



# Vers des modèles mécaniques enrichis (modélisation discontinuités, initiation de la fissure, évolution de la déflexion)

***Modélisation numérique 3D de l'endommagement des  
chaussées par modèle M4-5n :***

***Fissuration de couche & Décollements d'interface***

*Développement de l'outil de calcul*

*O. Chupin & J.-M. Piau (Univ. Gustave Eiffel)*

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

## Sujet inscrit dans le thème de DVDC sur

- « le développement de modèles d'évolution de l'état structurel des chaussées et leur application à l'estimation de la durée de vie résiduelle des chaussées »

### Dans ce thème, 2 axes suivant les échelles d'étude :

- ▶ Échelle plurikilométrique des itinéraires routiers : approche de type statistique, formulation de lois d'évolution d'état des chaussées sur la base, en général, des campagnes d'auscultation des réseaux routiers
- ▶ Échelle plus locale (pluri-métrique) : approches « mécanistiques » basées sur la prise en compte par modèles mécaniques des dommages se développant dans les chaussées



## Travaux présentés ici → axe 2

### ► Portent sur

adaptation et utilisation du modèle mécanique, dit M4-5n, basé sur une description de type « empilement de plaques » des structures de chaussées

### ► Intérêt du modèle vis-à-vis des objectifs du PN DVDC

capacité à prendre en compte la présence de fissures (notamment verticales) ou de surface de décollement au sein des structures multicouches

### ► Avantages du modèle par rapport aux approches usuelles (3D) :

- Facilite la description géométrique des surfaces de discontinuité (fissures, décollements)
- Valeurs des champs mécaniques du M4-5n restent bornées au voisinage des singularités géométriques

Et permet néanmoins de modéliser des fissures se développant en milieu 3D et donc de mieux se rapprocher des mécanismes de dégradation hétérogènes des chaussées (e.g. fissures localisées en bande de roulement)



- ▶ Vocation des travaux présentés : déboucher sur un outil de modélisation avancée du comportement des chaussées
- ▶ Exemples d'applications potentielles :
  - Interprétation à un instant donné des mesures d'auscultation et de l'état structurel local des chaussées
  - Prévisions d'évolution dans le temps de l'état structurel des chaussées endommagées
  - Évaluation de l'effet de travaux d'entretien
  - Aide au développement de technologie innovantes



- ▶ Effectuer les développements nécessaires à la prise en compte dans l'approche M4-5n de fissures et décollements se produisant et se propageant au sein des couches de chaussées ou à leurs interfaces → code de calcul par EF (Freefem++)
- ▶ Application de l'outil à l'examen d'un premier cas de remontée de fissure dans une chaussée  
(inspiré d'un essai accéléré à échelle 1 (FABAC) réalisé sur une planche d'essai à l'Université Gustave Eiffel)



