L'exploitation
et la maintenance
des infrastructures

PN - ANR MOVE
DVDC
DURÉE DE VIE DES CHAUSSÉES

IREX
Institut pour la recherche appliquée
et l'expérimentation en génie civil

APPROCHE TRIBOLOGIQUE DU COMPORTEMENT EN SURFACE DE CHAUSSEE

Philippe REYNAUD[1], Daniel NELIAS[2], Benoit PICOUX[1]
Christophe PETIT[1],

[1] GC2D, Egletons, Université de Limoges, France
[2] LaMCoS, INSA Lyon, France

MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
Liberté
Égalité
Fraternité

Restitution publique des résultats
7 novembre 2023, ENTPE, Vaulx-en-Velin

AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

POSITION DU PROBLÈME, APPORT DE LA TRIBOLOGIE

- problèmes de surface et de sub-surface (5 cm) : coût 15 milliards euros / an
- Répondre scientifiquement et concrètement aux pathologies de la surface (pas abordable avec les méthodes actuelles ou outils de calculs très lourds)

  Top Down Cracking TDC ; Orniérage ; polissage

- Réalisme du contact pneu-chaussée - meilleure qualité mécanique en conception et réparation

Multiplication des points singuliers ; Diminution de l'épaisseur des couches ; Matériaux (nouvelles formulations)

- Tribologie (science du contact, du frottement, de l'usure et de la lubrification …)

  Roulement tractif, freinage et virage ne sont pas pris en compte

  Calcul rapide accessible aux industriels

NOS OBJECTIFS

APPROCHER AU MIEUX LA REALITE DU CONTACT EN SURFACE

CALCULER LES CONTRAINTES ET DEFORMATIONS EN SURFACE DE CHAUSSEE EN PRENANT EN COMPTE LE FROTTEMENT

Calcul semi-analytique du contact depuis 1990

Similitude du problème de contact (seuls les matériaux et les dimensions changent)

Géométrie
Cinématique
Chargement
Matériaux
Frottement

Calcul des Contraintes et des déformations en tout point

NOTRE DEMARCHE : ADAPTER LE CODE DE CALCUL DES ROULEMENTS (SAM) AU CONTACT PNEU-CHAUSSEE

PARAMETRES DE L ETUDE

Freinage
accélération

roulement

virage

PNEU
(Géométrie, gonflage, matériau, chargement)

Code de calcul SAM
Développé par le LaMCos, + rapide que les EF

► CHAUSSEE
► (Paramètres mécaniques, viscosité, plasticité, géométrie, thermique)

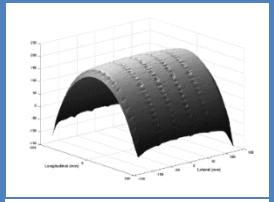
Etat des contraintes et déformations dans la chaussée

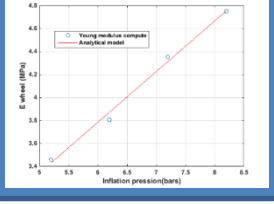
Fissuration, orniérage, Délamination

Conception, maintenance

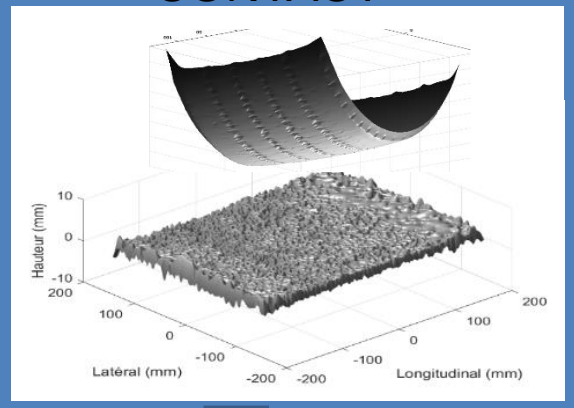
FONCTIONNEMENT DE SAM

PNEU

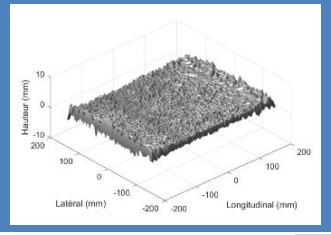




CONTACT

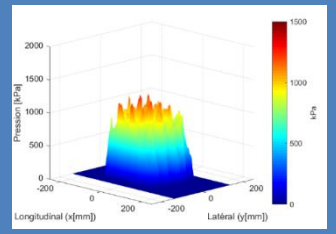


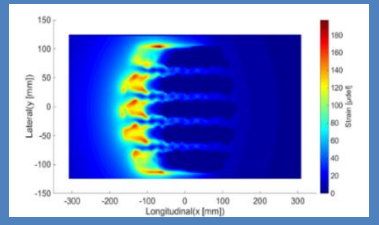
CHAUSSEE

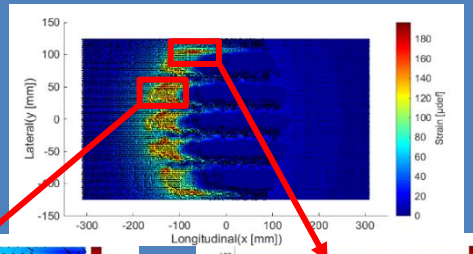


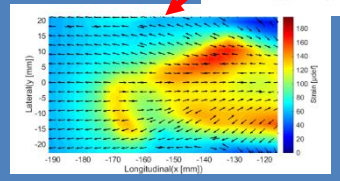
Effort normal W	32 kN
Effort tangentiel longitudinal F_x	[-10, 10] kN
Effort tangentiel latéral F_y	10 kN
Module d'Young du pneu E_w	2,92 MPa
Coefficient de Poisson du pneu ν	820
Pression de gonflage du pneu	820 kPa
Module d'Young du BBSG (15 °C, 10 Hz) E_c	5 400 MPa
Coefficient de Poisson du BBSG ν	0,35
Coefficient de frottement μ	0,7

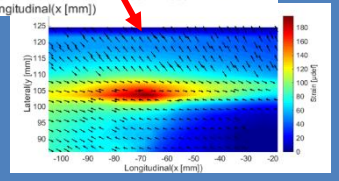
RESULTATS



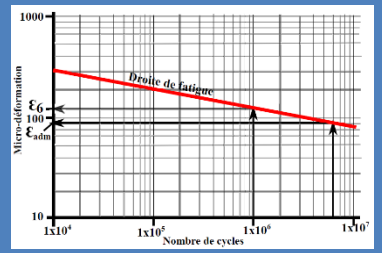








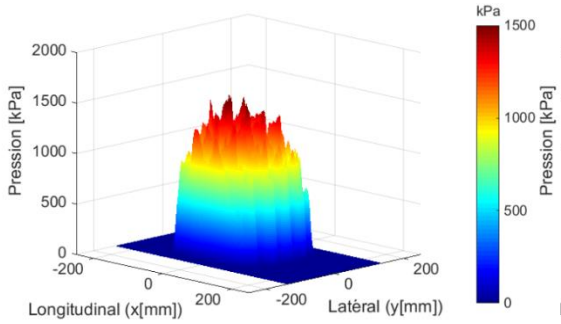
CRITERE



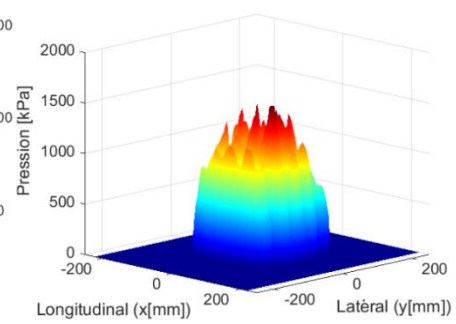
NECCESSITE DE RESULTATS DE FATIGUE SUR COUCHES DE SURFACE CONCEPTION

CALCULS AVEC LE CODE SAM EN STATIQUE (DVDC TRANCHE 1)

