAD, J.-M. (2005). « Estimation of the segregation potential of fine-grained soils using the frost heave response of two reference soils » *Can. Geotech. Journal*, 42, p. 38-50: <http://pubs.nrc-cnrc.gc.ca/>
25. KONRAD, J.M., et N.R. MORGENSTERN (1980). « A mechanistic theory of ice lens formation in fine-grained soils », *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 17, p 473-486.
26. KONRAD, J.M., et N.R. MORGENSTERN (1983). « Frost susceptibility of soils in terms of their segregation potential », Proceedings of the 4<sup>th</sup> Intl. Conference on Permafrost, University of Alaska and National Academy of Sciences, National Academy Press, Washington DC.
27. KONRAD, J.M, et M. ROY (1999). « Flexible pavements in cold regions : a geotechnical perspective », *Canadian Geotechnical Journal*, 37(3) : 689 :699.
28. LADANY, B. (1996). « La conception et la réhabilitation des infrastructures de transport en régions nordiques », *Études et Recherches en transport*, Transports Québec.
29. LANGLOIS, P. (2003). « Enrobés. Formulation selon la méthode LC ». Gouvernement du Québec.
30. LEROUEIL, S., F. TAVENAS et J.P. LE BIHAN (1983) « Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada », *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4) : 681 :705.
31. MEEUS, J. (1991). *Astronomical Algorithms*. William-Bell Inc..
32. Normes – Ouvrages routiers (Tomes I à VII), Les Publications du Québec. Documentation en ligne sur Internet : [www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca](http://www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca)
33. RIEKE R.D., T.S. VINSON et D.W. MAGEAU (1983). « The role of specific surface area and related index properties in the frost heave susceptibility of soils », 4th Intl. Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska.

34. RIOUX, N. (1999). « Impacts du gel sur les chaussées au Québec », *Revue Innovation Transport*, n° 4, p. 13-6 (février).
35. SAARELAINEN, S. (1992). « Modelling frost heaving and frost penetration in soils at some observation sites in Finland. The SSR model », Espoo 1992, VTT, VTT publications 95, Technical research centre of Finland, 120 p.
36. SAVARD Y., et autres (2004). « Amélioration de la performance des chaussées souples 1992-2002 (construction ou reconstruction) », 39<sup>e</sup> Congrès annuel de l'Association québécoise du transport et des routes (AQTR), Québec, Canada.
37. SEROTA, S., et A. JANGLE (1972). « A Direct Reading Pocket shear vane, Transaction of the American Society of Agricultural Engineers », *Civil Engineering*, n° 42, p. 73-76.
38. SERVICE DES CHAUSSÉES (1995). « Dimensionnement structural des chaussées ». Notes de cours, ministère des Transports du Québec (mars).
39. ST-LAURENT, D. et P. LANGLOIS (2006). « Potentiel pour des chaussées bitumineuses à durée de vie prolongée », 41<sup>e</sup> congrès annuel de l'Association québécoise du transport et des routes (AQTR) (avril).
40. THOMPSON, M. R. (1989). « ILLI-PAVE Based NDT Analysis Procedures. Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli », ASTM STP 1026. Eds. A. J. Bush III et G. Y. Baladi. Philadelphia, p. 487-501.
41. TRANSPORTS QUÉBEC (2010). *Normes – Ouvrages routiers, Construction routière*. Tome II, chapitre 2, « Structures de chaussées », Les Publications du Québec.
42. TRANSPORTS QUÉBEC (2004). *Guide d'utilisation des géosynthétiques de séparation et de renforcement des chaussées*, Les Publications du Québec.
43. TRAVAUX PUBLICS CANADA (1992) « Manual of pavement structural design ASG-19 (AK-68-12) Manuel sur la conception des chaussées » Service Architecture et Génie, Transport aérien, Canada.
44. VON QUINTUS H., et B. KILLINGSWORTH (1997a). « Design Pamphlet for the Determination of Layered Elastic Moduli in Support of the 1993 AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures », publication no. FHWA-RD-97-077.
45. VON QUINTUS H., et B. KILLINGSWORTH (1997b). « Design Pamphlet for the Determination of Design Subgrade in Support of the 1993 », publication no. FHWA-RD-97-083.

## 14 - POUR COMMUNIQUER AVEC NOUS

Vous pouvez joindre la Direction des chaussées à l'adresse suivante pour toute information additionnelle.  
Nous vous invitons à nous faire connaître vos commentaires et suggestions.

Direction des chaussées  
Ministère des Transports du Québec  
800, Place d'Youville, 14<sup>e</sup> étage  
Québec (Québec) G1S 4X9

Téléphone : 418 644-0890

Courriel : [logicielchaussee@transport.gouv.qc.ca](mailto:logicielchaussee@transport.gouv.qc.ca)

Site Internet : <https://www.transport.gouv.qc.ca>

## **ANNEXE I**

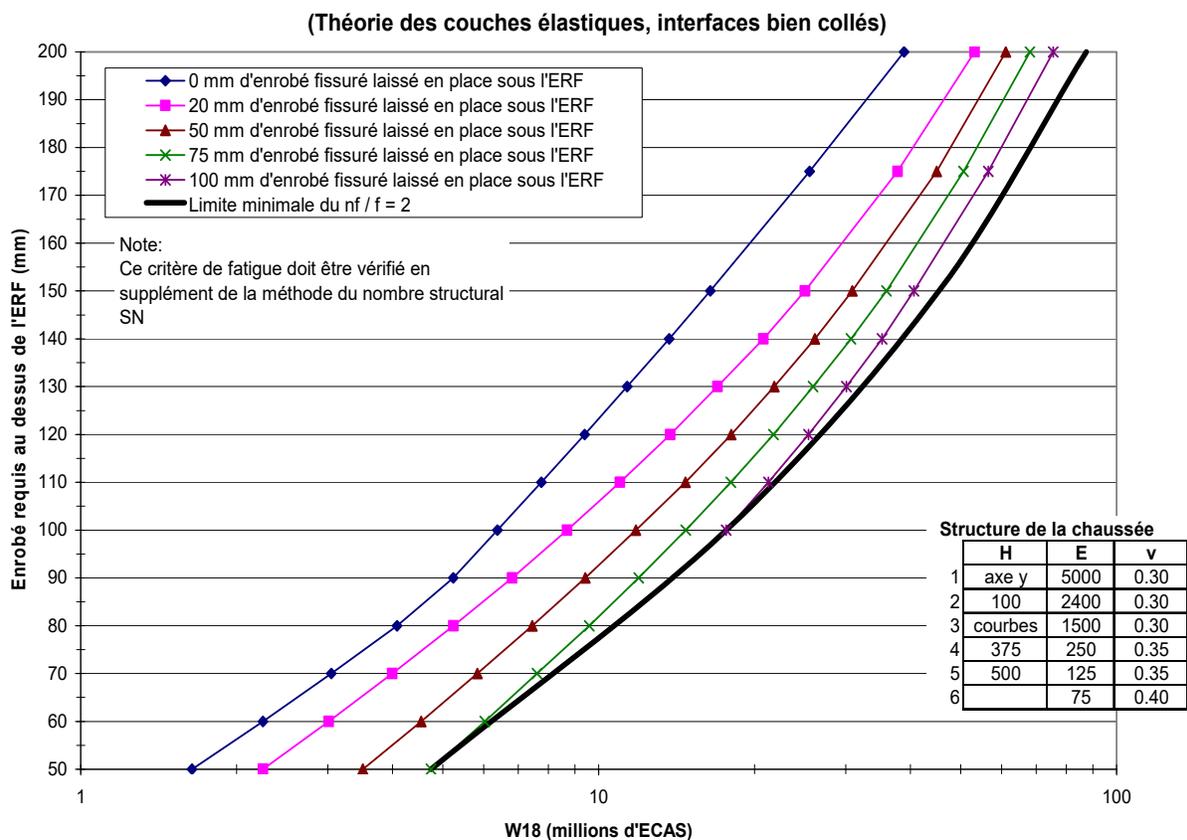
### **Recyclage à froid des enrobés (RFE)**