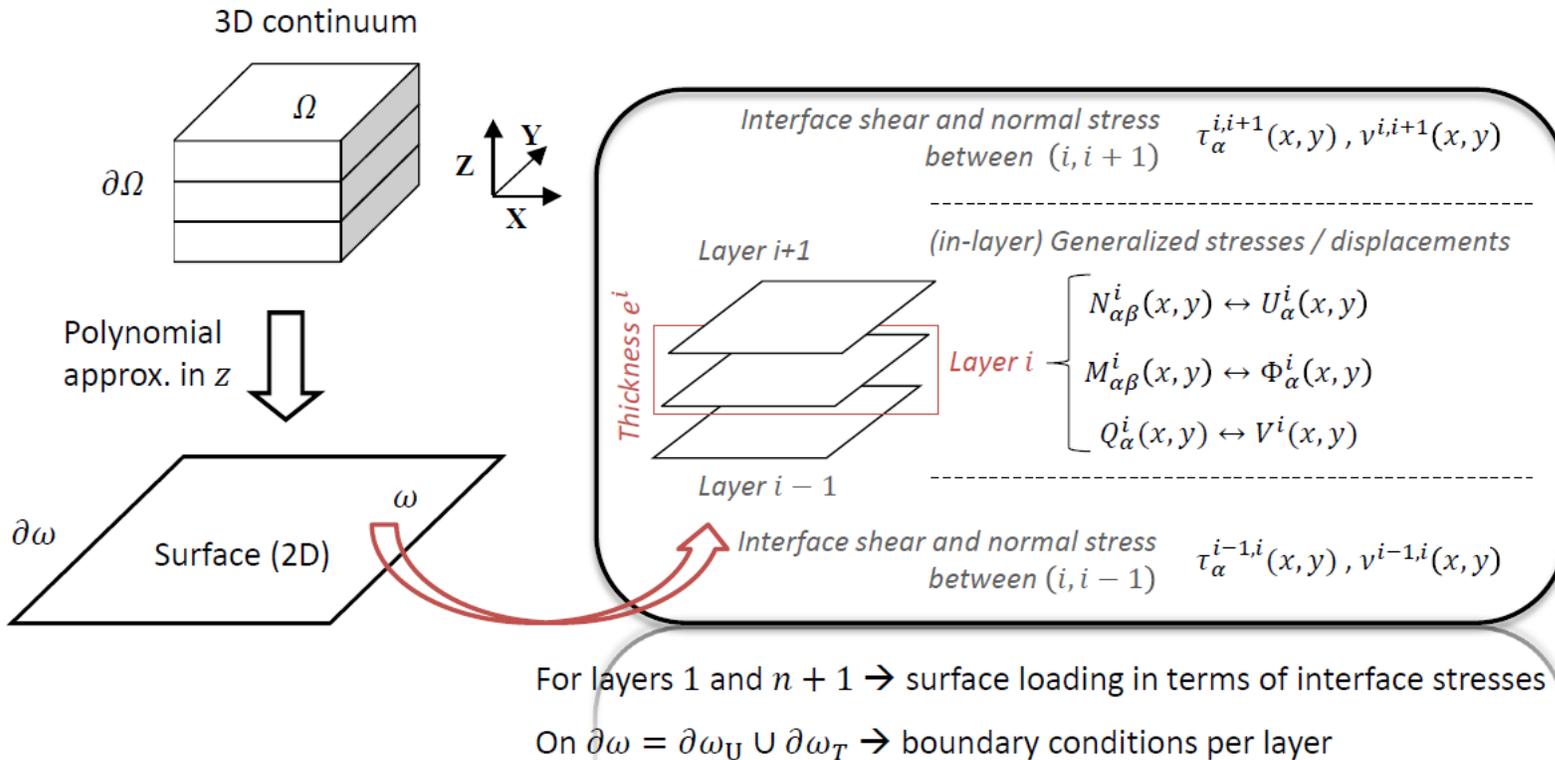
Points de départ : outils M4-5N par éléments finis développé dans la thèse de H. Nasser (2016) et travaux antérieurs sur M4-5n (A. Chabot)

## 3 étapes dans les développements numériques effectués

- ▶ Généraliser la technique de prise en compte de fissures verticales ou surface de décollement horizontales initiée dans la thèse de H. Nasser
- ▶ Déterminer les taux de restitution d'énergie associées à la propagation de surfaces de fissuration ou décollement en approche M4-5n
- ▶ Couplage de ces quantités à une loi d'évolution de type « loi de Paris » qui permet de prévoir la cinétique d'endommagement en fatigue d'une chaussée sous un trafic de charges roulantes