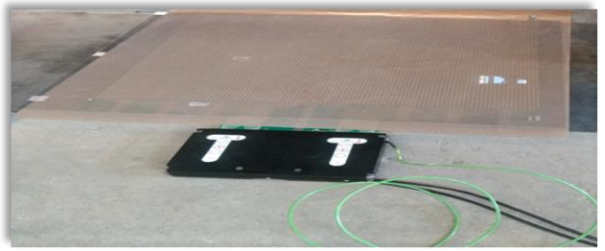
CHARGE SUR LE PNEU
W= 32,5 kN



Champ de pression calculé par SAM

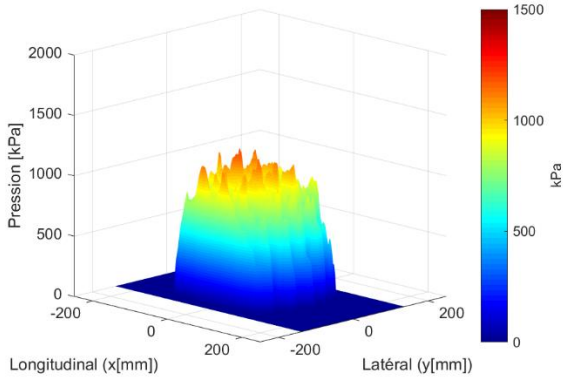


Champ de pression mesuré par Tekscan
Pression maxi 1,5 MPa

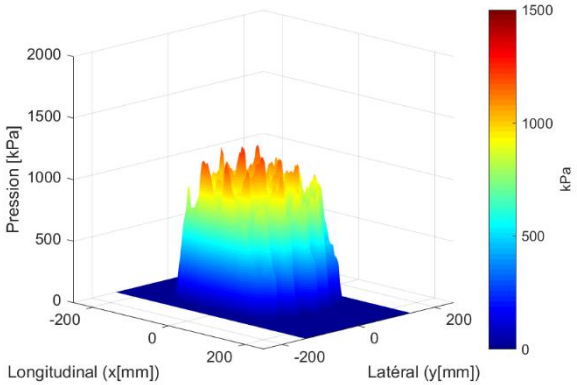


Validations par une mesure avec un capteur de pression résistif Tekscan

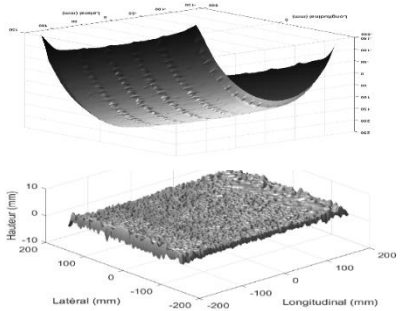
Bon accord entre SAM et les mesures TekScan



Champ de pression calculé par SAM
Sur chaussée lisse Pmax = 1,5 Mpa



Champ de pression calculé par SAM
Sur chaussée réelle numérisée Pmax = 1,5 Mpa

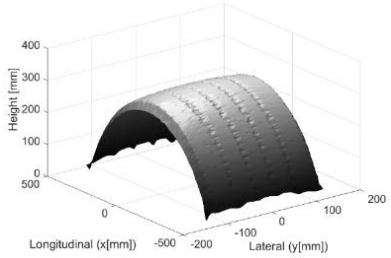


Taille de maille : 3x3x3 mm

Temps CPU (Core i5 2×2.5 GHz – 8 Go RAM) : **7 s**

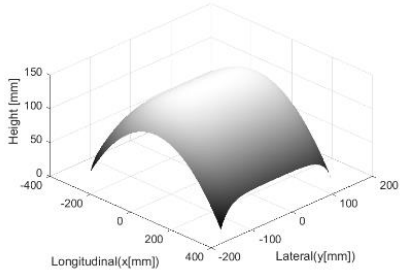
Influence négligeable de la prise en compte d'une surface de chaussée réelle sur la pression de contact
Le profil du pneu est prépondérant

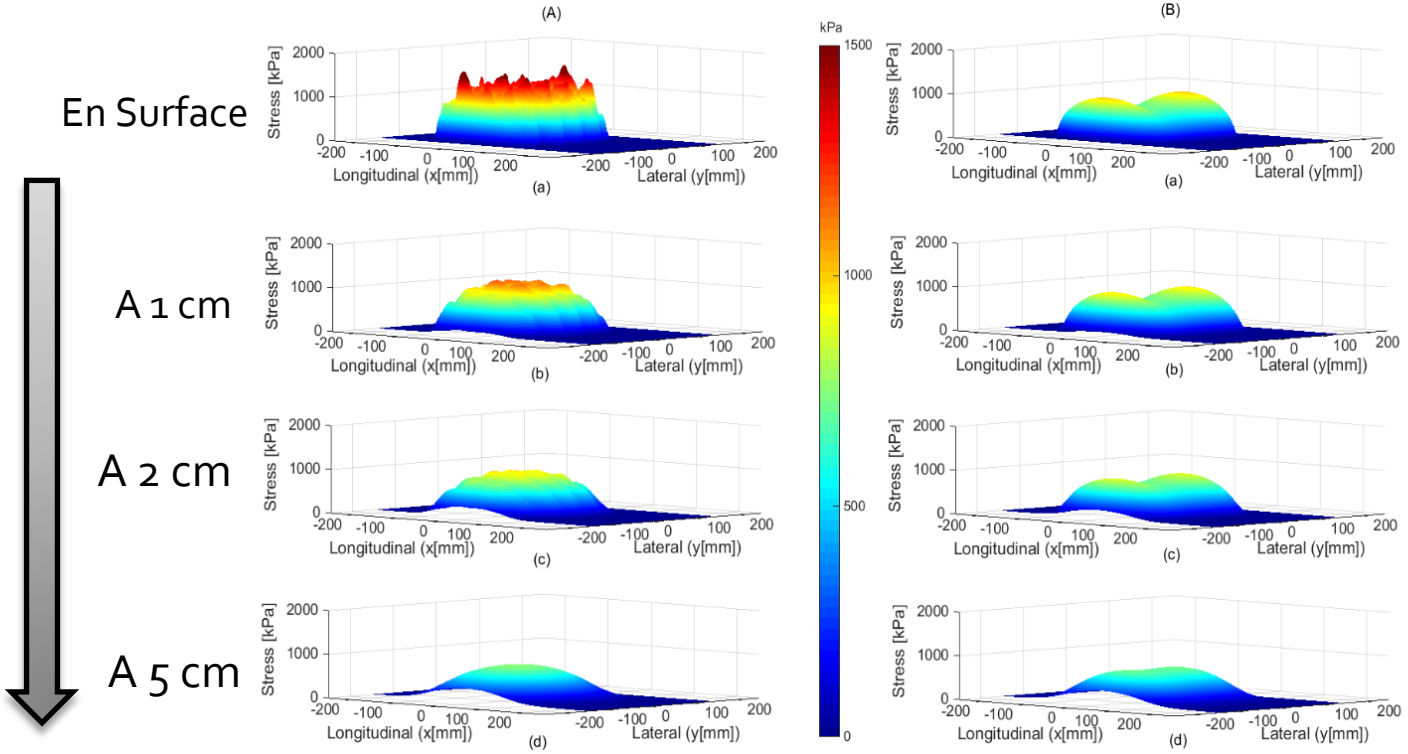
EVOLUTION DU CHAMP DE CONTRAINTES NORMALES EN PROFONDEUR



Profil avec pneu réel (pression de gonflage 8 bars, charge 35 kN)

