



Chaire de recherche industrielle
du CRSNG sur l'interaction
Charges lourdes/Climat/Chaussées



Logiciel mécaniste-empirique pour la conception des chaussées souples: i3C-ME

Infra 2014

Décembre 2014

Damien Grellet, Laurie-Anne Grégoire, Jean-Pascal Bilodeau, Guy Doré

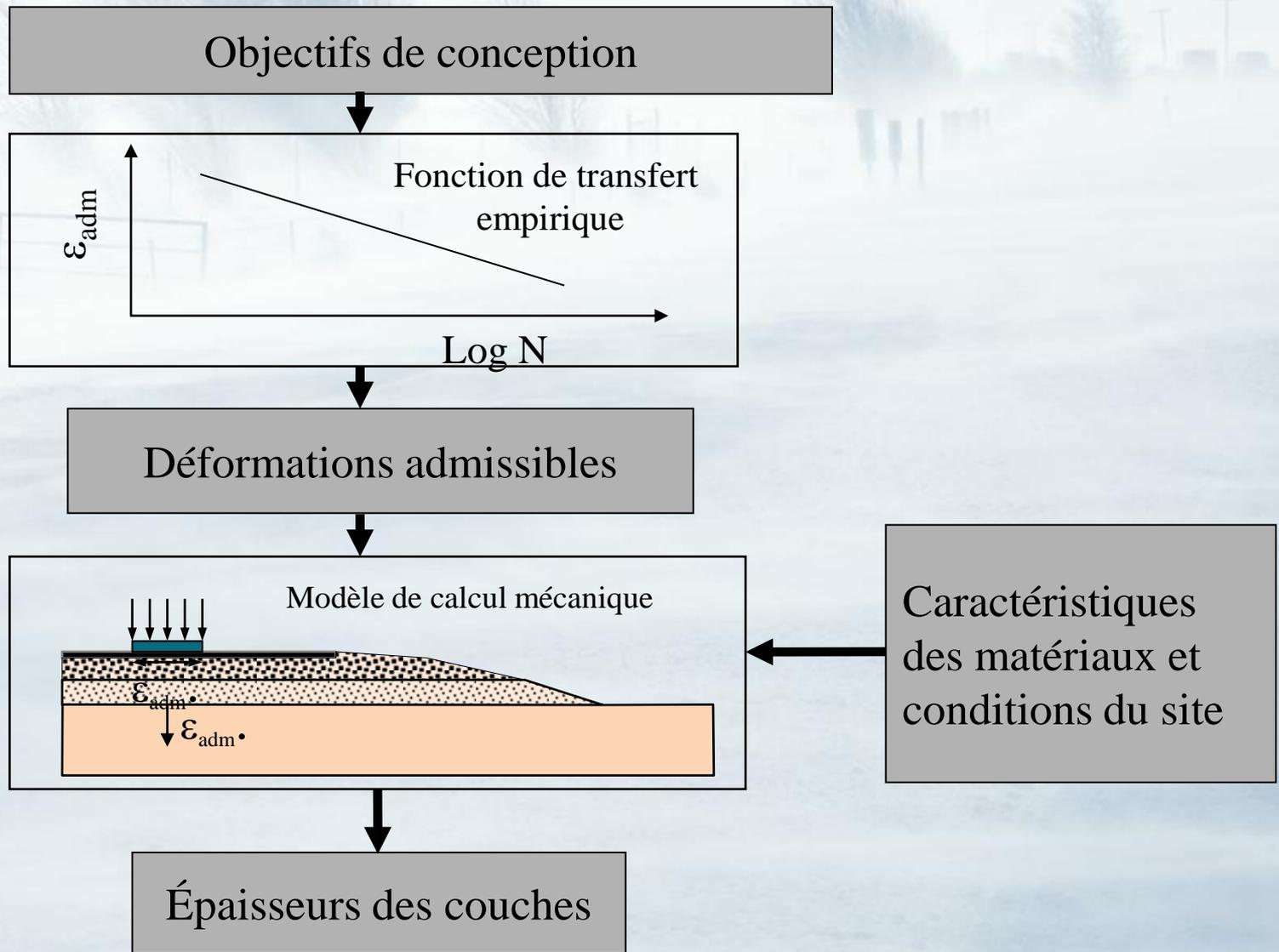


Introduction

- La pratique courante pour la conception des chaussées au Québec fondée sur les modèles empiriques dérivés de l'essai AASHTO
 - Importantes limitations
- La tendance actuelle est d'adopter des méthodes fondées sur une approche mécaniste-empirique
 - DARWIN-ME



Approche mécaniste-empirique de conception



Objectifs du projet

- Développer un logiciel de dimensionnement mécaniste-empirique adapté aux conditions urbaines et rurales québécoises
- Aider et assister à la conception de tous types de chaussées pour un climat et une classe de trafic imposés.
- Intégrer les résultats de recherche de la Chaire de recherche i3C pour mieux répondre aux besoins des gestionnaires de réseaux routiers

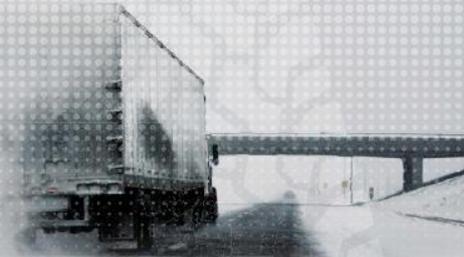


Caractéristiques souhaitées

- Le logiciel vise à être convivial, intuitif et simple d'utilisation
- Le logiciel permet à l'utilisateur d'effectuer des choix lors des étapes du dimensionnement mais aussi de les personnaliser



Ecran d'accueil (tableau de bord)



OBJECTIF DE CONCEPTION

DONNÉES CLIMATIQUES

ϵ_{adm}
 N_d
DÉFINITION DES MODÈLES DE PERFORMANCE

DÉFINITION DE LA CHARGE

DÉFINITION DE LA STRUCTURE DE LA CHAUSSÉE

CALCUL DE L'EFFET DU GEL

INFORMATION GÉNÉRALE

DÉMARER LES CALCULS

Logiciel mécaniste-empirique de conception des chaussées souples i3c : développé par la Chaire de recherche industrielle du CRSNG sur l'interaction Charges lourdes/Climat/Chaussées



Module 1: Objectif de conception

- Calcul du nombre total d'applications de charge N (en ECAS)
- Outil de calcul du coefficient d'agressivité moyen des véhicules

Détermination du nombre d'Équivalent Charge Axiale Simple (ÉCAS)

Caractéristique de la route

Type de route : Classe de la route :

Détermination du nombre d'Équivalent Charge Axiale Simple (ÉCAS)

Calcul du nombre d'Écas

Détermination de l'agressivité des véhicules

Verifiez les caractéristiques des véhicules en cliquant sur les contrôles ci-dessous:

1- 2- 3-

Nom descriptif du véhicule:

Groupe d'essieu 1:
Configuration de l'essieu: Poids à l'essieu:

Groupe d'essieu 2:
Configuration de l'essieu: Poids à l'essieu:

Groupe d'essieu 3:
Configuration de l'essieu: Poids à l'essieu: Nombre d'ECAS:

Groupe d'essieu 4:
Configuration de l'essieu: Poids à l'essieu:

Groupe d'essieu 5:
Configuration de l'essieu: Poids à l'essieu:

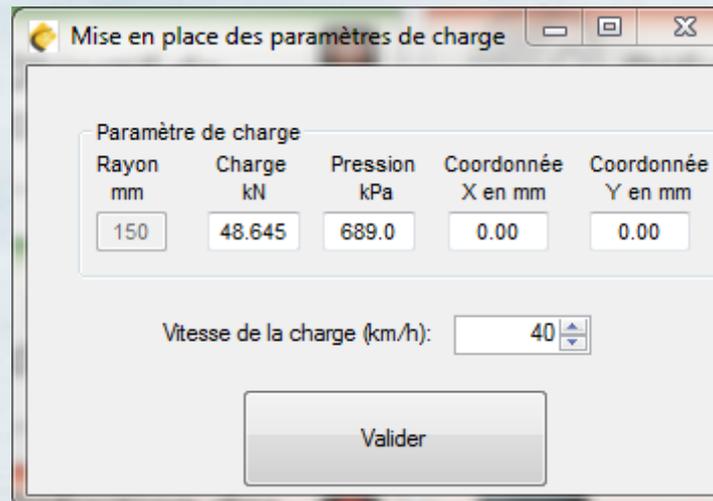
Coeficient d'agressivité moyen total:

Valider

Selectionner les types de véhicules parmi la base de donnée	Quantité	Coeficient d'agressivité moyen	Coeficient d'agressivité total
1- <input type="text" value="Autobus GMC classic"/>	X <input type="text" value="50"/>	<input type="text" value="3.35"/>	<input type="text" value="167.5"/>
2- <input type="text" value="Autobus Novabus LFS"/>	X <input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="4.48"/>	<input type="text" value="448"/>
3- <input type="text" value="Autobus Novabus LFS Artic"/>	X <input type="text" value="100"/>	<input type="text" value="6.32"/>	<input type="text" value="632"/>
4- <input type="text" value="Autobus Novabus LFS Artic"/>	X <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5- <input type="text" value="Autobus Novabus LFS Artic"/>	X <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
6- <input type="text" value="Camion 1 unité - 2 essieux"/>	X <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
7- <input type="text" value="Camion 1 unité - 3 essieux"/>	X <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
8- <input type="text" value="Camion 1 unité - 4 essieux et +"/>	X <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
9- <input type="text" value="Camion 2 unités - 4 essieux et -"/>	X <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
10- <input type="text" value="Camion 2 unités - 5 essieux"/>	X <input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

➤ Module 2: Conditions de charge

- Mise en place des caractéristiques de la charge pour déterminer les contraintes et les déformations dans chaque couche de la structure.
- Adapter la vitesse de la charge pour tenir compte du caractère viscoélastique des matériaux.
- Possibilité d'effectuer les calculs pour des charges spécifiques.



Mise en place des paramètres de charge

Paramètre de charge				
Rayon mm	Charge kN	Pression kPa	Coordonnée X en mm	Coordonnée Y en mm
150	48.645	689.0	0.00	0.00

Vitesse de la charge (km/h):

Valider



➤ Module 3: Définition du climat

- Division de l'année en 5 saisons avec durée et T° moyenne pour chacune
- Modélisation de l'hivers sous forme de sinus, moyenne mensuelle ou données journalière.

Mise en place des conditions climatiques

Entrée manuelle des températures Sélectionner un climat parmi la base de donnée

Selectionner un climat présent dans la base de donnée: Québec

Saison	Durée de la saison (en jours)		
Automne	45	13	8
Hiver	143	-4	-6
Début du printemps	12	4	1
Fin du printemps	45	14	9
Ete	121	24	18
Total		366	

Valider les conditons climatiques

- Saisie direct de la T° du revêtement ou calcul à partir des T° de l'air
- Message d'alerte en cas d'erreur de saisie
- Sauvegarde des climats



Module 4: Structure de chaussée

Enrobé bitumineux

Détermination de la structure de chaussée et des propriétés mécaniques des couches

Structure de chaussée				
	Matériau	Epaisseur (mm)	Coefficient de poisson	Interface
1	Enrobé bitumineux	40	0.35	1
2	Enrobé bitumineux	70	0.35	1
3	Matériaux granulaire	450	0.35	1
4	Matériaux granulaire	450	0.35	1
5	Sol	790	0.35	1
6	Enrobé bitumineux Matériaux granulaire			
7	Sol Autre couche			
8				
9				
10				

Information

- L'épaisseur de la dernière couche doit être égale à 0 mm

Valider la structure

Couche 1 | Couche 2 | Couche 3 | Couche 4 | Couche 5 | Couche 6 | Couche 7 | Couche 8 | Couche 9 | Couche 10

Selectionner les propriétés du matériau

Type d'enrobé: ESG-10 | Grade de Bitume: PG 64-34

Propriétés mécaniques du matériau

Niveau 1 : Mesure en laboratoire des propriétés mécaniques

Coefficients du module dynamique: Modèle de Witczak

δ : | α : | β : | γ : | a_1 : | a_2 :

Coefficients du module complexe: Modèle de Huet-Sayegh

Niveau 2 : Sélection par défaut des propriétés mécaniques

Niveau 3: Relation par défaut

Information

Module 4: Structure de chaussée

Enrobé bitumineux

Détermination de la structure de chaussée et des propriétés mécaniques des couches

Structure de chaussée	Matériau	Epaisseur (mm)	Coefficient de poisson	Interface
1	Enrobé bitumineux	40	0.35	1
2	Enrobé bitumineux	70	0.35	1
3	Matériaux granulaire	450	0.35	1
4	Matériaux granulaire	450	0.35	1
5	Sol	790	0.35	1
6				
7				
8				
9				
10				

Information

- L'épaisseur de la dernière couche doit être égale à 0 mm

Valider la structure

Couche 1 | Couche 2 | Couche 3 | Couche 4 | Couche 5 | Couche 6 | Couche 7 | Couche 8 | Couche 9 | Couche 10

Selectionner les propriétés du matériau

Type d'enrobé: ESG-10 | Grade de Bitume: PG 64-34

Information:
Information sur le modèle de Witczak
1- Modèle retenu dans MEPDG

Propriétés mécaniques

Niveau 1:

Coefficients du module dynamique: Modèle de Witczak

δ : | α : | β : | γ : | a_1 : | a_2 :

Coefficients du module complexe: Modèle de Huet-Sayegh

Niveau 2: Sélection par défaut des propriétés mécaniques

Niveau 3: Relation par défaut

Information

Module 4: Structure de chaussée

Enrobé bitumineux

Détermination de la structure de chaussée et des propriétés mécaniques des couches

Structure de chaussée	Matériau	Epaisseur (mm)	Coefficient de poisson	Interface
1	Enrobé bitumineux	40	0.35	1
2	Enrobé bitumineux	70	0.35	1
3	Matériaux granulaire	450	0.35	1
4	Matériaux granulaire	450	0.35	1
5	Sol	790	0.35	1
6				
7				
8				
9				
10				

Information
- L'épaisseur de la dernière couche doit être égale à 0 mm

Valider la structure

Couche 1 | Couche 2 | Couche 3 | Couche 4 | Couche 5 | Couche 6 | Couche 7 | Couche 8 | Couche 9 | Couche 10

