

Restitution des résultats de l'ORSI « DEDIR »
du Dimensionnement à l'Entretien Durable des Infrastructures Routières
IFSTTAR Nantes - 17 mai 2018

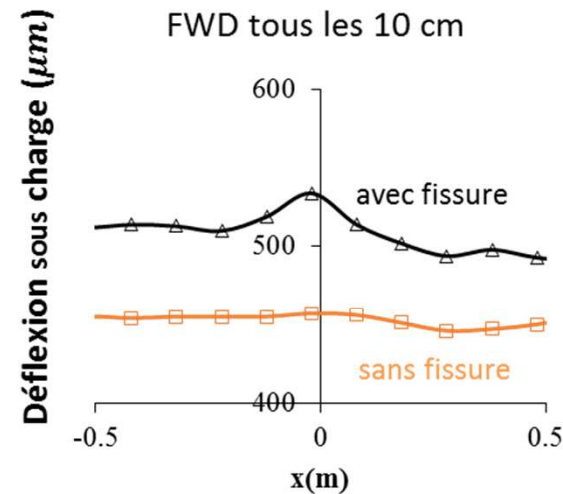
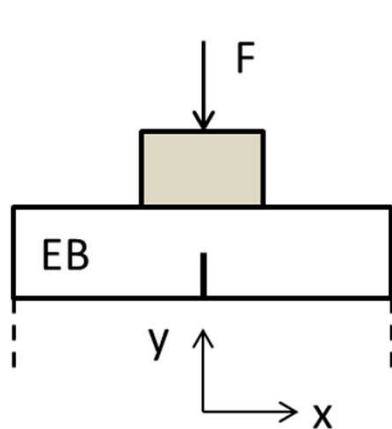
Modèles de calcul pour chaussées fissurées

O. Chupin
IFSTTAR/MAST/LAMES

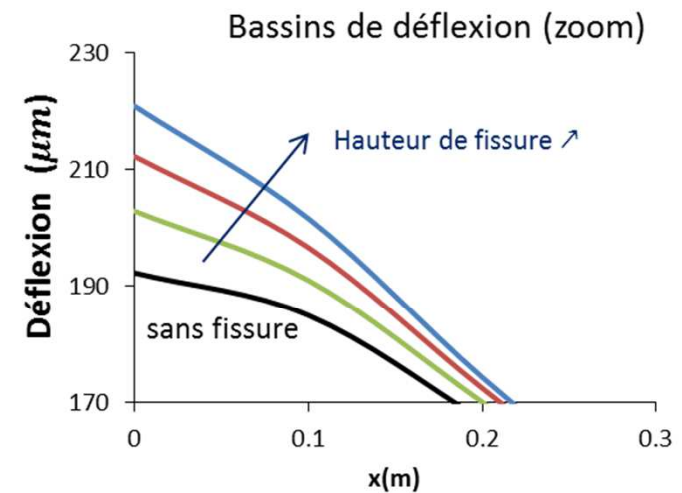
Contexte et objectifs visés

- Aide à l'interprétation des mesures d'auscultation à échelle « locale » (métrique)

- Exemple : interprétation des mesures de déflexion



Essai



Simulation

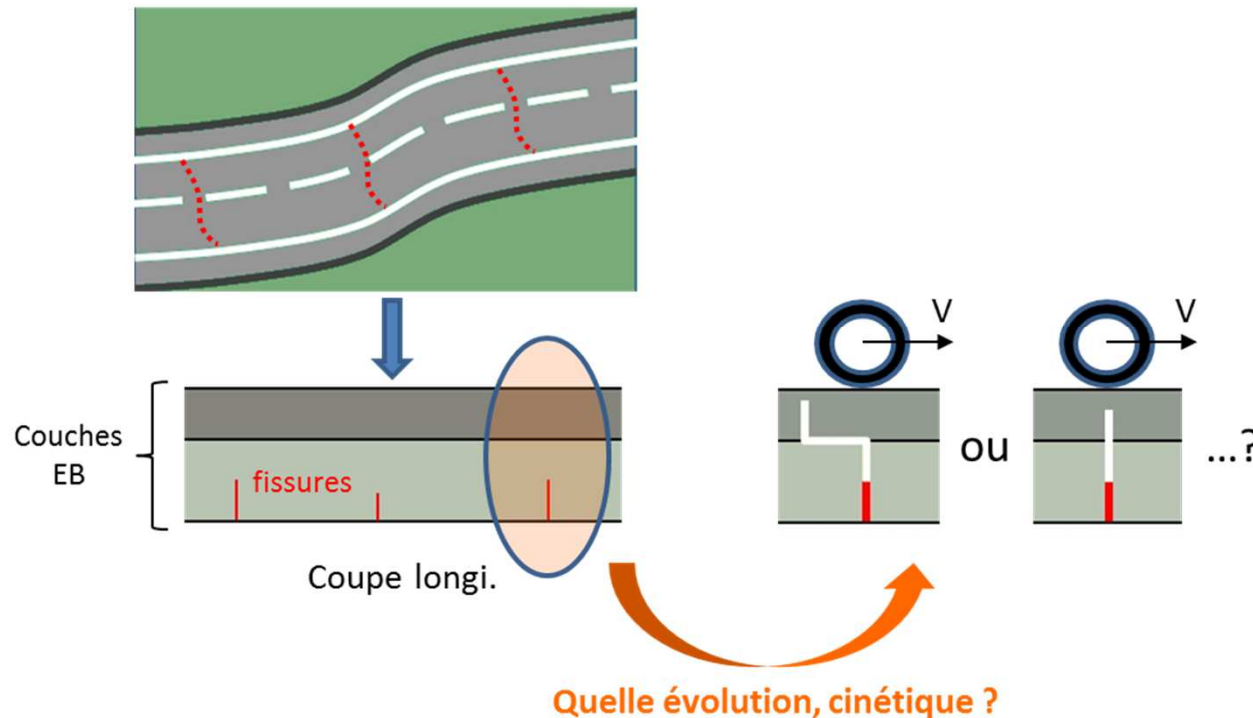
outil = aide à estimation de la hauteur de fissure

