

Evolution des outils de modélisation pour l'analyse des essais sur chaussée en vraie grandeur à l'UGE

Olivier Chupin
Université Gustave Eiffel

Introduction

- Essais en vraie grandeur (manège de fatigue, FABAC , simulateur U. Laval,...) permettent de guider le développement de nouveaux modèles
- Confrontation outils numériques / résultats d'essais → meilleure compréhension du comportement mécanique des structures chaussées en conditions réelles
- Évolutions des outils  observations expérimentales

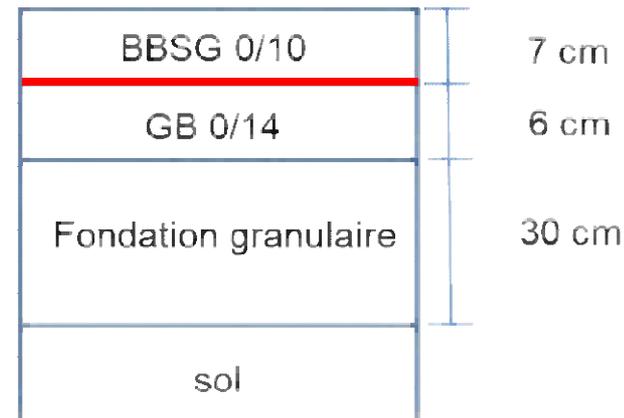
Plan de la présentation

- Exemple d'utilisation de modèles avancés et de développements de modèles pour l'étude de l'effet du comportement d'interface entre couches d'EB sur la réponse mécanique des chaussées
 - Effets réversibles (ViscoRoute© 2.0) et irréversibles (calcul EF)
- Autres outils EF développés « récemment » pour l'analyse de l'endommagement/fissuration des chaussées et des effets du gel/dégel

Comportement interface entre couches d'EB et effet sur la réponse de la structure – effets réversibles

- Essai manège dans le cadre d'une collaboration Université Laval (Québec) / UGE – 2011 (thèse D. Grellet, 2017)
- 2 structures testées dont celle présentée ci-dessous