## ► Description simplifiée

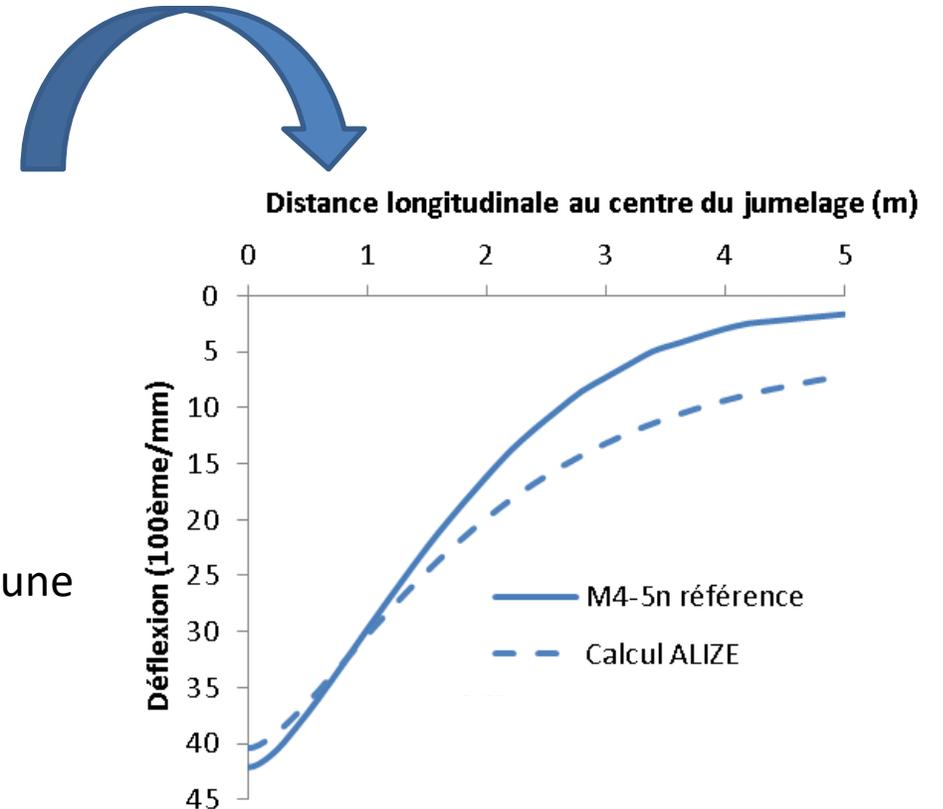


- Modélisation d'une chaussée 3D à partir d'un « empilement » de plaques élastiques qui travaillent en flexion/cisaillement et possiblement en compression  $\rightarrow$  formulation 2D en champs généralisés (de couche et interface) ; facilite traitement géométrique des défauts
- Ressorts de Winkler pour représenter le sol
- Eq. équilibre, loi de comportement, compatibilité cinématique...
