

# Modélisation multi-échelle de l'agressivité des pneumatiques sur les couches de roulement

Juan Carlos QUEZADA\*, Oussama HAMMOUD, Dexin  
LIU, Ferhat HAMMOUM et Cyrille CHAZALLON  
\*MCF-HDR, INSA Strasbourg / Icube GC-E

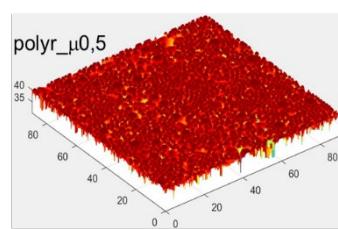
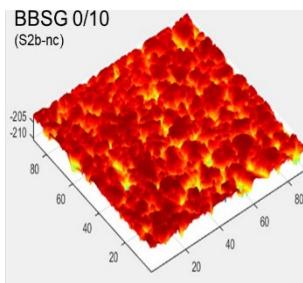
# Contexte applicatif et scientifique

## ANR BINARY : Work Package 5 (INSA Strasbourg)

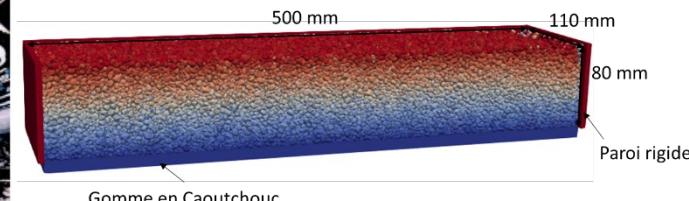
Modélisation numérique des essais laboratoire et à échelle réelle :

- Approche éléments discrets (DEM) : code LMGC90 + modèle VENoL

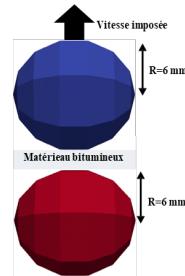
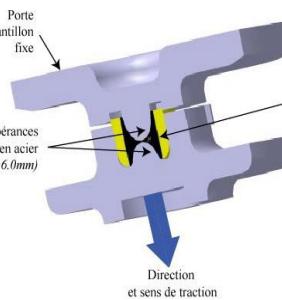
(extraits 90 mm x 90 mm)



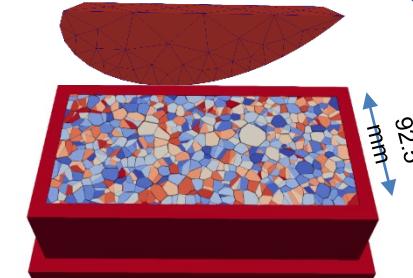
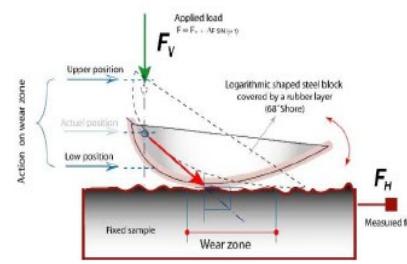
Texture



WTT (Wheel Tracking Test)

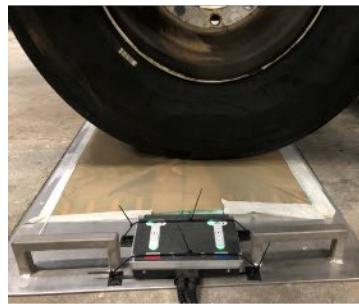


RULOB

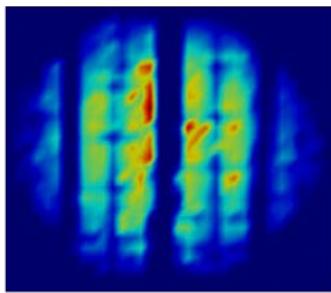


T2R (Tribomètre routier)

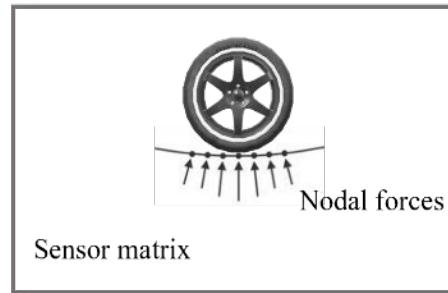
# Chaîne de couplage pneu-chaussée



Step 1



Step 2

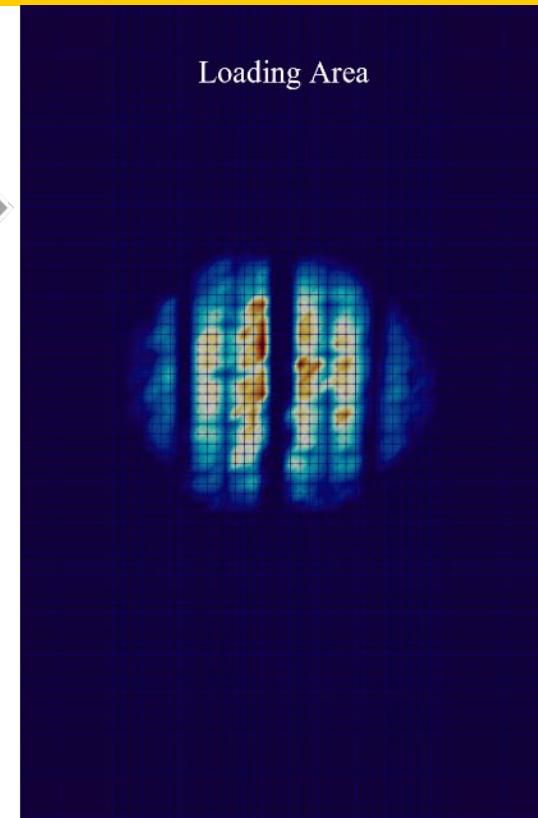


Asphalt layer

Nodal forces

Step 4

Loading Area



Ge, H., Quezada, J. C., Le Houerou, V., Chazallon, C., & Hornych, P. (2023). A new tire-sensor-pavement coupling chain for investigating asphalt mixture responses under rolling tire loads. *Road Materials and Pavement Design*, 24(sup1), 245-262.

