

Validation d'une structure de chaussée à l'aide de



Outil de Prédiction de l'Évolution du Comportement des Chaussées

Mathieu Meunier – Daniel Perraton

Bitume Québec - Novembre 2010

Plan de la présentation

1. Mise en contexte

2. Objectifs

3. Principes de base de l'outil de calcul

4. Capacité et limite

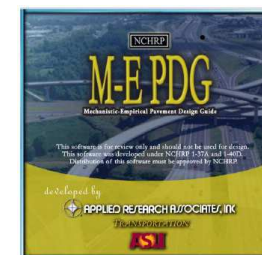
5. Formulation – Autoroutier et Urbain

6. Simulations

7. Conclusions

1. Mise en contexte

- L'outil de prédiction  se veut un complément aux outils de dimensionnement de chaussée
- Il ne veut en aucun cas concurrencer les outils suivants :



Plan de la présentation

1. Mise en contexte

2. Objectifs

3. Principes de base de l'outil de calcul

4. Capacité et limite

5. Formulation – Autoroutier et Urbain

6. Simulations

7. Conclusions

2. Objectifs



Orienter et guider l'étape de conception



Prédire le comportement à long terme de la chaussée



Economiser et maximiser chaque dollar investi dans le réseau routier



Concevoir des chaussées durables



Créer un réseau routier de qualité

2. Objectifs



Prédire le comportement à long terme
de la chaussée ...



... le comportement vis-à-vis l'ORNIÉRAGE

Ornières de type fluage causés par les couches
de matériaux bitumineux

2. Objectifs



Prédire le comportement à long terme
de la chaussée ...



... le comportement vis-à-vis la **FATIGUE**

La **FATIGUE** : fissuration dans traces de roues

La **RUINE** : fissuration problématique
dans traces de roues ...
en l'absence d'entretien

Plan de la présentation

1. Mise en contexte

2. Objectifs

3. Principes de base de l'outil de calcul

4. Capacité et limite

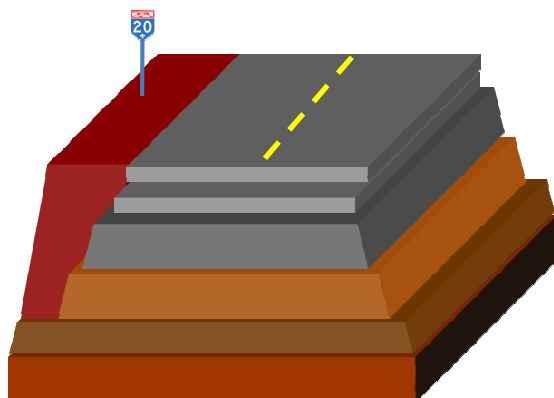
5. Formulation – Autoroutier et Urbain

6. Simulations

7. Conclusions

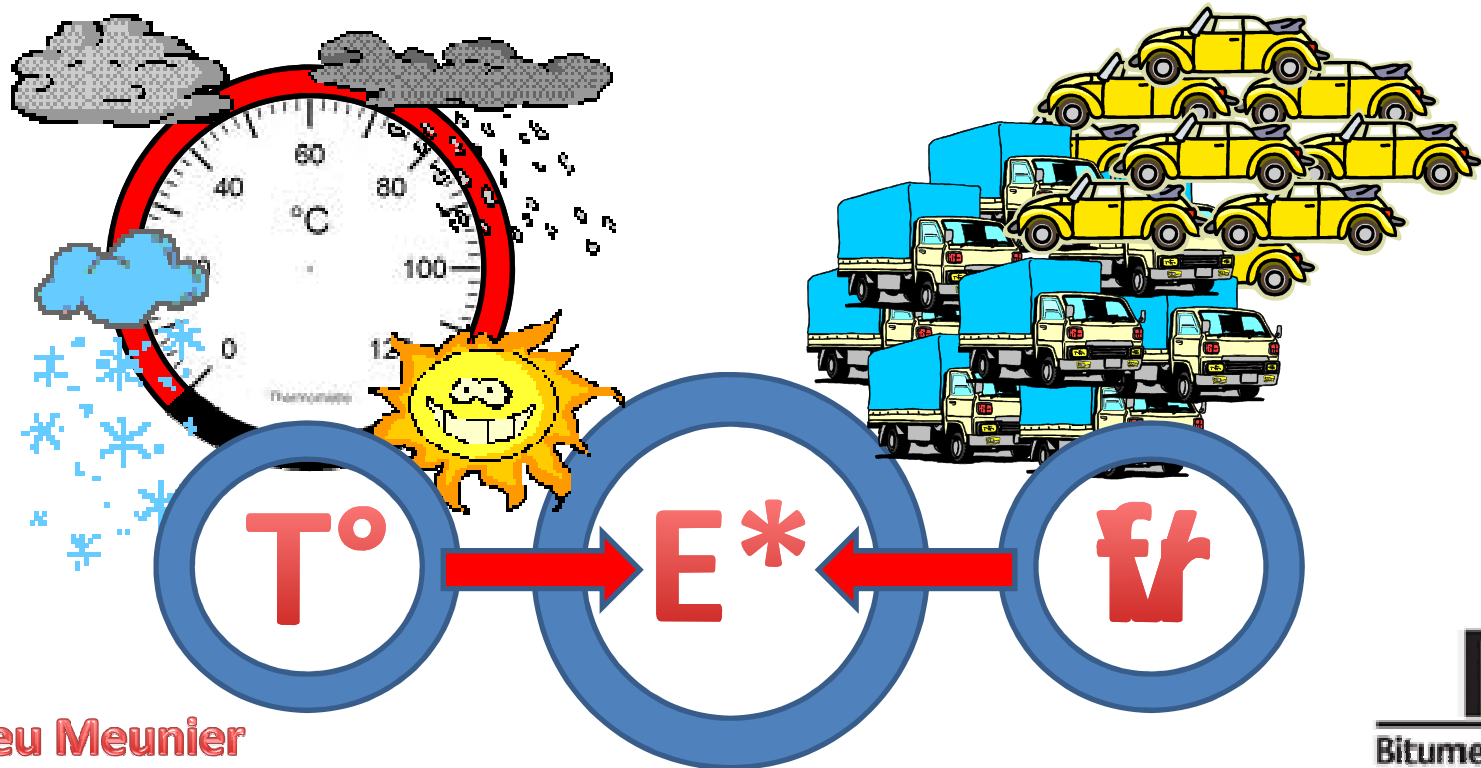
3. Principe de base de l'outil

- Évolution de la chaussée dans le temps...
dépend de :



