

17 Novembre 2020

**Ferhat HAMMOUM**  
Directeur de Recherche  
Docteur ENPC

**Pierre HORNYCH**  
IDTPE -HDR

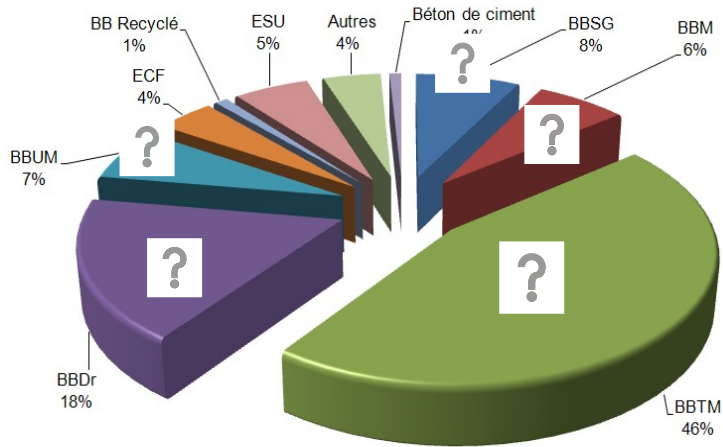


# Effets du climat sur la performances des chaussées : résultats récents obtenus sur les matériaux (partie A) et les structures (partie B)

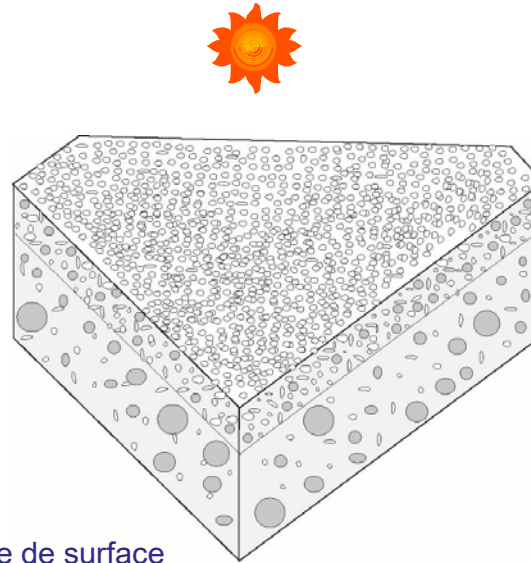


**Partie A: Nouvelles avancées dans l'étude du comportement des matériaux bitumineux**

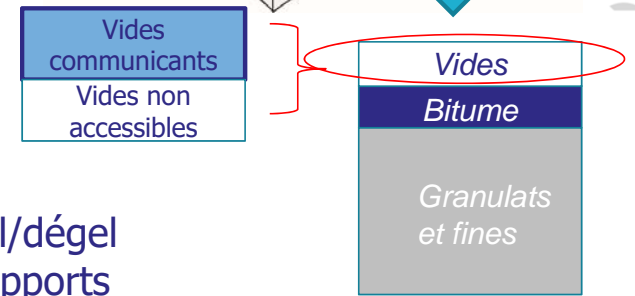
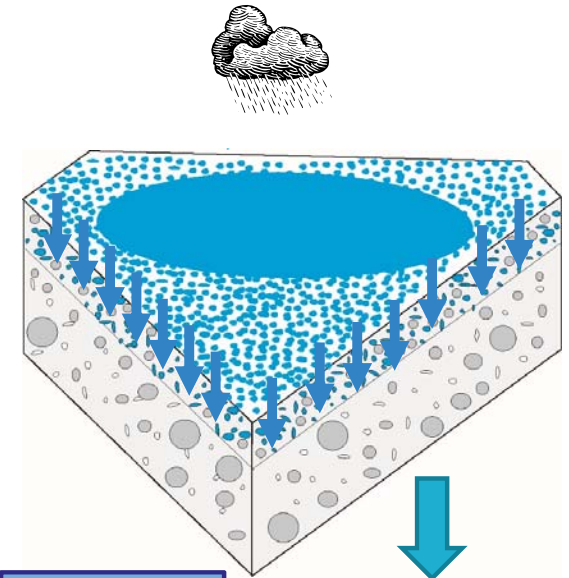
# Eau et passage par le 0°C : une combinaison préjudiciable pour les chaussées



Base CARAT (Cerema\_2016):  
Réseau National français



Couche de surface  
(porosité entre 4 et 25%)



## Nous savons que :

- 10% des précipitations s'infiltrent dans les chaussées
- Teneur en eau non négligeable dans les EB durant la saison humide

## Nous ne connaissons pas :

- Lien entre endommagement des EB surface (trafic) et les cycles de gel/dégel
- La pérennité du collage des couches de roulement minces sur leurs supports (BBTM, BBUM, BBM)

## Eau et passage par le 0°C : une combinaison préjudiciable pour les chaussées

### o Circonstances d'apparition des désordres

- ✓ grands linéaires (> 100 Km)
- ✓ en quelques heures d'une même journée (ex: 20/12/2009)
- ✓ en bandes de roulement
- ✓ sans signe précurseur spécifique
- ✓ suite à alternances pluie & gel jusqu'à ~ -10° C

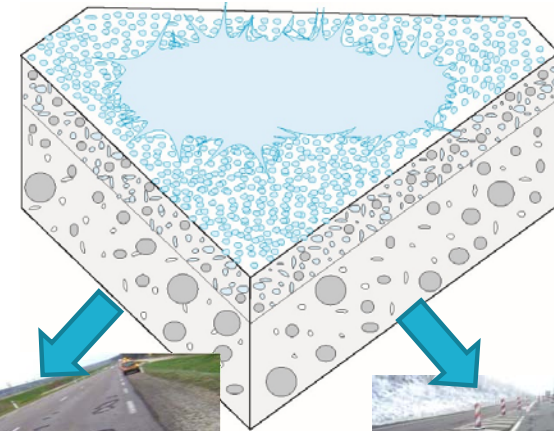
### o Etendue géographique

- ✓ pb rencontré dans divers pays (UK, B, GER, NL, etc.)

### o Périodes hivernales (exemple dans les Vosges)

- ✓ **70 cycles F/T par an**
- ✓ **500 et 1200 F/T sur 12 à 15 ans**

[BLPC, 279, 2012]



Observations identiques sur BB recouvrant anciennes dalles béton



Chapelets de nids de poule sur un BBTM relativement récent

1. Recherche d'un phénomène de gonflement franc en présence d'eau dans les EB ?
2. Comment se comporte une interface (EB collé sur son support) ?

## Collaborations & engagements

- Programmes de recherche LCPC FONDEPHY / Groupe Eau (2006-2009) puis CCLEAR (2011-2014)
- Thèse M.Hun (2012) sur le décollement de couche



- Collaboration de recherche avec le ministère des transports du Québec (D. Saint-Laurent)
- Projet AdaptClim / Post-doc R. Ktari, 2016-2017 (Soutien Région PdL)  
Effet des variations saisonnières sur les structures (Alizé et MPGED)



- Collaboration de recherche LHOIST-Univ. Eiffel (Didier Lesueur)
- Thèse V-T Vu sur les effets des cycles de gel/dégel et apport de la chaux (2017)
- Collaboration tripartite université Laval - MTQ-Univ Eiffel (G. Doré, J-P Bilodeau)
- Post-doc B. Shiferaw (Soutien DGITM-France)
- Combinaison trafic+climat (expérimentation et modélisation)



## Sommaire

- 1. Eau et passage par le 0°Celsius : une combinaison préjudiciable pour les chaussées**
- 2. Effet des cycles de gel et de dégel sur les enrobés bitumineux partiellement saturés**
- 3. Premières investigations sur l'effet structurel (focus sur l'interface)**
- 4. Expérimentation en vraie grandeur**

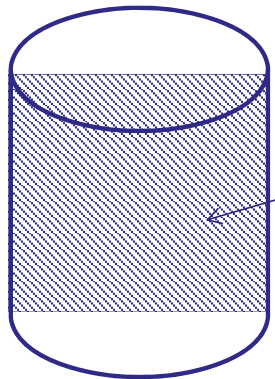
**+ Liste de 17 publications sur les résultats obtenus (2010-2020) à la fin de la présentation**



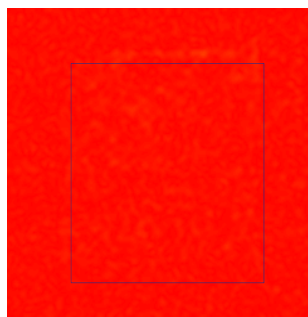
# Effet des cycles de gel et de dégel sur les enrobés bitumineux partiellement saturés