Profil avec pneu lisse (pression de gonflage 8 bars, charge 35 kN)





En Surface

A 1 cm

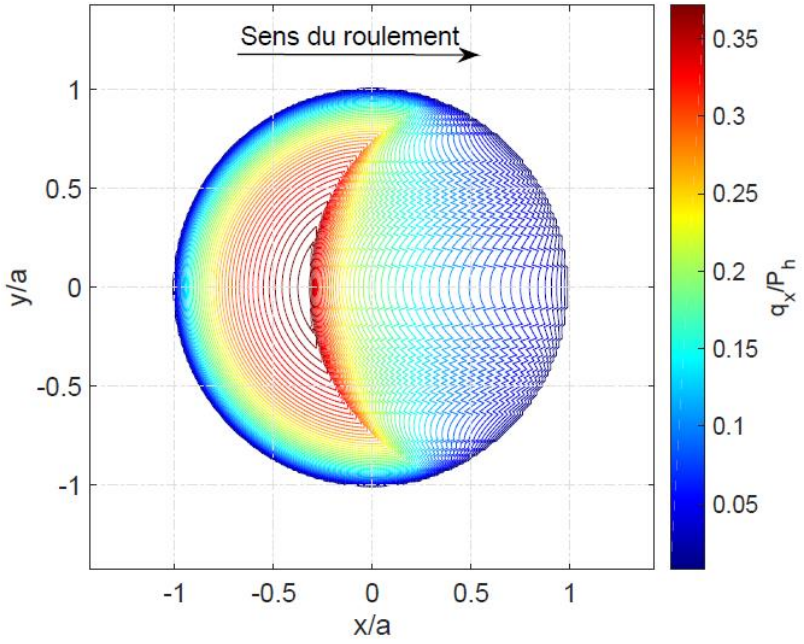
A 2 cm

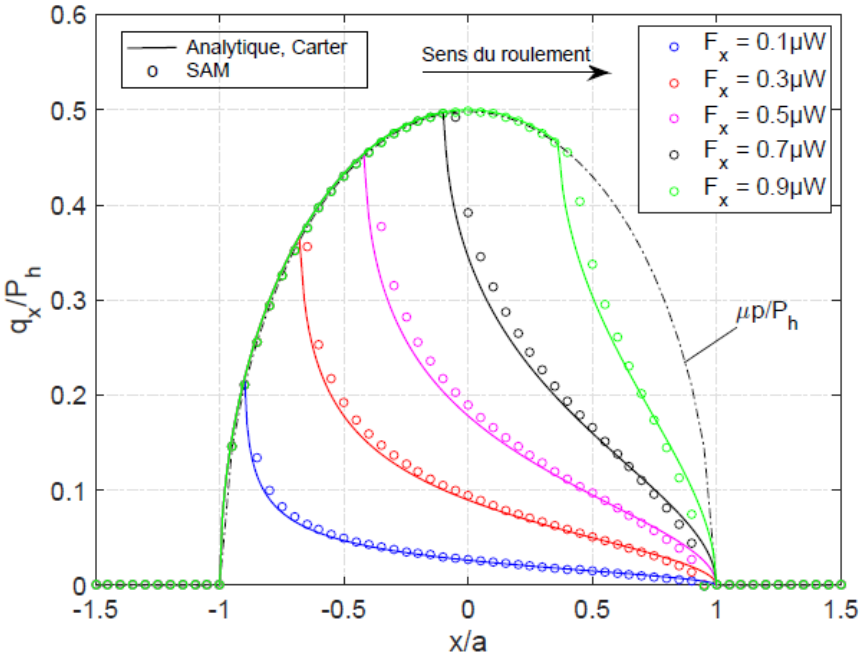
A 5 cm

En surface
Avec pneu reel Pmax =1,5 MPA
Avec pneu lisse Pmax =1,0 MPa

Pour une étude dans les premiers centimètres il est impératif de prendre en compte un pneu réel

PRISE EN COMPTE DE LA THEORIE DU CONTACT ET DU FROTTEMENT





Adhérence à l'avant du contact
Glissement à l'arrière du contact

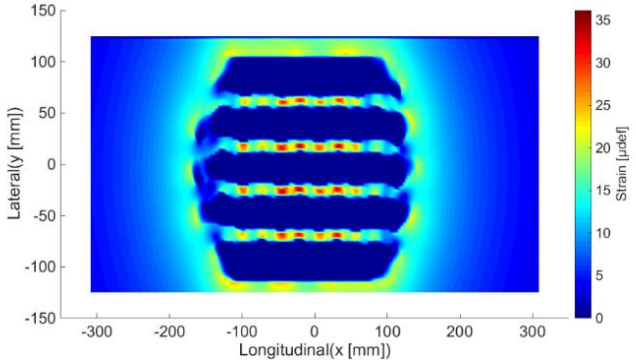
Le cisaillement en surface augmente avec le coefficient de frottement

CALCULS AVEC LE CODE SAM (DVDC TRANCHE 2)

En Roulement libre (ROUE DE REMORQUE)

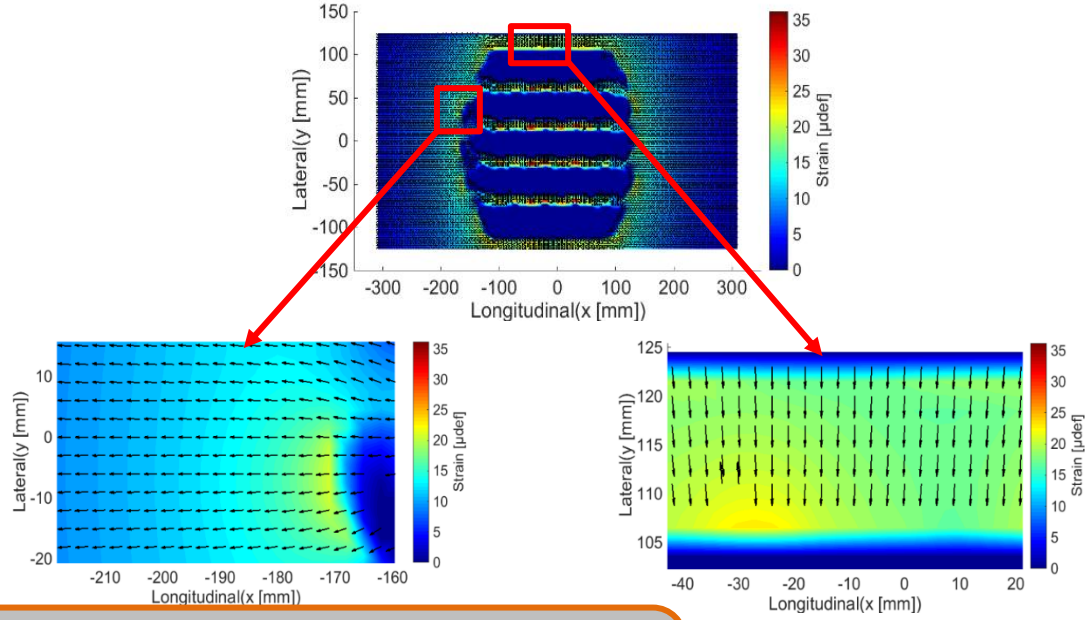
μ (*coef de frottement*) = **0**,7;
W(charge sur le pneu) = **32,5** kN;
F_x (*effort de traction*) = 0
Contact sur BBSG

