

# Etude du comportement des couches de roulement sur le manège de fatigue et modélisation

Marina Al Bacha, Mai Lan Nguyen, Olivier Chupin,  
Pierre Horny  
Université Gustave Eiffel

# Plan

- **Contexte**
- **Objectif et méthodologie**
- **Etude expérimentale**
- **Approches numériques**
- **Apport des capteurs à fibres optiques**
- **Conclusions**

# Mécanismes de dégradation des couches de roulement

- **Principes de la méthode française de dimensionnement (NF P98-086):**
  - Prédiction des dommages et de la durée de vie, basée sur les couches d'assise
  - Interface collée ou glissante entre les couches
- **Le comportement structurel des couches de roulement reste peu étudié, bien que celles-ci soient fortement sollicitées par :**
  - Le chargement des véhicules
  - Les conditions climatiques
  - Les conditions de collage à l'interface



Variation de la distribution des déformations et contraintes conduisant à des dommages en surface



Fissures



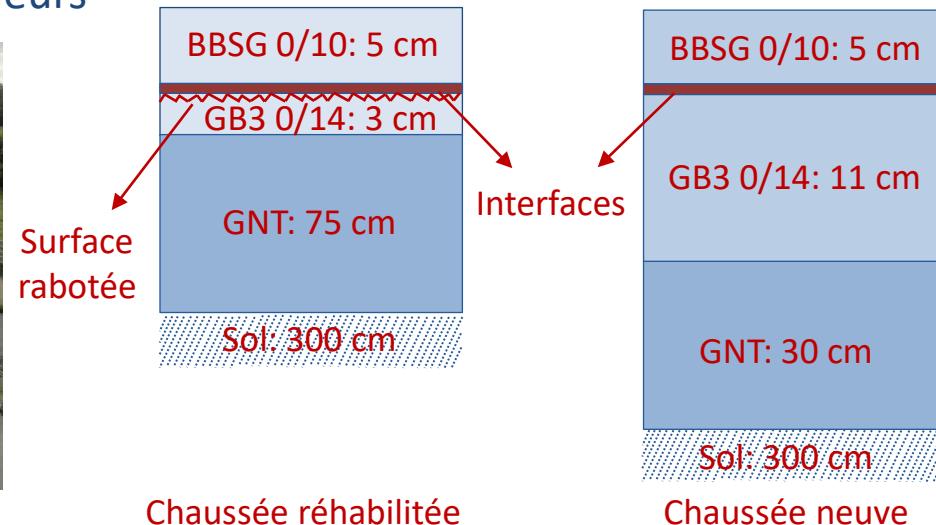
Nids de poule



Ornières

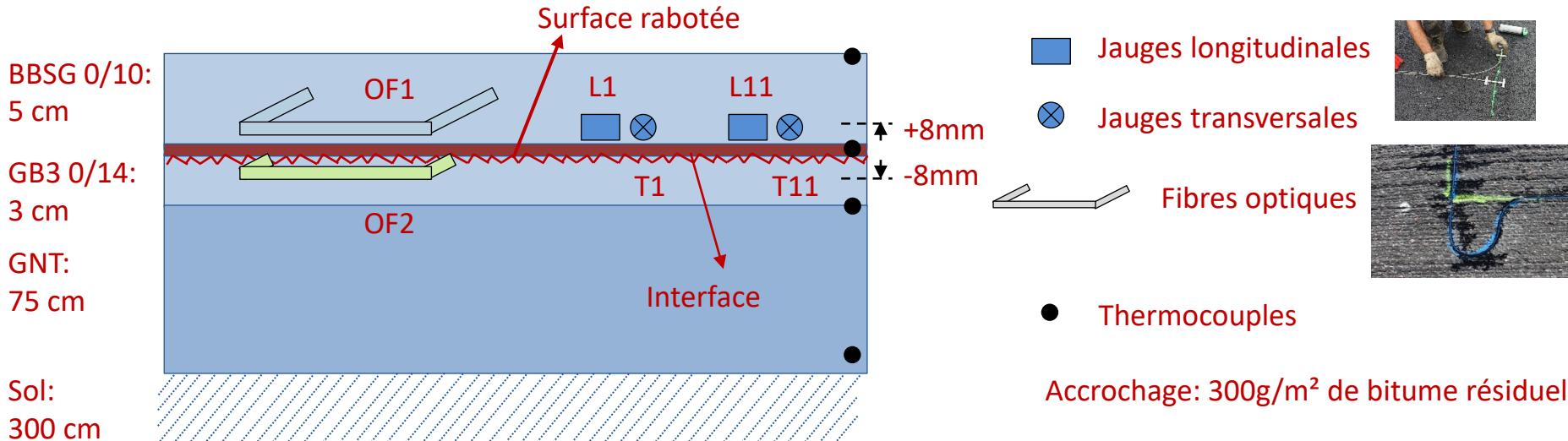
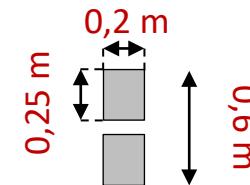
# Objectif et méthodologie