- D'un point de vue numérique : résolution d'un problème EF 2D



## ► Alizé vs. M4-5n sur une structure de chaussée neuve (GB3/GB3) sous charge de référence (jumelage standard, $p=0.662$ MPa)

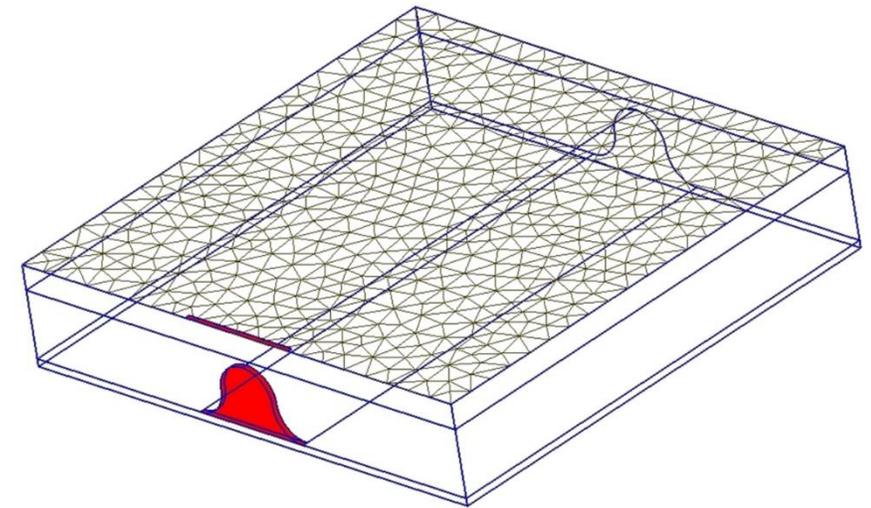
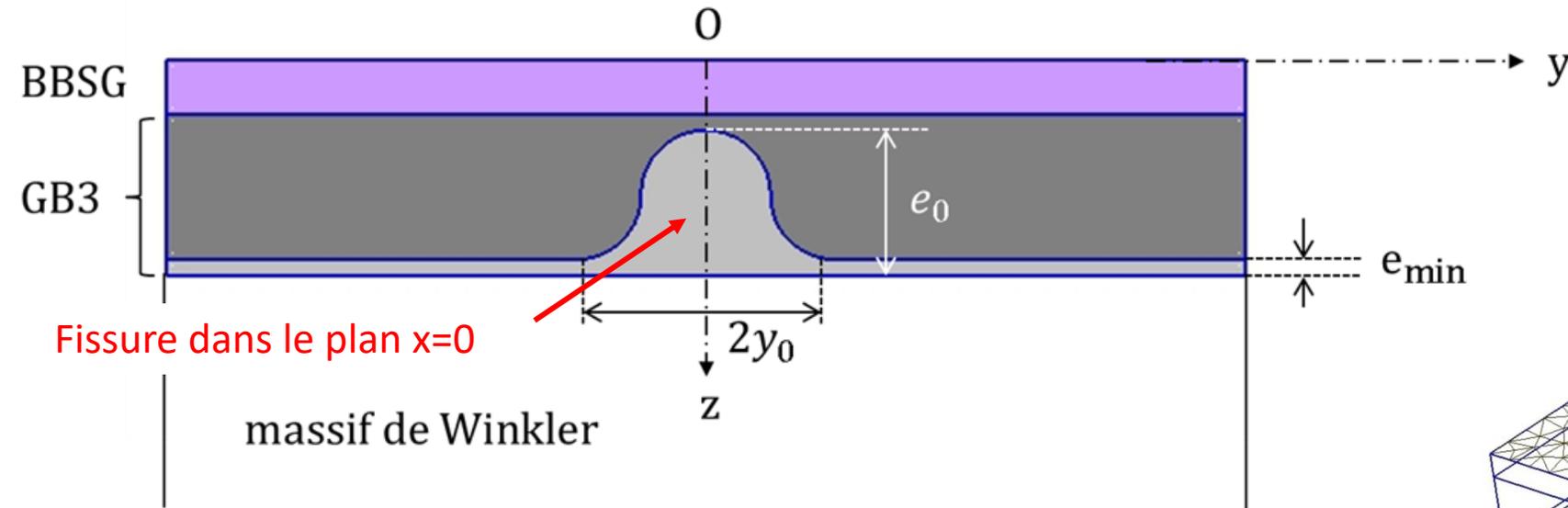
Matériau	Epaisseur (m)	Module d'Young (MPa)	Coefficient de Poisson
BBSG3	0,08	7000	0,35
GB3	0,13	9000	0,35
GB3	0,13	9000	0,35
Plate-forme	Infini	50	0,35



