

**Dimensionnement structural
des chaussées souples
Logiciel – Chaussée 2
(Formation – Mai 2008)**

Direction du Laboratoire des chaussées
Service des chaussées
Secteur : Expertise en chaussées



CHAUSSÉE



Logiciel de dimensionnement
des chaussées souples

DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL
DES CHAUSSÉES SOUPLES AU MTQ :

LOGICIEL

CHAUSSÉE 2

Dimensionnement structural des Chaussées souples



<http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/reseau/chaussees/logiciel.asp>

Animateurs

Service des Chaussées: (418) 644-0890

- ◆ Guy Bergeron, ing. M.Sc. (poste 4019)
 - guy-g.bergeron@mtq.gouv.qc.ca
- ◆ Yves Savard, ing. M.Sc. (poste 4044)
 - Yves.savard@mtq.gouv.qc.ca
- ◆ Denis St-Laurent, ing. M.Sc. (poste 4061)
 - Denis.St-laurent@mtq.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.

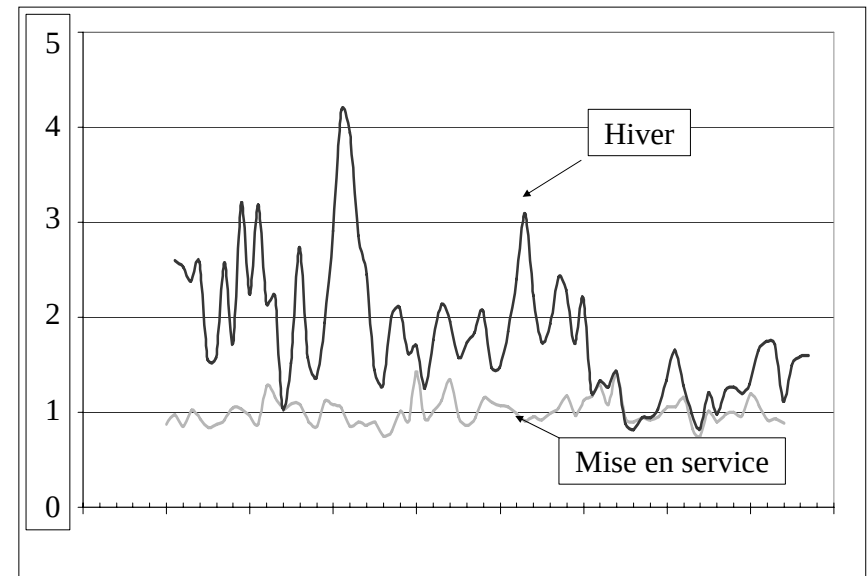


- ◆ Meilleure prise en compte des effets du gel.
- ◆ Approche Analytique
 - Basée sur la gélivité des sols
 - Les conditions hydriques

Chaussée 2: Justification



Chaussée 2: Justification



Chaussée 2: Justification



Chaussée 2: Justification



Contenu de la formation

- 8:30 Introduction (G.B.)
8:40 Le logiciel « Chaussée 2 » (G.B.)
8:55 La méthode AASHTO 1993 (G.B.)
9:15 Propriétés mécaniques des matériaux (Y.S.)
9:40 Trafic et agressivité des véhicules (Y.S.)
10:00 – 10:15 *Pause café*
10:15 Trafic et agressivité des véhicules (Y.S.)
10:25 Dimensionnement au gel (G.B.)
10:50 Traitement du climat (Y.S.)
11:10 Modélisation thermique (Y.S.)
11:30 Potentiel de ségrégation (G.B.)

Contenu de la formation

- 12:00 *Dîner*
13:30 Les étapes de dimensionnement (Y.S.)
13:50 Durée de vie (Y.S.)
14:00 Exemple avec le logiciel (Y.S.)
14:20 Exercices avec le logiciel (G.B.)

Contenu de la formation

- 15:00 *Pause café*
15:15 Exemple: conception sur sol gélif (G.B.)
15:40 Exemple: conception sur sol saturé (Y.S.)
16:00 Exemple: conception en milieu non
homogène (G.B.)
16:20 Commentaires des participants
16:30 *Fin du cours*



Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

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

Climat
Station météorologique
Sainte-Anne-de-la-Pérade Choisir

Zone	T _{EB}	T _{ma}	IG _n	σ _{IG}
Sud	20,5	4,2	1252	228

Simulation
Climat PR IG
15 1595
n IG_s
1,0 1595

a (MPa ⁻¹)	K _u (W/mK)	K _f	S _r (%)	L _f (Wh/m ²)	Coût (\$/m ²)
1,48	1,48	0	1250	20,45	
1,77	1,89	52	7897	3,80	
2,46	2,98	72	14967	5,46	

4 5 6 7

5 SC fin (plus de 30 % passer) Total = 920

1,8 16,0 2,0 10,0 1,88 2,58 87 24859

Réinitialiser les matériaux

Grapher Z (m) 2,293 h (m) 0,037

Total 29,71

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 ÉCAS (millions)
30 3,0 Outil ÉCAS

BB reporté à l'an prochain : 0 mm

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)	a (MPa ⁻¹)	K _u (W/mK)	K _f	S _r (%)	L _f (Wh/m ²)	Coût (\$/m ²)				
1 BB HRO	145	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											
5 SC fin (plus de 30 % passer)		1,8	16,0	2,0	10,0	1,88	2,58	87	24859	Total	29,71

Réinitialiser les matériaux

Grapher Z (m) 2,293 h (m) 0,037

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

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

Climat

Station météorologique
Sainte-Anne-de-la-Pérade Choisir

Zone	T _{EB}	T _{ma}	IG _n	σ _{IG}
Sud	20,5	4,2	1252	228

Simulation
Climat PR IG
15 1595
n IG_s
1,0 1595

STRUCTURE

Matériau	H (mm)	a (MPa ⁻¹)	K _u (W/mK)	K _f	S _r (%)	L _f (Wh/m ²)	Coût (\$/m ²)				
1 BB HRO	145	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											
5 SC fin (plus de 30 % passer)		1,8	16,0	2,0	10,0	1,88	2,58	87	24859	Total	29,71

Réinitialiser les matériaux

Grapher Z (m) 2,293 h (m) 0,037

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 : ECAS (millions)

Climat

Station météorologique
Sainte-Anne-de-la-Pérade

Zone T_{EB} T_{ma} IG_N sig
Sud 20,5 4,2 1252 228

Simulation PR IG
Climat 15 1595

n IG_s
1,0 1595

Couches de matériaux

Matériau H (mm)

1	BB HRO	145	↑ ↓ ↕ ↔
2	MG 20	200	
3	MG 112 (excluant les sable)	575	
4			
5			
6			
7			
S	SC fin (plus de 30 % passer)	Total = 920	

GEL (1994)

SP ₀ (mm²/KH)	a (MPa ⁻¹)	Ku (W/mK)	Kf	Sr (%)	Lf (Wh/m²)	Coût (\$/m²)
0,0		1,48	1,48	0	1250	20,45
0,0		1,77	1,89	52	7897	3,80
0,0		2,46	2,98	72	14967	5,46
2,0	10,0	1,88	2,58	87	24859	
(m) 2,293 h (m) 0,037						Total 29,71

[illegible]

Nouveautés de CHAUSSÉE 2

- **Sauvegardes en fichiers distincts**
- **Matériaux**
 - Coupes types par intervention
 - Notices d'information
 - Accès direct aux paramètres avancés (double clic)
 - Ajouts à la bibliothèque de matériaux (BAF, ERF, rubblizing, isolants, infra-améliorée, sols avec $IL > 0,9$, etc.)
- **Structural**
 - Facteur de capacité portante variable pour chaque couche
 - Prise en compte des pavages en parachèvement
 - Durées de vie prolongées

Chaussée - [Exemple 1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Notice d'information : CH (IL < 0.9)

Attention de ne pas endommager ce sol lors de la construction. Une couche de séparation sera requise si la sous-fondation ne respecte pas le critère de filtre pour couche anticontaminante, (norme 2103) Vous pouvez aussi envisager un géotextile (norme 13101), géogrid, stabilisation ou autre disposition appropriée. (consulter le guide d'utilisation des géosynthétiques de séparation et de renforcement des chaussées)

Rappeler automatiquement ce message dans : 1 jour

Climat

Station météorologique : Laprairie Choisir

Zone : T_{BB} : T_{ma} : I_{Gr} : σ_{IG}

Sud : 20.5 : 6.5 : 901 : 209

Simulation : PR : IG

Climat : 15 : 1215

n : IGs

1.0 : 1215

Paramètres avancés: Mr Module réversible effectif

Materiau	Modele	MRmin	MRmax	K1	K2	K3	K4
Croute argileuse > 1 m	20			41,4			
MG 112 (excluant les sables mal)	30	89,6	124,1	7,8	0,6		
MG 20	30	114	290	14	0,6		
BB HRO et BAF	10	1000	7000	4,00	0,01	1	

Modelé = choix de l'équation pour Mr:

- 10 => Béton bitumineux, $Mr = 10^{(K1-K2 \cdot T^*K3)} (+ K4 \text{ lorsque } H > 150)$
- 20 => Élasticité pure, $Mr = K1$
- 30 => K-theta, $Mr = K1 \cdot \theta^{K2}$
- 40 => Ln(theta), $Mr = K1 \cdot \ln(\theta) \cdot K2$

MrMin et MrMax = Plage de contrôle

1.00 : 20 > Equivalences d'été (FAS = 0.65)

Mr = 31 MPa
CBR = 3.5
Cu = 105 kPa

Total : 53.48

Couches de matériaux

	Materiau	H (mm)	
1	BB HRO et BAF	260	
2	MG 20	300	
3	MG 112 (fuseau entier)	1100	
4			
5			
6			
7			
8	CH (IL < 0.9)		

Total = 1660

Réinitialiser les matériaux

Nouveautés de CHAUSSÉE 2

■ Climat

- Carte géographique pour les stations météorologiques
- Traitement statistique des variations d'intensité des hivers

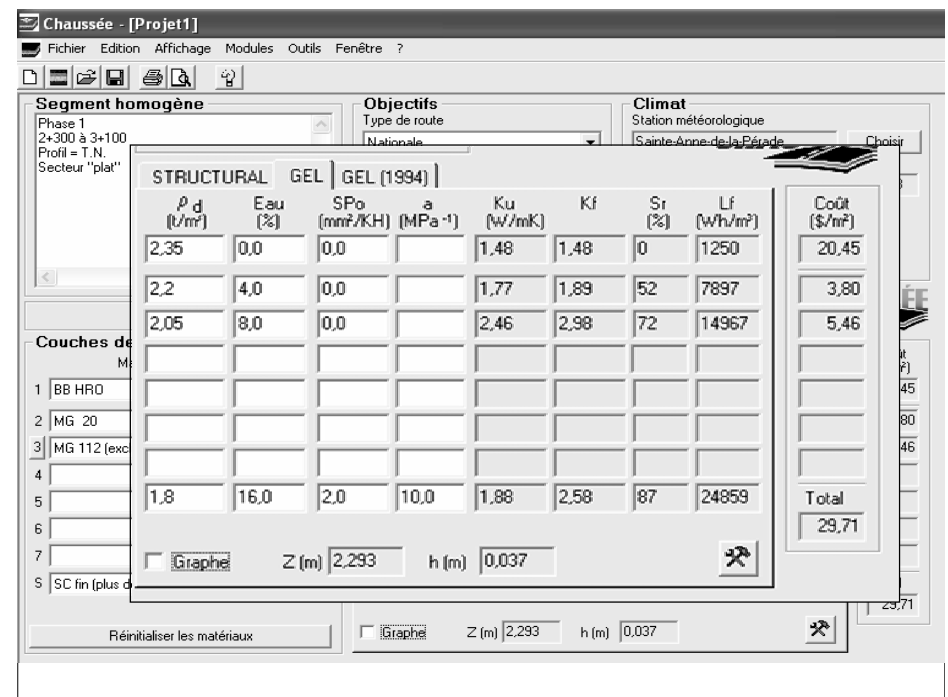
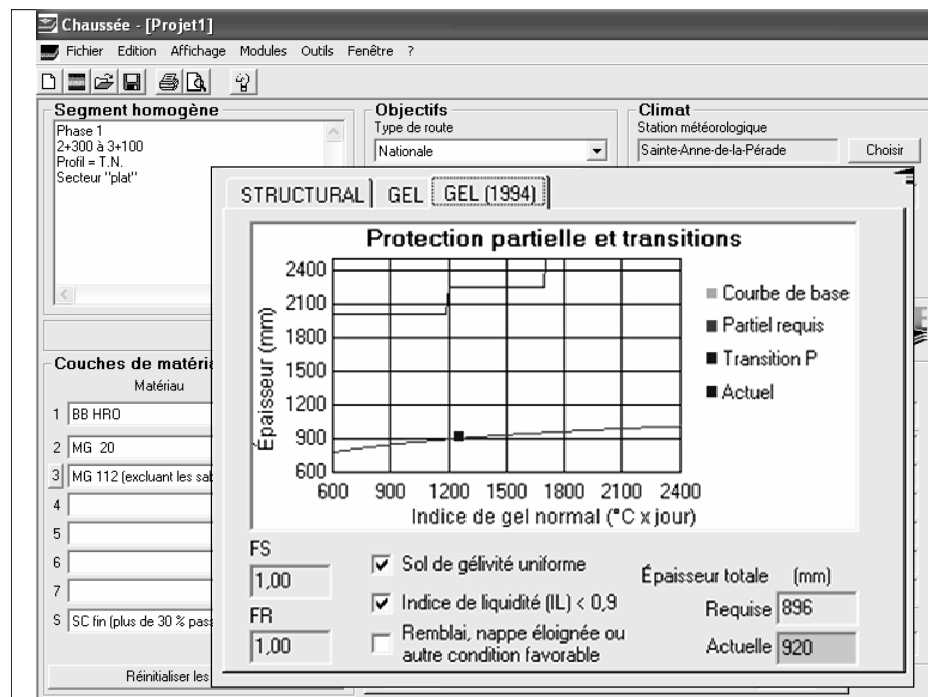
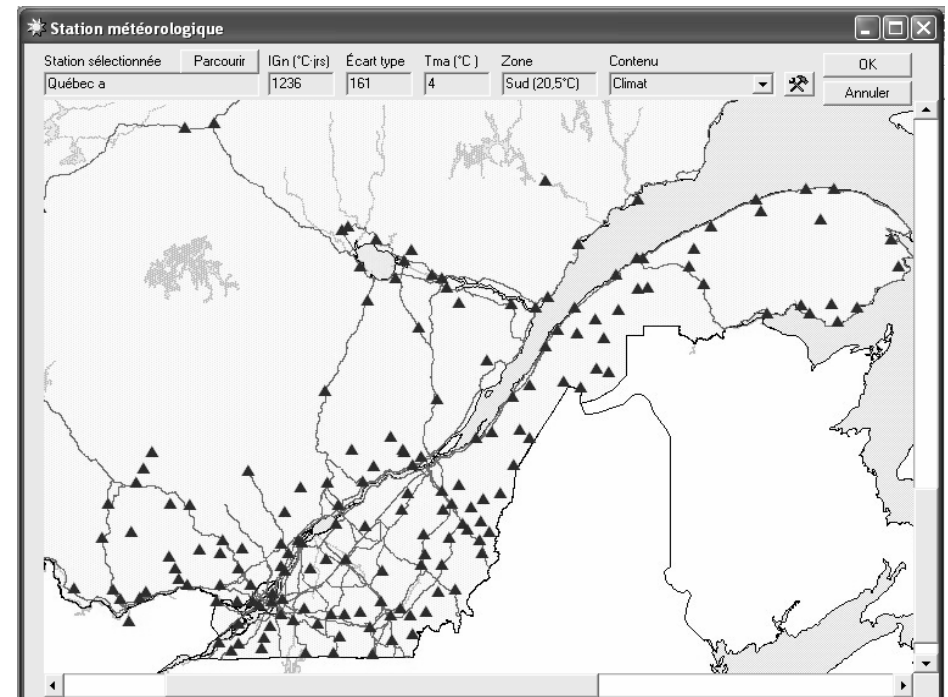
- Gel 1994: Profondeur P pour transitions

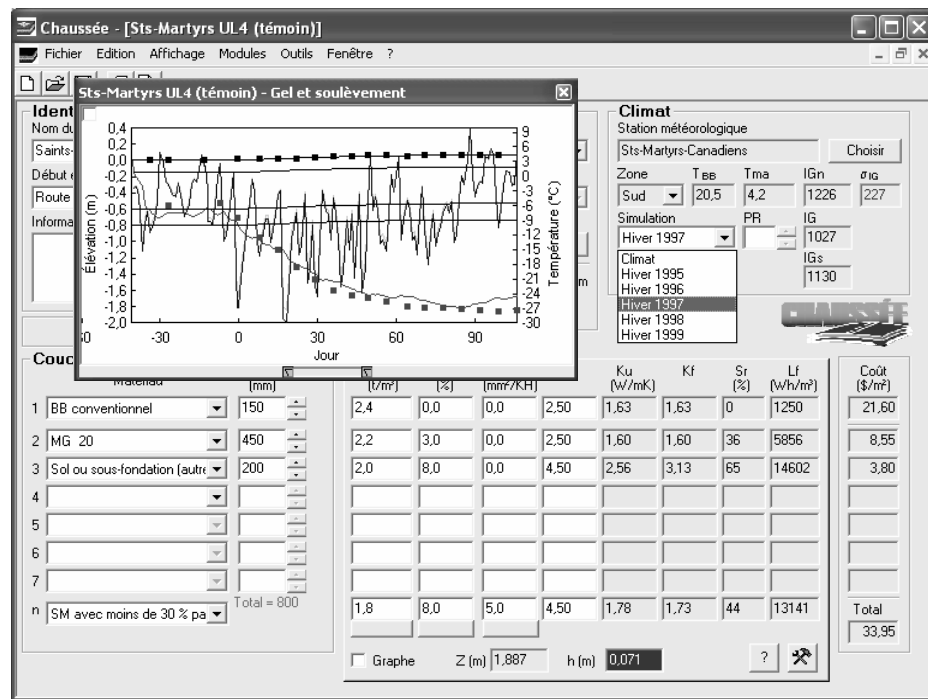
- En parallèle avec la courbe de protection partielle contre le gel

■ Gel: pénétration et soulèvements

- Une approche nouvelle et rationnelle
- Indicateurs de performance vérifiables
- Contrôle accru pour les dimensionnements contre le gel (sols avec $IL > 0,9$, isolants, infra-améliorée, etc.)

Effort principal





Boîte de saisie

- Confirmer une entrée avec Enter, Tab avec l'incrémenteur ou en cliquant ailleurs

- Incrémenteur

- Souris et flèches de clavier
- Accélérer : *Maj* ou *Page précédente* et *Page suivante*
- Ralentir : *CTRL*

180

- Méta-données

- Double clic (Option mode *Approfondi*)



- Nom de l'utilisateur (pour rapport d'impression)

- Répertoire de travail (facultatif)

- Mode d'utilisation

- *Simple*

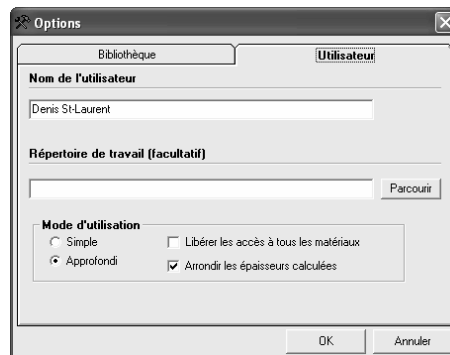
- Accès limité aux paramètres les plus importants

- *Approfondi*

- Déblocage 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



CHAUSSÉE 2 : Logiciel de dimensionnement des chaussées souples
Guide de l'utilisateur

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
10 - CALCUL D'USURE	26

10 - CALCUL DU GEL	36
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 Indice de gélivité sans surcharge (SP_0).....	40
10.3.2 Coefficient de surcharge (a).....	42
10.3.3 Sol argileux varvé ou ayant un indice de liquidité élevé ($I_L \geq 0,9$)	44
10.4 – CONDUCTIVITÉ THERMIQUE (K)	44
10.4.1 Conductivité thermique (K_s) et masse volumique des particules solides (ρ_s)	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
11 - CRITÈRE DE GEL DE 1994	50
12 - NORME POUR LES ROUTES À FAIBLE TRAFIC	53
13 - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	53
14 - POUR COMMUNIQUER AVEC NOUS	56

ANNEXES :

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



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

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène Objectifs Climat

Phase 1
2+300 à
Profil = 1
Secteur =

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

F Mr	Mr effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m	SN	w18 (en millions)	Coût (\$/m²)
1,00	3592	0,47	1,0	2,69	3,447	20,45
1,00	148	0,1	0,8	3,33	3,971	3,80
1,00	87	0,09	0,8	5,0	8,153	5,46
1,00	36	→ Équivalences d'été (FAS = 0,84) Mr = 43 MPa CBR = 5,6				Total 29,71

Choisir
σ18
228

Coût (\$/m²)
20,45
3,80
5,46
Total
29,71

Couche

1 | BB HF
2 | MG 2
3 | MG 1
4 |
5 |
6 |
7 |

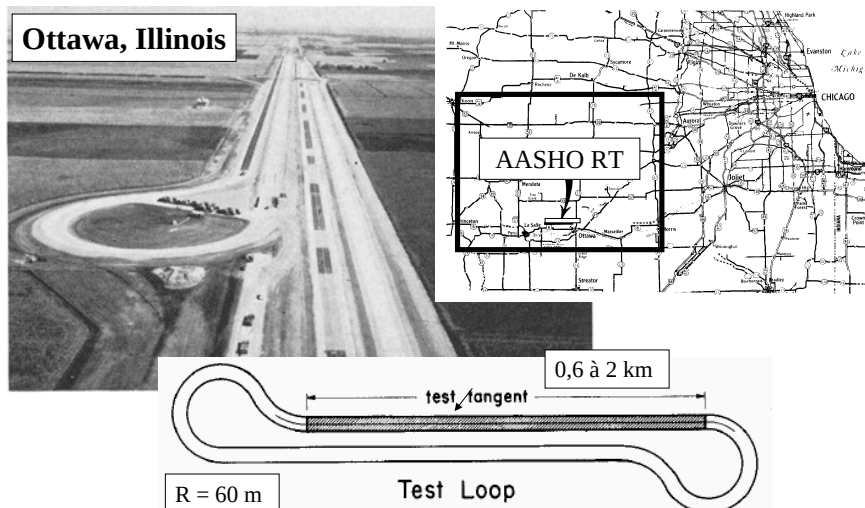
S | SC fin (plus de 30 % passer) | Total = 320

1,00 | 36 | → Équivalences d'été (FAS = 0,84)
Mr = 43 MPa
CBR = 5,6

Réinitialiser les matériaux

L'essai routier AASHO

Vue d'un circuit



Un seul type de sol (silt argileux)



Figure 16. Embankment construction, loop 1, using rotary speed mixers to process and adjust moisture content of soil.

Construction (années 1956-57)

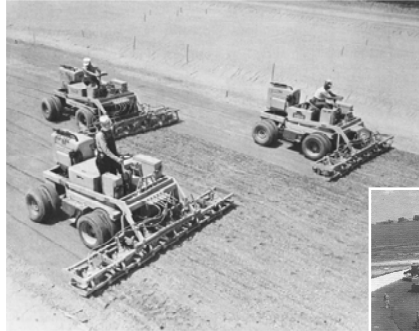


Figure 57. Compacting subbase.

6 circuits fermés
468 planches (ch. souples)
368 planches (ch. rigides)
1 set de matériaux



Figure 29. Bituminous concrete construction.

(AASHO, 1961)

Charges de trafic (années 58-60)



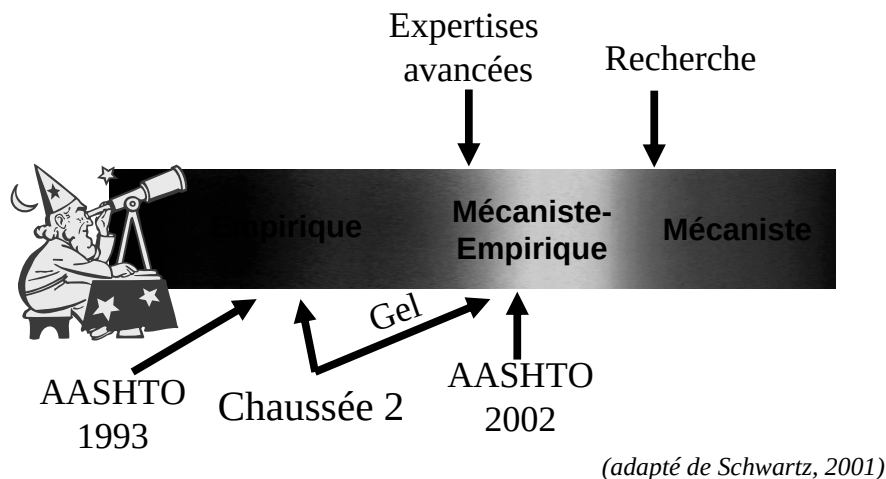
- 1 114 000 de passages en deux ans (56 km/h)
- circuit n°1 non circulé



Figure 23. Test vehicles, showing typical axle arrangements and loadings.

(AASHO, 1961)

Conception des chaussées Où en somme nous??



Méthode AASHTO: Nombre structural (SN)

➤ SN_{requis} ft (....

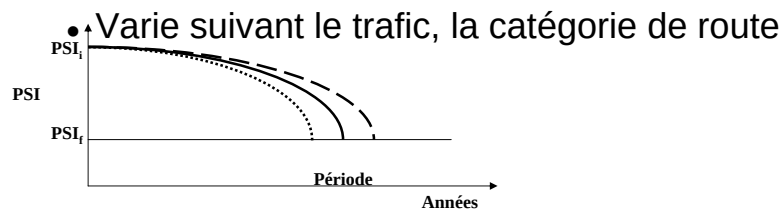
- **ECAS** = Trafic cumulatif pendant la période de design
- **R** = Fiabilité
- **S_0** = Variabilité

- **M_R** = Module de résilience
- Période de design
- **ΔPSI** = Diminution de l'indice de viabilité pendant la période de design



Niveau de confiance ou fiabilité R

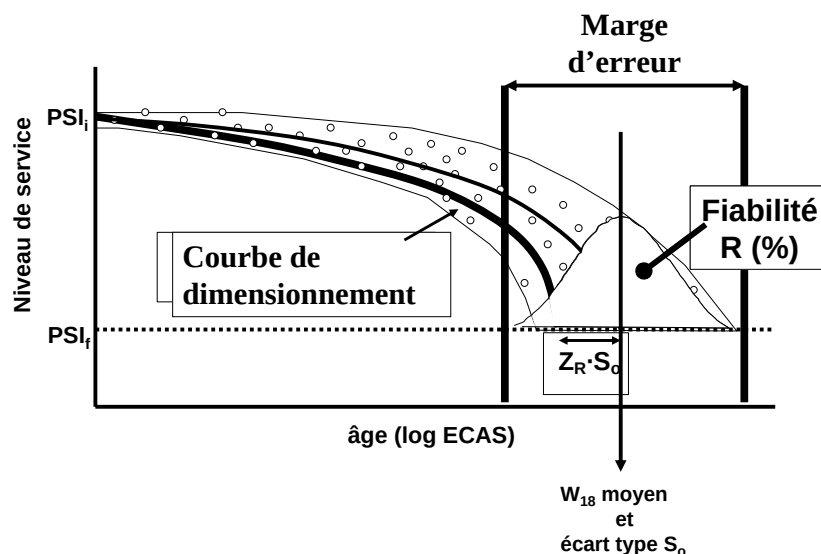
- 1 - R = niveau de risque
- R représente les chances que la chaussée présente un niveau de qualité supérieur ou égal à celui visé à la fin de la période de conception
 - Plus la route est importante, plus R est élevé



Variabilité So

- 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

AASHTO: Performance et durée de vie



Objectifs de design

Classification de la route	D.J.M.A. projeté	Période de Conception (années)	ΔPSI	Fiabilité R (%)	Soulèvement au gel (mm)	BB HRO requis
Locale	< 1 000	25	2,0	66	70	
	> 1 000	25	2,0	70	70	
Collectrice	< 2 000	25	2,0	70	60	
Régionale et	2 000-3 000	25	2,0	75	60	
Échangeur	> 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

Calcul structural

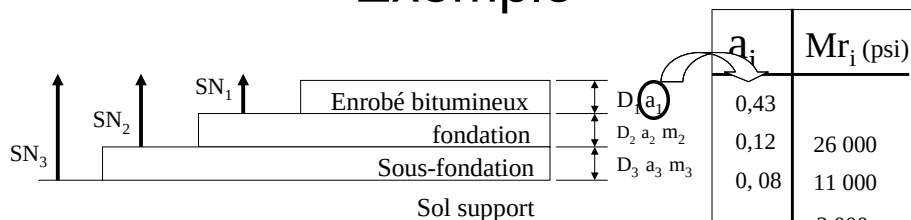
- Le nombre structural (SN) au-dessus de chaque couche doit être **suffisant** pour supporter le trafic sans déformation excessive durant toute la période de conception.
- La conception finale correspond à un **assemblage** de couches de matériaux d'épaisseurs définie qui résultent ainsi en un **% de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

Méthode AASHTO



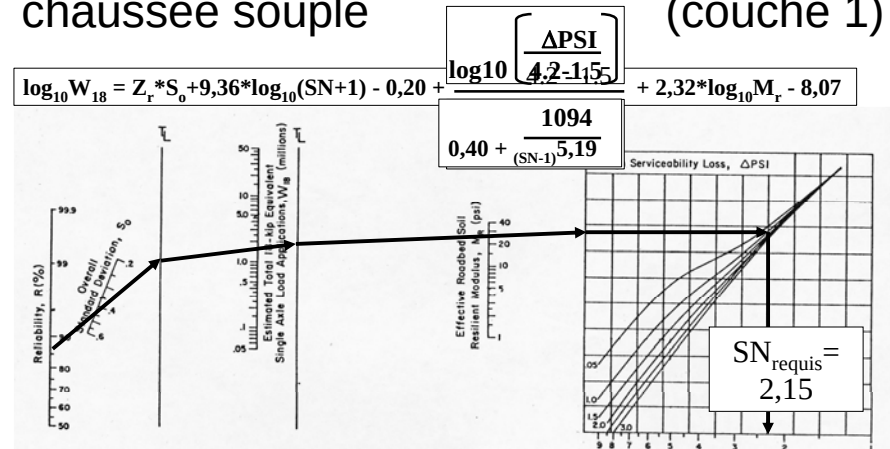
- $SN1 = a_1 \cdot D_1$
- $SN2 = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot m_2 \cdot D_2$
- $SN3 = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot m_2 \cdot D_2 + a_3 \cdot m_3 \cdot D_3$
 - a_i = Coefficient structural = f (Module M_r)
 - D_i = Épaisseur de la couche
 - m_i = Coefficient de drainage

Exemple



- $R = 85\%$
- $S_o = 0,45$
- ÉCAS total = 1,5 millions
- M_r infra = 21 MPa (3000 psi)
- $\Delta PSI = 2,0$

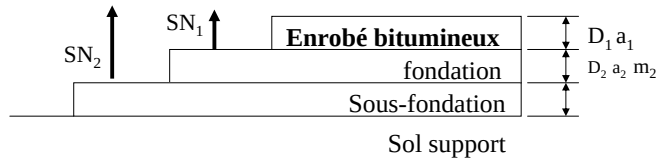
Abaque de dimensionnement pour une chaussée souple (couche 1)



Exemple

$W_{18} = 1,5 \cdot 10^6$, $R = 85\%$, $S_o = 0,45$, $M_r = 26000$ psi, $\Delta PSI = 2$

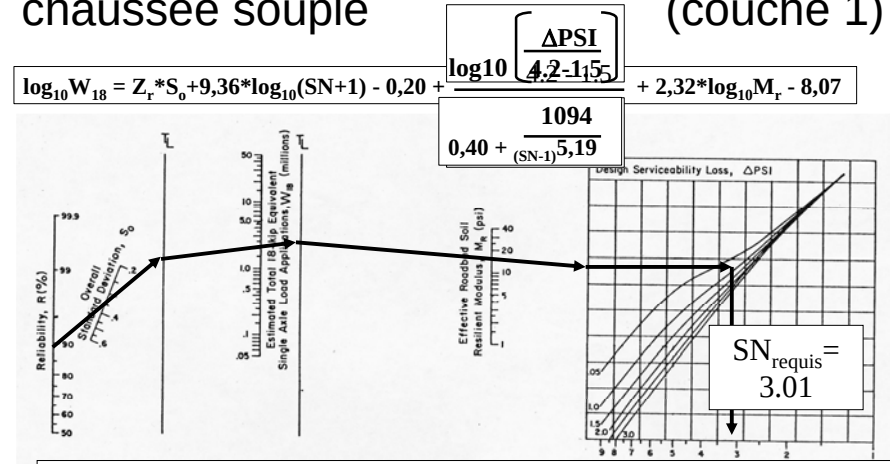
Exemple



a_i	E_i
0,43	
0,12	26 000
0,08	11 000
$m=0,8$	

➤ $SN_{1 \text{ requis}} = 2,15 = 0,43 \cdot D_1 \Rightarrow D_1 = 2,15/0,43 = 5.0 \text{ po}$

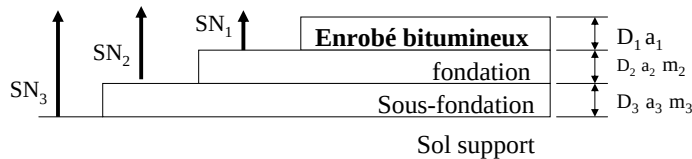
Abaque de dimensionnement pour une chaussée souple (couche 1)



Exemple

$W_{18} = 1,5 \cdot 10^6$, $R = 85 \%$, $S_o = 0,45$, $M_r = 11000 \text{ psi}$, $\Delta PSI = 2$

Exemple



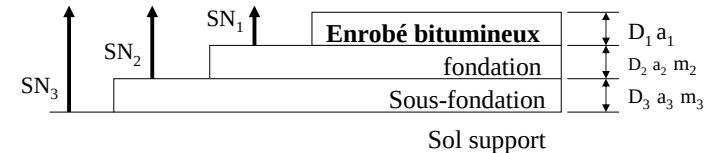
a_i	E_i
0,43	
0,12	26 000
0,08	11 000
$m=0,8$	

➤ $SN_{1 \text{ requis}} = 2,15 = 0,43 \cdot D_1 \Rightarrow D_1 = 2,15/0,43 = 5.0 \text{ po}$

➤ $SN_{2 \text{ requis}} = 3,01 \Rightarrow D_2 = \frac{3,01 - 2,15}{0,12 \cdot 0,8} = 9 \text{ po}$

➤ $SN_{3 \text{ requis}} = 4,72 \Rightarrow D_3 = \frac{4,72 - 3,01}{0,08 \cdot 0,8} = 27 \text{ po}$

