

# Monitoring et aide à la décision pour la maintenance prédictive des chaussées

—

## Des enjeux et problématiques nécessitant une approche multidisciplinaire

Guillaume Terrasson, **Damien Lesbats**, Nathalie Charrier,  
Eric Villeneuve, Julie Lartigau et Mohamed Elachachi

7<sup>ème</sup> Journée annuelle SHM@COFREND  
Bordeaux – 20 mars 2024



# Plan

**01**

**Introduction**

**02**

**Démarche  
proposée**

**03**

**Exploitation des  
données**

**04**

**Modélisation  
mécanique**

**05**

**Moyens  
d'instrumentation**

**06**

**Conclusions**

# Contexte des travaux

## Maintenance des infrastructures routières



Comment maintenir la qualité de service ?

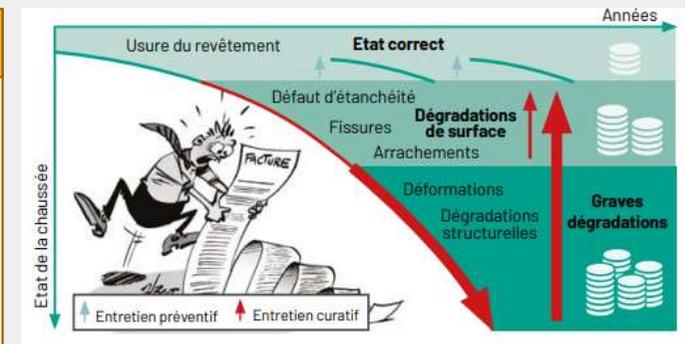
Comment prolonger leur durée de vie ?

Comment mieux anticiper et planifier ces opérations tout en limitant leur **impact financier** ?

Outils de  
maintenance  
prédictive

### Association de technologies du numérique

- Moyens d'instrumentation connectés
- Système de gestion des données
- Modèles de simulation mécanique
- Outils d'aide à la décision
- ...



↑ Source : NextRoad  
1€ non dépensé dans la résilience des infrastructures  
coûtera in fine 5 à 6€

Verrous  
identifiés

- Optimiser les **modèles mécaniques prédictifs** de l'endommagement des chaussées
- Intégrer des approches concurrentes mais complémentaires pour la maintenance prédictive des chaussées : **expertise métier et science des données**
- Optimiser l'instrumentation de l'infrastructure routière par l'apport de nouveaux capteurs ou de **systèmes embarqués reconfigurables, connectés et autonomes**

# Génèse du projet

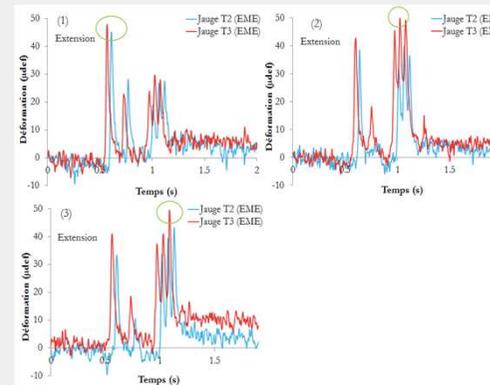


↑  
Section A63 instrumentée entre Bordeaux et Bayonne  
5 extensomètres, 8 géophones et 3 sondes de température

## De l'instrumentation à la collaboration...

### Réfection de chaussée en décembre 2014

- Instrumentation par le CEREMA
- Développement d'un logiciel pour le traitement des données collectées



- Accompagnement d'ESTIA Recherche sur les aspects « prédiction » et « mécanique »

# Une approche pluridisciplinaire

- Poursuite des travaux initiés sur l'exploitation des données issues du cas d'étude de l'A63
- Définition et validation d'indicateurs
- Suivi de l'évolution des dégradations



- État de l'art des moyens d'instrumentation de chaussée
- Étude, prototypage, expérimentation et mise en œuvre *in situ* de nouveaux moyens d'instrumentation

## En résumé, une approche...

- Basée sur 3 axes de recherche et sur le couplage expériences / modèles
- Mise en œuvre au travers de plusieurs stages co-encadrés
- Pour explorer les verrous et problématiques associés à la mise en place d'outils de maintenance prédictive