Couche d'accrochage entre
BBSG et GB



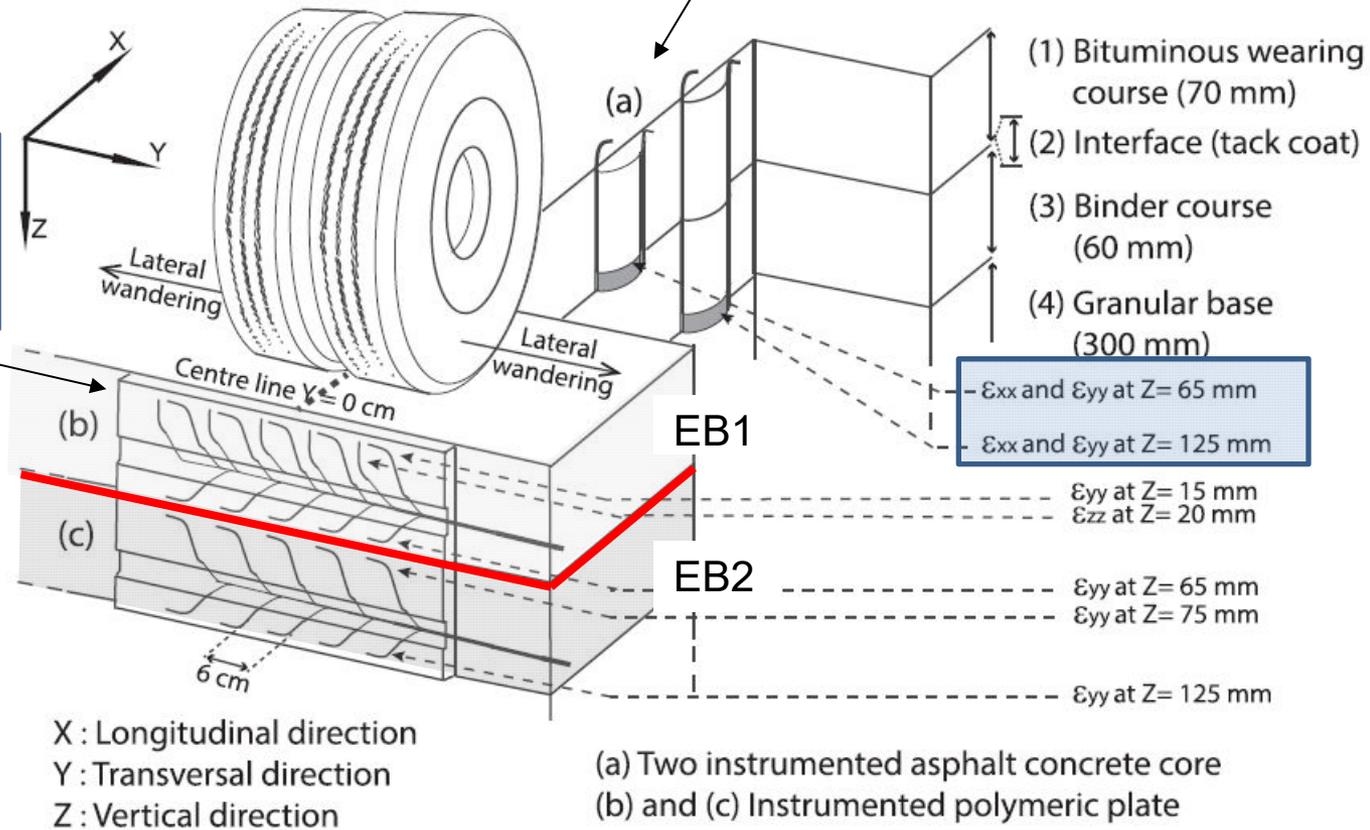
- Plusieurs sections avec EB instrumentés par 2 types de capteurs à fibres optiques + jauges $\rightarrow \varepsilon_L, \varepsilon_T, \varepsilon_{ZZ}$ à différentes cotes
 - En surface (haut BBSG)
 - De part et d'autre de l'interface entre couches d'EB (bas BBSG et haut GB)
 - Base des couches d'EB

Instrumentation FO

Instrumentation par fibre optique de carottes d'EB (tech. brevetée U. Laval)

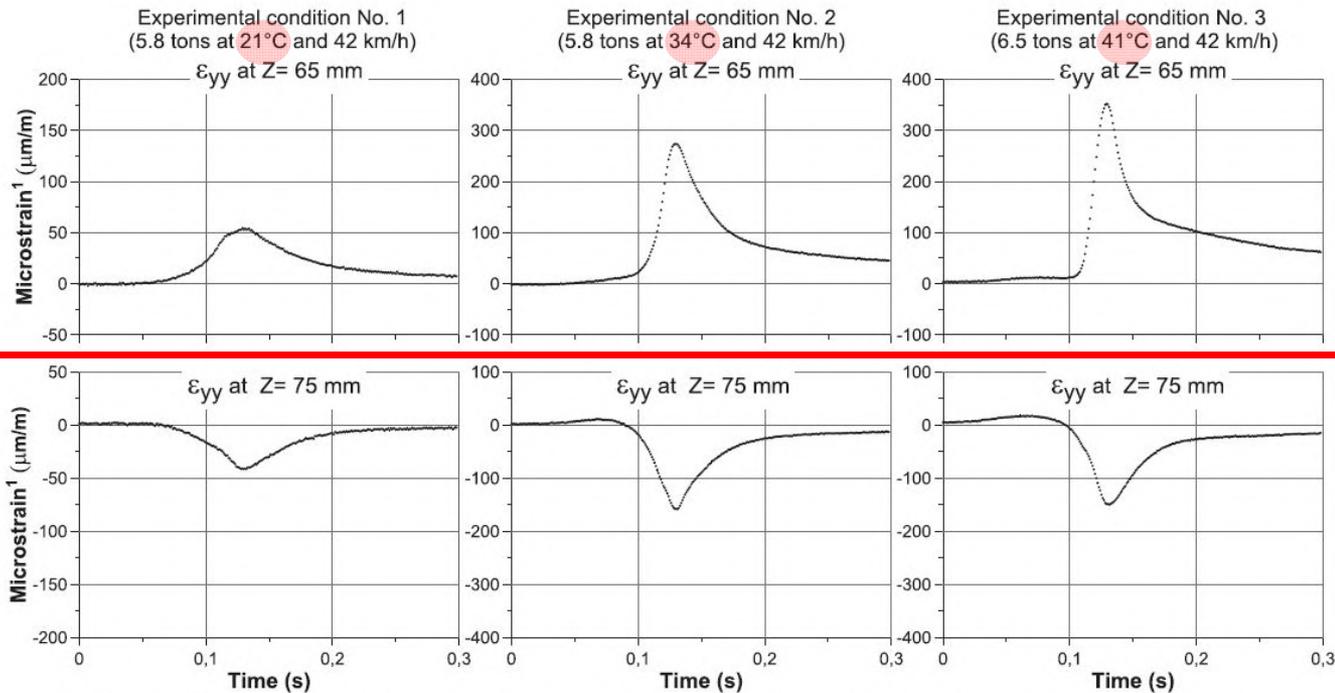
Plaque de déformation multiniveau (développée à U. Laval)