3. Principe de base de l'outil

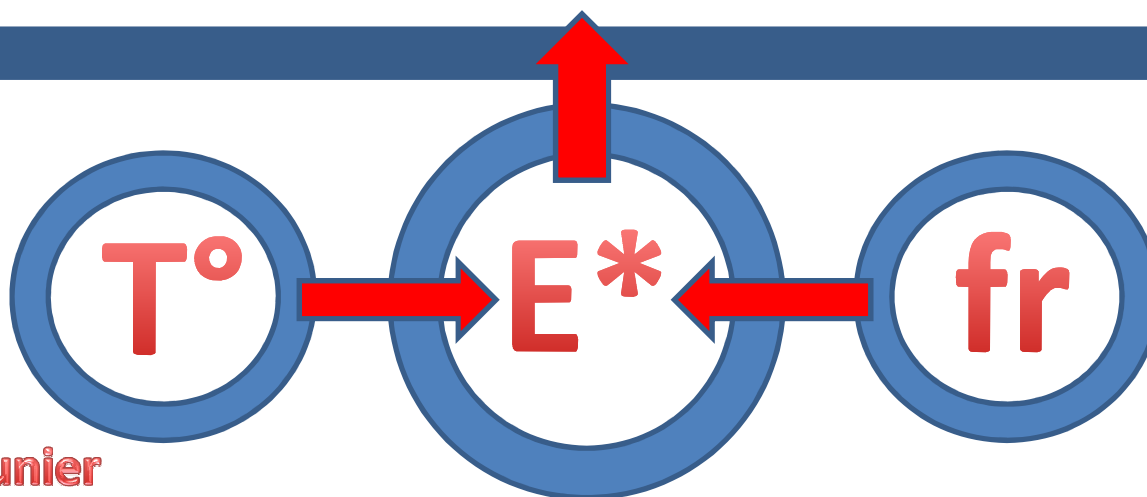
- Mais ... l'Évolution de la chaussée dépend en grande partie de :



3. Principe de base de l'outil

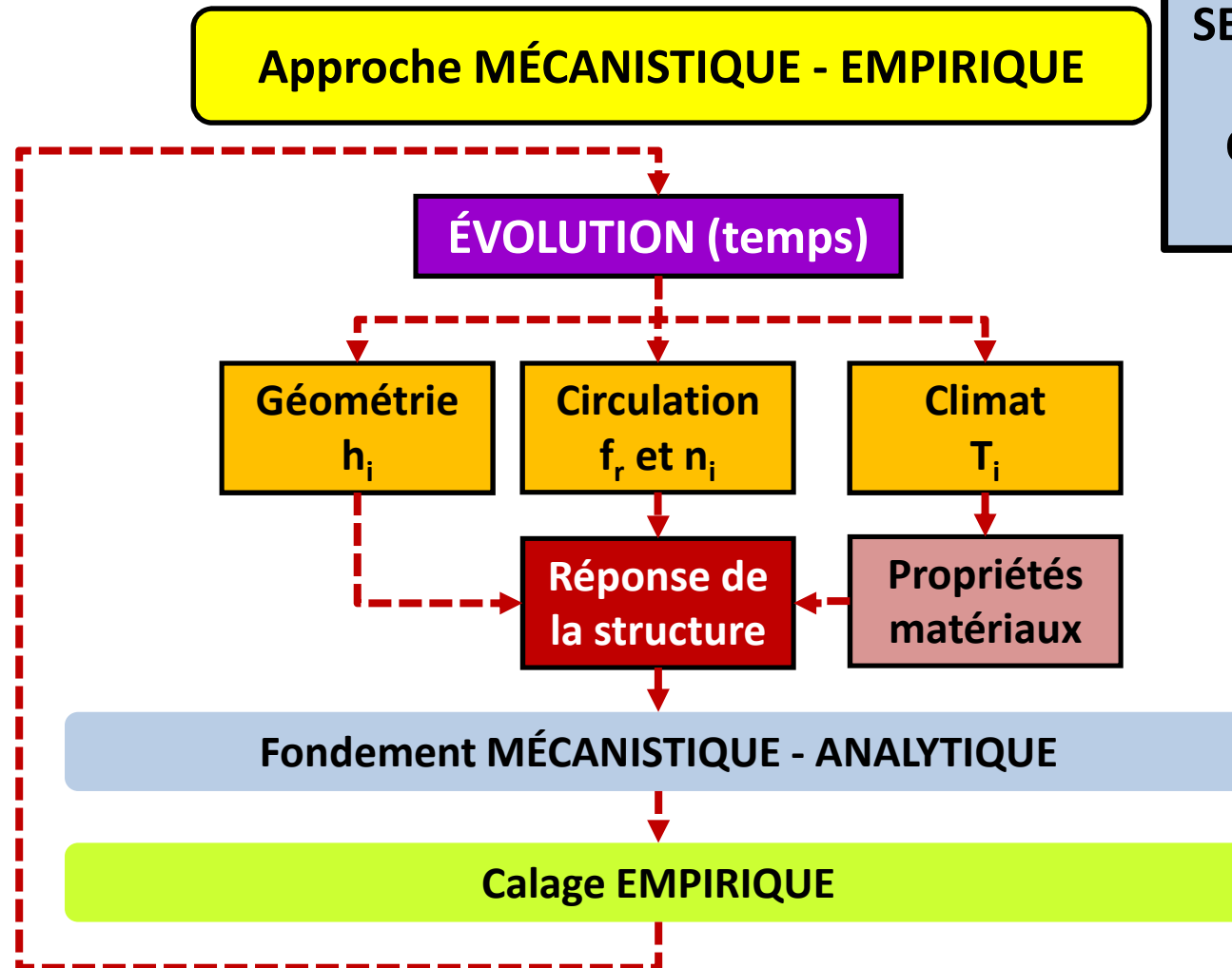
- Évolution de la chaussée dans le temps...
dépend en grande partie de :

... d'où l'IMPORTANT et la nécessité
de la caractérisation des matériaux

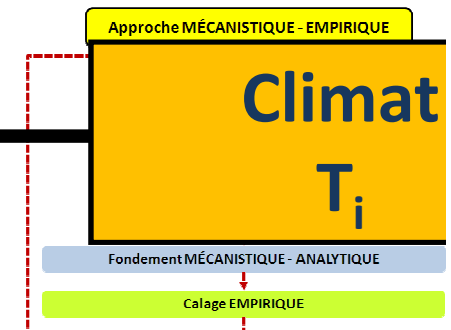


3. Principe de base de l'outil

Basée sur la
méthodologie
SETRA 1994 et
le logiciel
Chaussée 2
(gel-dégel)



3. Principe de base de l'outil



- Les calculs des profils de température dans la chaussées sont basés sur la théorie de la conductivité de la chaleur et de l'équation développée par MM. SHAO, PARK et KIM