1-Essai IRM (avec appui de S.Rodts, UMR Navier) : **Visualisation du front de dégel**

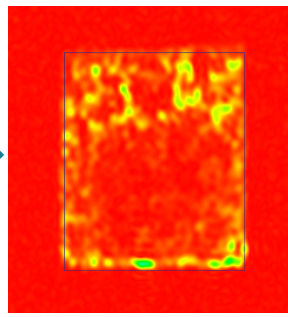
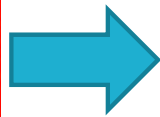
Eprouvette gelée : EB + glace ( $S_w > 75\%$ )



IRM avec noyau  $H^1$

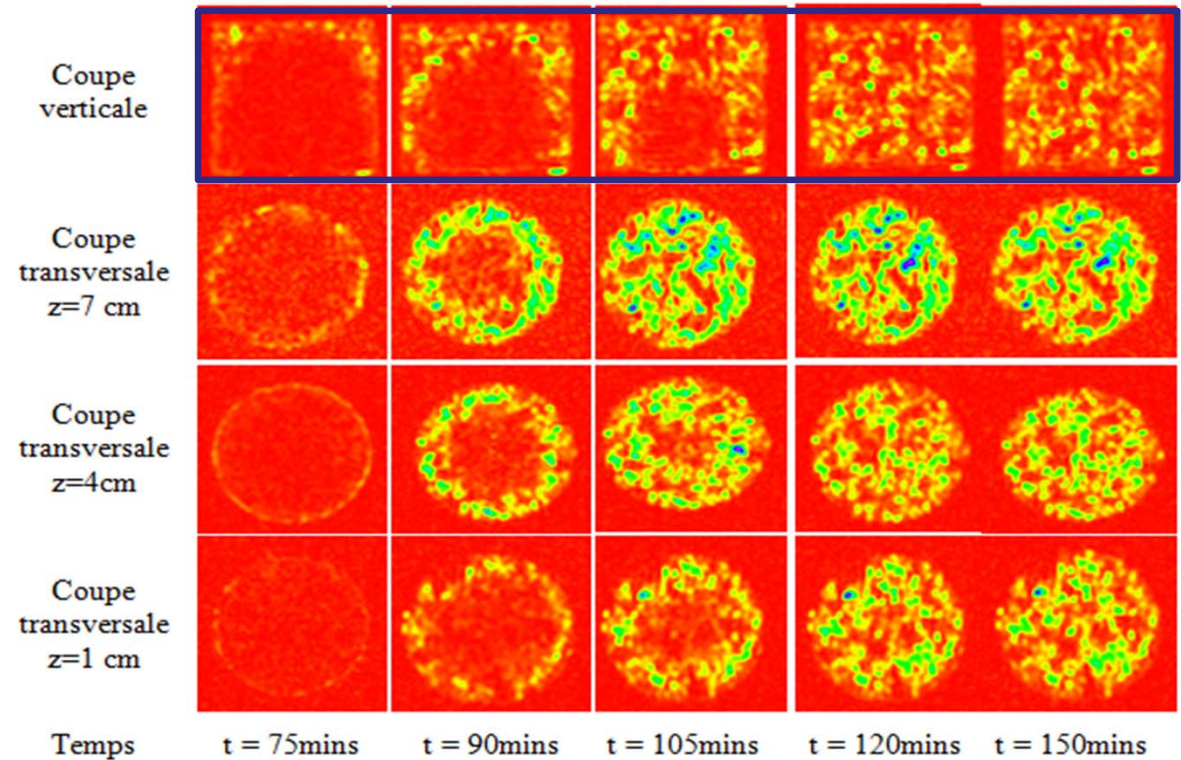


EB + glace à  $-28^\circ\text{C}$



EB + eau liquide protons  $H^+$  libres

Dégel 1D, EB calcaire, porosité 6,6%,  $S_r = 63\%$

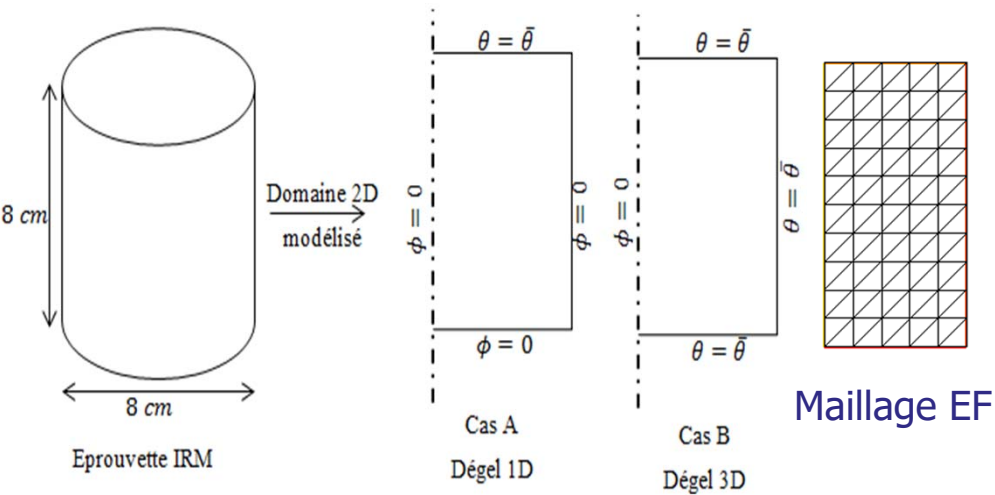


Vitesse de propagation du front de dégel  $\approx 3,2\text{cm/h}$

# Effet des cycles de gel et de dégel sur les enrobés bitumineux partiellement saturés

Développement numérique (problème semi-couplé):  
**Partie mécanique** (loi viscoélastique Huet-Sayegh)  
**Partie thermique** (regularisation condition de Stefan)  
 => Mise en oeuvre dans (FreeFEM++)

- Vu V-T, Chupin O., Piau J-M, Hammoum F., (2020) FE modelling of wet asphalt structures undergoing frost – Towards an explanation of winter potholes, International Journal of Pavement Engineering, accepted for publication