## Avantages :

- Sans modélisation complexe du modèle numérique du pneumatique
- Intégrer les charges réalistes des pneus dans la modélisation de la chaussée
- Simulation dynamique du roulement du pneu sur la surface de la chaussée lisse

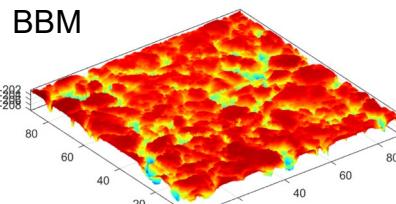
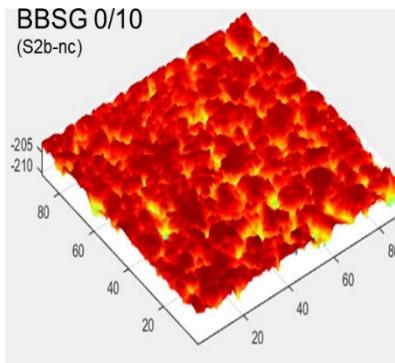
# Reproduction de surfaces texturées par approche discrète

Mise au point d'une méthode de fabrication d'échantillon numérique discret :

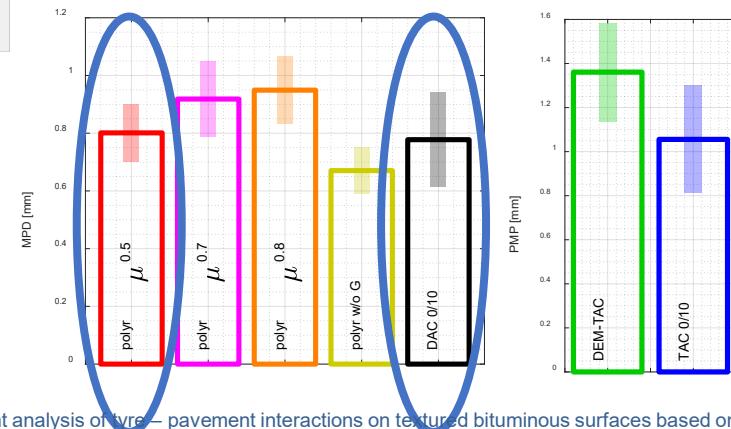
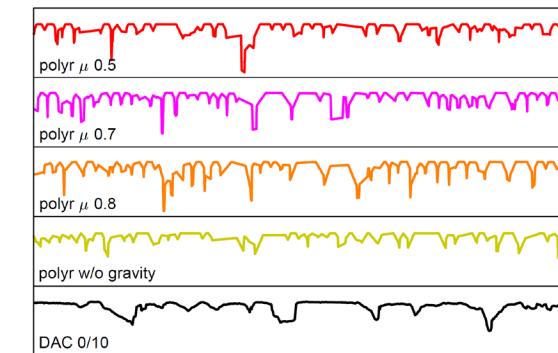
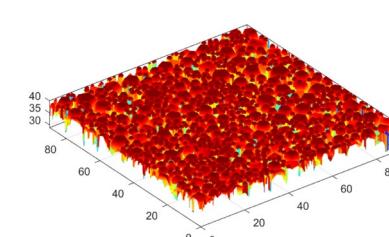
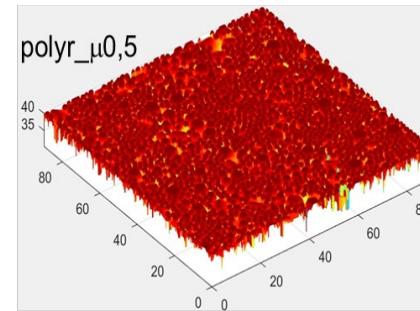
- Confection d'échantillons numériques de 90 mm × 90 mm avec les matériaux BBSG et BBM déposés par gravité
- Différentes textures de surface sont obtenues en faisant varier le coefficient de frottement  $\mu$

Texture expérimentale

(extraits 90 mm x 90 mm)



Texture numérique  
( $\mu=0.5$ )



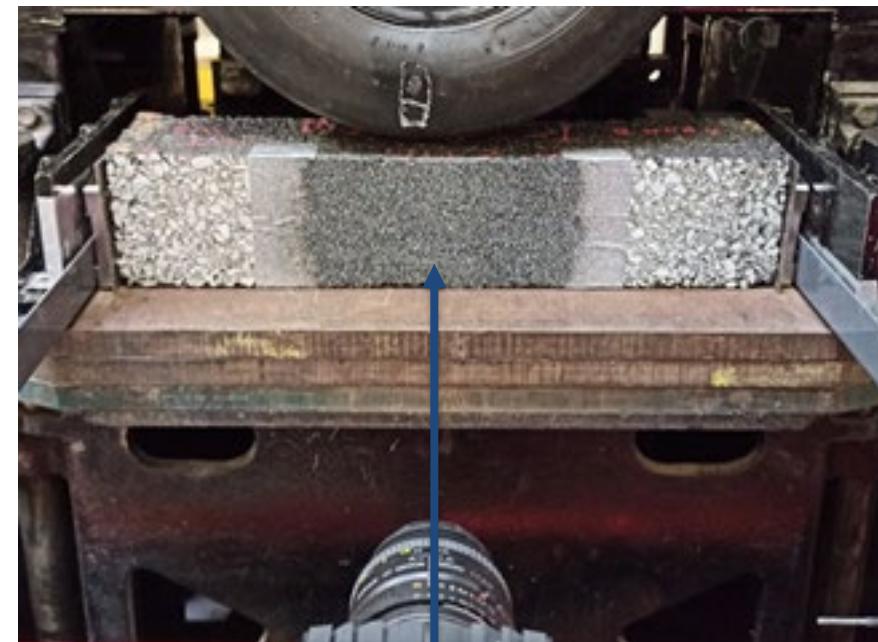
Quezada, J. C., Hammoud, O., Liu, D., Hammoum, F., Chazallon, C., Klein, P., & Cesbron, J. (2025). Advanced discrete element analysis of tyre – pavement interactions on textured bituminous surfaces based on the French wheel tracking test. *Road Materials and Pavement Design*, 26(sup1), 481–502. <https://doi.org/10.1080/14680629.2025.2482882>

