



**Travaux avec le ministère des Transports du Québec:
Partage d'expérience et comparaison des méthodes
de dimensionnement mécanisto-empirique des
chaussées pour la prise en compte du climat**

Nantes, le 7 février 2019

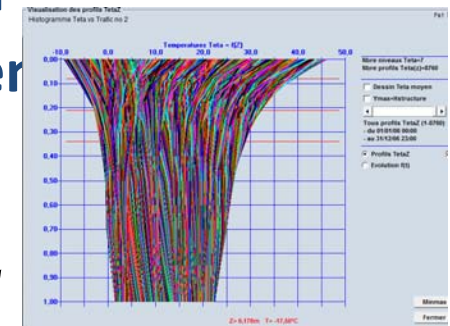
**Denis St-Laurent (MTQ, Québec)
Pierre Hornych (IFSTTAR, Nantes)
Rahma Ktari (IFSTTAR, Nantes)**



Projet de recherche RI-ADAPTCLIM

Coopération IFSTTAR – MTQ – Université Laval



- **Projet de recherche post-doctoral:**
 - IFSTTAR, Nantes, 12 mois (Rahma KTARI)
 - Financé par la région Pays de la Loire (programme RI-ADAPTCLIM)
 - Séjour de 6 semaines au Québec, automne 2017
- **Objectif: Amélioration des méthodes de dimensionnement – Prise en compte des distributions réelles de température**
- **Approche française (ALIZÉ-LCPC): Temp. équivalente**
 - Variations de modules
 - Variations des lois de fatigue
 - Variations spatiales (climatique)
 - Découpage temporel (pas de temps) et vertical (gradient vertical)
 - Comparaison avec l'approche américaine AASHTOWare Pavement ME Design



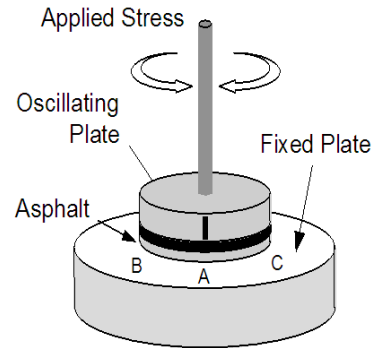
Intérêts de la collaboration IFSTTAR – MTQ – Université Laval

- Partage d'expertise dans les domaines du dimensionnement des chaussées et de la prise en compte du climat
- Accès à différentes méthodes de dimensionnement, et évaluation de la nouvelle méthode Pavement ME Design Américaine.
 - En particulier, évaluation du modèle climatique intégré dans la méthode américaine
- Échange de données de mesures sur sites expérimentaux :
 - sites A63 et A75 en France (climat tempéré)
 - site du SERUL au Québec (climat froid)
- Expérience côté Québécois sur la prise en compte des effets des cycles de gel/dégel et des variations d'humidité

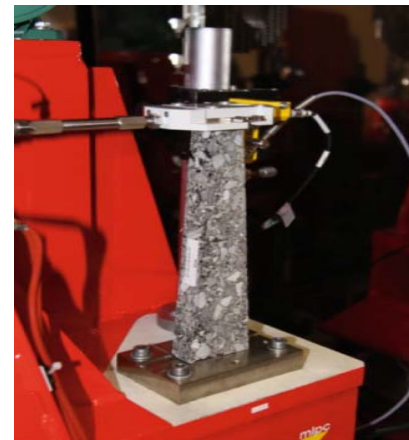
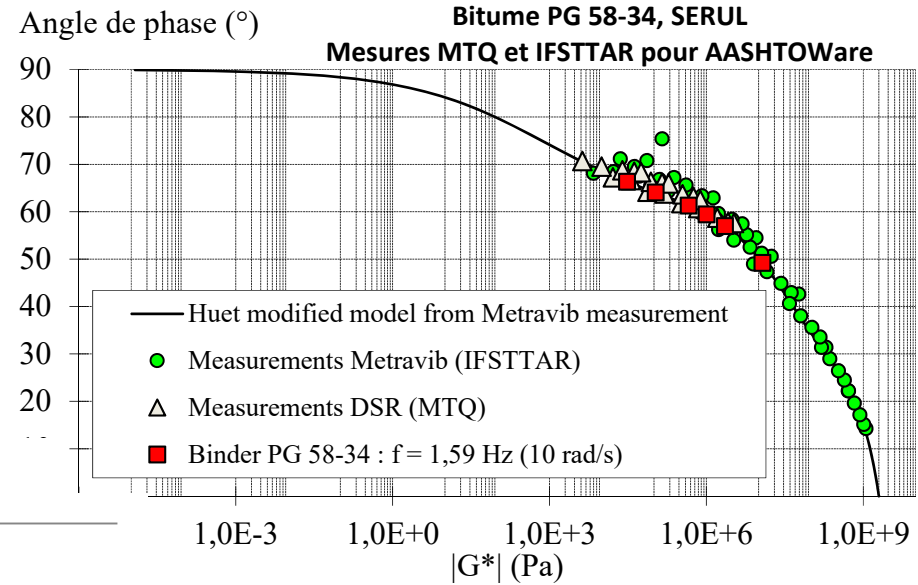
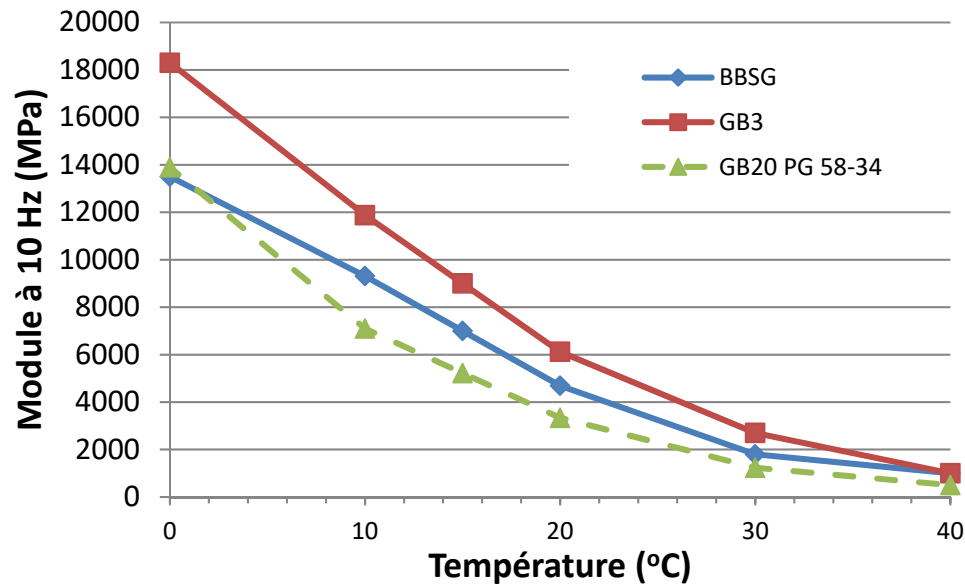
ALIZÉ vs AASHTOWare