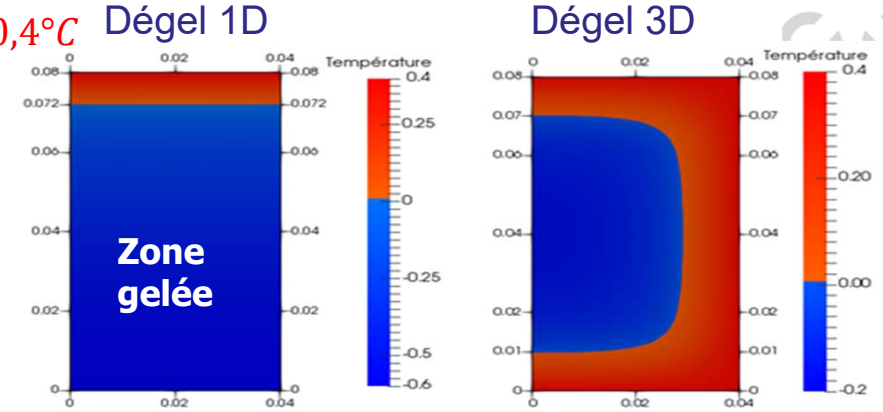


Domaine 2D axisymétrique modélisé avec CLs

Propagation du front de dégel  $\theta_f = 0^\circ\text{C}$

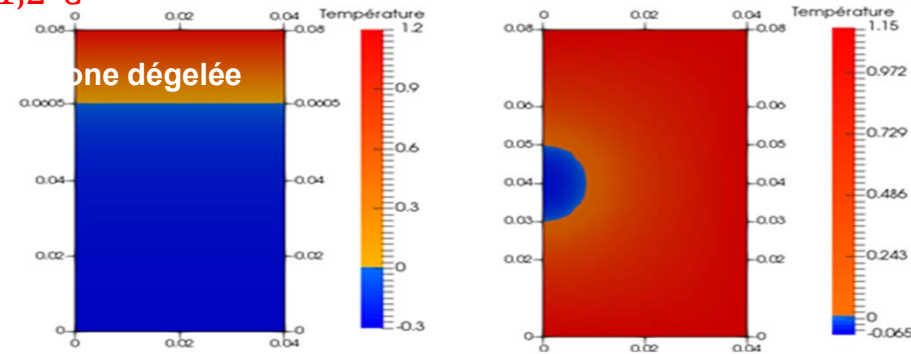
$t = 2,61h$

$\theta_{bord} = 0,4^\circ\text{C}$



$t = 3,18h$

$\theta_{bord} = 1,2^\circ\text{C}$





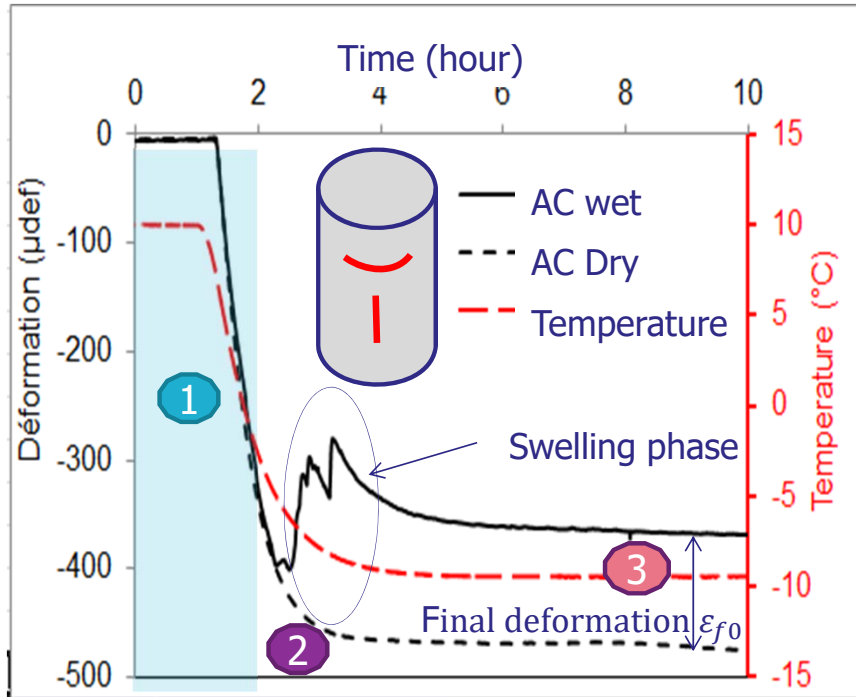
# Effet des cycles de gel et de dégel sur les enrobés bitumineux partiellement saturés

## 2- Essais à déformation libre

(V-T Vu, CBM 2018)

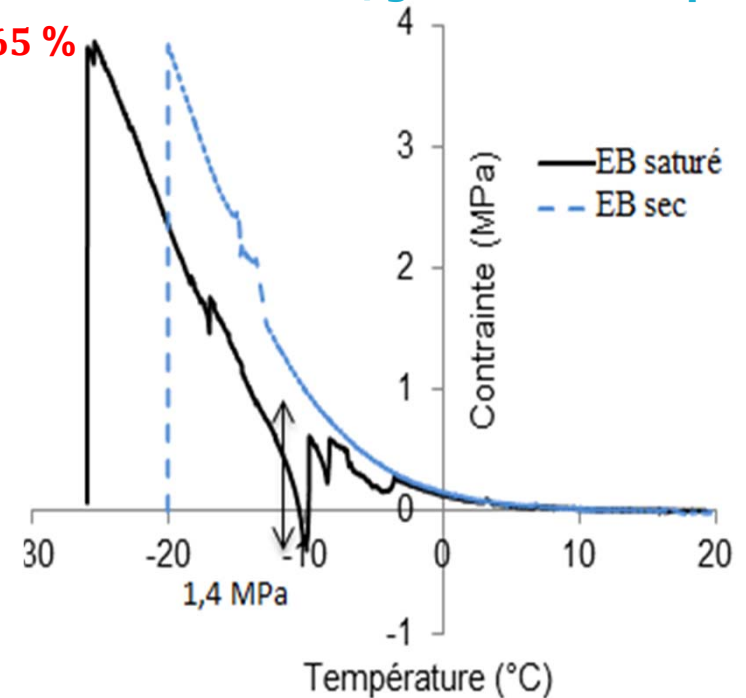
## 3- Essai de retrait/gonflement empêché

EB : porosité  $\approx 7,7\%$ ,  $S_w \approx 65\%$



- 1 Evolution similaire EB sec = EB saturé
- 2  $\theta \leq \theta_f (\approx -5^\circ\text{C})$  Etat de l'eau  $\Rightarrow$  gonflement
- 3 Déformation finale  $\epsilon_{f0} \approx 130\mu\text{def}$

Investigation 3D (Hétérogénéité des champs de contraintes induits dans les structures de chaussée par effet de gel)

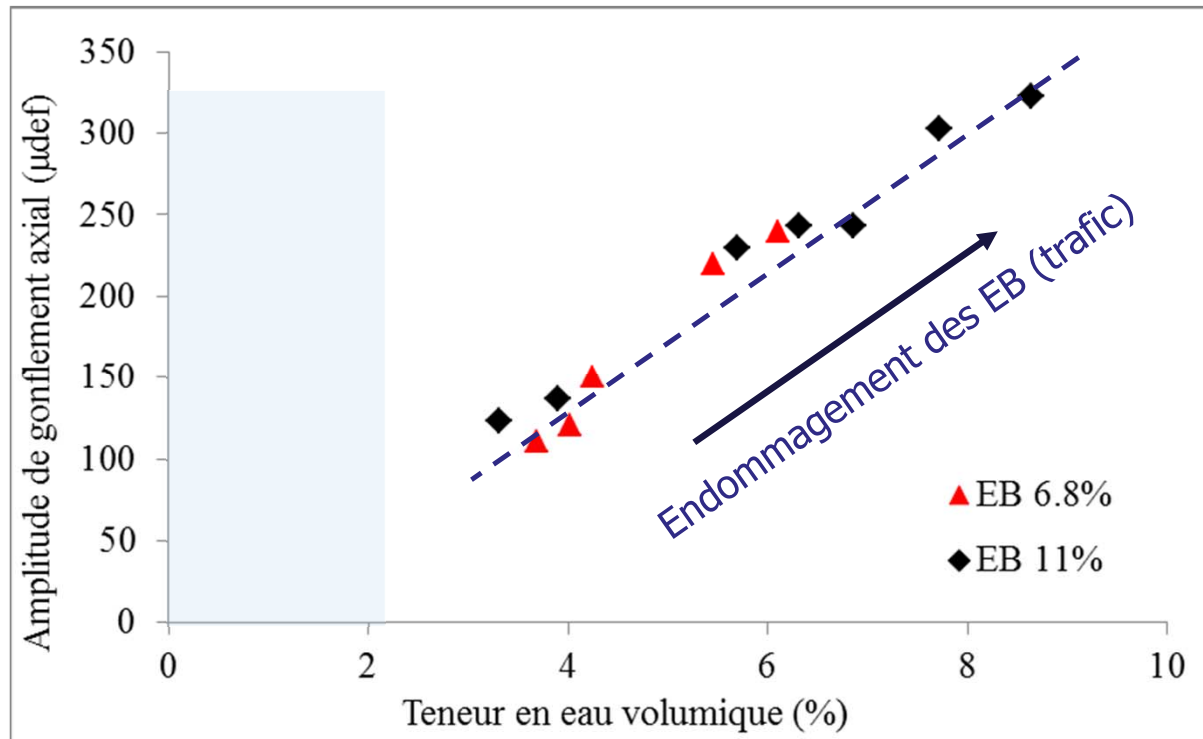


- Evolutions similaires EB sec et EB saturé pour  $\theta > -3^\circ\text{C}$
- Gonflement et contrainte  $s_t$   $\searrow$  jusqu'à état de compression
- Rupture:  $\sigma_r = 4\text{MPa}$ , mais  $\theta_r = -26^\circ\text{C}$  au lieu de  $-20^\circ\text{C}$