3. Principe de base de l'outil

Réponse de la
structure

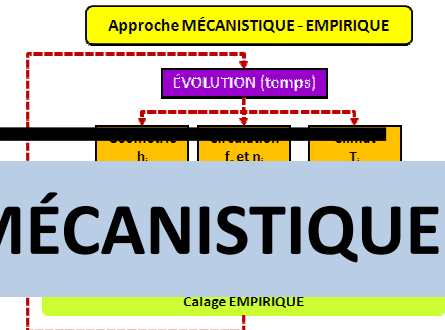
Approche MÉCANISTIQUE - EMPIRIQUE

Calage EMPIRIQUE

- Calculs $\sigma - \epsilon$ basés sur BURMISTER (comportement élastique) et fournis par le logiciel KENPAVE
- Calculs de E^* basés sur la modélisation VEL (modèle 2S2P1D) et Huet Sayegh (OLARD 2003, Di BENEDETTO et al.2004)

3. Principe de base de l'outil

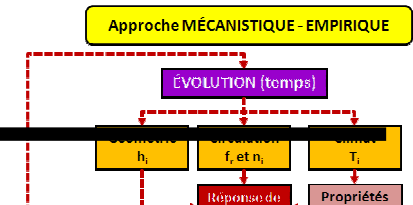
Fondement MÉCANISTIQUE



- **WÖHLER** : (courbe) loi durée de vie - fatigue
- **MINER** : loi d'accumulation du dommage
 - Dommage élémentaire (d_r)
 - Cumul des dommages (D_r)
- **ESSO** : loi d'orniérage et de son

**LOIS
DE LA
MMC**

3. Principe de base de l'outil



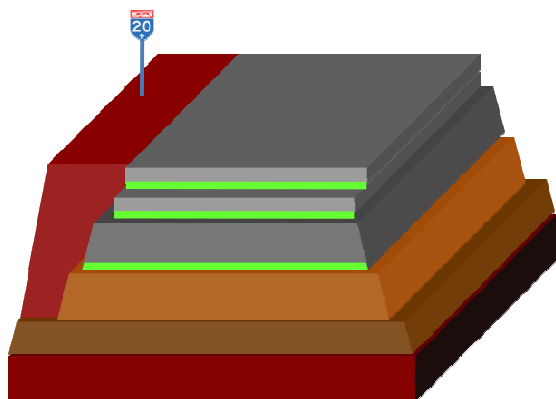
Calage EMPIRIQUE

- **Modèle de PERFORMANCE**
 - **Fatigue = Fissuration « FC »**
 - **Basé sur une fonction de « transfert »**

Plan de la présentation

1. Mise en contexte
2. Objectifs
3. Principes de base de l'outil de calcul
- 4. Capacité et limite**
5. Formulation – Autoroutier et Urbain
6. Simulations
7. Conclusions

4. Capacité et limite



- 1 couche d'infrastructure
 - Possibilité jusqu'à 4 couches de matériaux granulaires
 - Possibilité jusqu'à 4 couches de matériaux bitumineux
-

9 couches possibles



OPTION : Interfaces des couches
Collées ou Non-Collées

4. Capacité et limite



- Calcul sur une période de temps désirée ou pré-sélectionnée



- Température calculée à chaque haut et milieu de couche

E*

- Module complexe calculé pour chaque couche de matériau bitumineux

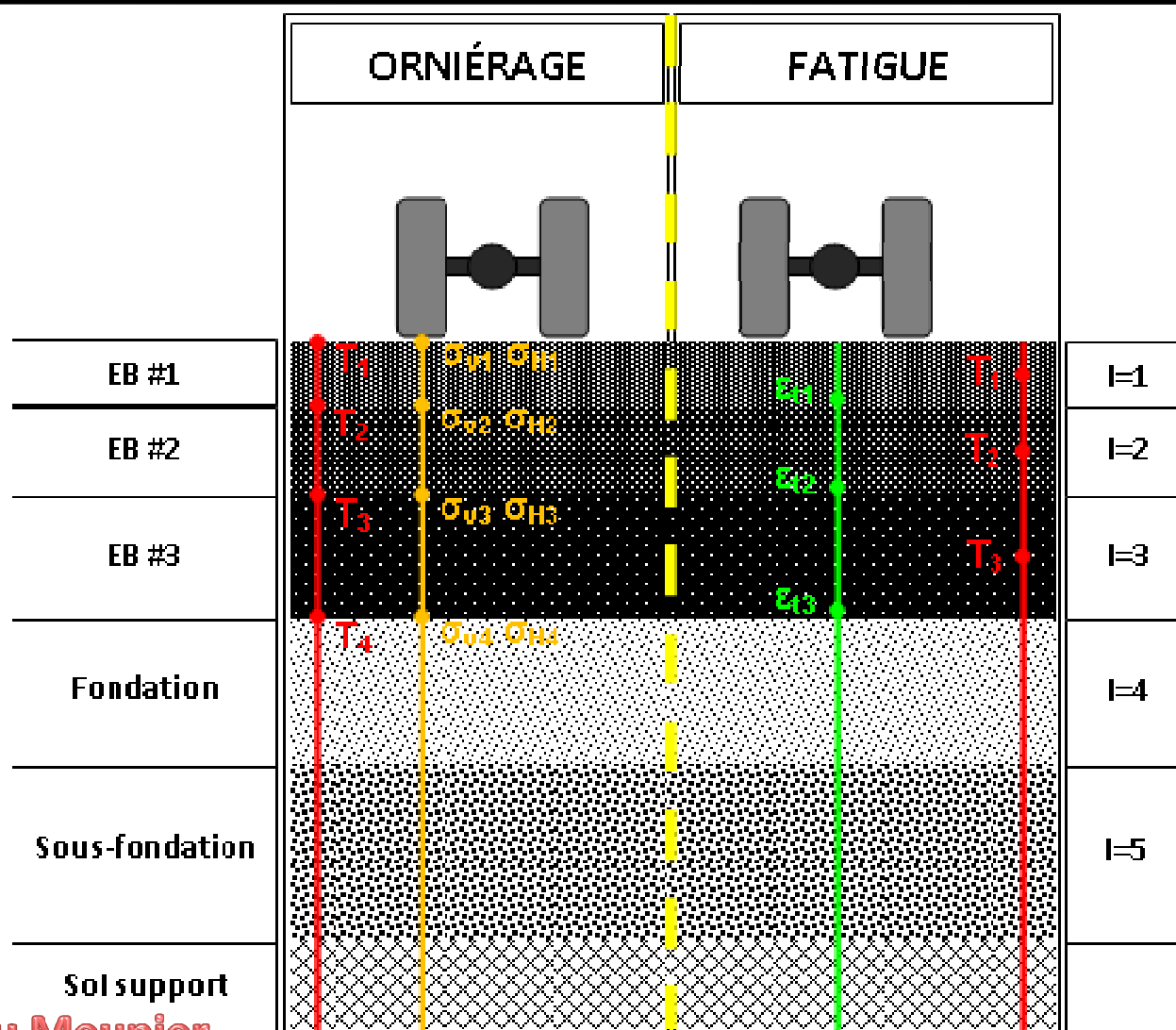


- Possibilité de tenir compte de la période de dégel – variation des modules des couches granulaires