	ALIZÉ v1.5 	AASHTOWare Pavement ME Design v2.3/2.5 
Climat	<ul style="list-style-type: none"> - Calcul à une température équivalente 	<ul style="list-style-type: none"> - Calculs à chaque température (loi Miner) - Modèle d'oxydation du bitume - Gradients de température/fréquence/oxydation (EICM, subdivisions des couches)
Trafic	<ul style="list-style-type: none"> - Essieu équivalent 	<ul style="list-style-type: none"> - Calcul à chaque essieu (loi de Miner)
Fatigue	<ul style="list-style-type: none"> - Facteur de correction du sol - Balayage vertical inclus dans le calage 	<ul style="list-style-type: none"> - Facteur de correction de l'épaisseur enrobé - Balayage transversal traité en sus de la loi de fatigue (loi Miner, grille, distrib. statistique) - Dommage converti en étendue de fissures
Orniérage	<ul style="list-style-type: none"> - Sol support : $\epsilon_{z, ad} = 0,012(NE)^{-0,222}$ 	<ul style="list-style-type: none"> - Chaque couche : $\sum f(\epsilon_z, h, T, W...)$
Autres		<ul style="list-style-type: none"> - Fissuration par le haut (autre fatigue) - Fissuration transversale (thermique) - Uni – confort de roulement (Indice IRI)

Variations du module (bitumes et enrobés: température)



Enrobés

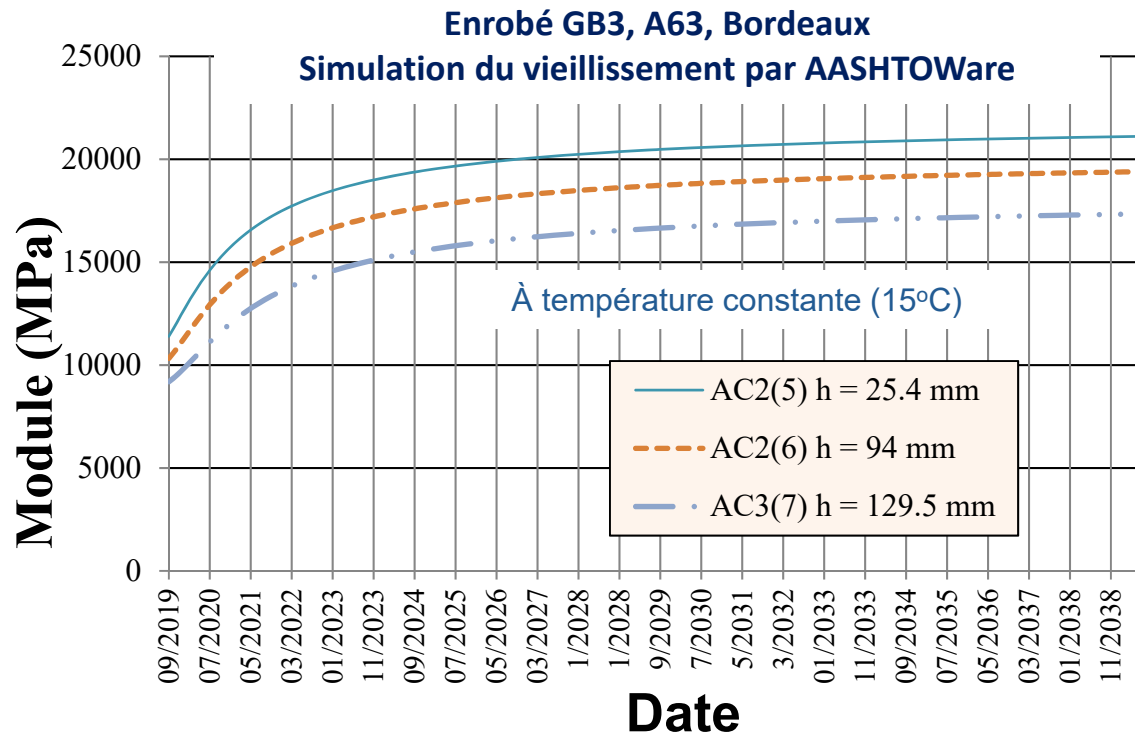


Variations du module des enrobés (vieillesissement)

Mesures à 24 ans d'intervalle sur une GB:

(Marsac, 2018)

	1990	2014	Δ
E(15°C, 10 Hz)	10 292	16 868	+64%
-1/b	4,3	8,3	+93%



Variations des lois de fatigue

Équation ALIZÉ-LCPC (E en MPa; ε en μdef)

$$\varepsilon_{t,ad} = \varepsilon_6(10^{\circ}C, 25Hz) \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \left(\frac{E(10^{\circ}C)}{E(\theta_{eq})}\right)^n \cdot k_c k_r k_s$$

Équation AASHTOWare (E en psi; ε en def)

$$N_f = k_{f1}(C)(C_H)\beta_{f1} \left(\frac{1}{\varepsilon_t}\right)^{\beta_{f2}k_{f2}} \left(\frac{1}{E}\right)^{\beta_{f3}k_{f3}}$$