- **Evaluer le comportement des couches de roulement sous trafic sur la base d'essais manège et de modélisations (Viscoroute©2.0 et calcul FEM)**
- **Considération de différents facteurs:**
  - Type de structure: réhabilitée ou neuve
  - Interface avec ou sans couche d'accrochage
  - Matériaux: BBSG, BBM
  - Chargements: roues simples, jumelage ou tridem
  - Températures à différentes profondeurs



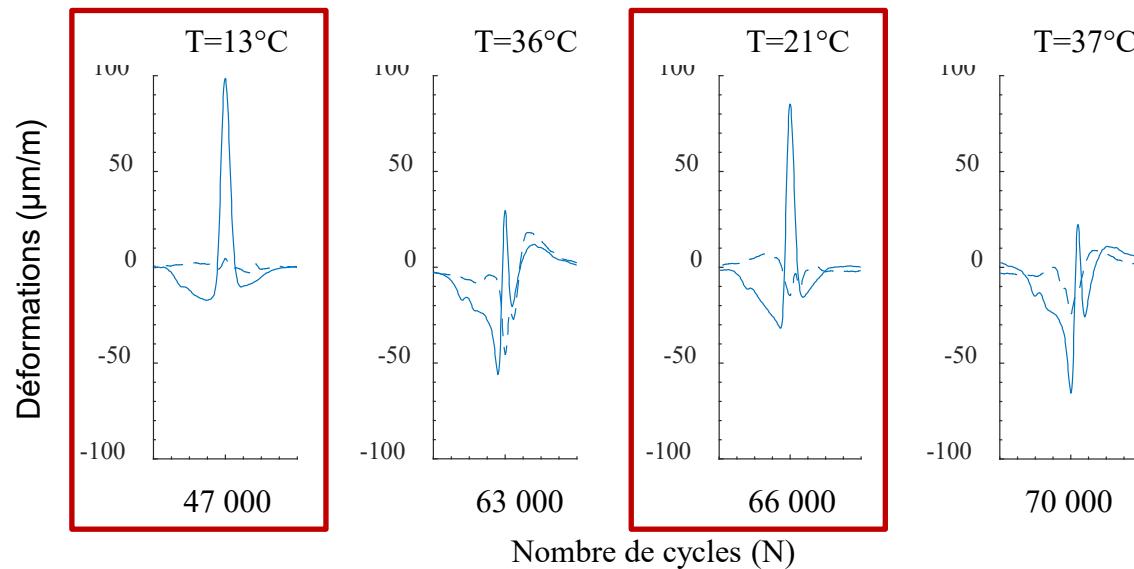
# Etude expérimentale de la chaussée réhabilitée

- Composition de la chaussée: couche de roulement neuve et couche d'assise existante, GNT et sol
- Demi essieux à roues jumelées (6,5 tonnes):
- Chargement: →470 000 cycles
- Instrumentation: jauges et fibres optiques (mesures des déformations), thermocouples (mesures des températures)



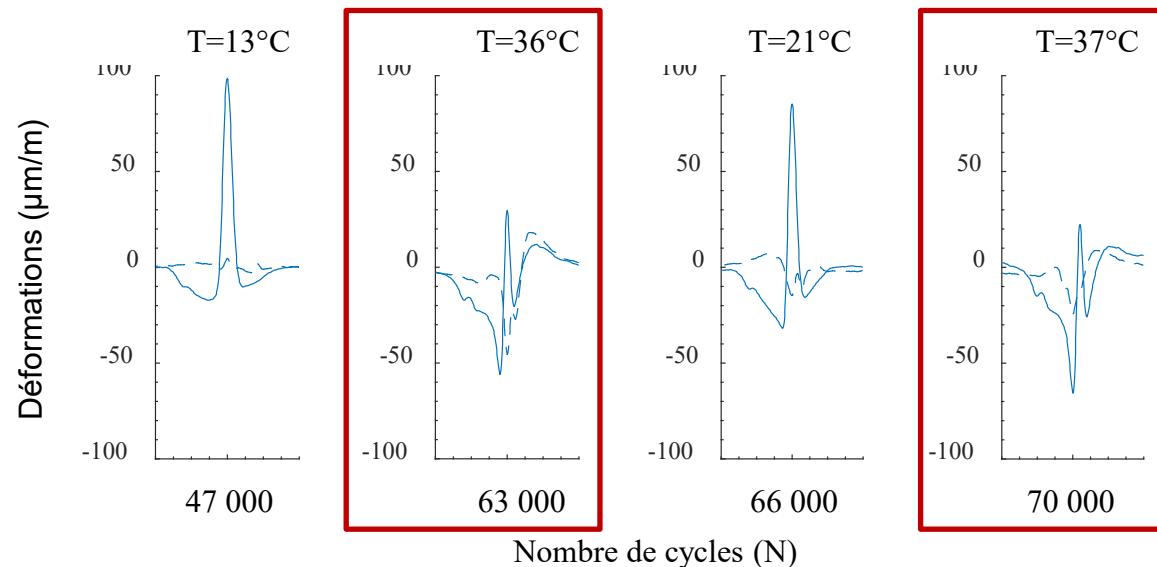
# Chaussée réhabilitée - Déformations longitudinales en bas de la couche de roulement en début de l'essai