- Bon accord général entre les déflexions calculées
- Écarts de forme liés à différences de modélisation des structures (simplification volontaire de la couche de GNT et du sol dans M4-5n ; une description plus précise aurait pu être faite)
- Même constat pour les déformations et contraintes



- ▶ Même calcul mais avec présence d'une fissure verticale dans GB3 (état de fissuration donné)

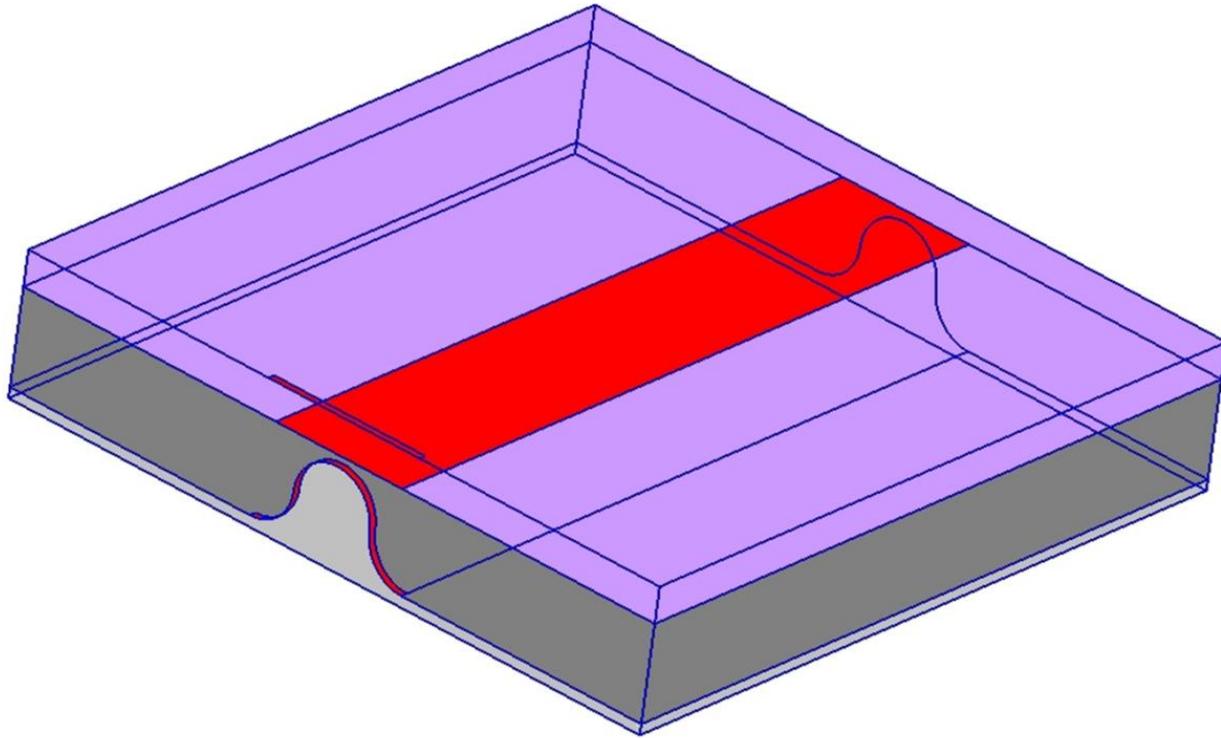


- Le profil de fissure considéré n'impacte que faiblement la déflexion par rapport au calcul précédent (42/100 mm)
- Par contre, forte augmentation des déformation et contrainte ( $\epsilon_{xx}$  et  $\sigma_{xx}$ ) à la base du BBSG

Vue 3D de la structure et maillage M4-5n associé (2D)



## ► Calcul avec fissure et décollement d'interface BBSG/GB3



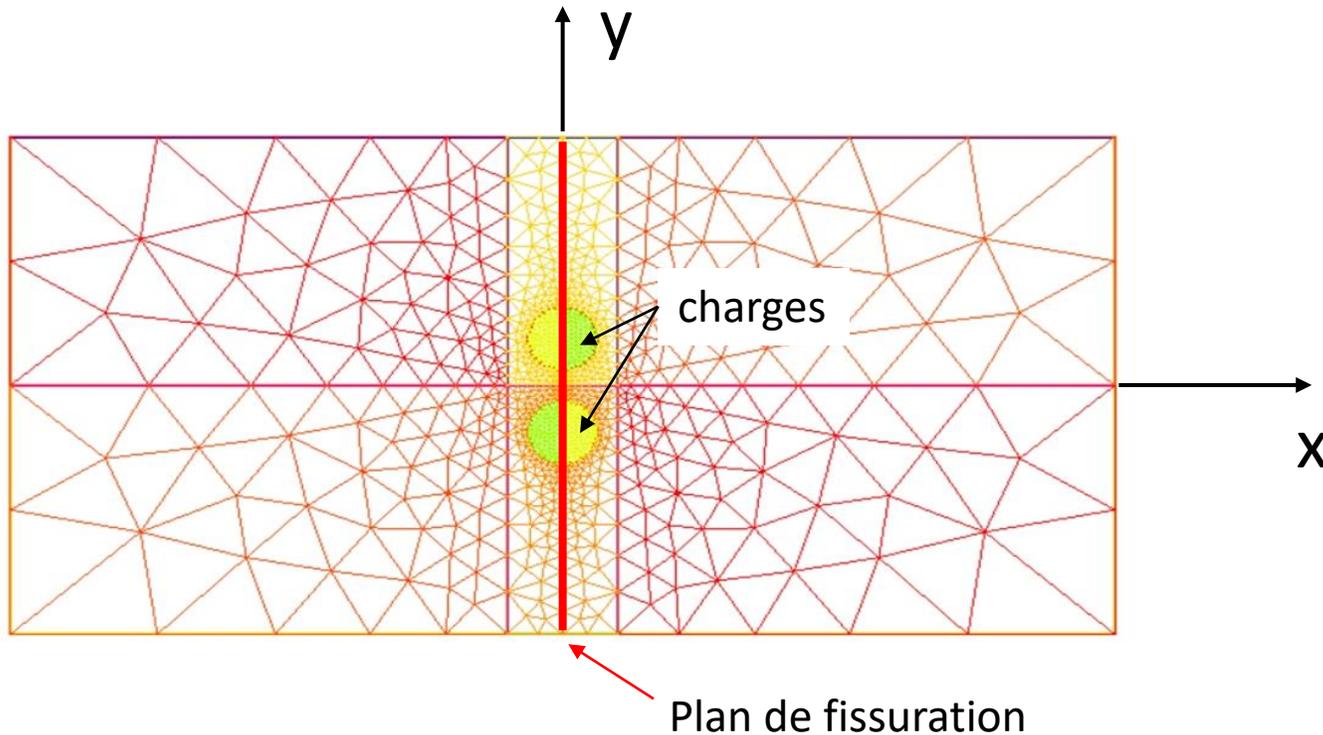
- Toujours faible impact sur la déflexion (ici 42/100 mm)
- Forte augmentation des déformation et contrainte ( $\varepsilon_{xx}$  et  $\sigma_{xx}$ ) à la base du BBSG due à la fissure
- Discontinuité de déformation  $\varepsilon_{xx}$  de part et d'autre de la surface de décollement ( $z = 0,08m$ ).