# Modélisation de l'essai d'orniérage (WTT)

- **Essai de roulement libre**
  - WTT : Test de roulement libre en laboratoire
  - Reproduit conditions sur site à petite échelle.
  - Utilise corrélation d'images pour détecter déplacements et déformations.
  - Évalue orniérage des couches bitumineuses.
- **Condition de l'essai**
  - Test sur un pneu lisse.
  - Trois vitesses de roulement (0,7 ; 3,5 et 7 km/h).
  - Plusieurs températures testées (25 °C, 40 °C, 50 °C).
  - Implique une plaque d'enrobé confinée dans trois directions.
  - La plaque repose sur une gomme de caoutchouc.



*Système avec caméra embarquée*



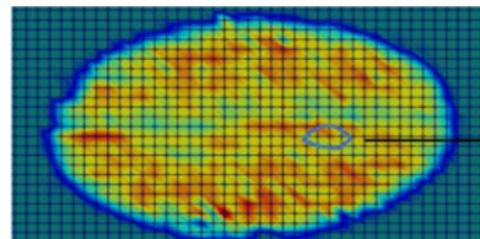
*Zone d'intérêt*

# Chaine de couplage sensor-DEM avec la texture

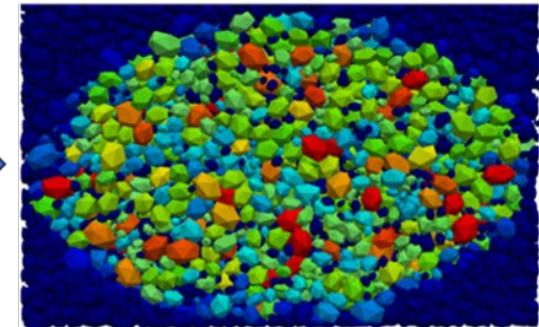
a) Tyre-sensor



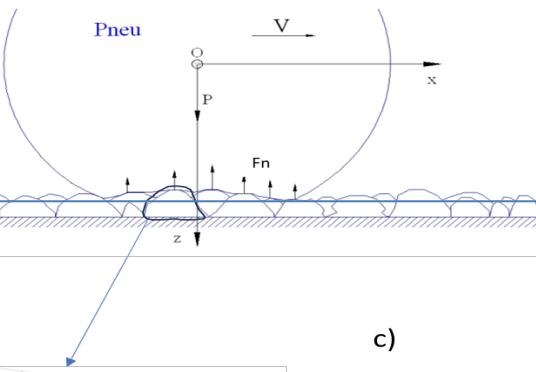
b) Pressure footprint



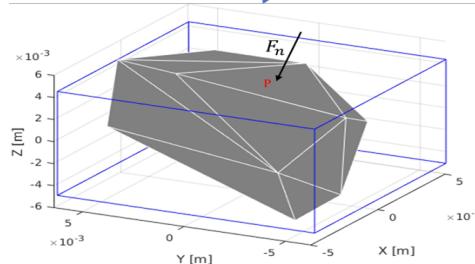
c) Applied forces on textured surface



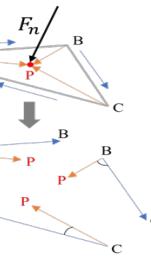
a)



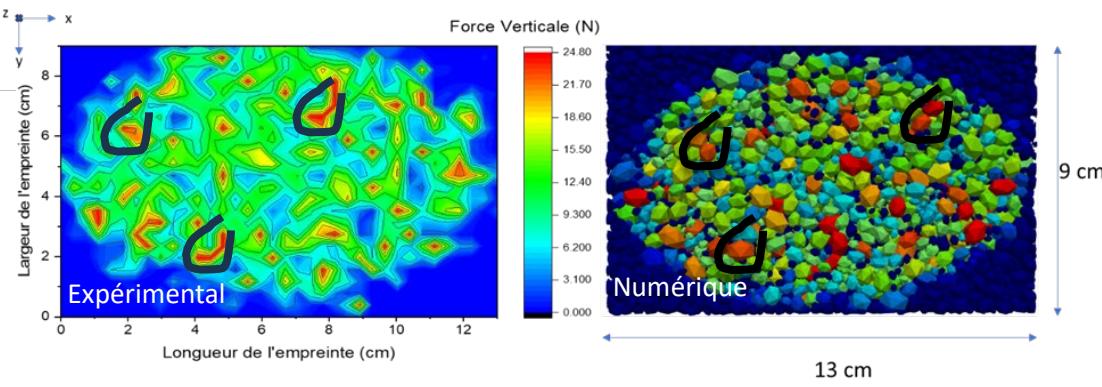
b)



c)