Où:

$$C = 10^{4,84 \left(\frac{V_{be}}{V_a + V_{be}} - 0,69\right)}$$

$$C_H = f(H_{enrobé})$$

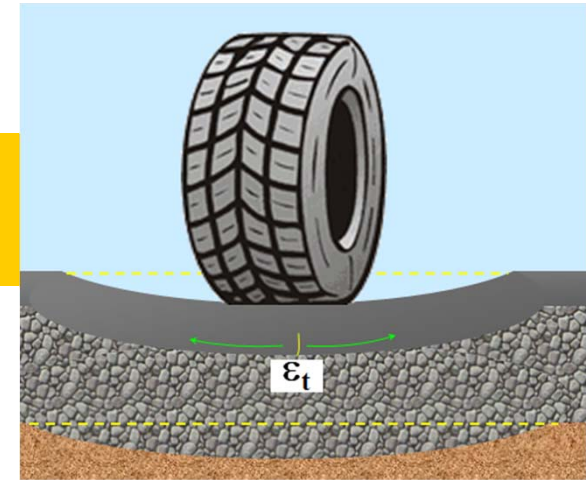
$$k_{f1}, k_{f2}, k_{f3}, = \text{constantes}$$

Correspondance

$$\beta_{f1}k_{f1} = \frac{\varepsilon_6^{-1/b} \cdot E(10^{\circ}C)^{-n/b} \cdot 10^6 \cdot (k_c k_r k_s)^{-1/b}}{(C)(C_H)}$$

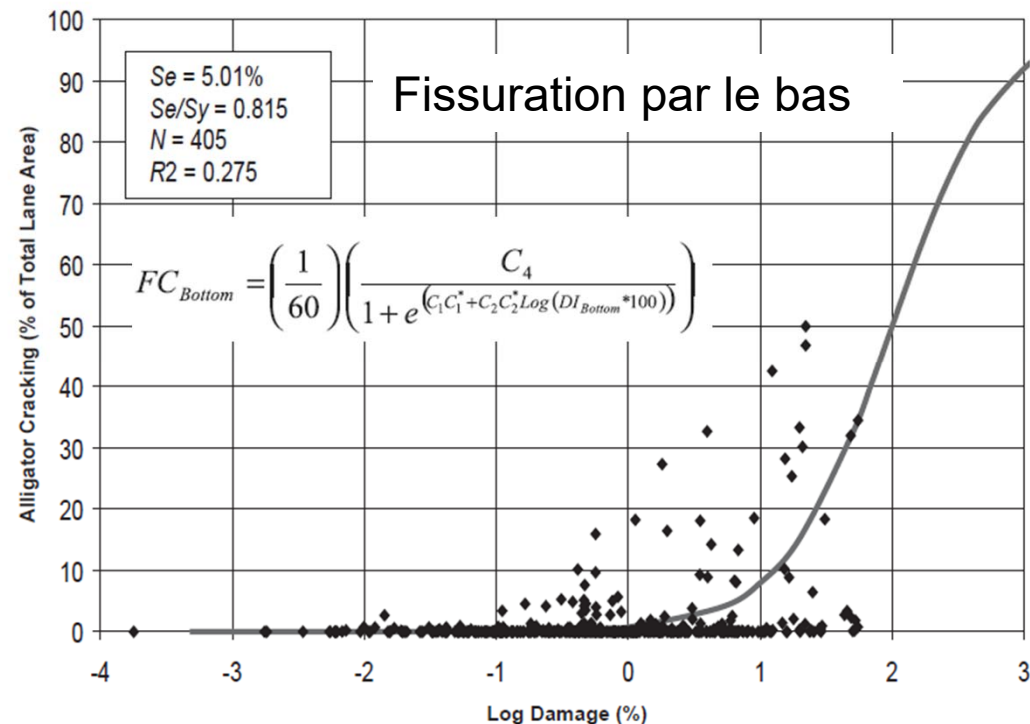
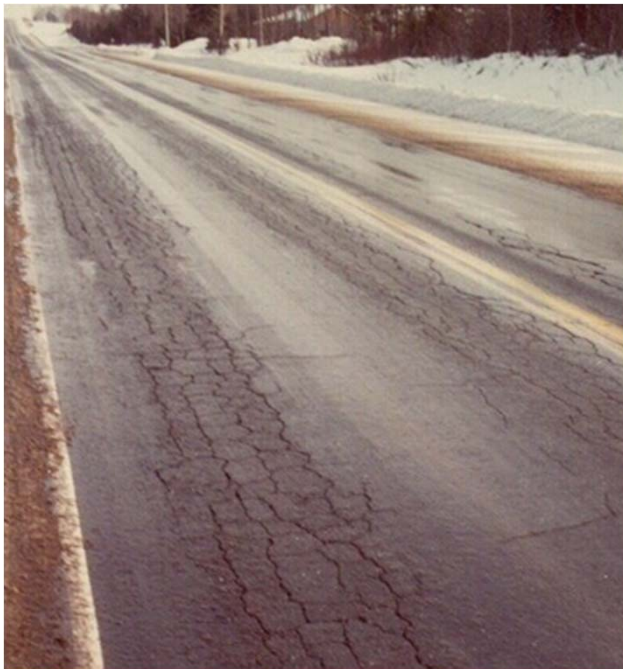
$$\beta_{f2}k_{f2} = \left(\frac{-1}{b}\right) \quad \beta_{f3}k_{f3} = \left(\frac{-n}{b}\right)$$

Balayage transversal (σ = 220 mm) inclus dans le calage du modèle ALIZÉ-LCPC.