- Sollicitation, DJMA , ECAS et CA variable

4. Capacité et limite



Mathieu Meunier

4. Capacité et limite



- **OPECC** prend en considération le **RISQUE** que l'on désire prendre dans le projet

Approche FRANÇAISE = « Notion de RISQUE »



- 1 **OPECC** considère la variation du design pour une même période de temps « p »
- 2 La variation du design dépend du **RISQUE** que l'on veut prendre ... 10% - 20% ... 50%

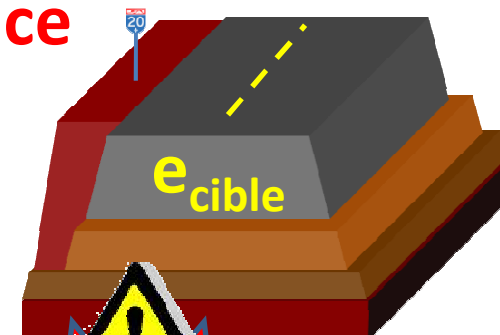
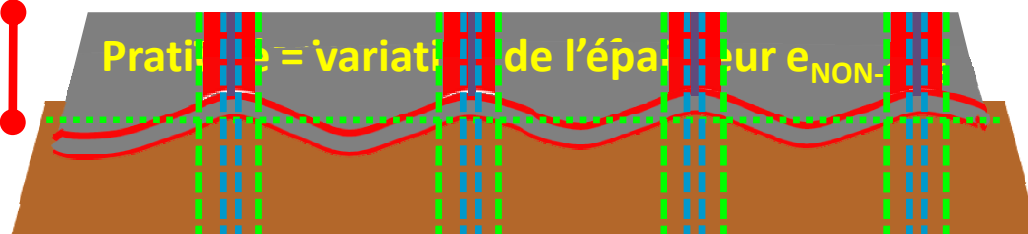
4. Capacité et limite



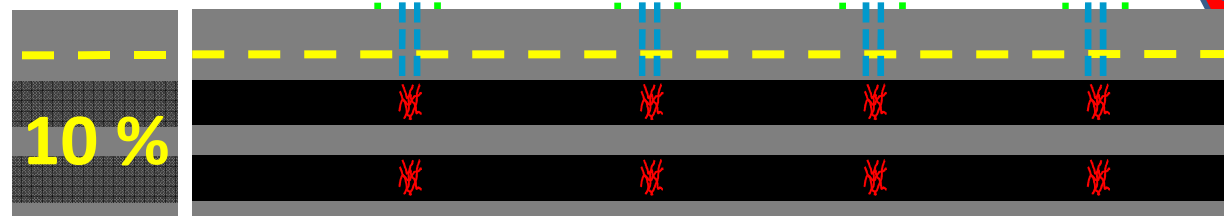
• Notion de RISQUE ... Mise en place

e_{cible}

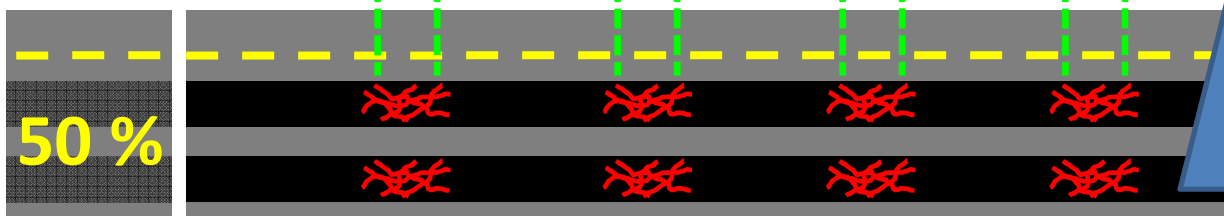
Pratiqué = variation de l'épaisseur e_{NON-}



10 %



50 %



Comment
réduire le
risque ?

↑ e

4.

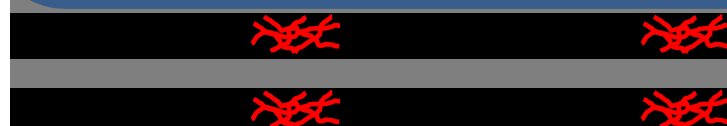


10 %

Épaisseur de pose plus élevée

Toujours sur une même période « p »

- Risque plus faible
- Apparition des fissures dans les traces de roues moins prononcée



10 % de la
chaussée
fissurée

20 %

Donc... pour une même épaisseur de pose

Toujours sur une même période « p »

- Plus le RISQUE est ÉLEVÉ, plus la fissuration sera PRONONCÉE

50 %



50 % de la
chaussée
fissurée

Plan de la présentation

1. Mise en contexte
2. Objectifs
3. Principes de base de l'outil de calcul
4. Capacité et limite
- 5. Formulation – Autoroutier et Urbain**
6. Simulations
7. Conclusions

5. Formulation

- 1^{er} cas : Milieu AUTOROUTIER

Paramètres de conception	
Durée de vie	30 ans
Fiabilité	0,95
Module résilient Mr, sol support	47 MPa
Situation géographique	Dorval
DJMA	40 000
CAM	1
% Poids lourds	10,0
% de croissance annuelle	2,0
Jours / année	300

5. Formulation - Milieu AUTOROUTIER

- 1^{ère} Étape : Définir le sol support
 - Données : $M_r = 47 \text{ MPa}$
 - Action : Définir la classe de portance

Tableau IV.1. – Classes de portance à long terme au niveau de l'arase de la PST

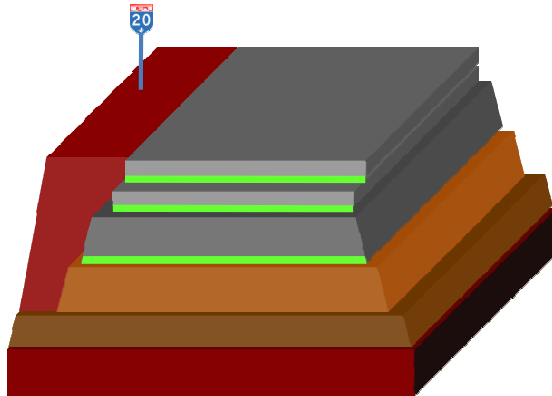
Module (MPa)	20	47	120	200
Classe de l'arase	AR1	AR2	AR3	AR4

AR1

« ... la méthode de dimensionnement est calée en retenant les caractéristiques mécaniques correspondant aux conditions hydriques les plus défavorables pour la chaussée... » Guide SETRA IV.3.5.