## ANNEXE I - RECYCLAGE À FROID DES ENROBÉS (RFE)

Le recyclage à froid des enrobés se fait généralement sur une épaisseur de l'ordre de 100 mm (de 85 à 110 mm). Il reste normalement une épaisseur d'enrobé fissuré en dessous de la couche recyclée. Il est recommandé de réaliser les travaux de façon que l'épaisseur non fissurée (nf), qui représente l'épaisseur recyclée plus l'épaisseur du recouvrement, soit supérieure à au moins deux fois l'épaisseur d'enrobé fissuré (f) laissé en place. Cela implique la réalisation d'un planage lorsque l'épaisseur en place est trop élevée. L'objectif de ce critère (rapport  $nf / f > 2$ ) est de réduire la vitesse de remontée des anciennes fissures. Cette problématique est telle qu'il est inutile de prévoir une période de conception supérieure à 20 ans.

L'épaisseur de recouvrement bitumineux doit respecter l'épaisseur minimale indiquée dans la Figure A 1 en supplément de l'épaisseur calculée par le logiciel (méthode de l'AASHTO).

**Figure A 1 : Enrobé à chaud requis au-dessus d'un enrobé recyclé à froid de 100 mm (critère de fatigue)**



## **ANNEXE II**

### **Caractérisation de sol en laboratoire Instructions pour évaluer la gélivité**

## Caractérisation de sol en laboratoire

### Instructions pour évaluer la gélivité

#### Domaine d'application

Sur les sols d'infrastructure présentant plus de 30 % de particules fines (< 80µm), ou bien aux endroits spécifiés par le demandeur.

Lorsque la quantité de particules passant le tamis requis est insuffisant pour un essai en particulier, il peut être envisagé de combiner deux échantillons de sol identique. Une telle action doit être mentionnée dans le rapport.

#### Méthode 1 : Détermination du potentiel de ségrégation ( $SP_0$ ) à l'aide d'un essai de congélation

Méthode d'essai LC 22-331

Cet essai est disponible à la Direction des matériaux d'infrastructures (DMI) du ministère des Transports et demande un délai minimum d'une semaine. Cette méthode est recommandée à titre d'approche la plus fiable en laboratoire. L'essai est applicable sur tout échantillon de plus de 2,5 kg passant le tamis de 5 mm. La réalisation sur un échantillon non-remanié constitue l'évaluation plus représentative (100 mm de diamètre par 120 mm de hauteur).

Il est aussi possible de mesurer le coefficient de surcharge ( $a$ ), sur demande, lorsque plus d'un échantillon est disponible. Dans le cas contraire, il faudra poser un coefficient par défaut en se basant sur la granulométrie. (Voir la méthode 2) Il est recommandé de mesurer le SP avec un essai réalisé sous une surcharge près de celle anticipée sur le terrain. Par exemple, une surcharge ( $\sigma$ ) de l'ordre de 0,02 MPa (20 kPa) peut être appropriée si on prévoit construire une structure de chaussée d'environ un mètre d'épaisseur au-dessus du sol. Le logiciel CHAUSSÉE utilise la valeur sans surcharge ( $SP_0$ ) qu'on peut obtenir avec l'équation suivante :

$$SP_0 = SP \cdot e^{a \cdot \sigma}$$

## Méthode 2 : Corrélation empirique pour la fraction fine

Cette approche simplifiée est à la portée de tous les laboratoires de sols. Elle vise spécifiquement la fraction fine. Il faut noter que les sols avec une matrice de particules grossières peuvent s'avérer moins gélifs. Il est recommandé de transmettre quelques échantillons témoins à la DMI pour évaluation parallèle (méthode 1) et base de données.

### 2.1- Teneur en eau naturelle

Méthode d'essai CAN/BNQ 2501-170

### 2.2- Granulométrie du sol et sédimentométrie des particules fines

Méthode d'essai BNQ 2501-025

Pour la sédimentométrie, fournir le pourcentage correspondant aux diamètres équivalents à 20, 5, 2 et 1 micromètres. Calculer le diamètre moyen «  $d_{50\text{ FF}}$  » en micromètres de la fraction fine (passant 80 $\mu\text{m}$ ). La densité relative des particules se mesure suivant la méthode d'essai CAN/BNQ 2501-070, laquelle peut être limitée à un seul essai par couche géologique sur un site donné. S'il est impossible de la mesurer, la valeur par défaut prescrite en l'absence d'expérience locale plus appropriée est de 2,73.

### 2.3- Limite de liquidité au cône suédois et limite de plasticité

Méthode d'essai CAN/BNQ 2501-092

Il est préférable d'effectuer la méthode de détermination de la limite de liquidité à points multiples, si la quantité de sol le permet.

En présence d'un sol non plastique : inscrire cette information pour la limite de plasticité ( $w_p = \text{n.p.}$ ) et réaliser tout de même l'essai pour déterminer la limite de liquidité.

Calculer l'indice de liquidité [  $I_L = (w - w_p)/(w_L - w_p)$  ] et faire ressortir au rapport la présence de tout échantillon dont l'indice  $I_L$  est supérieur ou égal à 0,9. Ce sont des sols extrêmement gélifs et pouvant produire des tassements importants au cours des premiers cycles de gel-dégel.