Interface



Exemple de résultats de mesure (Grellet & al. 2018)

- ε_T au passage d'un jumelage à l'interface entre couches d'EB, 3 températures
- Déformations mesurées sous le passage d'un centre de roue



Bas BBSG

interface

Haut GB

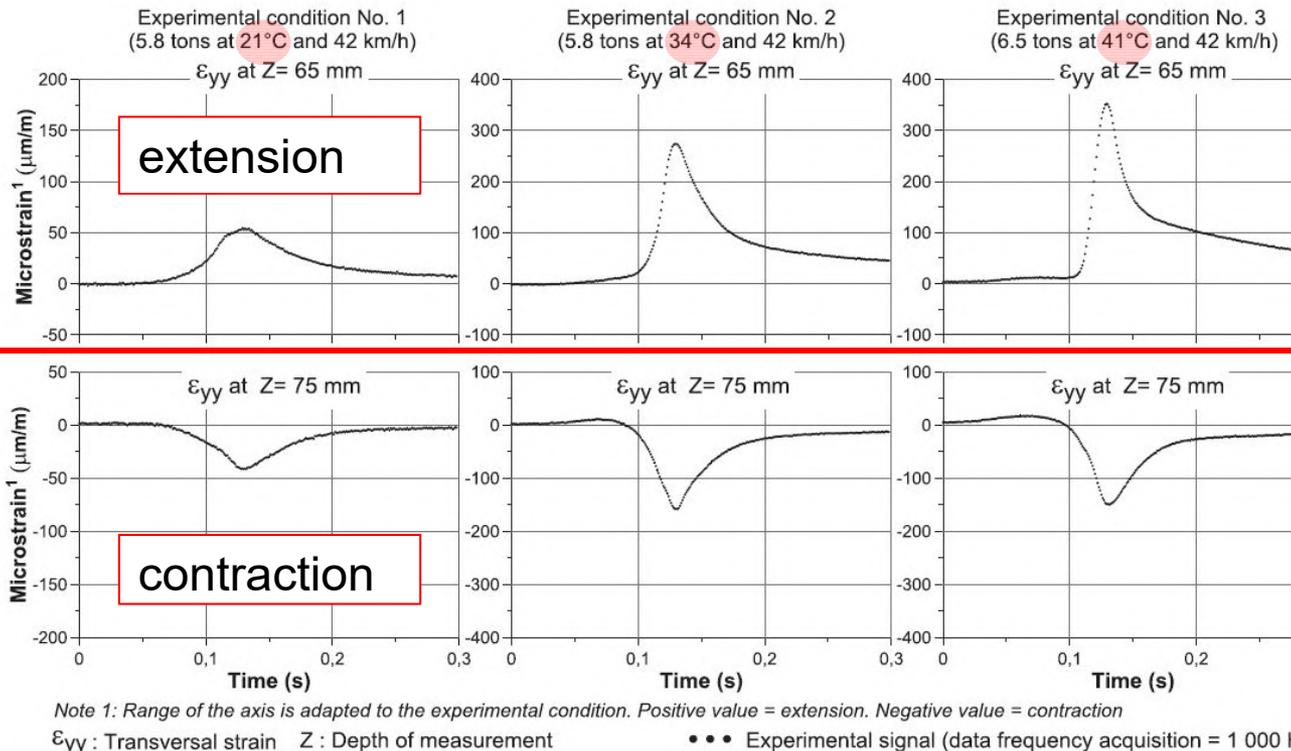
Note 1: Range of the axis is adapted to the experimental condition. Positive value = extension. Negative value = contraction

