



Chaire de recherche industrielle
du CRSNG sur l'interaction
charges lourdes-climat-chaussées



Logiciel i3C-me : dimensionnement mécaniste-empirique des chaussées

Guy Doré, ing., Ph.D.

Jean-Pascal Bilodeau, ing., Ph.D.

Damien Grellet, Ph.D.

Erdrick Leandro Perez-Gonzalez



Faculté des Sciences et de génie
Département de génie civil



Mise en contexte

Conception des chaussées

Semi-empirique

Mécaniste-empirique



Gratuit et développé à l'Université Laval (outil transfert technologique)

<https://i3c.gci.ulaval.ca/i3c-me/>



Mise en contexte

i3C-me comme outil de dimensionnement



Dimensionnement
structural ME

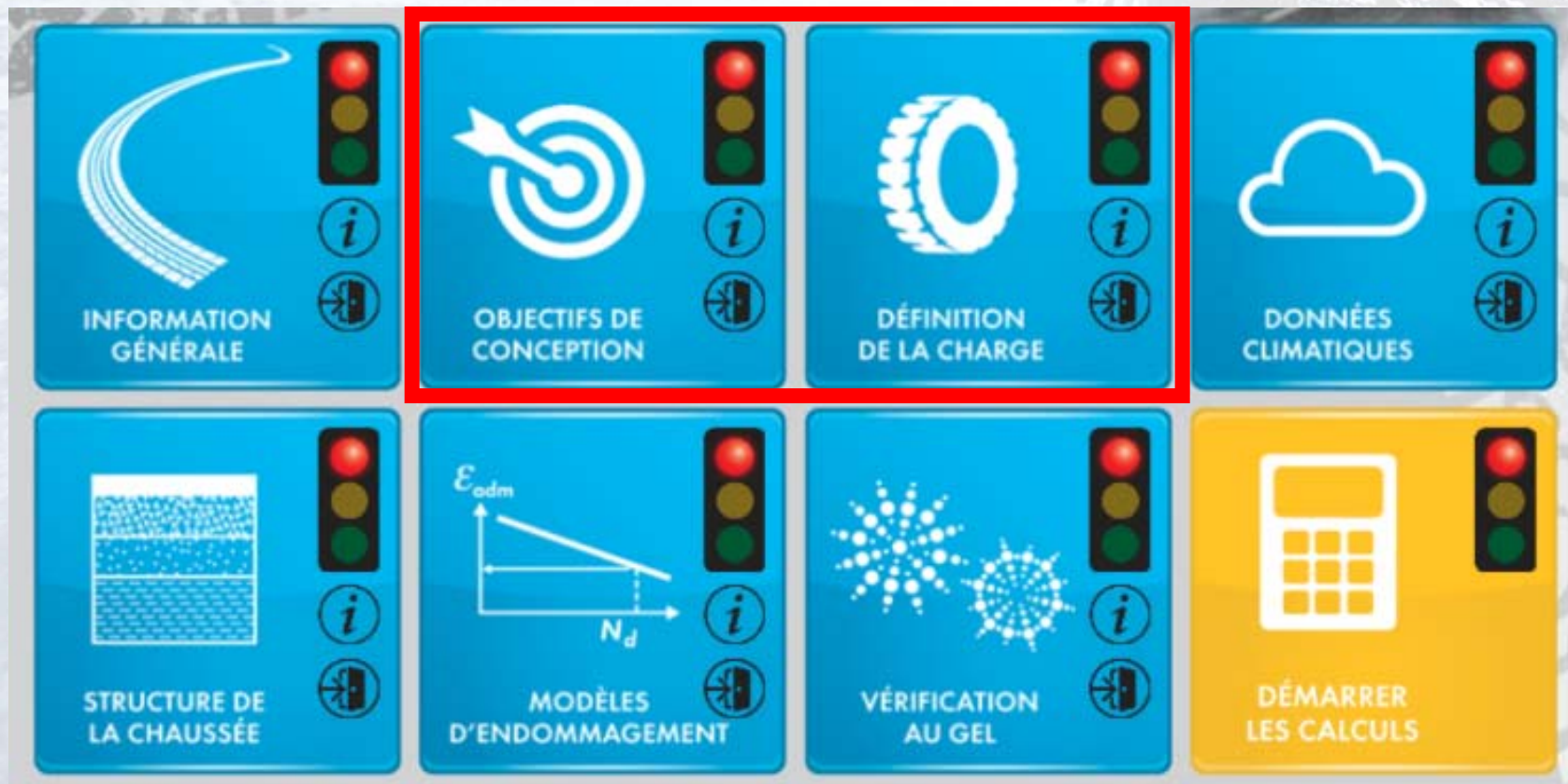
Dimensionnement au gel
ME (Saarelainen/Konrad)

Bases de données
éditables
(matériaux, véhicules, climat, etc.)