### 2.4- Valeur au bleu de méthylène (VB)

Méthode d'essai BNQ 2560-255 (passant 400 $\mu\text{m}$ )

### 2.5- Calcul de la gélivité des particules fines ( $SP_0$ et $a$ )

$$SP_0 = r \cdot SP_{0\text{ ref}} \quad \text{et} \quad a = 5 \cdot d_{50\text{ FF}}^{0,45}$$

où :

$SP_0$  = potentiel de ségrégation sans surcharge ( $mm^2/H^\circ C$ )

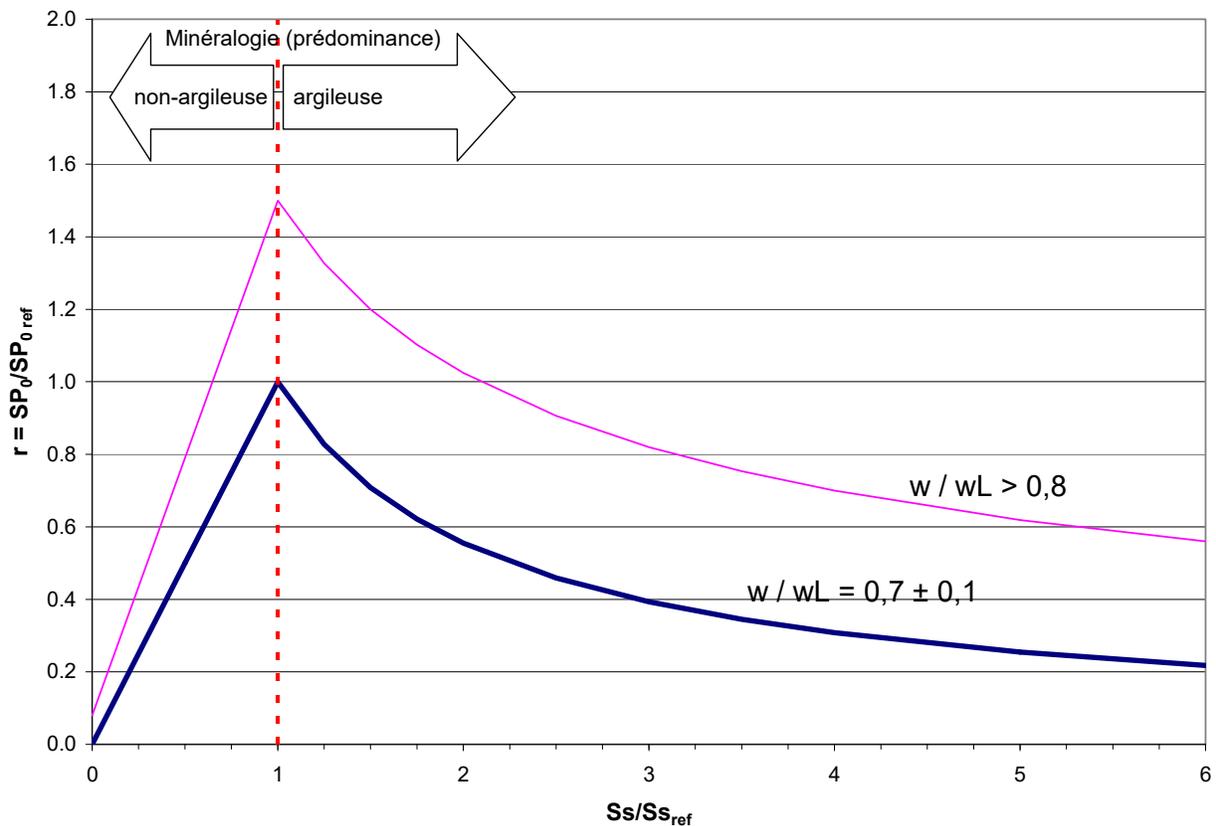
$a$  = coefficient de surcharge ( $MPa^{-1}$ )

$$r = \left( \frac{SP_0}{SP_{0ref}} \right) = f \left( \frac{S_s}{S_{sref}}, \frac{w}{w_L} \right) \text{ (Déduire } r \text{ sur la figure suivante)}$$

$$S_s = 20,9 \cdot VB \cdot \frac{P_{400\mu m}}{P_{80\mu m}} = \text{surface spécifique (m}^2/\text{g)}$$

$$S_{sref} = 25,95 - 11,78 \cdot \log d_{50FF} \leq 25,95 \text{ m}^2/\text{g} \text{ (Limiter cette valeur à 25,95, maximum)}$$

$$SP_{0ref} = 20,4 - 9,67 \cdot \log d_{50FF} \leq 20,4 \text{ mm}^2/\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{hrs} \text{ (Limiter cette valeur à 20,4, maximum)}$$



Référence : KONRAD J.-M. (2005). « Estimation of the segregation potential of fine-grained soils using the frost heave response of two reference soils ». *Can. Geotech. Journal*, 42, p. 38-50.

## **ANNEXE III**

### **Isolation des chaussées**

## ANNEXE III – ISOLATION DES CHAUSSÉES

### Références complémentaires

Il faut consulter les normes et directives suivantes concernant l'utilisation des couches isolantes en polystyrène.

- Norme 14301 « Polystyrène pour construction routière », tome VII, Matériaux, chap. 14 « Matériaux divers »
- Norme « Structures de chaussées », tome II, chap. 2.7 « Isolation des chaussées »
- CCDG, chapitre 12.2 « Sous-fondation de chaussée » (voir les articles traitant du polystyrène)
- Devis type « Clause type relative à la protection contre le gel d'une route existante à l'aide d'un isolant thermique en polystyrène »

Le *Guide de préparation des projets routiers* (Annexe TSC-04) présente aussi des informations complémentaires, ainsi que des abaques de calculs utiles pour le dimensionnement d'une protection totale, y inclus l'isolation d'une conduite enfouie sous une chaussée.

### Protection contre le givrage

La protection contre le givrage implique la mise en place d'un recouvrement granulaire minimum de 450 mm. La précision de cette recommandation peut être améliorée à l'aide des informations contenues dans le bulletin Info DLC de décembre 2003 publié sur le site Internet du Ministère ([www.transports.gouv.qc.ca](http://www.transports.gouv.qc.ca)).

Il est de mise d'éviter de commencer ou de terminer la mise en place d'un isolant dans les zones de conduite plus délicates telles que les zones de freinage (p. ex. : à moins de 100 m d'une intersection ou d'un passage à niveau), les pentes abruptes, le sommet des côtes, et à moins de 50 m des courbes. Une solution acceptable pour ces situations pourrait être d'augmenter le recouvrement granulaire d'au moins 150 mm.

### Vérification structurale

Le polystyrène utilisé en construction routière doit posséder une résistance en compression ( $R_c$ ) suffisante pour bien résister aux charges de trafic. Les dommages infligés au polystyrène sont considérés comme négligeables pour des contraintes inférieures à 10 % de la résistance en compression.

Cela implique l'utilisation de polystyrènes à haute densité. Les panneaux extrudés dont la résistance en compression ( $R_c$ ) atteint plus de 400 kPa résistent sans problème à toutes les situations routières normales, en considérant la protection granulaire de 450 mm imposée contre le givrage. Il est possible qu'une spécification de résistance ( $R_c$ ) de 250 kPa soit aussi acceptable, mais cela à condition que l'épaisseur de protection (granulaire + enrobé) s'avère suffisante. Un tel relâchement de l'exigence permet de réduire les coûts de l'isolant et ouvre l'admissibilité aux polystyrènes expansés.