Exploitation des données collectées

Moyens d'acquisition de données

Couplage modèle mécanique et modèle guidé par les données

- État de l'art des Réseaux de capteurs appliqués au suivi de l'état d'une chaussée
- Expérimentation et évaluation des performances de technologies de communication appliquée à la chaussée

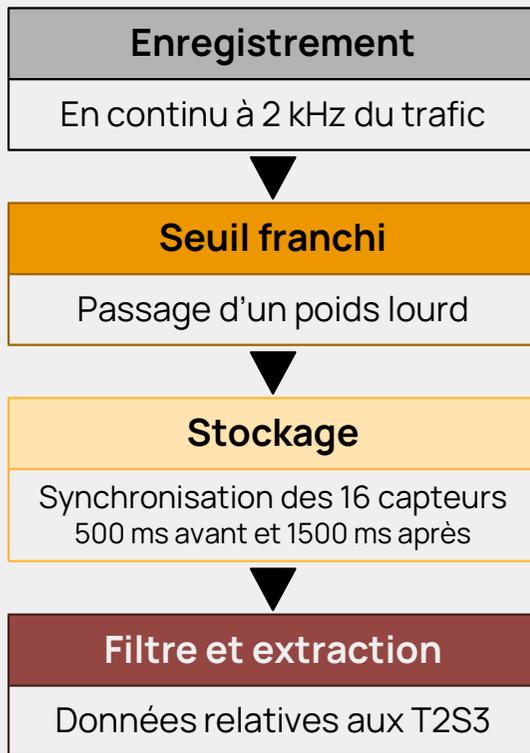


- Modélisation de l'ouvrage et de son environnement
- Méthodologies de traitement des données technologiques (capteurs, bases de données...) & données humaines (observations, expertises humaines...)