# Effet des cycles de gel et de dégel sur les enrobés bitumineux partiellement saturés

## 2- Essais à déformation libre

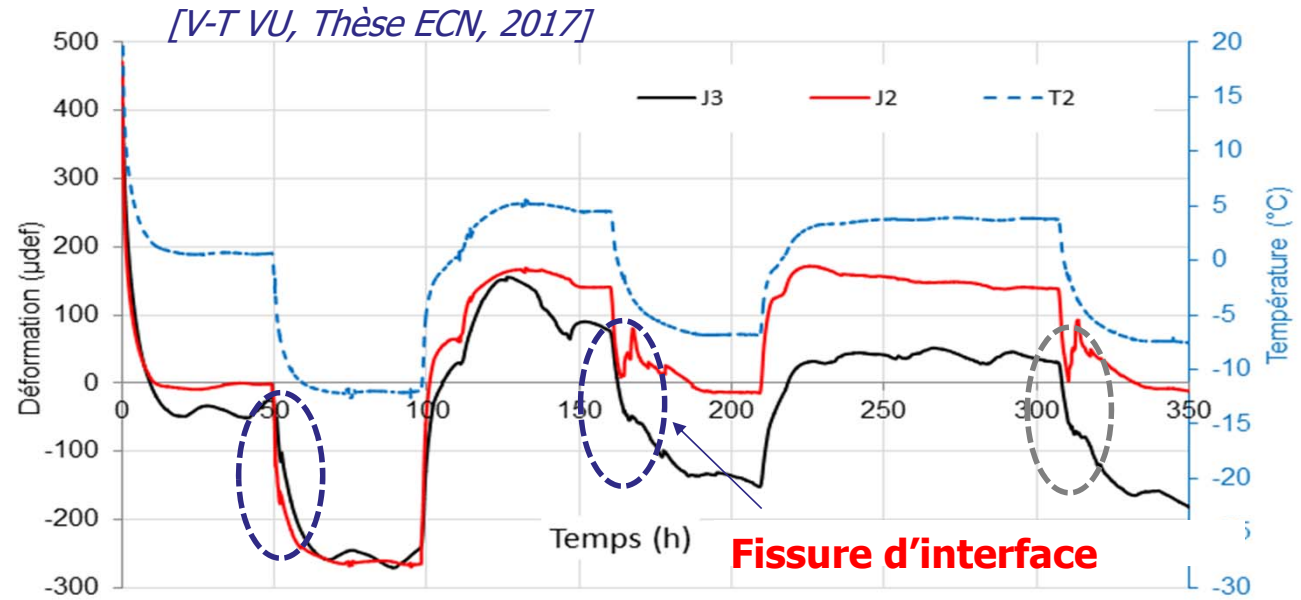
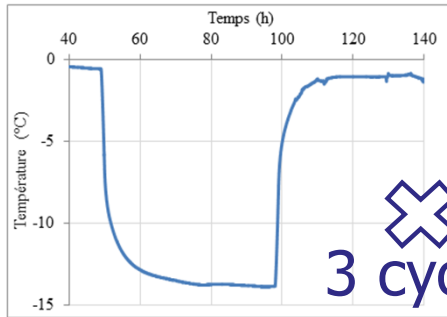
[V-T VU, Thèse ECN, 2017]



=> Gonflement proportionnel à la teneur en eau

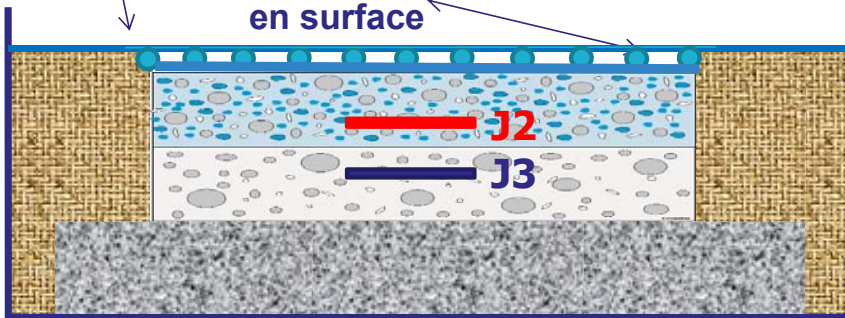
# Premières investigations sur l'effet structural (focus sur l'interface)

## Température de surface



Bac isolant

Circuit réfrigérant en surface



Mise en évidence d'un changement de comportement de l'interface

=> Etude à l'échelle 1 (trafic + climat)

## Principaux enseignements et recommandations pratiques

- **IRM** : visualisation de la présence d'eau au sein de l'échantillon EB et mise en évidence de la propagation d'un front de dégel
- **Essais sur éprouvette** : Mise en évidence et caractérisation d'un phénomène brutal de gonflement lors du gel de l'eau porale
- **Essai sur bicouche** : mise en évidence d'un changement de comportement au niveau de l'interface après le premier cycle de gel/dégel

### Quelques pistes pour réduire l'impact du gel sur les chaussées :

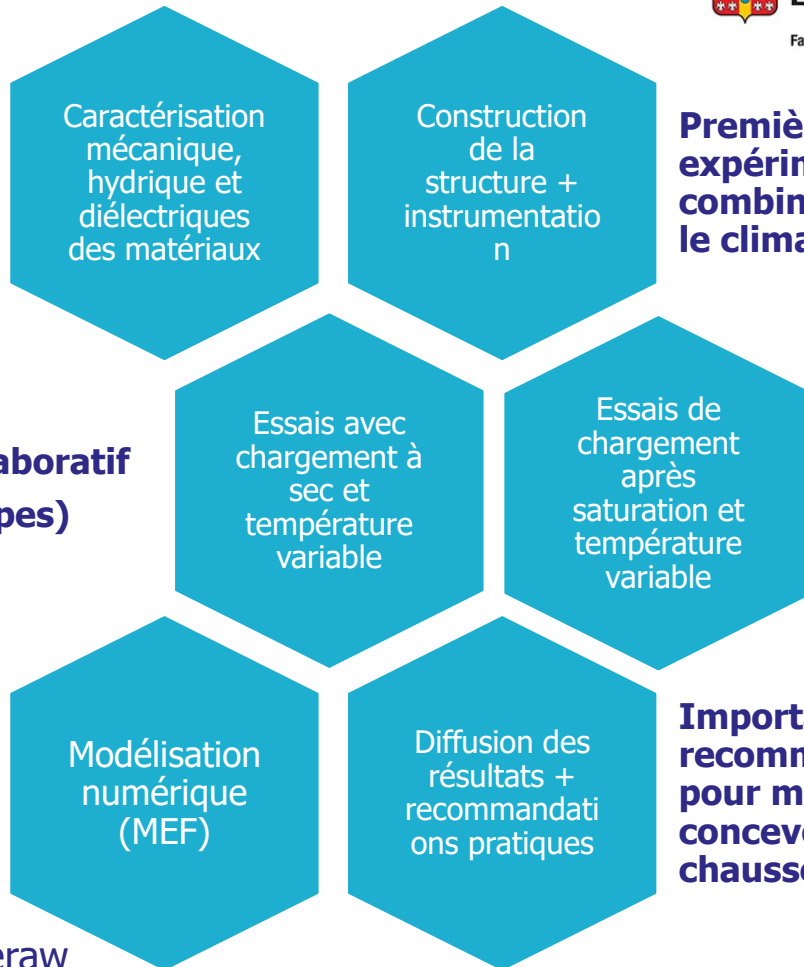
- ✓ Renforcer les EB dont la porosité est comprise entre 5% et 9% [ zone de « *pessimum* » ]
- ✓ Eviter la multiplication des couches et des interfaces durant les travaux de réhabilitation
- ✓ Etre vigilant vis-à-vis de l'uni des couches support de renforcement (éviter les poches d'eau)
- ✓ Recourir à la chaux hydratée pour améliorer la sensibilité vis-à-vis de l'eau
- ✓ Tester les différentes techniques d'interface en lien avec les conditions hivernales (essai bicouche)

Validation à l'aide d'une expérimentation en vraie grandeur (trafic + climat)