La contrainte transmise à l'isolant peut être évaluée à l'aide de la théorie des couches élastiques, ce qui nécessite un logiciel à cette fin. L'Équation 22 (Boussinesq, 1885) donne aussi une estimation raisonnable de l'épaisseur minimale de protection requise. Ce calcul doit être fait en dehors du logiciel CHAUSSÉE.

$$Z_{\min} = \sqrt{\frac{P/(\pi \sigma_o)}{[1 - (\sigma_a / \sigma_o)]^{-2/3} - 1}}$$

Équation 22

où :  $Z_{\min}$  = épaisseur minimale de protection (m)

(Considérer que 1 mm de BB équivaut à 2 mm de granulaire)

$P$  = charge sur roue (40 kN)

$\sigma_o$  = pression de contact pneu-chaussée (700 kPa)

$\sigma_a$  = pression admissible (environ 10 % de la résistance en compression de l'isolant, kPa)

Les polystyrènes ont un module de résilience très faible ( $\leq 15$  MPa). Pour cette raison, une étude particulière est requise pour les utilisations à grandes épaisseurs comme dans le cas des remblais allégés.

### Zone de transition

La plus grande difficulté d'un projet d'isolation consiste à bien réussir les transitions, étant donné le contraste au point de jonction entre une zone isolée (aucun effet de gel) et la route normale. Le dessin normalisé DN-II-029 « Isolation thermique – polystyrène » a été amélioré avec l'ajout d'un palier de

transition comportant des panneaux perforés. Le patron de perforation a pour effet de réduire la résistance thermique effective des panneaux.

Si requis, le concepteur peut dimensionner la transition en définissant son propre schéma de perforation. L'Équation 23 est proposée pour estimer le rapport de conductivité thermique entre un panneau intact et perforé. Le panneau perforé est caractérisé à l'aide d'une moyenne géométrique entre la conductivité du matériau qui le compose et celle du matériau granulaire occupant l'espace troué. Par exemple, des patrons de perforation couvrant 11%, 23% et 30% de la surface permettront de conserver respectivement 65%, 40% et 30% de la résistance thermique du panneau initial. L'épaisseur du panneau perforé multipliée par le rapport  $R_k$  donne l'épaisseur équivalente à utiliser pour une simulation avec CHAUSSÉE 2.

$$R_k = \frac{k_{\text{isolant intact}}}{k_{\text{système troué}}} = \frac{k_{\text{isolant}}}{k_{\text{isolant}}^{1-s} k_{\text{granulaire}}^s}$$

**Équation 23**

où :  $R_k$  = Rapport thermique

$k$  = conductivité thermique, par exemple :

$$k_{\text{isolant}} = 0,03 \text{ W/mK (polystyrène extrudé)}$$

$$k_{\text{granulaire}} = 1,73 \text{ W/mk (MG 20 avec 3\% de teneur en eau)}$$

$s$  = proportion de la surface trouée (fraction entre 0 et 1)

La solution la plus simple pourrait consister à éliminer la nécessité de la transition, en terminant l'isolation à la jonction d'une section de chaussée sur roc ou à la jonction d'un autre point immobile, tel qu'un tablier de pont. Si ce n'est pas possible, il est recommandé de terminer l'isolation dans un secteur en remblai plutôt qu'en déblai. La mesure des soulèvements sur une chaussée existante permet de choisir les points de jonction optimums, là où les soulèvements au gel sont le plus faible possible (Info DLC, 2010).

**DIMENSIONNEMENT**  
**DES CHAUSSÉES SOUPLES**

**(Paramètres de conception)**

**Ministère des Transports du Québec**  
**Service des chaussées**  
**Septembre 2006**

## **LIMITES DE LA NORME II-2.4.1**

**DJMA  $\leq$  5000**

**Véhicules lourds / jours / voie  $\leq$  250**

**ECAS annuels  $\leq$  150 000**

**Sol d'infrastructure uniforme et avec IL  $<$  0,9**

**Utiliser le logiciel CHAUSSÉE pour les cas ne respectant pas toutes ces conditions**

# **DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES**

## **(PAR SEGMENT « HOMOGÈNE »)**

### A - Données de base requises

Localisation (station climatique la plus représentative)

Classification de la route

DJMA (initial et projeté)

Trafic lourd en ÉCAS total ( $N_{18}$ )

Sol de support (portance, gélivité)

Type de matériaux granulaires disponibles

Type de structure de chaussée (variantes envisagées)

### B - Dimensionnement structural ( $W_{18} \geq N_{18}$ )

Détermination des couches, matériaux et épaisseurs, de la structure de la chaussées, de façon à ce que le trafic lourd admissible  $W_{18}$ , prédit à l'aide des équations de la méthode AASHTO 1993, soit supérieur à l'objectif visé  $N_{18}$ .

1. Revêtement
2. Fondation
3. Sous-fondation
4. (Isolation ou infrastructure améliorée)

### C – Dimensionnement de la protection contre le gel ( $h \leq h_{\text{admis}}$ )

Détermination des couches, matériaux et épaisseurs, nécessaires pour limiter les soulèvements différentiels causés par l'effet du gel.

### C – Structure de chaussée requise

La structure retenue doit satisfaire à la fois le dimensionnement structural et la protection contre le gel.

# OBJECTIFS FIXÉS

## CALCUL STRUCTURAL DES CHAUSSÉES

| Classification de la route               | D.J.M.A. projeté | Période de conception (années) | $\Delta$ PSI | Fiabilité R (%) | Soulèvement au gel admis <sup>1</sup> (mm) | BB HRO requis |
|--|------------------|--------------------------------|--------------|-----------------|--|---------------|
| Locale                                   | < 1 000          | 25                             | 2,0          | 66              | 70   |               |
|  | > 1 000          | 25                             | 2,0          | 70              | 70   |               |
| Collectrice<br>Régionale et<br>Échangeur | < 2 000          | 25                             | 2,0          | 70              | 60   |               |
|  | 2 000-3 000      | 25                             | 2,0          | 75              | 60   |               |
|  | > 3 000          | 25                             | 2,0          | 80              | 60   |               |
| Nationale                                | < 5 000          | 25                             | 2,0          | 80              | 55   |               |
|  | 5 000-20 000     | 30                             | 2,0          | 85              | 55   |               |
|  | > 20 000         | 30                             | 1,75         | 90              | 50   | X             |
| Autoroute                                | < 20 000         | 30                             | 1,75         | 90              | 50   | X             |
|  | > 20 000         | 30                             | 1,75         | 95              | 50   | X             |

Note : Soulèvement au gel admis pour une période de récurrence égale à la demie-période de conception.