Exemple



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

STRUCTURE DE CHAUSSEE FINALE

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

Exemple

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

Objectifs

Type de route: Autoroute

Classe de trafic (DJMA projeté): Supérieur à 20000

Années ECAS (millions): 30

ECAS (millions): 36.04

Outil ECAS

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Choisir

Zone: Sud

T_{ee}: 20.5

T_{ma}: 6.5

IGn: 901

σ_{iq}: 209

Simulation: PR

IG: 1215

Climat: 15

n: 1.0

IGs: 1215

Revêtement à haute résistance à l'orniérage requis

Couches de matériaux

	Matériau	H (mm)
1	BB HRO	265
2	MG 20	300
3	MG 112 (lisseau entier)	1100
4		
5		
6		
7		
n	CH (IL < 0.9)	Total = 1665

STRUCTURAL | GEL

F Mr	Mr effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m	SN	W19 (en millions)	Coût (\$/m²)
1.00	3592	0.47	1.0	4.91	39.157	37.37
1.00	110	0.07	0.8	5.57	37.878	5.70
1.00	74	0.08	0.8	8.18	37.634	9.90
1.00	20	Cu = 90 kPa (été)				Total
						52.97



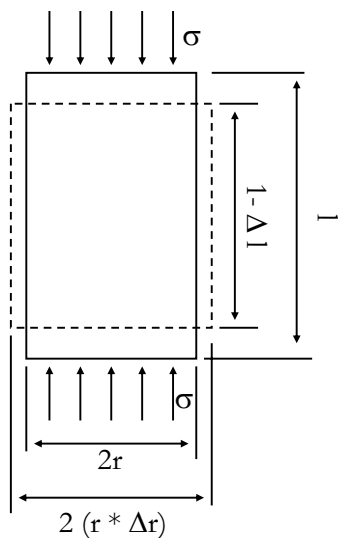
Matériaux de chaussées



Plan

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

Déformation des matériaux



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

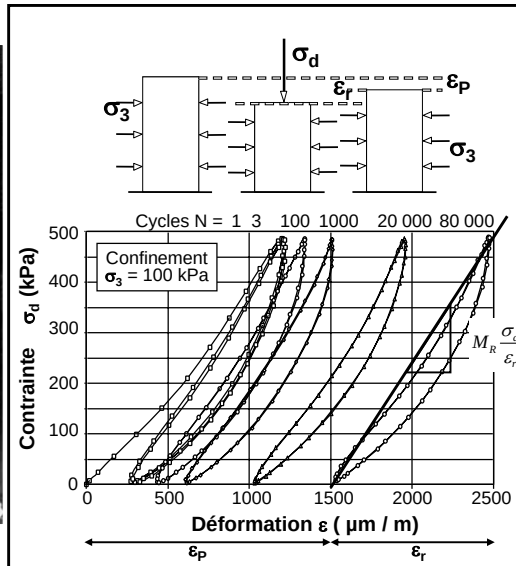
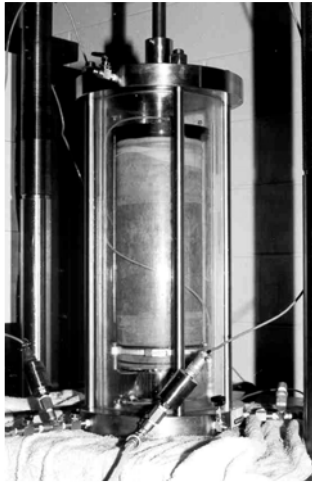
$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_l} \text{ Module de Young}$$

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

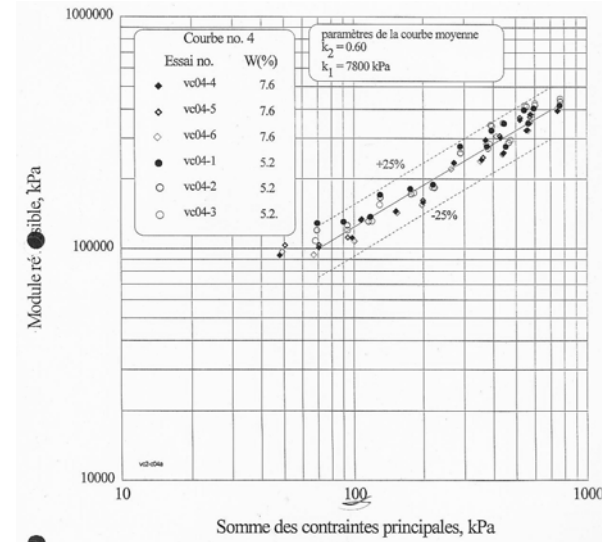
Lois de comportement

- Visco-élastique (bitumineux):
 - $M_R = 10 (K_1 - K_2 T^{K_3}) + K_4$
- K - Theta (granulaire):
 - $M_R = K_1 \theta^{K_2}$
- Élastique (sols):
 - $M_R = K_1$

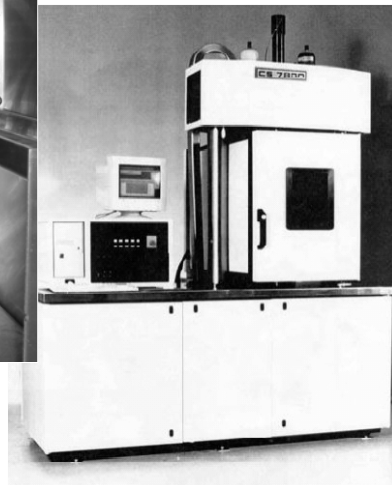
Mx granulaires et sols: essai triaxial



Matériau granitique de Valcartier

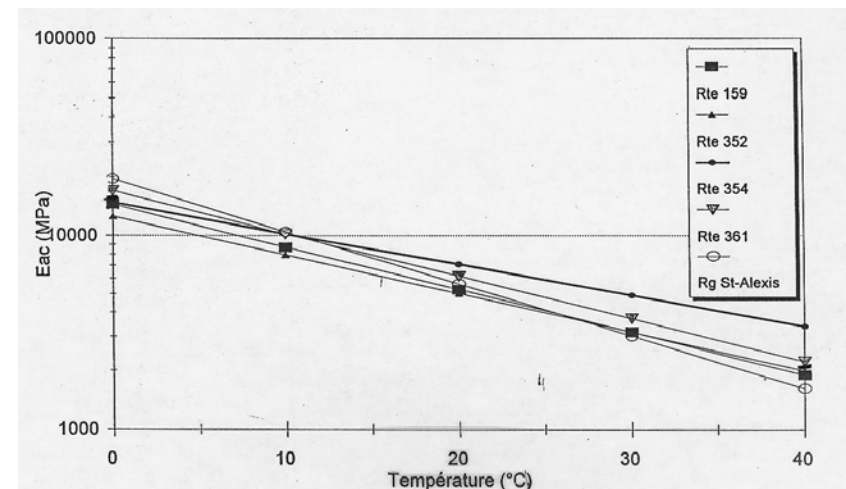


Mx bitumineux: Essai de tension-compression cyclique



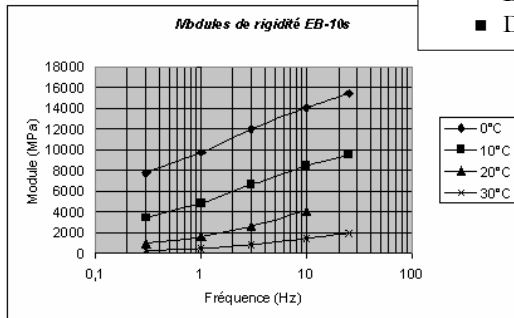
- Courbes de module et de fatigue des enrobés

E en fonction de la température



Enrobé bitumineux

- Variation du module des enrobés en fonction de
 - La température
 - Du temps de chargement (fréquence)
 - Du type de mélange



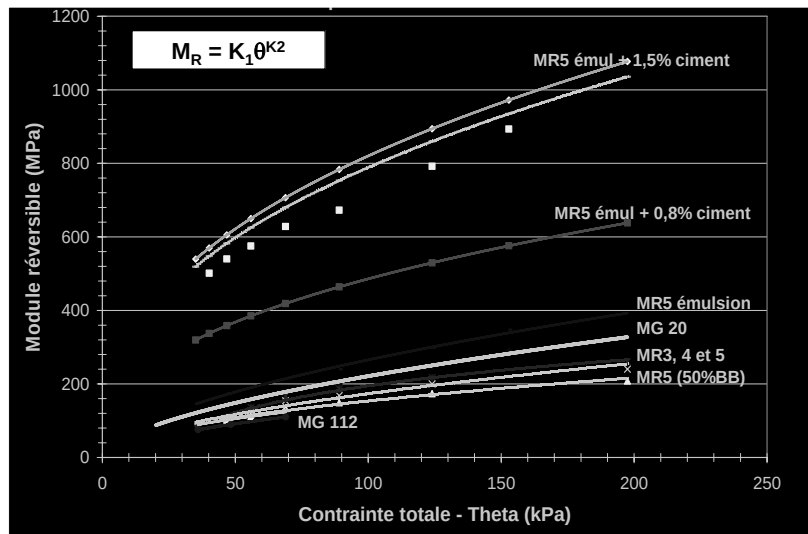
$$E_{e.b.} = f(T, H_z)$$

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

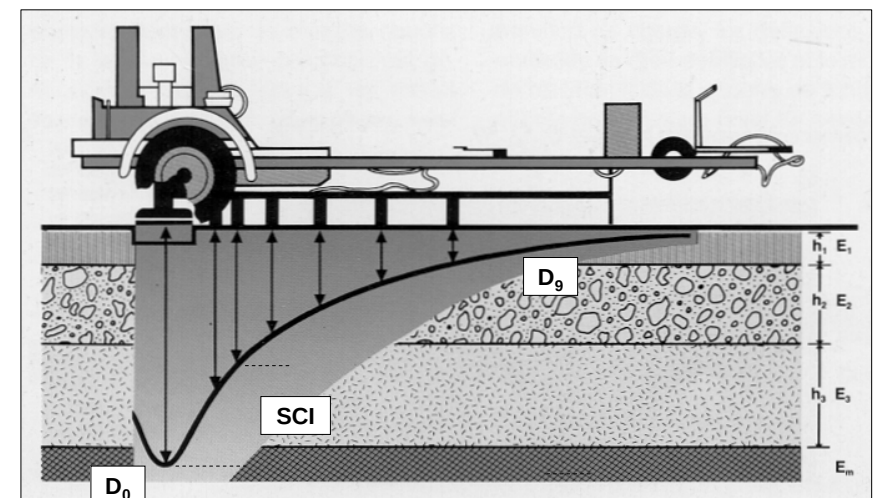
Type de route	Vitesse opération - nelle (km/h)	Fréquence estimée à mi-couche (Hz)		
		Epaisseur totale (100-300 mm)	Couche de surface (25-75 mm)	Couche de base (75-300 mm)
Autoroute	100	15-40	45-95	10-25
Nationale	70	10-30	35-70	15-20
Rue résid.	25	5-10	10-25	5-10
Intersect.	1	0.1-0.5	0.5-1.0	0.1-0.25

Modules réversibles

Étalonnés pour la méthode de l'AASHTO



Essais FWD

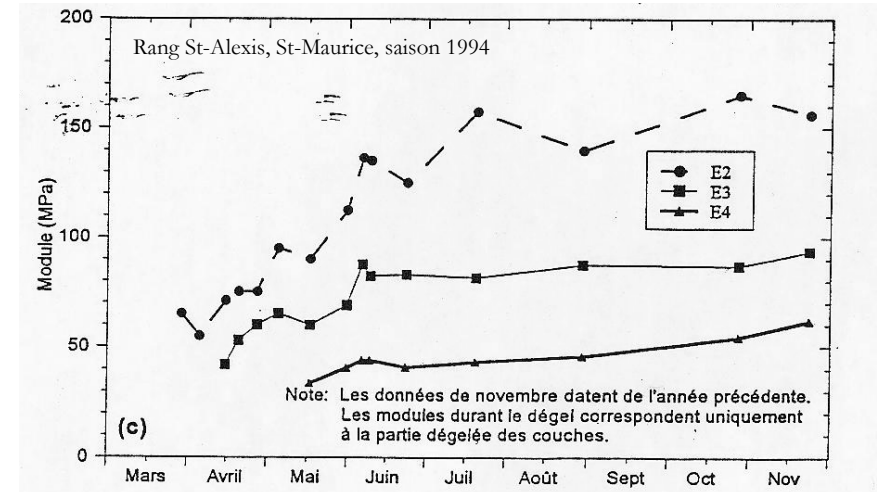


Variations saisonnières

L'influence du climat (froid et humidité) doit être pris en considération dans la conception structurale

- Matériaux bitumineux
 - Module varie avec la température
 - Module varie avec la fréquence (vitesse des véhicules)
 - Module varie avec l'âge (oxydation)
 - Présence de fissures (écart de température)

Variations saisonnières Sol et matériaux granulaires



Variations saisonnières

- Matériaux granulaires et sols
 - Gel-dégel
 - Précipitations
 - Fonte (neige et lentilles de glace)
 - Position de la nappe phréatique

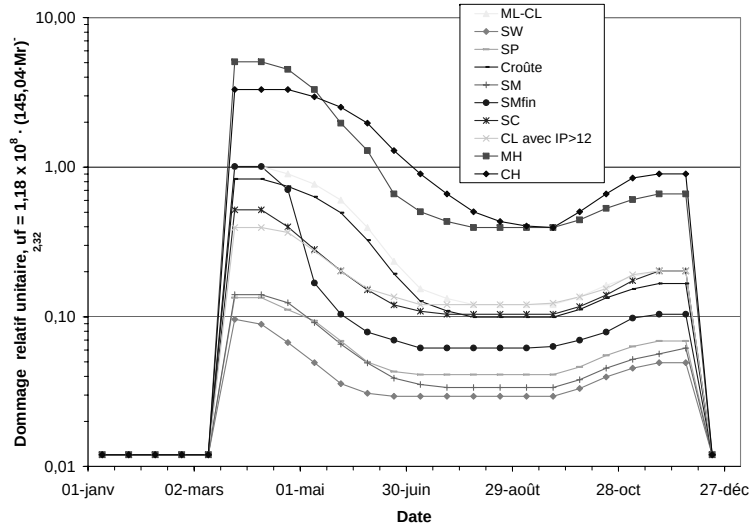
Pour tenir compte des variations annuelles, un dommage est attribué pour chaque période (module représentatif) et un module équivalent est attribué pour représenter la somme des dommages annuels

Mr effectif

- 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)
- Facteur d'ajustement saisonnier:
 - $FAS = 36,1 / 51,7 = 0,70$

Mois	M_r , MPa	u_f
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_r effectif :		36,1

Profils d'endommagement



Logiciel
chaussées
1.2

Logiciel
chaussées
2.0

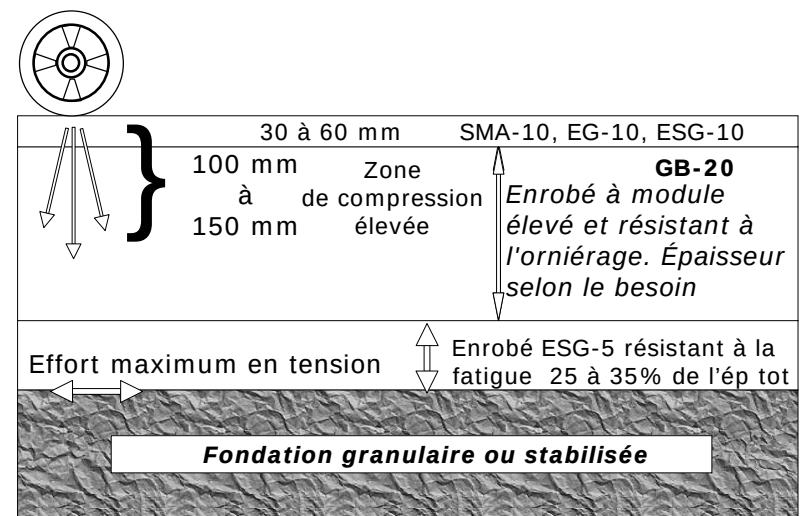
Couches de matériaux	Matériau	H (mm)	Mi effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m	SN	W/B (en millions)	Coût (\$/m³)
1	EB HFO	170	1.00	3552	0.47	1.0	3.15	775.539
2	EB fissuré	150	1.00	1366	0.3	1.0	4.9	38.767
3	MIS 20	275	1.00	110	0.07	0.8	5.51	34.893
4	MIS 112 (niveau entée)	500	1.00	74	0.08	0.8	6.69	29.382
5								
6								
7								
8	SC en place de 30 % parier							
Total = 1055								

Logiciel Chaussée 2

- Nouveau matériaux bitumineux
 - Enrobé bitumineux fissuré (existant)
 - Enrobé bitumineux haute résistance à l'orniérage (HRO) avec base anti-fatigue (BAF)



Enrobé à HRO et BAF



Logiciel Chaussée 2

- Nouveau matériaux de fondation
 - Enrobé recyclé à froid ERF (émulsion avec 0,5% ciment)
 - Dalles concassées par résonance (rubblizing)

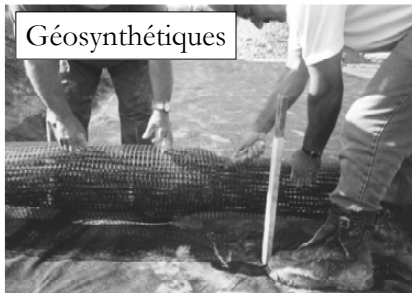
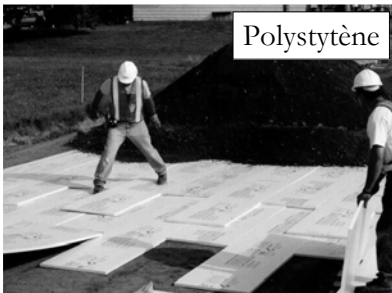


Logiciel Chaussée 2

- Nouvelles couches de sol
 - Croûte argileuse (i.e. ép. < 1,0 m)
 - Sols argileux avec $I_L \geq 0,9$
 - Sols stabilisés à la chaux
 - Infrastructure améliorée (jusqu'à 20% fines)
 - Roc brisé
 - SC grossier (moins de 30% fines)

Logiciel Chaussée 2

- Nouveaux matériaux
 - Polystyrène extrudé (thermique)
 - Polystyrène expansé (thermique)
 - Géosynthétiques



Autres points importants

- Contraintes plus élevées en surface => couches plus importantes
- Module des matériaux bitumineux diminue avec la fréquence (vitesse des véhicules)
- Le logiciel tient compte des variations saisonnières
- Le logiciel offre la possibilité d'utiliser des valeurs spécifiques => attention de bien maîtriser la démarche

Démonstration à l'aide du logiciel



Trafic et agressivité des véhicules



Transport
Québec

Contenu



- Notions de trafic (rappel)
 - Coefficients d'agressivité
 - Comptages et classifications
 - Agressivité moyenne et totale
 - Pourcentage d'accroissement
- Nouveautés Chaussée 2.0
- Points importants
- Démonstration à l'aide du logiciel

Transport
Québec

Le trafic lourd



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

▪ Poids de référence (AASHTO):

- 1 ECAS = essieu simple de 8 165 kg
- = " tandem de 15 200 kg
- = " tridem de 21 800 kg
- ≈ " quadrem de 32 000 kg

Transport
Québec

Agressivité des véhicules

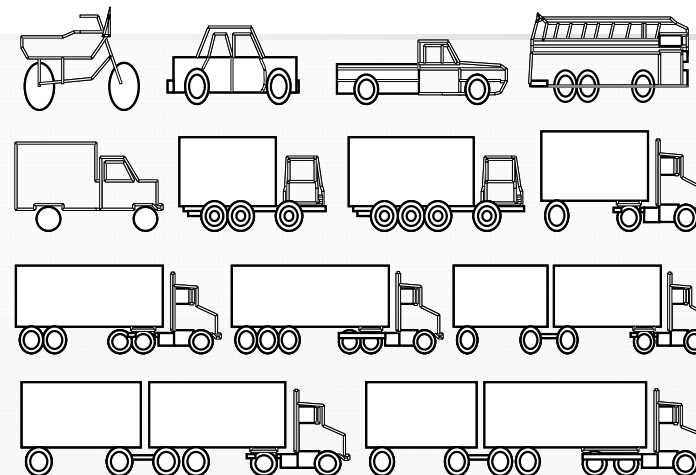
- Facteurs affectant l'agressivité
 - Charges
 - Configuration des essieux (distances)
 - Pneus (arrangement, type, pression)
 - Chaussée
 - Uni (défauts)
 - Géométrie (pentes, devers, courbe, zones de freinage...)
 - Capacité de support

Transport
Québec

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

- Essieu avant: 8 000 kg
- Essieu tandem arrière: 20 000 kg
- Agressivité relative
 - Essieu avant $= \left[\frac{8000}{8165 \text{ kg}} \right]^4 = 0.92$
 - Essieu arrière $= \left[\frac{20\,000}{15\,200 \text{ kg}} \right]^4 = 3.00$
 - Agressivité total = somme des essieux
 - C.A. = $0.92 + 3.00 = 3.92 \text{ ECAS } (W_{18})$

Classification des véhicules



Classification des véhicules (manuelle ou automatique)

Somme des deux directions																		
Municipalité de:		SHERBROOKE																
Localisation:		2,2 km à l'est de la 220 (100km/h)																
Station de comptage:		6001024500 (00010-03-025)																
Date de relevé:		2006-10-26 (Jedi)																
															Résultats pour l'ensemble de la collecte			
															Pourcentage de camions sur semaine:		8.84	(98 hrs)
															Pourcentage de camions de fin de semaine:		2.7	(48 hrs)
Classification selon le standard FHWA																		
Heure	Moto-cycliste	Véhicul. légers	Véhicul. légers 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	6	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	19	0	7	6	0	2	15	19	0	0	0	5	141			
05:00-06:00	1	216	45	1	11	10	0	5	31	26	0	0	4	5	355			
06:00-07:00	0	891	156	2	18	16	0	7	36	31	0	0	2	39	1198			
07:00-08:00	1	2385	237	2	35	19	1	7	56	33	1	0	5	75	2857	5.6		
08:00-09:00	1	2162	201	6	34	36	0	13	69	47	1	0	4	57	2631	8.0		
09:00-10:00	0	1213	160	3	29	29	0	12	60	51	0	0	7	45	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	48	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	206	5	33	18	0	11	89	37	1	0	5	83	3254	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	56	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		
* : véhicules particuliers																		

* : volumes estimés

Calcul de l'agressivité totale pour la période de conception

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

- 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

Agressivité totale

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

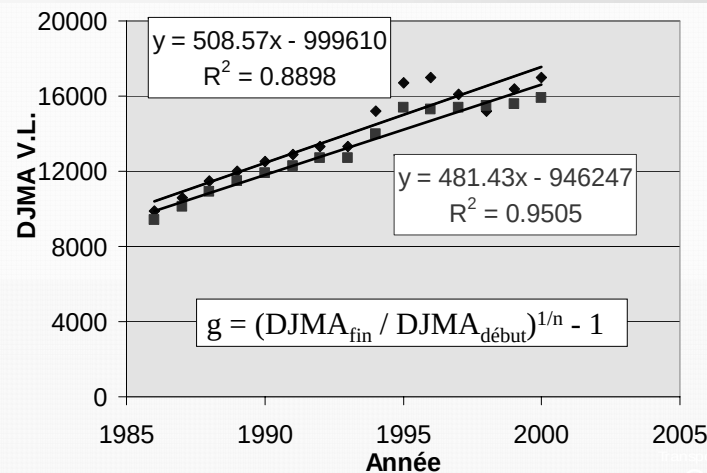
- C.A.M. = Coefficient d'agressivité moyen
- N jrs = 300 jours, correspond à la proportion de V.L. applicable durant l'année au Québec compte tenu de la méthodologie utilisée pour les comptages de trafic

Agressivité totale

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

- 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

Calcul de l'accroissement du DJMA véhicule lourd



Nouveautés Utilitaire trafic

Menu: Fichier, Edition, Affichage, Modules, Outils, Fenêtre, ?

Segment homogène

Objectifs

Type de route: [dropdown]
Classe de trafic (DJMA projeté): [dropdown]
Années ECAS (millions): 0.0 [button: Outil ECAS]
BB reporté à l'an prochain: [dropdown] mm

Climat

Station météorologique: [dropdown] Choisir
Zone: [dropdown] T_{BB} T_{ma} I_{gn} σ_{ig}
Simulation: [dropdown] PR IG
n: [input] IGs: [input]

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)	Mr	Mr effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m	SN	w ₁₈ (en millions)	Coût (\$/m²)
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

Reinitialiser les matériaux

CHAUSSEE

Outil de calcul du nombre d'ÉCAS

Prévision du trafic

Année du comptage: 2006
 Année du projet: 2008
 DJMA du comptage: 30 000
 DJMA actualisé: 31 827

Durée de vie (en années): 20
 f.a. (%): 3,0
 Nirs (jours/an): 26,87
 300

Agressivité du trafic

Proportion de véhicules lourds (%): 10,0

Coefficient d'agressivité moyen (CAM)

☐ Valeur par défaut
☒ Classification
☐ Saisie directe

Répartition du trafic lourd sur les voies

Nombre de voies par direction: 3 voies

Direction 1

Fraction du trafic en direction 1 (%)	Fraction par voie (%)	Trafic par voie (DJMA)	FS	ÉCAS par voie (en millions)	Voie de référence
50,0	62,0	3 256	1,0		☐ Voie 1
	30,6	6 542	1,0		☐ Voie 2
DJMA projeté pour la direction 1: 21 380	7,4	582	1,0		☐ Voie 3

Direction 2

Fraction du trafic en direction 2 (%)	Fraction par voie (%)	Trafic par voie (DJMA)	FS	ÉCAS par voie (en millions)	Voie de référence
50,0	7,4	582	1,0		☐ Voie 3
	30,6	6 542	1,0		☐ Voie 2
DJMA projeté pour la direction 2: 21 380	62,0	3 256	1,0		☐ Voie 1

Norme pour faible trafic

DJMA corrigé: 42 760
 DJMA projeté: 42 760
 ÉCAS projeté (millions):
 Fermer

Actualisation des C.A.

Outil de calcul du nombre d'ÉCAS

Comptage et classification des véhicules lourds

	Nb véhicules	CA (véhicules)	Agressivité totale
Autobus	0	1,10	0,00
Camion 1 unité 2 essieux	0	0,30	0,00
Camion 1 unité 3 essieux	0	1,40	0,00
Camion 1 unité 4 essieux et plus	0	5,70	0,00
Camion 2 unités 4 essieux et moins	0	0,50	0,00
Camion 2 unités 3 essieux	0	1,70	0,00
Camion 2 unités 3 essieux et plus	0	6,80	0,00
Camion 3 unités 3 essieux	0	1,70	0,00
Camion 3 unités 3 essieux et plus	0	7,30	0,00

Réinitialiser les CA

Coefficient d'agressivité moyen (CAM)

ECAS par camion: ?
 Retour

→ Hausse ≈ 5 %

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

Points importants

- Classification et comptage des véhicules lourds sur 48 heures ou plus
- Pourcentage d'accroissement non traité par le logiciel (détermination manuelle)
- On doit prévoir le trafic sur plusieurs décennies (réglementation, industrie,...)

Démonstration à l'aide du logiciel



Ministère des Transports
Québec

Démonstration 1: CAM

- Détermination du C.A. moyen à partir d'un comptage et classification
- Autoroute 10, Sherbrooke

Ministère des Transports
Québec

Gouvernement du Québec
Ministère des Transports

Classifications automatiques

07/07

Somme des deux directions

Municipalité de: SHERBROOKE
Localisation: 2,2 km à l'est de la 220 (100km/h)
Station de comptage: 0001024500 (00010-03-025)
Date de relevé: 2006-10-26 (Jeudi)

Résultats pour l'ensemble de la collecte

Pourcentage de camions sur semaine:	8.84	(98 hrs)
Pourcentage de camions de fin de semaine:	2.7	(48 hrs)

Classification selon le standard FHWA

Heure	Moto-cyclette	Véhic. légers	Véhic. légers 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	6	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	19	0	7	6	0	2	15	19	0	0	0	5	141	
05:00-06:00	1	216	45	1	11	10	0	5	31	26	0	4	5	355		
06:00-07:00	0	891	156	2	18	16	0	7	36	31	0	2	39	1198		5.6
07:00-08:00	1	2385	237	2	35	19	1	7	56	33	1	0	5	75	2857	
08:00-09:00	1	2162	201	6	34	36	0	13	69	47	1	0	4	57	2631	8.0
09:00-10:00	0	1213	160	3	29	29	0	12	60	51	0	0	7	45	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	56	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

Chaussée - [Projet13]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

Objectifs

Type de route

Classe de trafic (DJMA projeté)

Années ÉCAS (millions)

BB reporté à l'an prochain : 0 mm

Climat

Station météorologique

Zone T_{BB} T_{ma} I_{Gn} σ_{IG}

Simulation PR IG

IGs

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

	F Mr	Mr effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m	SN	W18 (en millions)	Coût (\$/m ²)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
S							

Réinitialiser les matériaux

CHAUSSEE

Outil de calcul du nombre d'ÉCAS

Prévision du trafic
 Année du comptage: 2006, Année du projet: 2008
 DJMA du comptage: 0, DJMA actualisé: 0
 Durée de vie (en années): 30, g (%): 3.0, f.a.: 47.58, Nirs (jours/an): 300

Agressivité du trafic
 Proportion de véhicules lourds (%): 0.0
Coefficient d'agressivité moyen (CAM)
☒ Valeur par défaut: Autoroute
☐ Classification
☐ Saisie directe: CAM

Répartition du trafic lourd sur les voies
 Nombre de voies par direction: 1 voie
Direction 1
 Fraction du trafic en direction 1 (%): 50.0, DJMA projeté pour la direction 1: 0
Direction 2
 Fraction du trafic en direction 2 (%): 50.0, DJMA projeté pour la direction 2: 0
 Norme pour faible trafic: DJMA corrigé: 0, DJMA projeté: 0, ÉCAS projeté (millions): Fermer

Outil de calcul du nombre d'ÉCAS

Comptage et classification des véhicules lourds

	Nb véhicules	CA (véhicule)	Agressivité totale
Autobus	43	1.10	47.30
Camion 1 unité 2 essieux	361	0.30	108.30
Camion 1 unité 3 essieux	391	1.40	547.40
Camion 1 unité 4 essieux et plus	6	5.70	34.20
Camion 2 unités 4 essieux et moins	188	0.50	94.00
Camion 2 unités 5 essieux	1205	1.70	2048.50
Camion 2 unités 6 essieux et plus	657	6.80	4467.60
Camion 3 unités 5 essieux	12	1.70	20.40
Camion 3 unités 6 essieux et plus	94	7.30	686.20

Réinitialiser les CA

Coefficient d'agressivité moyen (CAM)
 2.72 ÉCAS par camion ? Retour

$$CAM = \sum \text{agressivité totale} / \sum \text{Nb véhicules}$$

Démonstration 2: calcul ECAS total

Données

- Reconstruction prévue en 2008
- Étude de classification automatique – octobre 2006
- Accroissement annuel du DJMA 3%
- Dimensionnement 30 ans
- 50% de véhicules lourds par direction
- 4 voies, 2 directions

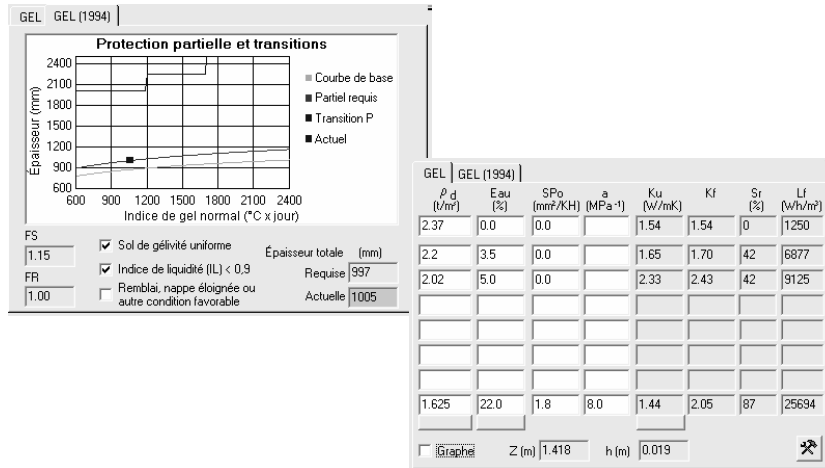
Outil de calcul du nombre d'ÉCAS

Prévision du trafic
 Année du comptage: 2006, Année du projet: 2008
 DJMA du comptage: 31 927, DJMA actualisé: 33 871
 Durée de vie (en années): 30, g (%): 3.0, f.a.: 47.58, Nirs (jours/an): 300

Agressivité du trafic
 Proportion de véhicules lourds (%): 9.3
Coefficient d'agressivité moyen (CAM)
☐ Valeur par défaut
☒ Classification
☐ Saisie directe: CAM 2.72

Répartition du trafic lourd sur les voies
 Nombre de voies par direction: 2 voies
Direction 1
 Fraction du trafic en direction 1 (%): 50.0, DJMA projeté pour la direction 1: 26 857
Direction 2
 Fraction du trafic en direction 2 (%): 50.0, DJMA projeté pour la direction 2: 26 857
 Norme pour faible trafic: DJMA corrigé: 53 715, DJMA projeté: 53 715, ÉCAS projeté (millions): 44.328, Fermer

Dimensionnement au gel



Considération du climat dans les modules de chaussée (v. 2)

● Module STRUCTURAL

- $E_{BB} = f(T_{BB})$ ← Zone sud, zone nord
- E autres matériaux = Précalculé avec l'approche du dommage équivalent (méthode AASHTO 1993).