# Expérimentation en vraie grandeur (en cours)



**Projet collaboratif  
(4 équipes)**

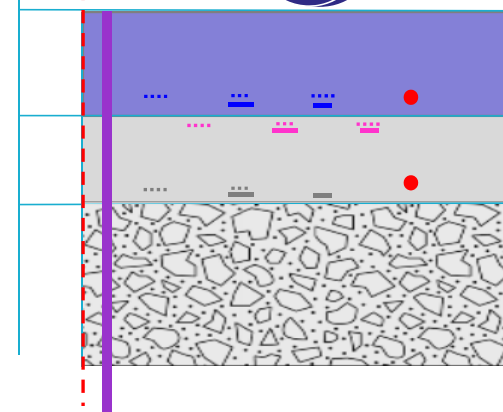


**Première expérimentation qui combine le trafic et le climat**

**Importance des recommandations pour mieux concevoir nos chaussées**



**Vue Profil vertical**



..... Jauge Axe 2  
— Jauge Axe 1

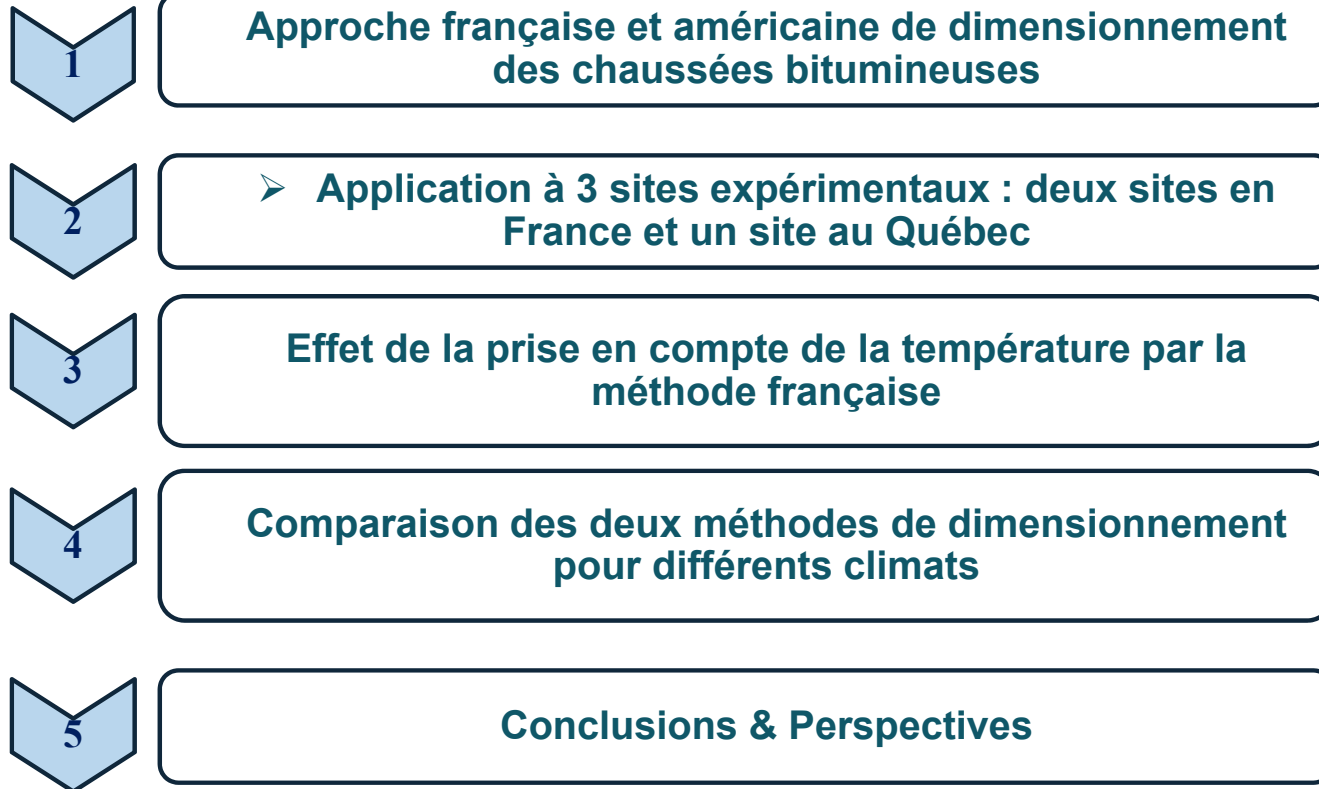






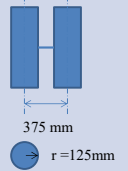
## **Partie B: Comportement des structures de chaussées avec les variations saisonnières**

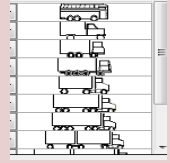
## Comportement des structures de chaussées prenant en compte les variations saisonnières



# Dimensionnement des structures de chaussées



	Paramètre	Données nécessaires
Trafic	Essieu de référence de 13t 	Moyenne journalière annuelle (MJA), CAM, coefficient d'accroissement, Durée de vie
Climat	Données des capteurs de température en profondeur	Variations de température T (Z, temps)  <b>pour une année</b>
Critères de performance	- Fissuration par fatigue de l'enrobée de la couche de base - Orniérage des matériaux non liés	50% pour le critère de fissuration  20 mm de déformation verticale permanente pour toute la chaussée  Pourcentage de risque

	Paramètre	Données nécessaires
Traffic	Distribution de la masse des essieux Classes du trafic   Paramètres de l'essieu	Trafic bidirectionnel quotidien moyen annuel des camions (AADTT), nombre de voies, le pourcentage du trafic dans chaque voie et dans chaque direction, la vitesse de référence Durée de vie, date de construction, date d'ouverture de trafic
Climat	Température de l'air, Vitesse de vent, Ensoleillement, Précipitation, Humidité relative Nappe phréatique	- Données horaires <b>EICM</b> <b>Pour plusieurs années</b> Calcul mensuel <b>avec distribution sur cinq intervalles</b>
Critères de performance	IRI, déformation permanente pour toute la chaussée Fissuration thermique, Pourcentage de fissuration par fatigue en bas de la couche de base, Fissuration par fatigue par le haut,	20% pour le critère de fissuration 12 mm de déformation verticale  Pourcentage de fiabilité

# Dimensionnement des structures de chaussées



	Paramètre	Données nécessaires
Enrobés	Module complexe des enrobés	$E(f,T)$
	Loi de fatigue	$\epsilon_6(f,T)$ $f = 10 \text{ Hz}$ $\epsilon_t < \epsilon_{t,adm}$ <b>Coefficients <math>k_s, k_p, k_c</math></b>

	Paramètre	Données nécessaires
Matériaux granulaires	Module constant au cours de l'année	Module d'Young Type de la plate-forme support PF1, PF2, PF3, PF4
	Critère d'orniérage	$\epsilon_z < \epsilon_{z,adm}$ $\epsilon_z < 0.012.(NE)^{-0.222} > T4$ $\epsilon_z < 0.016.(NE)^{-0.222} < T3$

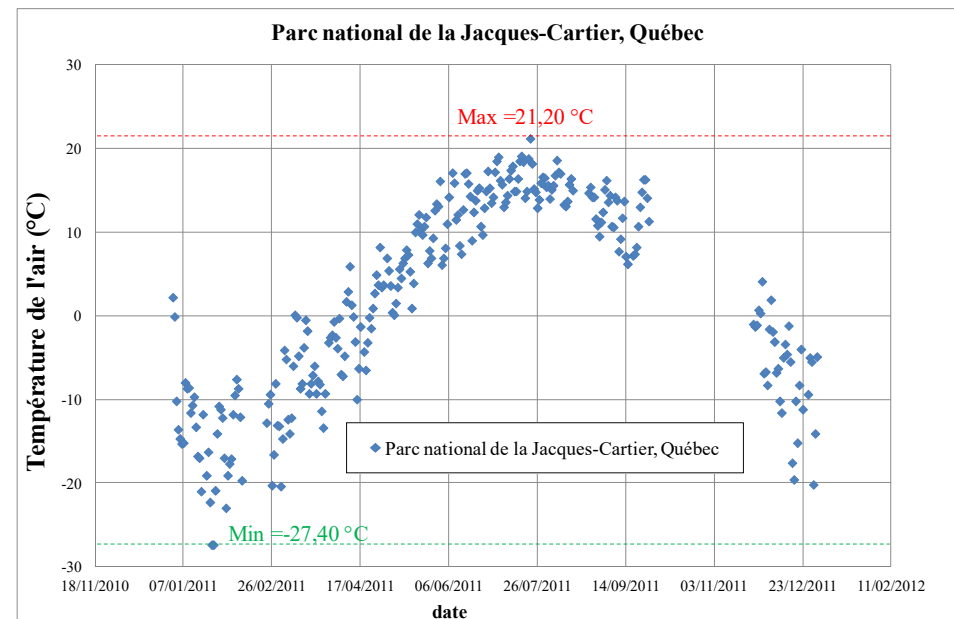
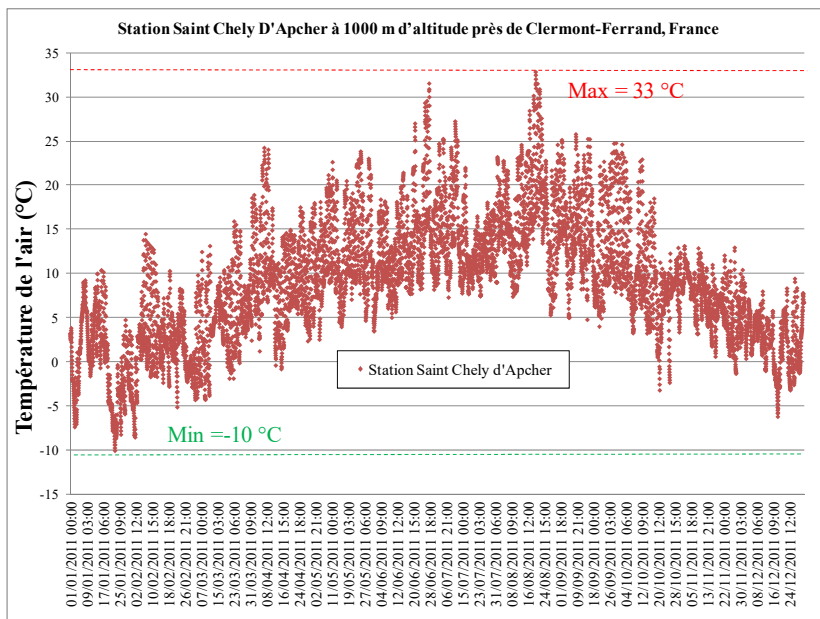
## AASHTOWare Pavement ME