Cisaillement surfacique



Déformations et directions principales

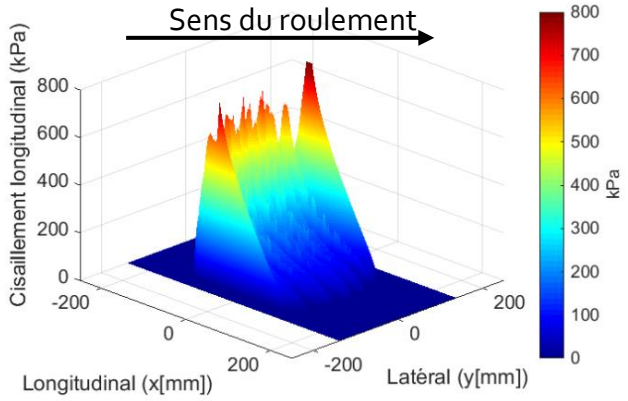
Champ de déformation principale maximale par extension en surface



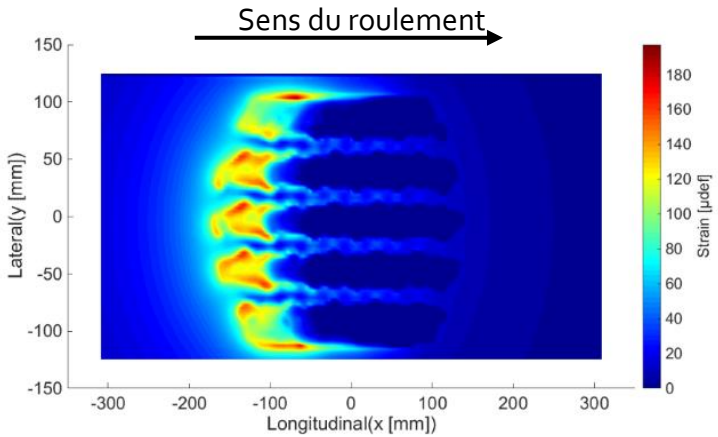
35 micro-def, valeur inférieure à ε 6
risque faible de fissuration initiée en surface

μ = **0**,7; W = **32,5** kN; F_x = 10 kN

Cisaillement surfacique



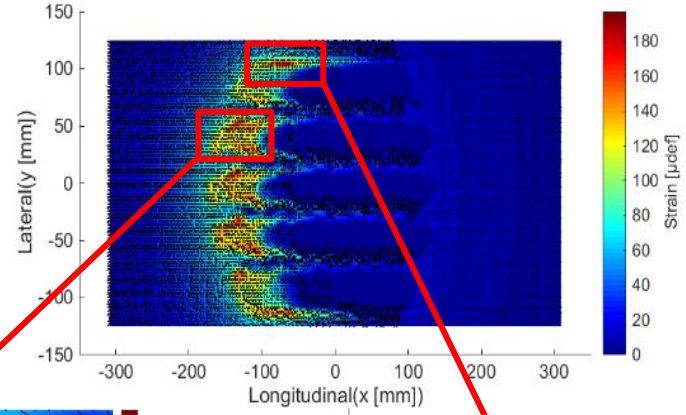
Profil **3D**

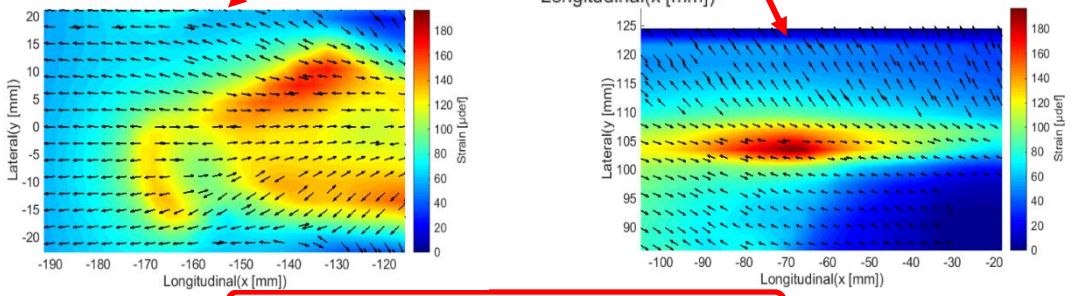


Vue projetée

Déformations et directions principales

Champ de déformation principale maximale par extension en surface





Directions principales d'extension

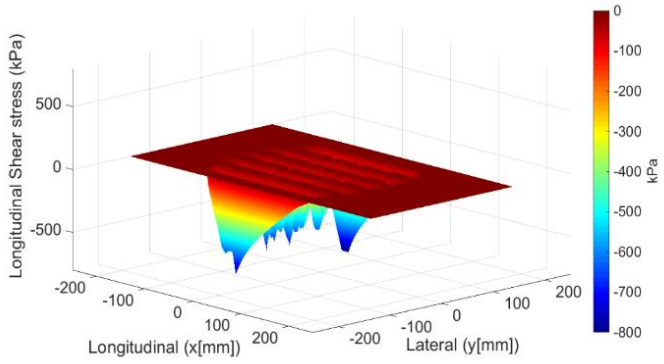
$$\varepsilon_t = 190 > \varepsilon_6$$

Risque de fissuration en surface (fissure longitudinale sur le bord arrière du contact pneu-chaussée)