5. Formulation - Milieu AUTOROUTIER

- 1^{ère} Étape : Définir le sol support



$$M_{r \text{ sol support}} = 20 \text{ MPa}$$

5. Formulation - Milieu AUTOROUTIER

- 2^e Étape : Définir l'épaisseur de la couche de forme
 - Données : Classe de l'arase = AR1
 - Action : Définir le EV_2 de la plate-forme

« ... pour des chantiers, comme ceux des autoroutes, où la circulation sur la couche de forme sera importante ... les seuils suivants peuvent être relevés : un module EV_2 d'au moins 80 MPa » Guide SETRA IV.2.

5. Formulation - Milieu AUTOROUTIER

- 2^e Étape : Définir l'épaisseur de la couche de forme
 - **Données** : $EV_{2PF} = \min 80 \text{ MPa}$ et $EV_{2AR} = 20 \text{ MPa}$
 - **Action** : Définir l'épaisseur de la plate-forme

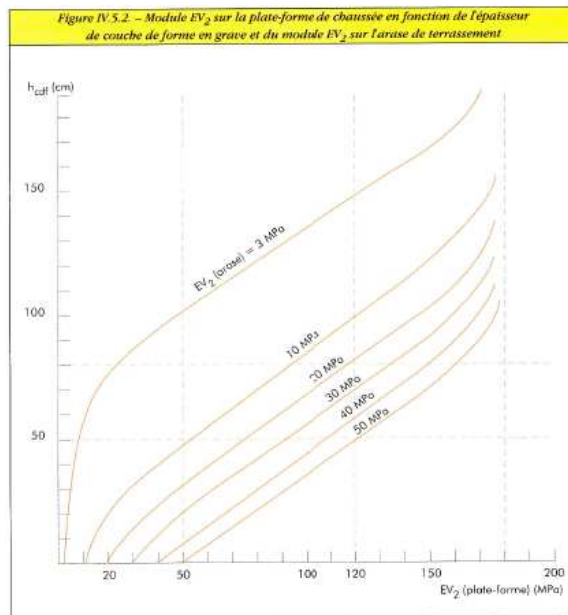


Figure IV.5.2. – Module EV_2 sur la plate-forme de chaussée en fonction de l'épaisseur de couche de forme en grave et du module EV_2 sur l'arase de terrassement Guide SETRA IV.5.3.1.

5. Formulation - Milieu AUTOROUTIER

- 2^e Étape : Définir l'épaisseur de la couche de forme

Épaisseur établie
pour des granulats
roulés...

H_{cdf} (cm)
Épaisseur de la
couche de forme

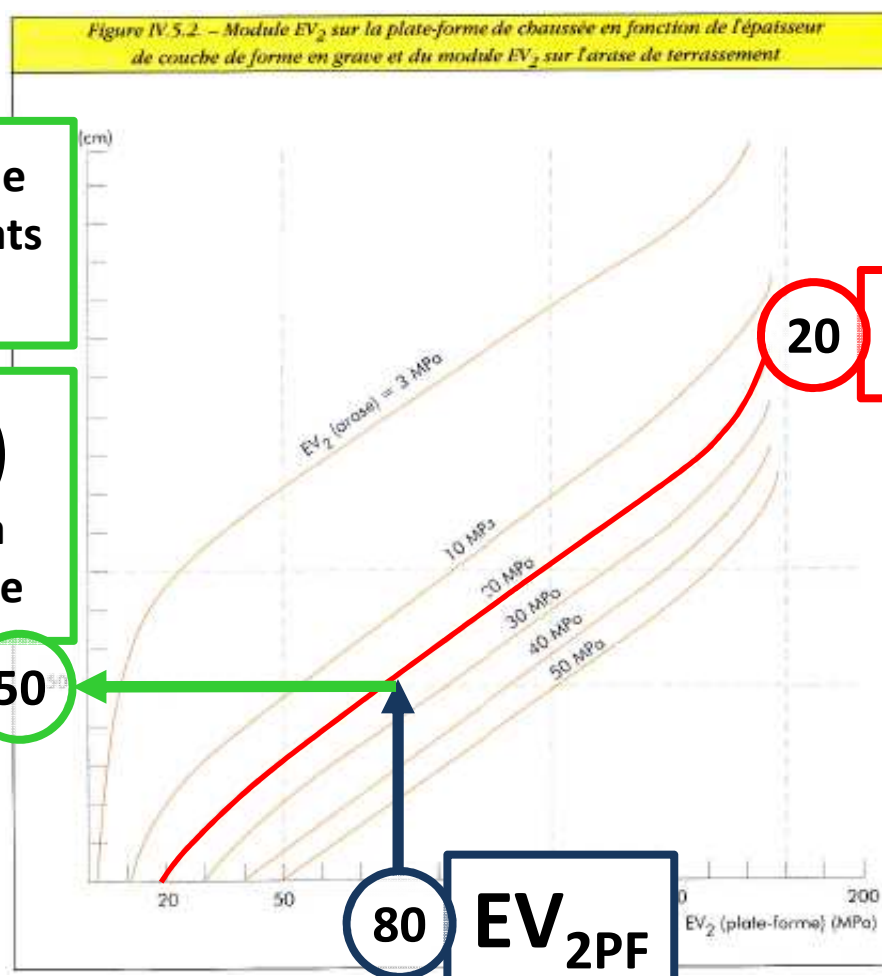
50

20

EV_{2AR1}

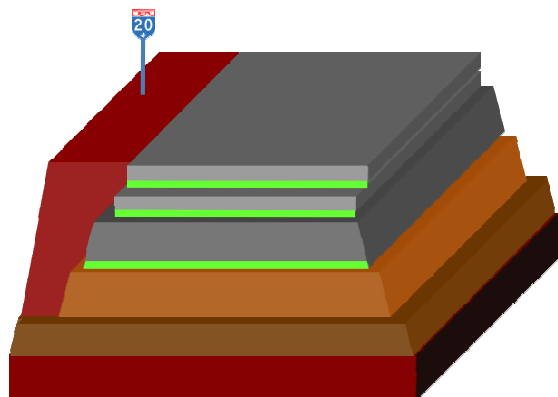
80

EV_{2PF}



5. Formulation - Milieu AUTOROUTIER

- 2^e Étape : Définir l'épaisseur de la couche de forme



$$E_{CF} = 80 \text{ MPa}$$

$$e_{CF} = 50 \text{ cm}$$

$$M_{r \text{ sol support}} = 20 \text{ MPa}$$

5. Formulation - Milieu AUTOROUTIER

- 3^e Étape : Définir la couche de fondation
 - **Données** : Consultation Chaussée 2 pour 1065-500
l'effet du gel-dégel – $E_{GNT} = 10$ **565**
 - **Action** : Définir les modules des CF et « e »

Tableau V.3.2. – Valeurs de module d'Young des couches de GNT pour le dimensionnement

Chaussées à moyen trafic (T2 et T1) : structures GB/GNT

Couches de fondation
(GNT subdivisée en sous-couches
de 0,25 m d'épaisseur)

$E_{GNT} [1] = 3 E_{\text{plate-forme support}}$
 $E_{GNT} [\text{sous-couche } i] = 3 E_{GNT} [\text{sous-couche } (i-1)]$
 E_{GNT} borné par 360 MPa

Dimensionnement des chaussées neuves
Guide SETRA VI.2.5.1.