ε_{yy} : Transversal strain Z : Depth of measurement

••• Experimental signal (data frequency acquisition = 1 000 Hz)

Exemple de résultats de mesure (Grellet & al. 2018)

- ϵ_T au passage d'un jumelage à l'interface entre couches d'EB, 3 températures
- Déformations mesurées sous le passage d'un centre de roue



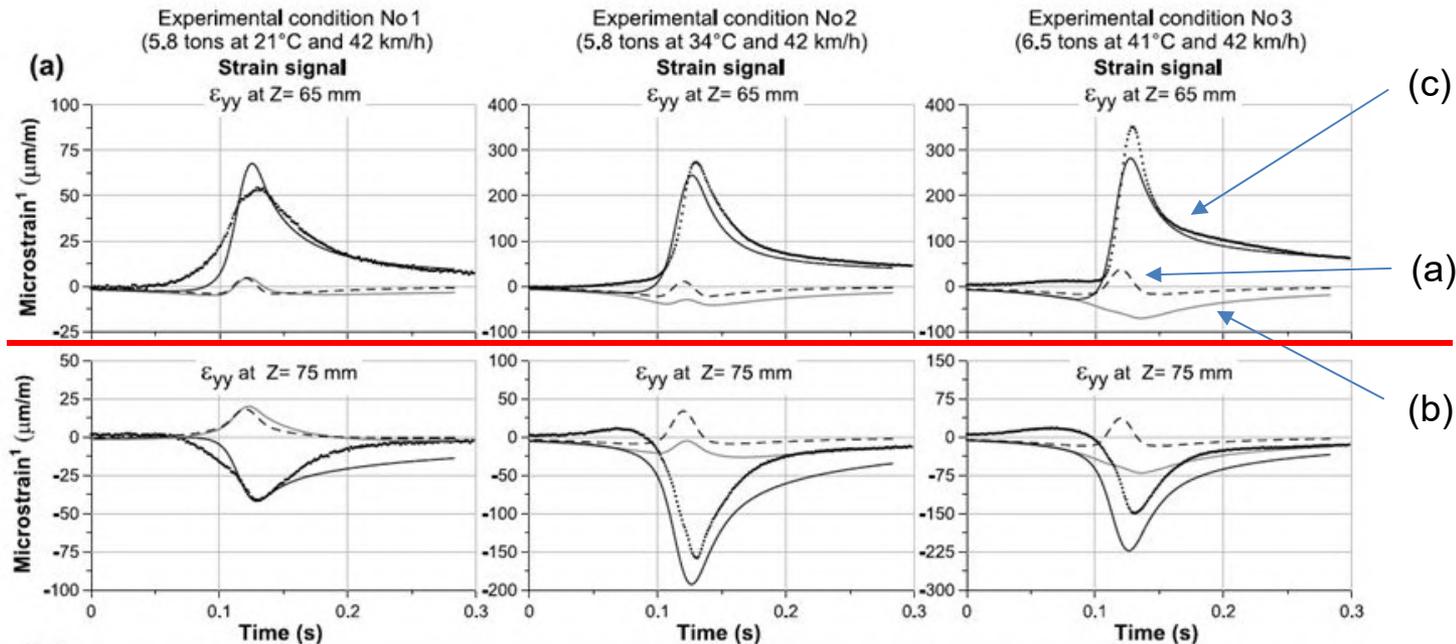
- Extension en bas de BBSG et contraction en haut de GB
- Augmentation des déformations avec T°C
- Pas de dégradation d'interface à ce stade (nb cycles de chargement faible)