Disponible en français et anglais



Modules de logiciel i3c-me



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

Fichier Aide

Caractéristique de la route

Classe de la route : Autoroute

Durée de vie (en années) : 30

Type de route : Rurale

Détermination du nombre d'écas admissible

Calcul du nombre d'Écas

Débit Journalier Moyen Annuel (DJMA): 40000

Proportion des véhicules dans la direction 1: D (en %) 50 Direction 2 (en %) 50

Nombre de voies par direction: 1 Proportion de véhicules par voie V (en %): 100

Proportion de véhicules lourds : C (en %) 15

Coefficient d'agressivité CA: Utiliser l'outil de calcul

Valeur par défaut 2.70

Saisie directe

Nombre de jours par années J : 300

Taux d'accroissement (en %) : 2 Facteur d'accroissement: FA (en %) 40.57

Calcul du nombre d'écas pour la voie la plus sollicitée

$N(\text{ÉCAS}) = 40000 \times 0.50 \times 1.00 \times 0.15 \times 2.70 \times 300 \times 40.5 = 98\,585\,100$

Saisie directe du nombre d'Écas

VALIDER
LE MODULE

$$N(\text{ESAL}) = \text{DJMA} \times D \times V \times C \times CA \times J \times \left(\frac{(1+g)^n - 1}{g} \right)$$



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

Fichier Aide

Caractéristique de la route

Classe de la route : Autoroute Durée de vie (en années) : 30

Détermination de l'agressivité des véhicules

Fichier Outils

- Comptage et classification des véhicules lourds:

Selectionner les types de véhicules parmi la base de donnée		Nombre de véhicules	Coefficient d'agressivité moyen	Coefficient d'agressivité total
1- Autobus Novabus LFS Artic	X	10	6,32	63,2
2- Camion 1 unité - 4 essieux et +	X	20	5,7	114
3- Camion 1 unité - 3 essieux	X	30	1,5	45
4- Camion 2 unités - 5 essieux	X	30	1,7	51
5- Camion 2 unités - 6 essieux et +	X	15	6,8	102
6-	X			
7-	X			
8-	X			
9-	X			
10-	X			

Coefficient d'agressivité moyen total: 3,57

Verifier les caractéristiques des véhicules en cliquant sur les controles ci-dessous:

1- 2- 3- 4- 5-

Nom descriptif du véhicule: Autobus Novabus LFS Artic

Groupe d'essieux N°1:

Configuration du groupe: Simple
Chargement total (kg): 6800

Groupe d'essieux N°2

Configuration du groupe: Simple
Chargement total (kg): 8100

Groupe d'essieux N°3

Configuration du groupe: Simple
Chargement total (kg): 12120

Groupe d'essieux N°4

Configuration du groupe:
Chargement total (kg):

Groupe d'essieux N°5

Configuration du groupe:
Chargement total (kg):

Coefficient d'agressivité du véhicule (ÉCAS): 6,32

VALIDER

$$\frac{(1+g)^n - 1}{g}$$



Paramètres de charge

Outils Aide

Paramètres du pneu

Choisir le type de pneu : 11R22.5

Les conditions de chargement peuvent différer de celles de l'ECAS, par conséquent, les modèles d'endommagement peuvent ne pas être valides

Pression de gonflage à froid (kPa) : 560

Charge du pneu (kN) : 20

Vitesse de la charge (km/h) : 90

Surface de contact brute (cm²) : 412.5

Rayon de cercle équivalent (cm) : 11.5

VALIDER LE MODULE

Caractéristique de l'essieu

Pneu simple

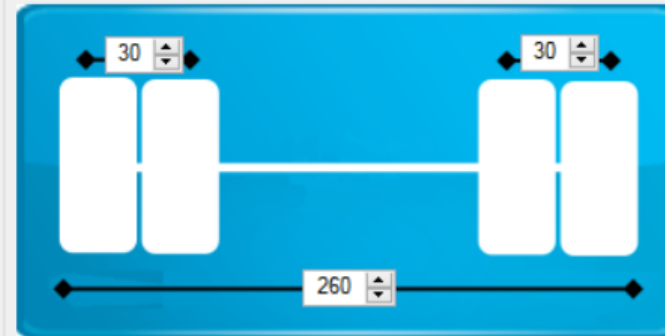
Demi-essieu

Charge à l'essieu (kN)

Pneu double

Essieu-complet

80.0



Considérations :

- Les distances dans la géométrie de l'essieu sont indiquées en cm
- La charge à l'essieu est répartie uniformément entre les pneumatiques
- La distance entre les pneumatiques doubles doit être au moins égale au d
- La longueur de l'essieu-complet doit être comprise entre 240cm et 260cm



Paramètres de charge

Outils Aide

Paramètres du pneu

Choisir le type de pneu : 11R22.5

Les conditions de chargement peuvent différer de celles de l'ECAS par conséquent, les modèles d'endommagement peuvent ne pas être valides

Pression de gonflage à froid (kPa) : 560

Charge du pneu (kN) : 20

Vitesse de la charge (km/h) : 90

Surface de contact brute (cm²) : 412.5

Rayon de cercle équivalent (cm) : 11.5

VALIDER LE MODULE

Information

Les enrobés bitumineux sont des matériaux visco-élastiques dont les propriétés mécaniques varient avec la température et la fréquence sous laquelle ils sont sollicités. Cette fréquence est fonction de la structure de chaussée et des caractéristiques de la charge.