- **À température modérée:**
  - Déformations longitudinales différentes mesurées par les 2 jauge L1 et L11 : comportement hétérogène
  - Déformations en extension importantes mesurées par L1 (autour de 100  $\mu\text{def}$ ): **interface non parfaitement collée** dès le début de l'essai → risque d'endommagement de la couche de roulement



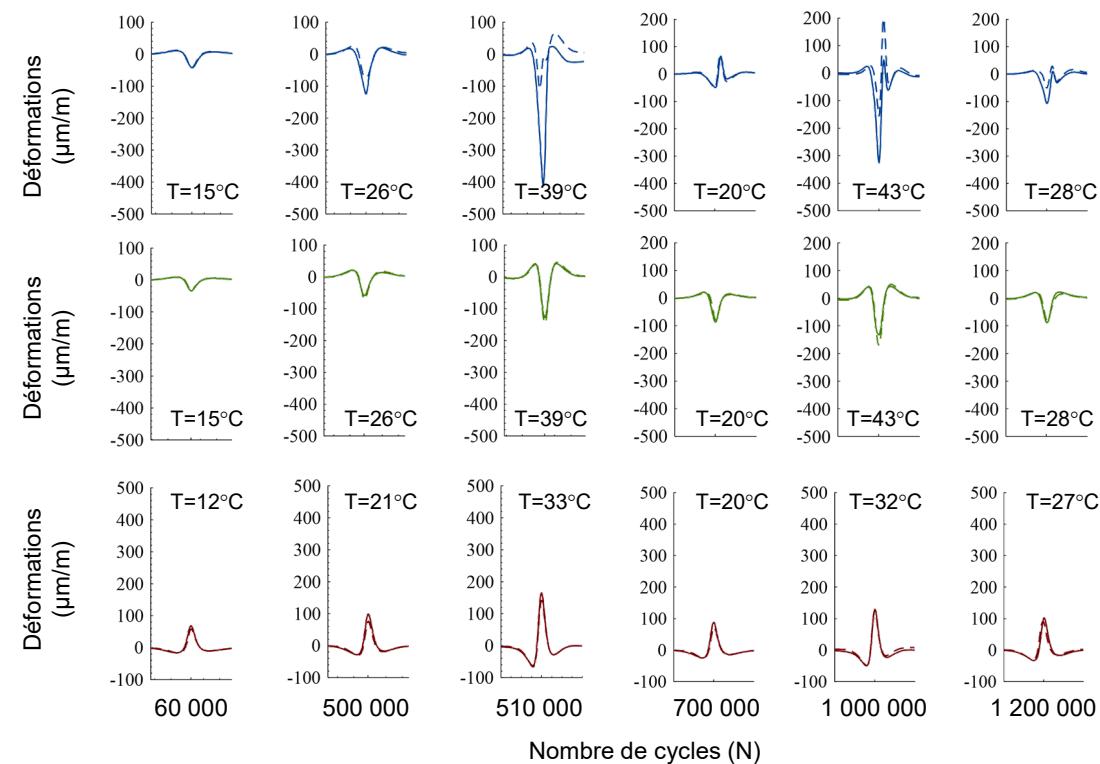
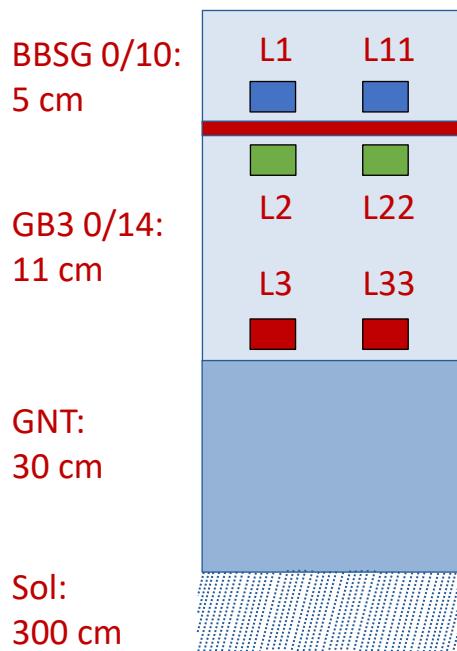
# Chaussée réhabilitée - Déformations longitudinales en bas de la couche de roulement en début de l'essai

- **À haute température:**
  - Changement de la forme du signal et diminution des déformations d'extension en bas de la couche de roulement: effet du comportement de l'interface?
  - **Changement réversible** a priori fonction de la température et non lié à un effet de nombre de cycles



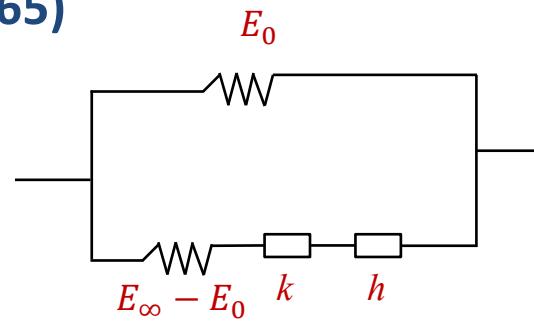
# Chaussée neuve – Evolution des déformations longitudinales