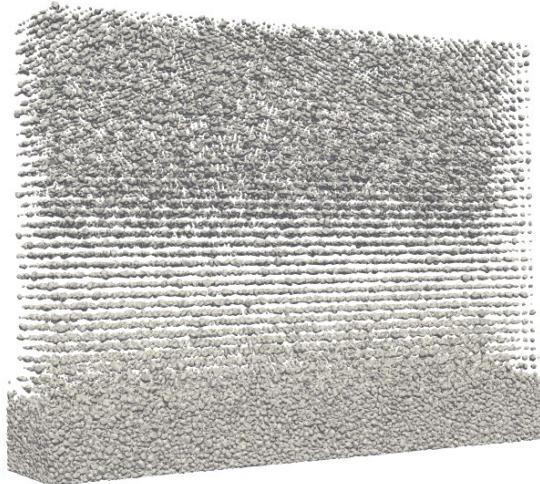


Distribution de charges sur la surface de l'échantillon

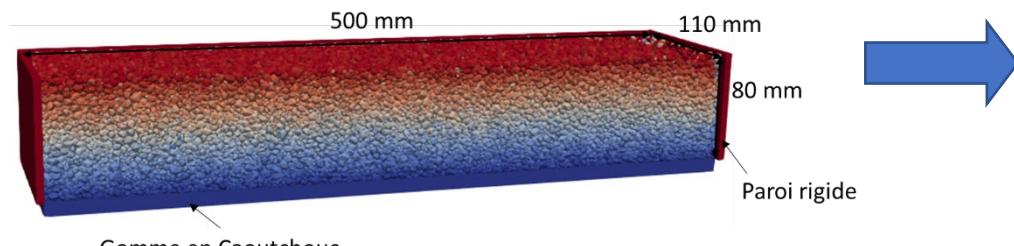


# Modèle numérique pour le WTT

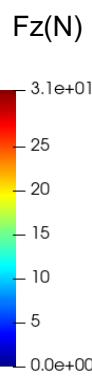
Génération des particules + dépôt sous gravité