- Même raisonnement possible pour décollement

Contexte et objectifs visés

- Aide à l'évaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées
 - Evolution sans maintenance à partir de la connaissance d'un état d'endommagement à un instant donné (connu par auscultation par exemple)
 - Détermination du scénario probable de ruine à partir de l'état d'endommagement donné

Chaussée avec fissures internes



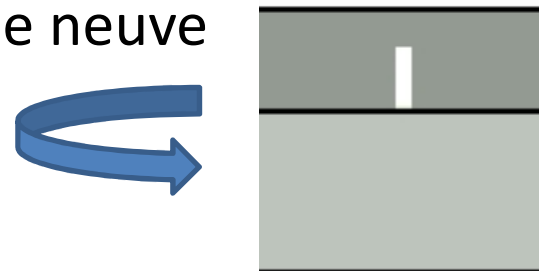
2 aspects à distinguer :
nature de l'évolution (ex. trajet de fissuration/décollement) et cinétique relative et « absolue » (à recouper avec auscultation à grande échelle suivant une approche à définir)

Contexte et objectifs visés

- **Dimensionnement de solutions de renforcement avec prise en compte de couche(s) endommagée(s)**
 - Exemple : couche de matériau neuf sur support fissuré :
Scénario : remontée de fissure ? délaminage ? + cinétique



Attention scénario différent de celui considéré en dimensionnement de chaussée neuve



Un besoin commun

Développement d'outils de calcul et d'expertise de la réponse mécanique de chaussées avec discontinuités (fissuration et/ou décollement d'interface)

- A état d'endommagement fixé : impact sur le comportement des chaussées (ex. aide auscultation)
- Propagation et évolution de l'endommagement/fissuration (détermination des scénarios de ruine et de leur cinétique)

Verrous scientifiques

D'un point de vue modélisation et calcul

- théoriques : algorithme de propagation de fissures (notamment en 3D), temps de calcul
- spécificités chaussées : géométrie multicouche, rhéologie thermo-viscoélastique des EB, trafic : charge roulante variable (intensité, géométrie charges) et balayage

Problématique ancienne mais progrès des méthodes numériques et capacités de calcul

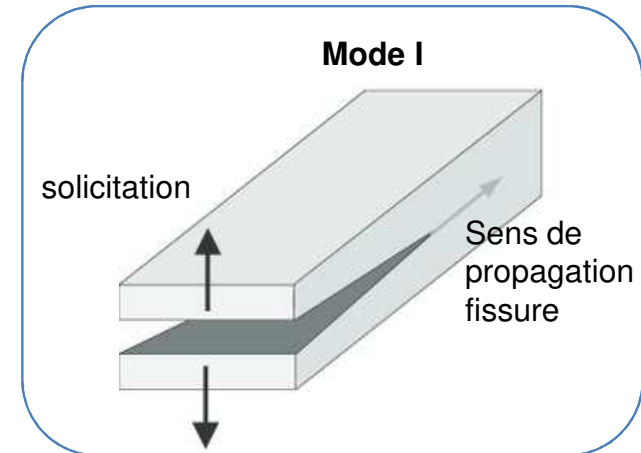
3 approches en développement au LAMES

- **Mécanique de la rupture + modèle de propagation par fatigue**
 - Application laboratoire et structures chaussée 2D pour trajet de fissuration donné
- **Modèle de plaques empilées : M4-5n**
 - Application aux chaussées : permet d'envisager des situations 3D raisonnablement
- **Adaptation aux chaussées de nouvelles méthodes d'étude de la fissuration des solides**
 - **Prise en compte de la viscoélasticité dans approches TLS, phase-field...**
 - **Travail en collaboration avec ECN (thèse B. Shiferaw)**

Mécanique de la rupture + modèle de propagation par fatigue

Rappels

- **Mode de sollicitation étudié :**
 - mode I = mode ouverture de fissure



- **Calculs de fissuration (EF) par l'approche globale utilisant des variables définies au niveau global de la structure**
 - G (taux de restitution d'énergie = énergie disponible pour créer un accroissement de fissure) et K_I (facteur d'intensité des contraintes)
 - Cette approche permet de découpler les aspects calculs de structure et intégration du modèle de propagation