- **En début de l'essai:** interface collée, continuité des déformations longitudinales
- **À 510 000 cycles et à haute température:** apparition de pics en extension en bas de la couche de roulement
- **À partir de 700 000 cycles :** discontinuité des déformations de part et d'autre de l'interface jusqu'à la fin de l'essai, indépendamment de la température → décollement irréversible



# Modélisation avec Viscoroute©2.0

- Modèle multicouche et semi-analytique pour calculer la réponse mécanique sous charge roulante
- Comportement viscoélastique des enrobés bitumineux de Huet-Sayegh (Huet, 1965 and Sayegh, 1965)

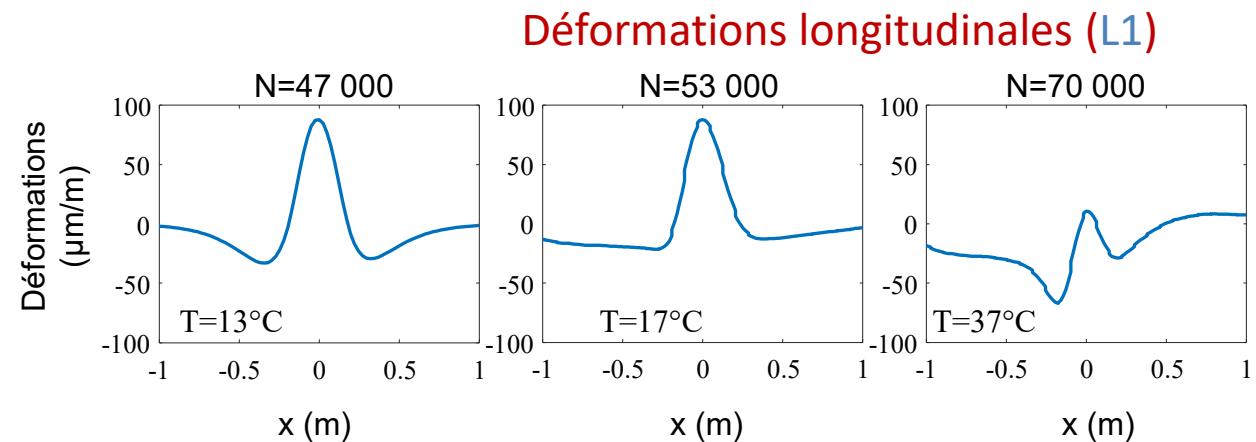


- Interface: collée ou couche mince viscoélastique approchée par un module élastique équivalent (discontinuité de déplacement horizontal), calibrée avec les résultats des essais