Comportement d'interface visqueux (\neq collé dans le sens $[[u]] = 0$) ?

Comparaison avec simulations ViscoRoute©2.0

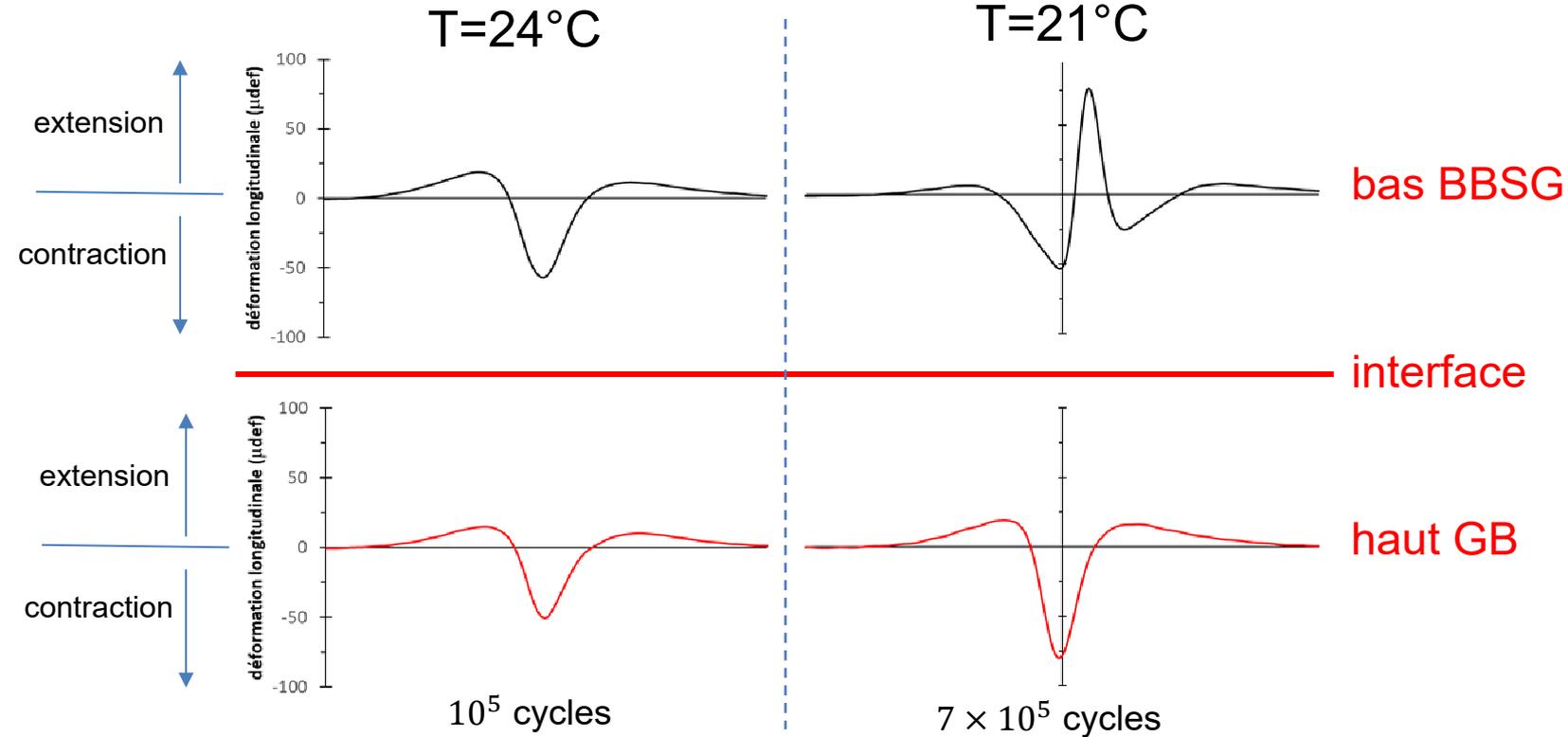
- **3 modèles étudiés**
 - (a) couches élastiques + interface collée (dimensionnement)
 - (b) couches viscoélastiques (modèle de Huet) + interface collée
 - (c) couches viscoélastiques + interface viscoélastique (Huet avec paramètres bitume) → « sauts » de déformation à l'interface proches de la mesure + effet de température bien reproduit
- **Modèle + résultats d'essais → fonctionnement de l'interface**
- **Comportement d'interface affecte réponse de la structure ; notamment extension en base de BBSG → endommagement couche de surface , top-down cracking...**