Compactage + conditions limites

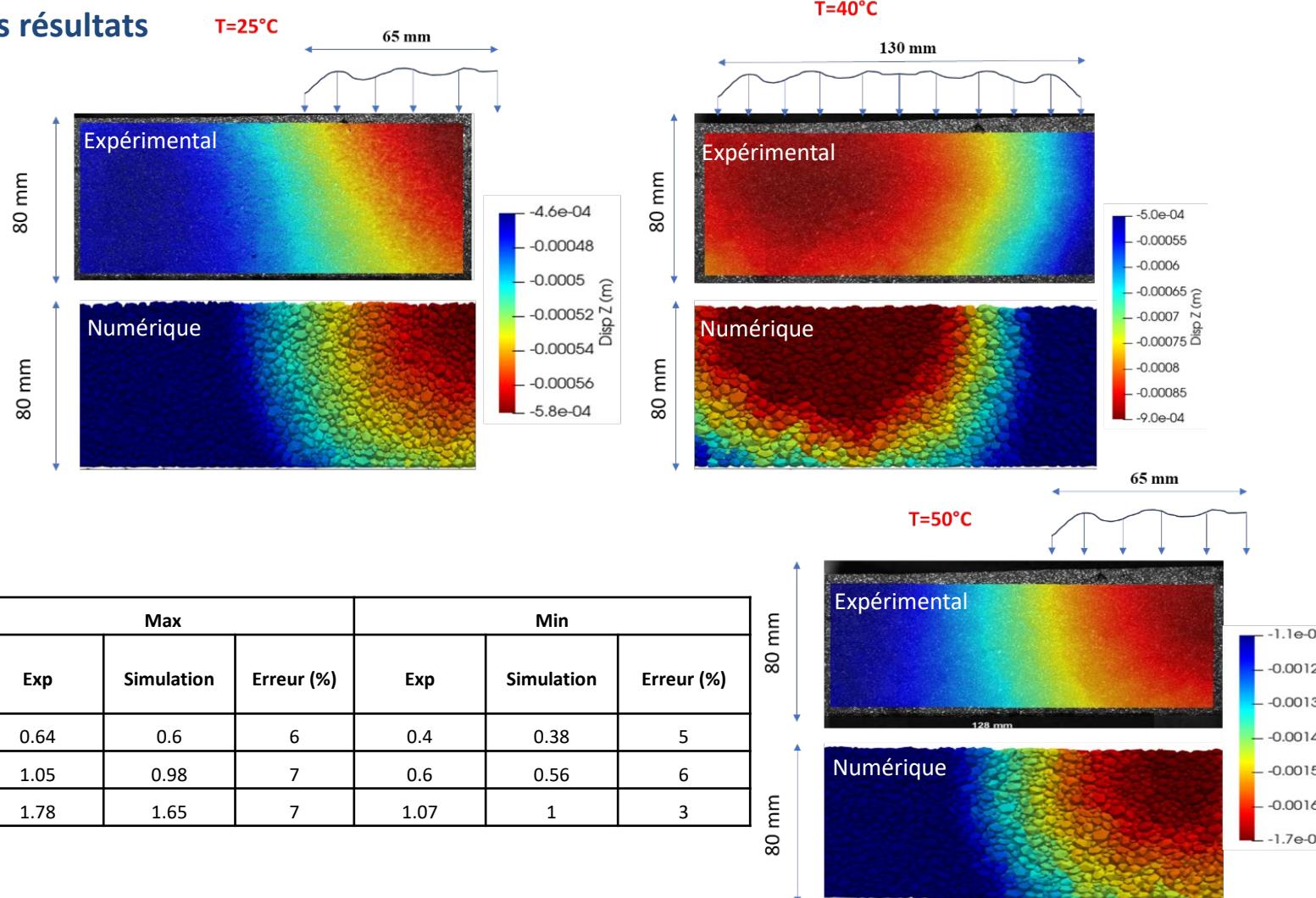


Application de la charge roulante



# Modèle numérique pour le WTT monocouche

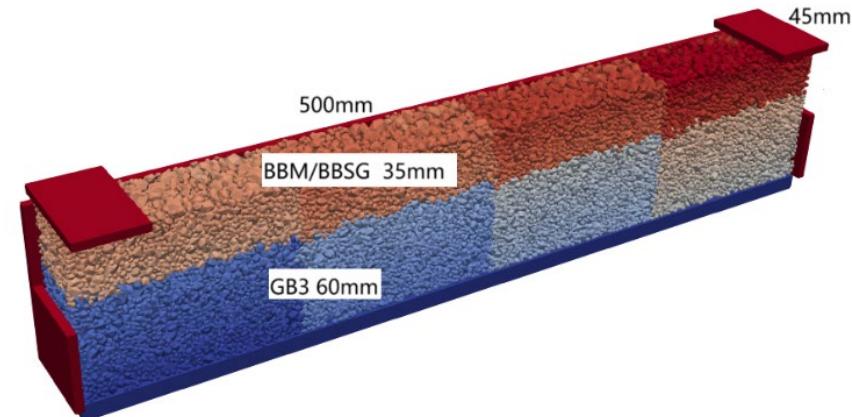
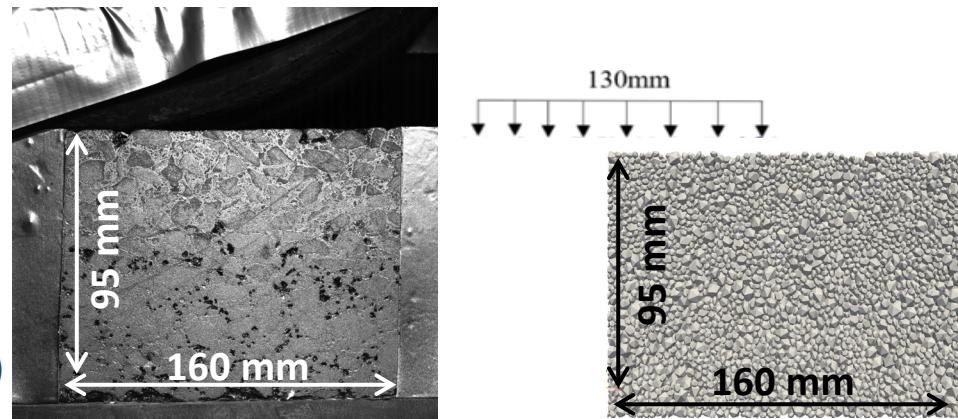
## Confrontation des résultats



# Modélisation numérique WTT bicouche

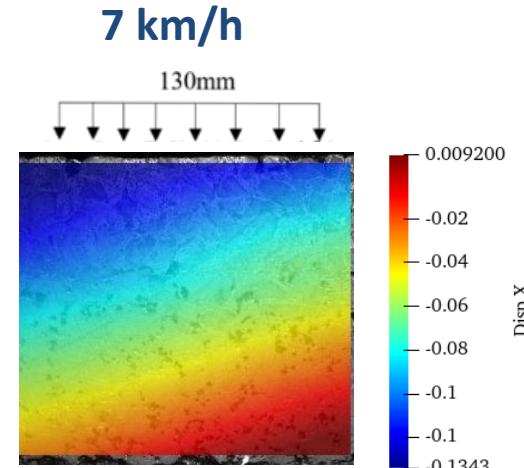
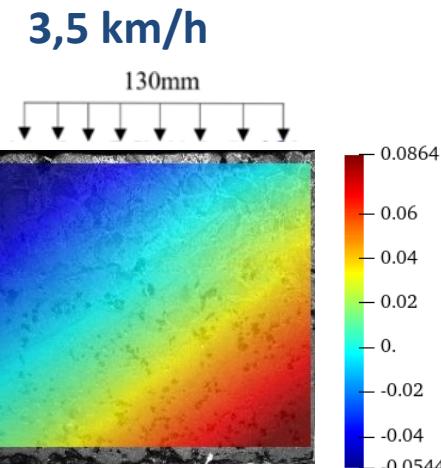
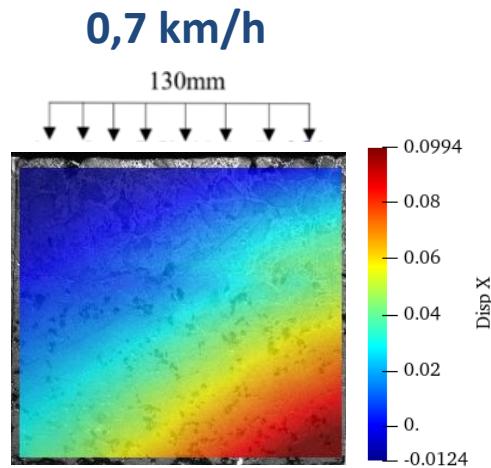
## Condition de l'essai

- Matériaux : BBM / BBSG sur GB3
- Trois vitesses de roulement : 0,7 ; 3,5 et 7 km/h
- Températures testées 20 et 50 °C
- 2 conditions d'interface :
  - WTC : avec couche d'accrochage (Tack coat)
  - WOTC : sans couche d'accrochage (Tack coat)

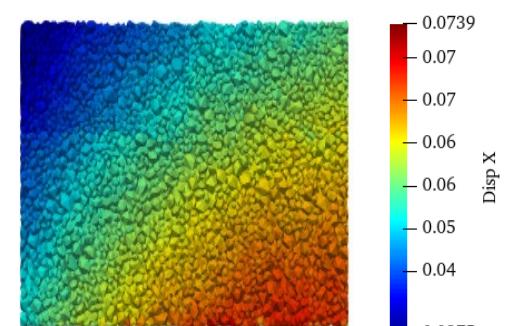
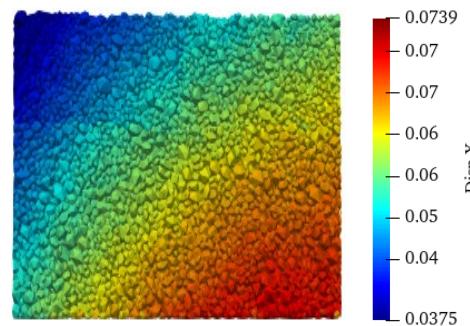
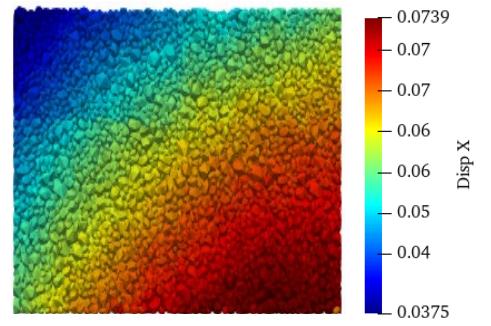