● Module Gel 1994

- $H_{tot} = f(\text{Indice de gel normal})$

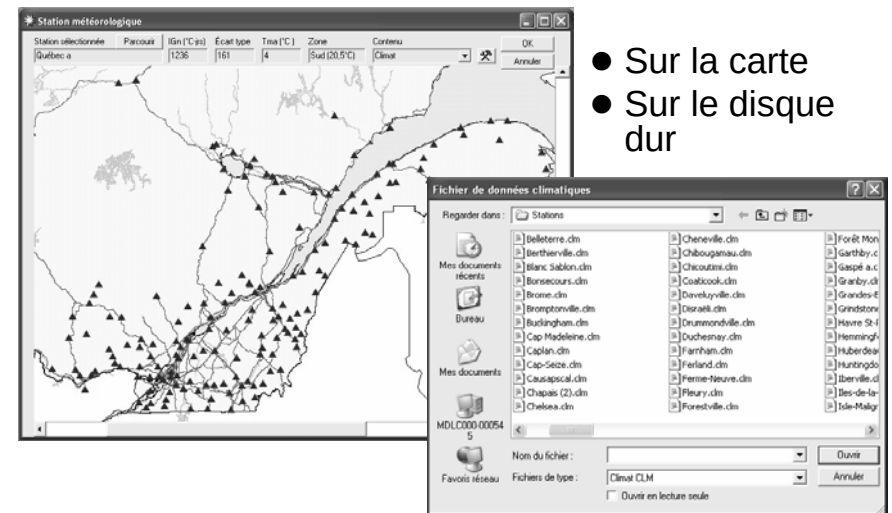
● Module Gel (modèle de simulation)

- Réponse = $f(T_{ma}, T_j)$
 - Température moyenne annuelle (T_{ma})
 - Températures journalières (hiver quelconque)

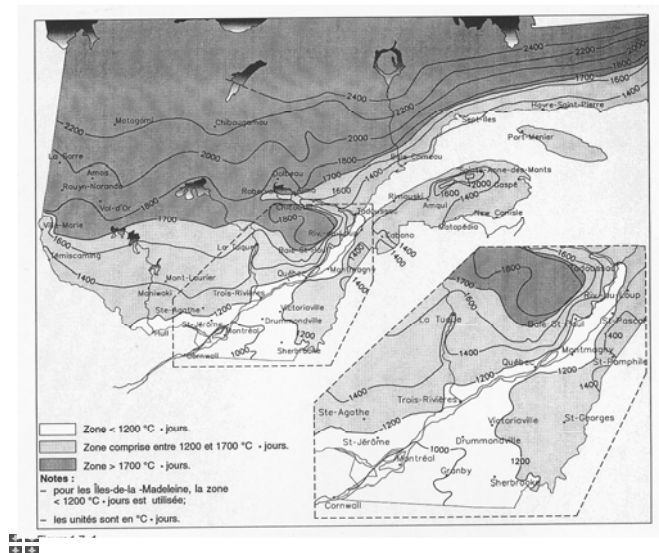
Climat du Québec

- Températures typiquement de -30 à +30°C
- Indices de gel: 800 à 2200°C jours
- Profondeurs de gel: 1,2 à 3 m
- Précipitations totales: 800 à 1400 mm / an
- Variations sur un vaste territoire

Choisir une station météorologique



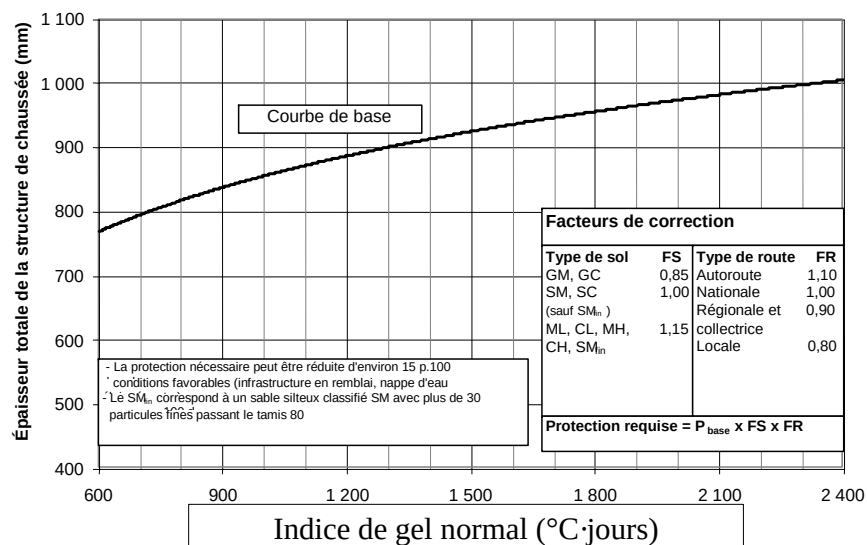
Indice de gel normal (IG_n)



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. 1.8) (Profondeur P)
 - Norme Drainage (tome II, chap. 3.5) (Profondeur de gel)
 - Mise hors gel (conduite, sol sensible, etc.)
 - Annexe TSC-04 du Guide de préparation des projets routiers

Protection contre le gel (1994)



Gel – Protection partielle (1994)

- Très 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

Protection partielle contre le gel

● Pourcentage de la profondeur du gel

Indice de gel normal (°C jour)	Locale	Autoroute
800	60 %	80 %
1200	50 %	70 %
2000	40 %	60 %

cas sur sol humide (critères de la courbe de base)

Difficile à relier avec la performance ...

Difficile de décortiquer les variations



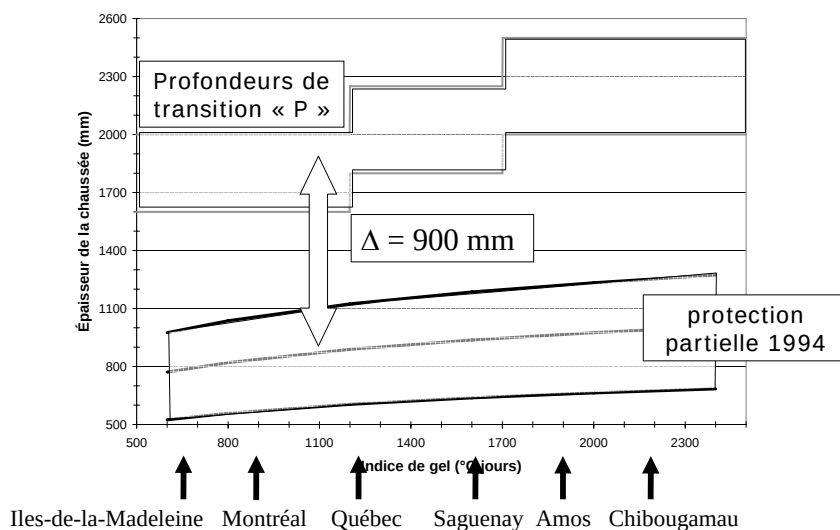
Profondeur P pour transitions

Indice de gel normal (°C jours)	Profondeur de transition « P » (m)		
	Autoroute et nationale	Régionale et collectrice	Locale
< 1200	2.0	1.8	1.6
1200 – 1700	2.25	2.0	1.8
> 1700	2.5	2.25	2.0

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



Protection partielle et profondeur P



Indicateur de performance au gel

Soulèvements différentiels



Été



Hiver



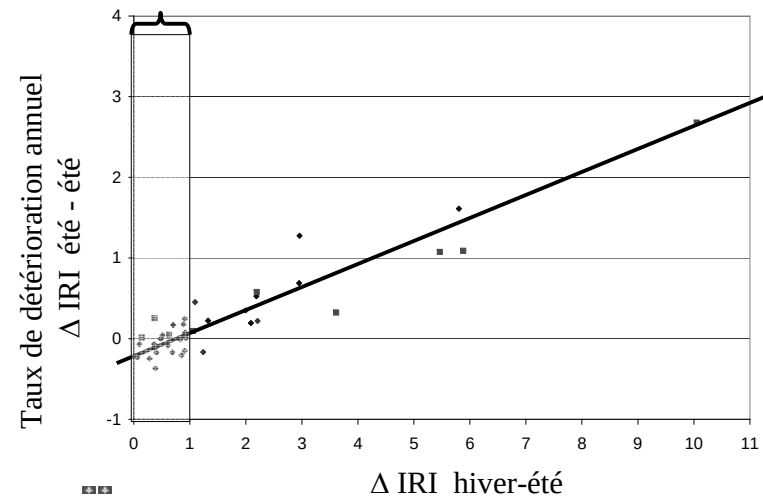
Les soulèvements au gel

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

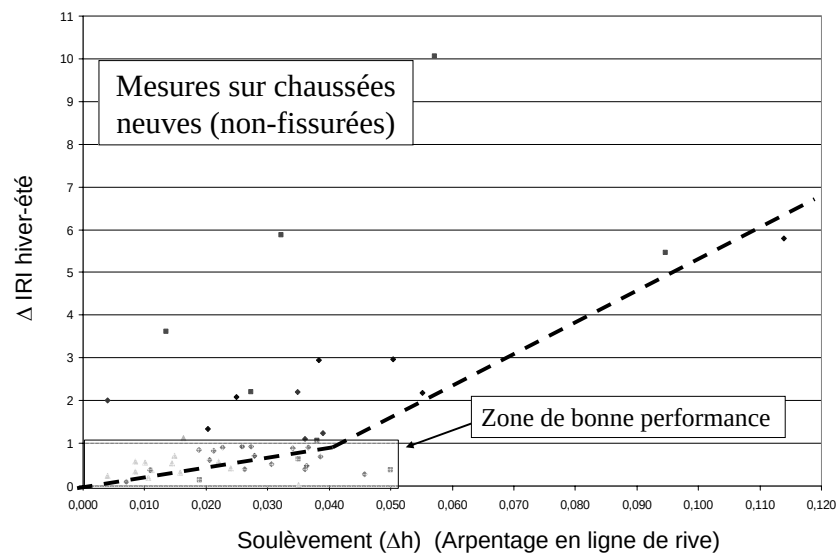


Chaussées neuves:
Seuil reconnu de bonne performance (max. 0,7 à 1)

Indicateur de performance
IRI, m/km



Soulèvement vs $\Delta IRI_{\text{hiver-été}}$



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...100 mm (Gustavson, Slunga et Saarelainen 1999)
- Expérience au SEC
– Jamais vu de problèmes avec < 50 mm
– Problèmes déjà vus avec > 80 mm

« Nouveau » critère de conception au gel

- Soulèvement (dh) prévisible maximum

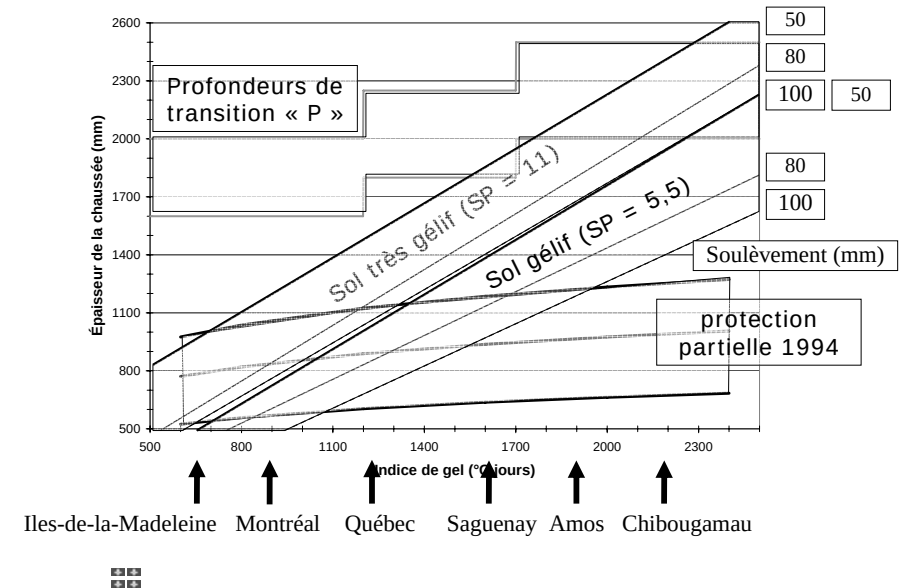
Autoroutes	< 50 mm
Nationales	< 55 mm < 50 mm lorsque DJMA = 20 000+
Régionales et collectrices	< 60 mm
Locales	< 70 mm

Seuils admis pour une probabilité de retour de 2 hivers durant la 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.



Protection partielle et profondeur P



Protection contre le gel

- Les premières méthodes incluent un bagage d'expérience important qui ne peut pas être complètement mis à l'écart.
- L'évaluation des soulèvements s'AJOUTE à la pratique actuelle 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.



Traitement du climat

Climat
Station météorologique

St-Célestin

Zone T_{BB} T_{ma} IG_n σ_{IG}

Sud 20.5 5.5 1056 218

Simulation PR IG

Hiver 1999 688

n IG_s

1.0 688

CHAUSSEE

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



www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca

Environnement Canada

English | Contactez-nous | Aide | Recherche | Site du Canada

Quoi de neuf | À notre sujet | Thèmes | Publications | Météo | Accueil

Rapport de données quotidiennes pour mars 2006

Notes sur qualité des données climatiques.

QUEBEC/JEAN LESAGE INTL
QUEBEC

Latitude: 46° 47' N Longitude: 71° 22' O Altitude: 74,10 m

Identification Climat: 701S001 Identification QMM: 71714 Identification TC: WQB

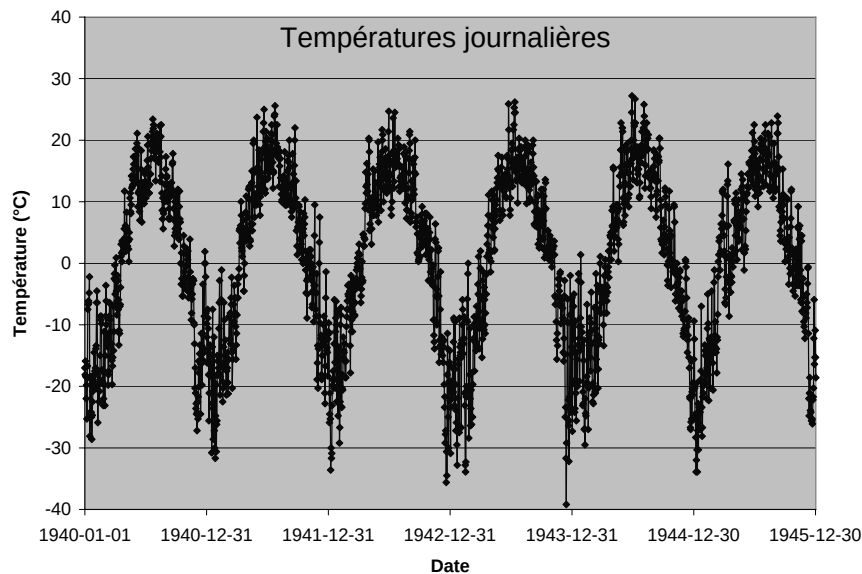
Mois: mars 2006 Aller

Précédent

Rapport de données quotidiennes pour mars, 2006

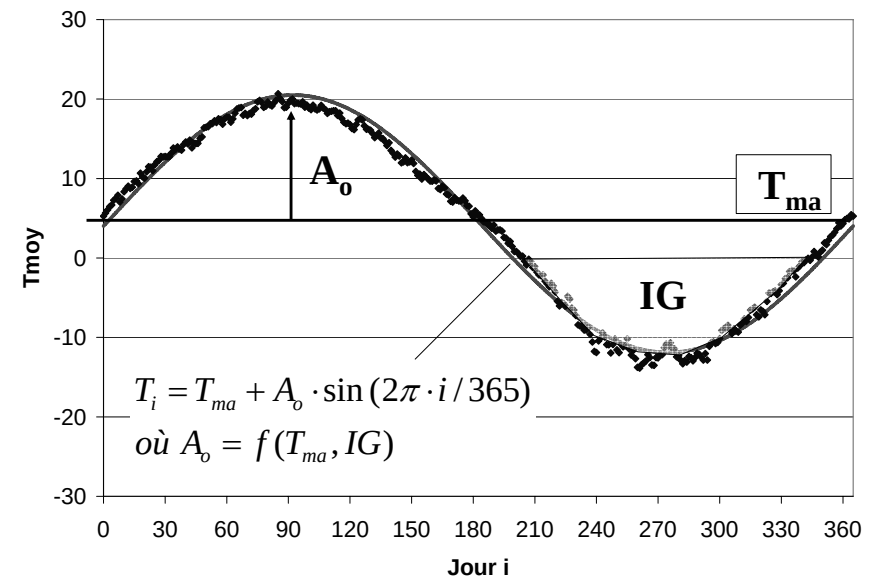
Jour	Temp. max. °C	Temp. min. °C	Temp. moy. °C	DJC °C	DJR °C	Pluie tot. mm	Neige tot. cm	Précip. tot. mm	Neige au sol cm	Dir. raf. max. 10's Deg	Vit. raf. max. km/h
01+	-11,5	-21,0	-16,3	34,3	0,0	M	2,0	1,3	66	23	37
02+	-6,1	-17,9	-12,0	30,0	0,0	0,0	1,0	3,4	68		<31
03+	-6,2	-17,3	-11,8	29,8	0,0	M	M	0,4	69	26	44
04+	0,7	-6,7	-3,0	21,0	0,0	M	M	0,0	66	34	48
05+	-1,9	-9,5	-5,7	23,7	0,0	M	M	0,0	65	24	44
06+	1,0	-7,6	-3,3	21,3	0,0	M	M	0,0	65	32	32
07+	-2,9	-12,4	-7,7	25,7	0,0	M	M	0,0	63		<31
08+	-3,0	-15,5	-9,3	27,3	0,0	M	M	0,0	64		<31
09+	-0,6	-9,5	-5,1	23,1	0,0	0,0	4,0	5,9	63	7	35
10+	4,1	-0,6	1,8	16,2	0,0	M	M	12,4	67	30	50
11+	7,0	0,8	3,9	14,1	0,0	M	M	0,0	61	30	52
12+	4,7	-3,3	0,7	17,3	0,0	M	M	2,3	58	32	37

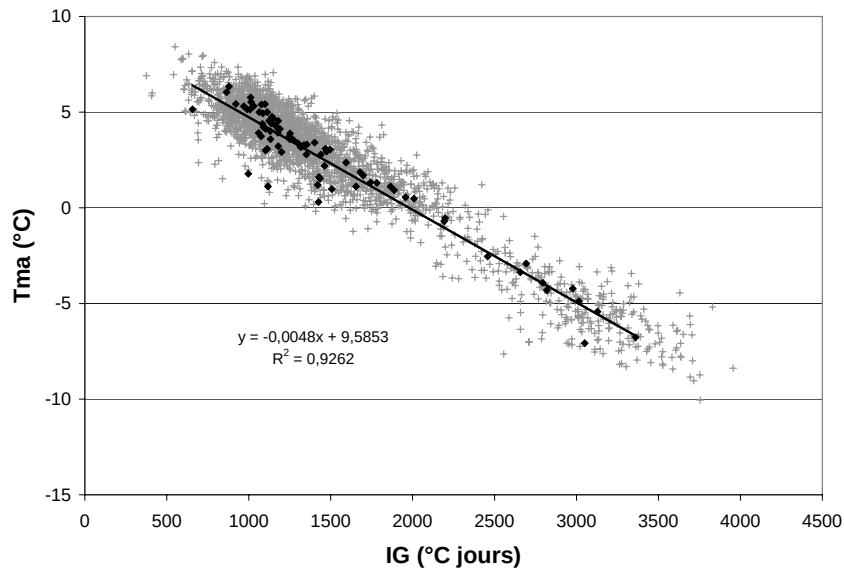
Températures atmosphérique (Amos)



Modèle sinusoidal

(Aéroport de Québec, moyennes de 1944 à 1995)





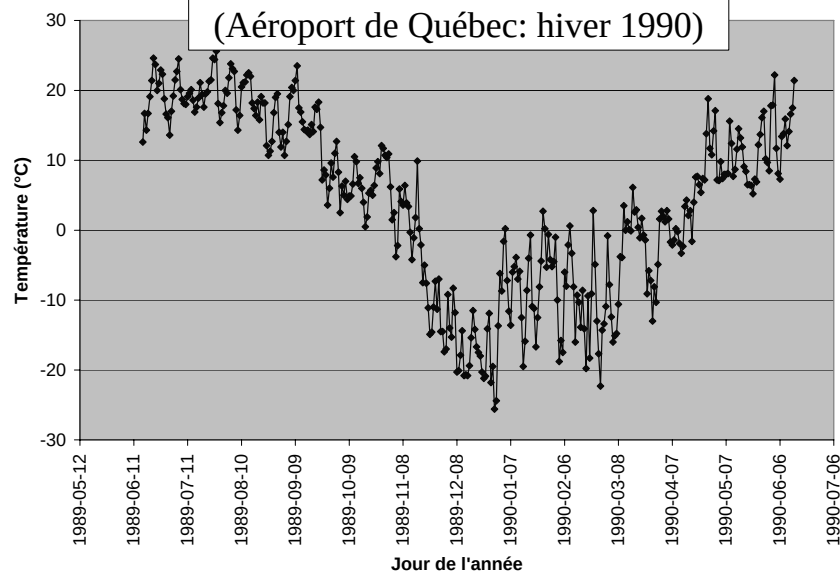
Caractérisation d'un hiver Indice de gel (IG)

- 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**.

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

Calcul d'un indice de gel (1)

(Aéroport de Québec: hiver 1990)



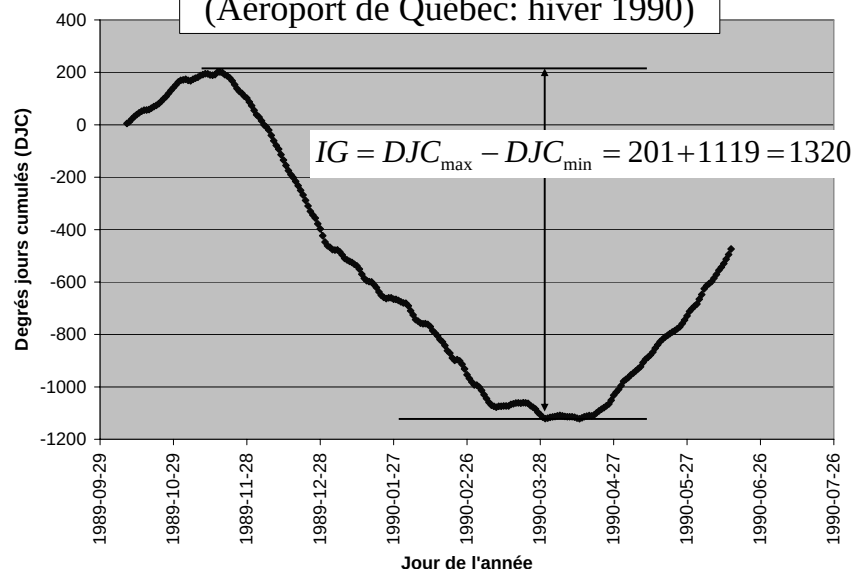
Calcul d'un indice de gel (2) Degrés-jours cumulés

	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

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

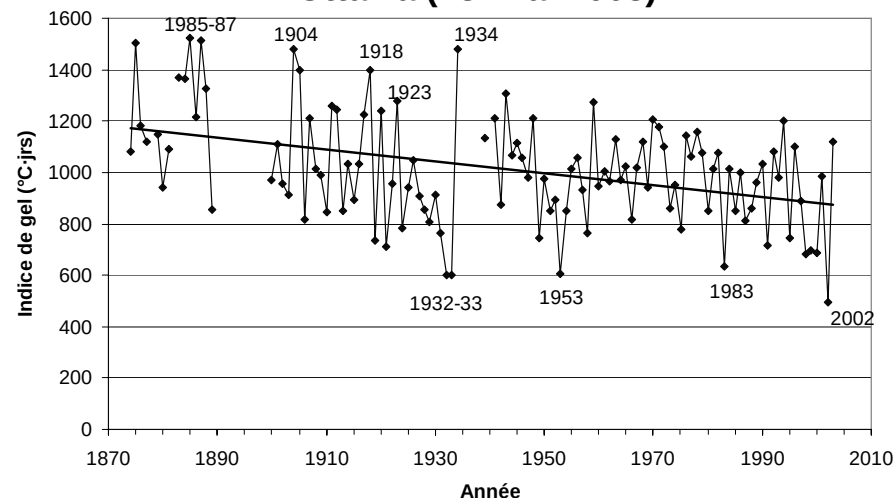
Calcul d'un indice de gel (3)

(Aéroport de Québec: hiver 1990)



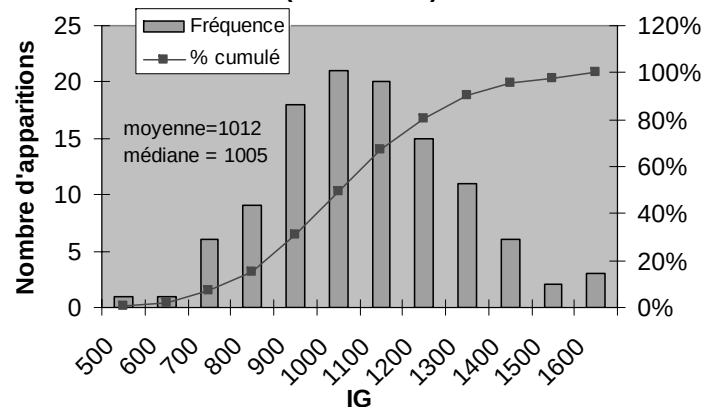
Fluctuation des indices de gel

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 _R
50	0
60	-0.253
66	-0.412
70	-0.524
75	-0.674
80	-0.841
85	-1.037
90	-1.282
91	-1.340
92	-1.405

aux 2 ans

aux 3 ans

aux 10 ans

R (%)	Z _R
93	-1.476
94	-1.555
95	-1.645
96	-1.751
97	-1.881
98	-2.054
99	-2.327
99.9	-3.090
99.99	-3.750

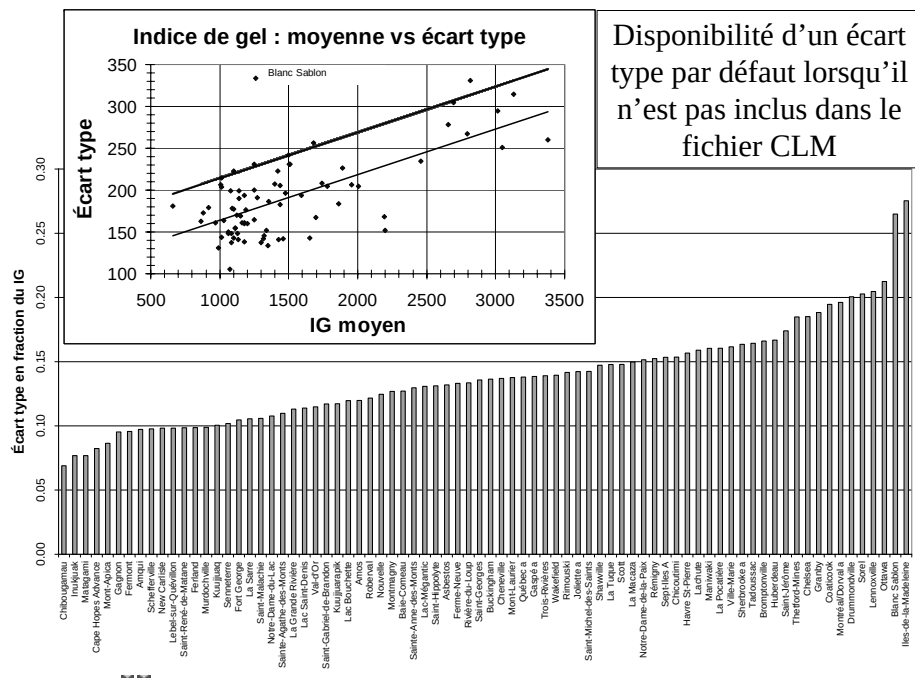
aux 20 ans

aux 100 ans

(aux 1000 ans !)

Période de récurrence (PR) => R(%)



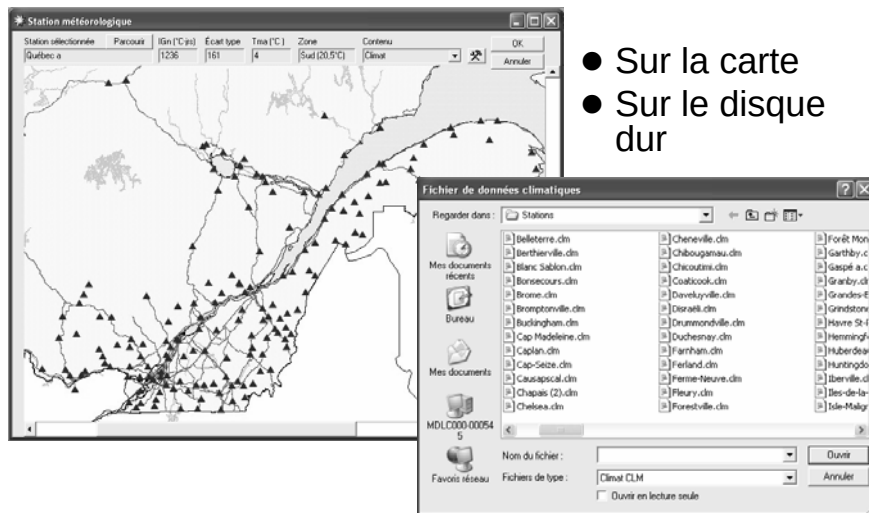


Conventions d'indices de gel

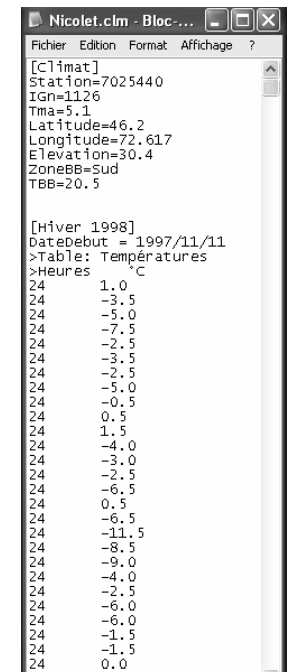
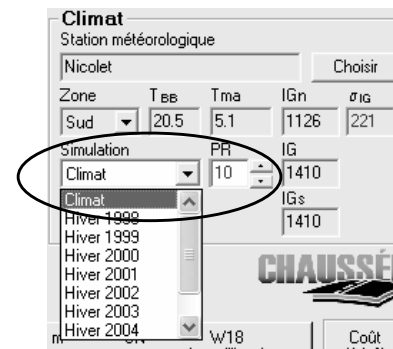
- IG_{1990} : valeur de l'hiver 1990 (hiver quelconque)
- IGN : valeur normale (moyenne)
- σ_{IG} : écart type
- IG : valeur retenue pour analyse ou conception
 - On peut choisir une approche probabiliste, la période de récurrence (PR) permet de déterminer le nombre d'écart type à ajouter au IGN
 - PR = 1 fois aux 2 ans $\rightarrow IG = IGN$
 - PR = 1 fois aux 10 ans $\rightarrow IG = IGN + 1,282 \sigma$
- IGs : valeur transmise à la surface



Choisir une station météorologique



Contrôle climatique Fichier CLM



Indice de gel à la surface (IGs)

- Les températures en surface (Ts) tendent en général à différer des températures de l'air (Ta)
- Le rapport entre l'indice de gel de la surface et l'indice de gel de l'air est appelé indice de transfert de chaleur, ou facteur n

$$n = \frac{IGs}{IG}$$



Transfert de chaleur (air - surface)

- La différence est influencée par :
 - Le taux de rayonnement solaire (longueur du jour et de la nuit, couverture nuageuse, zone ombragée)
 - Le type de surface (albedo, couleur, texture)
 - Les conditions atmosphériques (Humidité, Pollution, etc)
 - La vitesse du vent (convexion)
 - L'orientation des surfaces (nord, sud,...)
- Le facteur n varie donc avec la localisation
 - latitude, altitude proximité des plans d'eau.
- Et pour un même site, il varie d'un hiver à l'autre.



Facteur n recommandé

- À titre de valeur par défaut, les exercices de validation et d'étalonnage montrent que les meilleures prévisions du gel sont obtenues lorsqu'on pose $n = 1$.
- CHAUSSÉE 2 offre néanmoins différentes façons de modifier le facteur n.
 - (en mode approfondi)

Climat
Transfert de chaleur à la surface

☒ $IGs = n \cdot IG + 0$ ☐ $Ts = n \cdot Ta +$

n gel dégel
1.0 1.0

n 1.0 IGs 1442

CHAUSSÉE

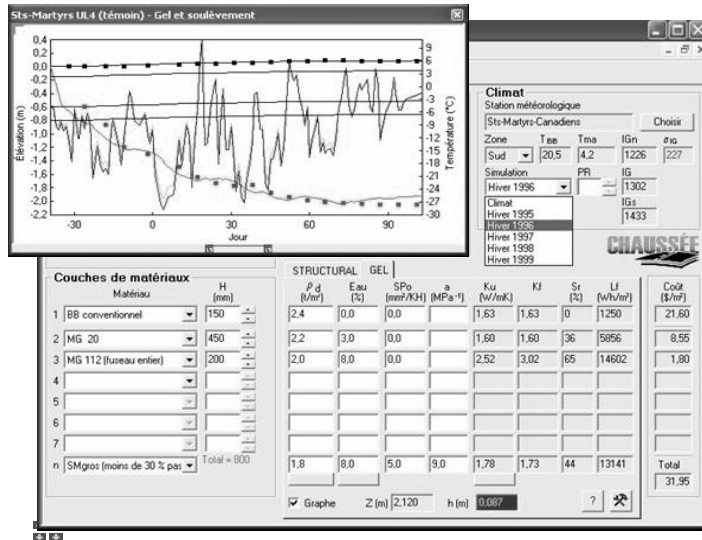


Conclusion

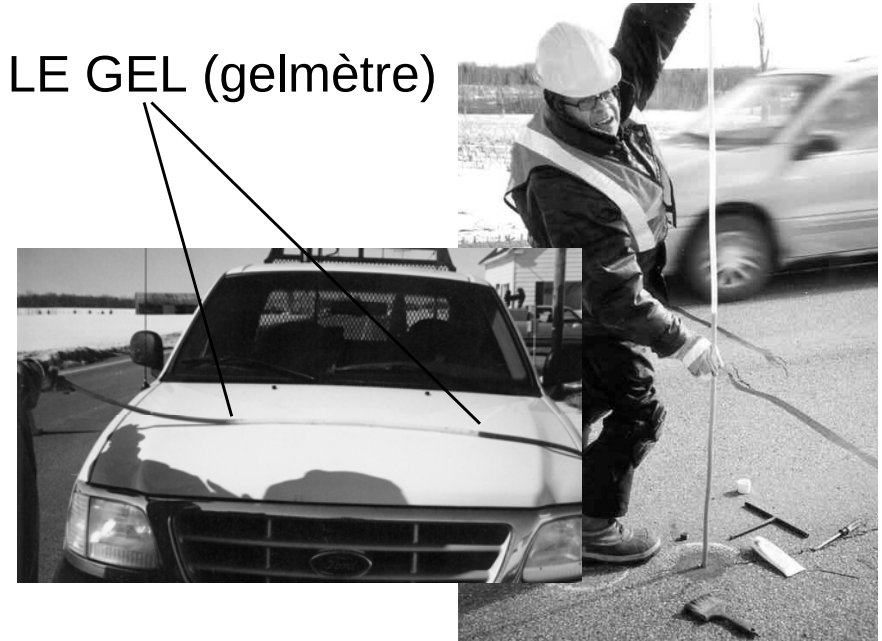
- En l'absence de données climatiques : Choisir la station météorologique la plus représentative.
 - Le logiciel propose ensuite des valeurs par défaut, incluant une période de récurrence pour fins de conception.
- Base de données climatiques.
 - Simulation du comportement pour une année donnée.