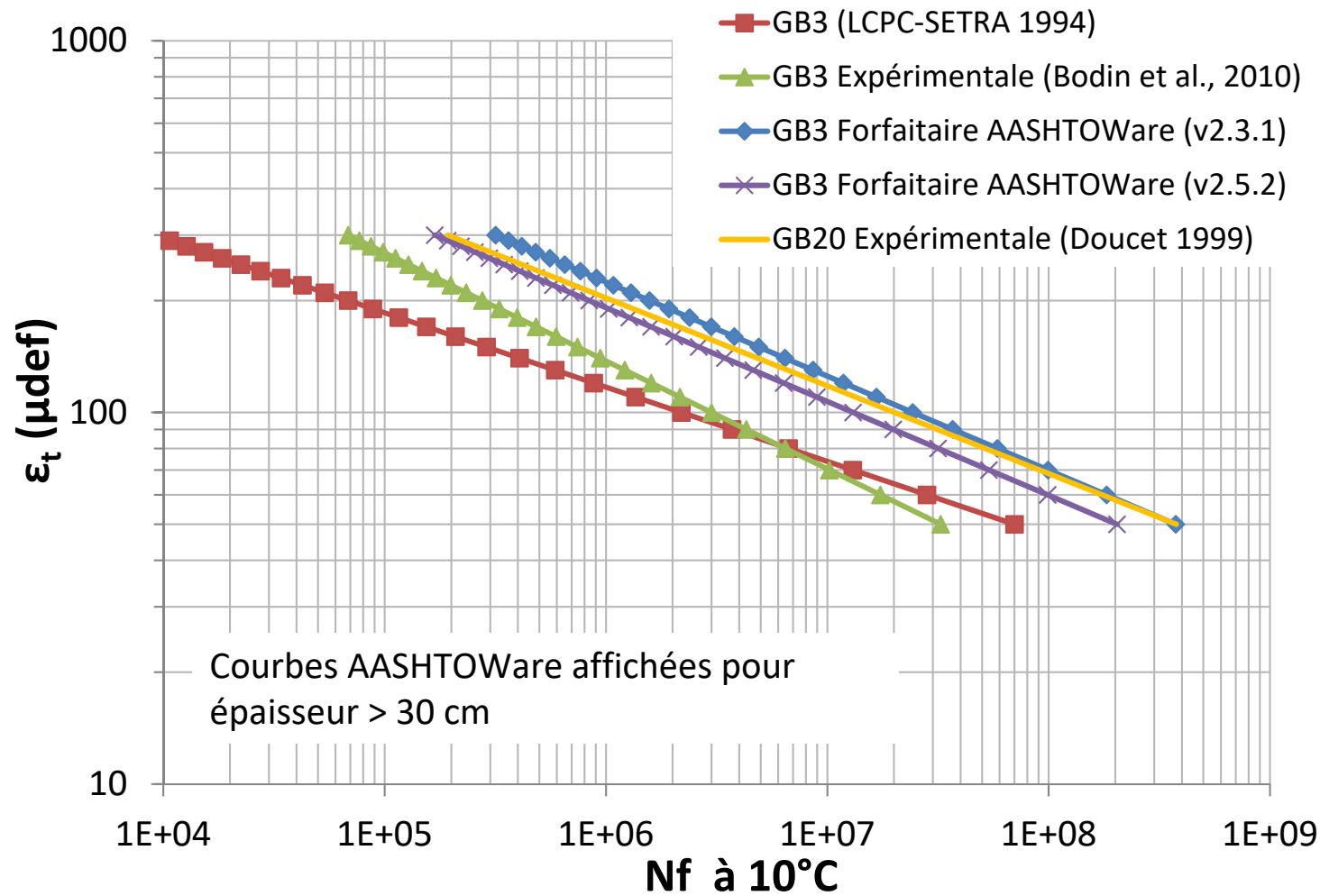


Fissuration par fatigue

L'AASHTOWare ne rapporte pas le dommage en % de la loi de Miner. Il convertit plutôt le résultat en étendue de fissuration, de façon empirique.