Approche globale de la fissuration

- **Etape 1 : Calcul EF**

Méthode énergétique basée sur calcul de G . Ne nécessite pas de maillage fin car « évite » singularités en pointe de fissure. Pour trajectoire de fissure donnée :

- Calcul de $W_{ext}(A)$ pour différentes aires de fissure A

- $G(A) = \frac{1}{2} \frac{dW_{ext}(A)}{dA}$ (effort imposé) et $K_I(A) = \sqrt{\frac{EG(A)}{1-\nu^2}}$ (déf. planes)

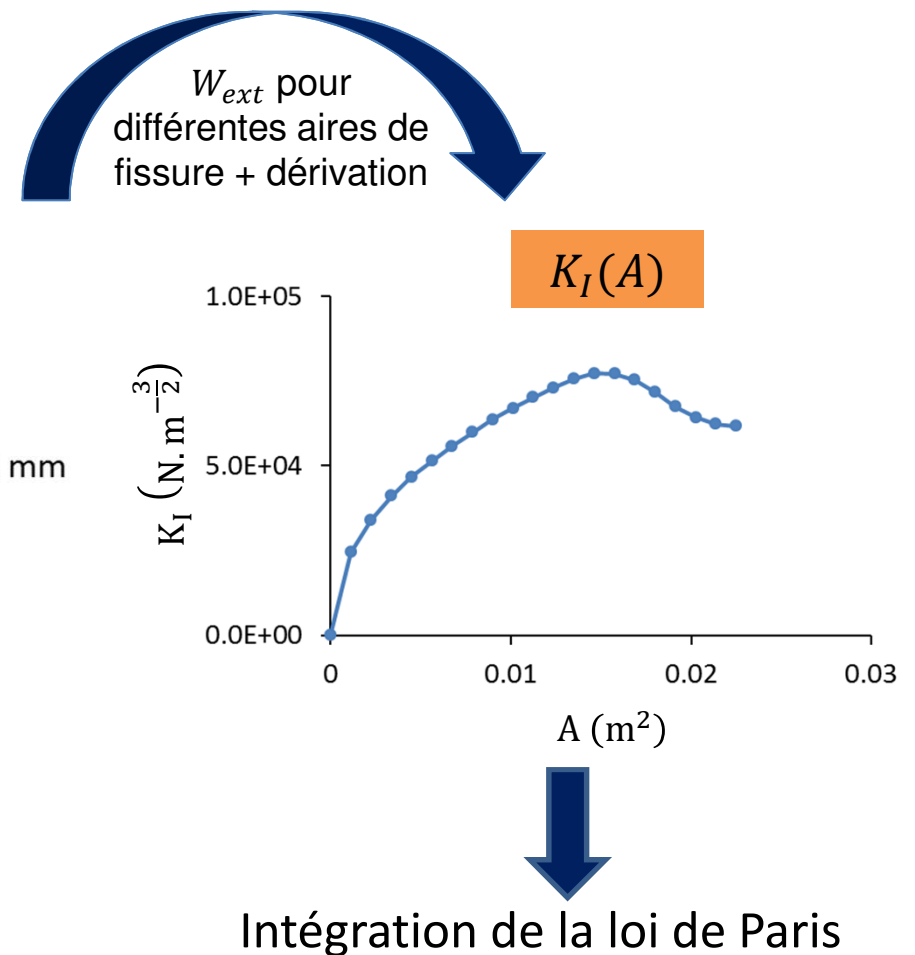
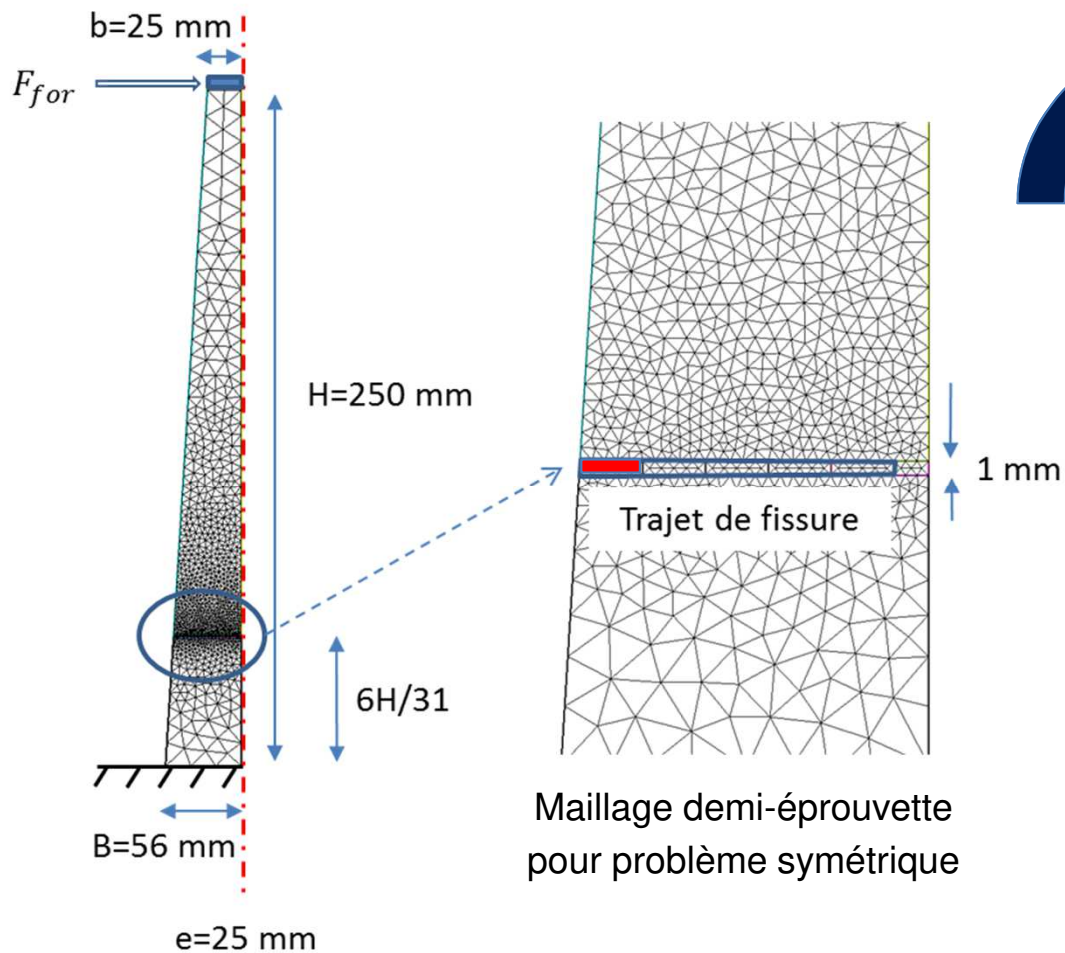
- **Etape 2 : Intégration du modèle de propagation**