# Déplacements horizontaux Ux : WTC 20 °C

**Ux (mm)  
Expérimental**

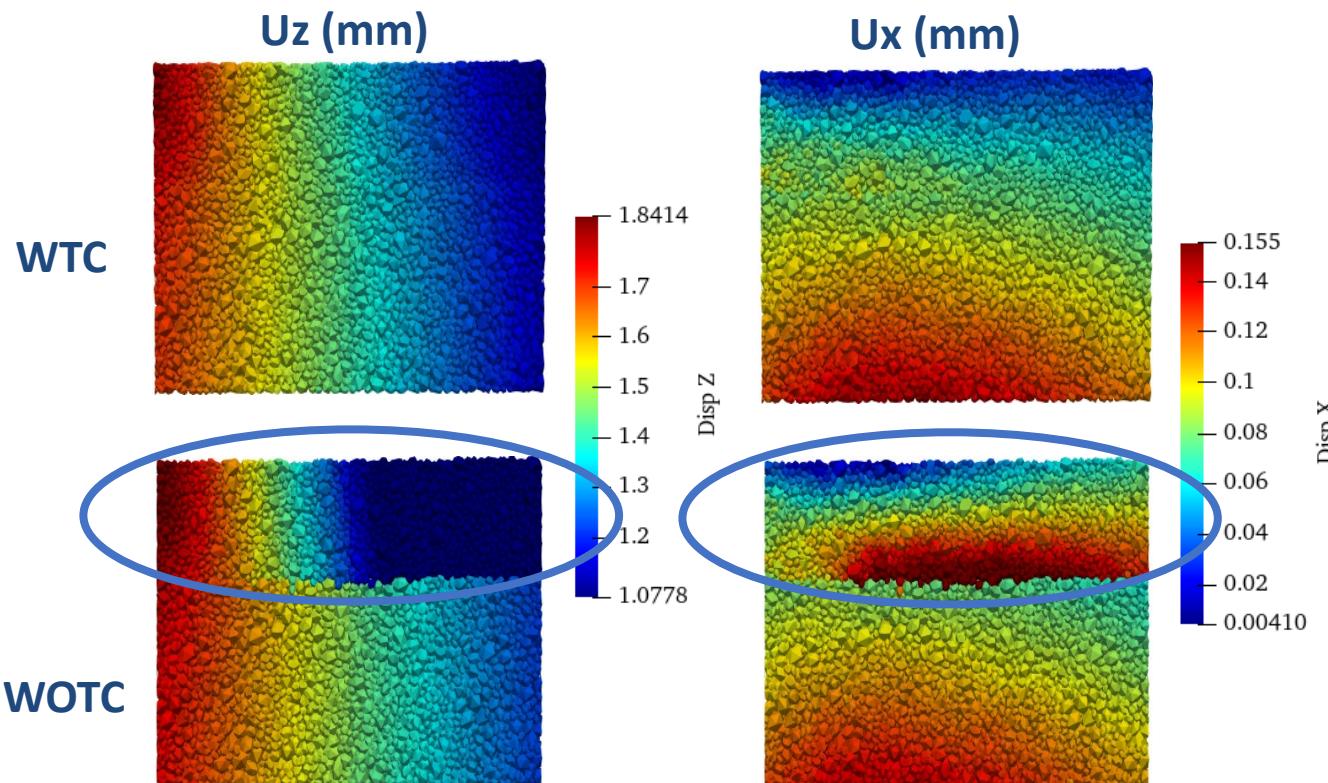


**Ux (mm)  
Numérique**



- Le déplacement horizontal diminue à mesure que la vitesse de chargement augmente.
- Numériquement, la région rouge devient plus restreinte lorsque la vitesse de chargement augmente.
- La composante de rigidité du modèle VENO-L augmente avec l'augmentation des vitesses de chargement.

# WTC et WOTC : $T = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ et $V = 3.5 \text{ km/h}$

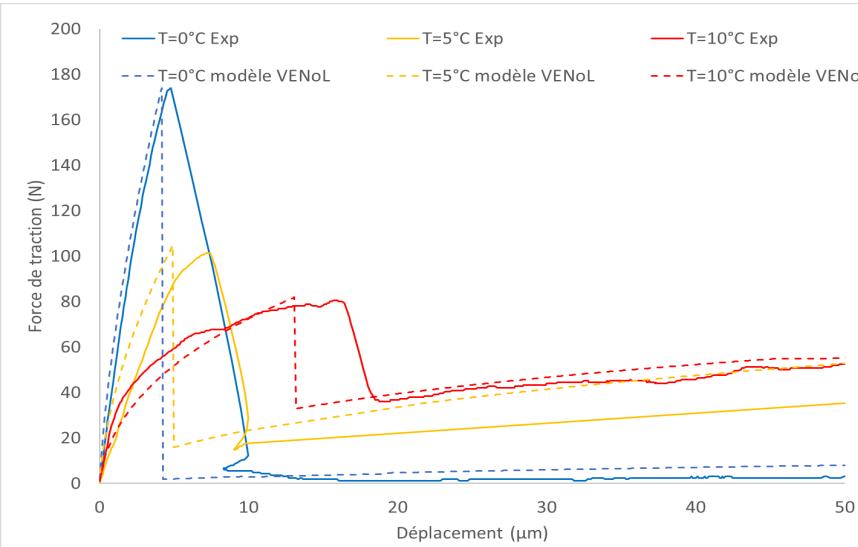
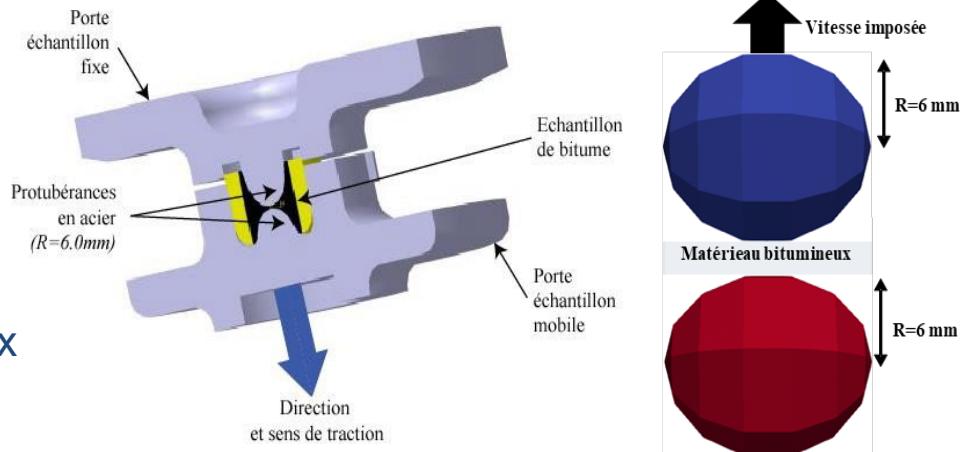