Le logiciel utilise la relation suivante : $Fréquence (Hz) = 0,46 \times V$
avec V = la vitesse de la charge (km/h)

Fréquence de sollicitation

Conserver la relation par défaut

Imposer la fréquence de sollicitation (en Hz) : 10,00

VALIDER



Considérations :

- Les distances dans la géométrie de l'essieu sont indiquées en cm
- La charge à l'essieu est répartie uniformément entre les pneumatiques
- La distance entre les pneumatiques doubles doit être au moins égale au d
- La longueur de l'essieu-complet doit être comprise entre 240cm et 260cm



Modules de logiciel i3c-me



Mise en place des conditions climatiques

Outils Aide

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

Selectionner un climat présent dans la base de donnée: Duchesnay

Saison	Durée de la saison (en jours)	Temperature du revêtement	
		Entrée directe	Calculée à partir des températures de l'air
Automne	44	T° de l'enrobé (°C) 12.72	T° de l'air (°C) 8.11
Hiver	156	-6.13	-7.84
Début du printemps	12	5.02	1.6
Fin du printemps	45	13.76	8.99
Ete	108	24.11	17.753
Total	365		

Ecart type de l'indice de gel (°C.jours): 209

Note : La T° de l'enrobé est calculée à 4 cm de profondeur. Cette profondeur de calcul est ajustée ultérieurement au 1/3 de l'épaisseur totale de la couche de revêtement bitumineux.

Informations relatives aux données climatiques

- La température moyenne annuelle (°C) : 4.04 - L'indice de gel calculé (degrés.jours): 1223.0

VALIDER LE MODULE

Température de l'air

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

Température EB

Température pour chaque saison

- Variation propriétés EB;
- Pénétration gel;

Durée des saisons

- Distribution trafic



Modules de logiciel i3c-me



Fichier Paramètre saisonnier Aide

Structure de chaussée

	Matériau	Epaisseur (mm)	Coefficient de poisson
1	Enrobé bitumineux	60	0.00
2	Enrobé bitumineux	100	0.00
3	Matériaux granulaire	300	0.35
4	Autre couche	25.0	0.35
5	Matériaux granulaire	300	0.35
6	Sol	300	0.35
7			
8			
9			
10			

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 58-28 Ratio de Poisson calculé

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

Liste des matériaux correspond au type d'enrobé et au grade de bitume : ESG-10-PG 58-28

Coefficients du module dynamique: Modèle de Witczak

δ : α : β : γ : a_1 a_2

Coefficients du module complexe: Modèle de Huet-Sayegh

Niveau 3 : Relation par défaut

Module (GPa)=11,437 e -0,0594 T

Information

Level 1
Huet Sayegh or Witczak models
 $|E^*| = f(T^\circ, \text{frequency})$
Complex modulus tests

Level 2

Level 3

VALIDER LE MODULE

Fichier Paramètre saisonnier Aide

Structure de chaussée

	Matériau	Épaisseur (mm)	Coefficient de poisson
1	Enrobé bitumineux	60	0.00
2	Enrobé bitumineux	100	0.00
3	Matériaux granulaire	300	0.35
4	Autre couche	25.0	0.35
5	Matériaux granulaire	300	0.35
6	Sol	300	0.35
7			
8			
9			
10			

Information

Toutes les couches sont parfaitement collées ensemble

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

- Les épaisseurs en ce qui concerne les transports

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

Sélectionner un type de couche particulier:

Couche Isolante

Couche drainante

Couche de renforcement

Propriété de la couche sélectionnée

Sélectionner un matériau de la base de données : Polystyrène extrudé - 400 kPa

Épaisseur de la couche isolante (mm): 25.0

Module en compression (MPa): 15 Conductivité thermique K_u (W/mK): 0.03

Résistance en compression (kPa): 400 Conductivité thermique K_f (W/mK): 0.03

Méthode de protection contre le givrage:

Recouvrement granulaire minimal de 450 mm de matériaux granulaires MG-20

Approche régionale de calcul de l'épaisseur minimale de protection contre le givrage (Info DLC, vol.8, n°12, décembre 2003 - Coté et Konrad, 2003)

Attention: La mise en place d'isolant implique un recouvrement granulaire minimal afin de réduire le risque de formation de givrage différentiel

Attention: Le polystyrène 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.

Isolation

Propriétés thermiques et mécaniques

Protection contre givrage

VALIDER LE MODULE

Fichier Paramètre saisonnier Aide

Structure de chaussée

	Matériau	Epaisseur (mm)	Coefficient de poisson
1	Enrobé bitumineux	60	0.00
2	Enrobé bitumineux	100	0.00
3	Matériaux granulaire	300	0.35
4	Autre couche	0.0	0.00
5	Matériaux granulaire	300	0.35
6	Sol	300	0.35
7			
8			
9			
10			

Couche drainante

Information

Toutes les couches sont parfaitement collées ensemble

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

Caractéristiques de l'état saturé

Correction du facteur saisonnier

VALIDER LE MODULE

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

Sélectionner un type de couche particulier:

Couche Isolante

Couche drainante

Couche de renforcement

Propriété de la couche sélectionnée

Moyenne $S_r / S_{r[ref]}$: 0.931

	Fin du printemps	Été	Automne
Temps à l'état saturé (%)	25	25	25
Valeur de S_r [réf]	0.900	0.900	0.900
S_r pour une section drainée	0.838	0.838	0.838
Gain de rigidité (%)	15.7	15.7	15.7
Facteur, sans couche de drainage	0.82	1.00	1.17
Facteur, avec couche de drainage	0.852	1.039	1.216

Information

Attention : les facteurs saisonniers standard servent de référence. Dans le calcul de la réponse mécanique, le gain de rigidité pondéré sera utilisé pour ajuster les facteurs saisonniers des matériaux.