	Paramètre	Données nécessaires
Bitume	Module complexe $G^*$ et angle de phase $\delta^*$	$G^*$ à des différentes température set à $f = 1,59 \text{ Hz}$ (10 rad/s)
<b>Subdivision en sous-couches pour tenir en compte des gradients de température et du vieillissement</b>		
Enrobés	Module complexe des enrobés	$E(f,T), V_a, V_b$ Paramètres de transfert thermique (EICM)
	Loi de fatigue	$N_f = f(\epsilon, E)$ <b>Coefficients de calage C + modèle de fissurations <math>C_H</math></b>
Paramètre		Données nécessaires
3 possibilités :		Courbe granulométrique, Masse volumique sèche, Module résilient, Paramètres de transfert thermique (EICM)
- Module constant au cours de l'année		
- Module pour chaque mois		
- Module en fonction de la température et de l'humidité		

# Sites expérimentaux choisis en France et au Québec

## 3 sites avec de grandes différences de températures saisonnières :

- Site de Bègles près de Bordeaux :  $-8^{\circ}\text{C}$  à  $+38^{\circ}\text{C}$
- Site de Saint Chely d'Apcher (1000 m d'altitude près de Clermont-Ferrand) :  $-18^{\circ}\text{C}$  à  $35^{\circ}\text{C}$
- Site routier de l'Université Laval (Québec) :  $-30^{\circ}\text{C}$  à  $+30^{\circ}\text{C}$

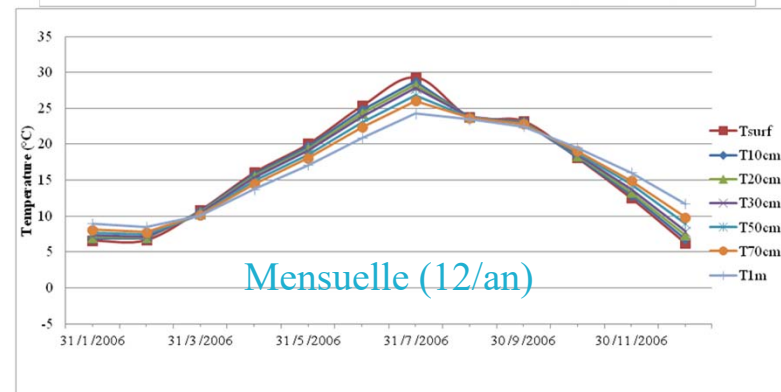
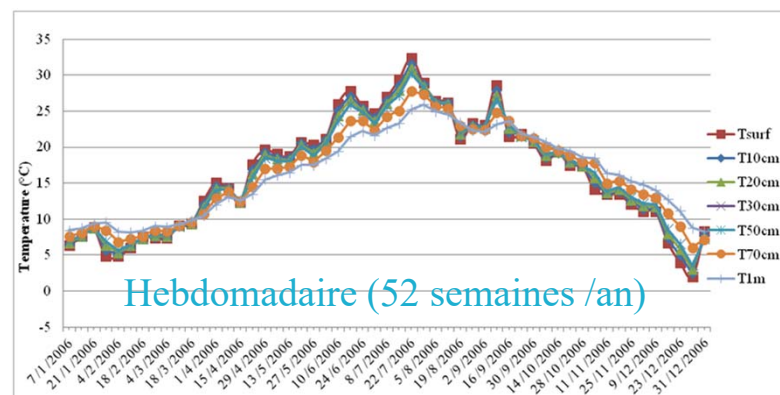
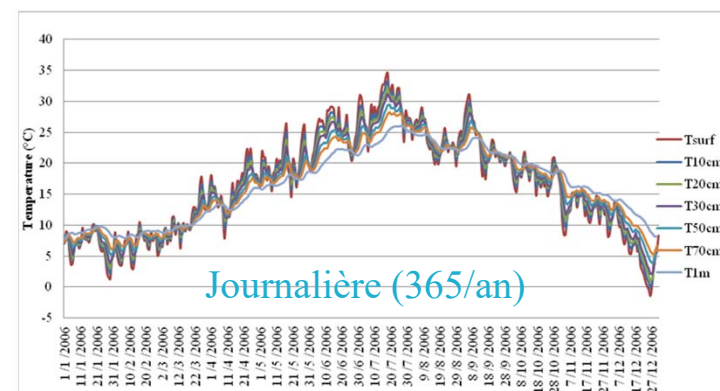
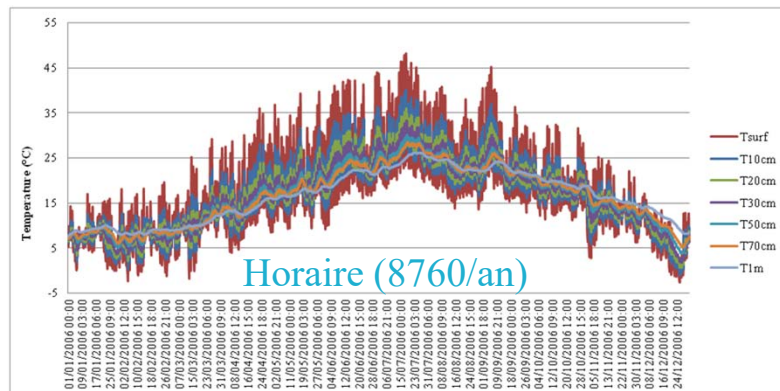




# Procédure incrémentale du calcul de la température équivalente

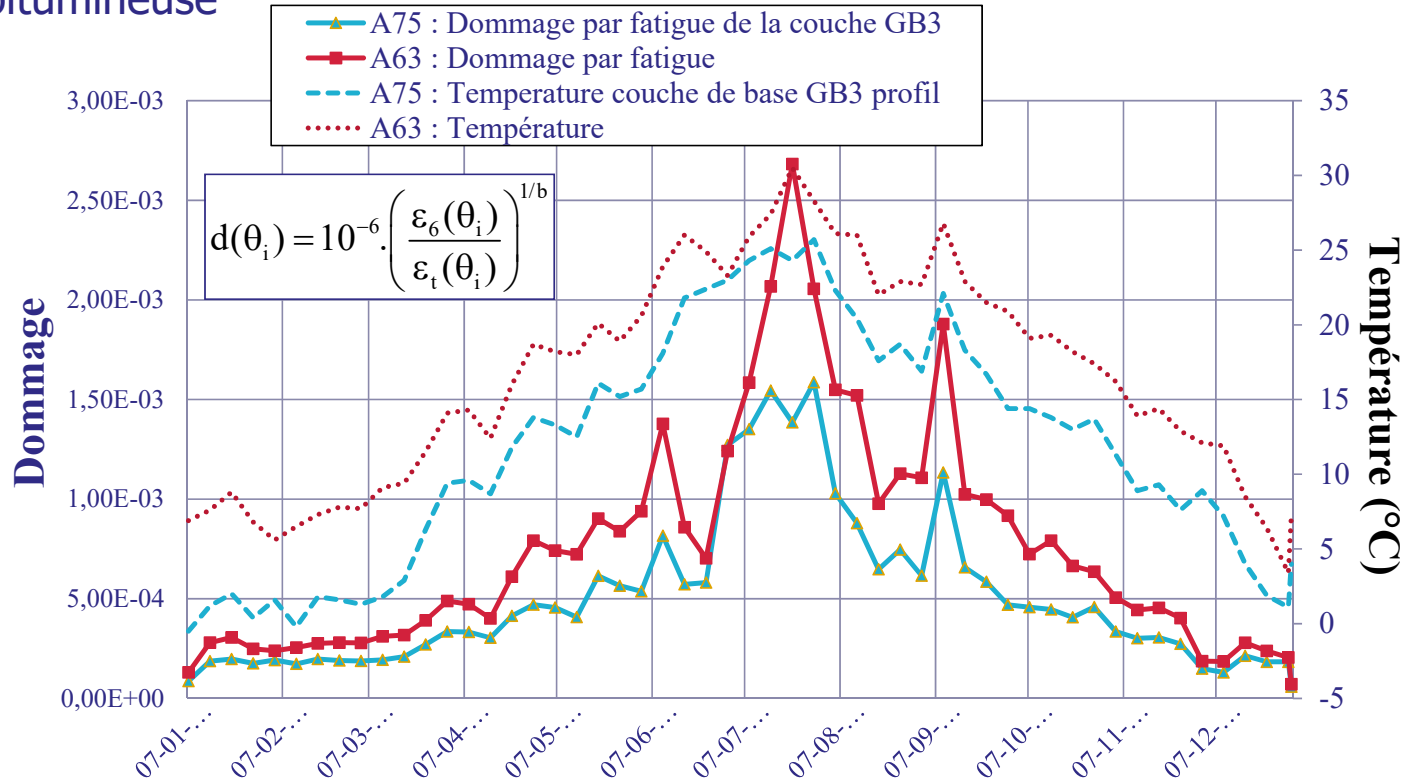
- Traitement des bases de données de mesures en continu de température à plusieurs profondeurs
- Développement d'une procédure de calcul incrémentale avec prise en compte de la température réelle pour calculer l'incrément de dommage correspondant avec les lois de fatigue.