Comportement interface entre couches d'EB et effet sur la réponse de la structure – aspects irréversibles survenus en cours d'essai de fatigue

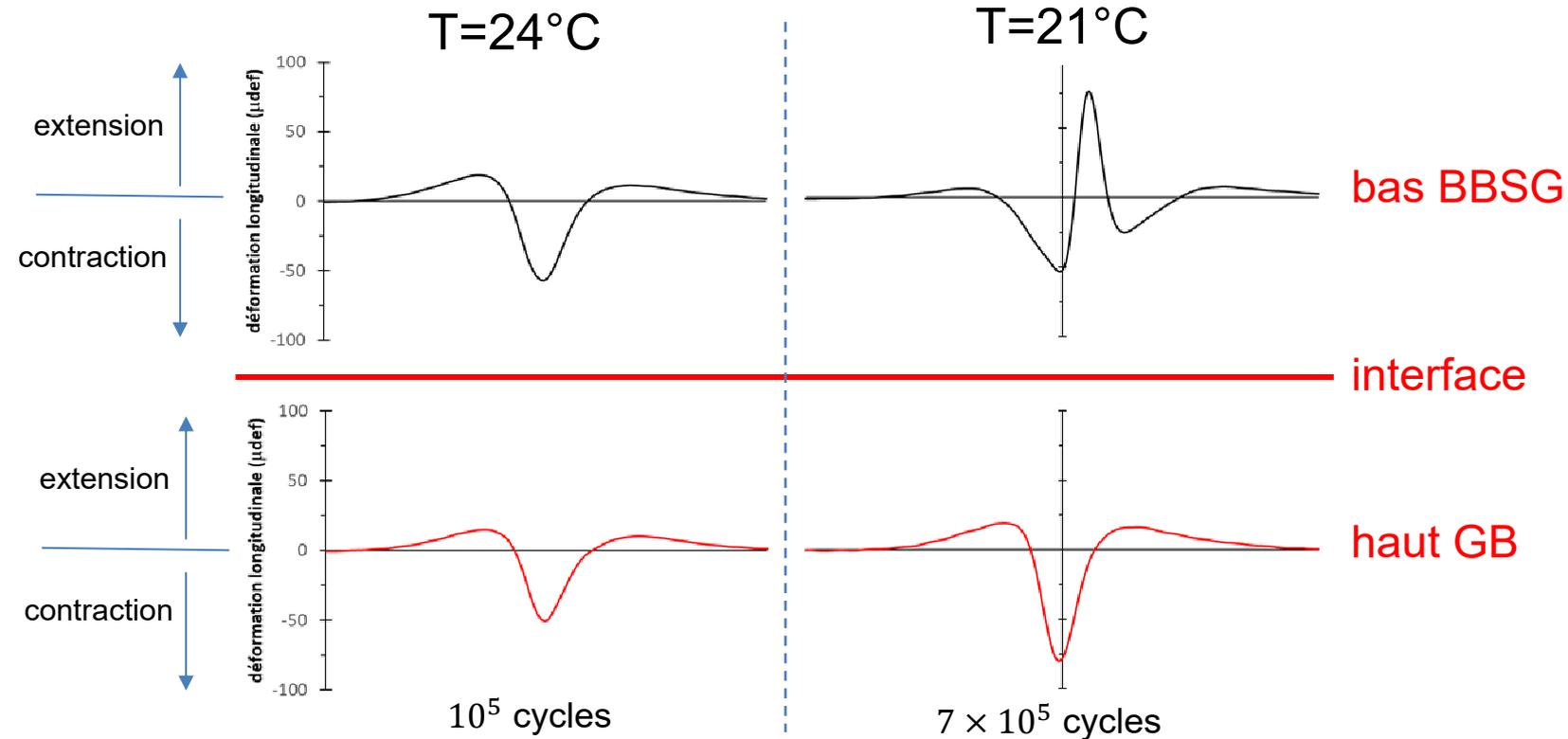
- Essai en cours d'exploitation (projet NEMO / poster Marina Al Bacha, doctorante LAMES)
- Structure : BBSG (5cm) + GB (10 cm) + GNT (25 cm) + sol
- Instrumentation à différents niveaux (jauges TML et dynatest, fibres optiques, température) – En particulier, mesure des déformations de part et d'autre de l'interface
- Nb de cycles total de chargement réalisé : $\approx 10^6$