- Loi de Paris : $\frac{dA}{dN} = C K_I^\eta(A)$ avec $A(N = 0^+) = A_0$

➔ **Implémentation dans un script Freefem++**

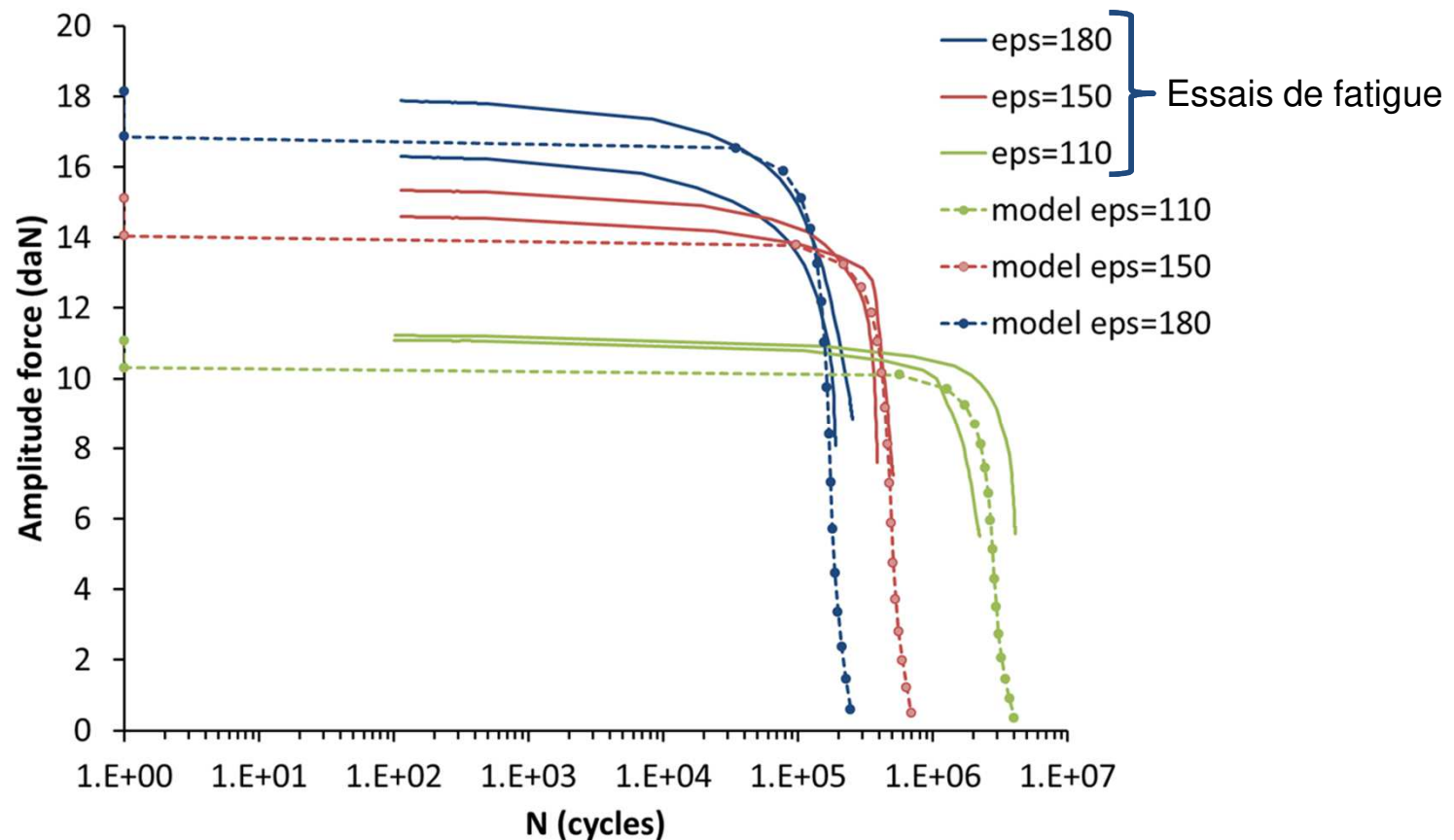
Application : essai de fatigue en flexion 2pt