Selectionner les propriétés du matériau

Type d'enrobé: ESG-10 | Grade de Bitume: PG 64-34

Propriétés mécaniques du matériau

Niveau 1 : Mesure en laboratoire des propriétés mécaniques

Niveau 2 : Sélection par défaut des propriétés mécaniques

Liste des matériaux correspond au type d'enrobé et au grade de bitume : ESG-10-PG 64-34

Coefficients du module dynamique: Modèle de Witczak

δ : 0.539 | α : 3.953 | β : -1.323 | γ : -0.377 | a_1 : -0.148 | a_2 : 0.000734

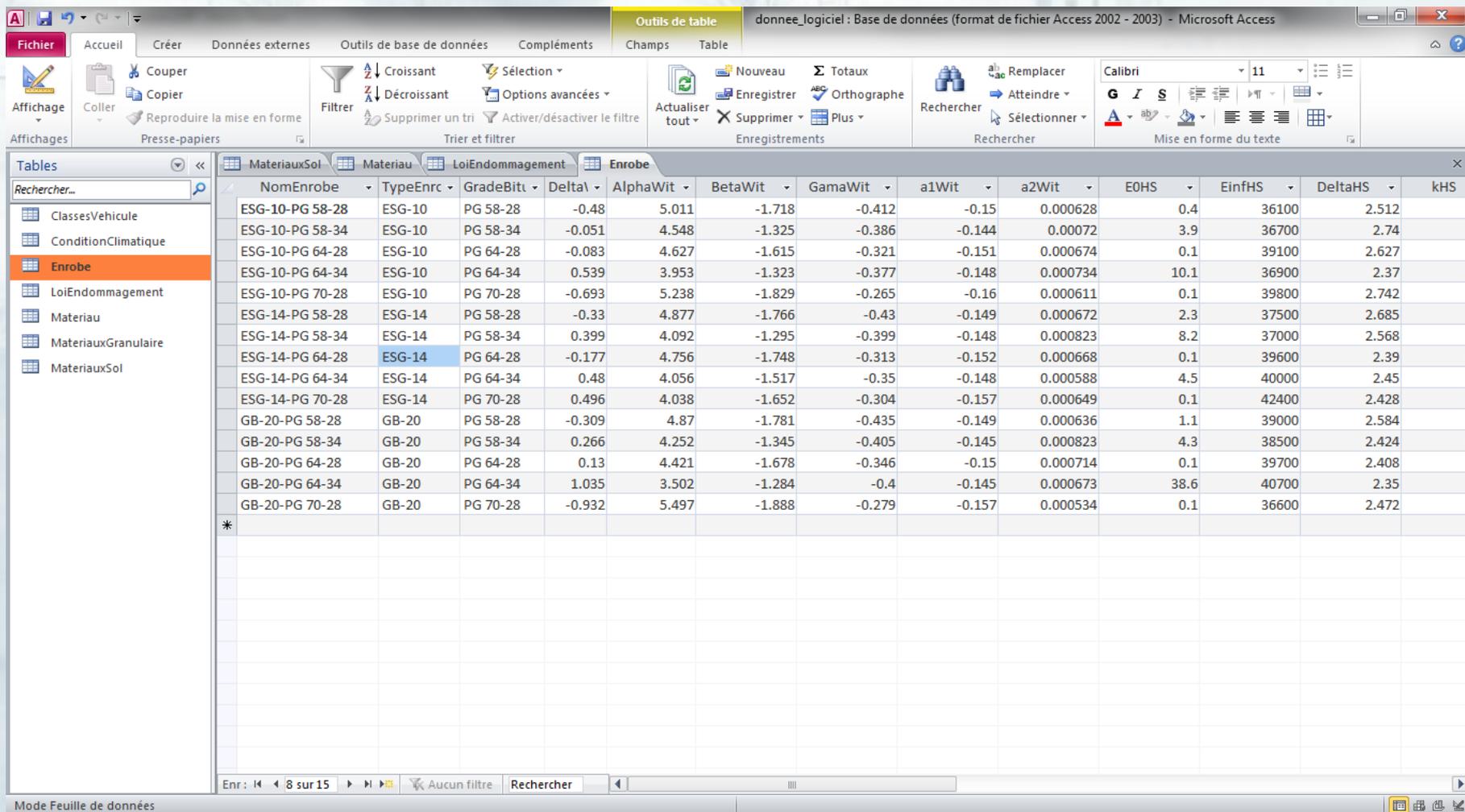
Coefficients du module complexe: Modèle de Huet-Sayegh

Niveau 3: Relation par défaut

Information

Module 4: Structure de chaussée

- Base de donnée Microsoft Access personnalisable.



The screenshot displays the Microsoft Access interface with the 'Enrobe' table selected. The table contains 15 columns and 15 rows of data. The columns are: NomEnrobe, TypeEnrc, GradeBit, Delta, AlphaWit, BetaWit, GamaWit, a1Wit, a2Wit, EOHS, EinfHS, DeltaHS, and kHS. The rows represent different material specifications, such as 'ESG-10-PG 58-28' and 'GB-20-PG 70-28'. The status bar at the bottom indicates 'Mode Feuille de données' and 'Aucun filtre'.

NomEnrobe	TypeEnrc	GradeBit	Delta	AlphaWit	BetaWit	GamaWit	a1Wit	a2Wit	EOHS	EinfHS	DeltaHS	kHS
ESG-10-PG 58-28	ESG-10	PG 58-28	-0.48	5.011	-1.718	-0.412	-0.15	0.000628	0.4	36100	2.512	
ESG-10-PG 58-34	ESG-10	PG 58-34	-0.051	4.548	-1.325	-0.386	-0.144	0.00072	3.9	36700	2.74	
ESG-10-PG 64-28	ESG-10	PG 64-28	-0.083	4.627	-1.615	-0.321	-0.151	0.000674	0.1	39100	2.627	
ESG-10-PG 64-34	ESG-10	PG 64-34	0.539	3.953	-1.323	-0.377	-0.148	0.000734	10.1	36900	2.37	
ESG-10-PG 70-28	ESG-10	PG 70-28	-0.693	5.238	-1.829	-0.265	-0.16	0.000611	0.1	39800	2.742	
ESG-14-PG 58-28	ESG-14	PG 58-28	-0.33	4.877	-1.766	-0.43	-0.149	0.000672	2.3	37500	2.685	
ESG-14-PG 58-34	ESG-14	PG 58-34	0.399	4.092	-1.295	-0.399	-0.148	0.000823	8.2	37000	2.568	
ESG-14-PG 64-28	ESG-14	PG 64-28	-0.177	4.756	-1.748	-0.313	-0.152	0.000668	0.1	39600	2.39	
ESG-14-PG 64-34	ESG-14	PG 64-34	0.48	4.056	-1.517	-0.35	-0.148	0.000588	4.5	40000	2.45	
ESG-14-PG 70-28	ESG-14	PG 70-28	0.496	4.038	-1.652	-0.304	-0.157	0.000649	0.1	42400	2.428	
GB-20-PG 58-28	GB-20	PG 58-28	-0.309	4.87	-1.781	-0.435	-0.149	0.000636	1.1	39000	2.584	
GB-20-PG 58-34	GB-20	PG 58-34	0.266	4.252	-1.345	-0.405	-0.145	0.000823	4.3	38500	2.424	
GB-20-PG 64-28	GB-20	PG 64-28	0.13	4.421	-1.678	-0.346	-0.15	0.000714	0.1	39700	2.408	
GB-20-PG 64-34	GB-20	PG 64-34	1.035	3.502	-1.284	-0.4	-0.145	0.000673	38.6	40700	2.35	
GB-20-PG 70-28	GB-20	PG 70-28	-0.932	5.497	-1.888	-0.279	-0.157	0.000534	0.1	36600	2.472	
*												