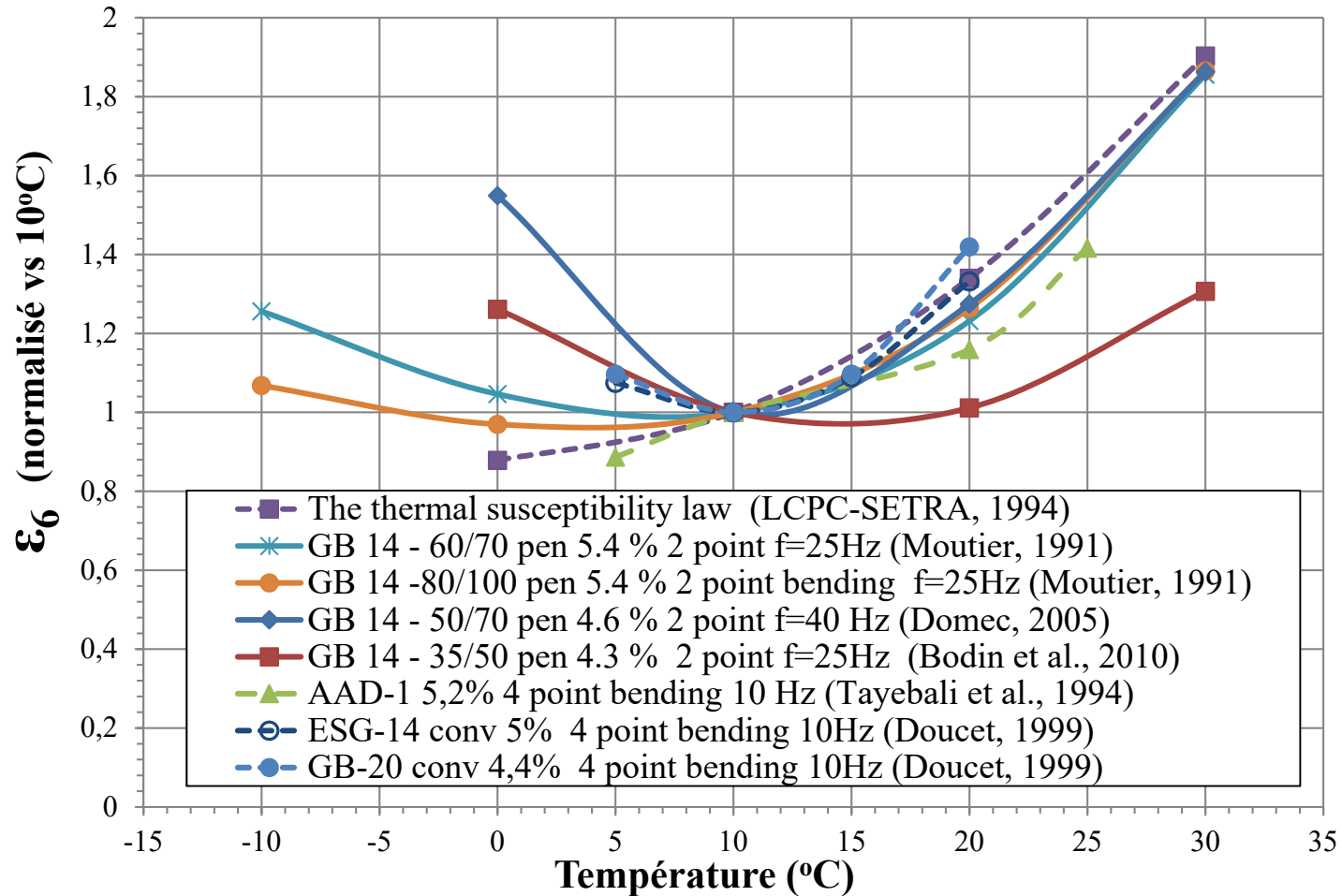


Droites de fatigue



GB3: $V_{be} = 10,8$; $V_a = 9$

Variation des lois de fatigue



Sites expérimentaux

A63, Bordeaux

Couche de roulement en BBSG (8 cm)
Couche de base en GB (13 cm)
Couche de fondation en GB (13 cm)
Plate-forme <u>PF3</u> 120 MPa

SERUL, Québec

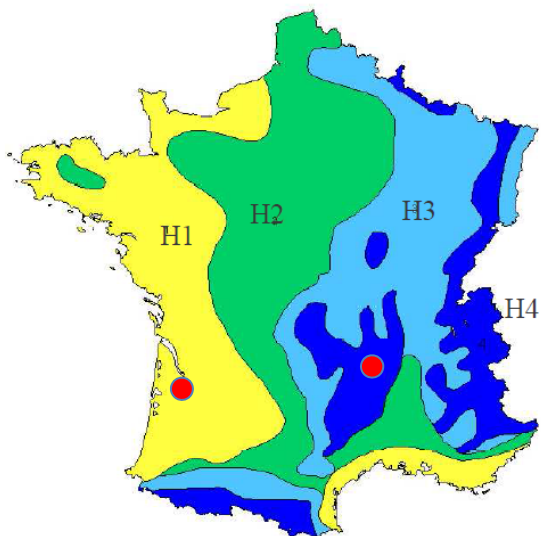
Revêtement (20 cm)
Fondation (20 cm)
Sous- fondation (45 cm)
Sol d' <u>infrastructure</u>

A75, Saint-Chély-d'Apcher

Couche de roulement <u>BBMa</u> 0/10 (4 cm)
Couche de liaison BBSG3 (5 cm)
Couche de base en BBSG3 (9,5 cm)
<u>GNT-B</u> (12 cm)
Grave pouzzolane chaux GPZC (25 cm)
Couche de forme traitée (35 cm)
Plate-forme <u>PF3</u> 120 MPa

Jeux de données climatiques (données horaires)

	Températures de l'air (°C)	Indice de gel (°C · jrs)
	Moy. (plage)	
• A63 Bordeaux:	14° (-8 à 39) (Zone H1)	13
• A75 Saint-Chély-d'Apcher:	8° (-18 à 35) (Zone H4)	37
• SERUL, Québec, Canada:	1,5° (-31 à 23)	1768
• Phoenix, Arizona, USA:	24° (-7 à 49) (NARR)	0
• Seattle, Washington, USA:	10° (-16 à 35) (NARR)	11



Température équivalente (θ_{eq})

C'est la valeur de température conduisant au même résultat de dommage annuel qu'un calcul détaillé incluant toutes les variations de températures.

Procédure de calcul dans l'annexe 6 du Guide SETRA-LCPC (1994).

Basé sur la loi de Miner:

$$\sum_i D_i = \sum_{i=1} \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

Valeurs forfaitaire établie à 15°C pour la France métropolitaine.

Permet d'éviter de refaire les calculs incrémentaux à chaque nouvelle analyse.