- Avec une couche d'accrochage  $\rightarrow$  déformation continue.
- Sans couche d'accrochage  $\rightarrow$  discontinuité d'interface.
- Des déplacements verticaux et horizontaux plus importantes apparaissent en l'absence de couche d'accrochage.
- La couche d'accrochage améliore l'adhérence entre les couches, optimise le transfert des contraintes et réduit le glissement d'interface

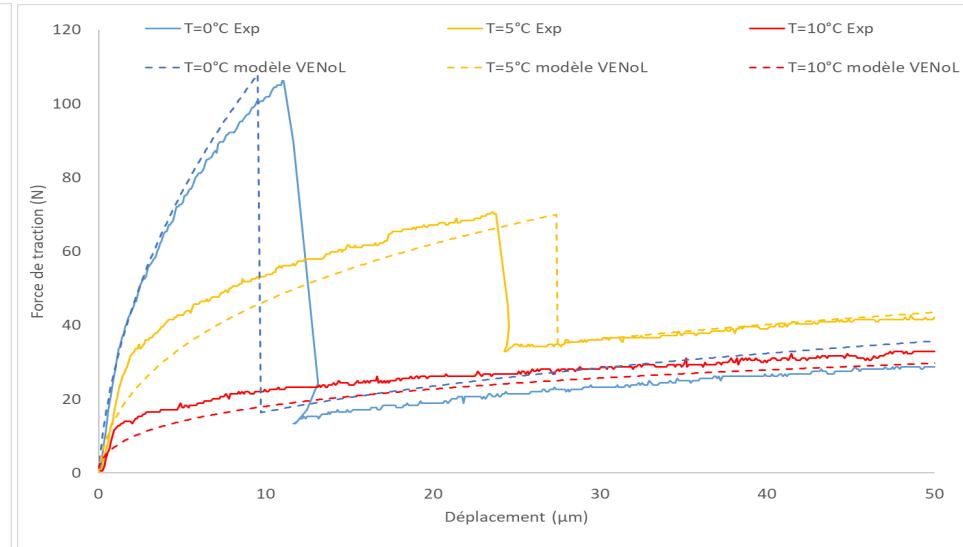
# Simulation DEM de l'essai RULOB (Rupture Locale du film de Bitume)

## Conditions de l'essai RULOB :

- Protubérances de 6 mm de rayon
- Film de bitume de 320 µm d'épaisseur
- Vitesses d'essai : 1,1 ; 11 et 110 µm/s
- Températures : -10, -5, 0 et 10 °C
- Matériaux : B35-50, RTFOT, PAV et Colflex



$V = 11 \mu\text{m/s}$



$V = 1.1 \mu\text{m/s}$

# Modélisation DEM de l'essai T2R (Travaux en cours)

Echantillon DEM :  $247 \times 92,5 \times 40$  mm

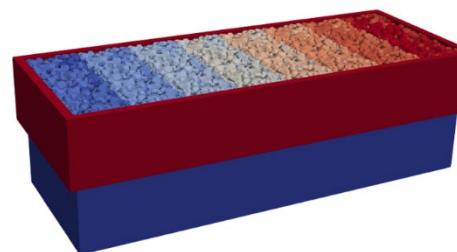
Couche supérieure : BBM/BBSG 4 cm

Couche inférieure : Caoutchouc 4 cm

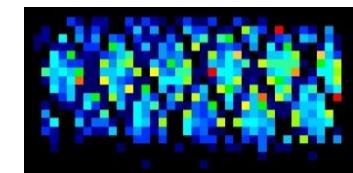
BBM : 43 776 particules, temps total 96 h

BBSG : 103 680 particules, temps total 245,5 h

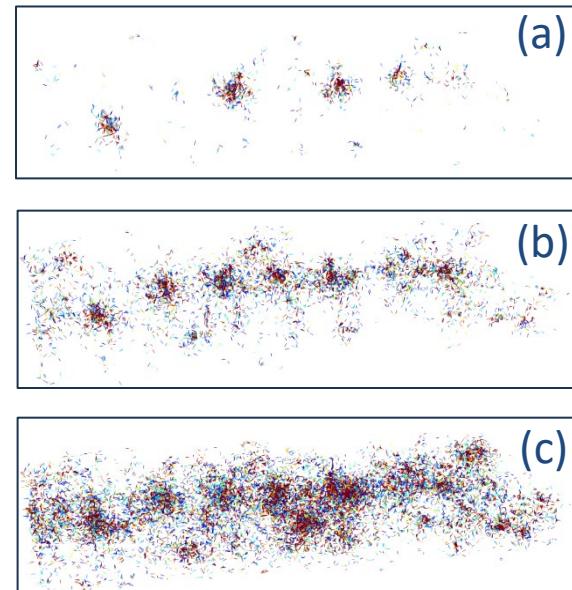
Echantillon numérique T2R



Empreinte patin



Simulation numérique T2R

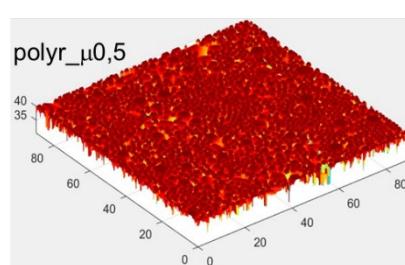
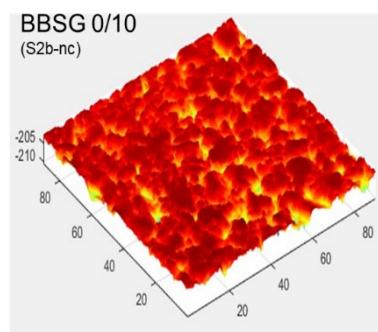