# Sélection et mise en forme

23 Go de données collectées entre 2014 et 2019 sur la section instrumentée de l'A63

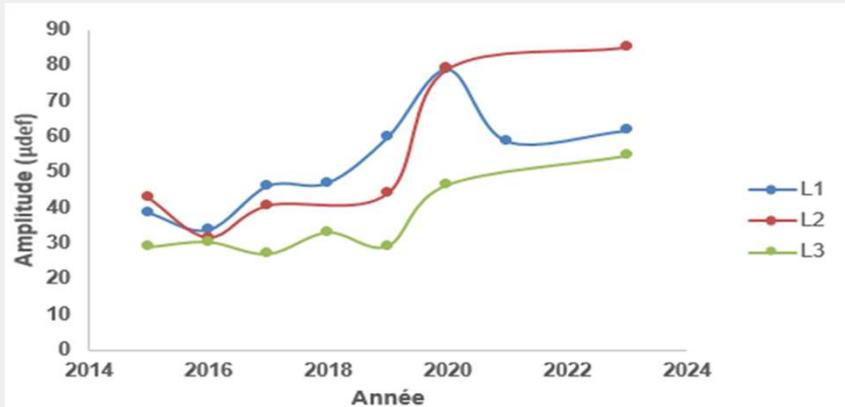


Profils enregistrés par les géophones (accélération fonction du temps) ↓

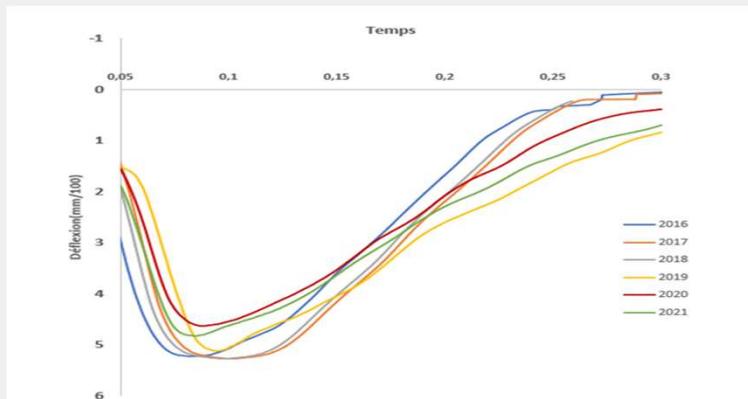


# Exploitation des données T2S3

Évolution des déformations longitudinales normalisées à 15°C ↓



Évolution pluriannuelle du rayon de courbure ↓



## Exploitation des jauges extensométriques

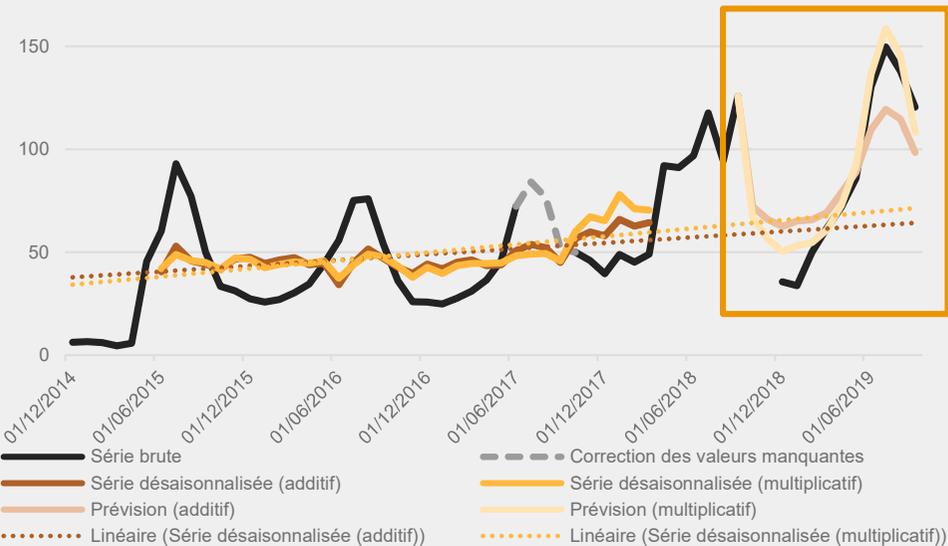
- **Changement de comportement à partir de 2020** → Mise en évidence de la fissuration
- **Augmentation du taux d'endommagement** → Confirmation de l'influence de la fissuration

## Exploitation des géophones

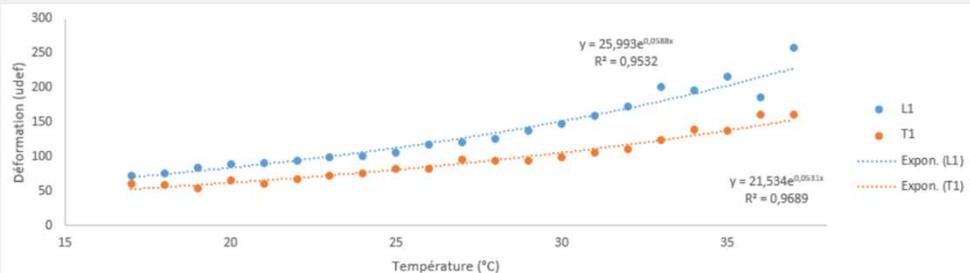
- **Application d'outils mathématiques** (intégration numérique; transformée de Hilbert) → Convertir une vitesse de déplacement en bassin de déflexion
- **Analyse de l'évolution de la forme du bassin de déflexion** → Mise en évidence de l'influence puis suivi de la progression de la fissuration

# Exploitation des données T2S3

Évolution des moyennes mensuelles des déformations maximales journalières ↓



Évolution des déformations en fonction de la température (année : 2021) ↓



## De premiers résultats prometteurs...

- **Évolution constante des  $\epsilon$**  → Augmentation, au cours des années, de la **dégradation** = propagation de fissures et vieillissement matériaux
- **Variations saisonnières** → Influence de la **température** sur l'amplitude des  $\epsilon$
- **Prédiction des évolutions des  $\epsilon$**  → résultats cohérents vis-à-vis des données brutes collectées