5. Formulation - Milieu AUTOROUTIER

• 3^e Étape : Définir la couche de fondation

• Action : Définir les modules des CF et « e »

Tableau V.3.2. – Valeurs de module d'Young des couches de GNT pour le dimensionnement

Chaussées à moyen trafic (T2 et T1) : structures GB/GNT

Couches de fondation
(GNT subdivisée en sous-couches
de 0,25 m d'épaisseur)

25

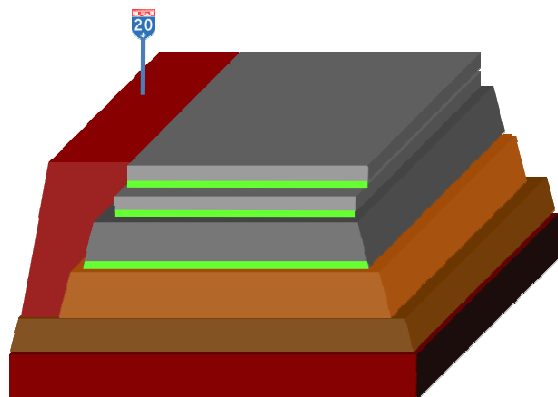
$E_{GNT} [1] = 3 E_{\text{plate-forme support}}$
 $E_{GNT} [\text{sous-couche } i] = 3 E_{GNT} [\text{sous-couche } (i-1)]$
 E_{GNT} borné par 360 MPa

1065-500
565

ère GNT (112) : $e = 25 \text{ cm}$; $E = 3 * E_{PFS} = 3 * 80 = 240 \text{ MPa}$
 GNT (112) : $e = 11,5 \text{ cm}$; $E = 3 * E_{GNT1} = 3 * 240 = 720 \text{ MPa}$
 Mais le E_{GNT} est limité à 360 MPa
 GNT (20) : $e = 20 \text{ cm (minimum MTQ)} = 360 \text{ MPa}$

5. Formulation - Milieu AUTOROUTIER

- 3^e Étape : Définir la couche de fondation



$$\begin{aligned} E_{\text{GNT3}} (20) &= 360 \text{ MPa} \\ e_{\text{GNT3}} (20) &= 20 \text{ cm} \\ E_{\text{GNT2}} (112) &= 360 \text{ MPa} \\ e_{\text{GNT2}} (112) &= 11,5 \text{ cm} \\ E_{\text{GNT1}} (112) &= 240 \text{ MPa} \\ e_{\text{GNT1}} (112) &= 25 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{CF}} &= 80 \text{ MPa} \\ e_{\text{CF}} &= 50 \text{ cm} \end{aligned}$$

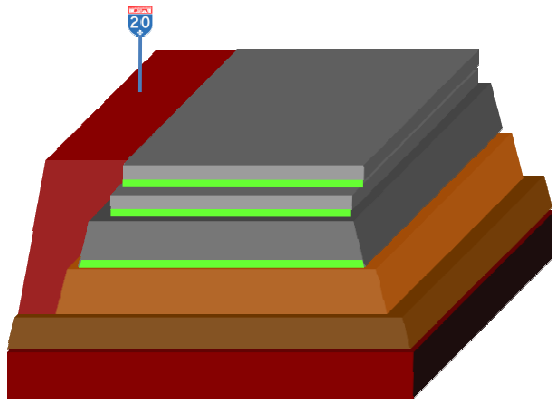
$$M_{\text{r sol support}} = 20 \text{ MPa}$$

5. Formulation - Milieu AUTOROUTIER

- 4^e Étape : Définir les couches d'enrobés
 - Données : Même design que le MTQ pour fin de validation
 - Action : Définir les valeurs de E^* (Huet-Sayegh), de fatigue (Wöhler) et d'orniérage (loi Esso)

5. Formulation - Milieu AUTOROUTIER

- 4^e Étape : Définir les couches d'enrobés



$E(\text{ESG-10}) = 7789 \text{ MPa}$
 $e(\text{ESG-10}) = 5,0 \text{ cm}$
 $E(\text{ESG-14}) = 7931 \text{ MPa}$
 $e(\text{ESG-14}) = 7,7 \text{ cm}$
 $E(\text{GB-20}) = 6969 \text{ MPa}$
 $e(\text{GB-20}) = 10,5 \text{ cm}$



$E_{\text{GNT3}}(20) = 360 \text{ MPa}$
 $e_{\text{GNT3}}(20) = 20 \text{ cm}$
 $E_{\text{GNT2}}(112) = 360 \text{ MPa}$
 $e_{\text{GNT2}}(112) = 11,5 \text{ cm}$
 $E_{\text{GNT1}}(112) = 240 \text{ MPa}$
 $e_{\text{GNT1}}(112) = 25 \text{ cm}$

$E_{\text{CF}} = 80 \text{ MPa}$
 $e_{\text{CF}} = 50 \text{ cm}$

$M_{\text{r sol support}} = 20 \text{ MPa}$

5. Formulation

- 2^e cas : Milieu URBAIN

Paramètres de conception	
Durée de vie	25 ans
Fiabilité	0,85
Module résilient Mr, sol support	45 MPa
Situation géographique	Jardin Botanique, MTL
DJMA	7 500
CAM	2,7
% Poids lourds	15,0
% de croissance annuelle	3,0
Jours / année	365

5. Formulation - Milieu URBAIN

- 1^{ère} Étape : Définir le sol support
 - Données : $M_r = 45 \text{ MPa}$
 - Action : Définir la classe de portance

Tableau IV.1. – Classes de portance à long terme au niveau de l'arase de la PST

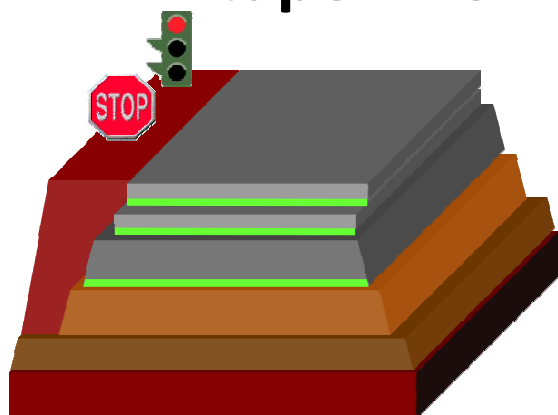
Module (MPa)	20	47.5	120	200
Classe de l'arase	AR1	AR2	AR3	AR4

AR1

« ... la méthode de dimensionnement est calée en retenant les caractéristiques mécaniques correspondant aux conditions hydriques les plus défavorables pour la chaussée... » Guide SETRA IV.3.5.