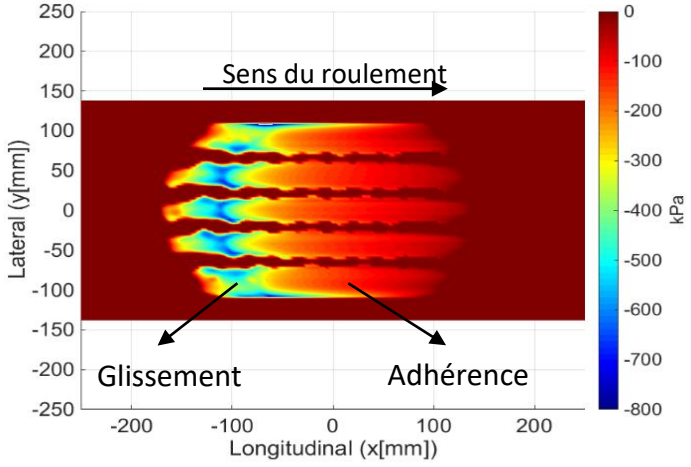
EN ROULEMENT + FREINAGE

μ = **0**,7; W= **32,5** kN; F_x = **-10 kN**

Cisaillement surfacique



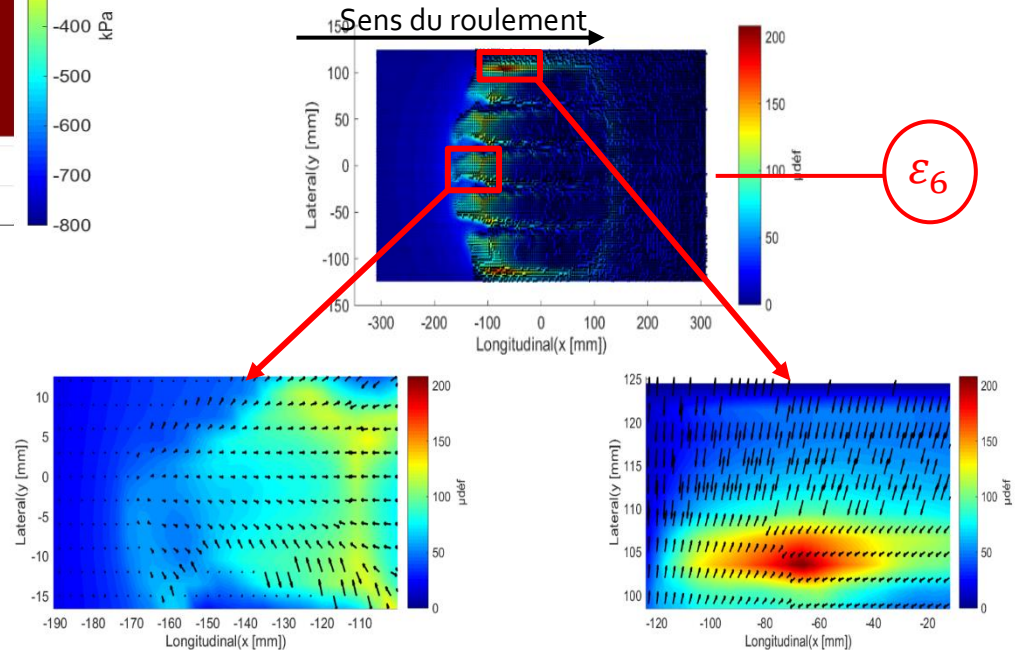
Profil **3D**



Vue projetée

Déformations et directions principales

Champ de déformation principale maximale par extension en surface

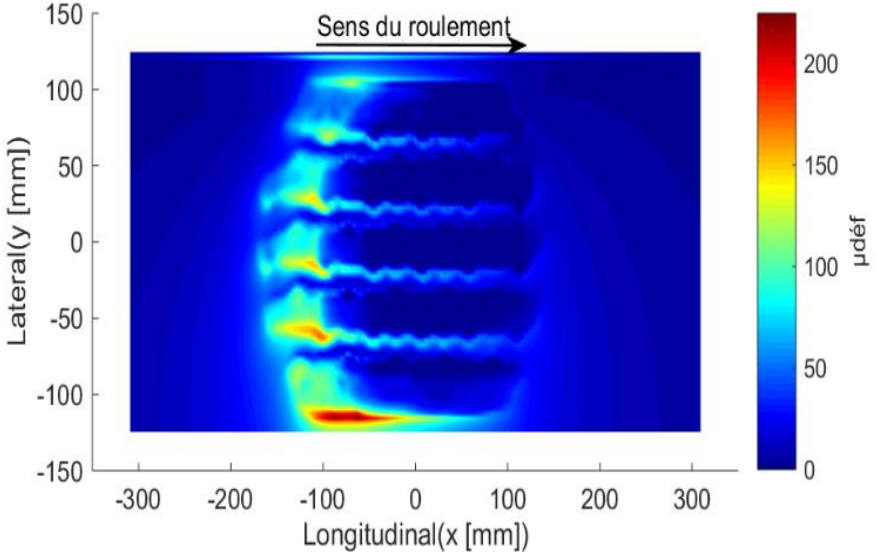


$$\varepsilon_t = 210 > \varepsilon_6$$

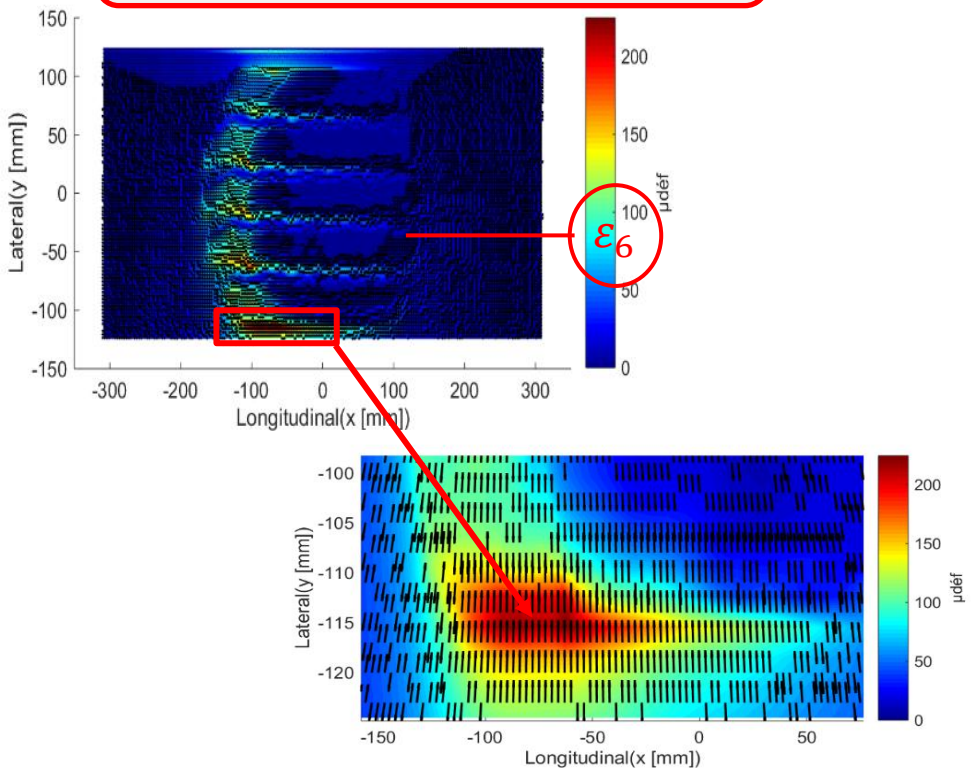
Risque de fissuration en surface (fissure longitudinale sur le bord arrière du contact pneu-chaussée)

EN ROULEMENT LIBRE EN VIRAGE (ROUE DE REMORQUE)