# Modélisation avec Viscoroute©2.0

- Pour chaussée réhabilitée:
  - Rappel des signaux expérimentaux

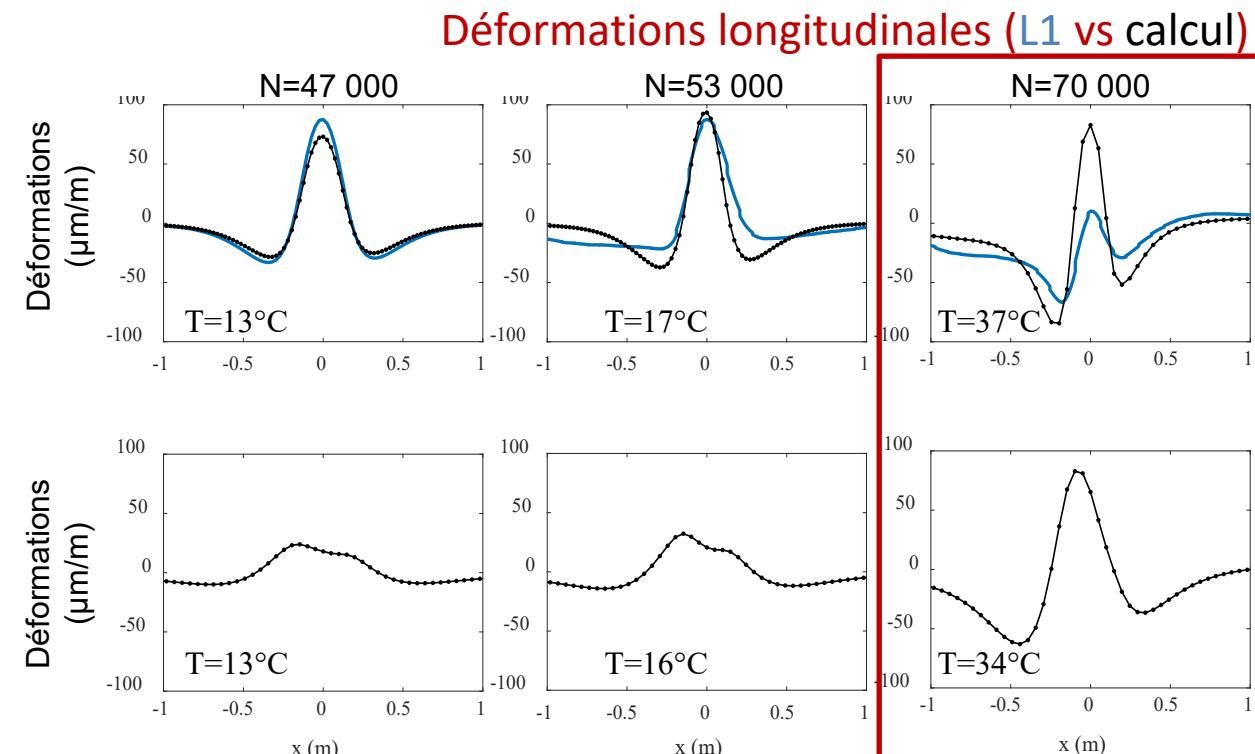
En bas de la couche de roulement



# Modélisation avec Viscoroute©2.0

- Pour chaussée réhabilitée:
  - Modèle avec interface mince ( $e=1\text{mm}$  (Grellet et al., 2018),  $E=20\text{ MPa}$ ):
    - Bonne prédition des déformations mesurées avec L1 à  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$
    - Déformations surestimées à  $37\text{ }^{\circ}\text{C}$