5. Formulation - Milieu URBAIN

- 1^{ère} Étape : Définir le sol support



$$M_{r \text{ sol support}} = 20 \text{ MPa}$$

5. Formulation - Milieu URBAIN

- 2^e Étape : Définir l'épaisseur de la couche de forme
 - Données : Classe de l'arase = AR1
 - Action : Définir le EV_2 de la plate-forme

« ... pour les chantiers courants, les valeurs généralement retenues sont :
Le module EV_2 ... soit supérieur à 50 MPa »
Guide SETRA IV.2.

5. Formulation - Milieu URBAIN

- 2^e Étape : Définir l'épaisseur de la couche de forme
 - **Données** : $EV_{2PF} = \min 50 \text{ MPa}$ et $EV_{2AR} = 20 \text{ MPa}$
 - **Action** : Définir l'épaisseur de la plate-forme

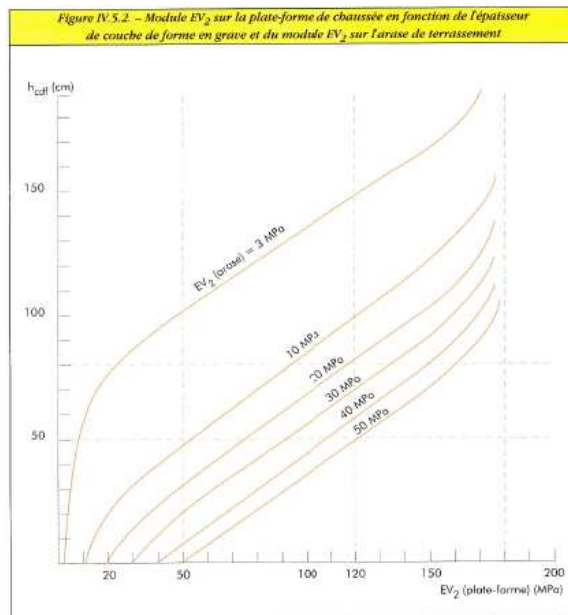
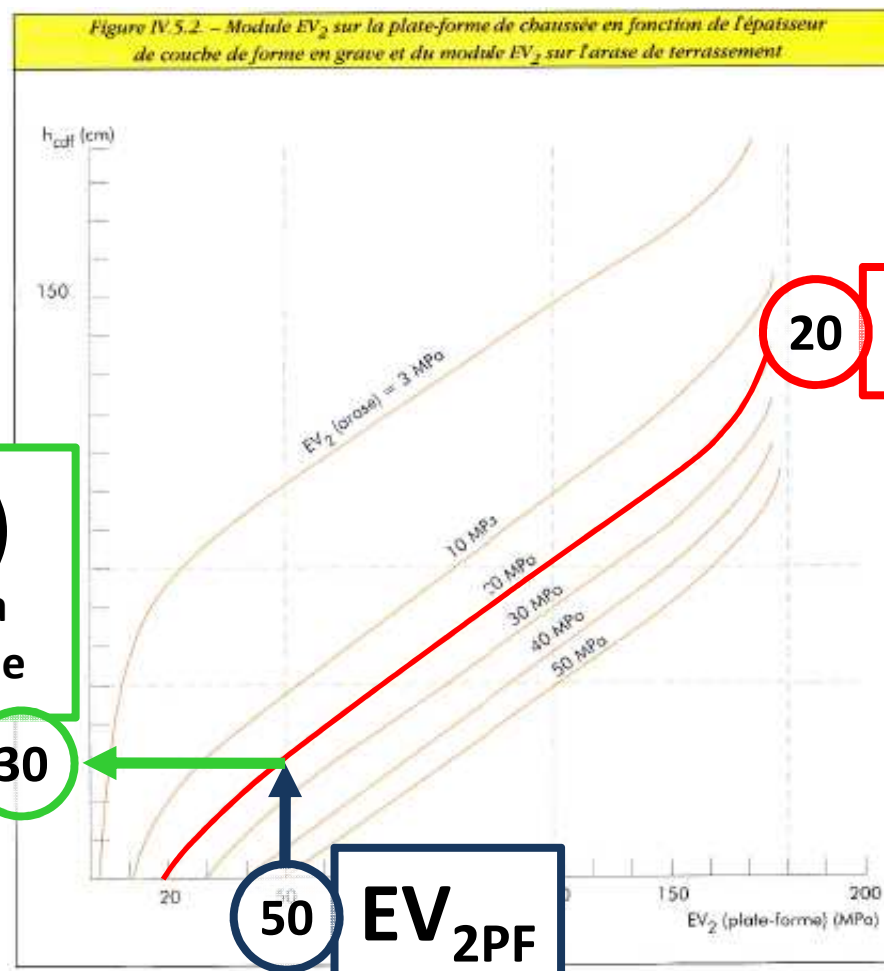


Figure IV.5.2. – Module EV_2 sur la plate-forme de chaussée en fonction de l'épaisseur de couche de forme en grave et du module EV_2 sur l'arase de terrassement Guide SETRA IV.5.3.1.

5. Formulation - Milieu URBAIN

- 2^e Étape : Définir l'épaisseur de la couche de forme

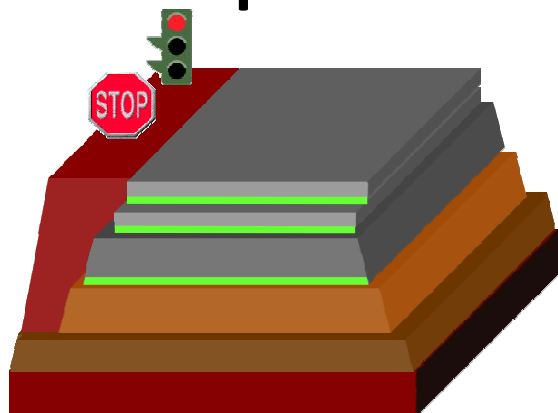


H_{cdf} (cm)
Épaisseur de la
couche de forme

Mathieu Meunier

5. Formulation - Milieu URBAIN

- 2^e Étape : Définir l'épaisseur de la couche de forme



$$E_{CF} = 50 \text{ MPa}$$

$$e_{CF} = 30 \text{ cm}$$

$$M_{r \text{ sol support}} = 20 \text{ MPa}$$

5. Formulation - Milieu URBAIN

- 3^e Étape : Définir la couche de fondation
 - Données** : Consultation Chaussée 2 pour 795-300
l'effet du gel-dégel – $E_{GNT} = 795$ **465**
 - Action** : Définir les modules des CF et « e »

Tableau V.3.2. – Valeurs de module d'Young des couches de GNT pour le dimensionnement

T1 car
DJMA_{VPS}
± 407

es à moyen trafic (T2 et T1) : structures GB/GNT

de fondation
divisée en sous-couches
m d'épaisseur)

$E_{GNT} [1] = 3 E_{\text{plate-forme support}}$
 $E_{GNT} [\text{sous-couche } i] = 3 E_{GNT} [\text{sous-couche } (i-1)]$
 E_{GNT} borné par 360 MPa

Définition des classes de
trafic Guide SETRA VI.4.3.1.