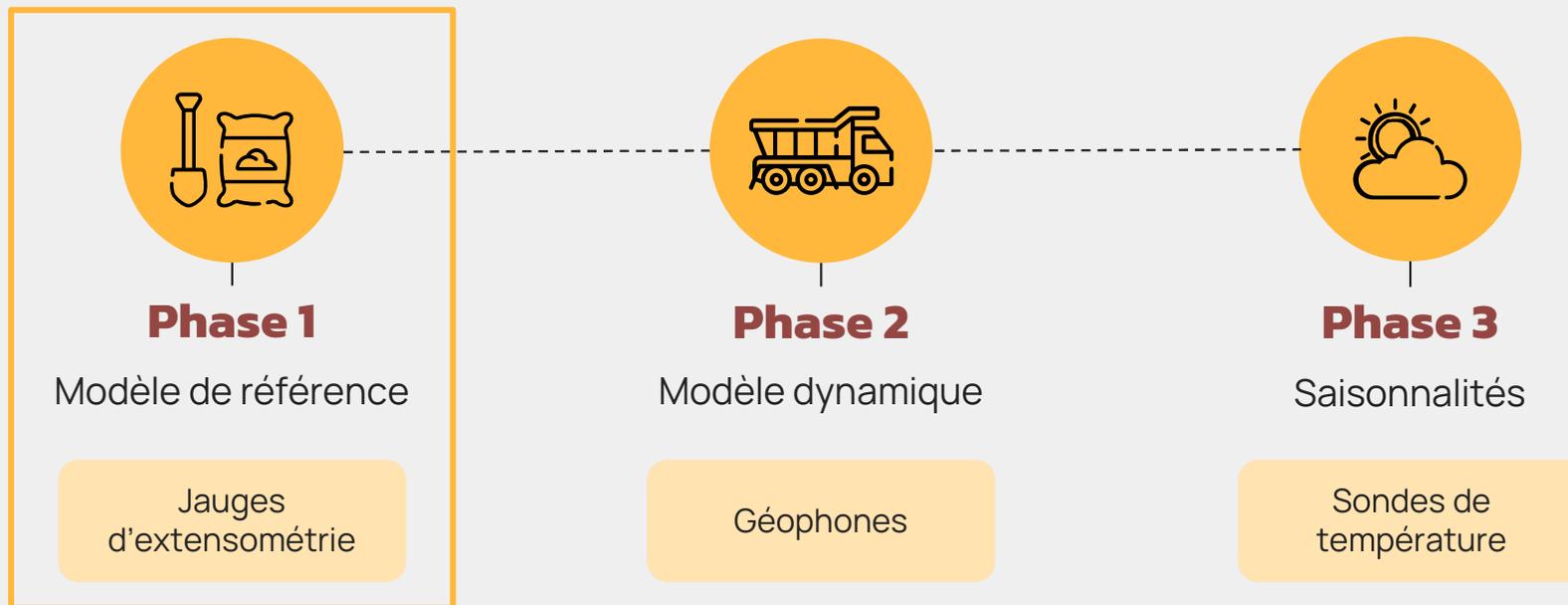
## ...ouvrant de nombreuses perspectives !

- **Tri et mise en forme des données** → Améliorer les outils proposés pour traiter cette grande quantité de données hétérogènes et incertaines
- **Exploitabilité des données collectées** → Mieux les objectiver pour valider leur fiabilité
- **Indicateurs de l'état d'une chaussée** → Définir les indicateurs et des approches pour les extraire et prédire leur évolution

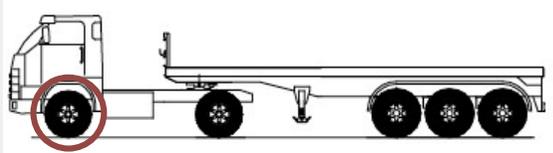
# Processus de modélisation

**Objectif :** Construire des modèles **prédictifs** de comportement **mécanique** de la chaussée (MEF)

**Verrou :** Comment prendre en compte les mesures enregistrées in-situ dans la construction de tels modèles ?



# Construction du modèle de référence

Hypothèses de modélisation	Géométrie et matériaux	Chargement
<p><b>État modélisé : déc. 2014</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Structure de chaussée <b>indéformable</b></li> <li>Couches de chaussée parfaitement <b>jointées</b></li> <li>Matériaux « neufs », <b>non endommagés</b> et <b>non chargés cycliquement</b></li> </ul>	<p><b>Structure multi-couches</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Voie lente modélisée : <math>l = 2,20</math> m</li> <li>Comportement des matériaux <b>linéaire</b> et <b>élastique</b></li> </ul> <ol style="list-style-type: none"> <li>Béton Bitumineux TM 2,5 cm</li> <li>Enrobé ME 9 cm</li> <li>Béton bitumineux ME 6,5 cm</li> <li>Grave-bitume 14 cm</li> </ol>	<p><b>Poids lourd : T2S3</b></p>  <ul style="list-style-type: none"> <li><b>75%</b> du trafic sur l'A63</li> <li>Chargement <b>statique</b> : pression uniformément répartie 0,9 MPa</li> </ul>