Cisaillement surfacique



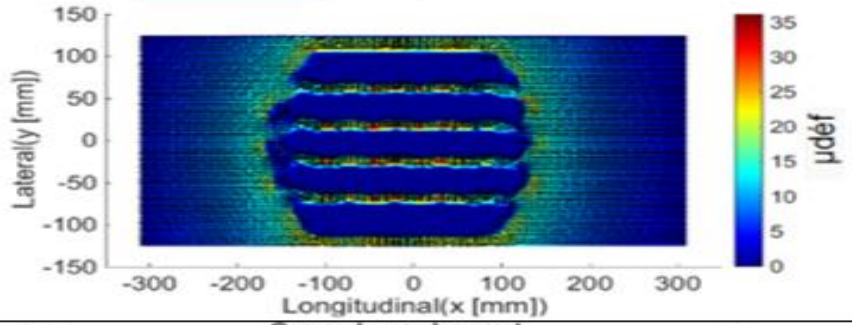
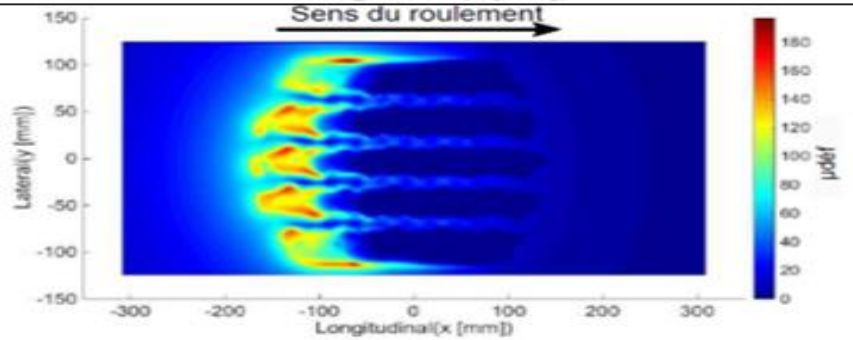
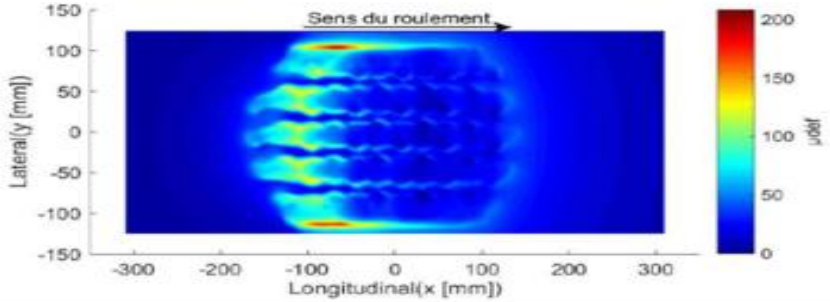
Champ de déformation principale maximale par extension en surface



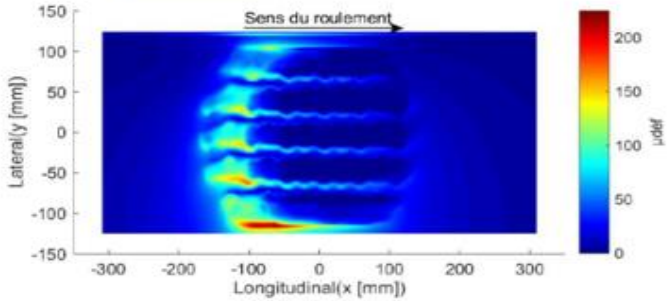
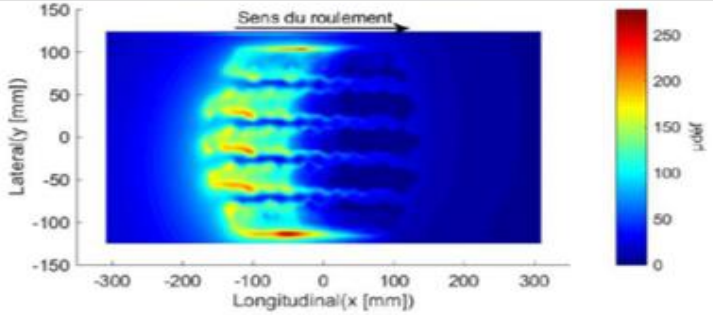
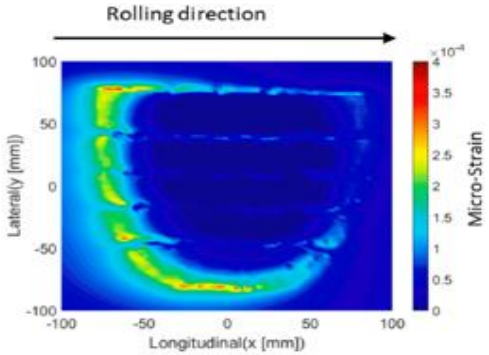
$$\varepsilon_t = 270 > \varepsilon_6$$

Risque de fissuration en surface (fissure longitudinale sur le bord arrière du contact pneu-chaussée)

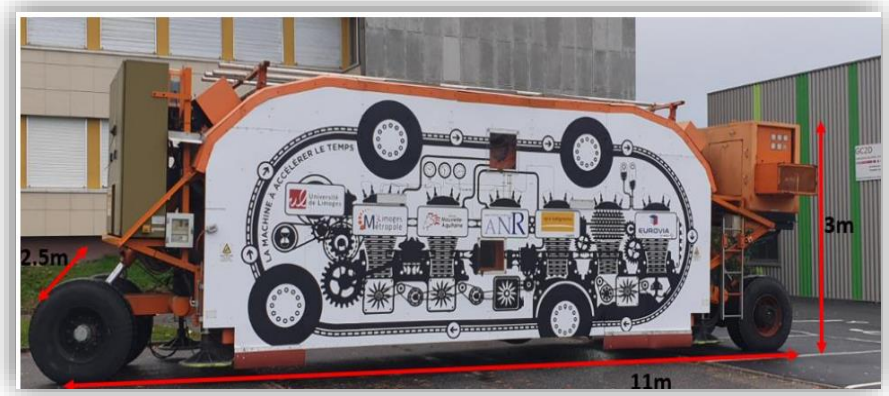
RECAPITULATIF CALCULS AVEC SAM EN SECTION DROITE

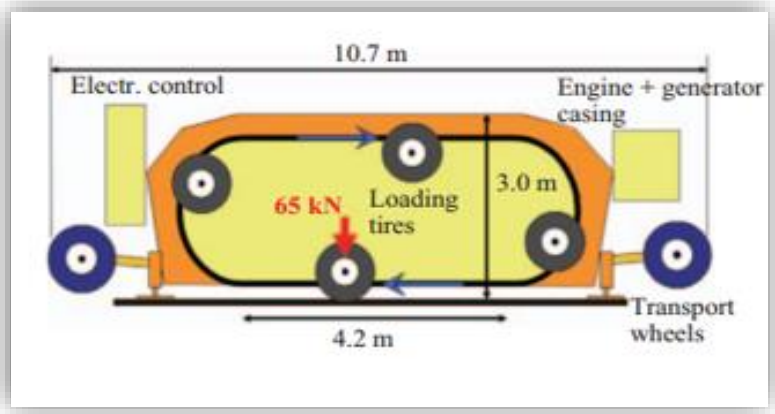
	Application des efforts	Déformations principales et directions principales d'extension	$\varepsilon_{6\ max}$ (µdef)
ROULEMENT PUR			35
ROULEMENT TRACTIF			200
ROULEMENT FREINAGE			200

RECAPITULATIF DES CALCULS AVEC SAM EN SECTION COURBE

	Application des efforts	Déformations principales et directions principales d'extension	$\varepsilon_{6\ max}$ (µdef)
VIRAGE PUR			250
VIRAGE TRACTIF			280
VIRAGE PNEU INCLINE			360