Modélisation thermique

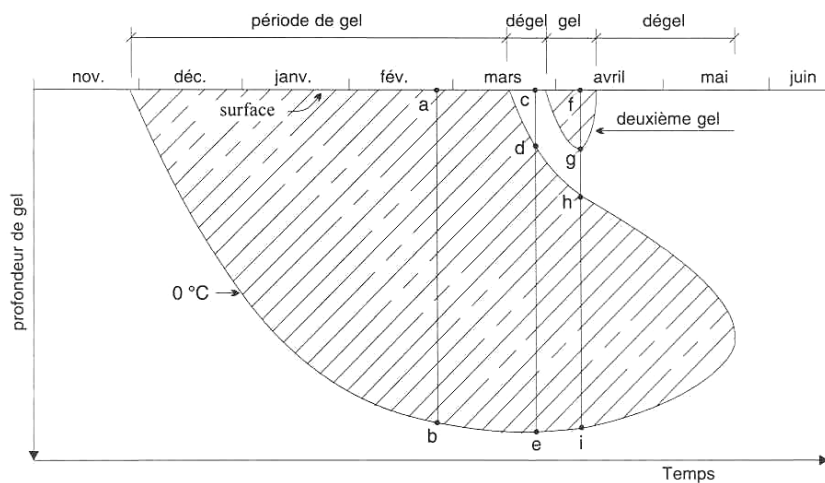


LE GEL (gelmètre)



Guide de fabrication disponible sur demande

Courbe de gel



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

Introduction

- Pour chaque segment homogène, et chaque variante envisagée, l'utilisateur doit spécifier :
 - Les objectifs de conception / type de route
 - Le climat
 - Le type de sol
 - Les matériaux constituant chaque couche
 - Les épaisseurs
- Caractéristiques des matériaux :
 - Valeurs par défaut
 - Ajustables selon les données disponibles.



Modèle de calcul (référence détaillée)

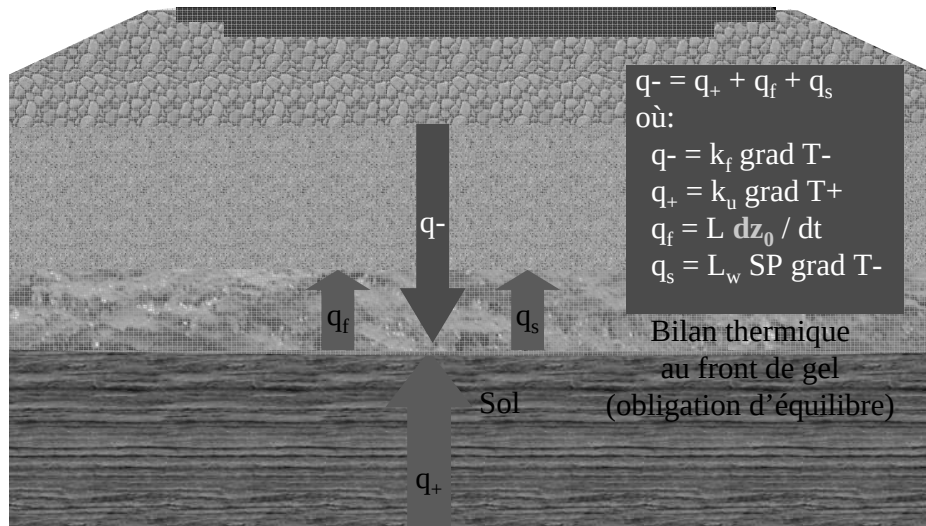
Saarelainen, Seppo (1992)

« 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.



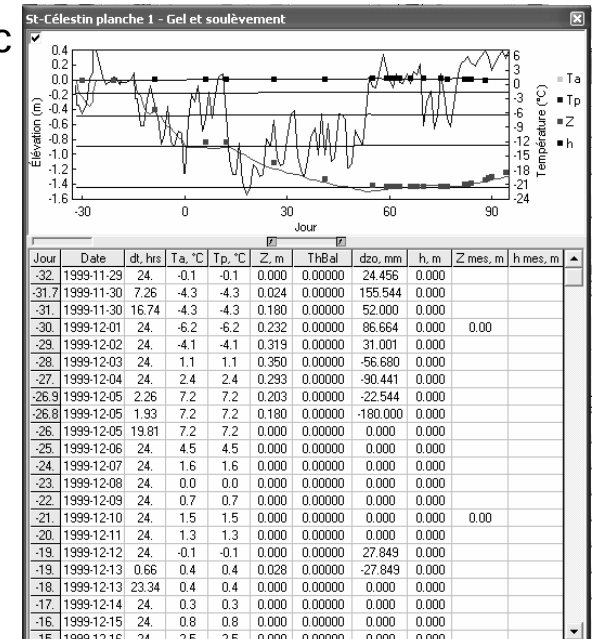
Pénétration du gel et soulèvement



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

$$dz_0 \text{ tel que } \sum q = 0$$

(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 (k_f et k_u = gelé et non-gelé)
 - Chaleur latente de fusion de l'eau (L_f)
 - eau interstitielle en changement de phase : $w_g = w - w_u$
 - eau de ségrégation (pompage pour la formation des lentilles de glace) : $\Delta V_w = SP \text{ grad } T \cdot dt$
 - (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 et
 - température du sol.

Tableau 11 : Variables et constantes associées aux constituants des matériaux

	solides	bitume	eau	glace	air
Masse volumique	ρ_s	$\rho_b = 1,02$	$\rho_w = 1$	$\rho_i = \rho_w / 1,09$	$\rho_a = 0$
Proportion	$1-n$	V_{be}	w_u	w_f	$n(1-S_r)$



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



Enthalpie

● Capacité calorifique

- Apport ou extraction de chaleur nécessaire (Joules) pour réchauffer ou refroidir 1 gramme de matière de 1°C
- Eau : $C = 4,19 \text{ J / g / } ^\circ\text{C}$
- Minéral : $C = 0,71$

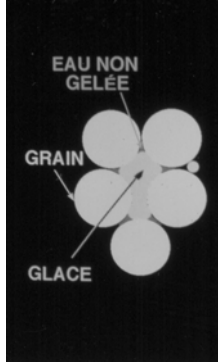
● Chaleur latente de fusion

- Apport ou extraction de chaleur nécessaire (Joules) pour fondre ou geler 1 gramme de matière
- Eau : $L = 333,55 \text{ J / g}$

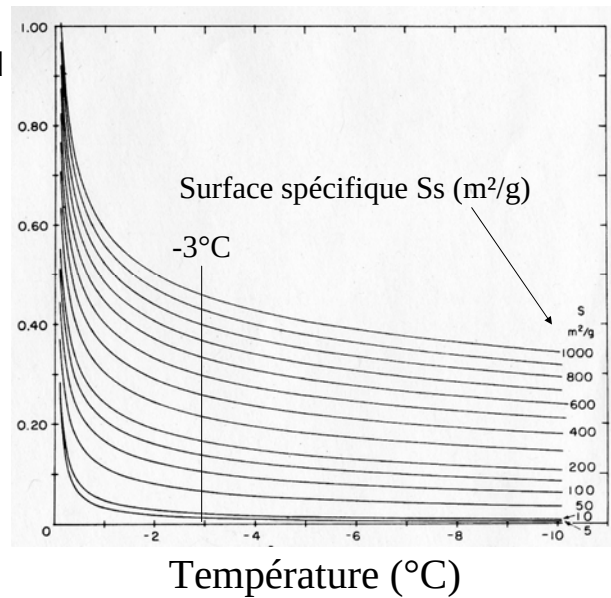


Le modèle SSR néglige la capacité calorifique, mais la chaleur latente y est un paramètre majeur.

Teneur en eau non-gelée



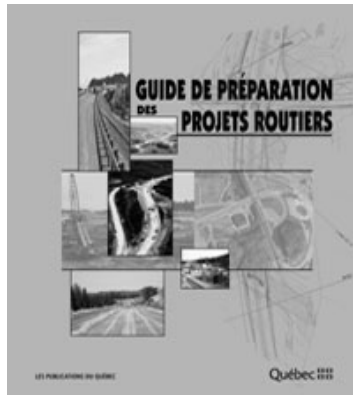
W_u



Réf.: Anderson et Tice (1972)

Dimensionnement basé sur la profondeur de gel

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



EXEMPLE DE PRODUIT DÉRIVÉ (MODÈLE THERM.)

16 mai 2003

Annexe TSC-04

Formules et abaques de conception

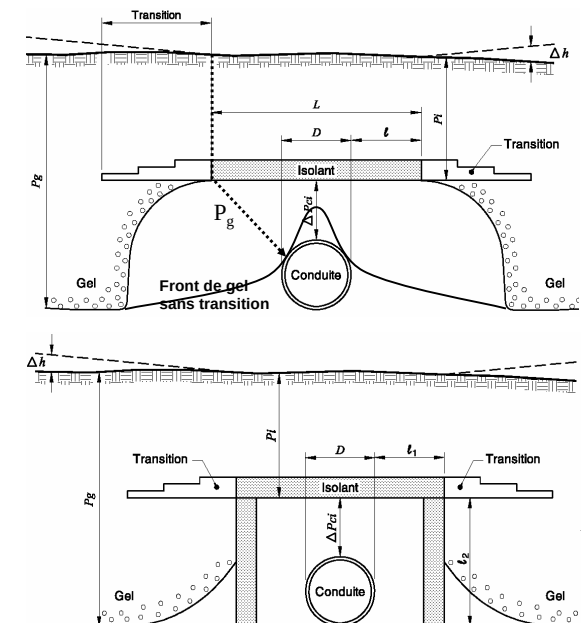
(protection totale)

TSC-04 – ISOLATION DES CHAUSSEES	04.1
1. Isolation de la chaussée	04.1
2. Isolation de conduites ou d'ouvrages sous une chaussée	04.2
2.1 Dimensionnement de l'isolation de conduite	04.2



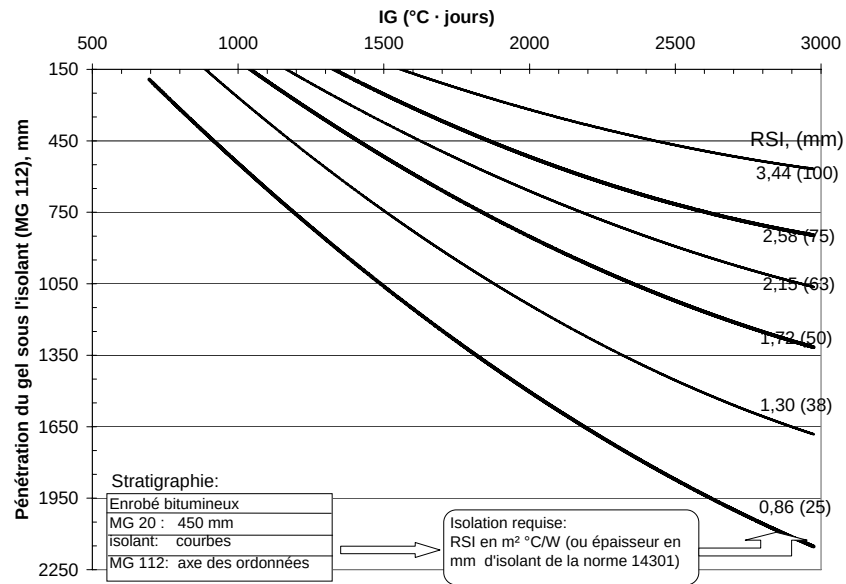
Annexe TSC-04

Isolation de conduites

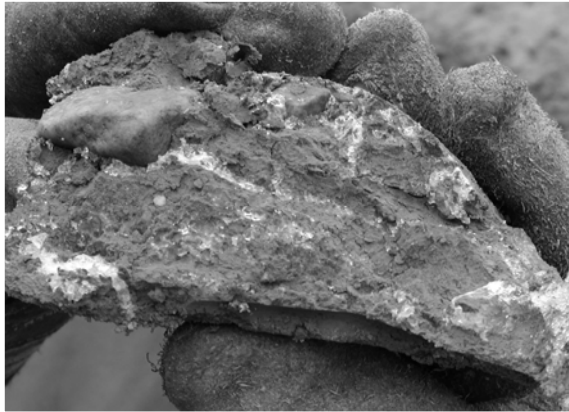


Pénétration du gel (épaisseur d'isolant)

Guide de préparation des projets routiers



Le potentiel de ségrégation (SP)



Potentiel de ségrégation (SP)

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

dh/dt = taux de soulèvement du sol (mm/h);
grad Tf = gradient thermique dans la frange gelée (°C/mm)
1,09 = Variation de volume du changement de l'eau en glace.

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



SP vs soulèvement (Δh)

$$SP * Grad T = h'$$

$$SP * Grad T = h'_i + h'_{sol}$$

$$h'_i = \Delta h / \Delta t = 0.09 n Sr (\Delta z / \Delta t)$$

$$n Sr = w \gamma_d / \gamma_w$$

$$h'_{sol} = \Delta h / \Delta t = 1.09 SP Grad T$$

$$\begin{aligned} dh &= (dhs) + (dho) \\ &= (1,09 SP grad T \cdot dt) + (0,09 dz_0 w \gamma_d / \gamma_w) \end{aligned}$$



Soulèvement au gel $h = \sum (dho + dhs)$

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



Gélinivité des sols

- Sol non gélinif (ex : MG20, MG112)
 - Gèle en bloc
 - Peu de variation de la teneur en eau
 - Gonflement léger
- Sol gélinif (ML, CL, SC etc..)
 - Formation de lentilles de glace
 - Augmentation de la teneur en eau
 - Gonflement élevé (jusqu 'à 20 cm et +)



Facteurs affectant la gélinivité (SP)

- Dépend de : granulométrie (% de fines, uniformité), minéralogie des fines, indice des vides, surcharge appliquée (profondeur), ...
 - Uniformité $C_u \uparrow \rightarrow SP \uparrow$ $C_u = d_{60} / d_{10}$
 - Fines $< 80\mu m \uparrow \rightarrow SP \uparrow$
 - Argile $< 2\mu m \uparrow \rightarrow SP \downarrow$
 - Capillarité $\uparrow \rightarrow SP \uparrow$
 - Perméabilité $\uparrow \rightarrow SP \uparrow$
 - Surcharge $\sigma \uparrow \rightarrow SP \downarrow$ $SP = SP_0 \cdot e^{-a \cdot \sigma}$



Détermination de la gélinivité (SP)

- Ordre 1 : Mesure directe ou indirecte
 - A) Essai de congélation en laboratoire (LC 22-335)
 - B) Mesures in situ (Z et h)
(Étalonner modèle par calcul inverse)
- Ordre 2 : Corrélation empirique
 - A) Sédimentométrie, surface spécifique et w/w_L
(Konrad 2005)
 - B) Sédimentométrie et w_L
(Rieke 1983 et Knutsson 1985)
- Ordre 3 : Appréciation qualitative
 - Granulométrie et classification des sols

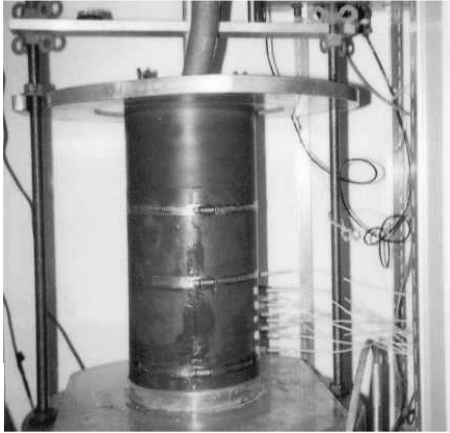


Essai de congélation

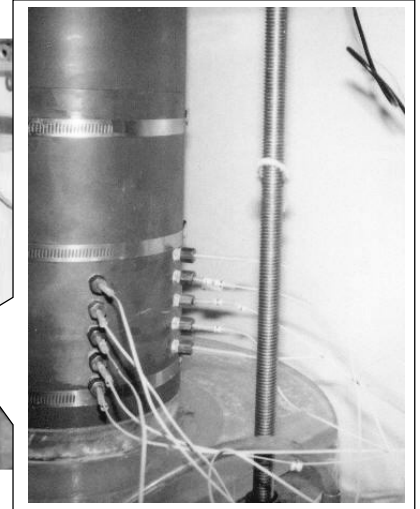
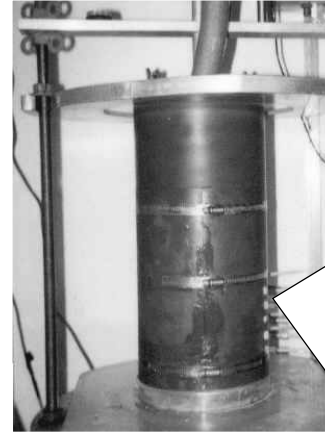
- Laboratoire central (LC 22-335)
 - Échantillon de sol non-remanié ou reconditionné
 - Gradient thermique constant
 - Alimentation en eau
 - Peut imposer une surcharge
- Résultats = SP_0 (ou SP)
 - Délai d'une semaine (SMI)



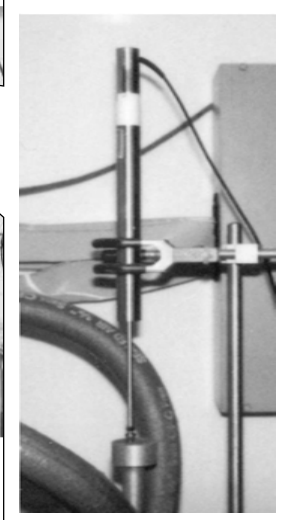
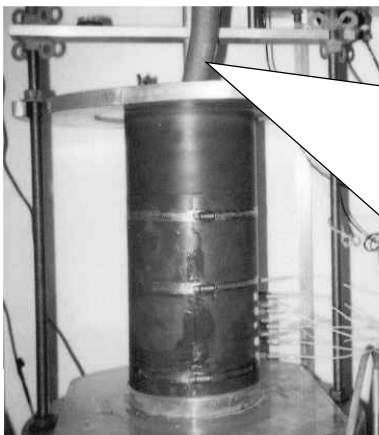
Cellule de gel



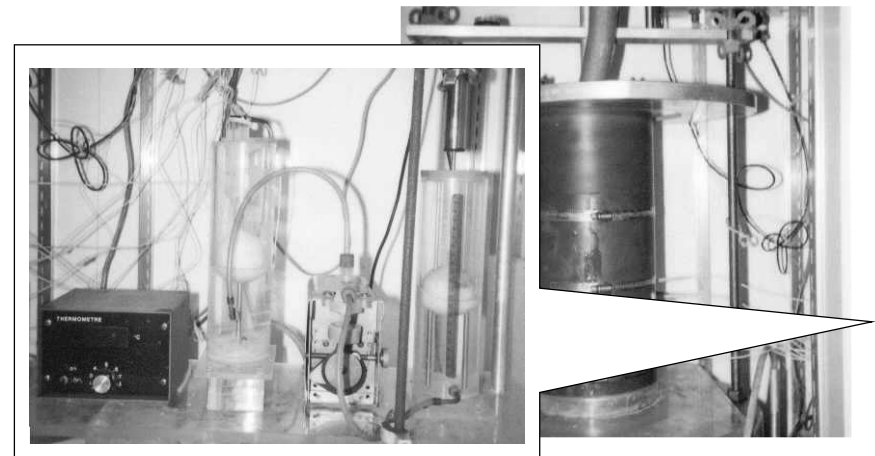
Cellule de gel



Cellule de gel



Cellule de gel



Effet de la surcharge

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

La prise en compte de ce phénomène nous amène à décomposer la gélivité SP en deux composantes tels que :

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

- Avec :
 - SP_0 = gélivité sans surcharge
 - a = coefficient de sensibilité à la surcharge (1/MPa)
 - σ est la pression opposée au soulèvement (MPa)



Estimation SP : Corrélation empirique

- Requiert des sondages (échantillonnage) :
 - Granulométrie + Sédimentométrie (ASTM D422)
 - Limites d'Atterberg (CAN/BNQ 2501-092-M-86)
 - Teneur en eau
- Analyse complémentaire possible avec :
 - Bleu de méthylène (norme BNQ-2560-255) sur la fraction passant au tamis de 400µm;



Exercice: Évaluation SP !

Objectifs

Type de route: Nationale

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

Années: 30, ÉCAS (millions): 23.4

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Saint-Jérôme

Zone: Sud, T_{BB}: 20.5, T_{ma}: 5.0, IG_n: 1142, σ_{IG}: 199

Simulation: PR, IG: 1440

n: 1.0, IG_s: 1440

Sol support

7 CL avec I_p ≤ 12 (IL < 0.9) Total = 1590

5 CL avec I_p ≤ 12 (IL < 0.9) Total = 1590

Reinitialiser les matériaux

Graphique Z (m): 1.954 h (m): 0.054



Couches de matériaux

Matériau	ρ _d (t/m ³)	Eau (%)	SP ₀ (mm/KH)	a (MPa ⁻¹)	K _u (W/mK)	K _f	S _r (%)	L _f (W/h/m ²)	Coût (\$/m ²)
1 BB HRO	215								30.32
2 MG 20	250								4.75
3 MG 112 (fuseau entier)	1125								10.13
4									
5									
6									
7									
8 CL avec I _p ≤ 12 (IL < 0.9)	1.3	40.0	5.0	10.0	1.26	2.29	99	42265	45.19

Reinitialiser les matériaux

Graphique Z (m): 1.954 h (m): 0.054

Estimation SP

- Sol argileux : CL-ML
- Teneur en eau : 19 %
- D_{50} (fraction fine) : 13 μm
- VB : 0.46
- % 400 μm : 97%
- % 80 μm : 90.2%
- % 2 μm : 6.5%
- WL : 27%



Question ?

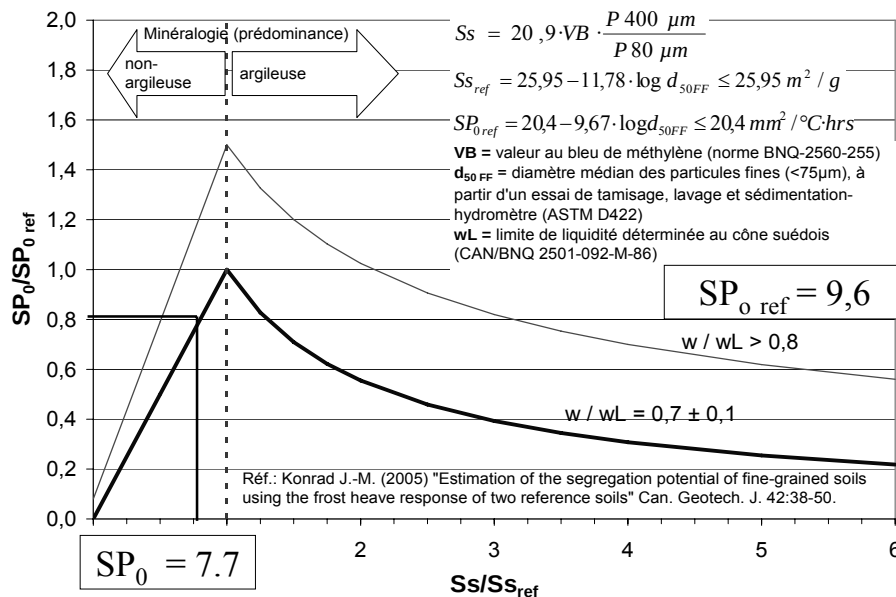
- Quel est le SP_0 du sol argileux CL ?
- Déterminer le paramètre de surcharge
« a »

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

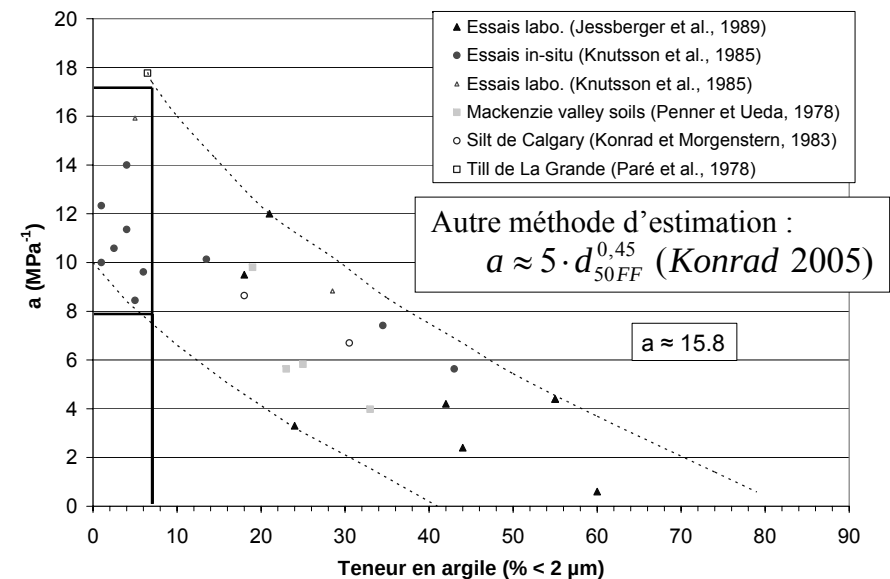
- Quel est l'impact sur le dimensionnement ?



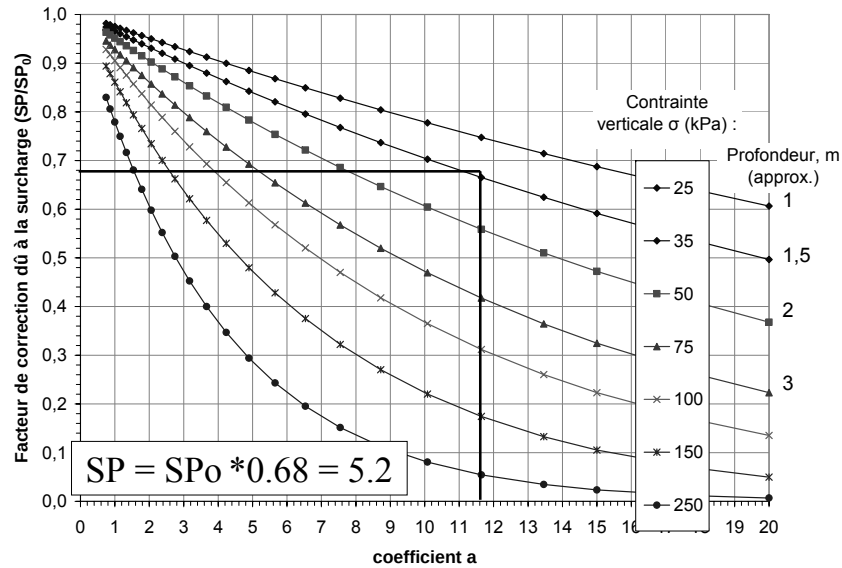
Estimation indirecte du SP_0 des fines



Coefficient de surcharge (a)



Effet du coefficient de surcharge



Question ?

Objectifs

Type de route: Nationale

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

Années: 30 ÉCAS (millions): 23.4

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Saint-Jérôme

Zone: Sud T_{BB}: 20.5 T_{ma}: 5.0 I_{Gn}: 1142 σ_{IG} : 199

Simulation: Climat PR IG

n: 1.0 IG_s: 1440

Sol support

7

CL avec $I_p \leq 12$ (IL < 0.9) Total = 1590

Réinitialiser les matériaux

☐ Graphes Z (m) 1.954 h (m)

ρ_d (t/m ³)	Eau (%)	SP ₀ (mm ² /KH)	a (MPa ⁻¹)
1.3	40.0	5.0	10.0

CHAUSSEE - [Design par défaut]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

Objectifs

Type de route: Nationale

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

Années: 30 ÉCAS (millions): 23.4

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Saint-Jérôme

Zone: Sud T_{BB}: 20.5 T_{ma}: 5.0 I_{Gn}: 1142 σ_{IG} : 199

Simulation: Climat PR IG

n: 1.0 IG_s: 1440

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)
1 BB HRO	215
2 MG 20	250
3 MG 112 (fuseau entier)	1125
4	
5	
6	
7	
8 CL avec $I_p \leq 12$ (IL < 0.9)	

Total = 1590

Réinitialiser les matériaux

STRUCTURAL GEL GEL (1994)

ρ_d (t/m ³)	Eau (%)	SP ₀ (mm ² /KH)	a (MPa ⁻¹)	K _u (W/mK)	K _f	S _r (%)	L _f (W/h/m ²)	Coût (\$/m ²)
2.35	0.0	0.0		1.48	1.48	0	1250	30.32
2.2	4.0	0.0		1.77	1.89	52	7897	4.75
1.92	8.0	0.0		2.10	2.49	56	14018	10.13
1.3	40.0	5.0	10.0	1.26	2.29	99	42265	
Total								45.19

☐ Graphes Z (m) 1.954 h (m) 0.054

CHAUSSEE - [Essai labo 1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

Objectifs

Type de route: Nationale

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

Années: 30 ÉCAS (millions): 23.4

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Saint-Jérôme

Zone: Sud T_{BB}: 20.5 T_{ma}: 5.0 I_{Gn}: 1142 σ_{IG} : 199

Simulation: Climat PR IG

n: 1.0 IG_s: 1440

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)
1 BB HRO	215
2 MG 20	250
3 MG 112 (fuseau entier)	1125
4	
5	
6	
7	
8 CL avec $I_p \leq 12$ (IL < 0.9)	

Total = 1590

Réinitialiser les matériaux

STRUCTURAL GEL GEL (1994)

ρ_d (t/m ³)	Eau (%)	SP ₀ (mm ² /KH)	a (MPa ⁻¹)	K _u (W/mK)	K _f	S _r (%)	L _f (W/h/m ²)	Coût (\$/m ²)
2.35	0.0	0.0		1.48	1.48	0	1250	30.32
2.2	4.0	0.0		1.77	1.89	52	7897	4.75
1.92	8.0	0.0		2.10	2.49	56	14018	10.13
1.3	19.0	7.7	15.0	0.86	1.10	47	16937	
Total								48.79

☐ Graphes Z (m) 2.243 h (m) 0.054

Calcul à rebours à partir d'observations in situ

- Données requise
 - Chaussée, ou sol, existant
 - Suivi du gel durant au moins un hiver
 - Mesures de la profondeur de gel (Z) : GELMÈTRE
 - Mesure des soulèvements (h) : NIVELLEMENT
 - Températures atmosphériques (site web env. Canada)
 - Logiciel CHAUSSÉE 2
- Méthodologie
 - Entrer les données (stratigraphie, température, Igel)
 - Ajuster les paramètres manquants (SP, w) de façon à faire coïncider les mesures (soulèvements et gel) avec les résultats de la simulation (Z et h)
 - Le modèle étalonné permet d'évaluer le comportement au gel de la chaussée suite à divers types de travaux (rehaussement, isolation, hivers plus rigoureux etc...)

The screenshot shows the CHAUSSÉE 2 software interface. Key sections include:

- Segment homogène:** A list of materials with their thicknesses (H in mm). Materials 1, 2, 3, and 4 are circled: BB HRO (215 mm), MG 20 (450 mm), Polystyrène extrudé (25 mm), and MG 112 (fuseau entier) (675 mm).
- Objectifs:** Type de route (Nationale), Classe de trafic (entre 5000 et 20000), Années ECAS (30, 23.4), BB reporté à l'an prochain (0 mm).
- Climat:** Station météorologique (Saint-Jérôme), Zone (Sud), T_{ee} (20.5), T_{ma} (5.0), I_{Gn} (1142), σ_{IG} (199), Simulation (PR), Climat (15), I_G (1440), n (1.0), I_{Gs} (1440).
- STRUCTURAL GEL (1994):** A table of material properties including ρ_d (t/m³), Eau (%), SP_o (mm²/KH), a (MPa·°C), Ku (W/mK), Kf, Sr (%), Lf (Wh/m²), and Coût (\$/m²). The bottom row is circled: 1.3, 19.0, 7.7, 15.0, 0.86, 1.10, 47, 16937, 47.92.
- Graphes:** Z (m) 1.309, h (m) 0.053.

Calcul à rebours

The screenshot shows the CHAUSSÉE 2 software interface. Key sections include:

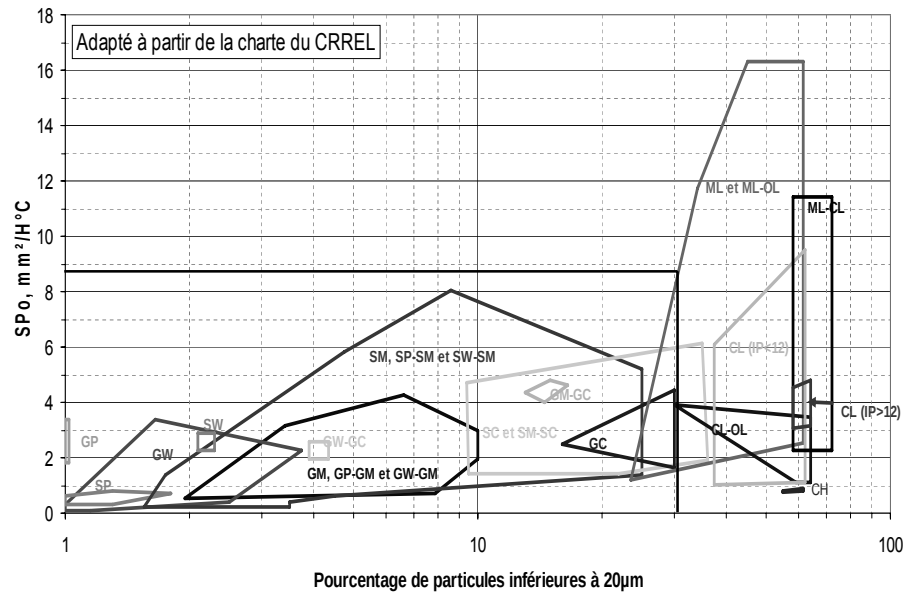
- Segment homogène:** A list of materials with their thicknesses (H in mm). Materials 1, 2, 3, and 4 are circled: BB (120 mm), MG 20 (200 mm), MG 112 (fuseau entier) (675 mm), and SC grossier (moins de 30 %) (300 mm).
- Objectifs:** Type de route (Nationale), Classe de trafic (entre 5000 et 20000), Années ECAS (30, 20.0), BB reporté à l'an prochain (0 mm).
- Climat:** Station météorologique (Sainte-Anne-de-la-Pérade), Zone (Sud), T_{ee} (20.5), T_{ma} (4.2), I_{Gn} (1252), σ_{IG} (228), Simulation (PR), Climat (2), I_G (1252), n (1.0), I_{Gs} (1252).
- STRUCTURAL GEL (1994):** A table of material properties including ρ_d (t/m³), Eau (%), SP_o (mm²/KH), a (MPa·°C), Ku (W/mK), Kf, Sr (%), Lf (Wh/m²), and Coût (\$/m²). The bottom row is circled: 1.3, 37.0, 5.3, 10.0, 1.21, 2.11, 91, 38647, 28.90.
- Graphes:** Z (m) 1.733, h (m) 0.070.

Échelle de gélivité (SP)

Gélivité	SP mm²/°C·heure
Négligeable	< 0,5
Faible	0,5 à 1,5
Moyenne	1,5 à 3
Élevée	3 à 8
Très élevée	> 8

Les sols avec $I_L > 0,9$ sont de gélivité extrême ($\approx 16-20$) et peuvent tasser de 50% au dégel

Charte CRREL convertie pour SP_0



Sols avec $I_L > 0,9$

- Sols cohérents gorgés d'eau qui n'ont jamais subi de gel depuis leur déposition initiale.
- Fréquent au Québec dans les déblais argileux, sous la croûte de surface.
 - Premier gel = Δh important ($SP_0 \approx 16-20$)
 - Premier Dégel = tassement important
 - $\approx 30\%$ sous 25 kPa
 - IL diminue $\rightarrow$ devient $IL \approx 0,73 \cdot (IL_{initial} - 0,5)$
 - SP diminue lors des cycles suivants



SP : Points importants

- Pour les sols « gélifs »
 - Évaluer les propriétés in-situ
 - S'assurer de la représentativité de l'échantillon
 - Horizon susceptible de geler
 - Teneur en eau
 - Évaluer les effets sur le dimensionnement en comparant avec les valeurs par défaut.