DJMA PROJETÉ (ou moyen) :

$$DJMA_{\text{projeté}} = DJMA \times \frac{f.a.}{n}$$

AGRESSIVITÉ TOTALE :

$$N_{18} = DJMA \cdot \text{Dir} \cdot \text{Voie} \cdot \text{VL} \cdot \text{CA} \cdot \text{Njrs} \cdot \text{f.a.}$$

avec :

$N_{18}$  = Nombre total de passages d'essieu équivalent à l'essieu de référence (18 000 lbs = 8,16 t) sur la voie la plus sollicitée

DJMA = Débit journalier moyen annuel (au début de la mise en service)

Dir = Proportion de véhicules dans la direction la plus sollicitée

Voie = Proportion de véhicules sur la voie la plus sollicitée

VL = Proportion de véhicules lourds

CA = Coefficient d'agressivité moyen (truck factor)

Njrs = 300 jours, correspond à la proportion de VL applicable durant l'année au Québec compte tenu de la méthodologie utilisée pour les comptages de trafic

f.a. = Facteur d'accroissement pour les véhicules lourds

$$f.a. = \frac{(1+g)^n - 1}{g} \quad g = \text{taux d'accroissement composé (décimal)}$$

$n$  = période de conception (années)

## COEFFICIENTS D'AGRESSIVITÉ

(Valeurs à utiliser par défaut en l'absence  
de données sur la classification des véhicules)

| Classe de route                                 | Pourcentage de véhicules lourds |       |       |        |
|---|---------------------------------|-------|-------|--------|
|   | 0-10                            | 10-20 | 20-30 | > 30 % |
| Locale  | 0,8                             | 1,2   | -     | -      |
| Collectrice                                     | 1,2                             | 1,9   | -     | -      |
| Régionale<br>(ou Échangeur)                     | 1,4                             | 2,7   | -     | -      |
| <u>Nationale :</u><br>à Autoroute<br>ou Urbaine | 1,2                             | 1,3   | -     | -      |
| Rurale  | 2,1                             | 3,1   | 3,7   | 5,3    |
| <u>Autoroute :</u><br>Urbaine                   | 1,1                             | 1,3   | -     | -      |
| Péri-urbaine<br>(transit)                       | 1,7                             | 2,0   | -     | -      |
| Rurale  | 2,1                             | 2,7   | 3,4   | -      |



## MODULES ET COEFFICIENTS STRUCTURAUX POUR REVÊTEMENT

| Zone <sup>1</sup> | Enrobés conventionnels |                |                    |                | Enrobé avec couche de surface à haute résistance à l'orniérage |                |  |                |
|-------------------|------------------------|----------------|--------------------|----------------|--|----------------|--|----------------|
|                   | Épaisseur ≤ 150 mm     |                | Épaisseur > 150 mm |                | Couche de base conventionnelle                                 |                | couche de base anti-fatigue <sup>2</sup> |                |
|                   | Mr, MPa                | a <sub>1</sub> | Mr, MPa            | a <sub>1</sub> | Mr, MPa  | a <sub>1</sub> | Mr, MPa                                  | a <sub>1</sub> |
| Sud               | 2900                   | 0,43           | 3100               | 0,44           | 3600   | 0,47           | 4000                                     | 0,49           |
| Nord              | 3500                   | 0,47           | 3700               | 0,48           | 4100   | 0,50           | 4600                                     | 0,52           |

| Zone <sup>1</sup> | Enrobés fissurés (cas par défaut) |                |                    |                |
|-------------------|-----------------------------------|----------------|--------------------|----------------|
|                   | Épaisseur ≤ 150 mm                |                | Épaisseur > 150 mm |                |
|                   | Mr, MPa                           | a <sub>1</sub> | Mr, MPa            | a <sub>1</sub> |
| Sud               | 1365                              | 0,30           | 1575               | 0,32           |
| Nord              | 1670                              | 0,33           | 1875               | 0,35           |

Notes :

1. Les zones sud et nord font référence à la figure 2.4-1 des normes. (Tome II, chapitre 2, structures de chaussée)
2. Couche de base anti-fatigue représentant 25 à 35% de l'épaisseur du revêtement. Couche intermédiaire en enrobé conventionnel. Revêtement total d'au moins 175 mm d'épaisseur.

## MODULES ET COEFFICIENTS STRUCTURAUX POUR FONDATION EN MG 20

| Épaisseur de<br>Revêtement (mm) | Module, Mr<br>(MPa) | Coefficient, a <sub>2</sub> |
|---------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| 50                              | 290                 | 0,17                        |
| 64                              | 275                 | 0,17                        |
| 75                              | 250                 | 0,16                        |
| 100                             | 200                 | 0,14                        |
| 125                             | 175                 | 0,12                        |
| 150                             | 150                 | 0,11                        |
| 175                             | 135                 | 0,09                        |
| 200 et plus                     | 125                 | 0,08                        |

$$a_2 = 0,249 \log(145,04 \cdot Mr) - 0,977$$

## MODULES ET COEFFICIENTS STRUCTURAUX POUR SOUS-FONDATION EN MG 112

| Épaisseur de<br>revêtement<br>(mm) | Sable et gravier (autre que<br>sable mal gradué, SP) |                | Sable mal gradué (SP) |                |
|------------------------------------|--|----------------|-----------------------|----------------|
|                                    | Mr, MPa  | a <sub>3</sub> | Mr, MPa               | a <sub>3</sub> |
| 50                                 | 110  | 0,11           | 100                   | 0,10           |
| 75                                 | 100  | 0,10           | 90                    | 0,09           |
| 100 et plus                        | 90   | 0,09           | 75                    | 0,08           |

$$a_3 = 0,227 \log(145,04 \cdot Mr) - 0,839$$

# DENSITÉ DES SOLS

(Valeurs par défaut à utiliser uniquement en l'absence de mesure)

| <u>Type de sol</u>                   | <u>Masse volumique sèche (<math>\rho_d</math>)</u> |                |
|--------------------------------------|--|----------------|
|                                      | état : <u>optimal</u>                              | <u>naturel</u> |
| GP, GW                               | 1,840  | 1,8            |
| GC, GM                               | 1,840  | 1,8            |
| SP                                   | 1,765  | 1,75           |
| SW                                   | 1,910  | 1,85           |
| infra améliorée (20% fines)          | 1,830  | 1,8            |
| SC <sub>gros</sub>                   | 1,845  | 1,8            |
| SC <sub>fin</sub>                    | 1,845  | 1,8            |
| SM <sub>gros</sub>                   | 1,830  | 1,8            |
| SM <sub>fin</sub>                    | 1,830  | 1,8            |
| Croûte argileuse                     | 1,735  | 1,7            |
| CL ( $I_p > 12$ ) ( $I_L < 0,9$ )    | 1,735  | 1,3            |
| CL ( $I_p \leq 12$ ) ( $I_L < 0,9$ ) | 1,735  | 1,3            |
| CH ( $I_L < 0,9$ )                   | 1,510  | 1,3            |
| ML, ML-CL ( $I_L < 0,9$ )            | 1,700  | 1,45           |
| MH ( $I_L < 0,9$ )                   | 1,315  | 1,3            |
| CL, ML, CH, MH ( $I_L \geq 0,9$ )    | --   | 1,15           |