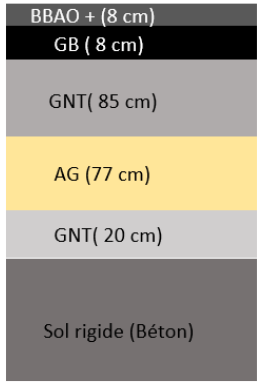
VALIDATIONS EXPERIMENTALES DES CALCULS SAM (DVDC TRANCHE 4)



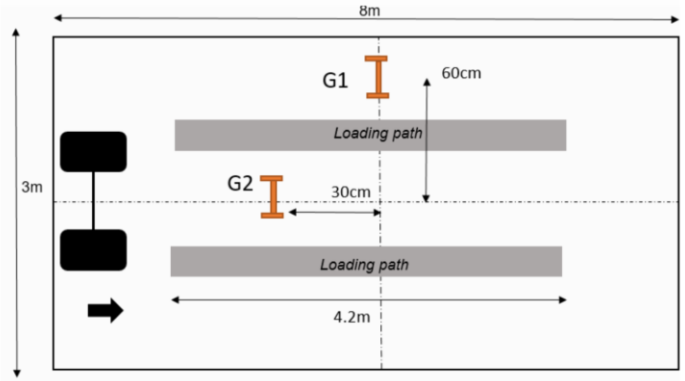


Simulateur en roulement pur MLS 10

d)

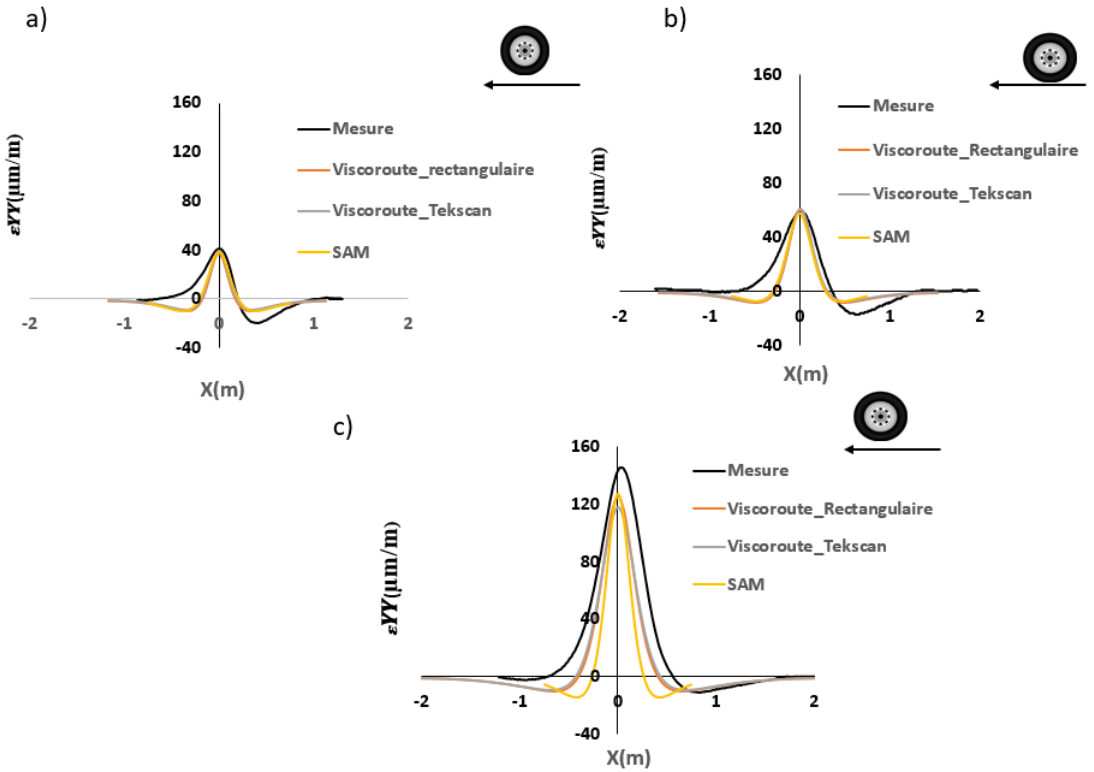


Exemple de chaussée Malet (spie Batignoles)



► Implantation des capteurs en surface de chaussée

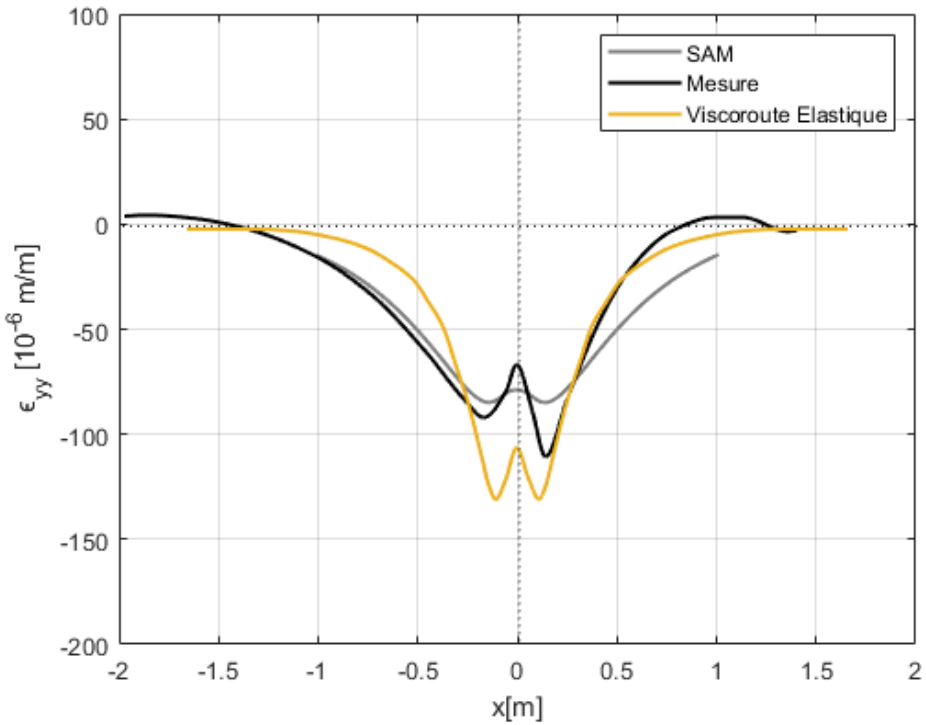
MESURES EN SURFACES À 0,6 M DU CENTRE DU JUMELAGE



Signaux de déformations transversales à 20 °C, (à h = 0 ;y = 60).
a) BBAO+, b) BBAO, c) Agreco