- ▶ Propagation de fissure → prévoir la cinétique d'endommagement en fatigue d'une chaussée sous un trafic
  - Détermination des taux de restitution d'énergie pour le M4-5n (fissure/décollement) + couplage avec loi d'évolution de type « loi de Paris »
  - Validation et calage vs. autres outils sur un cas simple 2D
- ▶ Exemple d'application
  - Structure : EME (5cm) / EME (6cm) + GNT (33 cm) + sol
  - Chargement : demi-essieu standard (sans balayage)
  - Etude de la remontée d'un profil de fissure s'initiant à la base de l'EME
  - Chargement placé à l'aplomb du plan de fissuration  $x = 0$  (position jugée comme la plus préjudiciable vis-à-vis de la remontée de fissure)
- ▶ Le calcul de propagation de fissure simule l'effet de répétition des charges sur la chaussée



## Quelques données de calcul



Maillage M4-5n de la chaussée simulée (vue de dessus de la chaussée 3D)

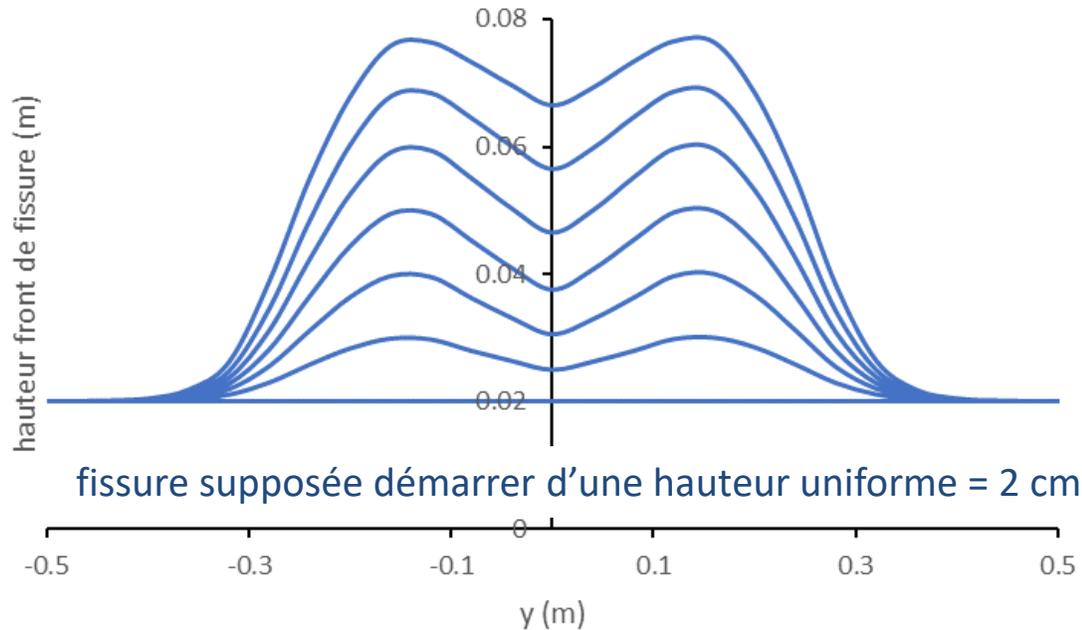
	E (MPa)	$\nu$
EME	15150	0.35
GNT	260	0.35
Ressorts Winkler	$k = 60 \text{ Mpa/m}$	

+ coefficients (2) pour la loi d'évolution de type Paris basée sur quantités M4-5n

Calage vs. calcul EF « classique » 2D déformations planes en mécanique de la rupture et loi de Paris