Modules de logiciel i3c-me



Dommages saisonniers : $D_i = \frac{n_i}{N_i}$

Dommage total : $D_T = \sum D_i$

Modifier la base de données

Déformation permanente

Modèle de fatigue IRI

Modèle de déformation permanente

Déformation en m/m

$$N_r = c_r \times k_{r1} \times \epsilon_v^{k_{r2}}$$

Modèle de la base de donnée:

- Asphalt Institute
- Asphalt Institute
- MnPave
- Huang (1993)
- Roadent
- i3C Ulaval

c_R

VALIDER LE MODULE



Accumulation progressive

Sélection des p

x

Modifier la base de données

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

Déformation permanente Modèle de fatigue **IRI**

Indice international de régularité

$$\Delta IRI_{LT} = 0.6 \left[0.001 \times IRI_0^2 + 0.399 \times h^{0.164} \times CV_G^{0.055} + 0.07 \times \log \left(\frac{age^3}{\sqrt{H_{BB}}} \right) + 1.813 \cdot 10^{-8} \left(\frac{ECAS_A^2}{ECAS_{AD}} \right) - 0.648 \right]$$

h

0

H_{BB}

60

ECAS_A

3286170

Classe de la route:

Rurale

% avec IRI maximal:

70%

IRI₀

1.2

CV_G

0.1

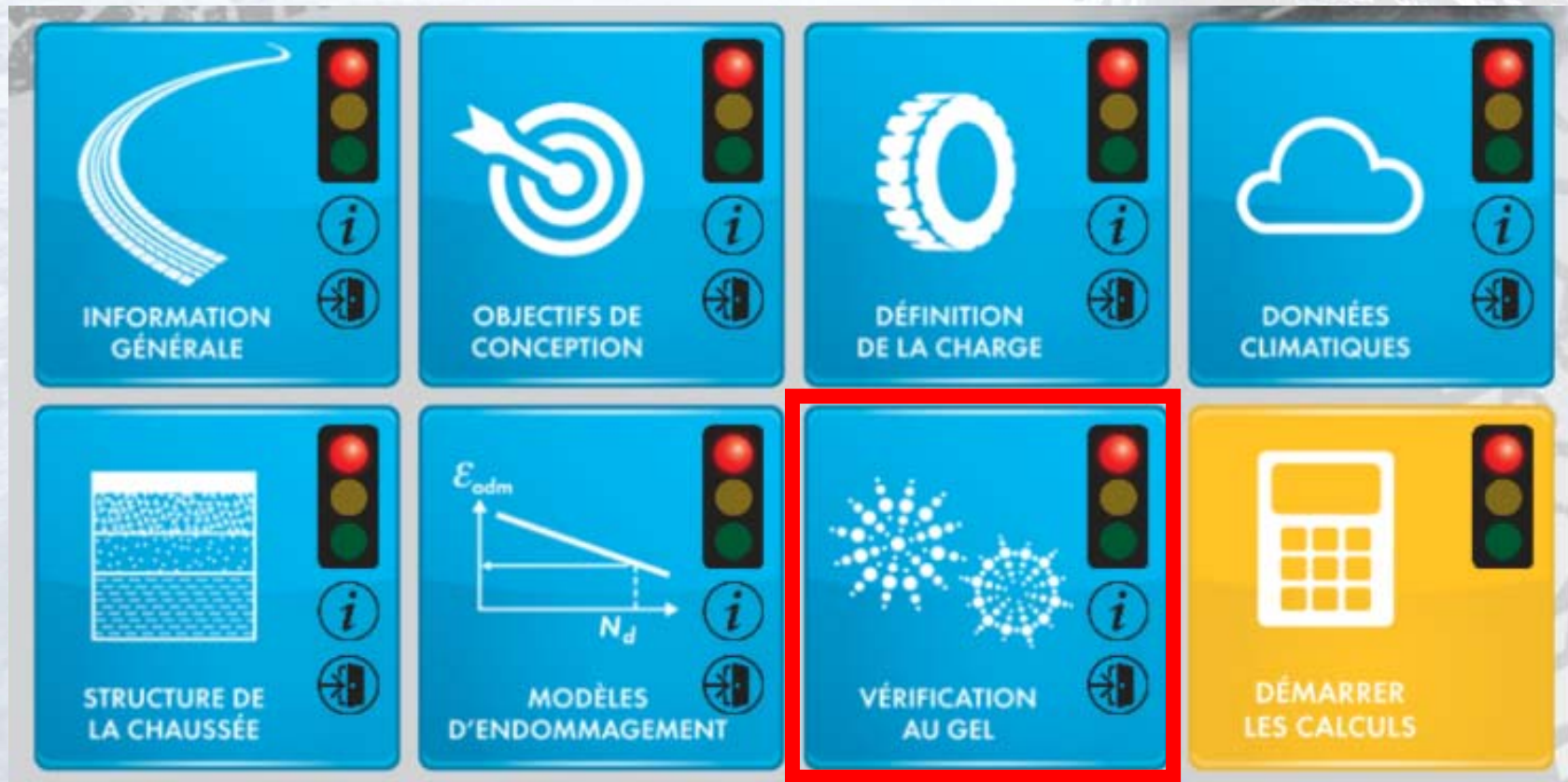
Variabilité:

Uniform (Alluvial terrace, Delta deposit, Marine or Lacustrine Flood Plain)

VALIDER
LE MODULE



Modules de logiciel i3c-me



Structure chaussée

Paramètres géotechniques

Propriétés thermiques

Propriétés thermiques et physiques

Détermination de la pénétration de gel et du soulèvement associé

Outils Aide

Structure de chaussée

Matériau	Épaisseur (mm)
1 Enrobé Bitumineux	60
2 Enrobé Bitumineux	100
3 MG 20	300
4 Couche Isolante	25
5 MG 112	300
6 SM fin	0

Paramètres géotechniques d'entrée

pd (Kg/m ³)	ps (Kg/m ³)	Teneur en eau (%)	Ss Sol (m ² /g)
2490	2650	0.0	0
2543	2650	0.0	0
2200	2720	4.0	0.5
50	300	14.0	0
2050	2640	8.0	0.5
1800	2690	15.0	10.0

Paramètres thermiques d'entrée

Ks (W/m.K)	x (W/m.K)	η	Kappa u	Kappa f	a (1/MPa)	SPo (mm ² /KH)
2.5	0	0	0	0	15	0
2.5	0	0	0	0	15	0
2.5	1.7	1.8	4.7	1.8	15.0	0.0
0.1	0	0	0	0	0	0
4.0	1.7	1.8	4.7	1.8	15.0	0.0
2.5	1.7	1.8	3.0	0.9	11.0	4.0

Paramètres d'entrée calculés

Sr (%)	Lf (Wh/m ³)	Ku (W/mK)	Kf (W/mK)
0.0	1250	1.99	1.99
0.0	1250	2.25	2.25
46.0	8164	1.68	1.78
0.8	649	0.03	0.03
73.4	15216	2.48	3.03
81.6	25050	1.48	1.93

Données climatiques de base

Température moyenne annuelle de l'air (°C) : 4.04

Coefficient de transfert air -> Surface : 0.90

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 normal de l'air: 1223

Détermination de l'indice de gel rigoureux : Approche probabiliste Estimation

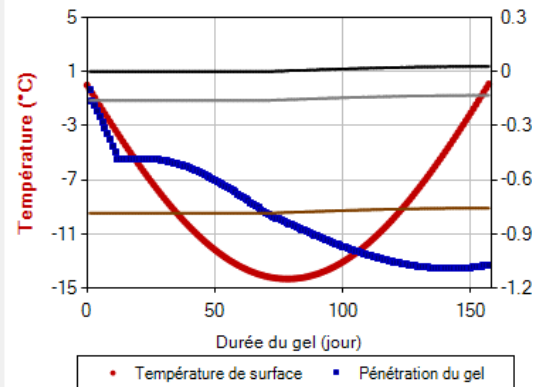
Écart type de l'indice de gel: 209 Période de récurrence: 30

Indice de gel rigoureux de surface : (Théorique) 1446.37 (Simulé) 1446.59

Amplitude du sinus par rapport à sa moyenne : 18.35

Durée de la période de gel (en jours) : 156.7

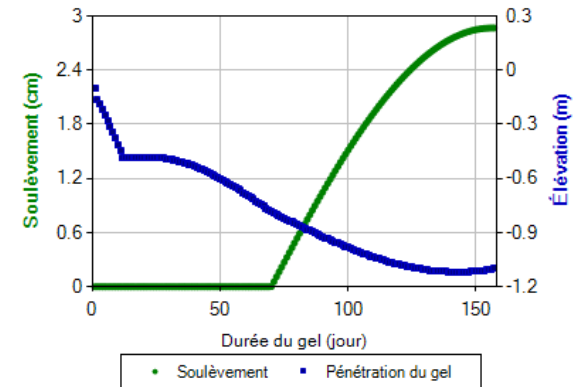
Évolution de la température et de la profondeur de gel