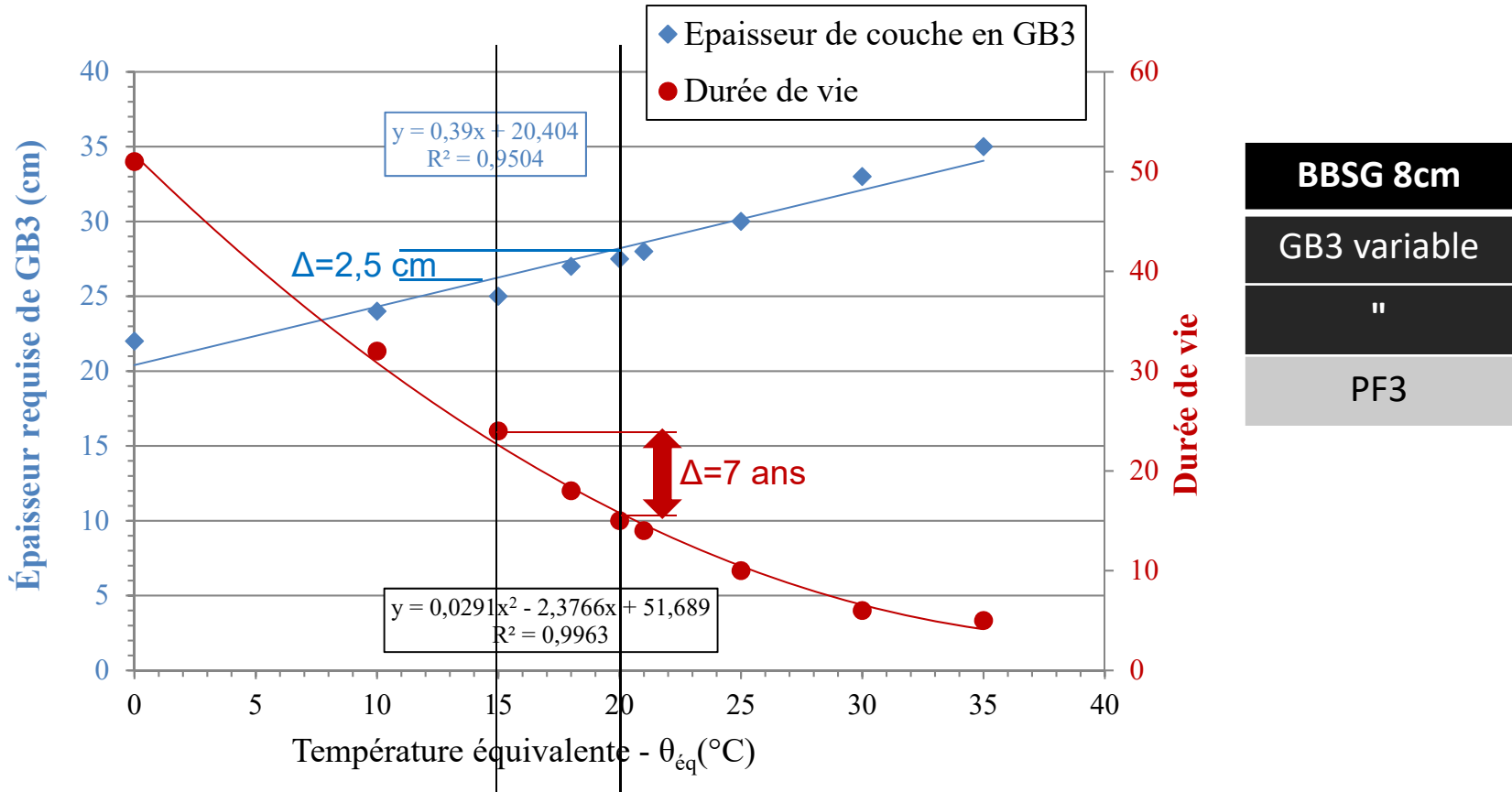
Synthèse des calculs de température équivalente (θ_{eq})

Climat	Bordeaux, France	Saint-Chély-d'Apcher, France		Forêt Montmorency, Canada
T. moyenne de l'air (°C)	13,6	8		1,45
Type de structure	Bitumineuse épaisse A63	Inverse A75	Bitumineuse épaisse de A63	Bitumineuse épaisse SERUL
θ_{eq} (°C)	18 à 20,8	13,5 à 16,5	16,2 à 18,4	6 à 8,9

Sommaire de l'étude de sensibilité:

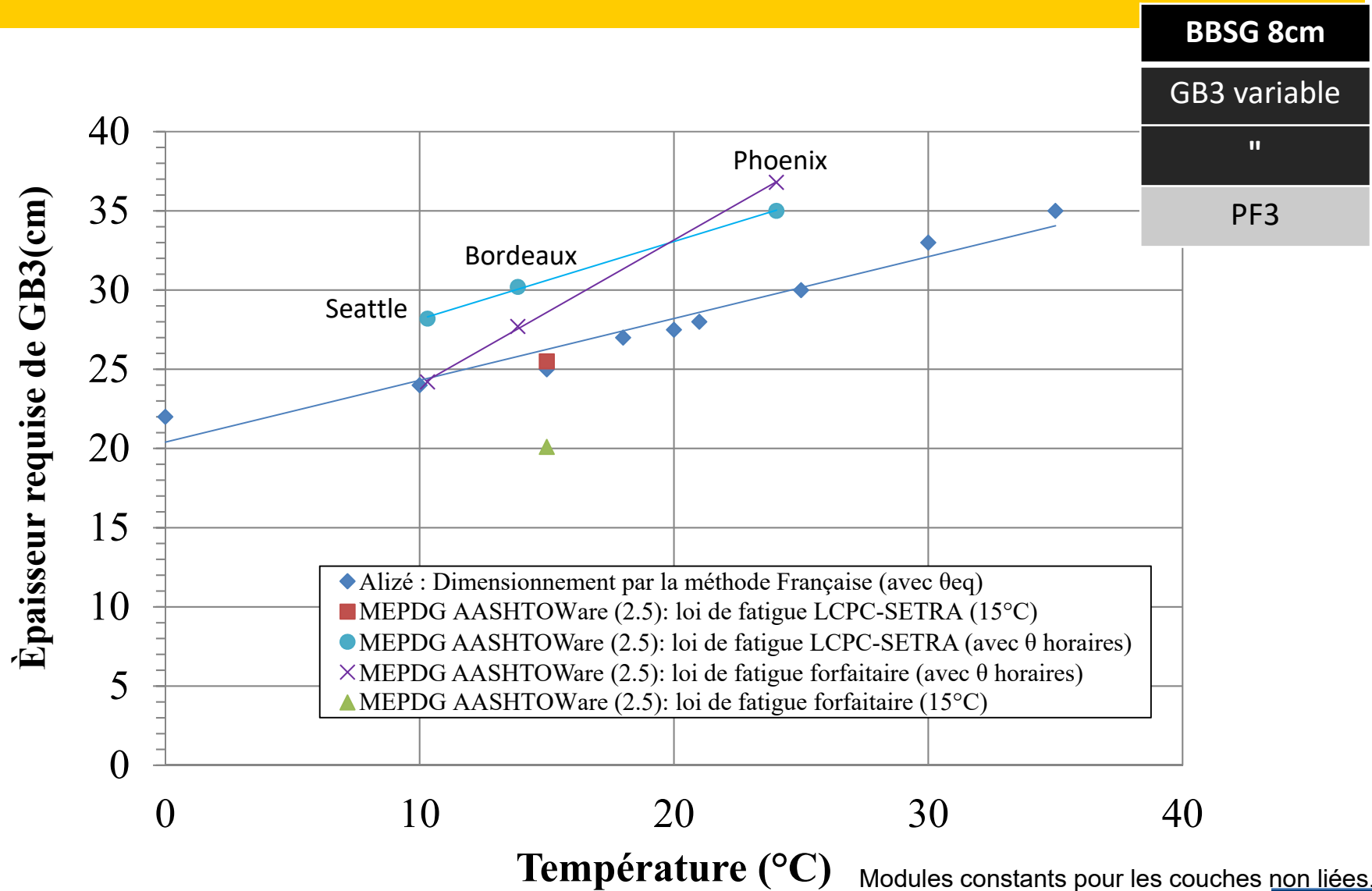
- Températures plus hautes → dommages en fatigue plus importants
- Pas de temps : $\pm 1^\circ\text{C}$ (horaire, journ., hebd., mensuel)
- Loi de fatigue $\varepsilon_6(\theta)$: $\pm 4^\circ\text{C}$
- Type de structure: $\pm 2^\circ\text{C}$ (A63 vs A75, climat St-Cély-d'Apscher)
- Gradient vertical: $\pm 0,3/\pm 1^\circ\text{C}$ (A63/A75)
- Choix de l'année: $\pm 1,5/\pm 0,8^\circ\text{C}$ (lois le fatigue LCPC/autres)