Bonne corrélation entre mesures et calculs SAM

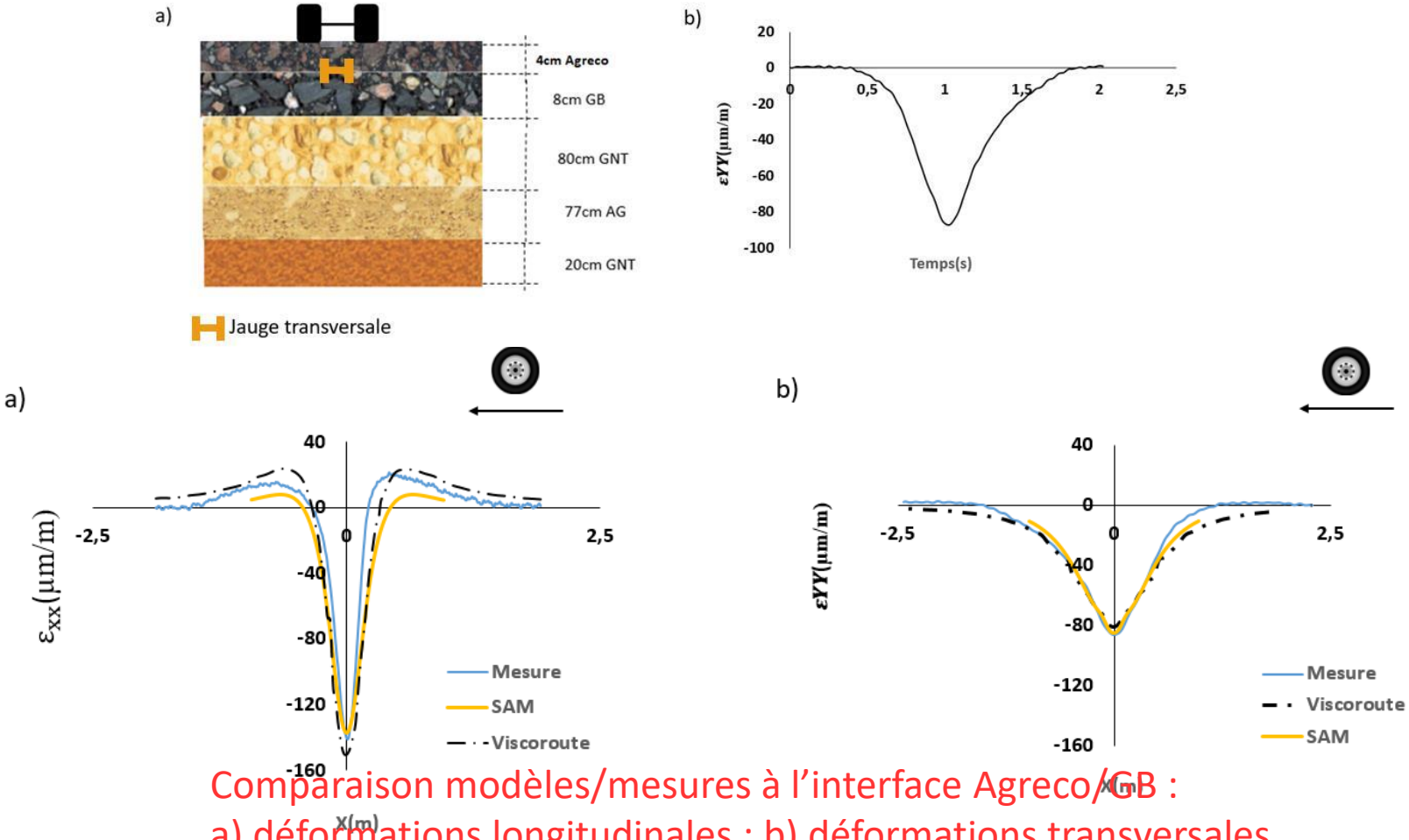
MESURES EN SURFACE AU CENTRE DU CONTACT



Signaux de déformations transversales pour le BBAO+
20 °C ; h = 0 ; y = 0.(En surface au centre du jumelage)

Bonne corrélation entre mesures et calcul SAM
En surface, SAM est plus proche des mesures que viscoroute
intégration des parametres tribologiques

MESURES A L'INTERFACE GB/COUCHE DE SURFACE



Comparaison modèles/mesures à l'interface Agreco/GB :
a) déformations longitudinales ; b) déformations transversales

Bonne corrélation entre mesures et calcul SAM

CONCLUSIONS

- Calcul fiable en surface du contact pneu/chaussée par un modèle utilisant une méthode Semi-Analytique très rapide intégrant le frottement

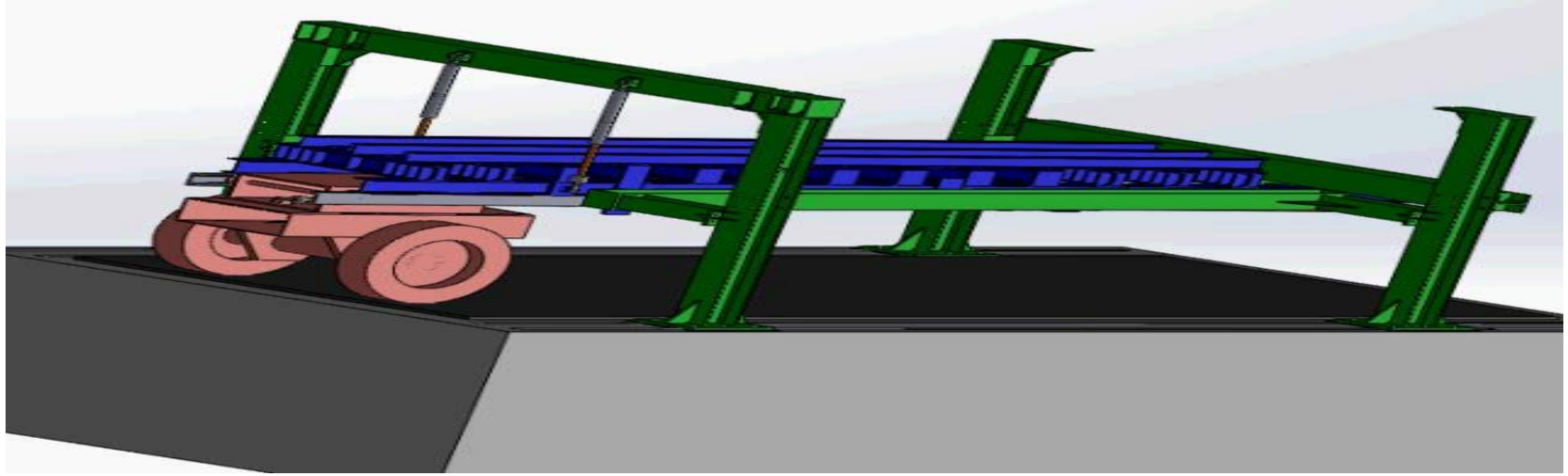
- Application au contact reel Pneu/Chaussée avec mise en évidence de l'effet agressif de la structure du pneu

- Calcul en surface des contraintes et déformations en roulement libre, tractif et en freinage

- Mise en évidence de déformations supérieures à $\varepsilon 6$ en roulement tractif, freinage et virage

PERSPECTIVES

- Développement de l'aspect élasto-plastique et visco-elastique du revêtement (en cours au LaMCoS)
- Évolution de l'outil SAM vers des aspects probabilistes (coefficient de risque)



- Construction (en cours) d'un simulateur (MACADAM) reproduisant le freinage, l'accélération et les virages en ambiances contrôlées (0 à 40°C)

- Aide au dimensionnement des couches de surface des chaussées (SAM ROUTE).