Penetration du gel (en m) : 1.119

VALIDER LE MODULE

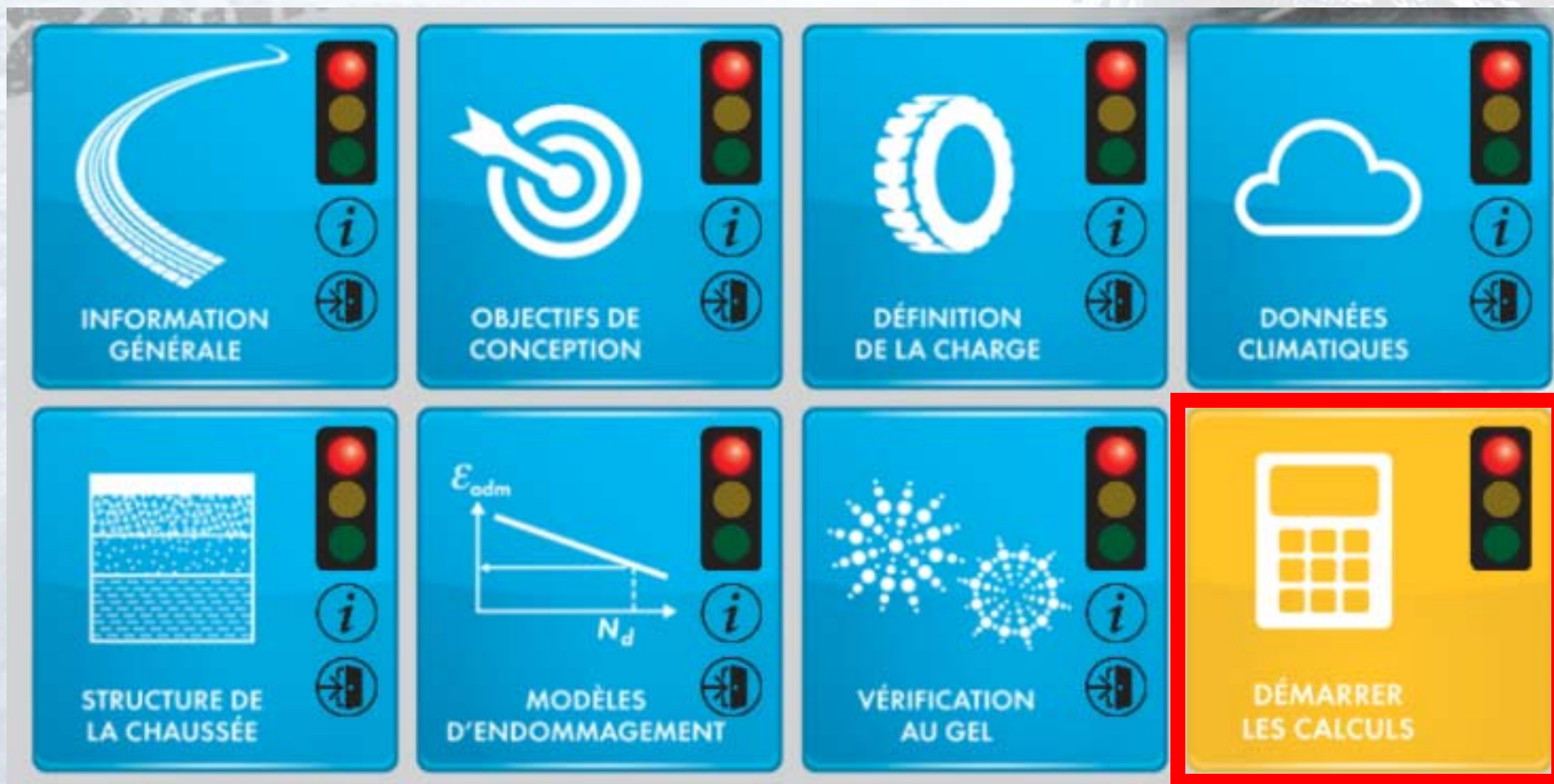
Évolution du soulèvement et de la profondeur de gel



Soulèvement engendré par le gel (en cm) : 2.87

Soulèvement admissible (en cm) : 5.009

Modules de logiciel i3c-me



Résultats

Résultat des calculs

Données | Données | Automne | Hiver | Début printemps | Fin printemps | **Été** | Résultats | IRI | Synthèse des résultats

Pour la saison d'été, les modules de chaque couche ainsi que les déformations et les contraintes associées au calcul de l'endommagement sont présentés ici:

Saison: Été

Structure de chaussée

Couche No.	Épaisseur (mm)	Module Élastique(MPa)	Coefficient Poisson	Condition Interface
1.1	015	2 671.00	0.29	1.00
1.2	020	2 786.00	0.29	1.00
1.3	025	2 906.00	0.29	1.00
2.1	015	3 807.00	0.27	1.00
2.2	020	3 873.00	0.26	1.00
2.3	025	3 947.00	0.26	1.00
2.4	050	4 022.00	0.26	1.00
3.1	060	164.00	0.35	1.00
3.2	090	137.00	0.35	1.00
3.3	150	122.00	0.35	1.00
4.1	060	89.00	0.35	1.00
4.2	090	89.00	0.35	1.00
4.3	120	89.00	0.35	1.00
4.4	300	93.00	0.35	1.00
4.5	330	103.00	0.35	1.00
5.1	000	70.00	0.35	1.00

Calcul de la durée de vie en fatigue

Les déformations et les contraintes sont évaluées au bas de la couche N° 7

Durée de la saison : La saison dure 108 jours, soit 29.6 % de l'année

Nombre de passage total admissible en fatigue pour la saison : 11.27 (en million)

Nombre de passage total admissible en déformation permanente : 1955.70 (en million)

Nombre de passage de charge rencontré au cours de la saison sur la durée de vie utile: 5.92 (en million)