Les étapes de dimensionnement



1^{er} étape

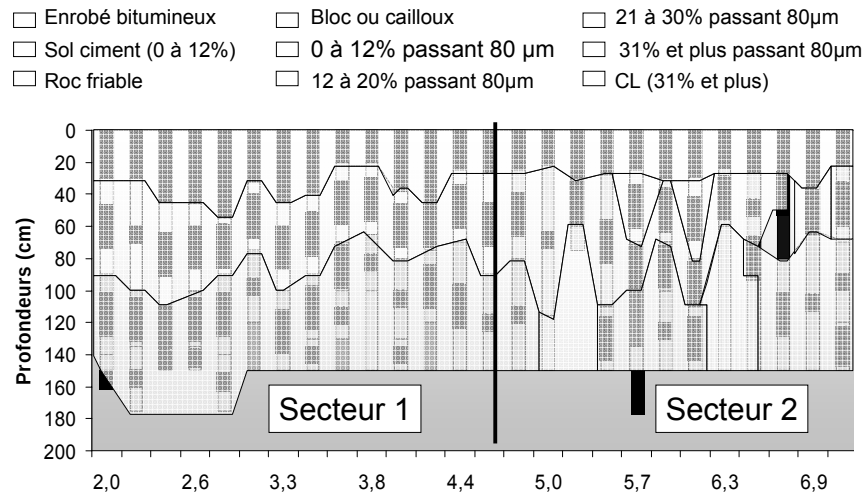
■ Segmenter en secteurs homogènes

– La route est en 3-D

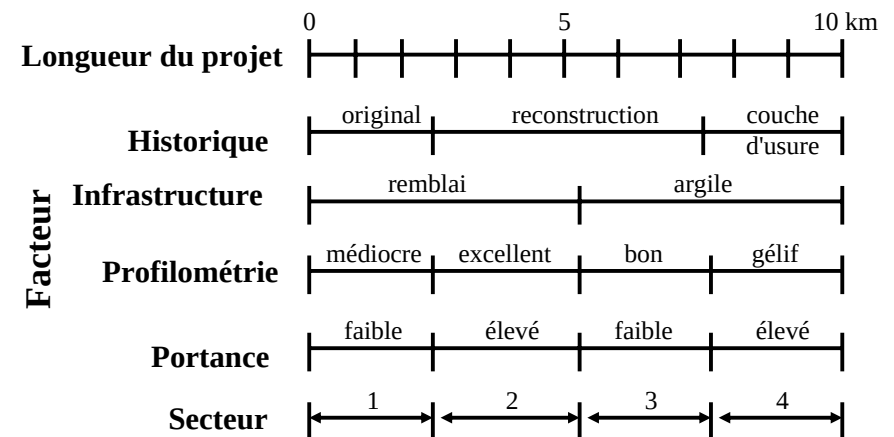
- Profondeur
- Longueur
- Largeur

– Le logiciel est en 1-D (profondeur)...faire autant de calculs que nécessaire pour couvrir la variabilité dans les 2 autres dimensions

Segmentation en regard des sondages



Segmentation : exemple



2^e étape

■ Objectifs de conception

- Choisir le type de route et la classe de DJMA
- 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)

3^e étape

■ Couches de matériaux

- Sélectionner d'abord 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 permis de subdiviser le sol d'infrastructure en plusieurs couches (croûte, zone non-saturée et saturée, etc.)

4^e 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

5^e 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: $S_r = 100\%$
 - Éteindre les lumières oranges
- Ajuster la conductivité Ks en fonction de la minéralogie des matériaux, si requis
- 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

6^e étape

■ Variantes de conception

- Produire une feuille de calcul par segment homogène
 - Retenir des conditions jugées sécuritaires et raisonnables à l'intérieur de chaque segment
- Vérifier les diverses variantes admissibles pour le projet
 - Avec ou sans recyclage, avec ou sans stabilisation, etc.
- Sauvegarder et imprimer les scénarios retenus

Durée de vie des chaussées



Définitions

- Durée de vie: Période au terme de laquelle un renforcement structurel devient nécessaire.
- Dimensionnement: Détermination des couches (caractéristiques mécaniques et thermiques, épaisseur) à mettre en œuvre pour rencontrer les objectifs de performance

Limitation à l'augmentation de la durée de vie des chaussées

- Le climat a été longtemps évoqué comme un frein à l'augmentation des durées de vie:
 - Fissuration thermique
 - Soulèvements au gel

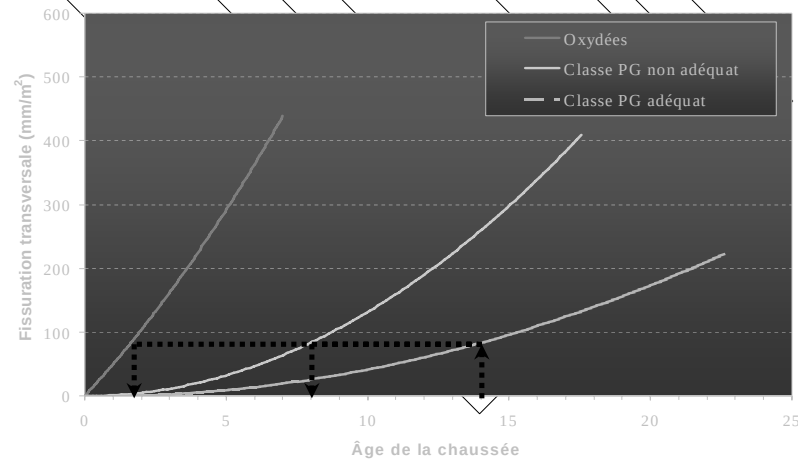
On intervient plus rapidement sur les routes pour des raisons climatiques que structurelles...

Évolutions des pratiques

- Liants bitumineux (classe PG)
- Nouveaux enrobés (méthode LC)
- Méthode de dimensionnement (logiciel Chaussée)
 - Mécanique
 - Thermique

Comportement des chaussées

Fissuration de retrait thermique (transversale)



Prolongement des durées de vies (nouvelle route, isolation, décohesionnement, conc. dalle)

Route	DJMA	V 1.2	V 2.0
Autoroute	tout	20 ans	30 ans
Nationale	> 5000	20 ans	30 ans
	< 5000	15 ans	25 ans
Régionale	tout	15 ans	25 ans
Collectrice	tout	15 ans	25 ans
Locale	tout	15 ans	25 ans

Considérations supplémentaires sur la durée de vie

- La durée de vie doit cependant être revue à la baisse dans les cas suivants:
 - Enrobé recyclé à froid: 20 ans (avec $n_f/f > 2$)
 - Resurfaçage d'un revêtement fissuré: 10-15 ans (+ 5 ans avec CAF ou ERF)
 - Milieu urbain où les services souterrains peuvent nécessiter des interventions
- Chaussée 2 contient des notes d'information sur la durée de vie des interventions

Chaussée - [Projet14]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

Objectifs
Type de route
Classe de trafic (DJMA projeté)
Années ECAS (millions)
BB reporté à l'an prochain : 0 mm

Climat
Station météorologique
Zone T_{BB} T_{ma} IG_n σ_{ig}
Simulation PR IG IG_s

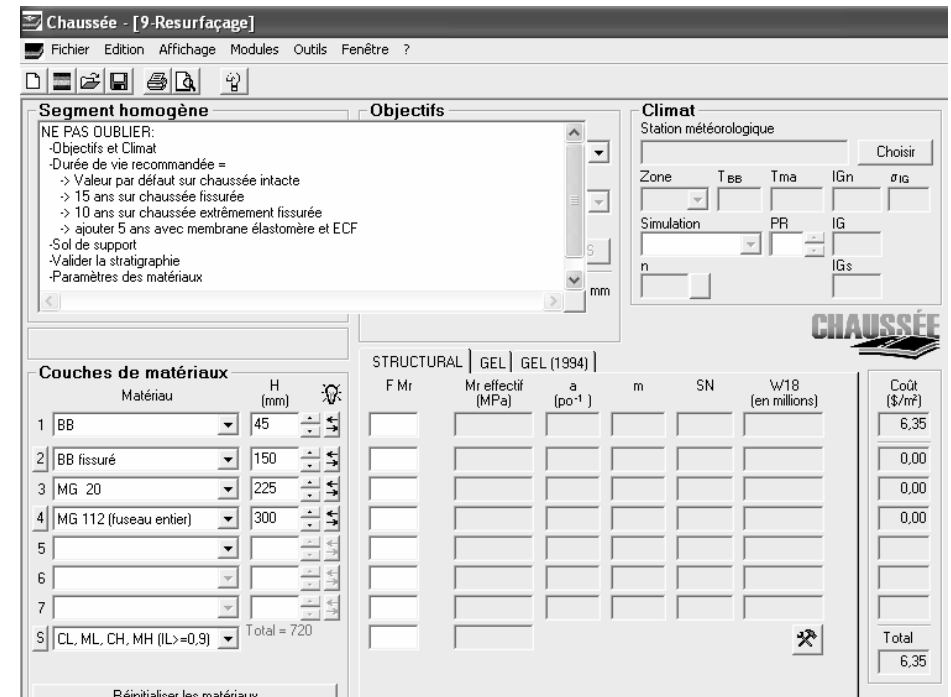
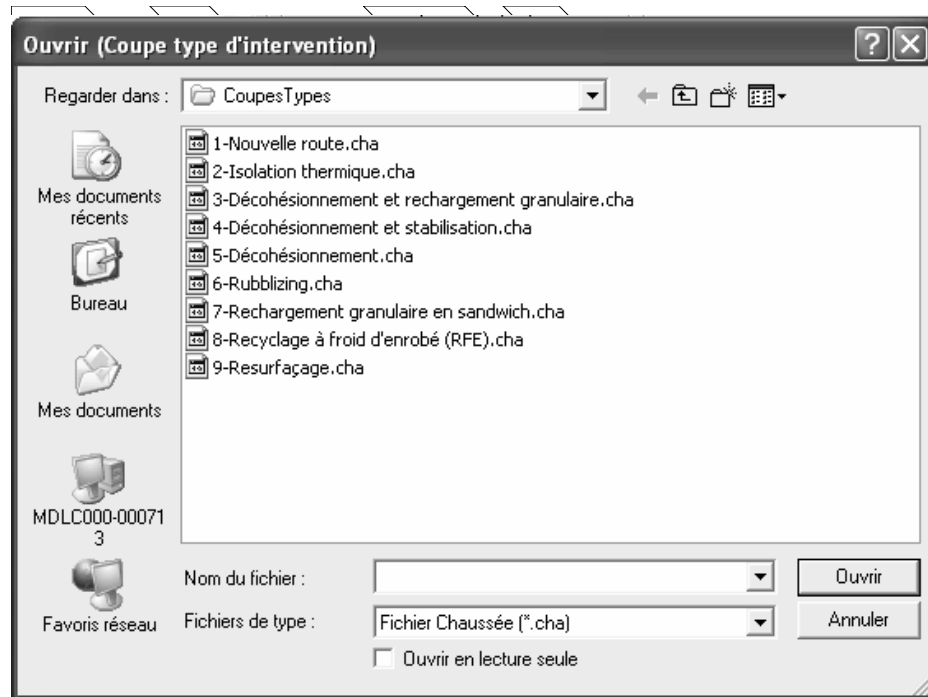
Couches de matériaux

Matériau	H (mm)	F Mr	Mr effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m	SN	W18 (en millions)	Coût (\$/m²)
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

Réinitialiser les matériaux

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

Total



Dimensionnement de chaussées

- Prendre conscience qu'on n'est pas limité au point de vue technique pour dimensionner un ouvrage pour 5, 20, 40 ans, etc en autant de prendre en considération les variables
 - Trafic
 - Climat
 - Sols
 - Matériaux

de la suite dans les idées...

- Chaussée à longue durée de vie
 - ➔ viser 40 années ou plus sans bris « structural » majeur
 - Fondations parfaitement stables
 - Revêtement bitumineux minimum de 200 mm (en général)
 - Couche de surface (35 à 75 mm) à renouveler aux 20 ans
- Chaussée « perpétuelle »
 - ➔ chaussée à longue durée de vie conçue de façon à limiter les déformations mécaniques en dessous du seuils d'endommagement des matériaux :
 - BB ➔ élongation < 65 $\mu\epsilon$
 - matériaux non-liés ➔ compression < 200 $\mu\epsilon$
 - Revêtement bitumineux minimum de 320 mm (en général)

Conception des structures de chaussées 3 composantes essentielles ...

Contexte québécois:



3:

RETRAIT THERM.

Fissures transversales

💡 Rev (bitume, épaisseur)

2:

STRUCTURAL

Fissures de fatigue et ornières

💡 Rev + fondations (épaisseurs, type)

1:

GEL

Soulèvements différentiels et lézardes

💡 Sous-fondation ou isolation (épaisseur, type)

Norme DJMA < 5000

- Modifications à apporter
 - Mécanique: 15 => 25 ans
 - Thermique: gel 1994 => SSR
- Période de transition
- Orientation



Exemple

- Autoroute à 4 voies (2 par direction)
- Dimensionnement pour 36 millions d'ECAS
 - DJMA = 25 000
 - 15 % de camions
 - Coefficient d'agressivité moyen = 2.0
 - Accroissement de 2 % / an
- Endroit : La Prairie
- Sol support : argile très plastique (CH) ($I_L < 0,9$)



Exemple (ECAS)



Exemple



Exemple (Variante)



Exemple (provision pour délai de parachèvement)

Chaussée - [Exemple 1]

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

Objectifs
Type de route: Autoroute
Classe de trafic (DJMA projeté): supérieure 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_{es}: 20.5 T_{ma}: 6.5 I_{Gn}: 901 σ_{10} : 209
Simulation: Climat PR: 15 IG: 1215
n: 1.0 IGs: 1215

Revêtement à haute résistance à l'ornièrage requis

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)
1 BB HRO et BAF	260
2 MG 20	275
3 MG 112 (fuseau entier)	1100
4	
5	
6	
7	
8 CH (IL < 0.9)	

Total = 1635

Réinitialiser les matériaux

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

F	M _r	M _r effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m	SN	W18 (en millions)	Coût (\$/m ²)
1.00	4021	0.49	1.0	5.03	41.002		37.88
1.00	110	0.07	0.8	5.63	36.417		5.23
1.00	74	0.08	0.8	8.24	36.663		9.90
1.00	20						
Total							53.01

→ Équivalences d'été (FAS = 0.65)
M_r = 31 MPa
CBR = 3.5
C_u = 105 kPa

Exemple (Gel)

Chaussée - [Exemple 1]

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

Objectifs
Type de route: Autoroute
Classe de trafic (DJMA projeté): supérieure 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_{es}: 20.5 T_{ma}: 6.5 I_{Gn}: 901 σ_{10} : 209
Simulation: Climat PR: 15 IG: 1215
n: 1.0 IGs: 1215

Revêtement à haute résistance à l'ornièrage requis

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)
1 BB HRO et BAF	260
2 MG 20	275
3 MG 112 (fuseau entier)	1100
4	
5	
6	
7	
8 CH (IL < 0.9)	

Total = 1635

Réinitialiser les matériaux

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

ρ_d (t/m ³)	Eau (%)	S _{Po} (mm/KH)	a (MPa ⁻¹)	K _u (W/nK)	K _f	S _r (%)	L _i (wh/nP)	Coût (\$/m ²)
2.35	0.0	0.0		1.48	1.48	0	1250	37.88
2.2	4.0	0.0		1.77	1.89	52	7897	5.23
1.92	8.0	0.0		2.10	2.49	56	14018	9.90
1.3	40.0	1.5	7.0	1.26	2.12	99	36690	
Total								53.01

Graphel Z (m): 1.898 h (m): 0.018

Exemple (Gel – 1994)

Chaussée - [Exemple 1]

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

Objectifs
Type de route: Autoroute
Classe de trafic (DJMA projeté): supérieure 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_{es}: 20.5 T_{ma}: 6.5 I_{Gn}: 901 σ_{10} : 209
Simulation: Climat PR: 15 IG: 1215
n: 1.0 IGs: 1215

Revêtement à haute résistance à l'ornièrage requis

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)
1 BB HRO et BAF	260
2 MG 20	275
3 MG 112 (fuseau entier)	1100
4	
5	
6	
7	
8 CH (IL < 0.9)	

Total = 1635

Réinitialiser les matériaux

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

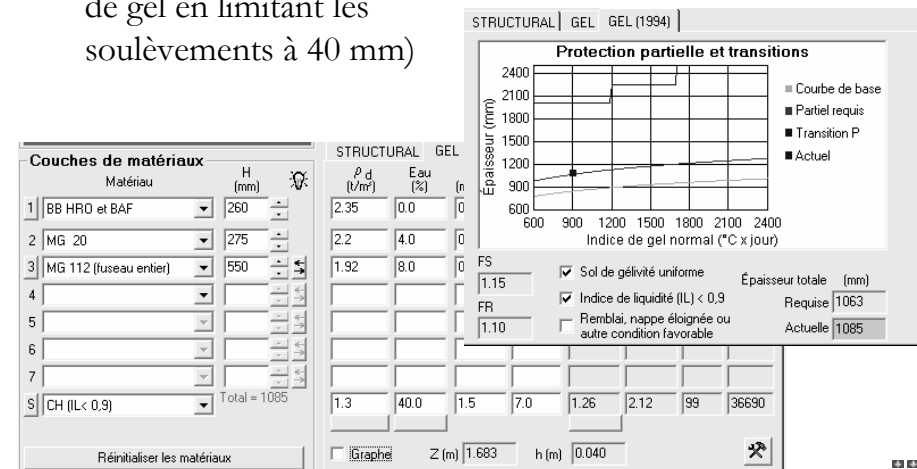
Protection partielle et transitions

Épaisseur (mm)

Indice de gel normal (°C x jour)

FS: 1.15 ☒ Sol de gélivité uniforme Épaisseur totale (mm): Requête 1063 Actuelle 1635
FR: 1.10 ☒ Indice de liquidité (IL) < 0.9
Remblai, nappe éloignée ou autre condition favorable

- 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)



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 de telles situations, l'épaisseur de sous-fondation demandée par la méthode AASHTO amène un poids pouvant causer des tassements dans le sol.
 - Une expertise par le Service de la géotechnique, et le Service des chaussées, peut s'avérer requise.

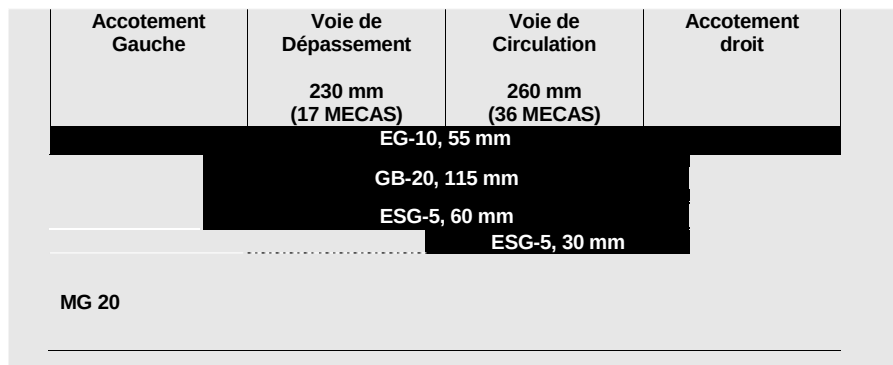


Exercice (La Prairie)

- 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.
- **Réponse :**
 - Si on réduit le revêtement, la durée de vie diminue... même si on augmente les épaisseurs des fondations.
 - On ne s'en sort pas à moins de rigidifier la fondation (stabilisation)

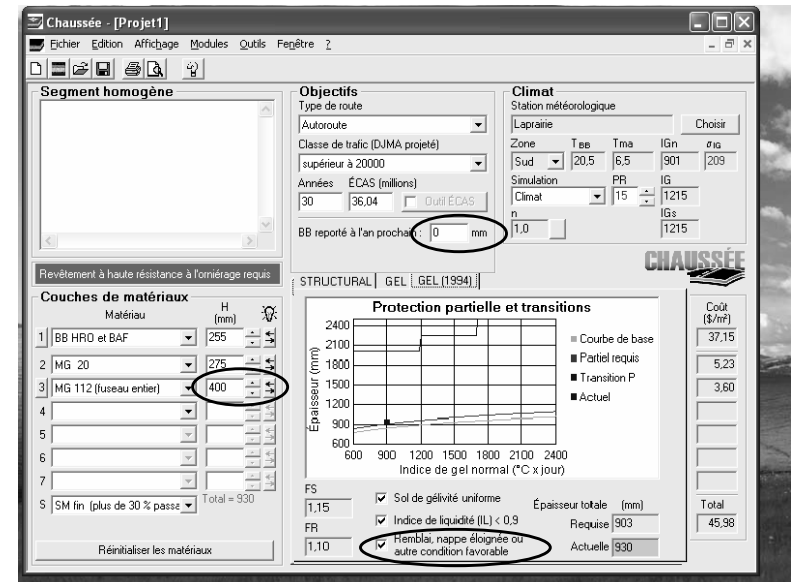


- L'épaisseur de 260 mm correspond à 76% du trafic lourd (voie 1). Il y aurait possibilité de réduire l'épaisseur dans la voie rapide, considérant qu'il y circule moins de camions. La voie 2 pourrait par exemple être dimensionnée pour 36% du trafic lourd avec une épaisseur de BB de 230 mm.



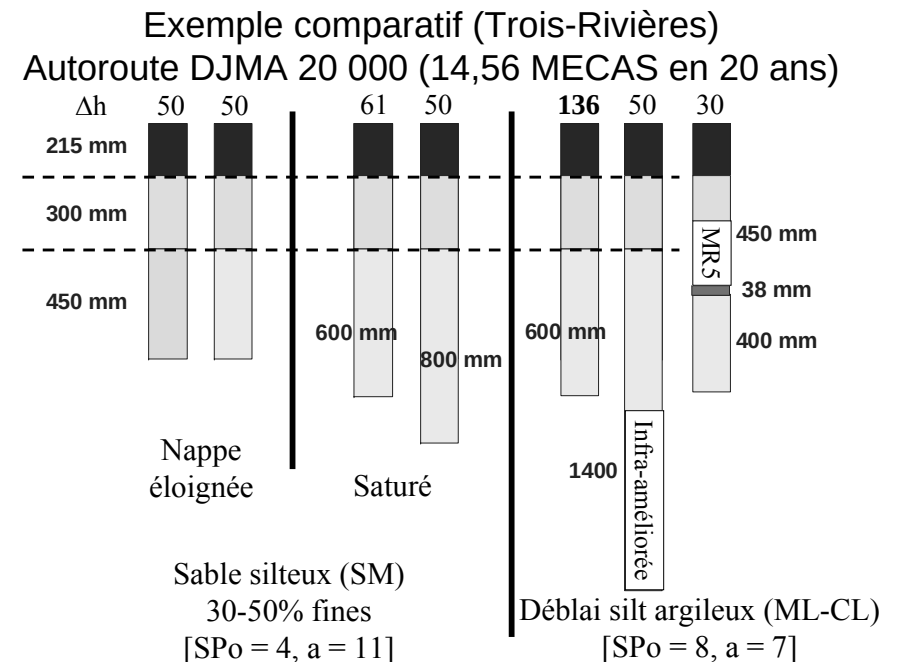
Exercice

- A partir du fichier « Exemple 1 »
- Faire une recommandation pour un secteur homogène bien drainé en sable silteux avec 35% de particules fines (SM)

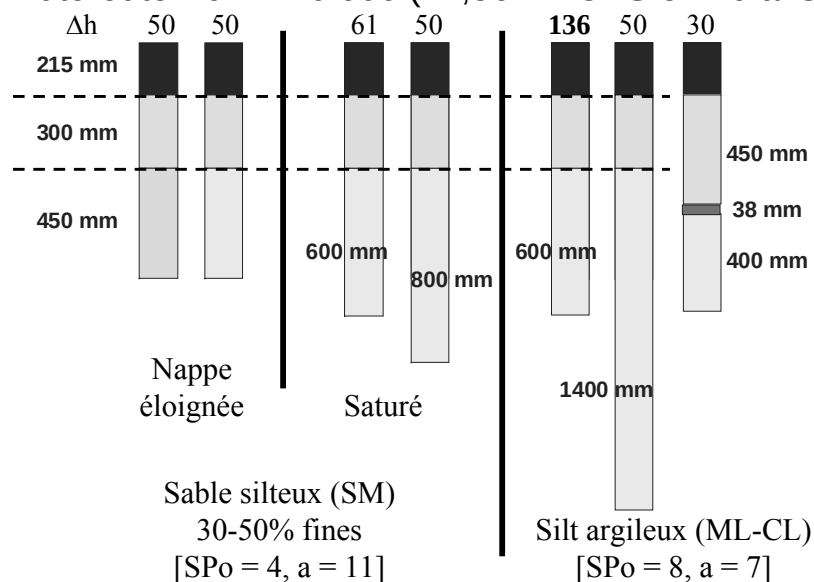


Variation du type de sol

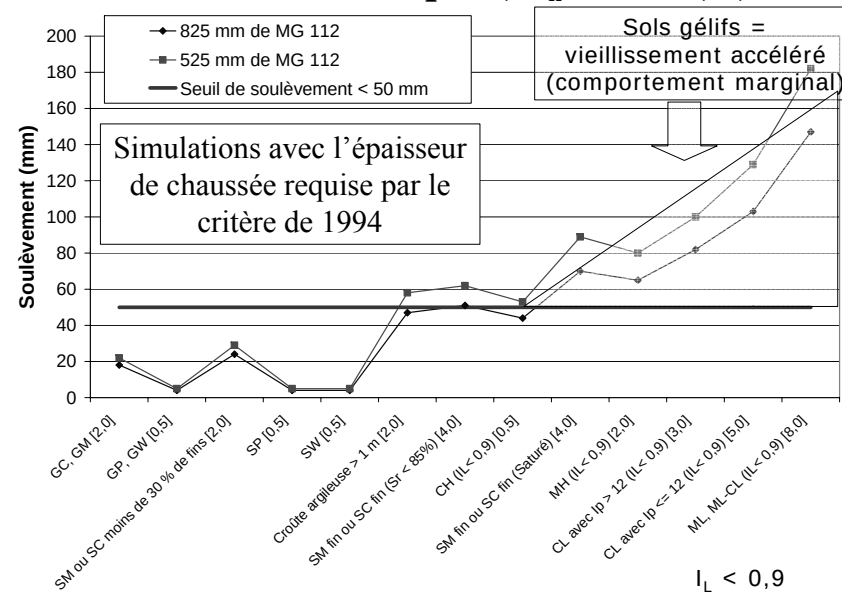
Exemples calculés avec le logiciel



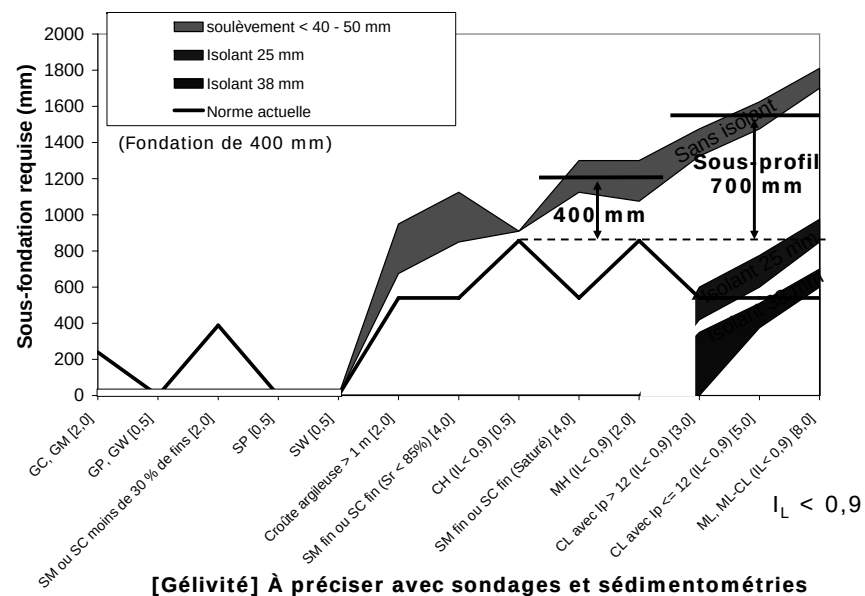
Exemple comparatif (Trois-Rivières) Autoroute DJMA 20 000 (14,56 MECAS en 20 ans)



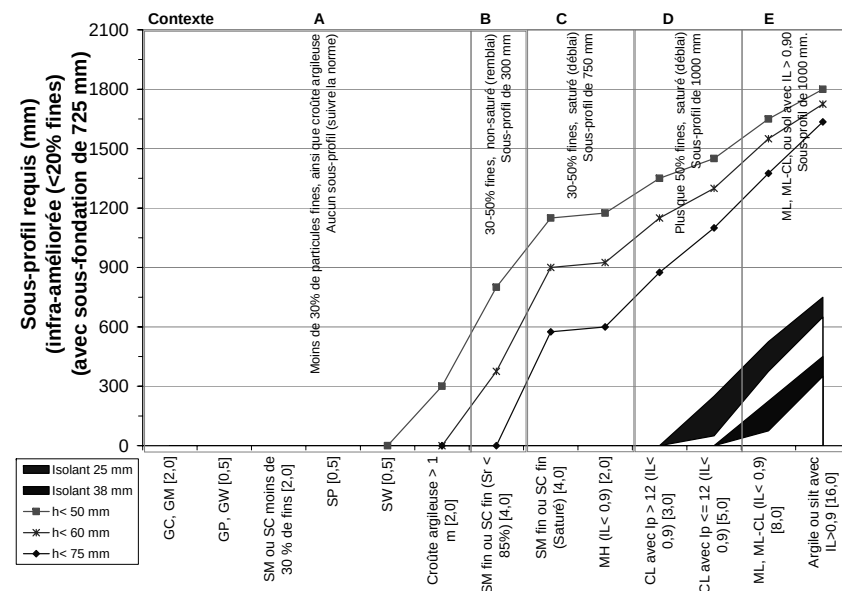
Soulèvements anticipés ($IG_n=1350^\circ\text{C jrs}$)



Sous-profils (contrôle du soulèvement)



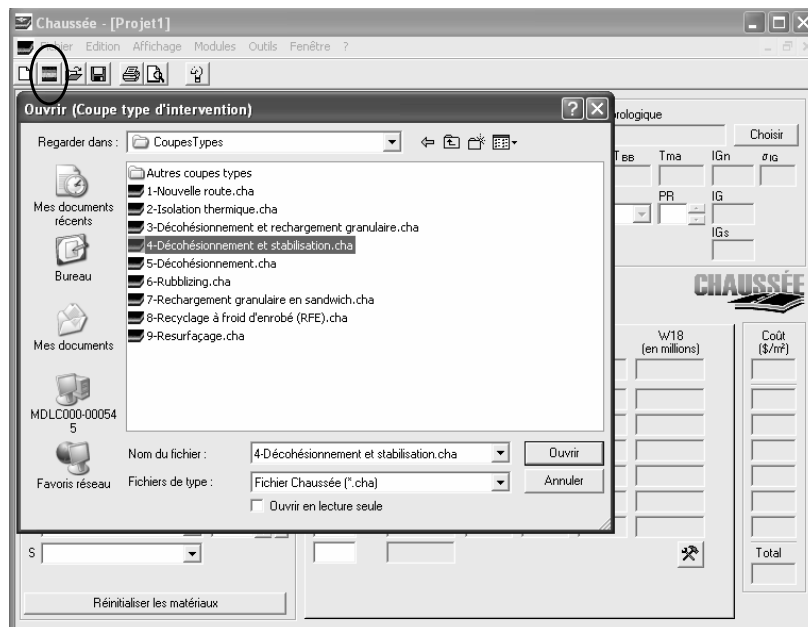
Route 175, Parc des Laurentides



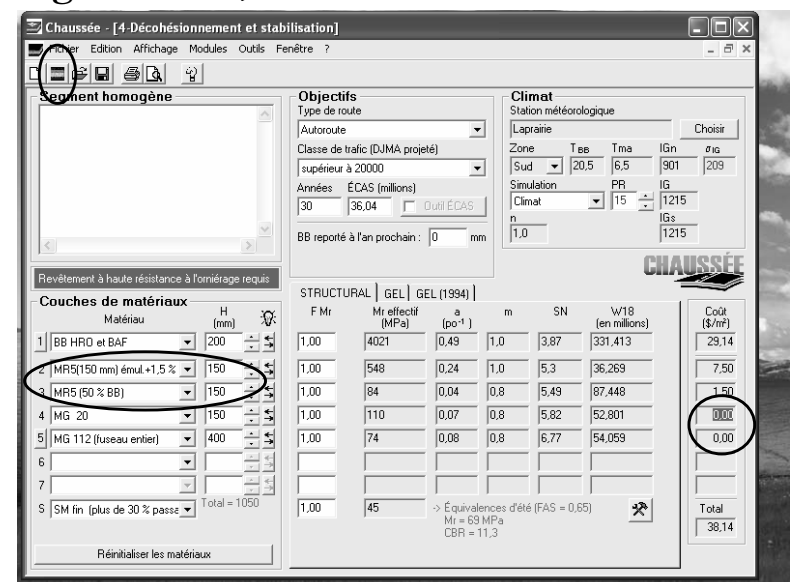
Techniques de recyclage

Exercice (Déco+Stab)

- À partir des objectifs de conception de l'Exemple 1
- Soit une chaussée existante dont les couches en place sont les suivantes:
 - 270 mm de BB fissuré
 - 300 mm de MG 20
 - 400 mm de MG 112 en place
 - SMfin 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, décohéssionnement et stabilisation



Exercice (RFE)

- Route Nationale, rurale à Lambton
- 2 voies (1 par direction)
- DJMA=4000, 21% de camions (accroissement nul)
- CAM=3,65
- Structure de chaussée en place:
 - BB 230 mm, MG 20 250 mm, MG 112 600 mm
 - Sol: SM (35% de fines), nappe à 2,5 m et plus
- Le BB est fissuré en pistes de roues et un relevé FWD indique qu'il faudrait lui attribuer un Mr de l'ordre de 1300 MPa
- Il n'y a pas de problématique de gel ($\Delta IRI < 0,7$ m/km)
- Dimensionner le revêtement pour un RFE de 100 mm



Guide Tableau 8

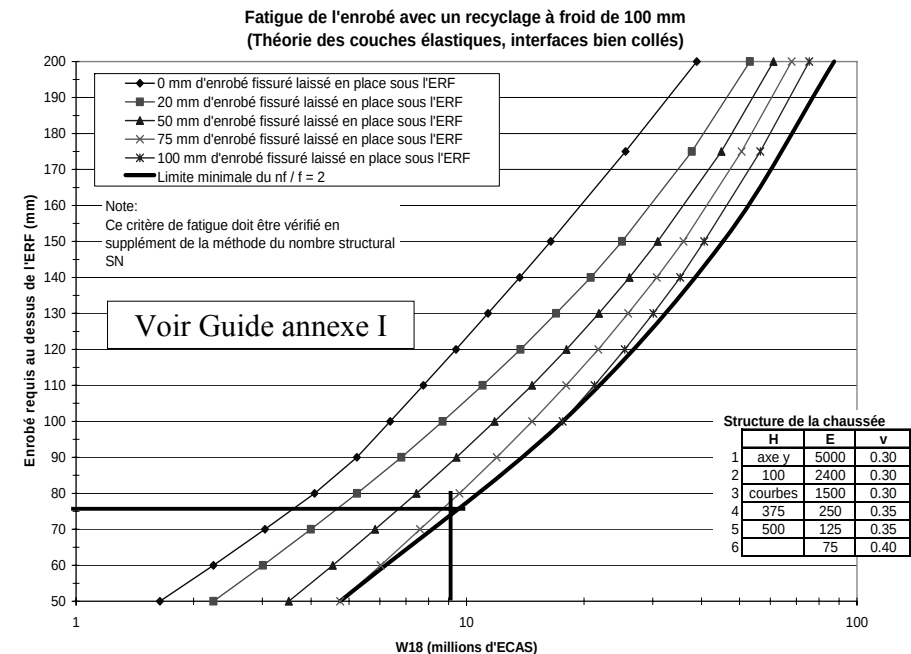
Fissuration de la surface	Coefficient structural	
	Revêtement bitumineux	Fondation stabilisée
Peu ou pas de carrelage		
Fissuration transversale de faible sévérité	0,35 à 0,40	0,20 à 0,35
< 10 % carrelage de faible sévérité		
< 1 fissure transversale tous les 6 m (sévérité moyenne et élevée)	0,25 à 0,35	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

Voir notes et commentaires dans le guide.