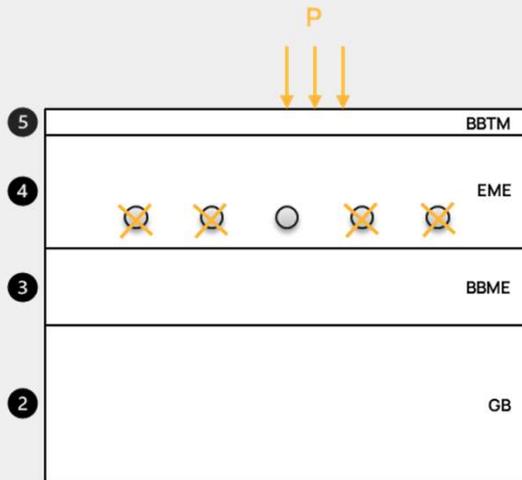
(Onischenko et al., 2016)  
(Selsal et al., 2022)

(NF P98-086, AFNOR, 2019)  
(Expertise CEREMA)

(Onischenko et al., 2016)  
(Cho et al., 2018)

# Premiers résultats issus du modèle

Calcul des **déformations numériques** aux emplacements des **jauges sur site**

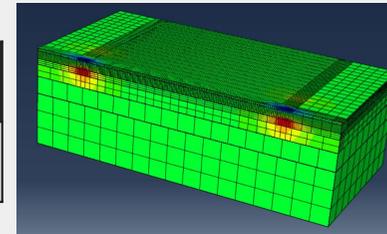


↑ Représentation schématique de la structure de chaussée de l'A63

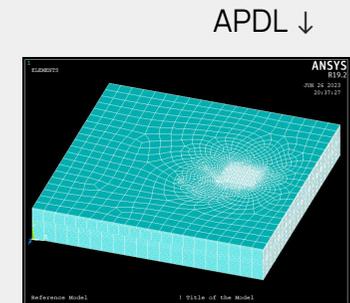
- Extensomètres : L3, T2, L2, L1, T1  
Espacés de 30 cm et distants de 1 cm de la base de la couche 4

## ▶ Comparaison des $\mu$ déf. expérimentale et numérique

	Exp.	Num.	Écart (%)
<b>L2</b>	6,8+/- 2,3	5,2	25



↑ Abaqus



APDL ↓

## ▶ Étude de sensibilité des propriétés élastiques des couches : $E$ et $\nu$

	Exp.	Num.	Écart (%)
<b>L2</b>	6,8	7,1	x

←

Modification  $E$  et  $\nu$  couches 3 et 5  
Propriétés couche 4 inchangées

### Bilan & perspectives

- **Ordre de grandeur simulations/expérimentation identique** → Objectiver et valider les données capteurs
- **Poursuite du process de modélisation** → Tendre vers un modèle dynamique et coupler au mieux les données incertaines et incomplètes issues des capteurs pour nourrir ce modèle

# Du capteur aux RCSF

Suivi et prédiction de l'état d'une chaussée = moyens d'instrumentation pour acquérir des données « temps réel »

## Technologies non-intrusives

← LiDAR (Nguyen et al., 2007)

↑ Caméra (Li et al., 2019)

Défectographe  
Station météo  
...

## Technologies intrusives

↑ Accéléromètre (Varin, 2022)

↑ Fibre optique (Varin, 2022)

Jauge  
Géophone  
Sonde de T°C  
...

## Réseaux de Capteurs Sans Fil

Association de **nœuds capteurs** avec capacité de **transmission sans fil** des données

Classification des **véhicules** à l'aide de d'accéléromètres et de magnétomètres (Bjawa et al., 2011) ↓

↑ **Suivi de dommages internes** à l'aide de capteur piézoélectrique autoalimenté (Alavi et al., 2016)

**Verrous technologiques**

- Coût d'installation et difficultés d'intégration
- Fiabilité, robustesse et limitation de ces solutions (durée de vie limitée, dérive des capteurs, capacité limitée des nœuds capteurs, fiabilité des moyens de communication...)