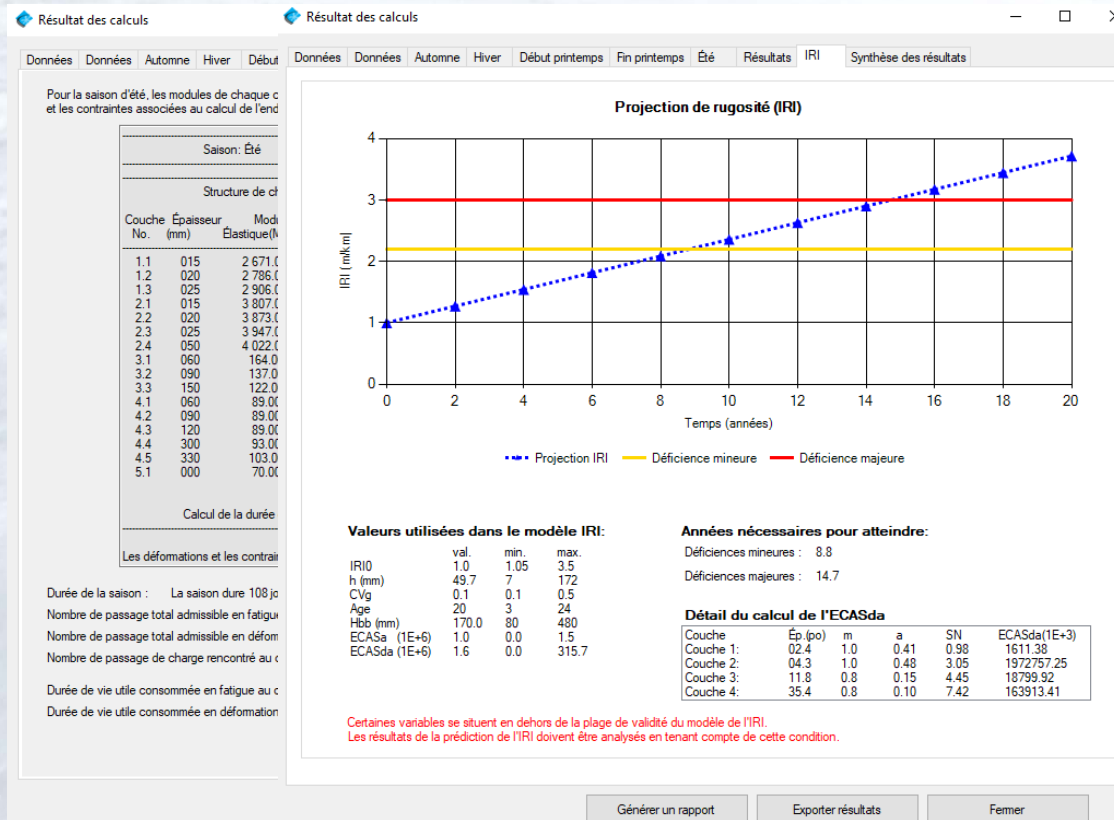
Durée de vie utile consommée en fatigue au cours de cette saison: 52.49 (en %)

Durée de vie utile consommée en déformation permanente au cours de cette saison: 0.30 (en %)

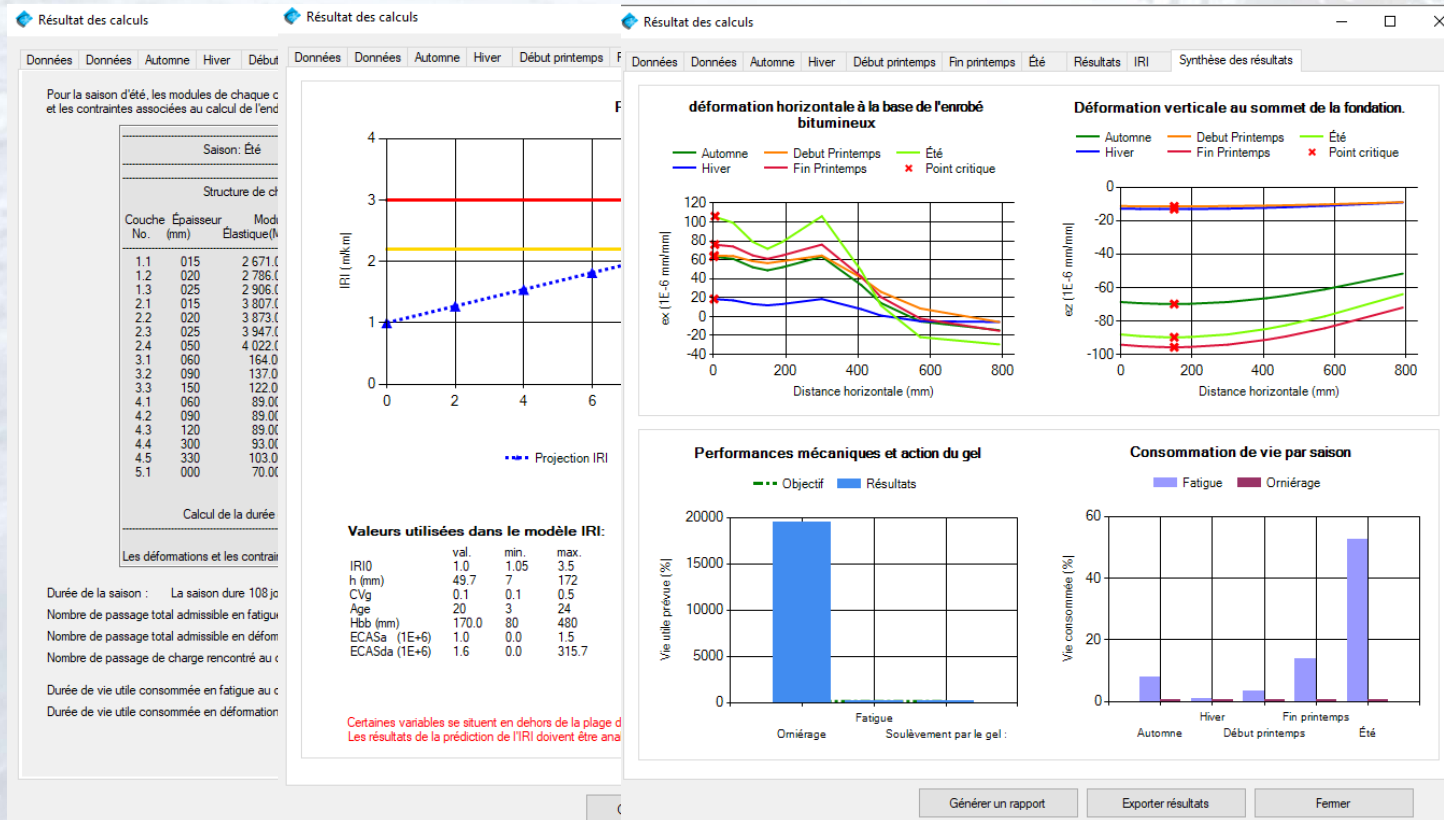
Générer un rapport | Exporter résultats | Fermer