- Calculs EF (2D) en élasticité avec $E = |E^*(\theta = 10^\circ\text{C}, f = 25\text{Hz})|$ (après caractérisation par essais de module complexe)
- Calcul à déformation ε_f imposée



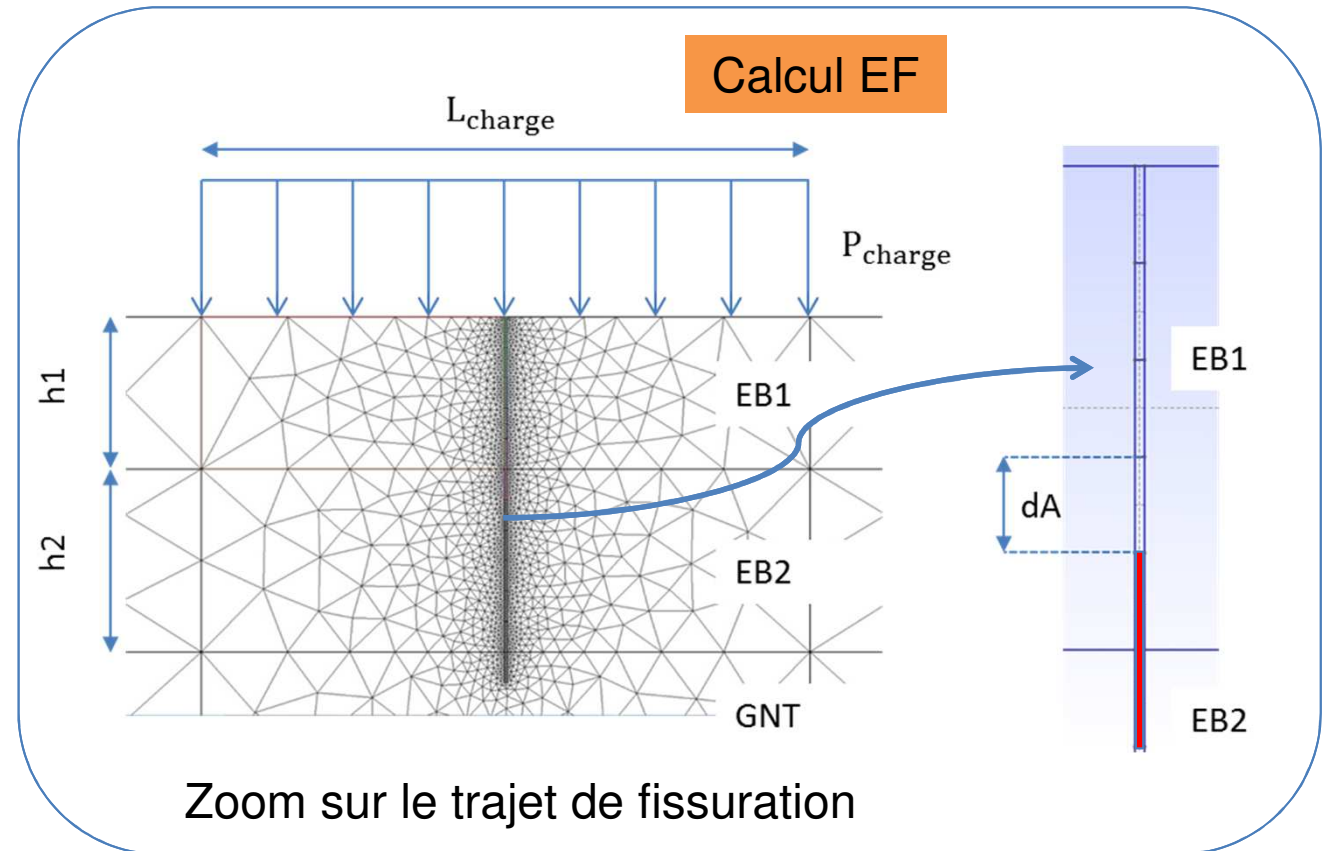
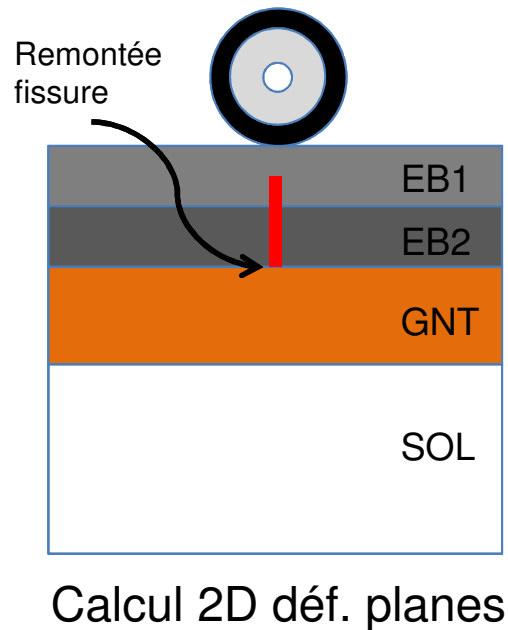
Confrontation à des résultats d'essai