Module 4: Structure de chaussée

Les matériaux granulaires

Détermination de la structure de chaussée et des propriétés mécaniques des couches

Structure de chaussée	Matériau	Épaisseur (mm)	Coefficient de poisson	Interface
1	Enrobé bitumineux	40	0.35	1
2	Enrobé bitumineux	70	0.35	1
3	Matériaux granulaire	450	0.35	1
4	Matériaux granulaire	450	0.35	1
5	Sol	790	0.35	1
6				
7				
8				
9				
10				

Information
- L'épaisseur de la dernière couche doit être égale à 0 mm

Valider la structure

Couche 1 | Couche 2 | **Couche 3** | Couche 4 | Couche 5 | Couche 6 | Couche 7 | Couche 8 | Couche 9 | Couche 10

Classe du matériau granulaire
Classification du matériau granulaire: MG 20

Propriété mécanique du matériau
 Niveau 1 : Mesure obtenue en laboratoire
 Nouvelles mesures de laboratoire
 Sélection parmi la base de données : MG 20

$$M_r = k_1 p_a (\theta/p_a)^{k_2} (\tau_{oct}/p_a + 1)^{k_3}$$

Paramètre k₁ 1194 Paramètre k₂ 0.864 Paramètre k₃ -0.338

Niveau 2 : Estimation à partir des propriétés physiques

Niveau 3 : Valeur typique du matériau

Information
Matériau sélectionné: Matériau granulaire de calibre 20-0 mm (CBR > 100)

Module 4: Structure de chaussée

Les matériaux granulaires

Détermination de la structure de chaussée et des propriétés mécaniques des couches

Structure de chaussée	Matériau	Epaisseur (mm)	Coefficient de poisson	Interface
1	Enrobé bitumineux	40	0.35	1
2	Enrobé bitumineux	70	0.35	1
3	Matériaux granulaire	450	0.35	1
4	Matériaux granulaire	450	0.35	1
5	Sol	790	0.35	1
6				
7				
8				
9				
10				

Information

- L'épaisseur de la dernière couche doit être égale à 0 mm

$$M_r = c1s \theta + c2s + \Delta M_r$$

Valider la structure

Couche 1 | Couche 2 | **Couche 3** | Couche 4 | Couche 5 | Couche 6 | Couche 7 | Couche 8 | Couche 9 | Couche 10

Classe du matériau granulaire

Classification du matériau granulaire: MG 20

Propriété mécanique du matériau

Niveau 1 : Mesure obtenue en laboratoire

$$c1s = -6.2592 - 0.50796 * \left(\frac{C_u}{n_f} \right) + 7.72547 * \left(\frac{\rho_{d\max}}{\rho_d} \right) - 0.10661 * w_{sat} + 0.16825 * w_{opt}$$

$$c2s = 879.47222 + 14.35277 * n - 6.21307 * n_c + 0.25323 * \rho_{d\max} - 0.55721 * \rho_d - 27.53323 * w_{sat}$$

Niveau 2 : Estimation à partir des propriétés physiques

Estimation à partir du modèle Mellizo, Bilodeau, Doré:

Entrer nouvelles mesures ou sélection parmi la base de données: MG 20

Pourcentage de particule fine %F:	3.52	Coefficient d'uniformité Cu :	33	Absorption Abs :	0.7
Teneur en eau optimale Wopt :	5.8	Degré de saturation Sat :	97	Teneur en eau W :	8
Densité sèche maximale $\rho_{d\max}$:	2228	Densité des grains ρ_s :	2658	Densité sèche ρ_d :	2260

Estimation à partir du CBR:

Niveau 3 : Valeur typique du matériau

Information

Matériau sélectionné: Matériau granulaire de calibre 20-0 mm (CBR > 100)

Module 4: Structure de chaussée

Les sols

Détermination de la structure de chaussée et des propriétés mécaniques des couches

Structure de chaussée				Couche 1	Couche 2	Couche 3	Couche 4	Couche 5	Couche 6	Couche 7	Couche 8	Couche 9	Couche 10
Matériau	Epaisseur (mm)	Coefficient de poisson	Interface										
1 Enrobé bitumineux	40	0.35	1										
2 Enrobé bitumineux	70	0.35	1										
3 Matériaux granulaire	450	0.35	1										
4 Matériaux granulaire	450	0.35	1										
5 Sol	790	0.35	1										
6													
7													
8													
9													
10													

Information
- L'épaisseur de la dernière couche doit être égale à 0 mm

Valider la structure

Classe du sol
Classification du sol : ML

Propriété mécanique du matériau

Niveau 1 : Mesure obtenue en laboratoire

Modèle: K- θ

Mesure FWD

Niveau 2 : Estimation à partir des propriétés physiques

Estimation à partir du modèle Rahim et George:

Propriété des matériaux

Estimation à partir du modèle Soto, Bilodeau, Doré:

Pourcentage de particule fine %F: Degré de saturation Sat : Module retrocalculé (essais au moule (MPa))

Estimation à partir du CBR:

Niveau 3 : Valeur typique du matériau

Information

➤ Module 5: Lois d'endommagement

- Choix ou entrée manuelle des paramètres des lois d'endommagement

Sélection des paramètres des lois d'endommagement

Selectionner un modèle d'endommagement présent dans la base de donnée:

Modèle de fatigue

$$N_F = C \cdot K_{F1} \cdot \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{K_{F2}} \cdot \left(\frac{1}{E}\right)^{K_{F3}}$$

Module E en MPa
Déformation en m/m

Modèle de la base de donnée:

C K_{F1}

Données pour le calcul de K_{F1} : Teneur en vide (%)

Modèle de déformation permanente

$$N_R = C_R \cdot K_{R1} \cdot \epsilon_V^{K_{R2}}$$

Déformation en m/m

Modèle de la base de donnée:

C_R K_{R1} K_{R2}



Module 6: Analyse au gel

- Trois niveaux de précision de calcul de la profondeur de gel et du soulèvement

Détermination de la profondeur de gel et du soulèvement associé

Structure de chaussée											
Matériau	Épaisseur (mm)	Masse volumique (Kg/m ³)	Teneur en eau (%)	% Fines <2 micron	SPo (mm ² /KH)	Ku (W/mK)	Kf (W/mK)	Entrée manuelle de Ku et Kf	a (1/MPa)	Sr (Décimal)	Lf (Wh/m ³)
1 Enrobé Bitumineux	40	2350	1	0	0	1.45	1.48	<input checked="" type="checkbox"/>	13.46	0.206	2185.5
2 Enrobé Bitumineux	70	2350	1	0	0	1.45	1.48	<input checked="" type="checkbox"/>	13.46	0.206	2185.5
3 MG 20	450	2200	4	2	0	2.80	2.54	<input type="checkbox"/>	12.70	0.520	8184.1
4 MG 112	450	1920	8	2	0	2.35	2.47	<input type="checkbox"/>	12.70	0.564	14285.0
5 ML	0	1450	30	22.5	8	1.31	2.09	<input type="checkbox"/>	7.02	0.975	40455.5