Signaux de déformation longitudinale sous jumelage pour 2 nb cycles différents



- 10^5 cycles (à gauche) : ε_{xx} bas et haut en contraction et de même amplitude \rightarrow fonctionnement d'interface de type collé
- 7×10^5 cycles (à droite) : signaux bas et haut différents avec extension en bas de BBSG

Signaux de déformation longitudinale sous jumelage pour 2 nb cycles différents



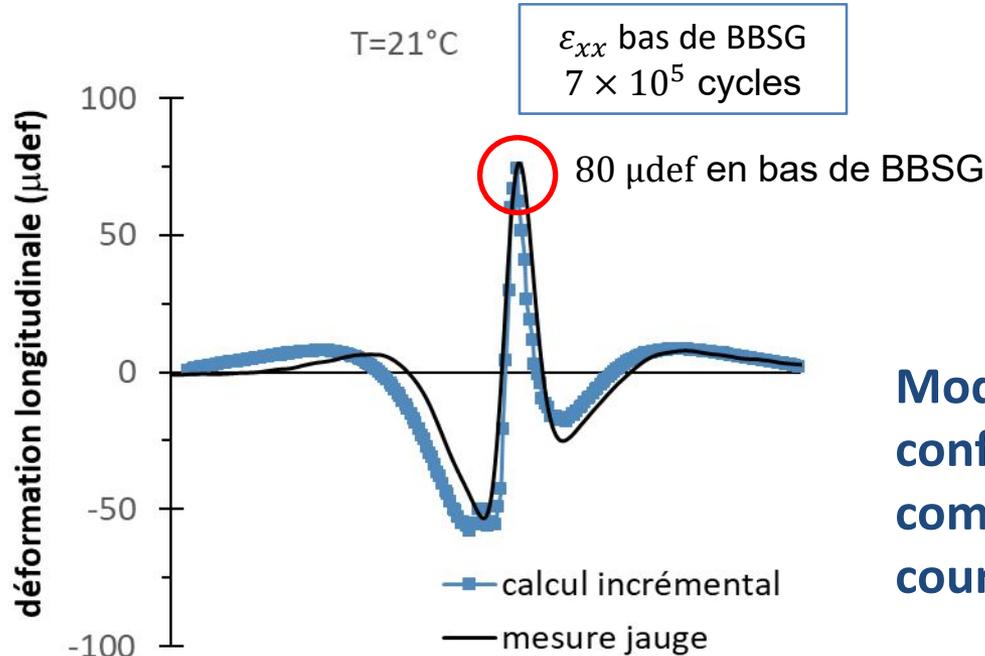
- Au cours de l'essai : modification du comportement d'interface autour de 5×10^5 cycles (passage par $T^\circ\text{C}$ et ε_{xx} élevées + répétition de passages de charges)
- En particulier, changement de forme de ε_{xx} en bas de BBSG – perte sur toute la fin de l'essai \rightarrow modification irréversible du comportement d'interface (rupture) ?