- Calage des paramètres de la loi de Paris sur un niveau de déformation ε_f
- Simulation des autres niveaux à ce même jeu de paramètres



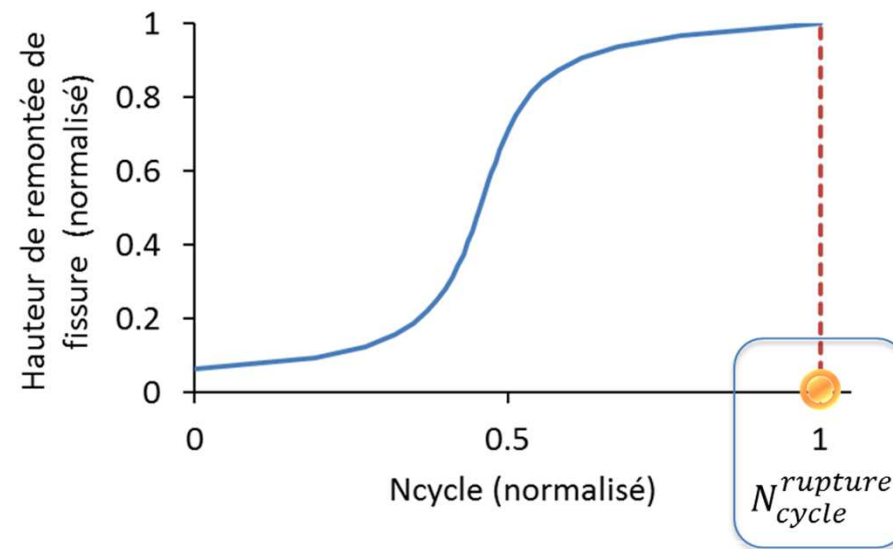
Calcul 2D de structure

- Loi de Paris calée à partir d'essais de fatigue en labo.
- Calcul de la cinétique de remontée de fissure dans couches d'EB
- Même approche que pour l'essai de fatigue : (1) Calcul de $K_I(A)$, (2) Intégration loi de propagation



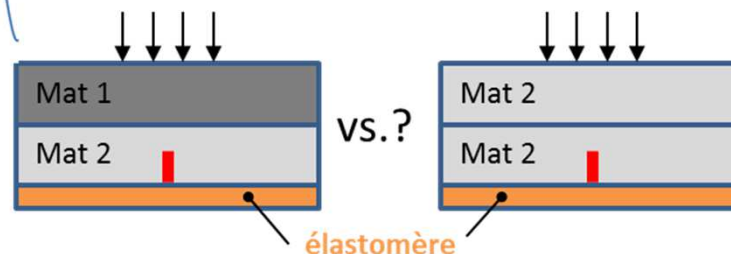
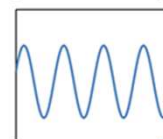
Nombre de cycles à rupture

- Intégration loi de Paris $\rightarrow N_{cycle}$ pour une hauteur de remontée de fissure



- Calcul 2D utile pour étude comparative entre matériaux et structures
- Besoin de validation sur essais de labo. à échelle intermédiaire

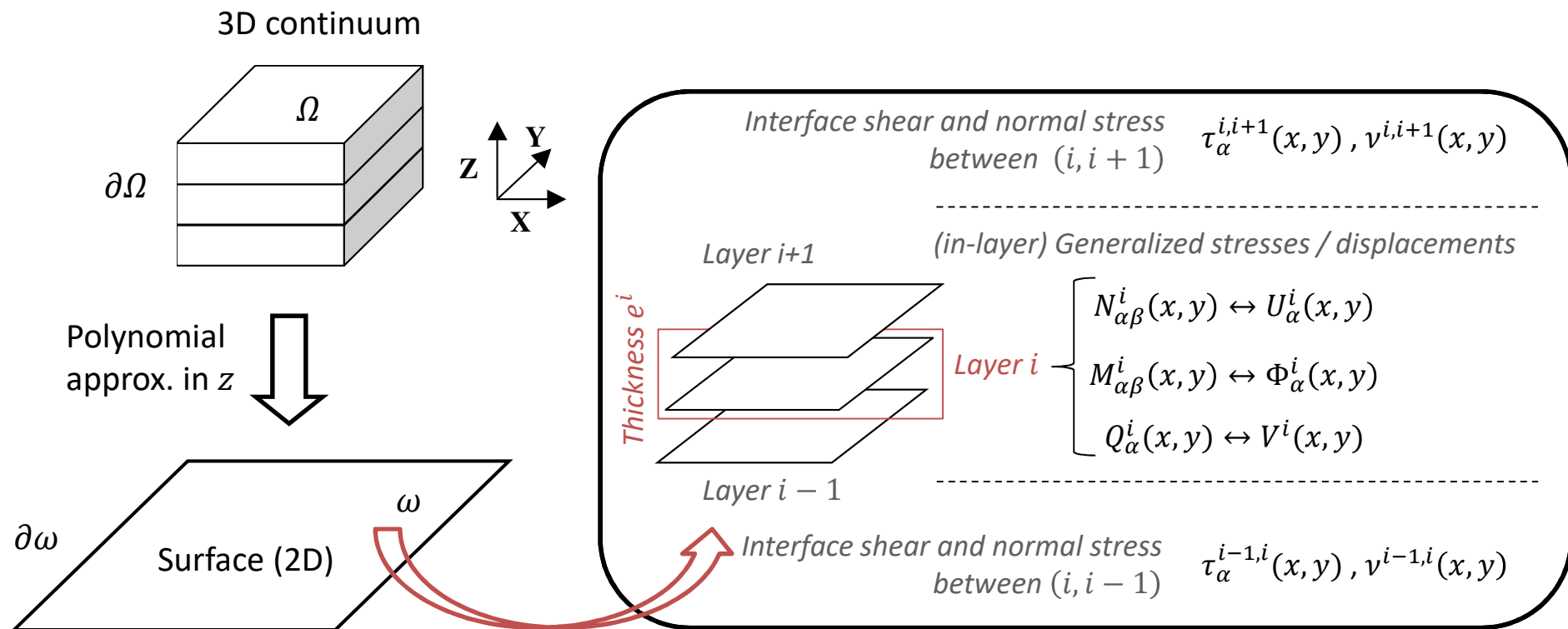
Pilotage en contrainte
(vers le bas)