Effet de la température équivalente (A63)

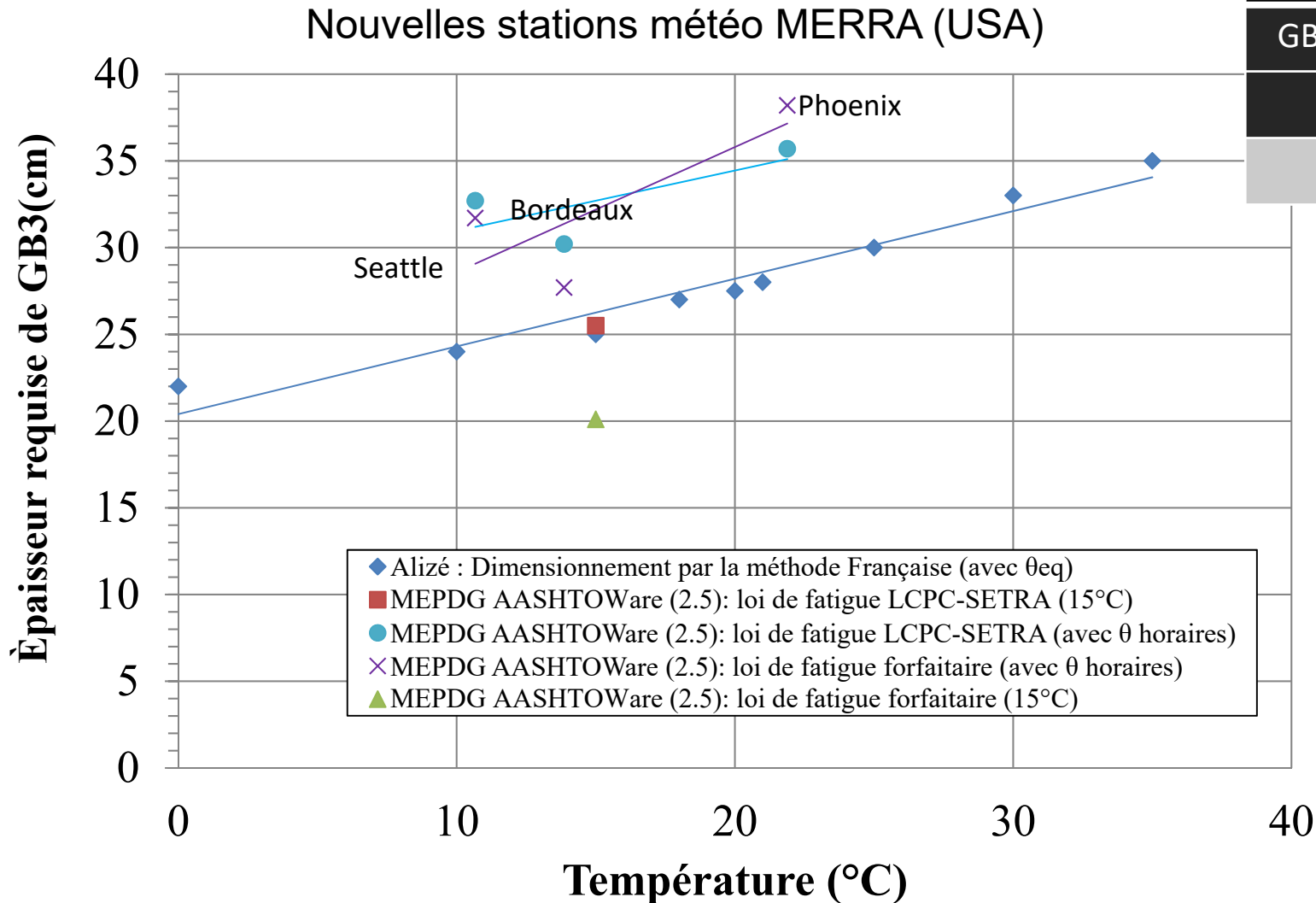


Bordeau 15° vs 20° Δ vie = 7 ans Δ Épaisseur GB3 = 2,5 cm

Comparatifs – dimensionnement 20 ans (A63)



Comparatifs – dimensionnement 20 ans (A63)



BBSG 8cm
GB3 variable
"
PF3

Effet du climat sur l'orniérage (A63)

BBSG 8cm

GB3 12 cm

GB3 13 cm

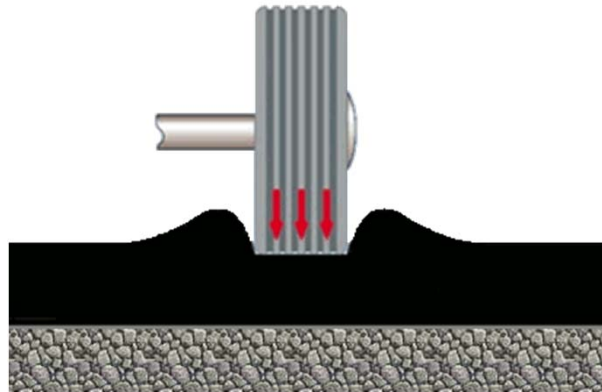
PF3

Logiciel AASHTOWare version 2.5 (stations NARR/MERRA):