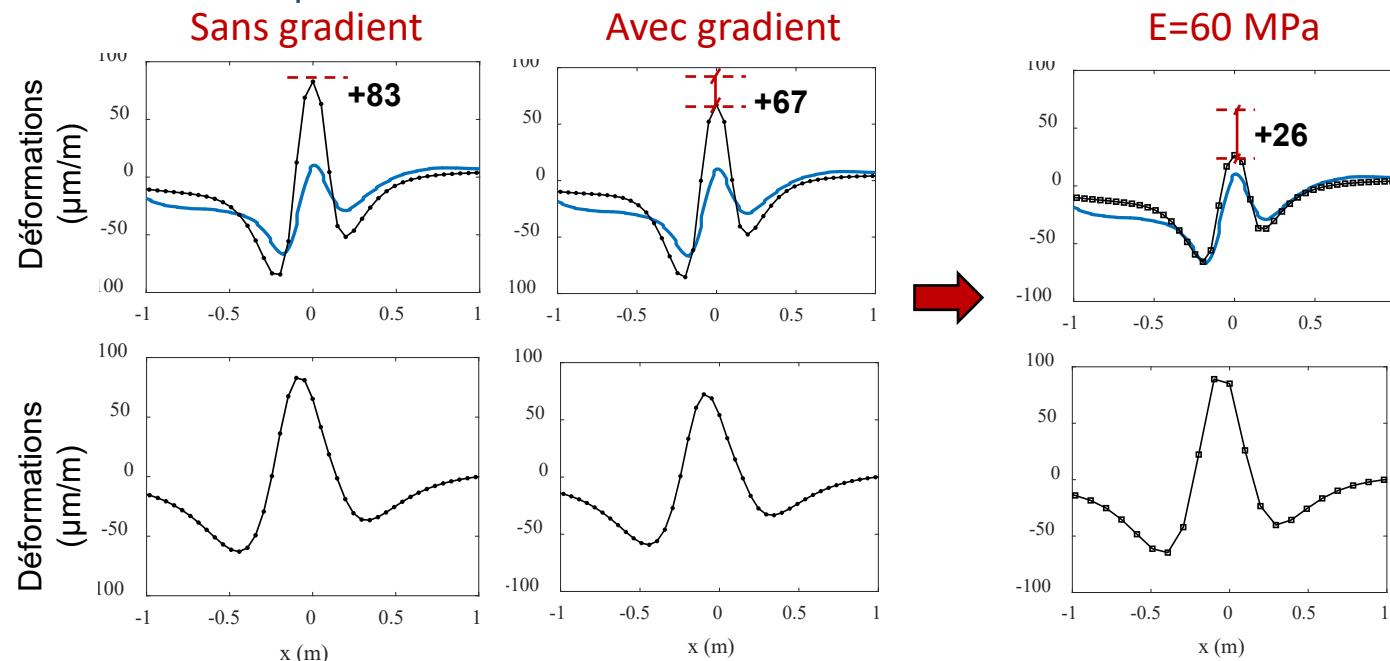
En bas de la couche de roulement



# Modélisation avec Viscoroute©2.0

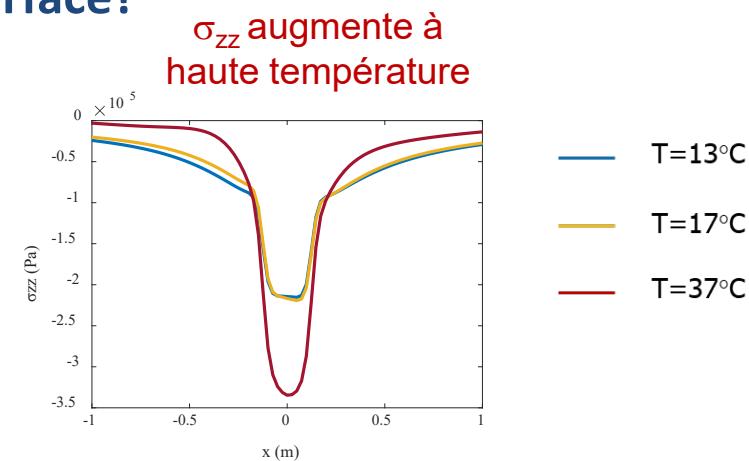
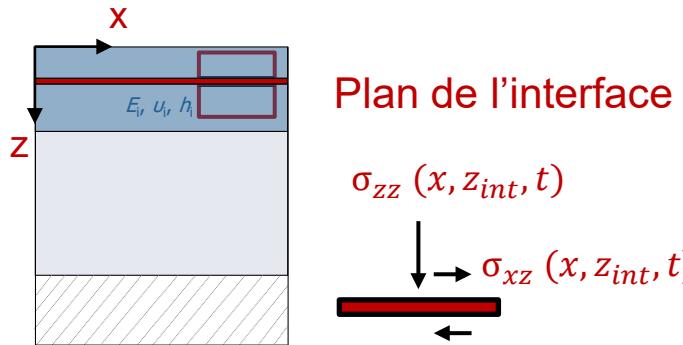
- **Ajout dans le modèle d'un gradient thermique:**
  - Modèle avec interface mince ( $e=1\text{mm}$  (Grellet et al., 2018),  $E=20 \text{ MPa}$ ) avec **gradient thermique** de  $1^\circ\text{C}/\text{cm}$  (d'après les thermocouples)
  - Le gradient de température permet de réduire les déformations calculées mais pas suffisamment pour retrouver les déformations mesurées
  - Une manière de retrouver les mesures: **augmenter le module** de l'interface → incompatible avec un comportement viscoélastique de l'interface

**En bas de la couche de roulement**



# Autre approche de modélisation de l'interface: comportement frottant

- Effet de la contrainte normale sur l'interface?



- Loi de frottement de Coulomb appliquée à l'interface:  $-\sigma_{zz} \operatorname{tg} \varphi \leq \sigma_{xz} \leq \sigma_{zz} \operatorname{tg} \varphi$

avec  $\sigma_{xz}$  = contrainte de cisaillement,  $\sigma_{zz}$  = contrainte normale et  $\varphi$  = angle de frottement

- Si  $\sigma_{xz} (x, z_{int}, t) \geq 0$ :

- $[\dot{u}] \geq 0$
- $\sigma_{xz} \leq (\sigma_{zz}) \operatorname{tg} \varphi$
- $[\dot{u}] (\sigma_{xz} + \sigma_{zz} \operatorname{tg} \varphi) = 0$

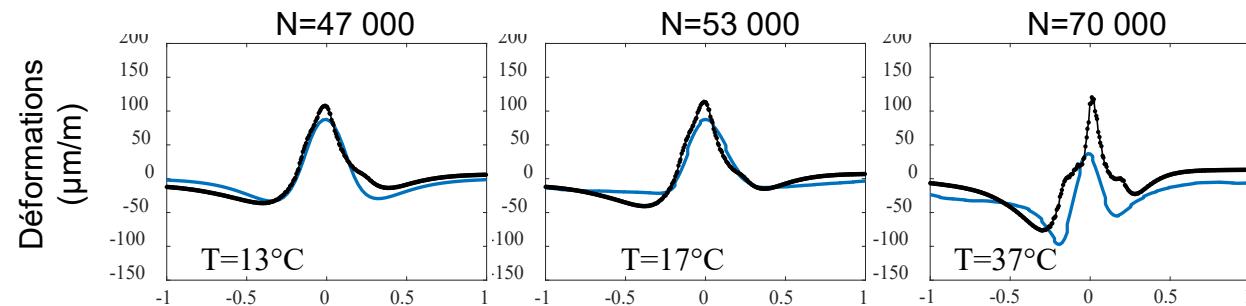
- Si  $\sigma_{xz} (x, z_{int}, t) < 0$ :

- $[\dot{u}] \leq 0$
- $\sigma_{xz} \geq \sigma_{zz} \operatorname{tg} \varphi$
- $[\dot{u}] (\sigma_{xz} - \sigma_{zz} \operatorname{tg} \varphi) = 0$

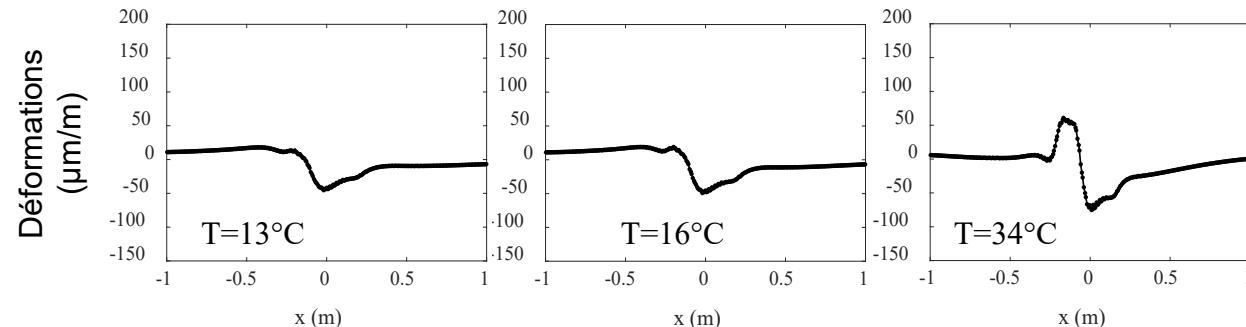
# Comportement frottant: calcul des déformations par EF