## Notes :

- Masse volumique sèche optimale selon l'essai proctor (sols cohérents) ou proctor modifié (sols pulvérulents)
- SM<sub>fin</sub>/SC<sub>fin</sub> → ( $\geq 30\%$  fines) ; SM<sub>gros</sub>/SC<sub>gros</sub> → ( $< 30\%$  fines)
- $I_p$  = Indice de plasticité ;  $I_L$  = Indice de liquidité

# HUMIDITÉ DES SOLS

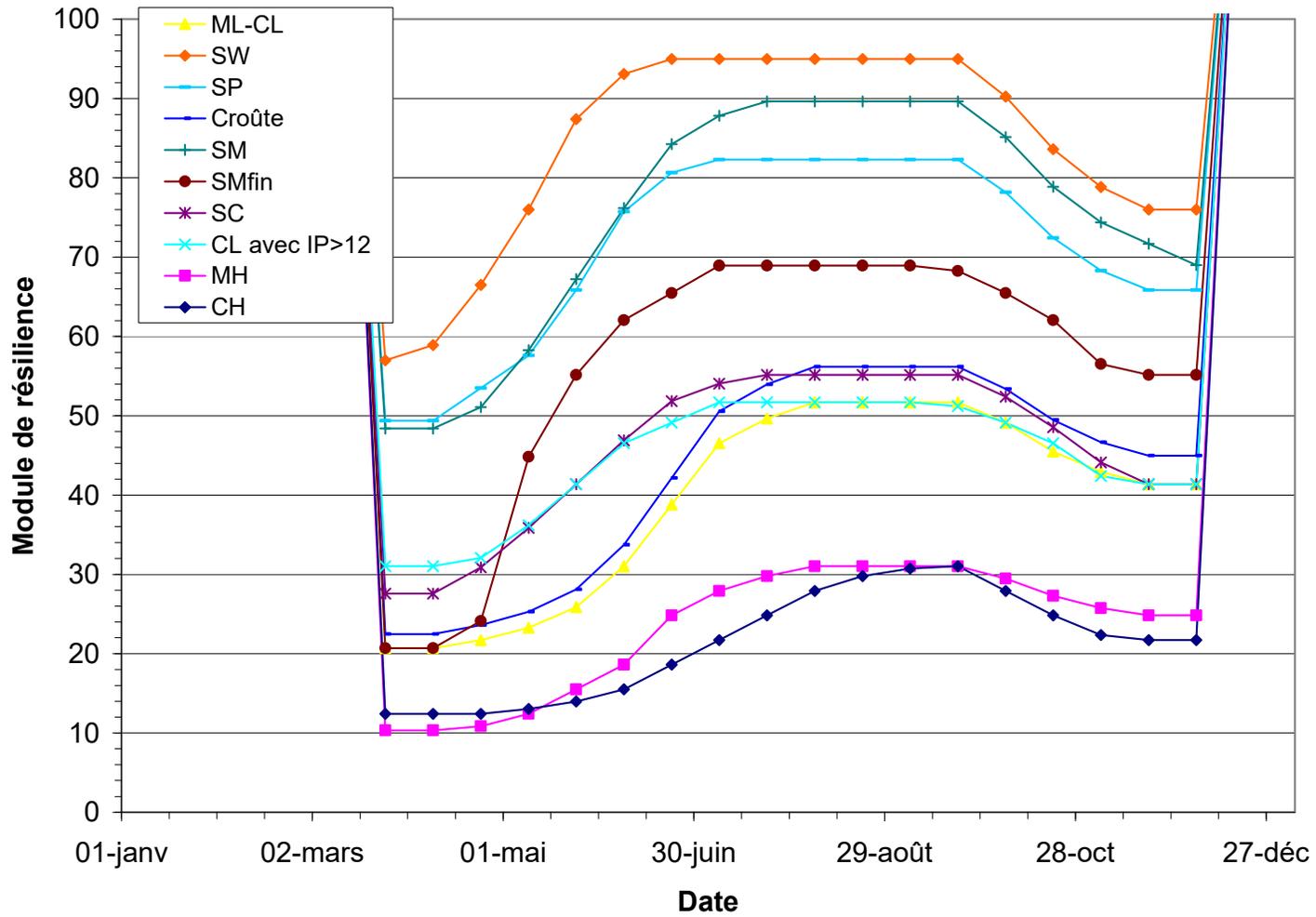
(Valeurs par défaut à utiliser uniquement en l'absence de mesure)

| <u>Type de sol</u>                   | <u>Teneur en eau (W, % du poids sec)</u> |                |               |               |
|--------------------------------------|--|----------------|---------------|---------------|
|                                      | état :                                   | <u>optimal</u> | <u>inter.</u> | <u>saturé</u> |
| GP, GW                               |  | 11             | 14            | 19            |
| GC, GM                               |  | 11             | 14            | 19            |
| SP                                   |  | 16,5           | 17            | 19            |
| SW                                   |  | 12,5           | 14            | 19            |
| infra améliorée (20% fines)          |  | 12             | 12            | 19            |
| SC <sub>gros</sub>                   |  | 12             | 15            | 20            |
| SC <sub>fin</sub>                    |  | 15             | 16            | 20            |
| SM <sub>gros</sub>                   |  | 12             | 14            | 19            |
| SM <sub>fin</sub>                    |  | 13,5           | 15            | 19            |
| Croûte argileuse                     |  | 18             | 19            | 22            |
| CL ( $I_p > 12$ ) ( $I_L < 0,9$ )    |  | 18             | 40            | 40            |
| CL ( $I_p \leq 12$ ) ( $I_L < 0,9$ ) |  | 18             | 40            | 40            |
| CH ( $I_L < 0,9$ )                   |  | 27,5           | 40            | 40            |
| ML, ML-CL ( $I_L < 0,9$ )            |  | 17,5           | 30            | 32            |
| MH ( $I_L < 0,9$ )                   |  | 32             | 40            | 40            |
| CL, ML, CH, MH ( $I_L \geq 0,9$ )    |  | --             | 50            | 50            |