Dimensionnement des chaussées neuves
Guide SETRA VI.2.5.1.

Mathieu Meunier

5. Formulation - Milieu URBAIN

- 3^e Étape : Définir la couche de fondation
 - Action : Définir les modules des CF et « e »**

Tableau V.3.2. – Valeurs de module d'Young des couches de GNT pour le dimensionnement

Chaussées à moyen trafic (T2 et T1) : structures GB/GNT

Couches de fondation
(GNT subdivisée en sous-couches
de 0,25 m d'épaisseur)

25

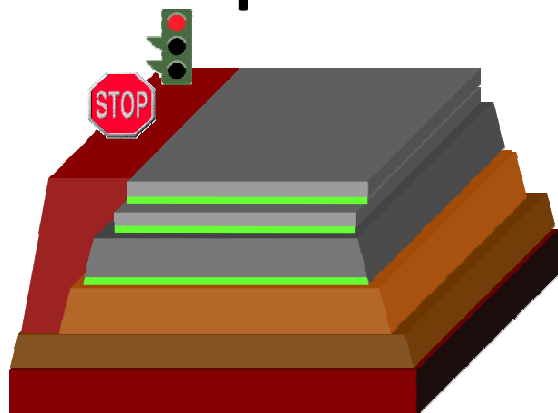
$E_{GNT} [1] = 3 E_{\text{plate-forme support}}$
 $E_{GNT} [\text{sous-couche } i] = 3 E_{GNT} [\text{sous-couche } (i-1)]$
 E_{GNT} borné par 360 MPa



795-300 GNT (112) : $e = 25 \text{ cm}$; $E = 3 * E_{PFS} = 3 * 50 = 150 \text{ MPa}$
 495 GNT (112) : $e = 2,5 \text{ cm}$; $E = 3 * E_{GNT 1} = 3 * 150 = 450 \text{ MPa}$
 Mais le E_{GNT} est limité à 360 MPa
 20 GNT (20) : $e = 22 \text{ cm (minimum MTQ)}$ = 360 MPa

5. Formulation - Milieu URBAIN

- 3^e Étape : Définir la couche de fondation



$$E_{\text{GNT2}} (20) = 360 \text{ MPa}$$

$$e_{\text{GNT2}} (20) = 22 \text{ cm}$$

$$E_{\text{GNT1}} (112) = 150 \text{ MPa}$$

$$e_{\text{GNT1}} (112) = 27,5 \text{ cm}$$

$$E_{\text{CF}} = 50 \text{ MPa}$$

$$e_{\text{CF}} = 30 \text{ cm}$$

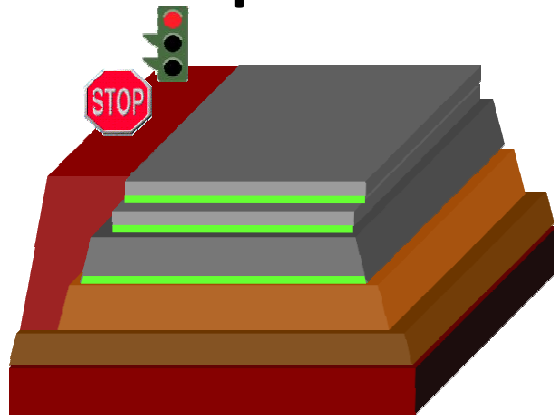
$$M_{\text{r sol support}} = 20 \text{ MPa}$$

5. Formulation - Milieu URBAIN

- 4^e Étape : Définir les couches d'enrobés
 - Données : Même design que le MTQ pour fin de validation
 - Action : Définir les valeurs de E^* (Huet-Sayegh), de fatigue (Wöhler) et d'orniérage (loi Esso)

5. Formulation - Milieu URBAIN

- 4^e Étape : Définir les couches d'enrobés



$E(\text{ESG-10}) = 7789 \text{ MPa}$
 $e(\text{ESG-10}) = 4,0 \text{ cm}$
 $E(\text{ESG-14}) = 7931 \text{ MPa}$
 $e(\text{ESG-14}) = 6,0 \text{ cm}$
 $E(\text{GB-20}) = 6969 \text{ MPa}$
 $e(\text{GB-20}) = 80,0 \text{ cm}$



$E_{\text{GNT2}}(20) = 360 \text{ MPa}$
 $e_{\text{GNT2}}(20) = 22 \text{ cm}$
 $E_{\text{GNT1}}(112) = 150 \text{ MPa}$
 $e_{\text{GNT1}}(112) = 27,5 \text{ cm}$

$E_{\text{CF}} = 50 \text{ MPa}$
 $e_{\text{CF}} = 30 \text{ cm}$

$M_{\text{r sol support}} = 20 \text{ MPa}$

Plan de la présentation

1. Mise en contexte
2. Objectifs
3. Principes de base de l'outil de calcul
4. Capacité et limite
5. Formulation – Autoroutier et Urbain
- 6. Simulations**
7. Conclusions

6. Simulation - Milieu AUTOROUTIER

Simulation à l'aide de
l'outil de calcul



Mathieu Meunier

6. Simulation - Milieu URBAIN

Simulation à l'aide de
l'outil de calcul



Mathieu Meunier

Plan de la présentation

1. Mise en contexte
2. Objectifs
3. Principes de base de l'outil de calcul
4. Capacité et limite
5. Formulation – Autoroutier et Urbain
6. Simulations
- 7. Conclusions**

7. Conclusions

- Un outil conviviale et simple d'utilisation
- Un outil qui fait ressortir les différences de design entre le milieu URBAIN et AUTOROUTIER
- Un outil qui fait ressortir les différences et l'utilité d'utiliser un liant d'accrochage entre les différentes couches
- Un outil qui fait ressortir les effet du gel/dégel
- Un outil qui nécessite une bonne caractérisation des matériaux
-  ...un outil PROMETTEUR



Questions...



**1100, rue Notre-Dame Ouest
Montréal, Québec
H3C1K3**



Téléphone : 514-396-8800 #7991



Télécopieur : 514-396-8584



Courriel : mathieu.meunier.1@ens.etsmtl.ca

Mathieu Meunier



Exemple... Fiche technique de produit