Modèle de plaques empilées : M4-5n

Modèle de plaques superposées (Chabot 1997)

- Chaque point de ω contient les champs généralisés de couche et d'interface représentatifs de la structure 3D
- Propriétés matériaux + épaisseur par couche



For layers 1 and $n + 1 \rightarrow$ surface loading in terms of interface stresses

On $\partial\omega = \partial\omega_U \cup \partial\omega_T \rightarrow$ boundary conditions per layer

Avantages du modèle

- Problème « réel » 3D ramené à un calcul 2D
- Prise en compte aisée de fissures verticales et décollement
- Valeurs finies des efforts généralisés en front de fissure

Récemment :

- Résolution par méthode éléments finis mixte + implémentation dans script Freefem++ (thèse H. Nasser, 2016) → outil opérationnel

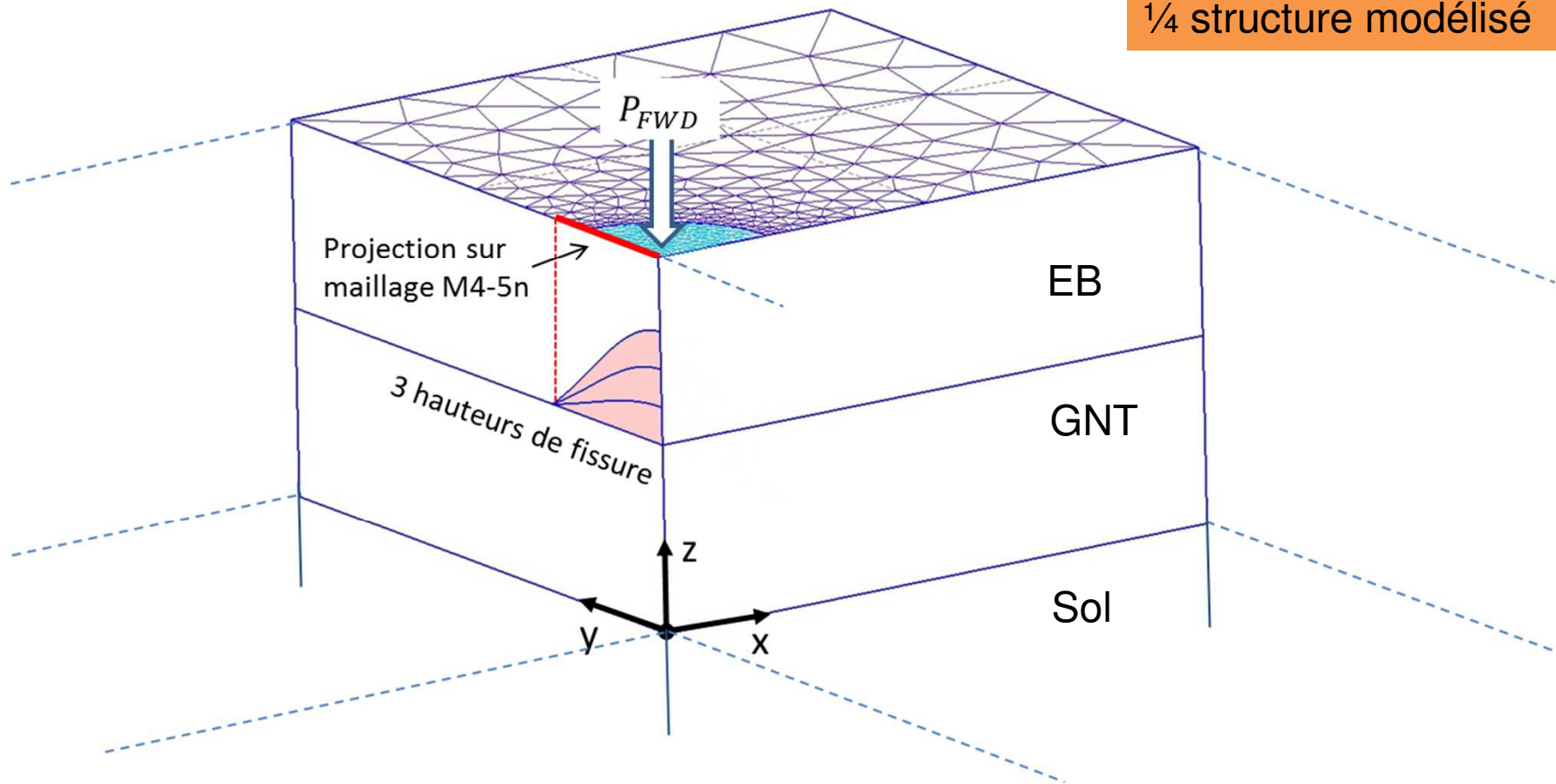
En cours :