Solution

- RFE : Conception raccourcie à 20 ans à cause de la remontée des fissures
 - 9,2 MECAS
- BB:
 - 230 mm en place - 100 mm recyclé = 130 mm de vieux BB fissuré potentiellement laissé en place
 - Le logiciel demande à priori 75 mm de BB neuf au dessus du ERF
 - $nf/f = (100+75)/130 = 1,35$ (inférieur à 2)
 - Un planage préalable d'environ 45 mm permet un $nf/f > 2$
 - $(100+75)/85 = 2,05$



Chaussée - [Projet3]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

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

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)
1 BB	74
2 ERF émuls. + 0,5% ciment	100
3 BB fissuré	85
4 MG 20	250
5 MG 112 (fuseau entier)	600
6	
7	
8 SM fin (plus de 30 % passe)	

Total = 1109

Réinitialiser les matériaux

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_{eb}: 20,5 T_{ma}: 4,3 IGn: 1195 σ_{ig}: 225

Simulation: Climat PR IG: 10 1484

n: 1,0 IGs: 1484

CHAUSSEE

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

F Mr	Mr effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m	SN	w18 (en millions)	Coût (\$/m²)
1,00	2894	0,43	1,0	1,26	9,305	10,43
1,00	1400	0,3	1,0	2,44	360,576	7,00
0,95	1298	0,29	1,0	3,41	13,115	0,00
1,00	125	0,08	0,8	4,07	12,252	4,75
1,00	74	0,08	0,8	5,49	33,445	5,40
1,00	45					

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

Total: 27,58

Étude de réfection sol gélif

- Une construction récente présente un secteur de 600 m avec problèmes de soulèvement au gel
 - Nicolet, route régionale
 - DJMA = 4000, 10 % camions, 2% croissance annuelle
- Devis du contrat précédent: 145 mm BB, 250 mm de MG 20, 525 mm de MG 112
- Silt (ML avec 34% d'eau) à la ligne d'infra d'après les sondages F3 à F5 de l'étude d'avant projet



Mandat et contraintes

- Proposer une solution d'ici au printemps prochain pour éliminer le problème.
 - Nous sommes en février 2005
 - Échéancier = 15 mai 2005
- Le profil ne peut pas être rehaussé de plus de 100 mm.



Étapes (plan d'action)

- **Collecte de données supplémentaire**
 - 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)**



Suivi du comportement au gel

- **Relevé d'arpentage hiver (5 mars 2005) et période hors gel (mai 2005)**
 - Soulèvement hivernal de l'ordre de 125 mm aux pires endroits, incluant un point près du sondage.
 - Valeur jugée critique et représentative pour l'analyse du secteur



Étapes (plan d'action)

- Collecte de données supplémentaire
 - 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)



Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

Objectifs

Type de route: Régionale
 Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 3000
 Années: 25, 5.399, Outil ECAS
 BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Nicolet
 Zone: Sud, T_{eb}: 20.5, T_{ma}: 5.1, I_{Gn}: 1126, σ_{ig}: 221
 Simulation: PR, IG: 1432
 Climat: 12, IGs: 1432
 n: 1.0

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)	F Mr	Mr effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m	SN	w/18 (en millions)	Coût (\$/m ²)
1 BB	145	1.00	2894	0.43	1.0	2.47	2.825	20.45
2 MG 20	250	1.00	157	0.11	0.8	3.32	3.184	4.75
3 MG 112 (fuseau entier)	525	1.00	74	0.08	0.8	4.56	5.17	4.73
4								
5								
6								
7								
S ML, ML-CL (IL < 0.9)	Total = 920	1.00	36	→ Équivalences d'été (FAS = 0.7) Mr = 51 MPa CBR = 7.3				Total 29.92

Réinitialiser les matériaux

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

Objectifs

Type de route: Régionale
 Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 3000
 Années: 25, 5.399, Outil ECAS
 BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Nicolet
 Zone: Sud, T_{eb}: 20.5, T_{ma}: 5.1, I_{Gn}: 1126, σ_{ig}: 221
 Simulation: PR, IG: 1432
 Climat: 12, IGs: 1432
 n: 1.0

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)	Coût (\$/m ²)
1 BB	145	20.45
2 MG 20	250	4.75
3 MG 112 (fuseau entier)	525	4.73
4		
5		
6		
7		
S ML, ML-CL (IL < 0.9)	Total = 920	Total 29.92

Réinitialiser les matériaux

Protection partielle et transitions

FS: 1.15, FR: 0.90
 Sol de gélivité uniforme: ☒
 Indice de liquidité (IL) < 0.9: ☒
 Remblai, nappe éloignée ou autre condition favorable: ☐
 Épaisseur totale (mm): Requête 908, Actuelle 920

Chaussée - [Projet1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

Segment homogène

Objectifs

Type de route: Régionale
 Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 3000
 Années: 25, 5.399, Outil ECAS
 BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Nicolet
 Zone: Sud, T_{eb}: 20.5, T_{ma}: 5.1, I_{Gn}: 1126, σ_{ig}: 221
 Simulation: PR, IG: 1432
 Climat: 12, IGs: 1432
 n: 1.0

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)	ρ _d (t/m ³)	Eau (%)	SP _o (mm/KH)	a (MPa ⁻¹)	K _u (W/mK)	K _f	S _r (%)	L _f (W/h/m ²)	Coût (\$/m ²)
1 BB	145	2.35	0.0	0.0		1.48	1.48		1250	20.45
2 MG 20	250	2.2	4.0	0.0		1.77	1.89	52	7897	4.75
3 MG 112 (fuseau entier)	525	1.92	8.0	0.0		2.10	2.49	56	14018	4.73
4										
5										
6										
7										
S ML, ML-CL (IL < 0.9)	Total = 920	1.45	34.0	0.0	7.0	1.44	2.48	106	38404	Total 29.92

Réinitialiser les matériaux

☐ Graphe Z (m) 1.676 h (m) 0.164

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



SÉCURITÉ PUBLIQUE

Précaution contre le givrage

- Critère classique (norme) :
 - Minimum de 450 mm de gravier au-dessus de l'isolant
- Calcul d'optimisation :
 - Voir Info DLC, déc 2003

Exemple

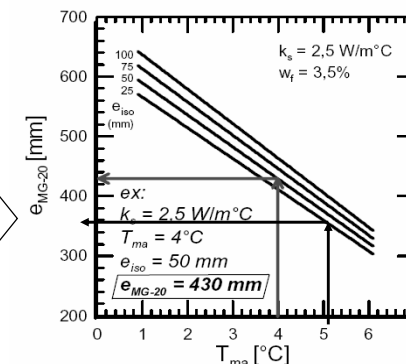


Figure 4 : Abaque de conception pour $k_s = 2,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Travaux de Côté et Konrad
(CREIG - Université Laval)

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 ($\sigma_a = 0,1 \cdot R_c$)

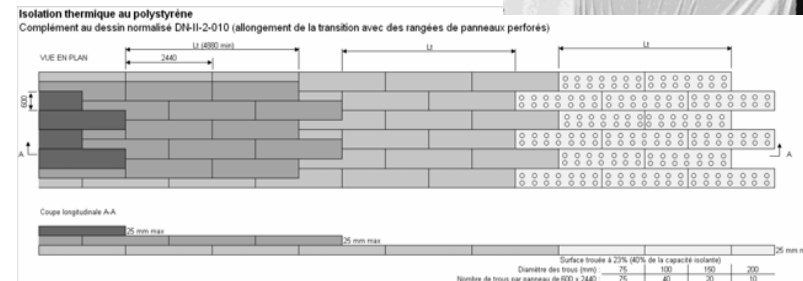
R_c	$Z_{\min}$ (mm)	BB minimum avec 450 mm de granulaire
250 kPa	900	225
400 kPa	700	125

(Équivalence $\approx 2:1$ entre MG20 et BB)



Zone de transition améliorée

Voir Guide annexe III



Conception sur sols saturés



Effet de la teneur en eau

- Dimensionnement pour une autoroute
- Localisation: Laurierville
- 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?

Chaussée - [1-Nouvelle route]

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): 53,647 Outil ÉCAS

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Laurierville

Zone: Sud T_{eb}: 20,5 T_{ma}: 4,4 I_{gn}: 1203 σ_{ig}: 226

Simulation: PR IG

Climat: 15 1542

n: 1,0 IGs: 1542

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

Matériau	H (mm)	F Mr	Mr effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m	SN	W18 (en millions)	Coût (\$/m ²)
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	0,94	4,50
4								
5								
6								
7								
8 SM fin (plus de 30 % passe)	Total = 800	1,00	45					Total

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

Total: 22,40

Réinitialiser les matériaux

Chaussée - [1-Nouvelle route]

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): 53,647 Outil ÉCAS

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Laurierville

Zone: Sud T_{eb}: 20,5 T_{ma}: 4,4 I_{gn}: 1203 σ_{ig}: 226

Simulation: PR IG

Climat: 15 1542

n: 1,0 IGs: 1542

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

Matériau	H (mm)	F Mr	Mr effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m	SN	W18 (en millions)	Coût (\$/m ²)
1 BB HRO	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					Total

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

Total: 48,78

Réinitialiser les matériaux

Chaussée - [1-Nouvelle route]

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): 53,647 Outil ÉCAS

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Laurierville

Zone: Sud T_{bb}: 20,5 T_{ma}: 4,4 I_{gn}: 1203 σ_{ig} : 226

Simulation: Climat PR IG 15 1542

n: 1,0 IGs: 1542

STRUCTURAL GEL GEL (1994)

Matériau	H (mm)	ρ_d (t/m ³)	Eau (%)	SPo (mm ² /KH)	a (MPa ⁻¹)	Ku (W/mK)	Kf	Sr (%)	Lf (W/h/m ²)	Coût (\$/m ²)
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	14013	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										48,78

Reinitialiser les matériaux

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

Chaussée - [1-Nouvelle route]

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): 53,647 Outil ÉCAS

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Laurierville

Zone: Sud T_{bb}: 20,5 T_{ma}: 4,4 I_{gn}: 1203 σ_{ig} : 226

Simulation: Climat PR IG 15 1542

n: 1,0 IGs: 1542

STRUCTURAL GEL GEL (1994)

Matériau	H (mm)	ρ_d (t/m ³)	Eau (%)	SPo (mm ² /KH)	a (MPa ⁻¹)	Ku (W/mK)	Kf	Sr (%)	Lf (W/h/m ²)	Coût (\$/m ²)
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										49,23

Reinitialiser les matériaux

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

Chaussée - [1-Nouvelle route]

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): 53,647 Outil ÉCAS

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Laurierville

Zone: Sud T_{bb}: 20,5 T_{ma}: 4,4 I_{gn}: 1203 σ_{ig} : 226

Simulation: Climat PR IG 15 1542

n: 1,0 IGs: 1542

STRUCTURAL GEL GEL (1994)

Matériau	H (mm)	ρ_d (t/m ³)	Eau (%)	SPo (mm ² /KH)	a (MPa ⁻¹)	Ku (W/mK)	Kf	Sr (%)	Lf (W/h/m ²)	Coût (\$/m ²)
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										49,23

Reinitialiser les matériaux

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

Chaussée - [1-Nouvelle route]

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): 53,647 Outil ÉCAS

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Laurierville

Zone: Sud T_{bb}: 20,5 T_{ma}: 4,4 I_{gn}: 1203 σ_{ig} : 226

Simulation: Climat PR IG 15 1542

n: 1,0 IGs: 1542

STRUCTURAL GEL GEL (1994)

Matériau	H (mm)	ρ_d (t/m ³)	Eau (%)	SPo (mm ² /KH)	a (MPa ⁻¹)	Ku (W/mK)	Kf	Sr (%)	Lf (W/h/m ²)	Coût (\$/m ²)
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)	800	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										52,61

Reinitialiser les matériaux

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

Prise en compte de la position de la nappe phréatique

- Conditions identiques de site
- Variante: nappe phréatique à 500 mm sous la ligne d'infrastructure
- Quel sera l'incidence sur le dimensionnement?

Chaussée - [1-Nouvelle route]

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): 53,647 Outil ÉCAS

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Laurierville

Zone: Sud T_{es}: 20,5 T_{ma}: 4,4 I_{gn}: 1203 σ_{ig}: 226

Simulation: PR IG

Climat: 15 1542

n: 1,0 IGs: 1542

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)	ρ _d (t/m ³)	Eau (%)	SPo (mm ² /KH)	a (MPa ⁻¹)	Ku (W/mK)	Kf	Sr (%)	Lf (Wh/m ²)	Coût (\$/m ²)
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

Reinitialiser les matériaux

STRUCTURAL GEL | GEL (1994)

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

Chaussée - [1-Nouvelle route]

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): 53,647 Outil ÉCAS

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Laurierville

Zone: Sud T_{es}: 20,5 T_{ma}: 4,4 I_{gn}: 1203 σ_{ig}: 226

Simulation: PR IG

Climat: 15 1542

n: 1,0 IGs: 1542

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)	ρ _d (t/m ³)	Eau (%)	SPo (mm ² /KH)	a (MPa ⁻¹)	Ku (W/mK)	Kf	Sr (%)	Lf (Wh/m ²)	Coût (\$/m ²)
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 SM fin (plus de 30 % passe)		1,8	18,0	4,0	11,0	1,94	2,83	98	26812	
Total = 1530										52,73

Reinitialiser les matériaux

STRUCTURAL GEL | GEL (1994)

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

Chaussee - [1-Nouvelle route]

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): 53,647 Outil ÉCAS

BB reporté à l'an prochain: 0 mm

Climat

Station météorologique: Laurierville

Zone: Sud T_{es}: 20,5 T_{ma}: 4,4 I_{gn}: 1203 σ_{ig}: 226

Simulation: PR IG

Climat: 15 1542

n: 1,0 IGs: 1542

Couches de matériaux

Matériau	H (mm)	ρ _d (t/m ³)	Eau (%)	SPo (mm ² /KH)	a (MPa ⁻¹)	Ku (W/mK)	Kf	Sr (%)	Lf (Wh/m ²)	Coût (\$/m ²)
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)	500	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 SM fin (plus de 30 % passe)		1,8	18,0	4,0	11,0	1,94	2,83	98	26812	
Total = 1705										54,31

Reinitialiser les matériaux

STRUCTURAL GEL | GEL (1994)

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



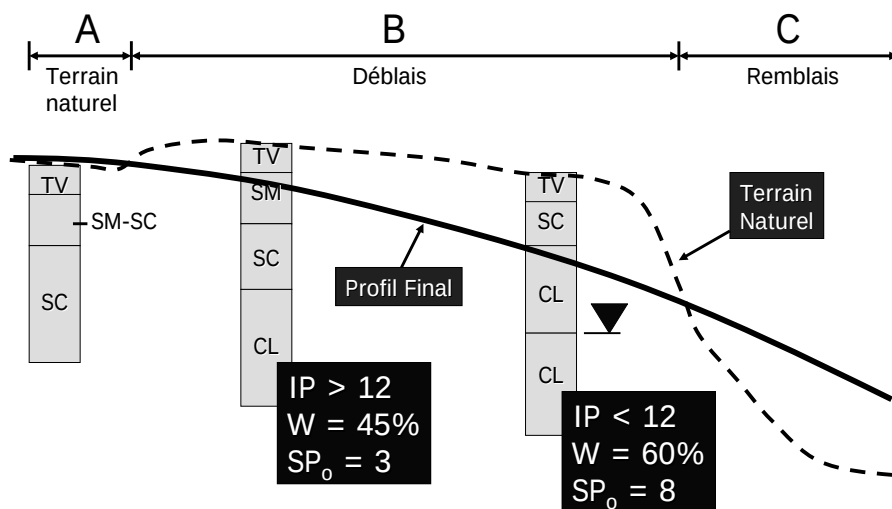
Conception en milieu « Non homogène »



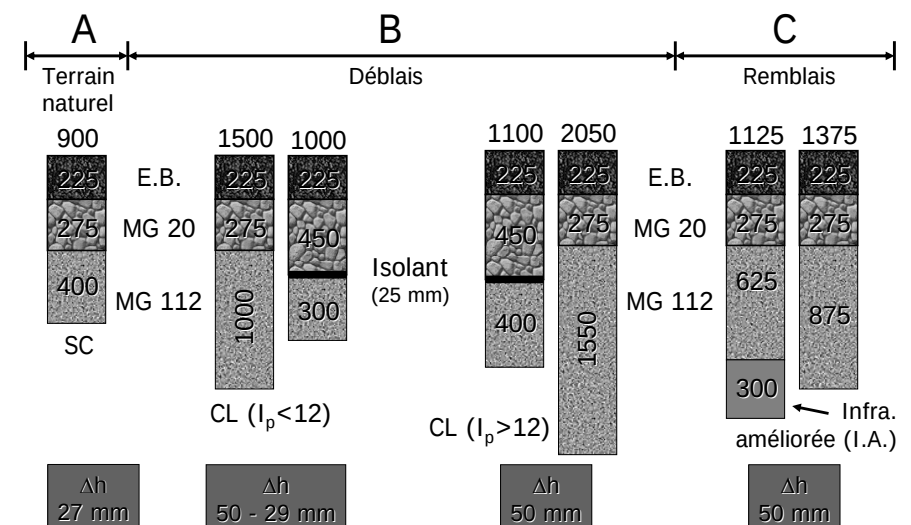
Données

- 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
- $I_g \text{ design} = 1559$ °C*j (1/15 ans)

Profil



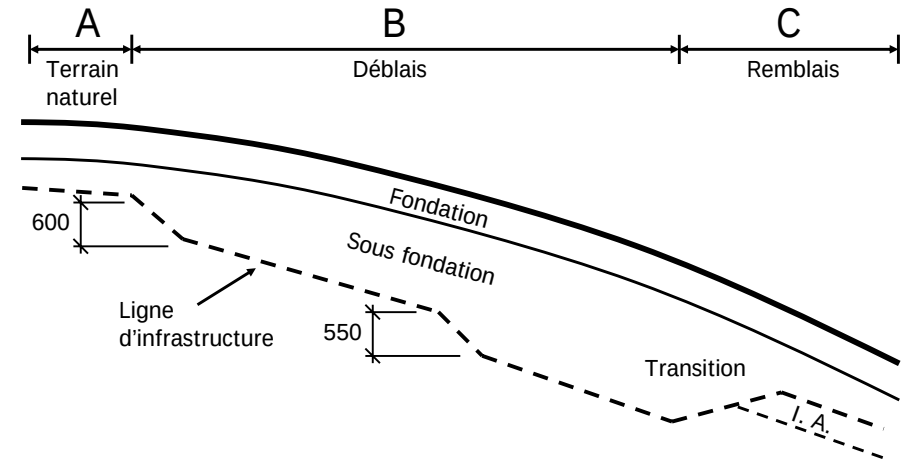
Structure possible



Points à considérés

- Profondeur des fossés
- Transition
- Disponibilité et coût des matériaux
- Faisabilité
- Quantité de Remblais / Déblais

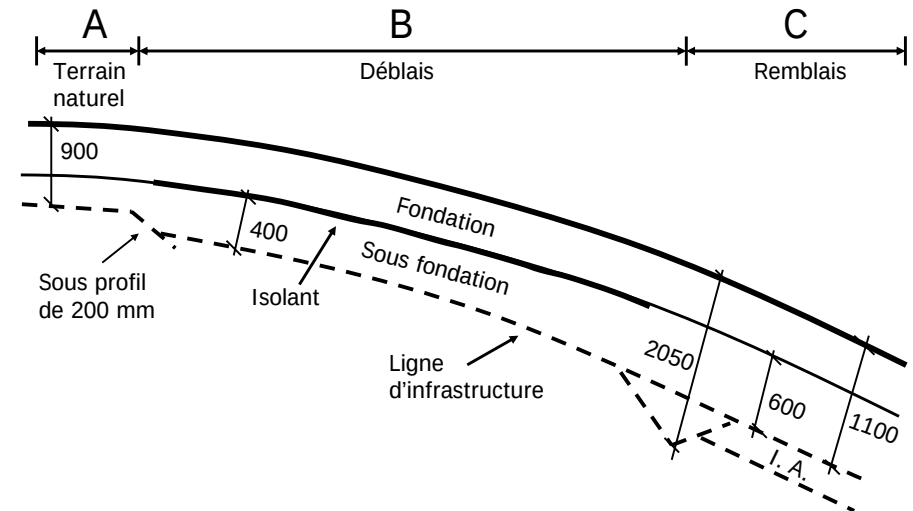
Option 1



Option 1

- Plus grande quantité de Remblais / Déblais
- Grande disponibilité de MG112
- Stabilité des talus (secteur B)
- Drainage du fond de coupe
- Faisabilité: Plus difficile sous trafic

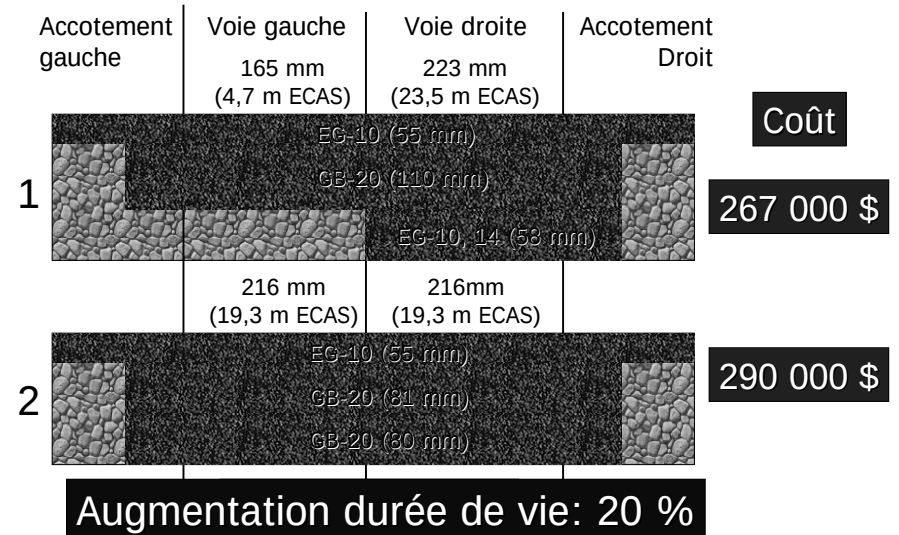
Option 2



Option 2

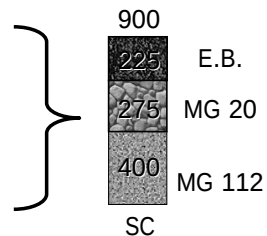
- Faible quantité de Remblais / Déblais (terrassement similaire p/r secteurs adjacents)
- Coût élevé pour le MG112
- Plus grande stabilité des talus (secteur B) pendant les travaux.
- Faisabilité:
 - Pas de terrassement en milieu saturé.
 - Travaux possibles sous trafic.
- Coût de l'isolant: 6 \$/m²

Chaussée asymétrique



Conclusion

- Faire une conception / Secteur homogène
- Considérer les aspects:
 - Faisabilité / coût
 - Remblai / Déblai
 - disponibilité des matériaux
 - Drainage
- Potentiel d'une chaussée asymétrique
 - 2 voies/direction
 - Secteur en pente



Direction du Laboratoire des chaussées



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

Québec, le 12 juillet 2006
Date de mise à jour : 19 décembre 2006.

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'étalonnage du module de résilience (FMr)	32
10 - CALCUL DU GEL	36
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 Indice de gélivité sans surcharge (SP_0)	40
10.3.2 Coefficient de surcharge (a)	42
10.3.3 Sol argileux varvé ou ayant un indice de liquidité élevé ($I_L \geq 0,9$)	44
10.4 – CONDUCTIVITÉ THERMIQUE (K)	44
10.4.1 Conductivité thermique (K_s) et masse volumique des particules solides (ρ_s)	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
11 - CRITÈRE DE GEL DE 1994	50
12 - NORME POUR LES ROUTES À FAIBLE TRAFIC	53
13 - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	53
14 - POUR COMMUNIQUER AVEC NOUS	56

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

σ :	pression ou contrainte (MPa ou kPa)
σ_{IG} :	écart type de l'indice de gel ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{jours}$)
γ :	poids volumique (kN/m^3)
ρ :	masse volumique (t/m^3)
ρ_d :	masse volumique sèche (t/m^3)
ρ_s :	masse volumique des particules solides (t/m^3)
ν :	coefficient de Poisson
ΔPSI :	écart de PSI admis entre l'état initial et l'état final d'une chaussée
a :	coefficient structural ou coefficient de surcharge pour le potentiel de ségrégation (MPa^{-1})
AASHTO :	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM :	American Standard of Testing Materials
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 χ 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
dt :	intervalle de temps (heures)
dV_i :	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 d'élasticité (MPa)
ÉCAS :	équivalent de charge axiale simple de 8160 kg
Eta :	paramètre η 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 :	gradient géothermique ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)
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)
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)
K1 à K4	constantes de modélisation du module de résilience
Ka et Kb	constantes de détermination du coefficient structural
Kappa :	paramètre κ 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 ³)
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 ²), ou fraction du volume en quartz
qf :	flux de chaleur de fusion (W/m ²)
qm :	flux de refroidissement (W/m ²)
qp :	flux géothermique (W/m ²)
qs :	flux de chaleur de ségrégation (W/m ²)
Qu :	teneur en eau non gelée contenue dans le sol gelé (% du volume)
R :	fiabilité (%) ou résistance thermique (m ² K/W)
Rf :	facteur de fines de Rieke et autres (1983)
S :	coefficient d'intensité du gradient géothermique
S ₀ :	erreur standard (écart type)
SN :	nombre structural (méthode de l'AASHTO)
SP :	potentiel de ségrégation (indice de gélivité en mm ² /KH)
SP ₀ :	potentiel de ségrégation sans surcharge (indice de gélivité en mm ² /KH)
Sr :	degré de saturation
SrCritique :	seuil de saturation de déclenchement du gonflement interstitiel
Ss :	surface spécifique (m ² /g)
Ss _{FF} :	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 _{BB} :	température effective du revêtement (°C)
Tf :	température de congélation (°C)
ThBal :	bilan thermique au front de gel
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
VB :	valeur au bleu de méthylène
Vbe :	volume de bitume effectif
VL :	pourcentage de véhicules lourds
w :	teneur en eau (% du sol sec)
W ₁₈ :	durée de vie structurale (ÉCAS)
w _L :	limite de liquidité
w _p :	limite de plasticité
wu :	teneur en eau non gelée contenue dans le sol gelé (% du sol sec)
Z :	profondeur de gel (m)
Z _R :	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 le 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 :

Système 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

Veuillez 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.
 - o 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 »
 - o 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.
3. Il est possible que certains privilèges d'accès 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

Chaussée - [Exemple 1]

Fichier Edition Affichage Modules Outils Fenêtre ?

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: 30 ÉCAS (millions): 36.04 ☒ Outil ÉCAS
BB reporté à l'an prochain: 50 mm

Climat
Station météorologique: Laprairie
Zone: Sud T_{EB}: 20.5 T_{ma}: 6.5 IG_n: 901 **σ_{IG}**: 209
Simulation: Climat PR IG: 1215
n: 1.0 IG_s: 1215

Couches de matériaux
Matériau H (mm)
1 BB HRO et BAF 260
2 MG 20 300
3 MG 112 (fuseau entier) 1100
4
5
6
7
8 CH (IL < 0,9) Total = 1660

STRUCTURAL | GEL | GEL (1994)

F Mr	Mr effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	m	SN	W18 (en millions)	Coût (\$/m²)
1.00	4021	0.49	1.0	5.03	41.002	37.88
1.00	110	0.07	0.8	5.68	39.508	5.70
1.00	74	0.08	0.8	8.29	38.92	9.90
1.00	20					

-> Équivalences d'été (FAS = 0.65)
Mr = 31 MPa
CBR = 3.5
Cu = 105 kPa

Total
53.48

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 « n » 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 (sédimentométrie, valeur au bleu, etc.).
- Ajuster la masse volumique sèche et la teneur en eau de chaque couche en fonction des données disponibles
 - o Sous la nappe phréatique, le sol devrait être considéré comme saturé ($S_r \approx 100\%$).
 - o 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

Matériau	HMin	HMax	Hincement
BB HRO et BAF	175	400	10
CH (IL< 0,9)	300	10000	100
MG 112 (fuseau entier)	300	10000	50
MG 20	150	10000	25

Plage et paramètre de contrôle
Hincement gouverne le pas d'incrémentation des épaisseurs, ainsi que l'arrondissement applicable (jusqu'à concurrence de 25 mm) avec les boutons de recherche automatique d'épaisseur.

Fermer

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)	ρ_d	n	nmin et nmax
		ρ_s	MVsolidesMin et MVsolidesMax
		Vbe	VbeMin et VbeMax
	% eau	Ss	SsMin et SsMax
		Wu	Alternance Wu/Qu (massique/volumique) en cliquant sur le titre de la colonne Wu
	Sr		Sr doit toujours se situer entre 0 et 100 %
Gélivité	SPo		SPoMin, SPoMax, aSPMin, aSPMax, SrCritique, Tf
	a (MPa ⁻¹)		
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 » permet de spécifier les prix unitaires à l'intérieur de la bibliothèque de référence. Les valeurs peuvent être exprimées en \$/tonne, en \$/m² ou en \$/m³. Il est recommandé de réviser ces valeurs en fonction des coûts typiques à chaque région.

Coût unitaire de la structure de chaussée : Le coût unitaire de la structure de chaussée (en \$/m²) 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 :

Objectifs

Type de route: Autoroute

Classe de trafic (DJMA projeté): supérieur à 20000

Années: 30 ÉCAS (millions): 36.04 ☒ Outil ÉCAS

BB reporté à l'an prochain: 50 mm

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) Seuil de détérioration (Indice Δ PSI) 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 :

$$\text{DJMA}_{\text{projeté}} = \text{DJMA}_{\text{initial}} \cdot fa / n$$

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).

$$N_{18} = \text{DJMA}_{\text{initial}} \cdot VL \cdot \text{Dir} \cdot \text{Voie} \cdot \text{CAM} \cdot N \cdot fa$$

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 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

Outil de calcul du nombre d'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 Njrs (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
Direction 1					
Fraction du trafic en direction 1 (%)	50.0	75.9	13 348	1.0	36.04
DJMA projeté pour la direction 1	17 586	24.1	4 238	1.0	11.443
Direction 2					
Fraction du trafic en direction 2 (%)	50.0	24.1	4 238	1.0	11.443
DJMA projeté pour la direction 2	17 586	75.9	13 348	1.0	36.04

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 (une direction)	Route à deux voies (une direction)		Route à trois voies et plus (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.

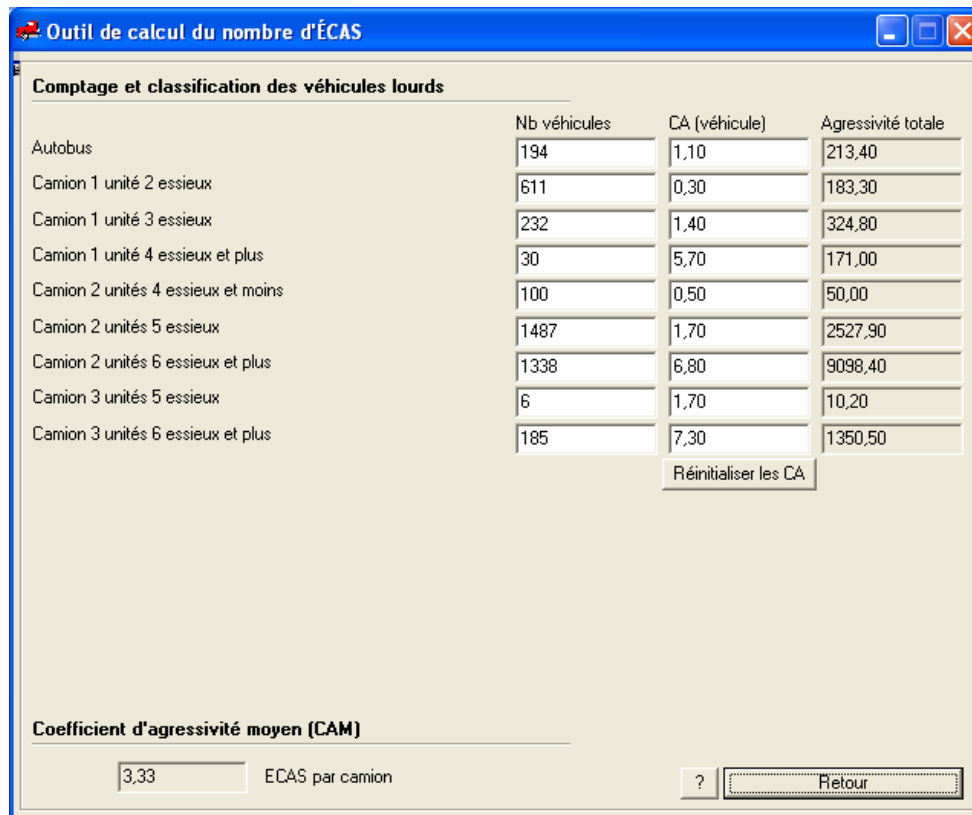
7.2 - Coefficient d'agressivité moyen (CAM)

Le coefficient d'agressivité moyen exprime le nombre d'ÉCAS attribué pour chaque classe de 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



Outil de calcul du nombre d'ÉCAS

Comptage et 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 8160 kg se fait de la façon suivante :

$$CA = \sum CA_i = \sum \left(\frac{m_i}{m_{ref}} \right)^4$$

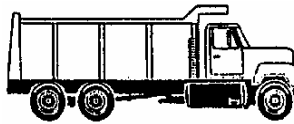
Équation 3

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
≈ 28,50 tonnes pour un essieu quadruple (extrapolé).