Variation	Climat (T moyenne)	Profondeur d'orniérage (mm)	
		Enrobé	Total
Constante	Forfaitaire, FR (15°C)	0,5	4,5
Horaire	Bordeaux, FR (13,8°C)	3,2	7,7
	Phoenix, AZ (23,9°C)	9,2 / 12,4	14,2 / 17,5
	Seattle, WA (10,1°C)	2,0 / 7,2	6,4 / 11,9

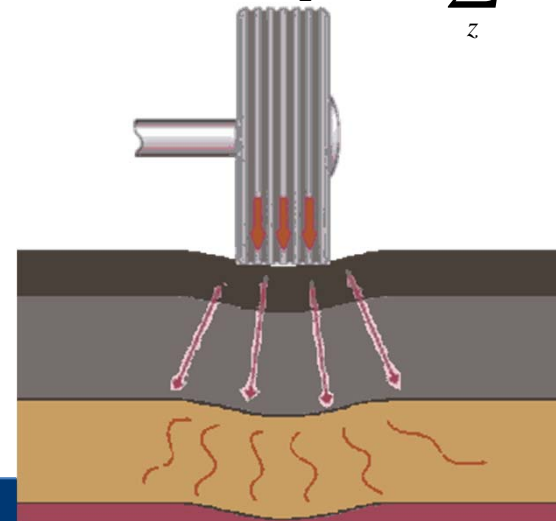
Dans l'enrobé

$$\Delta p_1 = \sum_z k_z \varepsilon \cdot 10^{-3,35} n^{0,48} T^{1,56}$$



Dans les matériaux non-liés

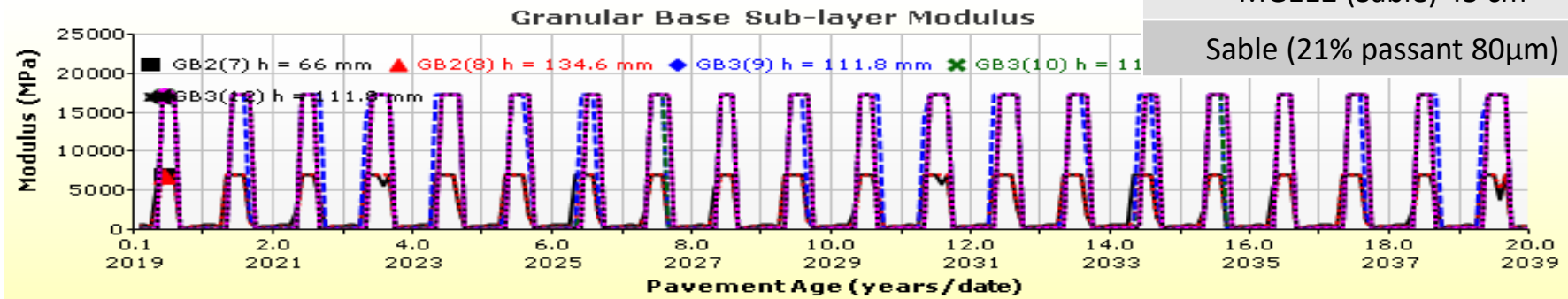
$$\Delta p_2 = 1,67 \sum_z \varepsilon h_z (K_z) e^{-\left(\frac{\rho_z}{n}\right)^{10^{-0,61-0,02 W_c}}}$$



Effet des cycles de gel dégel (structural)

SERUL – AASHTOWare version 2.5

ESG10+GB20 20 cm
MG20 (GNT) 20 cm
MG112 (Sable) 45 cm
Sable (21% passant 80µm)



Dégradations prédites après 20 ans de service (risque 20%)

Mode de dégradation ($\beta_i = 1,0 \forall i$)	Hypothèse sur modules des couches non-liées		Comparatif Alize ($\theta_{eq} = 9^\circ\text{C}$, $\epsilon_6=186$) ϵ vs ϵ_{ad}
	Constants toute l'année	Variations saisonnières (EICM)	
Fissuration par fatigue (%)	3		ϵ_t : 72 < 77
Fissuration par le haut (m/km)	105	80	
Fissuration thermique (m/km)	27		
Orniérage enrobé (mm)	2,7		
Orniérage total (mm)	7,4	9,4	ϵ_v : 143,6 < 369,8
IRI (m/km)	2,5		

Conclusions

- θ_{eq} n'est pas exclusivement intrinsèque au climat. Dépend aussi des matériaux et de la structure de chaussée.
 - La loi de fatigue ($\epsilon_6(\theta)$) ressort comme facteur le plus influent.
- Les codes de calcul ALIZÉ et AASHTOWare permettent des résultats plus ou moins similaires en fatigue
 - Sous réserve du choix des divers facteurs de calage, et pour un module de fondation constant
 - Résultats AASHTOWare sensible aux données climatiques (et pas seulement les °C)
- L'AASHTOWare intègre l'orniérage de toutes les couches, ce qui est plus réaliste, et propose d'autres modèles supplémentaires (EICM, oxydation, fissuration par le haut, fissuration thermique, IRI...)
- La prise en compte des variations de module des couches non-liées (cycles de gel et dégel) est importante pour le contexte québécois.
- Les soulèvement au gel, ainsi que la fissuration thermique, n'ont pas été étudiés dans ce projet, et sont des facteurs importants pour le Québec.
- Deux autres projets de coopération IFSTTAR-MTQ sont en cours.

Merci de votre attention

Ministère des Transports du Québec
800, Place D'Youville, Québec, Canada

Denis.St-Laurent à transports.gouv.qc.ca

IFSTTAR, Département Matériaux et structures
CS4 - F 44344 Bouguenais Cedex France

Pierre.Hornych à ifsttar.fr
Rahma.Ktari à ifsttar.fr



Merci également aux autres contributeurs à ce projet : J.M.Balay, J.M.Piau, P.Marsac, M.L.Nguyen