Modèle de chaussée avec comportement d'interface viscoplastique de type frottement de Coulomb

- Comportement structural sous charge roulante avec couches EB viscoélastiques (modèle Huet) + interface viscoplastique
- Loi de frottement de Coulomb à l'interface → comportement non linéaire
 - $[[\dot{u}]] = 0, \tau < \tau_c = \sigma_N \operatorname{tg}(\phi) \rightarrow$ fonctionnement frottant non glissant
 - $[[\dot{u}]] > 0, \tau = \tau_c \rightarrow$ fonctionnement frottant glissant
 - $[[\dot{u}]] < 0, \tau = -\tau_c \rightarrow$ fonctionnement frottant glissant
- Suivant la position de la roue par rapport à un point donné de l'interface, celui-ci peut fonctionner en mode frottant non glissant (ex. roue à la verticale de ce point, forte contrainte normale en ce point) ou frottant glissant
- Implémentation EF dans Freefem++ du calcul incrémental de la réponse de la structure sous charge roulante pour ce type de comportement (travail en cours)

Comparaison simulations / mesures

- Avant rupture d'interface : calcul élastique classique avec interface collée permet de retrouver les mesures de jauges au dessus et au dessous de l'interface
- Après rupture d'interface ($>5 \times 10^5$ cycles) : le modèle incluant le comportement d'interface frottant permet de se rapprocher des signaux atypiques mesurés en bas de BBSG



**Modèle vs. mesure →
confirmation des modifications du
comportement d'interface en
cours d'essai**

Autres exemples d'outils EF développés « récemment »

Modélisation de la fissuration des chaussées

- **Code EF type mécanique de la rupture + loi de Paris pour la propagation de fissures par fatigue (2D)**
 - Application à l'analyse d'un essai de remontée de fissure dans chaussée bitumineuse réalisé sur les machines FABAC
 - Calage de la loi de Paris en labo.
- **Code EF reposant sur le modèle « RDM » M4-5n + loi de Paris (3D)**
 - Application à l'interprétation du même essai FABAC → explicitation du scénario de fissuration (relativement complexe) à s'être développé en cours d'essai
 - Basé sur des critères de fissuration qui permettent de faire évoluer le front de fissure sous l'effet de la répétition des charges (PN DVDC)

Autres exemples d'outils EF développés « récemment »

Modélisation des effets du gel/dégel sur les chaussées

- Calcul mécanique avec loi de comportement incluant : viscoélasticité (Huet) + dilatation thermique + déformation de gonflement (solidification eau porale dans l'EB)
- Couplage avec équation de la chaleur (saut de Stefan)
- Code EF de calcul structurel utilisé pour la modélisation de l'essai de gel/dégel effectué à l'Université Laval (voir présentation J.-P. Bilodeau)

FWD en calcul dynamique + viscoélasticité (perspective)

Ensemble d'outils de calcul (LC + méthodes de calcul structurel appropriées) permettant d'analyser les essais en vraie grandeur – De nouveaux outils peuvent être développés suivant les besoins

Contribution aux techniques de chaussées (conception, entretien...)

Merci de votre attention

Université Gustave Eiffel / MAST-LAMES
olivier.chupin@univ-eiffel.fr