(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 :	12,3	+	3,0	=	15,3
Total :	20	+	8,5	=	28,5

CA à pleine charge :

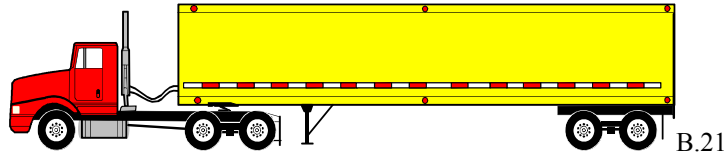
$$CA_p = \left(\frac{20}{15,2} \right)^4 + \left(\frac{8,5}{8,16} \right)^4 = 4,17 \text{ ÉCAS}$$

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 :



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

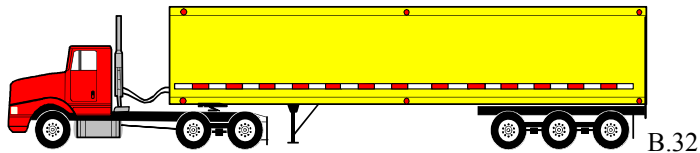
CA à pleine charge :

$$CA_p = \left(\frac{5,5}{8,16} \right)^4 + 2 \cdot \left(\frac{18}{15,2} \right)^4 = 4,14 \text{ ÉCAS}$$

CA à vide :

$$CA_v = \left(\frac{5,5}{8,16} \right)^4 + 2 \cdot \left(\frac{4,8}{15,2} \right)^4 = 0,23 \text{ ÉCAS}$$

Camion de catégorie A.42 (22 roues, 2 unités, 6 essieux) :



Tare :	5,5	+	5	+	7	=	17,5
Charge utile :	0	+	13	+	17	=	30,0
Total :	5,5	+	18	+	24	=	47,5

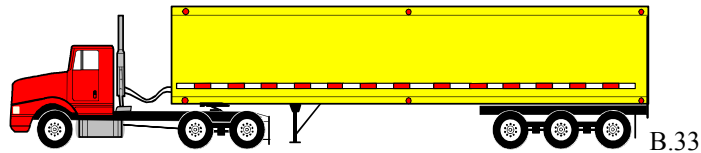
CA à pleine charge :

$$\left(\frac{5,5}{8,16} \right)^4 + \left(\frac{18}{15,2} \right)^4 + \left(\frac{24}{21,8} \right)^4 = 3,64 \text{ ÉCAS}$$

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 :

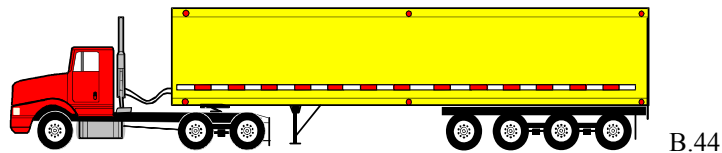
$$\left(\frac{5,5}{8,16}\right)^4 + \left(\frac{18}{15,2}\right)^4 + \left(\frac{26}{21,8}\right)^4 = 4,19 \text{ ÉCAS}$$

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 :

$$\left(\frac{5,5}{8,16}\right)^4 + \left(\frac{18}{15,2}\right)^4 + \left(\frac{32}{28,5}\right)^4 = 3,76 \text{ ÉCAS}$$

CA à vide :

$$\left(\frac{5,5}{8,16}\right)^4 + \left(\frac{5}{15,2}\right)^4 + \left(\frac{7,8}{28,5}\right)^4 = 0,22 \text{ ÉCAS}$$

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 (bouton « Choisir »). Il est aussi possible de rechercher le fichier à travers l'explorateur standard de Windows en cliquant sur le bouton « Parcourir » affiché au-dessus de la carte.

Climat				
Station météorologique				
Laprairie				Choisir
Zone	T _{BB}	T _{ma}	IG _n	σ _{IG}
Sud	20.5	6.5	901	209
Simulation	PR		IG	
Climat	15		1215	
n			IG _s	
1.0			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 2.4-1) est utilisée pour déterminer la température effective du revêtement (T_{BB}) nécessaire au calcul de son module de résilience (Mr). 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 (CHAUSSÉE 2) 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 (σ_{IG}). Lorsqu'il est inscrit en rouge, 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'écarts 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- $IG_s = n \cdot IG + b$: Cette méthode permet d'appliquer directement un facteur n prédéfini par l'utilisateur. L'ordonnée à l'origine « b » peut aussi être modifiée.

2- $T_s = n \cdot T_a + c$: Cette méthode applique un facteur n (et une ordonnée à l'origine) 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

Extrait du fichier CLM	Explication
[Climat]	[Climat] (en-tête obligatoire)
CodeStation=7016294	
IGn=1236	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.
IG_sigma=160.6	
Tma=4	
Latitude=46.8	
Longitude=71.38	
Elevation=74	
ZoneBB=Sud	
TBB=20.5	

[DJG 2004] DateDebut = 2003/11/30 >Table: DegrésJours >Jours °C·jours <table> <tr><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>31</td><td>197</td></tr> <tr><td>31</td><td>528</td></tr> <tr><td>29</td><td>281</td></tr> <tr><td>25</td><td>127</td></tr> </table>	1	2	31	197	31	528	29	281	25	127	[Titre d'une série de degrés-jours de gel (doit débuter par les lettres « DJG »)] Date de début de la série >Nom du tableau (facultatif) >En-tête des colonnes (facultatif) Durée (en jours) et intensité du gel (en °C·jours sous zéro) Le module GEL convertit les indices de gel en températures moyennes.												
1	2																						
31	197																						
31	528																						
29	281																						
25	127																						
[Hiver 2004] DateDebut = 2003/11/30 >Table: Températures >Heures °C <table> <tr><td>24</td><td>-2,1</td></tr> <tr><td>24</td><td>-4,4</td></tr> <tr><td>24</td><td>-11,2</td></tr> <tr><td>24</td><td>-9</td></tr> <tr><td>24</td><td>-12,8</td></tr> <tr><td>24</td><td>-14,1</td></tr> <tr><td>24</td><td>-9</td></tr> <tr><td>24</td><td>-3,4</td></tr> <tr><td>.</td><td></td></tr> <tr><td>.</td><td></td></tr> <tr><td>.</td><td></td></tr> </table>	24	-2,1	24	-4,4	24	-11,2	24	-9	24	-12,8	24	-14,1	24	-9	24	-3,4	.		.		.		[Titre d'une série de températures (doit débuter par le mot « Hiver »)] Date de début de la série >Nom du tableau (facultatif) >En-tête des colonnes (facultatif) Durées (24 heures) et températures journalières (Il faut obligatoirement entrer des intervalles de 24 heures.) Les températures sont publiées par Environnement Canada dans le site Internet suivant : http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada_f.html
24	-2,1																						
24	-4,4																						
24	-11,2																						
24	-9																						
24	-12,8																						
24	-14,1																						
24	-9																						
24	-3,4																						
.																							
.																							
.																							

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 CHAUSSEE.

STRUCTURAL

F Mr	Mr effectif (MPa)	a (po ⁻¹)	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 :

$$\log W_{18} = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \quad \log (SN + 1) - 0,20 + \frac{\log \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \quad \log (145,04 Mr) - 8,07$$

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 (ΔPSI). 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_{18} : durée de vie de la chaussée, exprimée en nombre total admissible de passages d'essieux équivalant à un essieu à double pneu de 8 165 kg (18 000 lb);

S_0 : erreur standard de l'estimation incluant 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_R : déviation normale associée au risque de calcul (1-R). Une table statistique standard (Tableau 5) sert à déterminer directement le Z_R 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_R en fonction du niveau de confiance R

R (%)	Z_R	R (%)	Z_R
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;

M_r : 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

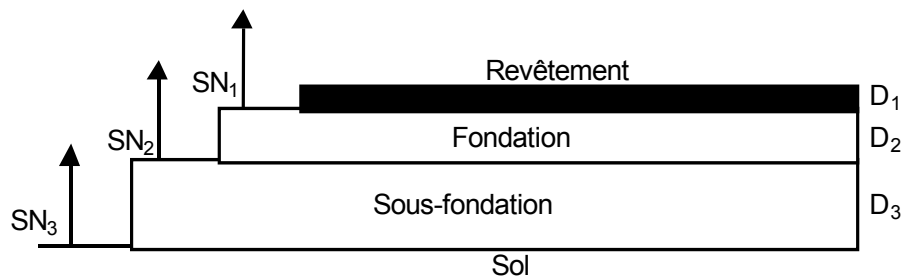
sus-jacente. Le module de résilience de chaque couche est aussi utilisé pour déterminer le nombre structural. Il faut utiliser une valeur effective tenant compte des variations saisonnières;

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



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 SN₁ avec le Mr de la couche 2 où :

$$SN_1 = a_1 D_1 / 25,4$$

où :

- SN₁** : nombre structural au-dessus de la fondation
- D₁** : épaisseur du revêtement (en mm)
- a₁** : coefficient structural du revêtement = f (Mr₁)

On doit ensuite résoudre la même équation 1 en prenant le SN₂ avec le Mr de la couche 3 où :

$$SN_2 = (a_1 D_1 + a_2 m_2 D_2) / 25,4$$

où :

SN₂ : nombre structural au-dessus de la sous-fondation

D₂ : épaisseur de la fondation

a₂ : coefficient structural de la fondation = f (Mr₂)

m₂ : 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_n : nombre structural composé pour **n** couches

D_i : épaisseur de la couche i

a : coefficient structural de la couche i = f (Mr_i)

m_i : coefficient de drainage de la couche i

Les coefficients structuraux (a_i) 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_a et K_b dépendent du type de matériau. Typiquement, les paramètres suivants sont recommandés.

	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

Le coefficient de drainage (m_i) 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. 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. 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 θ. Ce modèle est souvent utilisé dans le cas des matériaux granulaires. Ceux-ci sont dits « écouvissants », c'est-à-dire que le module augmente lorsque θ 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 _f
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_r effectif :		36,1 MPa

b) formulaire vierge

Mois	Mr, MPa	u _f
Janvier		
Février		
Mars		
Avril		
Mai		
Juin		
Juillet		
Août		
Septembre		
Octobre		
Novembre		
Décembre		
Somme :		
Moyenne :		
M_r effectif :		

$$u_f = 1,18 \cdot 10^8 (145,05 \cdot M_r)^{-2,32}$$

$$u_f = 1,18 \cdot 10^8 (145,05 \cdot M_r)^{-2,32}$$

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 :

$$FAS = \frac{Mr_{\text{effectif}}}{Mr_{\text{été}}}$$

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	
	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 > 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 < 10 % carrelage de sévérité élevée > 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 > 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) 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 des couches élastiques. 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 ou b) est recommandée pour déduire une valeur compatible avec un bassin de déflexion produit à la surface d'une chaussée bitumineuse.

$$\begin{aligned} \text{a) } M_r &= 6,89476 \times 10^{(40,894 - 0,0092d_0 + 0,022d_{305} - 0,19d_{914}) / 25,4} && \text{variante de Thompson (1989)} \\ \text{b) } M_r &= 172,608 - 1,42385d_{914} + 0,0030607d_{914}^2 && \text{variante de Hall et Elliot (1992)} \end{aligned}$$

Équation 9

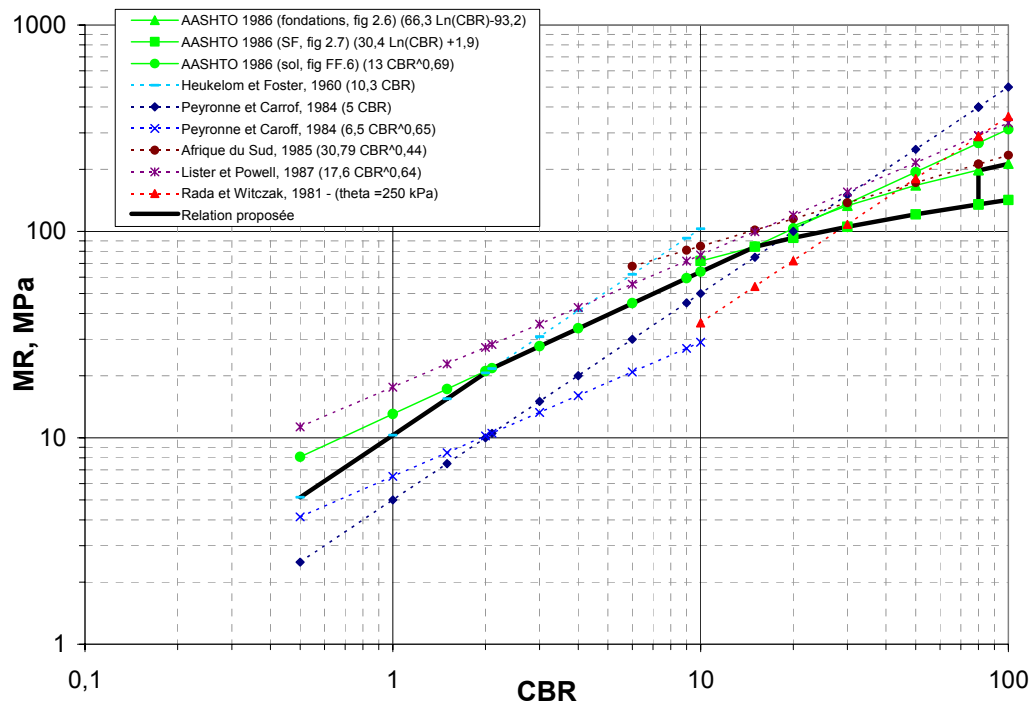
Norme d'essai ASTM D 4694 (FWD avec charge de 40 kN et diamètre de 300 mm)

d_0 , d_{305} et d_{914} : déflexions (μm) à 0; 305 et 914 mm du centre de la charge

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.

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 par contre 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



$$\text{CBR} \approx \text{Cu} / 30 \quad \text{où Cu = résistance au cisaillement non drainée (kPa)}$$

Équation 10

Normes d'essai pour le Cu (sols cohérents) :

scissomètre de chantier, norme BNQ-2501-200

scissomètre portatif (Serota et Jangle, 1972)

cône suédois, norme BNQ-2501-110

Norme d'essai pour le CBR : ASTM D 1883

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)			
ρ_d (t/m ³)	Eau (%)	SPo (mm ² /KH)	a (MPa ⁻¹)	Ku (W/mK)	Kf	Sr (%)	Lf (W/h/m ²)
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, 2003, 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 du Service 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). 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, $m^2/^\circ K h$

L_w : chaleur latente de fusion de l'eau = 92 778 Wh/m³

k_f : conductivité thermique du sol gelé, au front de gel, $W/^\circ C \cdot m$

k_u : conductivité thermique du sol non gelé, au front de gel, $W/^\circ C \cdot m$

L : chaleur latente de fusion du sol gelé, au front de gel, Wh/m^3

$R_{fz} = \sum (z_i / k_{fi})$: résistance thermique des couches gelées, $m^2 K / W$

z_i : épaisseur de la sous-couche gelée i , m

k_{fi} : conductivité thermique de la sous-couche gelée i , $W/^\circ C \cdot m$

$grad T_+ \approx 1,16 \cdot S \cdot (0,43 \cdot T_{ma} + 1)$: gradient géothermique (estimation empirique), $^\circ C / m$

T_{ma} : température moyenne annuelle de l'air ($^\circ C$)

S : coefficient d'intensité qui prend la valeur de 1,0 en novembre et décroît pour atteindre 0,7 en avril.

$grad T_- = (T_f - T_p) / z^*$: gradient de température du sol gelé au front de ségrégation, $^\circ C / m$

T_f : température de congélation, $^\circ C$

T_p : température à la surface du sol au temps dt , $^\circ C$

$z^* = k_f \cdot R_{fz} + 0,5 dz_0$

L'équation doit être résolue de façon itérative pour déterminer l'avancée du front de gel (dz_0) 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 ;

$$dh_0 = dV_i \cdot w_f \rho_d / \rho_w \cdot dz_0 \approx dV_i \cdot (S_r \cdot n) \cdot dz_0$$

Équation 12

où : dV_i : gonflement du volume interstitiel : $dV_i = (S_r - S_{rCritique})$ (Limité de 0 à 0,09)

S_r : saturation en eau (décimal)

$S_{rCritique}$: seuil de déclenchement du gonflement interstitiel (Typiquement 0,85 à 0,9)

w_f : teneur en eau gelée, kg/kg ;

ρ_d : masse volumique sèche du sol gelé, t/m^3 ;

ρ_w : masse volumique de l'eau, t/m^3 .

- Le soulèvement dû à la formation des lentilles de glace, m ;

$$dh_s = 1,09 SP grad T_- dt = 1,09 SP (T_f - T_p) dt / (k_{fz} R_{fz})$$

où SP : potentiel de ségrégation, $m^2/^\circ C \cdot H$

Équation 13

Le calcul doit se répéter pour chaque donnée de température (T_p) 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 :

$$dh = (dh_s + dh_0); h = \Sigma(dh) \qquad dz = (dz_0 + dh); z = \Sigma(dz)$$

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_0);
- le soulèvement de ségrégation issu de la formation des lentilles de glace (h_s).

Le gonflement interstitiel (h_0) 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 (S_r) 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_0) et du coefficient de surcharge (a), en utilisant la relation suivante :

$$SP = SP_0 e^{-a \cdot \sigma} \qquad \text{où } \sigma \text{ est la surcharge appliquée sur le sol (en MPa).}$$

Équation 15

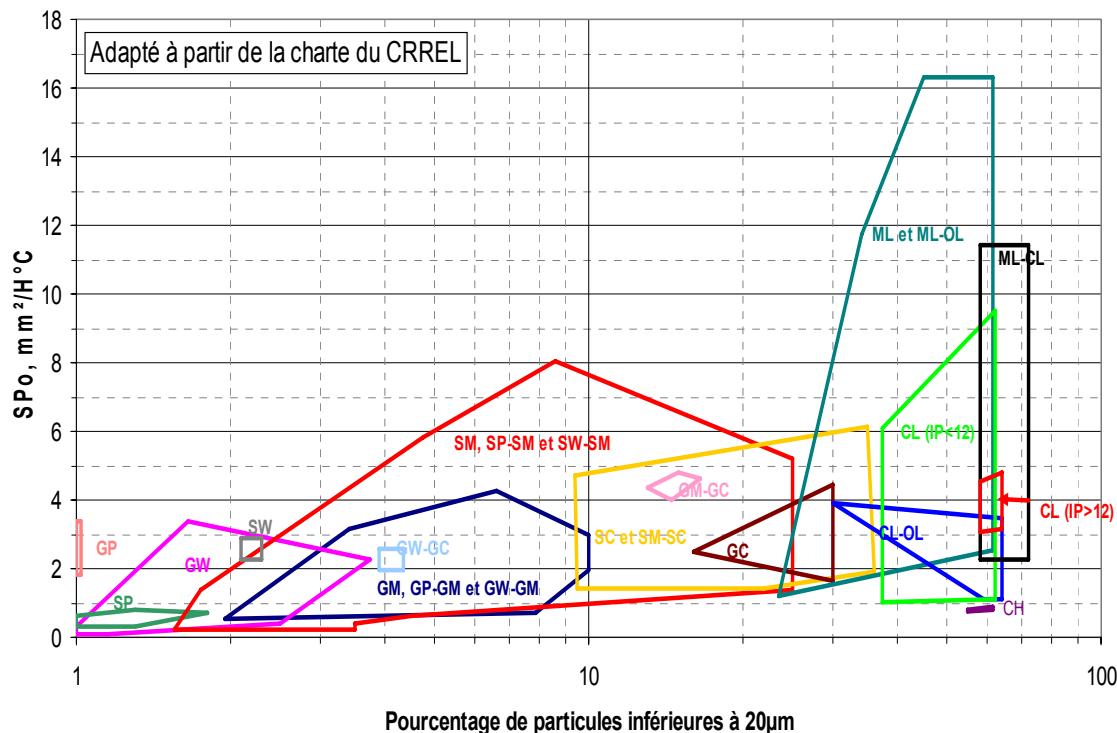
À l'intérieur du logiciel, l'affichage du coefficient de surcharge ne se fait que lorsque la valeur SP_0 est supérieure à zéro.

Tableau 9 : Échelle de gélivité

Gélivité	SP			CRREL, 1981 mm/jour	indice de soulèvement $\Delta h / h_{gel}$
	mm ² /°C·heure	mm ² /°C·jours	(x10 ⁻⁵)mm ² /°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 mm²/°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 SP₀



10.3.1 Indice de gélivité sans surcharge (SP₀)

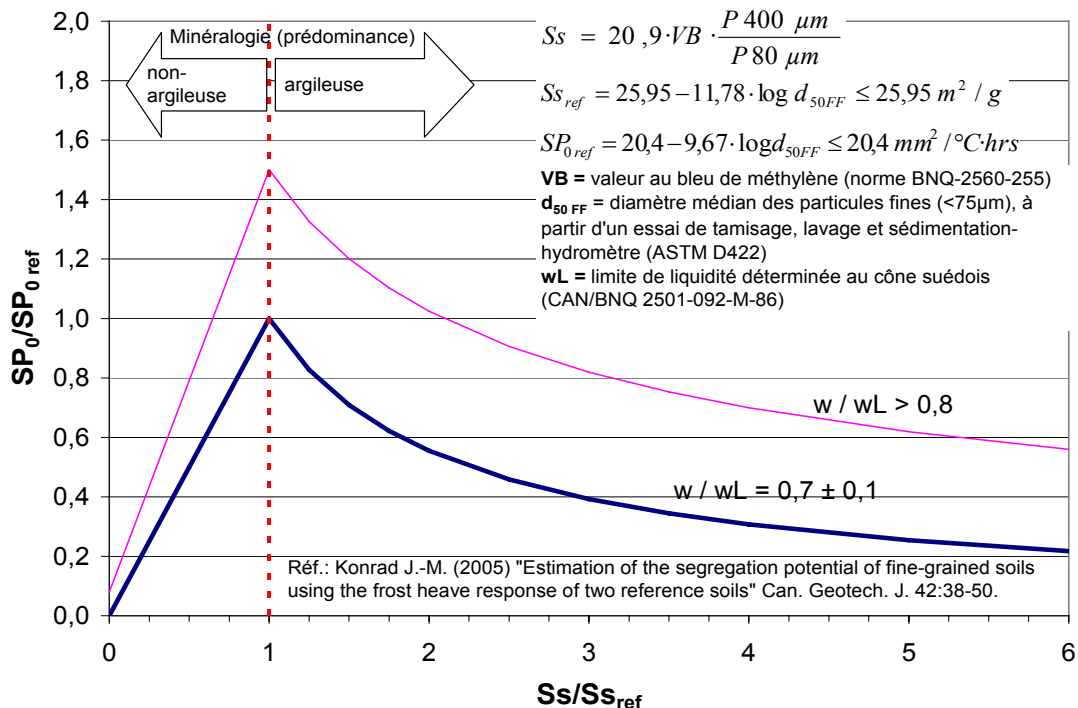
La Figure 8 montre que la classification unifiée ne permet pas une évaluation précise de la gélivité. Voici les différentes approches qui permettent de déterminer l'indice de gélivité, en ordre décroissant de précision. Plusieurs de ces approches peuvent aussi être combinées pour plus de fiabilité.

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 le Service des matériaux du ministère des Transports dans un délai d'environ une semaine.

Une autre approche très performante 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. La section 10.8 décrit les fonctions spéciales prévues dans le logiciel pour permettre de procéder de cette façon.

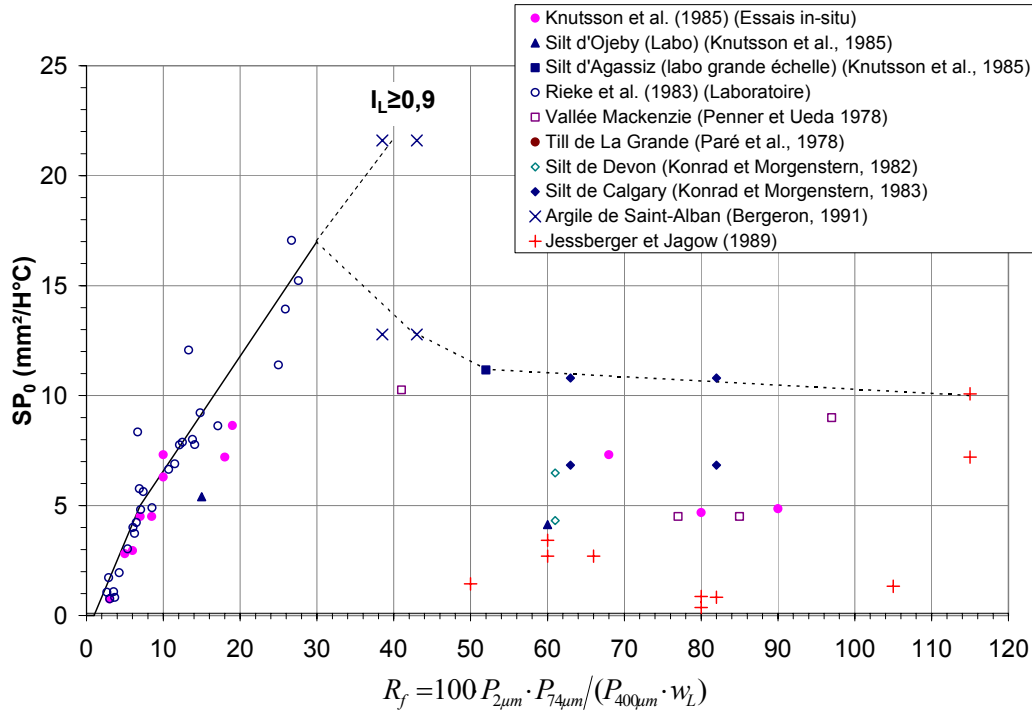
La troisième approche consiste à utiliser une corrélation empirique, proposée par Konrad (2005), à partir des essais de caractérisation habituels auxquels on ajoute une caractérisation des particules fines par sédimentométrie et un essai au bleu de méthylène. Cette approche est résumée à la Figure 9 et détaillée en annexe 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. De par la dispersion des points, cette dernière s'avère imprécise lorsque le facteur de fines (Rf) est supérieur à 30.

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^{-1} 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 80 μm)

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^{-1} a pour effet de réduire la gélivité de 40 % sous une contrainte 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)

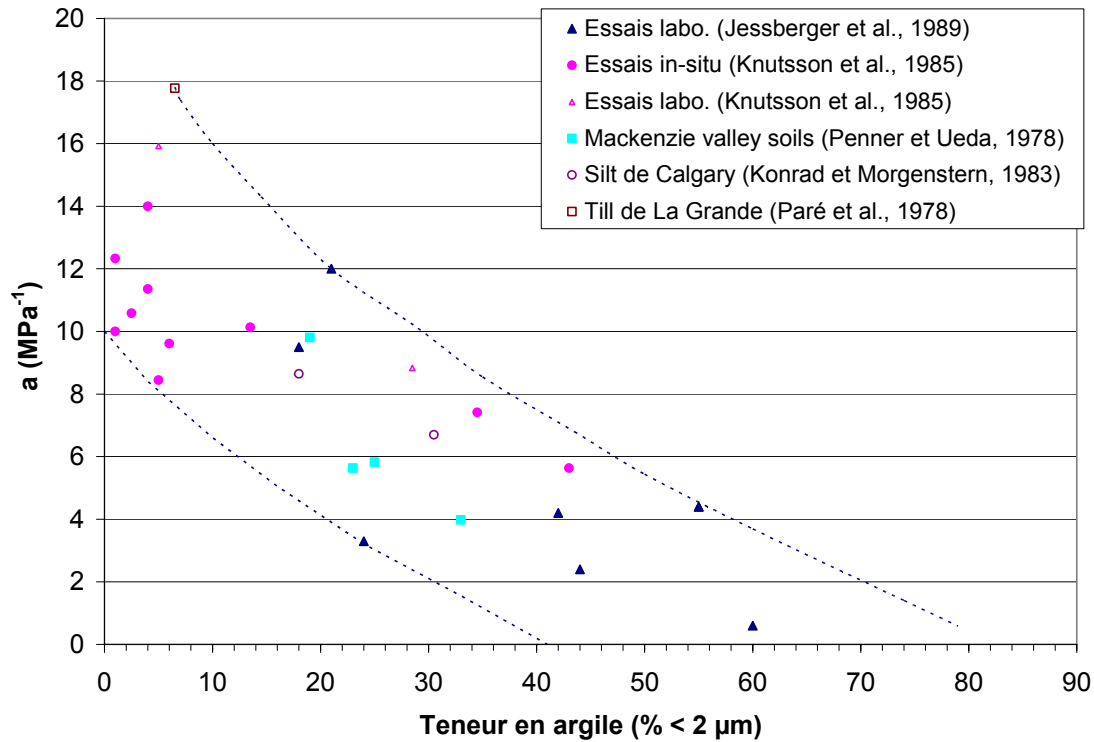
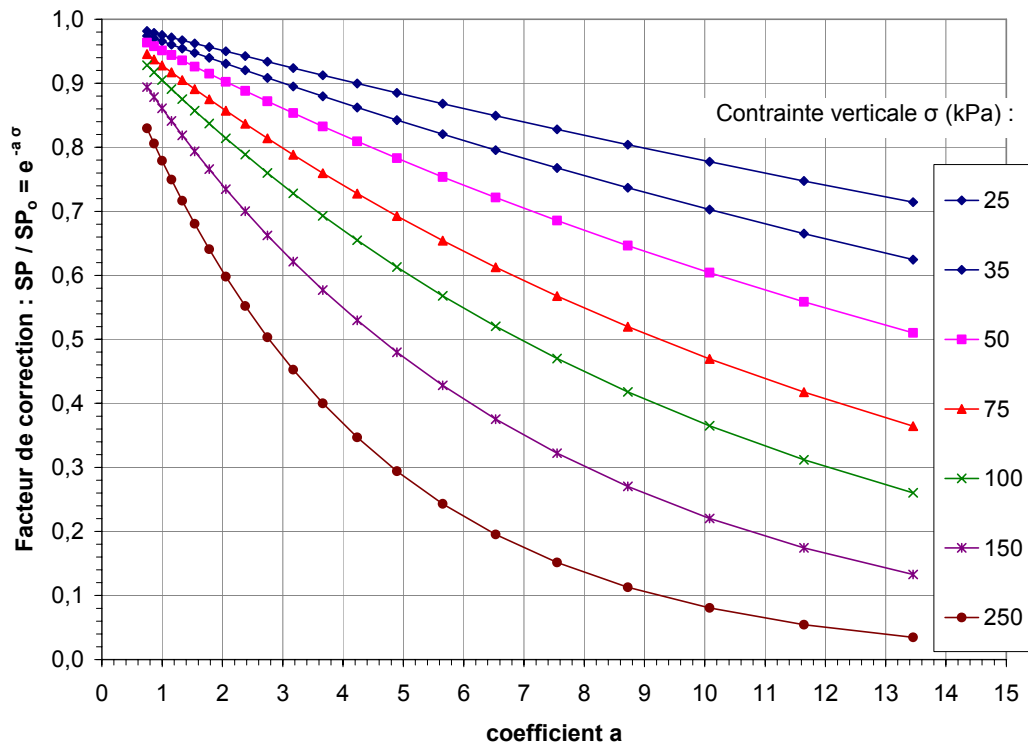


Figure 12 : Effet du coefficient de surcharge sur la gélivité



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 charge 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 CHAUSSEÉ 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 des particules solides (ρ_s)

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 (ρ_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 ρ_d du module GEL. Le Tableau 10 présente une liste de valeurs de conductivité thermique (Ks) et de masse volumique (ρ_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)

$$K_s = 2^{(1-q)} 7,7^q \quad \text{lorsque } q > 0,2$$

$$K_s = 3^{(1-q)} 7,7^q \quad \text{lorsque } q \leq 0,2$$

Équation 17

Tableau 10 : Conductivité thermique et masse volumique des particules solides

Matériau	ρ_s t/m ³	ks W/m°C
Roches		
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
Granite	2,75	2,5
Granite (Valcartier)	2,75	2,6
Granite (Lac-St-Charles)	2,65	2,6
Calcaire	2,70	2,5
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
Sols et matières organiques		
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 (Lw) est de 334MJ/m³ (92778 Wh/m³). Le logiciel CHAUSSÉE 2 calcule la valeur Lf 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	ρ_s	$\rho_b = 1,02$	$\rho_w = 1$	$\rho_i = \rho_w / 1,09$	$\rho_a = 0$
	ρ_d				
Proportion			wu	wf	$n \cdot (1 - S_r)$
	1-n	Vbe			

Les intrants au logiciel sont les suivants :

ρ_d = masse volumique sèche (tonnes/m³) (solides + bitume vs volume total)

ρ_s = masse volumique des particules solides (tonnes/m³)

w = teneur en eau, lorsque le sol n'est pas gelé (kg eau/kg solides)

V_{be} = 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_r = 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_u = teneur en eau non gelée (kg/kg) (voir l'Équation 21)

w_f = 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_s) et teneur en eau gelée (w_f) ou non gelée (w_u)

La subdivision de la teneur en eau (W) en portions gelée et non gelée (W_f et W_u) 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

(Ss) 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 (h₀).

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 (Ss) utilisée à cet endroit et la surface spécifique des particules fines (Ss_{FF}) pouvant servir au calcul de l'indice de gélivité (SP₀). Il est possible de basculer entre la teneur en eau non gelée massique (Wu) et volumique (Qu) lorsqu'on clique sur l'étiquette de titre de cette colonne.