## Climat Bordeaux (A63) : Année 2006



# Endommagement par fatigue des structures de chaussées

Effet des variations saisonnières de température sur le calcul du dommage élémentaire  
Structure bitumineuse



Le climat de Bordeaux (A63,  $\theta_{eq} = 20^\circ\text{C}$ ) engendre plus de dommage par fatigue pour les matériaux bitumineux que le climat de Saint-Chély d'Apcher à 1000 m d'altitude (A75,  $\theta_{eq} = 18^\circ\text{C}$ ).

# Influence de la température sur le dimensionnement de la chaussée

Structure initiale

8BBSG/13GB3/13GB3/PF3

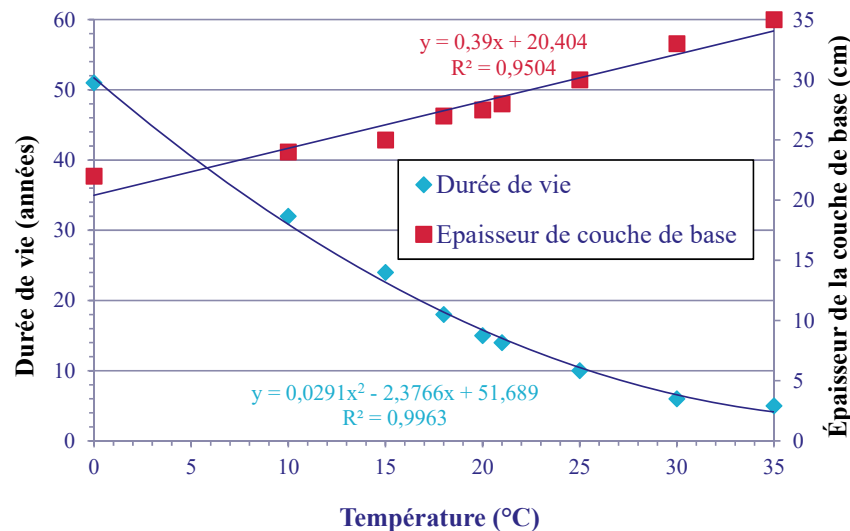
Dépendance en température des paramètres de fatigue

$$\varepsilon_6(\theta) \sqrt{E(\theta)} = \text{constante}$$

(LCPC-SETRA, 1994)

Risque  $r = 1 \%$

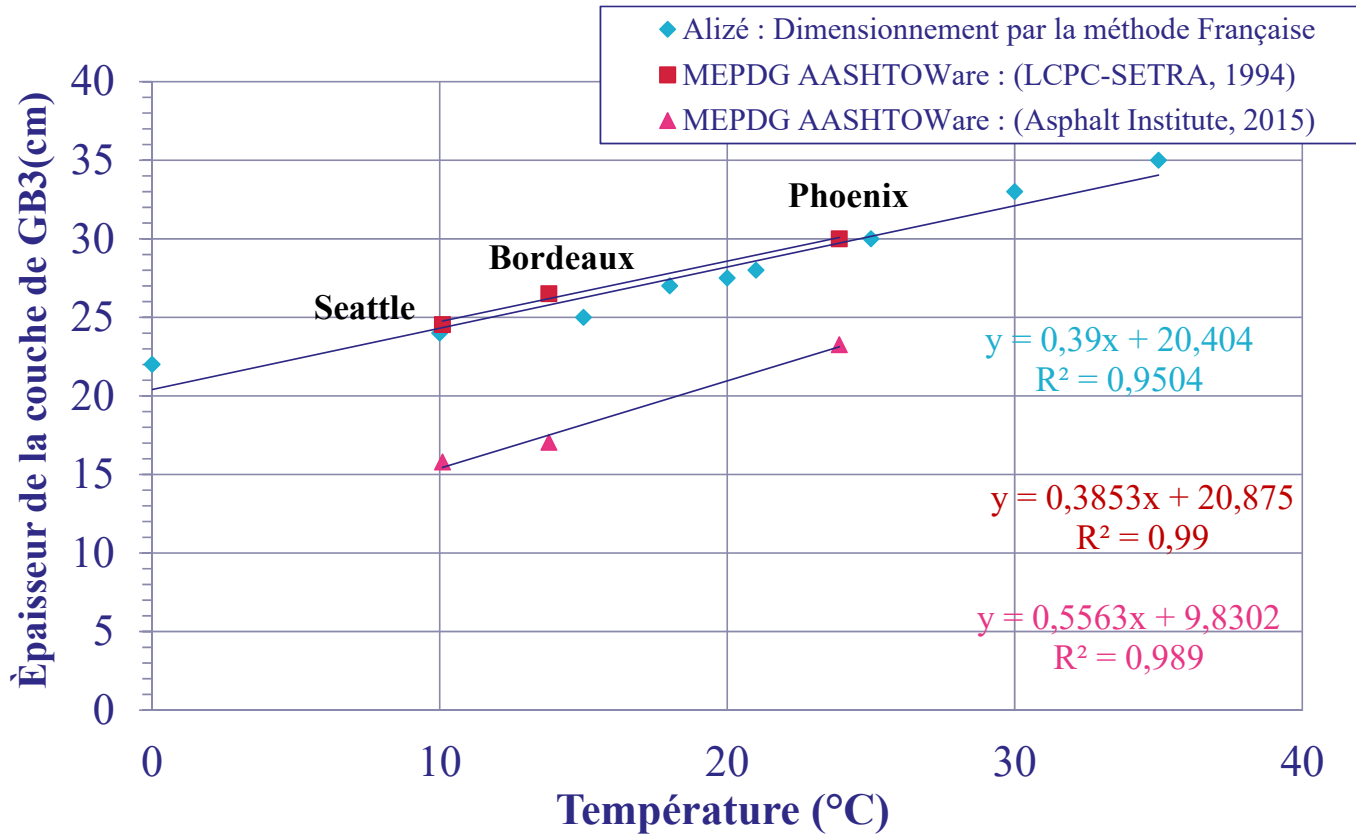
Température équivalente (°C)	10	15	18	20	21	25	30	35
Durée de vie (années)	<b>32</b>	<b>24</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>5</b>
Épaisseur de la couche GB (cm) pour (20 ans)	24	25	27	27,5	28	30	33	35
	-2	-1	+1	+1,5	+2	+4	+7	+9



**Une augmentation de 1°C engendre une réduction de 8% de la durée de vie de la chaussée.**

## Durées de vie des chaussées pour différents climats

Comparaison du dimensionnement de la structure A63 avec différents climats (utilisation de MEPDG )