# Moyens existants

## Apports de 2 technologies pour la mesure de déformations

### Accéléromètres

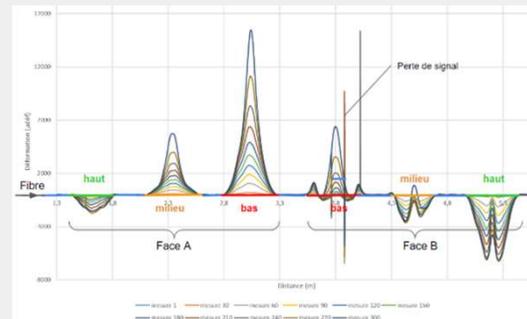
#### Flexion 2 points



- Mise en évidence de la **relation linéaire** entre l'atténuation de l'accélération et la **propagation** de la fissure

### Fibre optique

#### Flexion 2 points



- Mise en évidence du **phénomène de traction-compression**

#### Effet de la circulation



- Absence de corrélation** avec la modélisation routière

### Bilan & perspectives

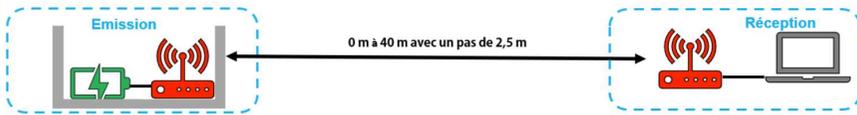
- Poursuite du process d'évaluation → Transposer, à l'échelle d'un démonstrateur, les essais réalisés en laboratoire

# Performances des communications sans fil

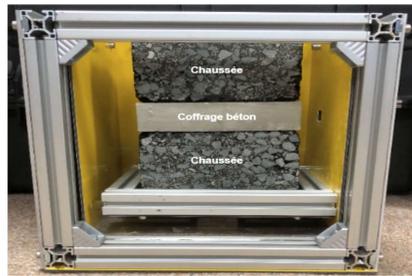
**Objectif :** Caractériser l'influence des matériaux bitumeux et des paramètres de technologies de communication sur les performances d'une liaison sans fil

## Dispositif et conditions expérimentales

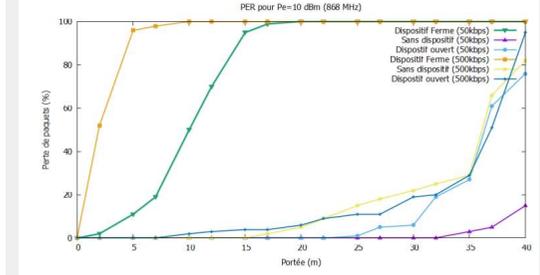
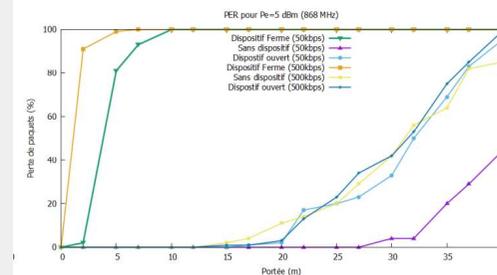
Avec dispositif ouvert :  $P_e = 0, 5, 10, 14$  dBm



$f_{\text{transmission}}$ (MHz)	434 et 868
Débit (kbps)	50 et 500
$P_E$ (dBm)	0, +5, +10 et +14
Condition de transmission	Champ libre, dispositif fermé et ouvert
Profondeur (cm)	10 et 20



## Résultats et analyses



- L'augmentation du débit diminue la fiabilité de transmission
- À 434 MHz, la fiabilité est moins bonne qu'à 868 MHz
- Portée atteignable = vingtaine de mètres sans perte de paquet
- Peu d'influence du matériaux bitumeux sur la fiabilité de transmission