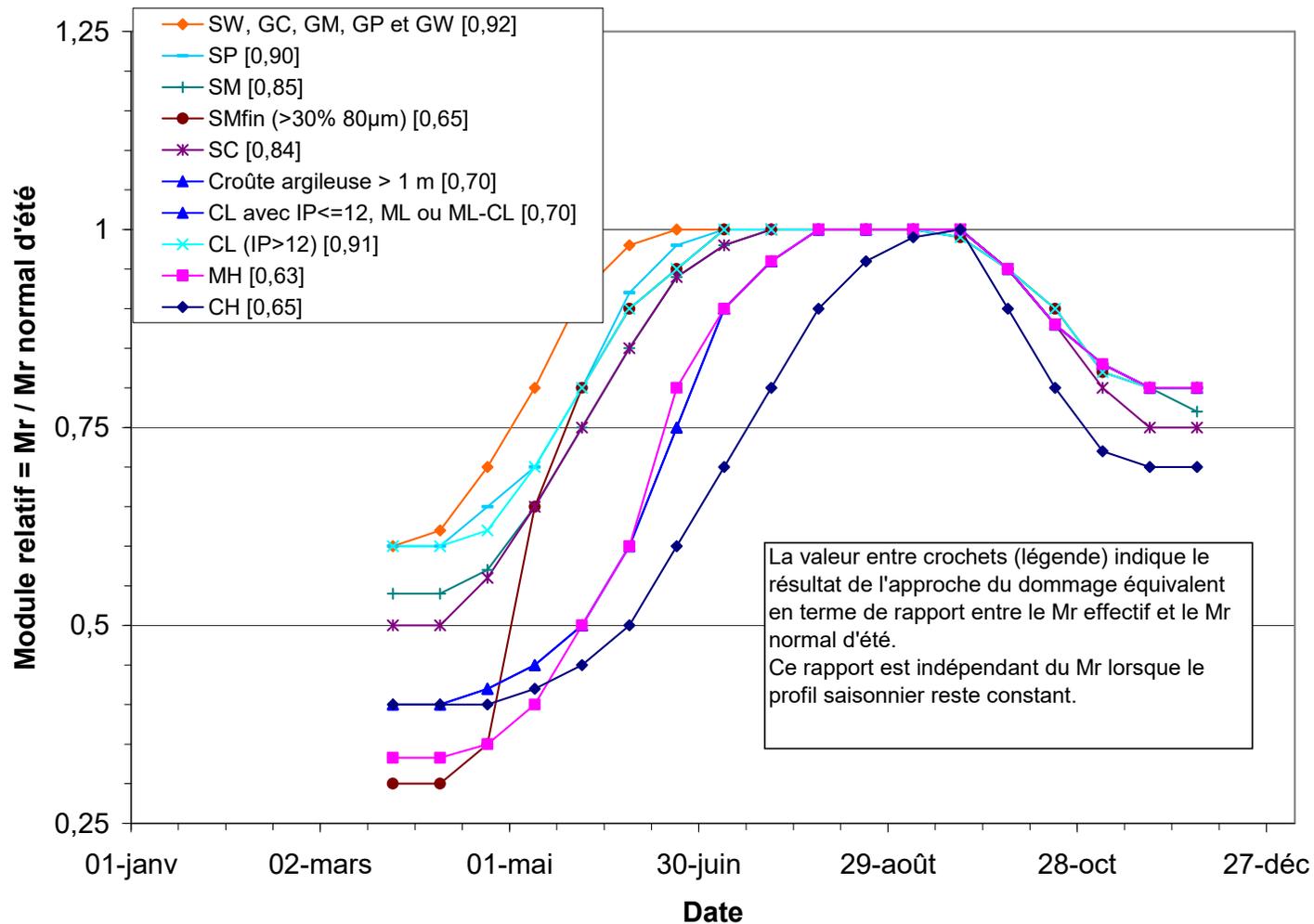
Notes :

- Teneur en eau optimale selon l'essai proctor (sols cohérents) ou proctor modifié (sols pulvérulents)
- SM<sub>fin</sub>/SC<sub>fin</sub> → ( $\geq 30\%$  fines) ; SM<sub>gros</sub>/SC<sub>gros</sub> → ( $< 30\%$  fines)
- $I_p$  = Indice de plasticité ;  $I_L$  = Indice de liquidité