Localisation des forces tangentielles :  
(a) début, (b) milieu, (c) fin de l'essai

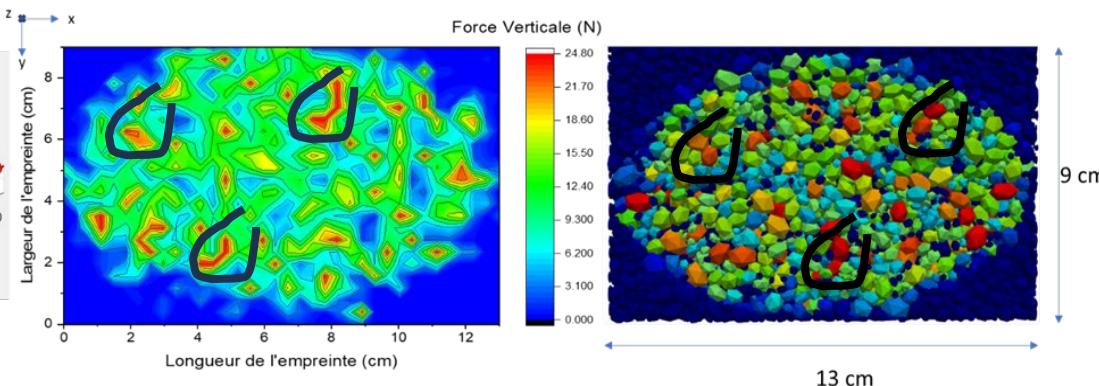
# Conclusions

- L'approche discrète permet de reproduire numériquement la texture et la concentration des chargements sur couche de roulement

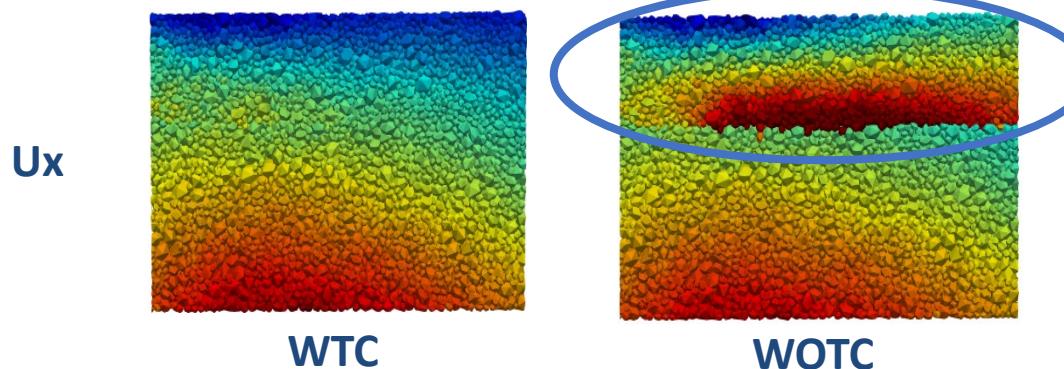
(extraits 90 mm x 90 mm)



$$\mu = 0.5$$

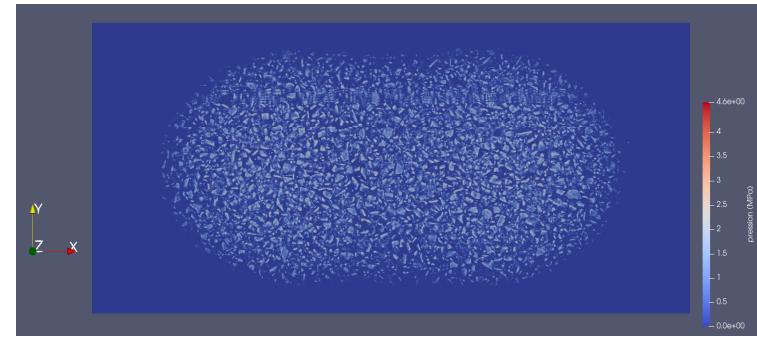
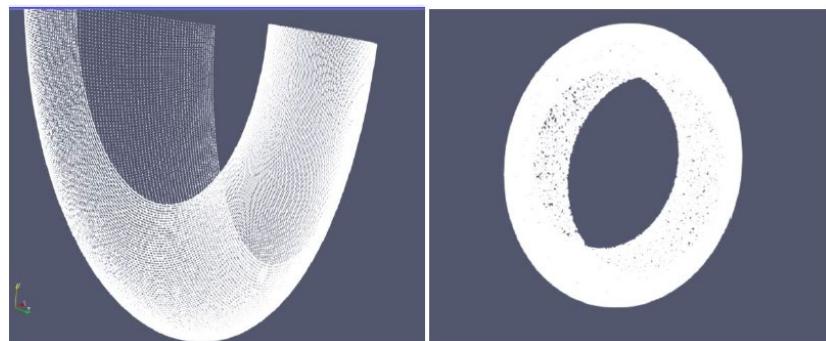


- Cette approche permet de mettre en évidence l'effet de la couche d'accrochage sur l'interface (déplacements horizontaux Ux et verticaux Uz)



# Perspectives

- Amélioration de la modélisation du contact pneu-chaussée : couplage SAM – DEM



- Etude de la résistance au roulement à l'échelle du contact pneu-particules :
  - Analyse de la corrélation entre la texture de la surface et le coefficient de frottement, glissement, etc.
- Développement des modèles prédictifs de la durabilité à long terme (orniérage, arrachements) des couches de roulement

# Merci de votre attention

**Juan Carlos QUEZADA**  
**INSA Strasbourg / ICube GC-E**  
**24 boulevard de la Victoire, 67000 Strasbourg**  
**[juan-carlos.quezada@insa-strasbourg.fr](mailto:juan-carlos.quezada@insa-strasbourg.fr)**