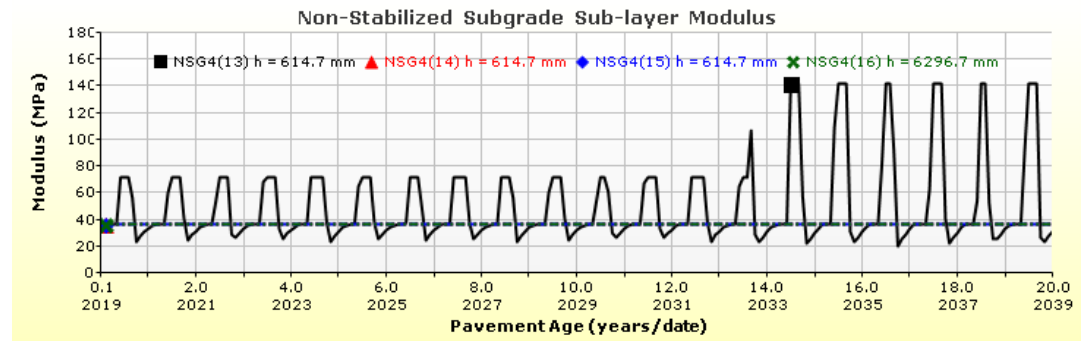
Peu de différence entre méthode française et US avec la même loi de fatigue



Importance du choix de la **loi de fatigue**, et de son évolution avec la température pour le dimensionnement

## Effet des variations de module des couches non liées en fonction de la température et de l'humidité (Site SERUL, Québec)

Utilisation de la méthode MEPDG pour prédire les variations de module du sol support et de la GNT



Influence des variations saisonnières de module sur le dimensionnement ⇒ effet limité sur les déformations permanentes

Type de dégradations		IRI (m/km)	Déformation permanente (mm)	Fissuration par fatigue (%)	Fissuration par le haut (m/km)
Seuil		3	12	20	380
Loi de fatigue	Asphalt Institute <b>MR constant</b>	2,7	<b>16,7</b>	<b>1,7</b>	<b>79,2</b>
	GB 20 (Doucet, 1999) <b>MR constant</b>	2,7	<b>16,7</b>	<b>0,9</b>	<b>33,4</b>
	Asphalt Institute <b>MR variable EICM</b>	2,8	<b>19,1</b>	<b>1,7</b>	<b>59,3</b>



## Comportement des structures de chaussées : Conclusions et perspectives

- Le dimensionnement par la méthode française est effectué pour une température équivalente constante calculée à partir des **variations de température d'une année**. Seul le critère de fatigue est pris en compte
- La **procédure incrémentale** de la méthode de dimensionnement MEPDG prend en compte, de façon plus réaliste, les **variations saisonnières au cours de la durée de vie des chaussées** pour plusieurs critères de dégradations : fissuration thermique, orniérage et fatigue
- Le choix des **lois de dommage, fonction de la température**, joue un rôle déterminant

## Evolutions envisagées pour la méthode française

- Intégrer un **modèle thermique** dans Alizé permettant de calculer les températures dans la structure de chaussée à partir des données métrologiques et le valider
- Améliorer les lois d'évolution de la **durée de vie en fatigue en fonction de la température**
- Intégrer des **modèles de comportement des interfaces** de couches de chaussées, dépendants de la **température**.

*R. Ktari et al. (2020), International Journal of Pavement Engineering*

**En vous remerciant pour votre attention**

**P. Hornych & F. Hammoum**

Département MAST



Remerciements pour leurs contributions :

J-M Balay, J-P Bilodeau, D. Bodin, S. Bouron, O. Chupin, A. Chabot, G. Doré, M. Hun, J-P Kerzerho, R. Ktari, D. Lesueur, D. Saint-Laurent, C. Mauduit, P. Marsac, P. Metais, M-L Nguyen, J-M Piau, B. Pouteau, V-T Vu,

**Pour plus  
d'informations**



## Pour plus d'informations (2010-2020) : (1/3)

- Mauduit C., Hammoum F., Piau J.M., Mauduit V., Ludwig S., Hamon D. (**2010**) Quantifying expansion effects induced by Freeze–Thaw cycles in partially water saturated bituminous mix: Laboratory Experiments, Road Materials and Pavement Design, 11 (Special Issue):
- Bodin D., Terrier J.P., Perroteau C., Hornych P., Marsac P. (**2010**) Effect of temperature on fatigue performance of asphalt mixes, 11th International Conference on Asphalt Pavements, Nagoya, Aout 2010.
- Hun M., Chabot A., Hammoum F. (**2012**) A Four-Point Bending Test for the Bonding Evaluation of Composite Pavement. In: Scarpas A., Kringos N., Al-Qadi I., A. L. (eds) 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. RILEM Bookseries, vol 4. pp 51-60, Springer
- *M. Hun (2012) Effet de l'eau sur le décollement des couches, Thèse de l'école doctorale SPIGA, 29 octobre (thèse financée par l'Ifsttar).*
- Mauduit C., Nguyen P., Mauduit V., Venries N., Kerzreho JP, Pouteau B., Hammoum F., (**2013**) Site instrumenté sur l'autoroute A75: Impact des conditions climatiques sur les infrastructures routières, *Revue Générale des Routes et de l'Aménagement*, n°907-908, 80-87, janvier 2013.
- Mauduit V., Mauduit C., Vulcano-Greullet N., Coulon N., Hammoum F., Hamon D., Kerzreho J-P., Piau J-M, Chabot A., (**2013**), Dégradation subite des enrobés bitumineux par période de gel/dégel : Analyse de cas de terrain et recherche exploratoire en laboratoire, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 279, pp 47-63
- Chabot A., Hun M., Hammoum F. (**2013**), Mechanical analysis of a mixed mode debonding test for "composite" pavements, *Construction and Building Materials*, Volume 40, March 2013, p. 1076-1087, ISSN 0950-0618,

## Pour plus d'informations (2010-2020) (2/3)

- Horny P., Balay J.M., Mauduit C., Bodin D. (**2013**) Evaluation of the concept of equivalent temperature for pavement design, Ninth International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (BCRA), 25-27 June 2013, Trondheim, Norway
- Mauduit C., Crégut E., Joly S., Liandrat S., Chupin O., Hammoum F., Piau J-M, (**2014**), Asphalt Pavements, edited by Y. Richard Kim, CRC Press, Vol 1, 139-146. ISBN 978-1-138-02693-3
- *Chabot A., Hammoum F., Hun M. (2016) Mixed-Mode Debonding Approach to Evaluate Water Sensibility in Bi-Layer Composite Pavement. In: Chabot A., Buttlar W., Dave E., Petit C., Tebaldi G. (eds) 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements. RILEM Bookseries, vol 13. Pages 613-618, Springer.*
- *VU V.T. (2017). Comportement au gel/dégel des enrobés bitumineux partiellement saturés et impact sur l'endommagement des chaussées. Thèse de l'école doctorale SPIGA, 18 décembre (thèse financée par LHOIST).*
- *Chabot A., Hammoum F., Hun M., (2017) A four point bending bond test approach to evaluate water effect in a composite beam, Special Issue : Mechanisms of cracking and debonding in pavements: debonding mechanisms in various interfaces between layers, European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol 21.*
- *Vu V.T., Chupin O., Piau J.-M., Hammoum F., Bouron S. (2018) Experimental study and modeling of the behavior of partially saturated asphalt concrete under freezing condition. Construction and Building Materials, 163: pp. 169–178*
- Ktari R., Hammoum F., Horny P., Saint-Laurent D., Marsac P., Nguyen M-L, Piau J-M, (**2019**) Prise en compte des variations saisonnières de température dans la méthode française de dimensionnement des infrastructures routières Chapitre 1 de l'ouvrage (35 pages) : Réseau international sur l'évaluation des risques et l'adaptation climatique d'ouvrages en génie civil et bâtiments –Editeur ISTE (<https://iste-editions.fr>)

## Pour plus d'informations (2010-2020) (3/3)

- *R. Ktari , D. Saint-Laurent, P. Horny, F. Hammoum, P. Marsac & M-L. Nguyen (2020) Effect of climate on asphalt pavement performance using two mechanistic-empirical methods Effect of climate on asphalt pavement performance using two mechanistic-empirical methods, International Journal of Pavement Engineering*
- D. Lesueur, P. Métais, P. Pibis, S. El Bedoui, H. Ruat, S. Bouron and F. Hammoum (2020) Improving the durability of asphalt mixtures with hydrated lime: Field results from recent French sections, RILEM International Symposium on Bituminous Materials, published in RILEM Bookseries published by Springer
- *Vu V-T, Chupin O., Piau J-M, Hammoum F., (2020) FE modelling of wet asphalt structures undergoing frost – Towards an explanation of winter potholes, International Journal of Pavement Engineering, accepted for publication*