- **Comparaison du modèle avec les mesures pour la chaussée réhabilitée:**
  - Bonne prédiction des déformations pour toutes les températures
  - Modèle d'interface lui-même indépendant de la température (angle de frottement constant)
  - Effet de température via la viscoélasticité des couches et l'impact sur la contrainte normale appliquée à l'interface

**En bas de la couche de roulement**

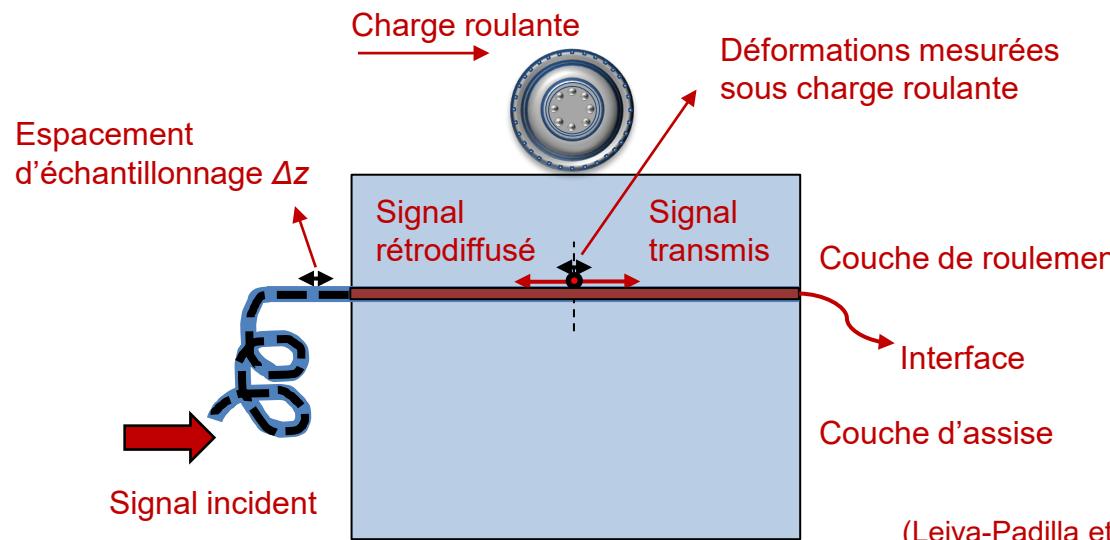


**En haut de la couche d'assise**



# Apport des fibres optiques au suivi du comportement des couches de chaussée

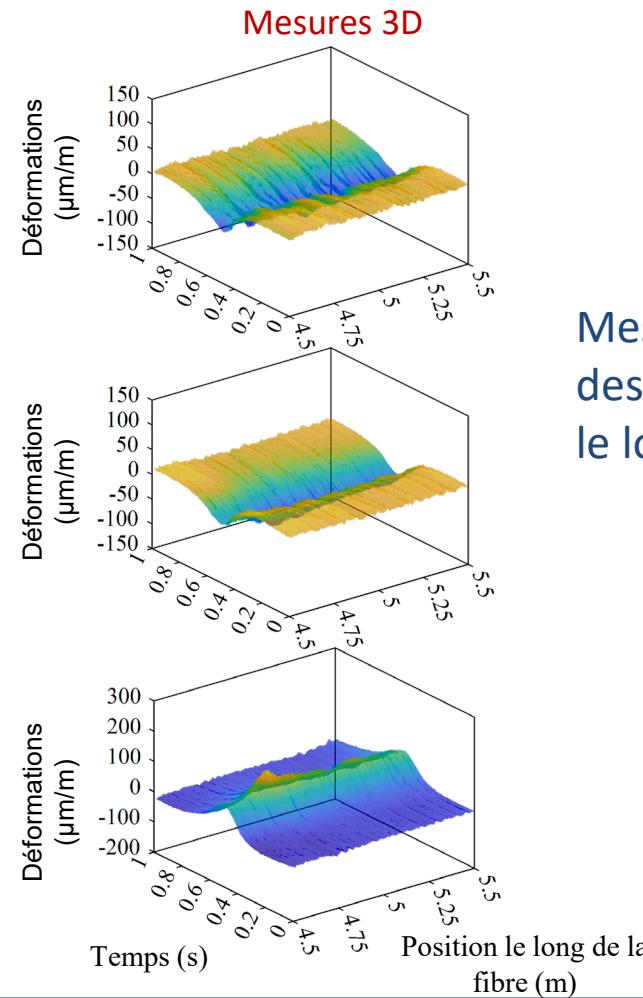
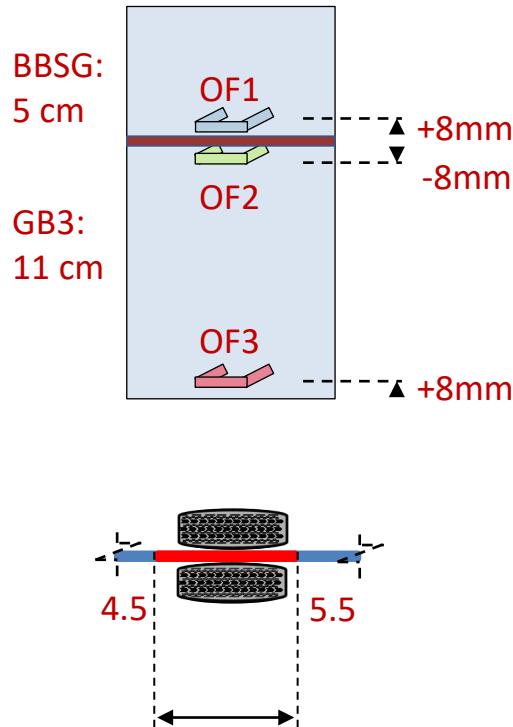
- Nouvelle technique d'instrumentation pour mesurer en continu les déformations sous charge roulante: méthode de Rayleigh
  - Densité de mesure importante (tous les 2,6 mm le long de la fibre)
  - Fibre de faible diamètre et moins intrusive que les jauge
  - Instrumentation en direction longitudinale et en transversale
  - Fréquence d'échantillonnage adaptable aux conditions de mesure