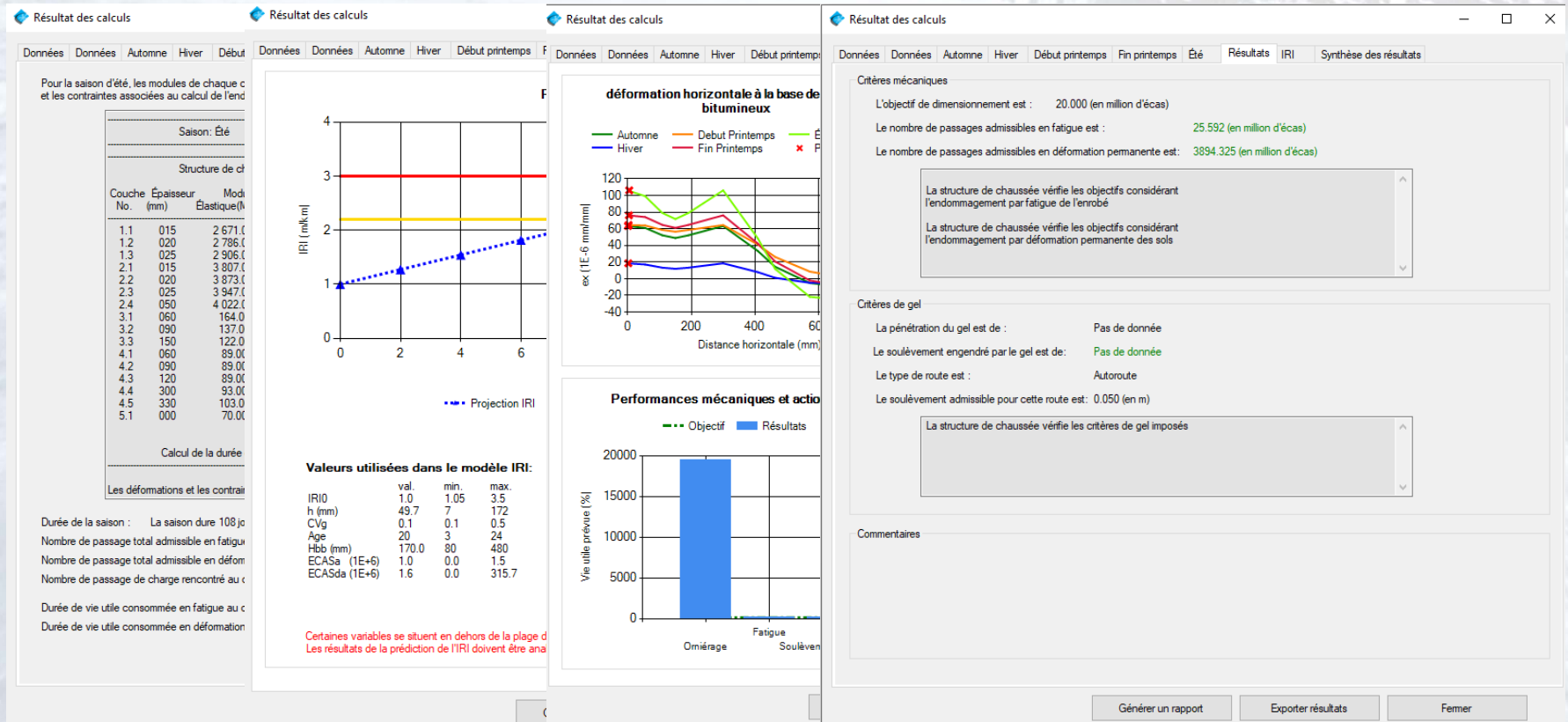
Résultats



Résultats



Résultats



Évolution du logiciel i3C-me

i3C-me (v1.0)
2016

i3C-me (v2.0)
2019

i3C-me (v2.5)
+
i3C-SHL (v1.0)
(Décembre 2020)

Conclusions

- i3C-me est un outil très récent et en développement constant
- Outil de dimensionnement des chaussées flexibles gratuit et simple d'utilisation
- Considérations recherches et connaissances du Québec
- Plateforme idéale pour transposer résultats de recherche

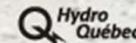
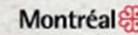
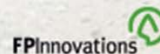




Chaire de recherche industrielle
du CRSNG sur l'interaction
charges lourdes-climat-chaussées

Merci pour votre attention !

Partenaires



opSens
18/12/2020

Symposium international i3C