10.8 - Étalonnage du calcul avec des mesures de terrain

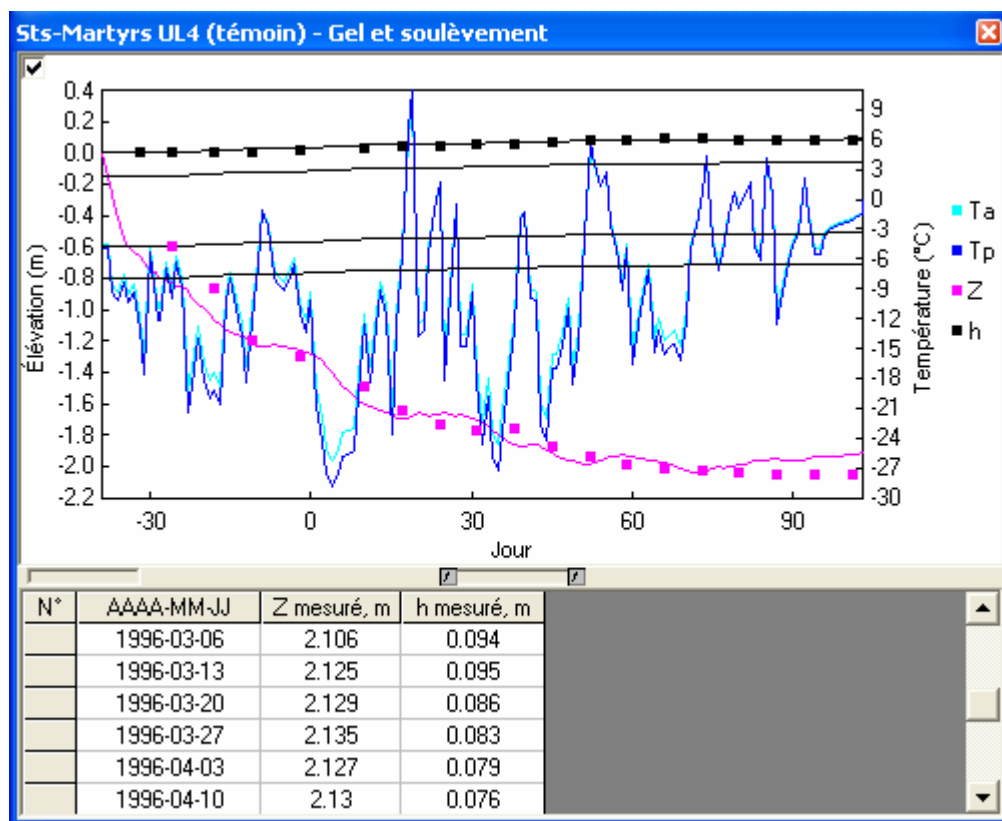
Le code de calcul du logiciel et la bibliothèque de paramètres par défaut ont été minutieusement préparés et validés pour réduire les imprécisions dans les limites du possible. La simulation théorique peut tout de même présenter certains écarts avec la réalité d'un site donné.

Il est possible d'effectuer un étalonnage 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.

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

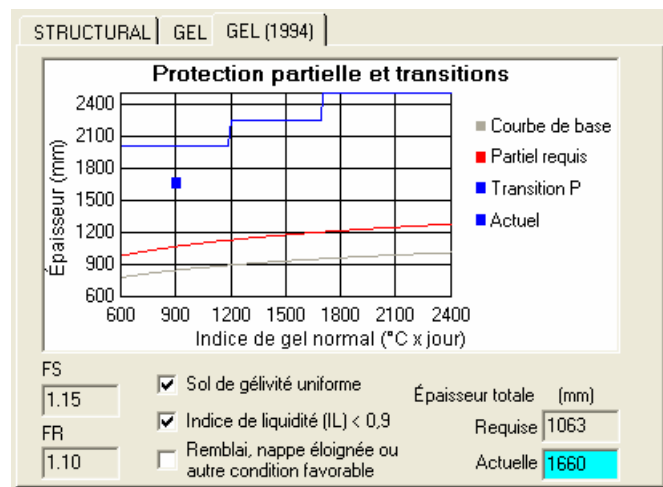


11 - CRITÈRE DE GEL DE 1994

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.

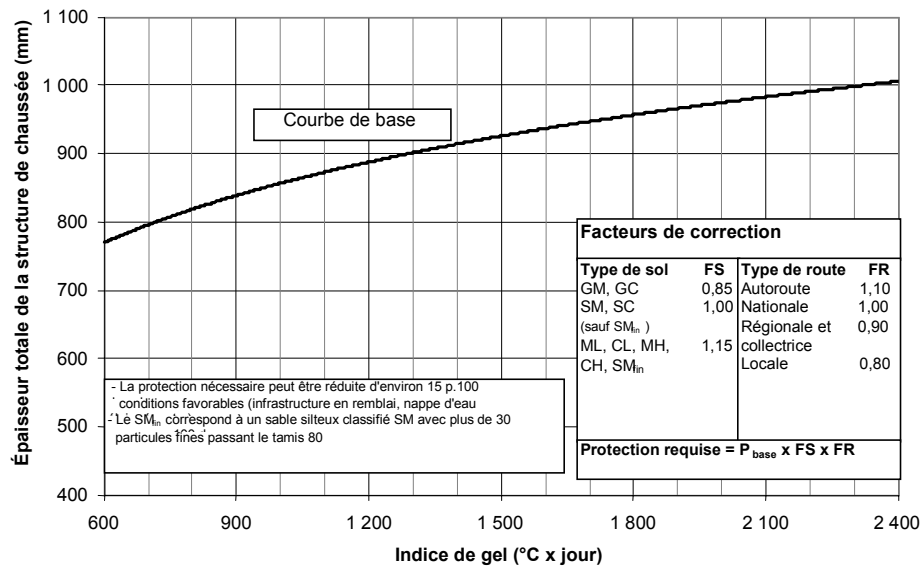
Le critère de protection partielle fournit l'épaisseur totale minimale de la structure de chaussée. La règle de détermination des profondeurs « P » pour transitions, Norme II-1.8 (Tableau 1.8-1), y est aussi mise en parallèle

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 fixe comme une coupe de roc ou un ouvrage d'art. 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. 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 normal (°C x jours)	Route locale (%)	Autoroute (%)
800	60	80
1 200	50	70
2 000	40	60

IMPORTANT : Si le sol 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 différentiels¹.

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 μ m.

¹ Une case « Sol homogène » a été ajoutée dans le logiciel CHAUSSÉE 2 pour rendre cette directive plus évidente. 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 2.4-1 à 2.4-4 de la norme II-2.4.1 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.

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 2.4-4 de cette norme.

La norme est publiée en ligne sur le site Internet suivant (Tome II, Construction routière, chapitre 2) :

http://www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits/ouvrage_routier.fr.html

La norme ne peut pas être utilisée lorsque le sol de support est composé d'une argile varvée ou lorsqu'il est composé d'un sol argileux ayant un indice de liquidité élevé ($I_L \geq 0,9$).

13 - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Principaux liens utiles du ministère des Transports (normes, devis types, documents contractuels, guides, manuels, bulletins Info DLC, etc.) :

- http://www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits/ouvrage_routier.fr.html
- <http://www.mtq.gouv.qc.ca/fr/publications/affaires/contrats/index.asp#devis>
- <http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/reseau/chaussees/index.asp>

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
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
11. DARTER, M.I., et autres (1985). *Portland Cement Concrete Pavement Evaluation System (COPES)*, NCHRP Report 277, Transportation Research Board.
12. 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.
13. ENVIRONNEMENT CANADA : www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.

18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. KONRAD, J.-M. (1998). « Méthodologie pour la conception de chaussées urbaines sur sols gélifs » *Revue Géoglobe*, Automne 1998, pp. 12-15.
22. 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/>
23. 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.
24. KONRAD, J.M., et N.R. MORGENSTERN (1983). « Frost susceptibility of soils in terms of their segregation potential », Proceedings of the 4th Intl. Conference on Permafrost, University of Alaska and National Academy of Sciences, National Academy Press, Washington DC.
25. LADANY, B. (1996). « La conception et la réhabilitation des infrastructures de transport en régions nordiques », *Études et Recherches en transport*, Transports Québec.
26. LANGLOIS, P. (2003). « Enrobés. Formulation selon la méthode LC ». Gouvernement du Québec.
27. MEEUS, J. (1991). *Astronomical Algorithms*. William-Bell Inc..
28. Normes – Ouvrages routiers (Tomes I à VII), Les Publications du Québec. Documentation en ligne sur Internet : http://www.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits/ouvrage_routier.fr.html
29. 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.
30. RIOUX, N. (1999). « Impacts du gel sur les chaussées au Québec », *Revue Innovation Transport*, n° 4, p. 13-6 (février).
31. 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.
32. SAVARD Y., et autres (2004). « Amélioration de la performance des chaussées souples 1992-2002 (construction ou reconstruction) », 39^e Congrès annuel de l'Association québécoise du transport et des routes (AQTR), Québec, Canada.
33. 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.

34. SERVICE DES CHAUSSEES (1995). « Dimensionnement structural des chaussées ». Notes de cours, ministère des Transports du Québec (mars).
35. ST-LAURENT, D. et P. LANGLOIS (2006). « Potentiel pour des chaussées bitumineuses à durée de vie prolongée », 41^e congrès annuel de l'Association québécoise du transport et des routes (AQTR) (avril).
36. 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.
37. TRANSPORTS QUÉBEC (1994). *Normes – Ouvrages routiers, Construction routière*. Tome II, chapitre 2, « Structures de chaussées », Les Publications du Québec.
38. 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.
39. 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.
40. 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 le Service des chaussées à l'adresse suivante pour toute information additionnelle. Nous vous invitons à nous faire connaître vos commentaires et suggestions.

Service des chaussées
Ministère des Transports du Québec
930, chemin Sainte-Foy, 5^e étage
Québec (Québec) G1S 4X9

Téléphone : 418 644-0890
Télécopie : 418 646-6195
Courriel : logicielchaussee@mtq.gouv.qc.ca
Site Internet : <http://www.mtq.gouv.qc.ca>

ANNEXE I

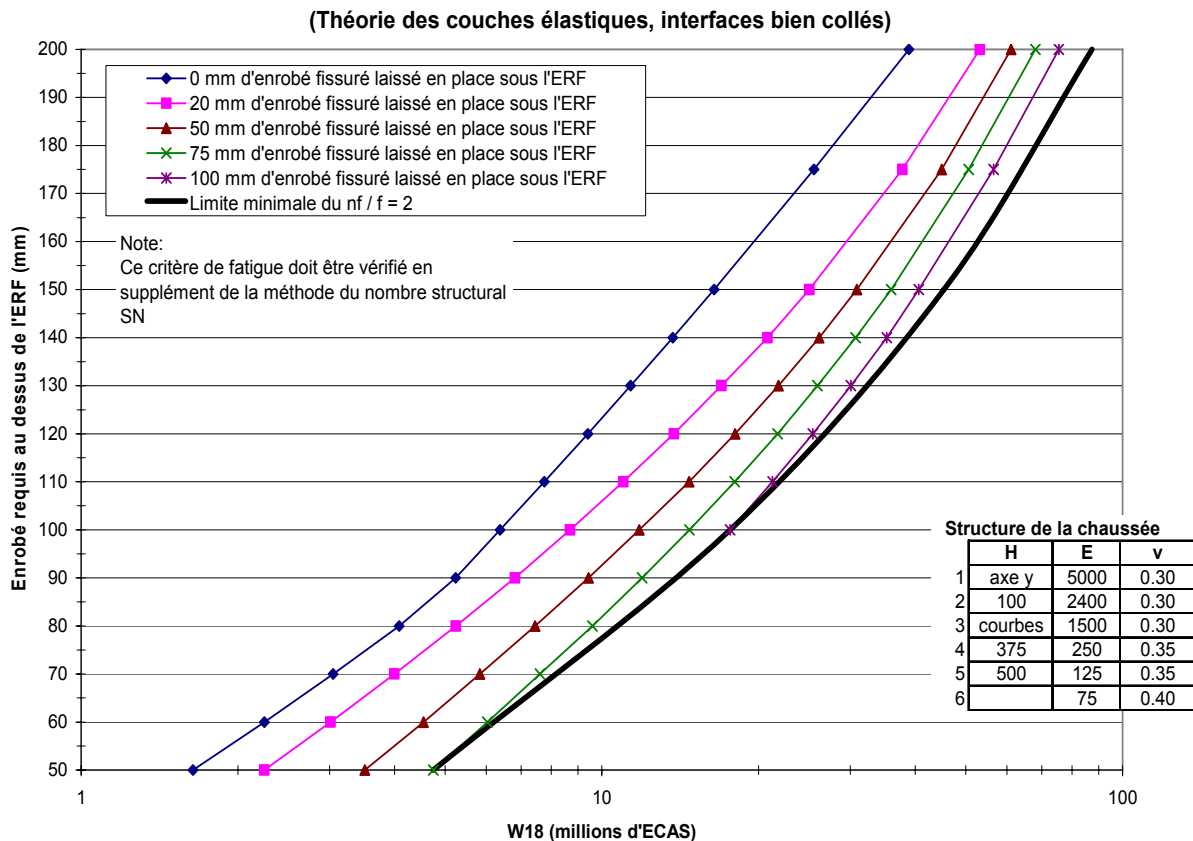
Recyclage à froid des enrobés (RFE)

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 ($nf / f > 2$) 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 devrait 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 au Service des matériaux d'infrastructures (SMI) du ministère des Transports et demande un délai minimum d'une semaine. Cette méthode est recommandée à titre d'approche la plus fiable. 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 (σ) 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 CHAUSSEE utilise la valeur sans surcharge (SP_0) qu'on peut obtenir avec l'équation suivante :

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

Personne-ressource au SMI : Claude Robert au Service des matériaux d'infrastructures, 2700 rue Einstein, Québec (Québec), G1P 3W8, (tél. : 418 644-0781, poste 232).

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 et les sols avec une matrice de particules grossières peuvent s'avérer moins gélifs. Il est recommandé de transmettre quelques échantillons témoins au SMI pour évaluation parallèle 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 80µm). 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 400µm)

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 ($\text{mm}^2/\text{H}^\circ\text{C}$)

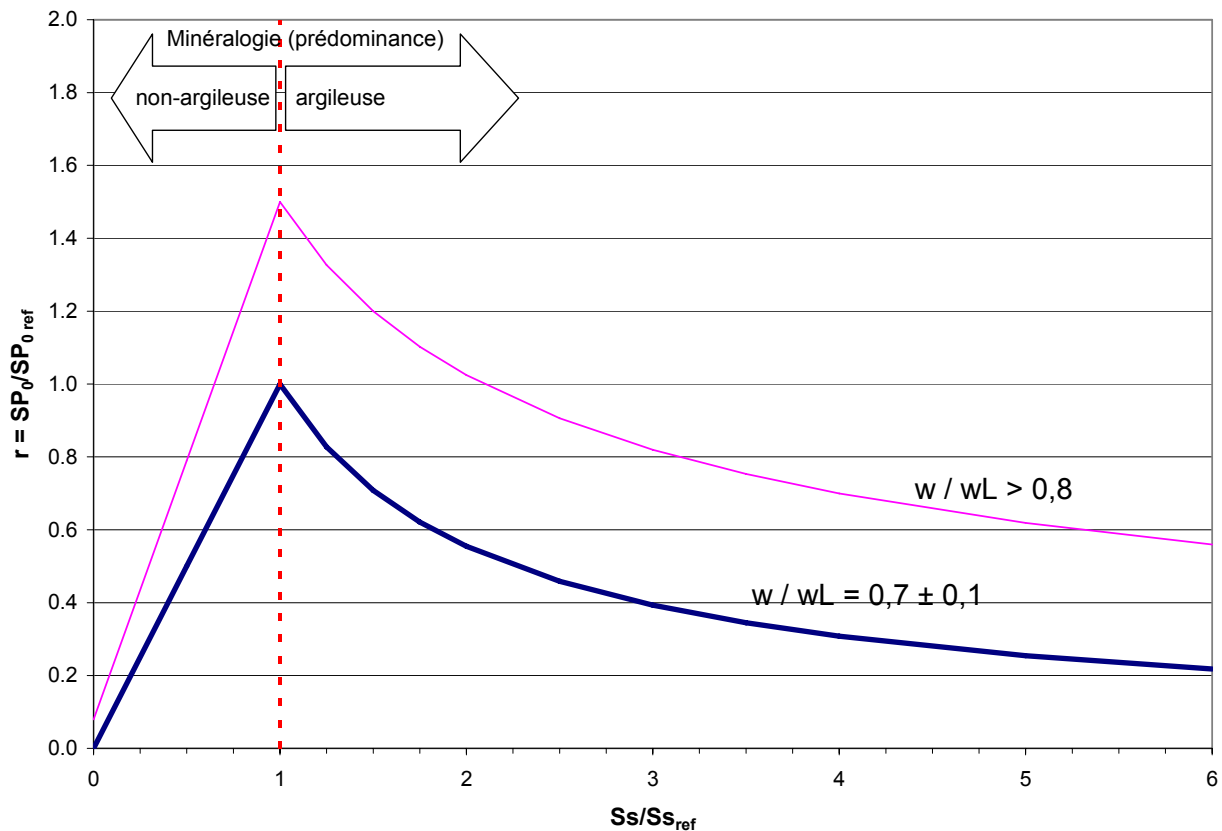
a = coefficient de surcharge (MPa^{-1})

$$r = \left(\frac{SP_0}{SP_{0ref}} \right) = f \left(\frac{S_s}{S_{sref}}, \frac{w}{w_L} \right) \text{ (Déduire } r \text{ sur la figure suivante)}$$

$$S_s = 20,9 \cdot VB \cdot \frac{P_{400\mu m}}{P_{80\mu m}} = \text{surface spécifique (m}^2/\text{g)}$$

$$S_{sref} = 25,95 - 11,78 \cdot \log d_{50FF} \leq 25,95 \text{ m}^2/\text{g} \text{ (Limiter cette valeur à 25,95, maximum)}$$

$$SP_{0ref} = 20,4 - 9,67 \cdot \log d_{50FF} \leq 20,4 \text{ mm}^2 / ^\circ\text{C} \cdot \text{hrs} \text{ (Limiter cette valeur à 20,4, maximum)}$$



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 CHAUSSEES

Références complémentaires

Il faut consulter les normes et directives suivantes concernant l'utilisation des couches isolantes en polystyrène.

- Norme 14301 « Polystyrène pour construction routière »
- Norme « Structures de chaussées », tome II, chap. 2.6
- CCDG, chapitre 19.9

Le devis type « Isolation des chaussées » (ci-joint) est recommandé en attendant la mise à jour de ces documents. Ce dernier prévoit notamment l'amélioration de la zone de transition ainsi que l'admissibilité du polystyrène expansé lorsque la vérification structurale est jugée satisfaisante.

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 :

<http://www1.mtq.gouv.qc.ca/fr/publications/reseau/infodlc/2003-2004/03-12.pdf>

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)

σ_o = pression de contact pneu-chaussée (700 kPa)

σ_a = pression admissible (environ 10 % de la résistance en compression de l'isolant, kPa)

Les polystyrènes ont un module de résilience très faible (≤ 15 MPa). Pour cette raison, une étude particulière est requise pour les utilisations à grandes épaisseurs comme dans le cas des remblais allégés.

Amélioration de la zone de transition

La plus grande difficulté d'un projet d'isolation consiste à bien réussir les transitions, étant donné le contraste potentiel entre une zone isolée (aucun effet de gel) et la route normale existante. La situation idéale consiste à éliminer le besoin d'une transition en terminant l'isolation sur un affleurement rocheux ou

à la jonction d'un autre point fixe tel qu'un ouvrage d'art. Sinon, il est recommandé de terminer l'isolation dans un secteur en remblai plutôt qu'en déblai.

L'expérience indique que le dessin normalisé DN-II-2-010 est souvent peu satisfaisant. Le problème se situe principalement à la jonction entre l'épaisseur minimale de 25 mm et le secteur non isolé. Il s'agit donc de concevoir une zone tampon supplémentaire pour atténuer la différence de régime thermique à ce point de jonction. L'amélioration peut se faire de diverses manières (transition en terrassement conventionnel, fabrication de panneaux d'épaisseur inférieure à 15 mm, etc.) L'approche la plus simple semble l'utilisation de panneaux perforés pour une capacité isolante réduite. Le devis type ci-joint propose un dessin amélioré en ce sens pour les extrémités des secteurs isolés. L'insertion d'un patron de perforation unique, avec une surface trouée à environ 23 %, permet d'atténuer de moitié le différentiel de soulèvement au point de jonction et constitue une amélioration importante. L'insertion de zones d'atténuations additionnelles, telles que la variante indiquée avec deux patrons de perforation distincts, pourrait cependant s'avérer préférable pour les cas de gélivité jugés plus sévères.

DEVIS TECHNIQUE SPÉCIAL
PROTECTION CONTRE LE GEL À L'AIDE D'UN ISOLANT
THERMIQUE EN POLYSTYRÈNE (SUR UNE
ROUTE EXISTANTE)

1. CARACTÉRISTIQUES DE L'ISOLANT

L'isolant doit être conforme aux exigences de la norme 14301 « Polystyrène pour construction routière ». Les exigences du tableau 14301-1 sont transcrites dans le tableau 1 à des fins de référence et s'appliquent par défaut. En pratique, seuls les polystyrènes extrudés sont capables d'atteindre la résistance de 400 kPa permettant de supporter toutes les classes de circulation routière.

Tableau 1 : Caractéristiques physiques et mécaniques du polystyrène pour l'isolation thermique des chaussées (spécification de 400 kPa)

Propriétés	Méthodes d'essais	Exigences
Résistance à la compression (min.)	ASTM D 1621	400 kPa ¹
Module de compression (min.)	ASTM D 1621	15 MPa
Résistance thermique (min.)	ASTM C 177	0,86 m² °C/W
Absorption d'eau en volume (max.)	ASTM D 2842	0,7 %

¹ : À une déformation ou un fléchissement de 5 % selon la première éventualité dans le cas d'un polystyrène extrudé.

Ces exigences peuvent être remplacées par celles du tableau 2 ci-dessous lorsque le concepteur autorise l'utilisation d'une couche isolante ayant une résistance en compression de 250 kPa. Dans ce cas, l'entrepreneur peut utiliser comme couche isolante soit du polystyrène extrudé, soit du polystyrène expansé à haute densité (EPSHD).

Tableau 2 : Caractéristiques physiques et mécaniques du polystyrène pour l'isolation thermique des chaussées (spécification de 250 kPa)

Propriétés	Méthodes d'essais	Exigences	
		Extrudé	Expansé
Résistance à la compression (min.)	ASTM D 1621	250 kPa ¹	250 kPa
Module de compression (min.)	ASTM D 1621	9 MPa	9 MPa
Résistance thermique (min.)	ASTM C 177	0,86 m² °C/W	0,69 m² °C/W
Absorption d'eau en volume (max.)	ASTM D 2842	0,7 %	2,5 %

¹ : À une déformation ou un fléchissement de 5 % selon la première éventualité dans le cas d'un polystyrène extrudé.

L'épaisseur de polystyrène est spécifiée par le concepteur selon les résultats de l'analyse thermique. Cette épaisseur doit être multipliée par un facteur 1,2 dans le cas d'un polystyrène expansé par rapport à un polystyrène extrudé.

2. POSE DE L'ISOLANT

La pose et le paiement de l'isolant doivent se conformer à l'article 19.9 du Cahier des charges et devis généraux (CCDG) ainsi qu'à la norme Construction routière (Tome II, article 2.6).

La pose de l'isolant peut se faire de deux façons différentes selon le rehaussement admissible du profil de la chaussée.

2.1 Lorsque les travaux nécessitent une excavation de la structure de chaussée existante pour éviter ou limiter un rehaussement du profil, la méthode à suivre est la suivante :

2.1.1 Enlever le revêtement existant et le matériau granulaire sous-jacent jusqu'à la profondeur requise pour la mise en place de la nouvelle structure de chaussée. Le revêtement existant peut être plané et ensuite décohésionné avec la fondation granulaire sous-jacente pour former un matériau de type MR5. Le matériau MR5 et la fondation granulaire peuvent être réutilisés au-dessus de l'isolant thermique dans le cas où la granulométrie et la qualité respectent les caractéristiques requises des matériaux de fondation.

2.1.2 Nivelier ensuite le fond de l'excavation de telle sorte qu'après le compactage sa surface soit parallèle à la surface finie du revêtement. Si le sol ainsi mis à nu est cohésif ou instable, il faut excaver une épaisseur supplémentaire d'au moins 150 mm, niveler de nouveau selon la méthode précitée et poser une couche de matériau granulaire MG-112 dont l'épaisseur, après compactage, est la même que celle de la couche excavée précédemment. La surface sur laquelle l'isolant est placé doit être uniforme et constituer un support suffisamment fort et stable pour que tout danger de rupture de l'isolant par flexion ou cisaillement soit écarté.

2.1.3 Placer ensuite les panneaux en quinconce comme montré sur le dessin normalisé DN-II-2-010 de la norme Construction routière. L'entrepreneur devra prendre soin de faire coïncider l'un des joints longitudinaux avec la ligne de centre de la chaussée. Les panneaux doivent être pressés les uns contre les autres et fixés solidement de façon que tous les joints demeurent bien fermés au moment de la mise en place de la couche granulaire sus-jacente.

2.1.4 Dans le cas où les extrémités du secteur isolé ne peuvent se terminer dans une infrastructure de nature non gélive (sol naturel, structure, remblai ou roc), la transition thermique illustrée sur le dessin normalisé DN-II-2-010 de la norme Construction routière est modifiée de manière à la prolonger d'au moins 4,88 m (deux longueurs de panneau) afin d'obtenir une valeur isolante intermédiaire entre l'épaisseur d'isolation de 25 mm et l'épaisseur zéro (voir Figure 1). Cet ajout peut se faire au choix selon l'une des méthodes suivantes :

- a) Panneaux en demi-épaisseur (12,5 mm en extrudé ou 14 mm en expansé).

- b) Panneaux de 25 mm d'épaisseur avec une surface perforée à 23 %, à l'aide de trous uniformément espacés selon l'un des patrons de perforation suivants :
 - i. 75 trous de 75 mm de diamètre;
 - ii. 42 trous de 100 mm de diamètre;
 - iii. 19 trous de 150 mm de diamètre;
 - iv. 10 trous de 200 mm de diamètre.

Variante de l'article 2.1.4 recommandée pour atténuer des différentiels de soulèvement plus importants

2.1.5 Dans le cas où les extrémités du secteur isolé ne peuvent se terminer dans une infrastructure de nature non gélive (sol naturel, structure, remblai ou roc), la transition thermique illustrée sur le dessin normalisé DN-II-2-010 de la norme Construction routière est modifiée de manière à la prolonger d'au moins 12,2 m (cinq longueurs de panneau) afin d'obtenir une capacité isolante progressivement réduite (65% et 30%), entre l'épaisseur d'isolation de 25 mm et l'épaisseur zéro (voir Figure 1). Cette insertion peut se faire avec la succession des deux patrons de perforation suivant :

- a) Panneaux de 25 mm d'épaisseur avec une surface perforée à 11 %, à l'aide de trous uniformément espacés selon l'un des patrons de perforation suivants :
 - i. 35 trous de 75 mm de diamètre;
 - ii. 20 trous de 100 mm de diamètre;
 - iii. 9 trous de 150 mm de diamètre;
 - iv. 5 trous de 200 mm de diamètre.

- b) Suivis d'une extrémité de panneaux de 25 mm d'épaisseur avec une surface perforée à 30 %, à l'aide de trous uniformément espacés selon l'un des patrons de perforation suivants :
 - i. 35 trous de 75 mm de diamètre;
 - ii. 20 trous de 100 mm de diamètre;
 - iii. 9 trous de 150 mm de diamètre;
 - iv. 5 trous de 200 mm de diamètre.

2.2 Lorsque le profil de la chaussée peut être haussé à volonté, il y a généralement avantage à garder en place les matériaux non gélifs qui s'y trouvent déjà (fondation et revêtement) et de placer l'isolant au-dessus du revêtement. La méthode à suivre dans ce cas est la suivante :

2.2.1 Poser une couche de correction en béton bitumineux de façon à combler toute dépression dans le revêtement existant et ainsi obtenir une couche de support en pente régulière vers les fossés.

2.2.2 Élargir la plate-forme existante et compacter soigneusement jusqu'à la paroi des fossés latéraux conformément aux exigences du cahier des charges.

2.2.3 Placer l'isolant sur la couche de support ainsi préparée en utilisant la méthode décrite dans les articles 2.1.3 et 2.1.4.

3. POSE DE LA FONDATION SUPÉRIEURE ET DU REVÊTEMENT

3.1 Le matériau granulaire placé entre le revêtement et l'isolant doit être mis en place conformément aux exigences du CCDG (chapitre 12). Il doit être déposé sur la surface isolante et étendu sur une épaisseur minimale de 450 mm, en prenant soin de n'exercer aucune pression pouvant entraîner un déplacement des panneaux de polystyrène. La couche granulaire est amincie ensuite en poussant l'excédent vers l'accotement de façon qu'il ait une épaisseur de 300 mm une fois compacté selon les exigences du cahier des charges. Une seconde couche permettant d'atteindre l'épaisseur spécifiée dans les plans et devis doit être appliquée pour faciliter la circulation normale des camions.

3.2 On procède ensuite à la pose du revêtement bitumineux.

4. PARAMÈTRES DE CONCEPTION

Les paramètres de conception, conformément au présent document, doivent spécifier ce qui suit :

- Localisation du secteur à isoler :
- Épaisseur minimale de la sous-fondation (sous l'isolant) : _____ mm;
- Épaisseur minimale de l'isolant (art. 1) : _____ mm;
- Épaisseur minimale de la fondation au-dessus de l'isolant (art. 3.1) : _____ mm;
- Épaisseur minimale du revêtement : _____ mm.

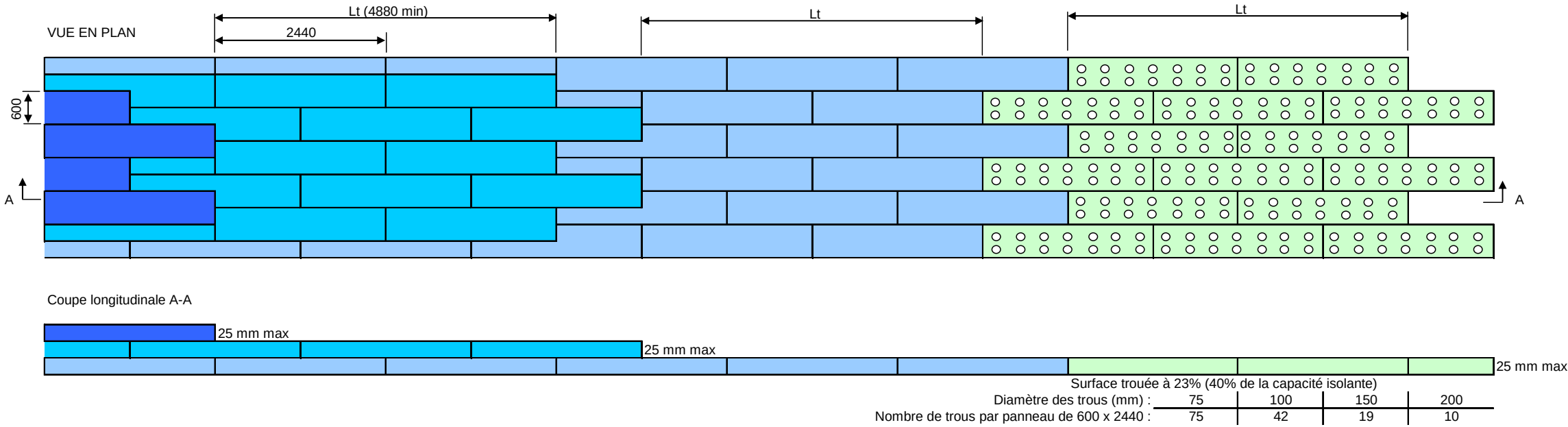
Préparé par : Denis St-Laurent, ing. M. Sc.
Service des chaussées

Québec, le 19 décembre 2006

Figure 1 :

Isolation thermique au polystyrène

Complément au dessin normalisé DN-II-2-010 (allongement de la transition avec des rangées de panneaux perforés)

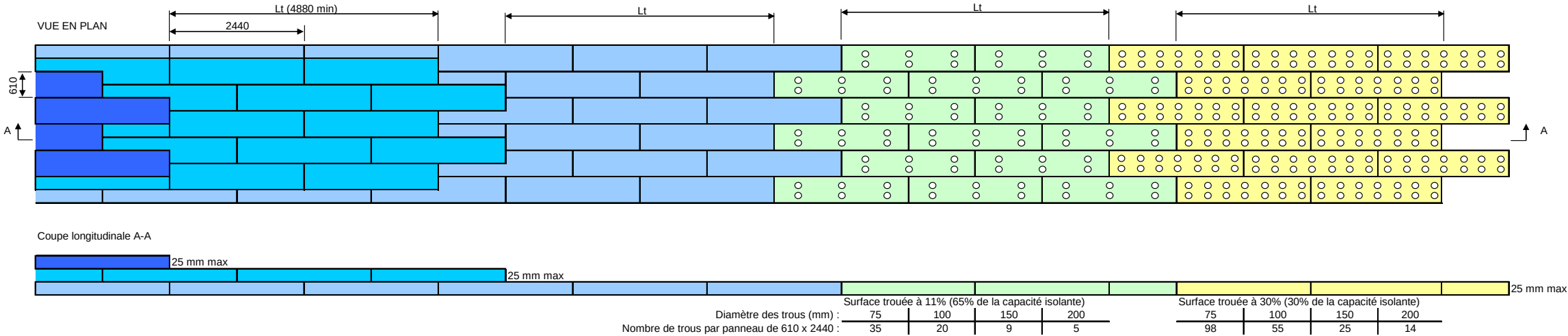


(Choisir un seul des 4 patrons de perforation indiqués selon le diamètre de trous choisi)

Figure 1:

Isolation thermique au polystyrène

Complément au dessin normalisé DN-II-2-010 (allongement de la transition avec deux séries de rangées de panneaux perforés) (Variante avec deux patrons de perforation)



(Retenir un patron de perforation sur quatre, selon le diamètre de trous choisi)

Votre évaluation personnelle du cours a pour but de nous guider en vue d'améliorer la formation d'un ministère/organisme.
Vos commentaires sont donc très précieux.

Titre du cours	
Date du cours	Durée
Nom de la ou des personnes qui ont donné la formation	Numéro de la salle de cours
Nom de l'entreprise ou de l'établissement (s'il y a lieu)	
Votre nom (facultatif)	Numéro du corps d'emploi auquel vous appartenez

Cocher la case de l'énoncé qui correspond le mieux à votre opinion.

1. En désaccord avec l'énoncé (--) 2. Plus ou moins d'accord (-) 3. Plutôt d'accord (+) 4. Tout à fait d'accord (++)

Objectifs, contenu et méthodologie

	1 (--)	2 (-)	3 (+)	4 (++)
1. Les objectifs étaient clairs et précis.	☐	☐	☐	☐
2. Le contenu répondait à mes besoins.	☐	☐	☐	☐
3. Il y avait un bon équilibre entre la théorie et la pratique.	☐	☐	☐	☐
4. Le temps de formation était suffisant.	☐	☐	☐	☐
5. La documentation fournie était utile.	☐	☐	☐	☐
6. Les techniques utilisées ont facilité mon apprentissage.	☐	☐	☐	☐

La personne-ressource

7. Possède bien le contenu.	☐	☐	☐	☐
8. A bien présenté le contenu.	☐	☐	☐	☐
9. A favorisé les interactions dans le groupe.	☐	☐	☐	☐
10. A respecté mon rythme d'apprentissage.	☐	☐	☐	☐

Ce que je **retiens** de cette formation :

Commentaires

Deux éléments qu'il faut **conserver** dans cette formation :

Deux éléments qu'il faut **améliorer** dans cette formation :