(Leiva-Padilla et al., 2024)

# Apport des fibres optiques au suivi du comportement des couches de chaussée

- Exemple de mesures des déformations longitudinales pour la chaussée neuve

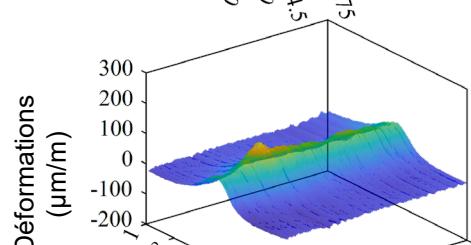
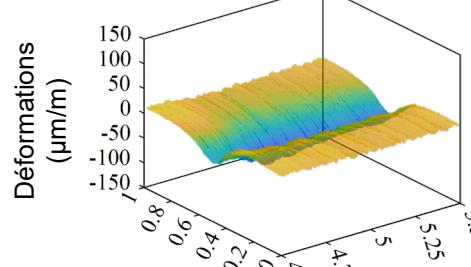
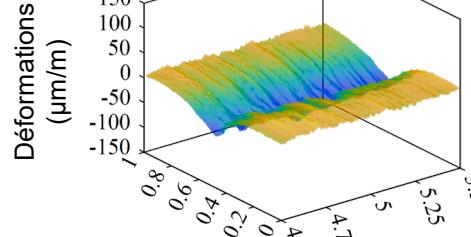


Mesure continue  
des déformations  
le long de la fibre

# Apport des fibres optiques au suivi du comportement des couches de chaussée

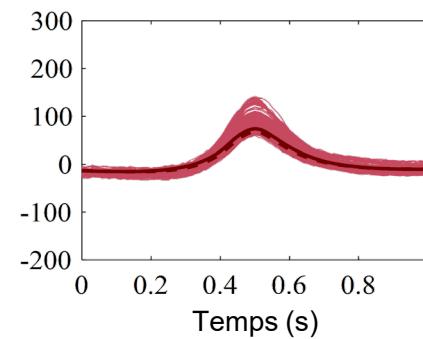
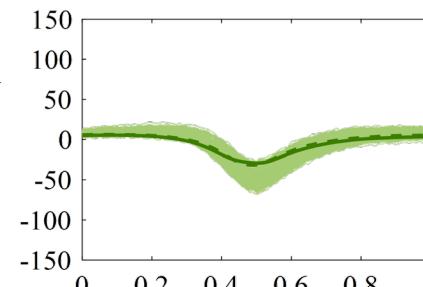
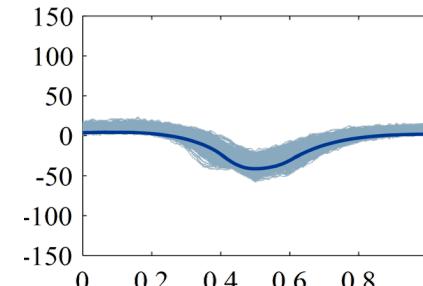
- Comparaison avec les mesures des jauge

Mesures 3D



Projection

Jauge



- Valeurs de déformations similaires avec les fibres et les jauge dans toutes les couches

- Mise en évidence de la variabilité des déformations avec les fibres optiques

# Conclusions

- **Etude expérimentale sur le manège:**
  - Le comportement de couche de roulement dépend fortement des conditions d'interface
  - Pour la chaussée réhabilitée: l'interface n'est pas parfaitement collée dès la construction
  - Pour la chaussée neuve: bon collage entre les couches bitumineuses en début d'essai, décollement de l'interface après une période de hautes températures
- **Nouvelle approche de modélisation des interfaces :** Comportement frottant → bonne évaluation des déformations dans la structure pour l'ensemble des cas étudiés ici
- **Apport des capteurs en fibre optique:** Densité de mesures plus importante, permettant de caractériser la variabilité des déformations dans les couches

# Merci de votre attention

[marina.al-bacha@univ-eiffel.fr](mailto:marina.al-bacha@univ-eiffel.fr)

**Université Gustave Eiffel, Campus de Nantes**  
**Allée des ponts et chaussées, 44344 Bouguenais**