### Bilan & perspectives

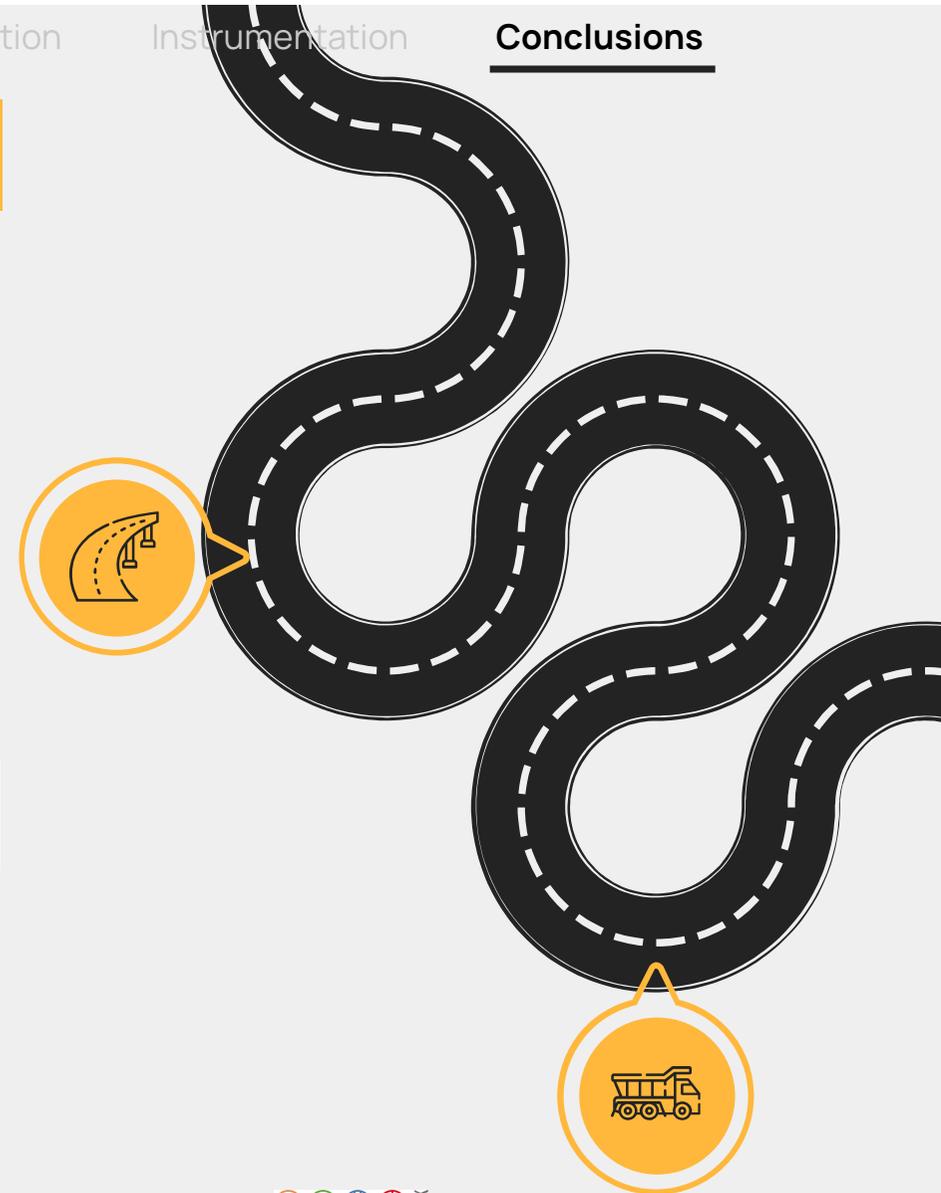
- **Possibilité d'intégrer des capteurs sans fil au sein d'une chaussée** → Poursuivre les expérimentations pour mieux caractériser les performances atteignables et se rapprocher d'un fonctionnement en cas réel
- **Limitation en termes de débit de transmission** → Étudier l'impact sur l'exploitabilité des données

## Appui au gestionnaire

- **Optimisation de modèles mécaniques prédictif**
  - Approche "prédictive" de l'évolution
  - Approche des valeurs de déformations dans la structure
- **Couplage expertise métier et science des données**
  - Définitions de configurations de sollicitation (T2S3)
  - Définition d'indicateurs d'état structurel
- **Apport de systèmes embarqués, connectés et autonomes**
  - Résultats de laboratoire encourageants
  - Faisabilité d'un démonstrateur

## Perspectives

- Appui stratégique pour s'adapter aux effets du changement climatique
- Fort potentiel des travaux exploratoires valorisables dans des travaux de recherches académiques (thèse, appel à projets...)



# Monitoring et aide à la décision pour la maintenance prédictive des chaussées

—

## Des enjeux et problématiques nécessitant une approche multidisciplinaire

Guillaume Terrasson, **Damien Lesbats**, Nathalie Charrier,  
Eric Villeneuve, Julie Lartigau et Mohammed Elachachi

7<sup>ème</sup> Journée annuelle SHM@COFREND  
Bordeaux – 20 mars 2024