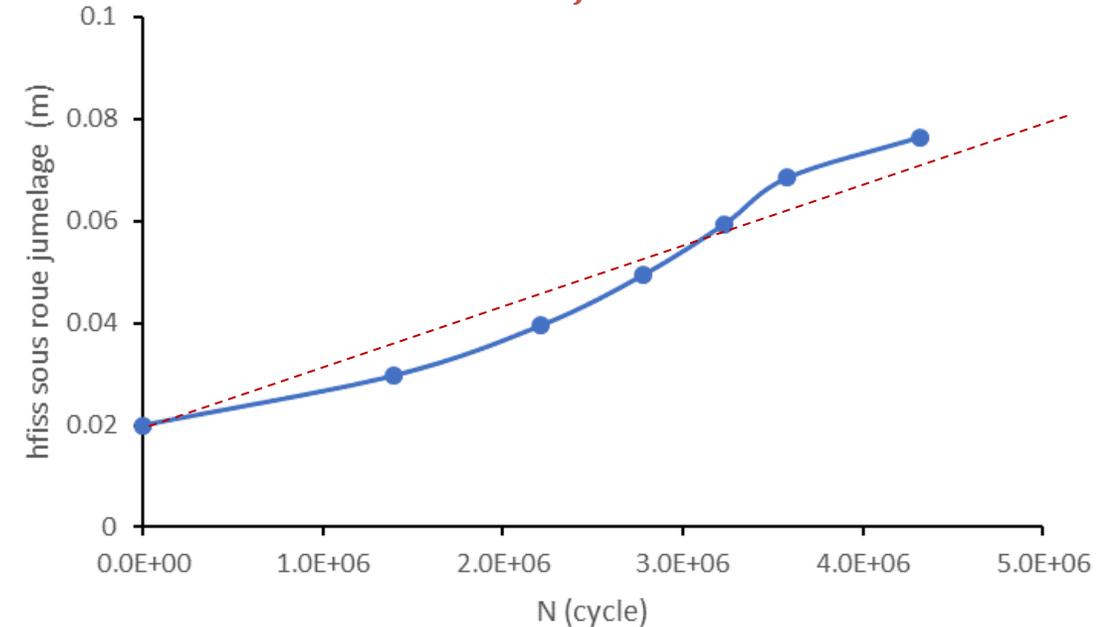


## Evolution de la géométrie du front de fissure dans le plan vertical (O, y, z)



- On retrouve la symétrie escomptée des profils de fissuration, par rapport à l'axe longitudinal médian de la chaussée
- $h_{max}$  fissure sous les roues, puis rapide décroissance à l'extérieur des bandes de roulement

## Cinétique de propagation de fissure vs. nb chargements ( $h_{fiss}$ pris sous les roues)



- Les points correspondent aux profils de la figure de gauche
- La remontée de fissure sous les roues apparait approximativement linéaire avec le nombre de chargements sur la plage de fissuration de 2 à 8 cm



- ▶ Ces travaux visent à proposer un outil de calcul numérique du comportement, à l'échelle métrique, d'une section de chaussée comportant des défauts (fissures, surfaces de décollement) ; outil basé sur le modèle M4-5n
- ▶ 1<sup>ère</sup> partie du travail pour un état de fissuration donné – Les exemples de principe traités montrent l'applicabilité des développements effectués à la Mécanique des Chaussées
- ▶ 2<sup>ème</sup> partie du travail tournée vers la modélisation de la propagation des fissures et surfaces de décollement sous les actions répétées de charges de trafic – développement du formalisme mathématique
- ▶ Implémentation des ces développements sous forme de script de calcul aux éléments finis dans l'environnement Freefem++



- ▶ Premier exemple de calcul de remontée de fissure dans une couche de chaussée bitumineuse sur support fissuré présenté
  - simulations permettent d'obtenir l'évolution de la géométrie du front de fissuration et sa cinétique en fonction du nombre de passages de charge
  - Les résultats numériques fournissent une estimation de l'étendue de la zone endommagée en fonction de la localisation des charges appliquées et des cycles de chargement
- ▶ Toutefois, les applications pratiques de l'outil numérique développé sont encore largement à définir et à formaliser
- ▶ L'application de ces travaux à des usages plus finalisés devra se faire progressivement par adaptations, calage et améliorations du présent outil