# SOL : VARIATIONS SAISONNIÈRES DES MODULES



# SOL : VARIATIONS SAISONNIÈRES DES MODULES



## Exemple : calcul du Mr effectif Méthode du dommage équivalent

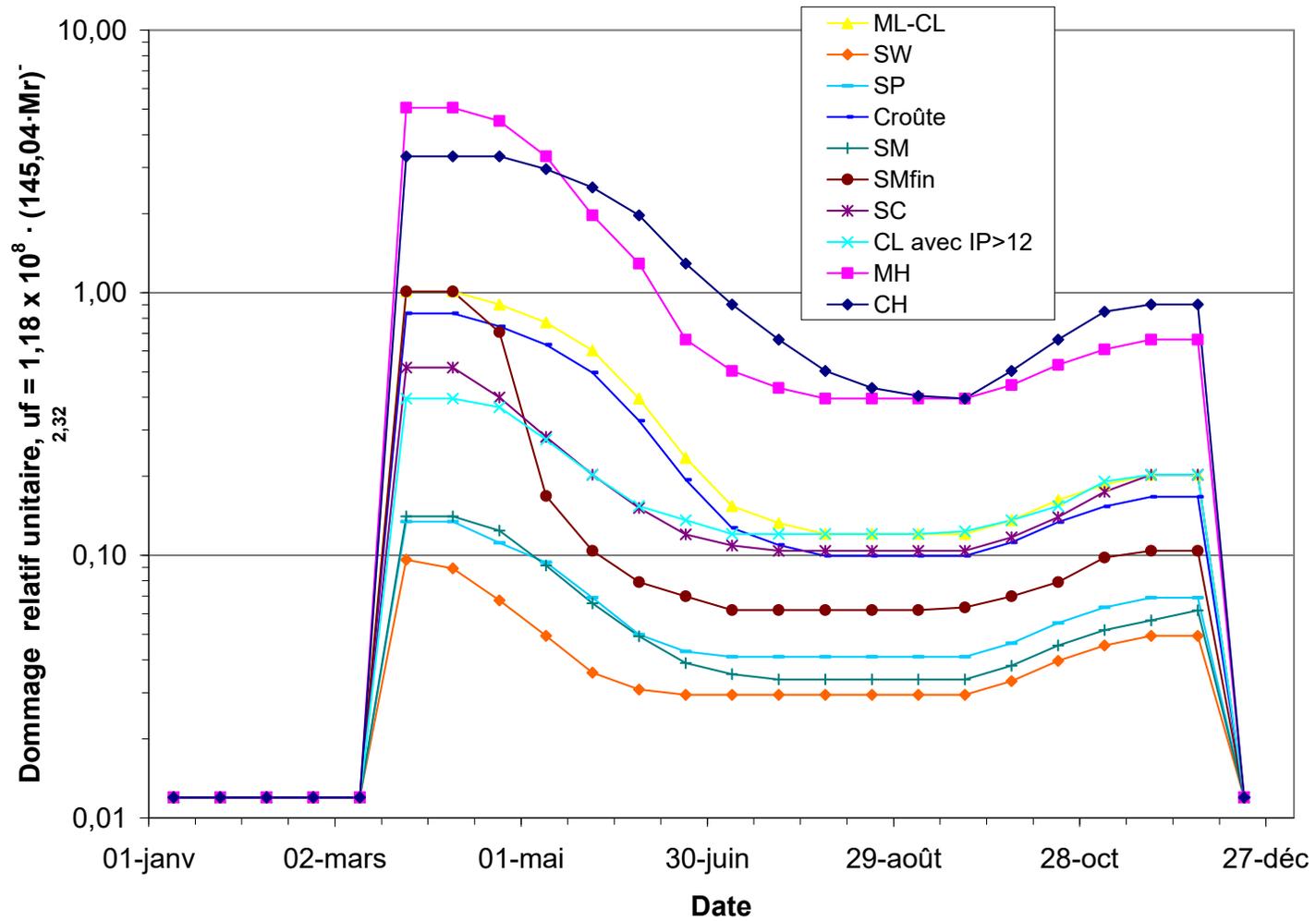
**Sol : ML, ML-CL ou CL avec IP<12**

| Mois                 | Mr, MPa | uf          |
|----------------------|---------|-------------|
| Janvier              | 140     | 0,01        |
|                      | 140     | 0,01        |
| Février              | 140     | 0,01        |
|                      | 140     | 0,01        |
| Mars                 | 140     | 0,01        |
|                      | 20,7    | 1,01        |
| Avril                | 20,7    | 1,01        |
|                      | 21,7    | 0,90        |
| Mai                  | 23,3    | 0,77        |
|                      | 25,9    | 0,60        |
| Juin                 | 31,0    | 0,39        |
|                      | 38,8    | 0,24        |
| Juillet              | 46,5    | 0,15        |
|                      | 49,6    | 0,13        |
| Août                 | 51,7    | 0,12        |
|                      | 51,7    | 0,12        |
| Septembre            | 51,7    | 0,12        |
|                      | 51,7    | 0,12        |
| Octobre              | 49,1    | 0,14        |
|                      | 45,5    | 0,16        |
| Novembre             | 42,9    | 0,19        |
|                      | 41,4    | 0,20        |
| Décembre             | 41,4    | 0,20        |
|                      | 140     | 0,01        |
| Somme :              |         | 6,66        |
| Moyenne :            |         | 0,28        |
| <b>Mr effectif :</b> |         | <b>36,1</b> |
| Effectif / normal :  |         | 0,70        |

$$u_f = 1,18 \cdot 10^8 (145,04 \cdot M_r)^{-2,32}$$

# DOMMAGES RELATIFS UNITAIRES

## Variations saisonnières



## MODULES POUR SOLS SUPPORTS

(Valeurs par défaut à utiliser uniquement en l'absence de mesure)

| <u>Type de sol</u>                         | <u>Module effectif</u><br><u>Mr (MPa)</u> | <u>Ratio saisonnier</u><br><u>Mr<sub>effectif</sub>/Mr<sub>normal</sub></u> |
|--|---|---|
| CL, ML, CH, MH ( $I_L \geq 0,9$ )          | $\leq 20$                                 | 0,60  |
| CH, MH                                     | $\leq 20$                                 | 0,64  |
| CL ( $I_P \leq 12$ )<br>ML, ML-CL          | $\leq 36$                                 | 0,70  |
| CL ( $I_P > 12$ )                          | 47  | 0,91  |
| SC <sub>fin</sub>                          | 36  | 0,84  |
| SM <sub>fin</sub>                          | 45  | 0,65  |
| SC <sub>gros</sub>                         | 57  | 0,84  |
| SM-SC                                      | 62  | 0,75  |
| SW-SC, SP-SC                               | 66  | 0,80  |
| SM <sub>gros</sub>                         | 76  | 0,85  |
| Croûte argileuse ( $\geq 1,0$ m)           | 39  | 0,70  |
| SP, SW-SM, SP-SM<br>(idem MG-112 type B)   | 74  | 0,90  |
| SP-SW<br>(idem MG-112 type A)              | 87  | 0,91  |
| SW, GM, GC, GW, GP<br>(supérieur à MG 112) | $\geq 87$                                 | 0,92  |

### Notes :

- Modules effectifs tenant compte des variations saisonnières après calculs selon l'approche du dommage équivalent.
- SM<sub>fin</sub>/SC<sub>fin</sub> → ( $\geq 30\%$  fines) ; SM<sub>gros</sub>/SC<sub>gros</sub> → ( $< 30\%$  fines)
- $I_P$  = Indice de plasticité ;  $I_L$  = Indice de liquidité

# GÉLIVITÉ DES SOLS SUPPORTS

(Valeurs par défaut à utiliser uniquement en l'absence de mesure)

| <u>Type de sol</u>                              | <u>Sans surcharge</u><br><u>SPo (mm<sup>2</sup>/KH)</u> | <u>Coef. surcharge</u><br><u>a (MPa<sup>-1</sup>)</u> | <u>Surf. spécifique</u><br><u>Ss (m<sup>2</sup>/g)</u> |
|---|---|---|--|
| GP, GW  | 0,5 (0,5 à 3)   | 15  | 0,5  |
| GC, GM  | 2 (0,7 à 4)   | 15  | 5  |
| SP  | 0,5 (0,5 à 1,6)   | 15  | 0,5  |
| SW  | 0,5 (0,5 à 3)   | 15  | 0,5  |
| infra améliorée (20% fines)                     | 1,6 (1,5 à 2,5)   | 15  | 0,5  |
| SC <sub>gros</sub>                              | 2 (1,5 à 5,5)   | 12  | 5  |
| SC <sub>fin</sub>                               | 2 (1,5 à 5,5)   | 10  | 5  |
| SM <sub>gros</sub>                              | 2 (1,5 à 6,5)   | 15  | 0,5  |
| SM <sub>fin</sub>                               | 4 (2 à 7)   | 11  | 10   |
| Croûte argileuse                                | 3,2 (2 à 5,5)   | 12  | 40   |
| CL (I <sub>p</sub> > 12) (I <sub>L</sub> < 0,9) | 3 (2 à 6)   | 7   | 60   |
| CL (I <sub>p</sub> ≤ 12) (I <sub>L</sub> < 0,9) | 5 (1 à 10)  | 10  | 35   |
| CH (I <sub>L</sub> < 0,9)                       | 1,5 (0,5 à 4)   | 7   | 90   |
| ML, ML-CL (I <sub>L</sub> < 0,9)                | 8 (6 à 16)  | 7   | 40   |
| MH (I <sub>L</sub> < 0,9)                       | 2 (1 à 4)   | 7   | 85   |
| CL,ML,CH,MH (I <sub>L</sub> ≥ 0,9)              | 20 (14 à 23)  | 7   | 35   |

## Notes :

- L'indice SP exclue le 9% de gonflement de l'eau interstitielle.
- La surface spécifique (Ss) est la valeur moyenne du sol pour le calcul de la teneur en eau non-gelée
- SM<sub>fin</sub>/SC<sub>fin</sub> → (≥ 30% fines) ; SM<sub>gros</sub>/SC<sub>gros</sub> → (< 30% fines)
- I<sub>p</sub> = Indice de plasticité ; I<sub>L</sub> = Indice de liquidité