- Modélisation de Kerstern

Modélisation sinus

Données climatiques de base

Température moyenne annuelle de l'air (°C) :

Coefficient de transfert air -> Surface :

Méthode 1: Simulation Sinus Méthode 2: Calcul mensuel Méthode 3: Saisie journalière

Méthode 1: A partir de l'indice de gel et de la température moyenne annuelle, l'amplitude du sinus par rapport à sa moyenne ainsi que la durée du gel sont calculés et une courbe sinus théorique est déterminée

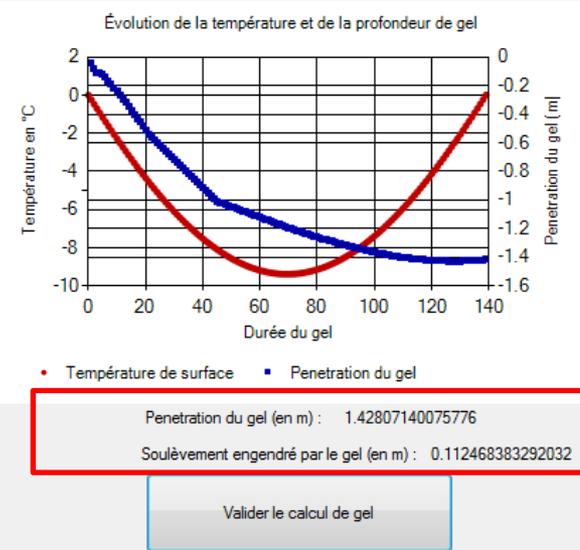
Indice de gel de l'air:

(Théorique) (Simulé)

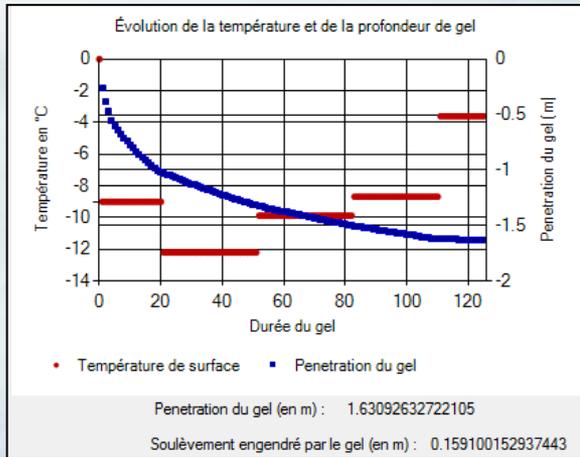
Indice de gel de surface :

Amplitude du sinus par rapport à sa moyenne :

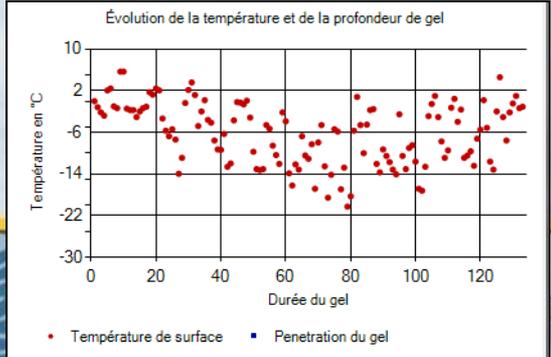
Durée de la période de gel (en jours) :



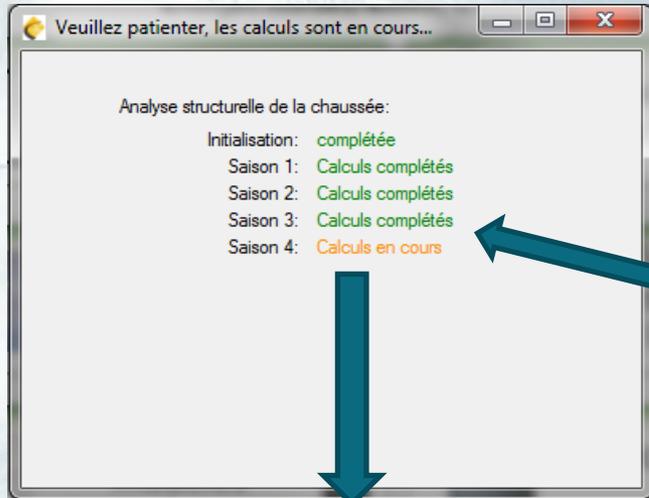
Modélisation mensuelle



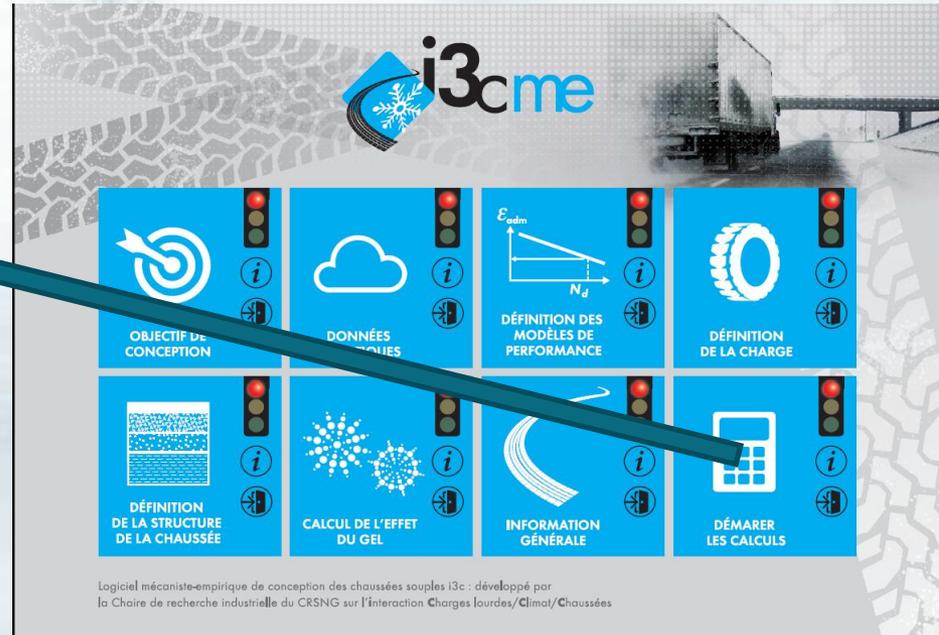
Modélisation Journalière



Résultats:



Saison 1:



Couche	Épaisseur (mm)	Module (Mpa)
1	40	7 300
2	70	11 168
3	450	174
4	450	87
5	790	53

$$\epsilon_{\text{Fatigue}} = 171 \mu\epsilon$$

$$N_{\text{Fatigue}} = 1.17 \text{ million}$$

$$\epsilon_{\text{ornière}} = 200 \mu\epsilon$$

$$N_{\text{ornière}} = 1.52 \text{ million}$$

Cumul des dommages pour les 5 saisons : Durée de vie:

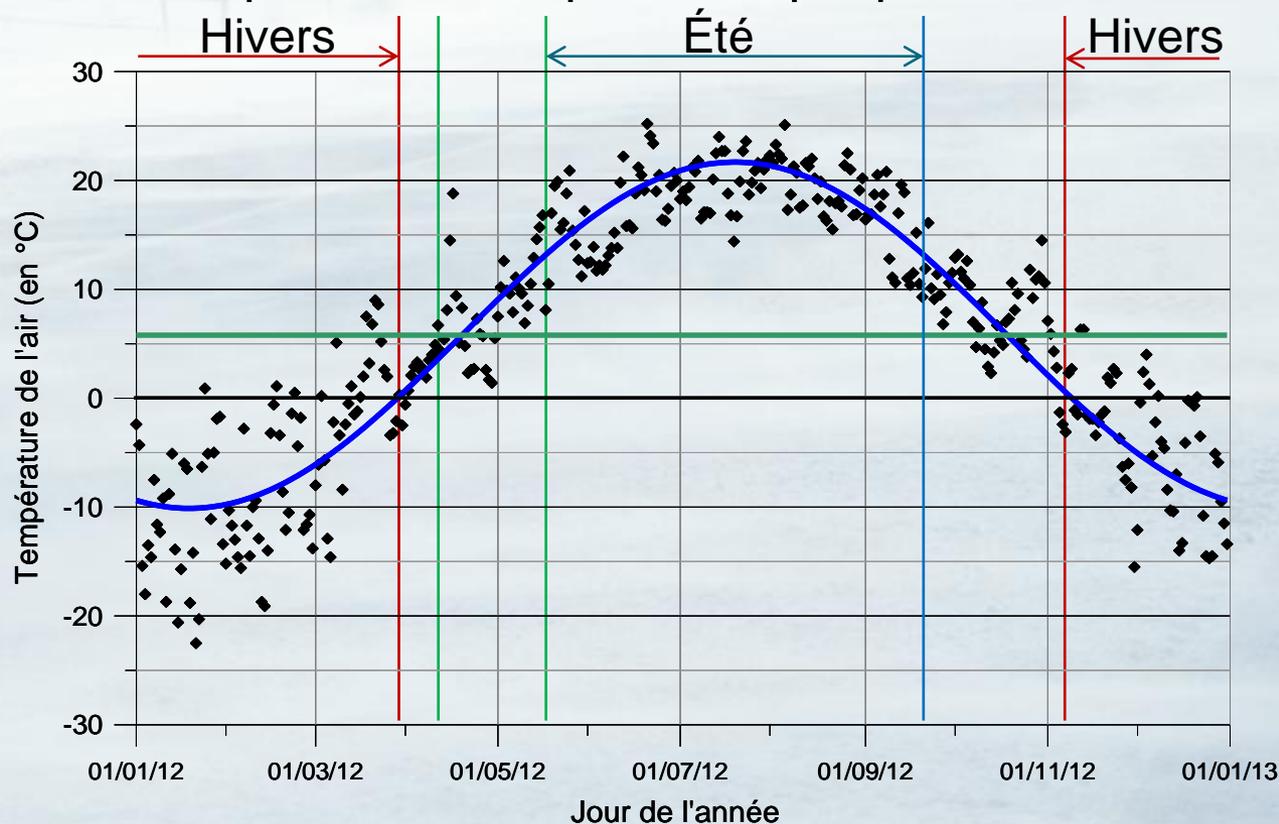
Fatigue = 1.15 million

Ornièrage = 16.2 millions



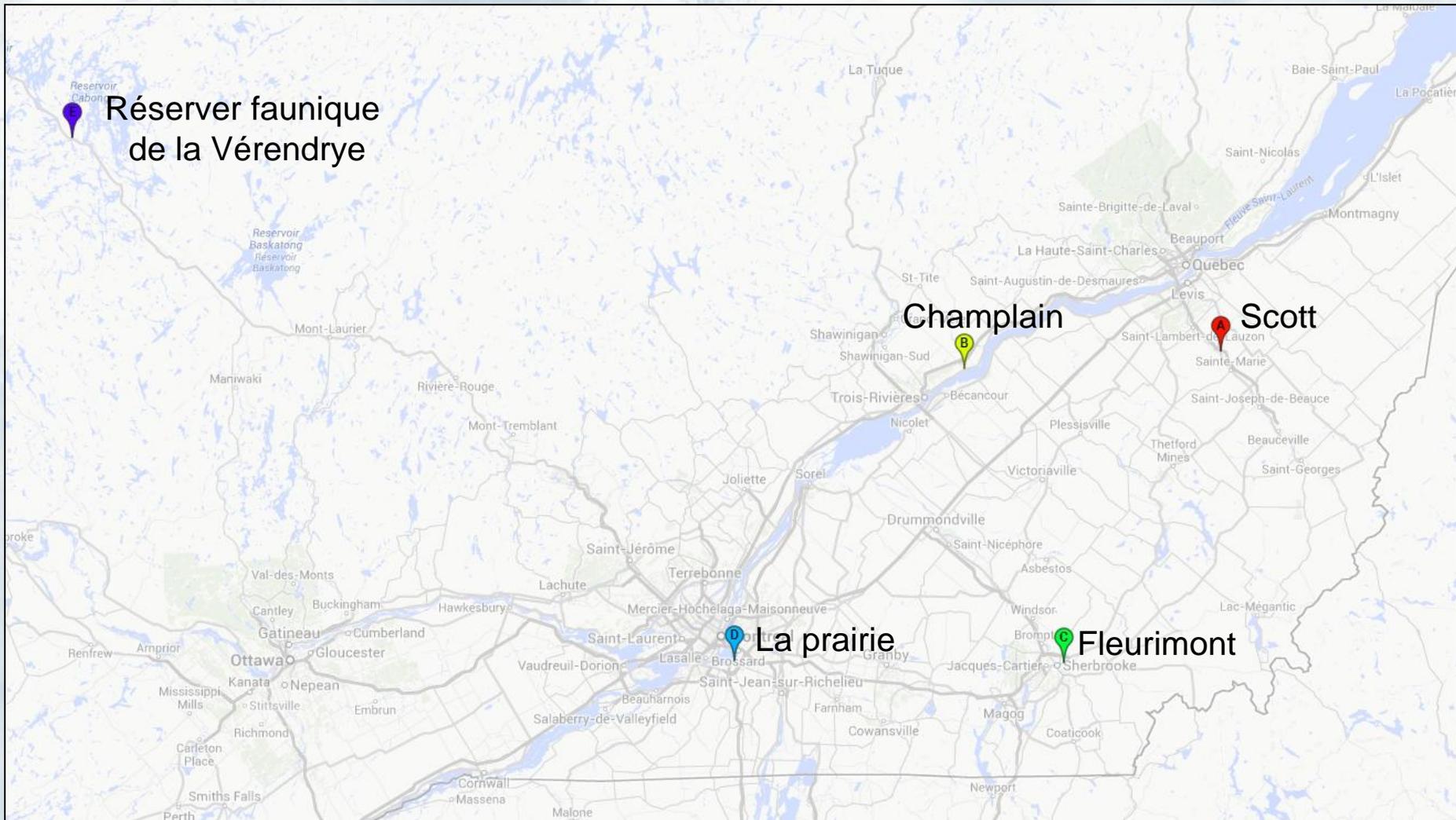
Manuel d'utilisation

- Détail de l'ensemble de module du logiciel
- Explication pour les différents options et outils de calcul du programme
- Aide pour la conception comme par exemple pour le climat:



Saison	Hivers	Début printemps	Fin printemps	Été	Automne
Durée	143	12	45	121	45
T° moyenne	-6.04	0.7	8.9	18.10	8.42

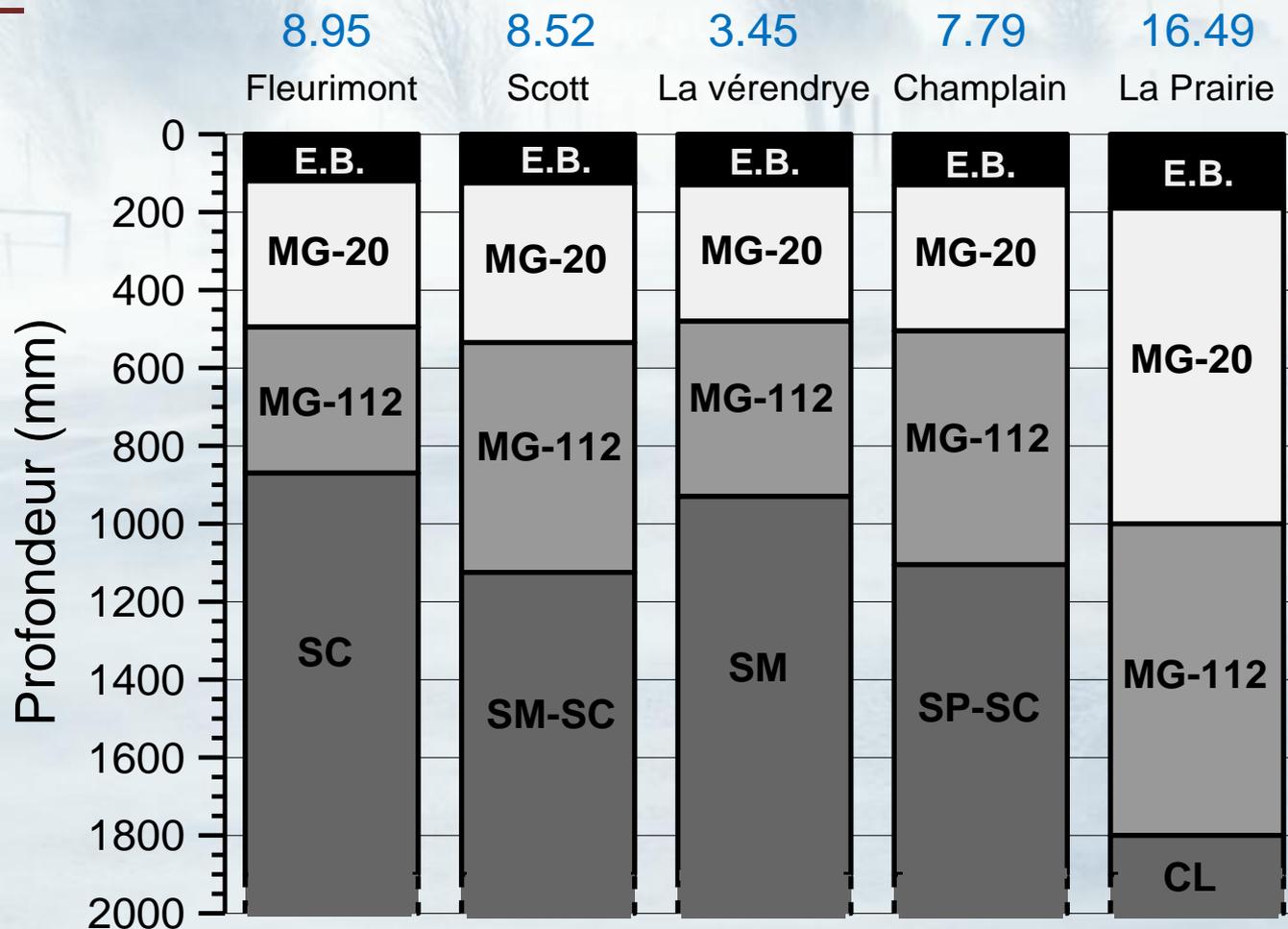
➤ Vérification du logiciel:



➤ Vérification:

Essais FWD pour
détermination des
modules en place

Objectif en million d'ECAS



Résultat: Chaussée 2:

I3C:

1.56

4.29

1.3

13.8

214

1.36

0.93

1.21

3.26

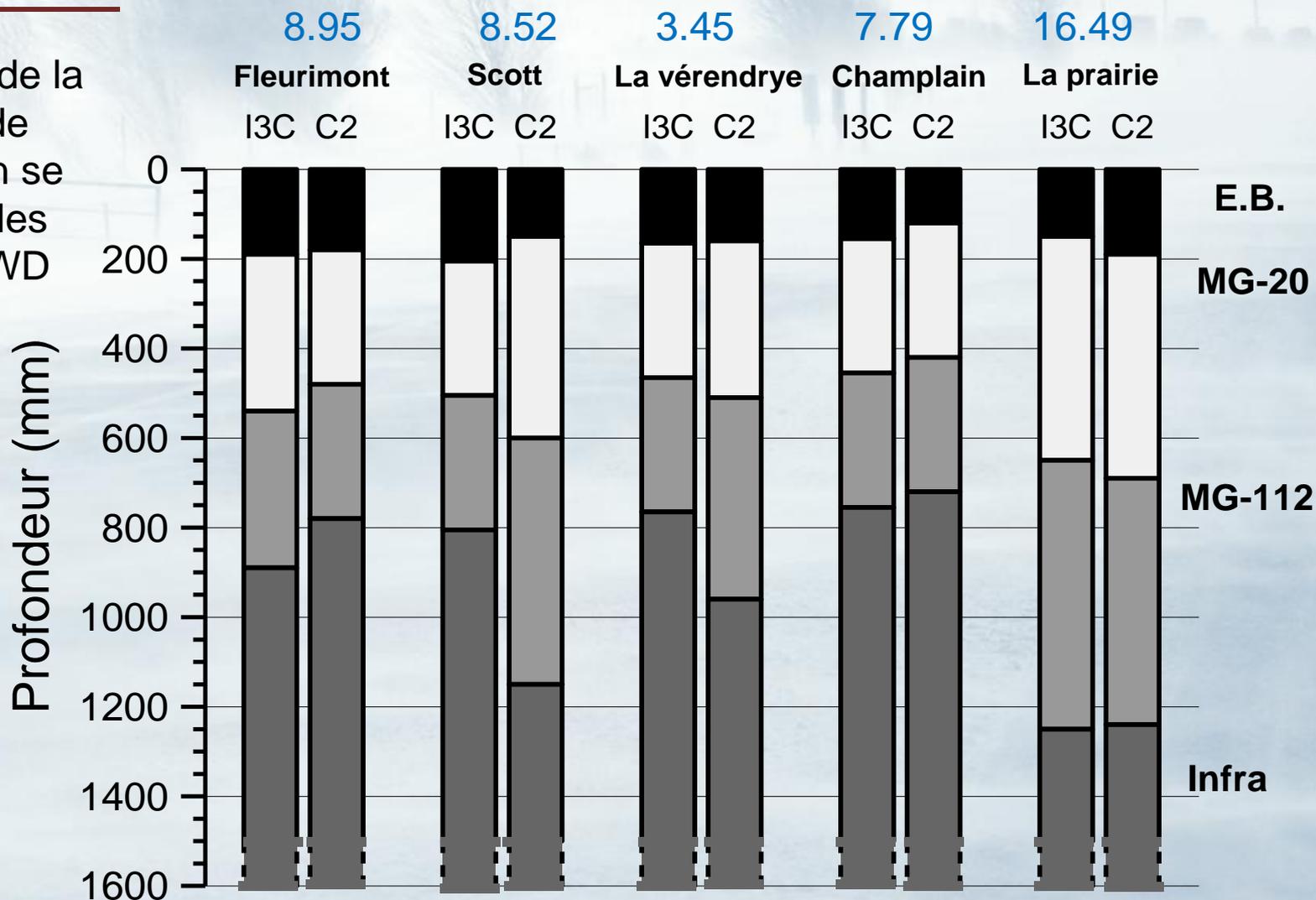
58



➤ Vérification:

Objectif en million d'ECAS

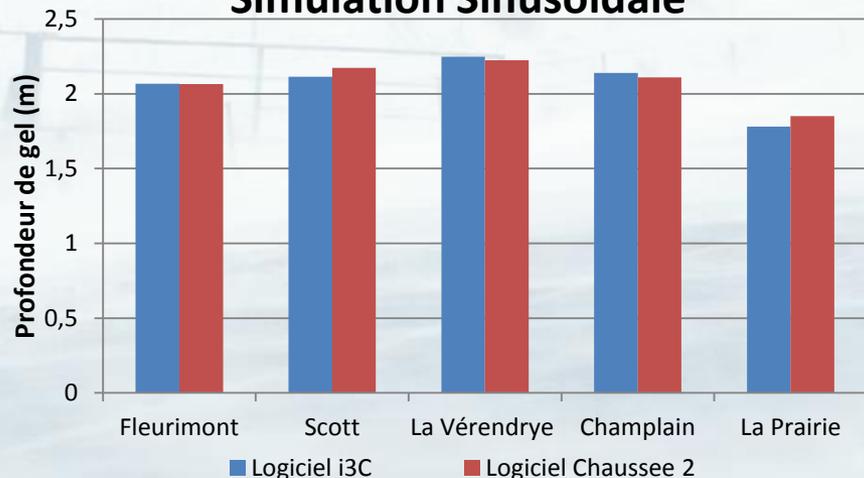
Optimisation de la structure de chaussée en se basant sur les modules FWD



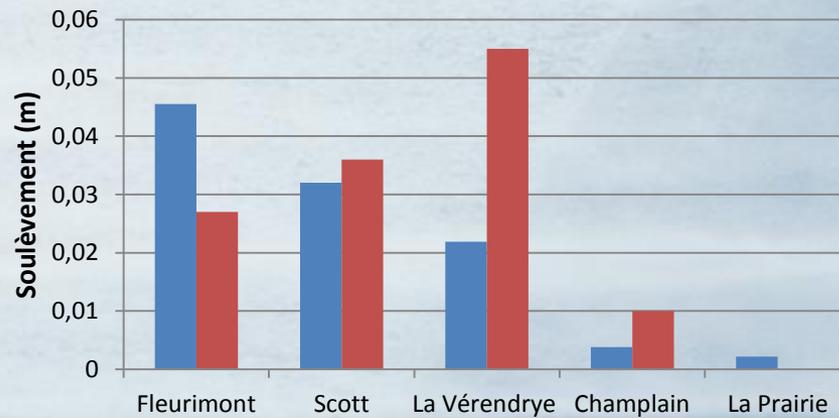
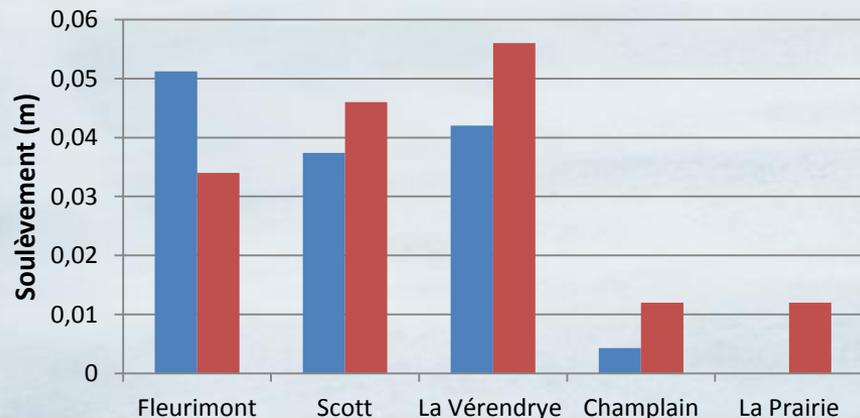
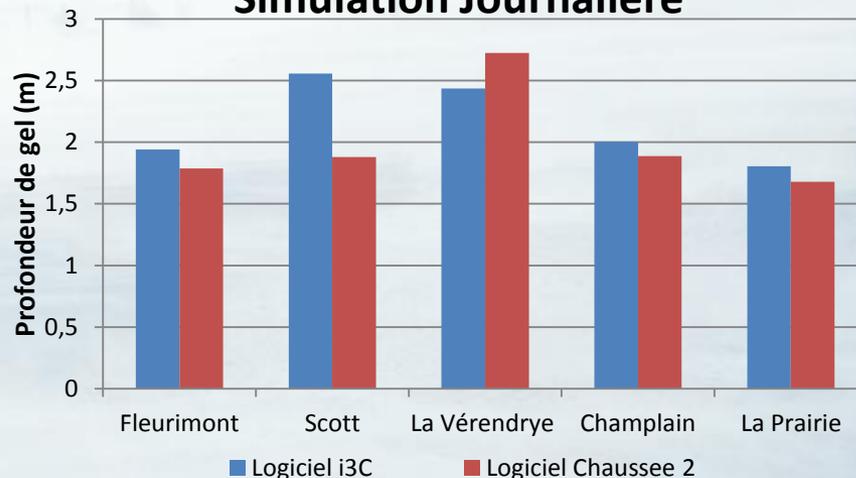
Application:

Analyse de la profondeur de gel et du soulèvement

Simulation Sinusoidale



Simulation Journalière



Développements à venir

- Le logiciel est maintenant pleinement fonctionnel
 - Transfert aux partenaires lors d'une formation en janvier 2015
 - Transfert éventuel à l'ensemble de l'industrie après validation (~fin 2015)
- Améliorations à venir
 - Prise en compte du soulèvement différentiel (Bilodeau et Doré)
 - Prise en compte de la charge dynamique (Villeneuve/Fahimi)
 - Prise en compte des changements climatiques (Perron-Drolet)
 - Insertions de couches spéciales (drainage et isolation)



Conclusion

- Logiciel de conception de chaussée fonctionnel
 - Intégration de nouvelle fonctionnalité de calcul
 - Cohérence avec les logiciels actuels
 - Choix et polyvalence des méthodes de calculs
- Distribution prochaine pour tester le logiciel
 - S'adapter à la demande des futurs utilisateurs
 - Manuel de fonctionnement
 - Base de donnée primaire





Chaire de recherche industrielle
du CRSNG sur l'interaction
Charges lourdes/Climat/Chaussées

**Merci à tous les partenaires de la
chaire i3C
Merci de votre attention**

PARTENAIRES



LVM

DESSAU



Faculté des Sciences et de génie
Département de génie civil