- vers la propagation de fissure (définition de critères en efforts généralisés, algorithme d'avancée de front fissure...)

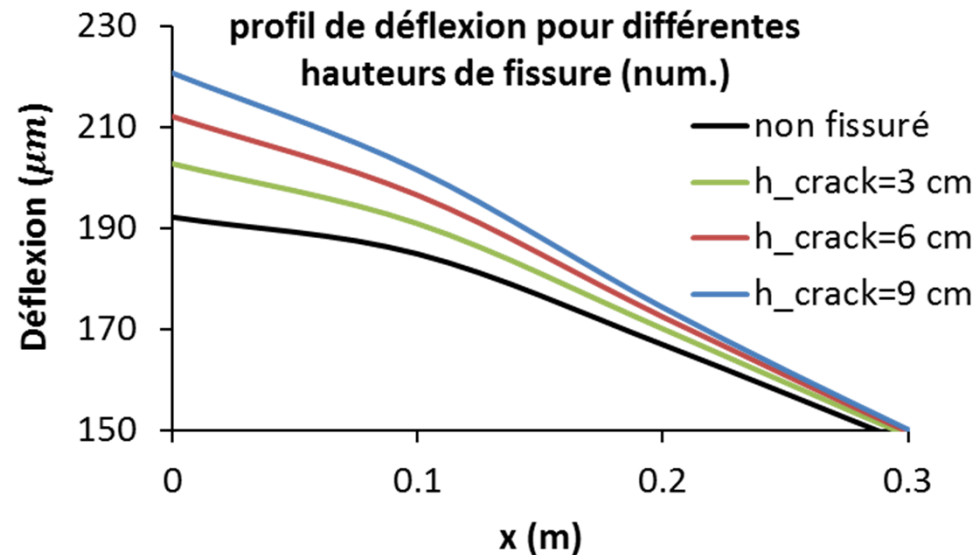
Exemple d'application : sensibilité de la déflexion à la présence d'une fissure verticale

- Structure EB + GNT + Sol \rightarrow 3 couches M4-5n + ressorts de Winkler
- Influence de la hauteur de fissure sur déflexion

$\frac{1}{4}$ structure modélisé



Déflexion vs. hauteur de fissure



- Déflexion ↗ avec hauteur de fissure
- Effet constaté lors de campagnes FWD sur structures « tests » fissurées + ordre de grandeur retrouvé
- Fissuration de qq cm détectable avant remontée en surface si FWD effectué aux bons endroits

Adaptation aux chaussées de nouvelles méthodes d'étude de la fissuration des solides

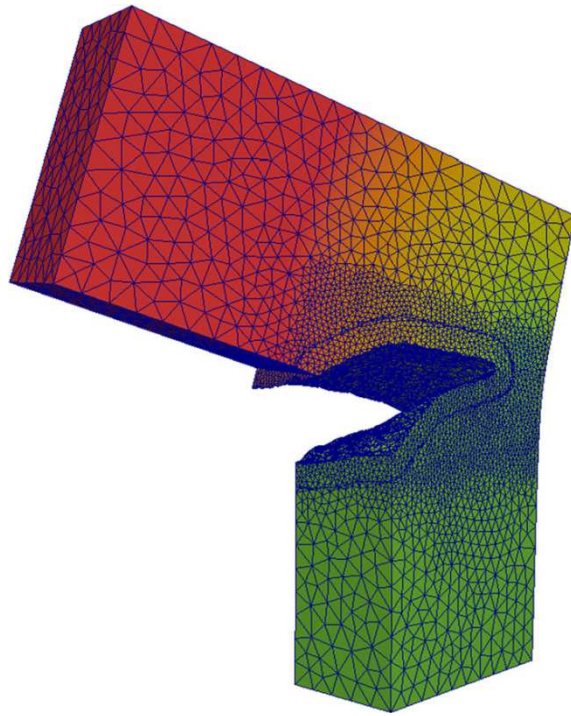
Approche TLS (Thick Level Set) (Moës et al., 2011)

- **Modèle d'endommagement “avancé” pour calcul de structures**
 - Traitement non local de l'endommagement (courbe de niveau + propagation) pour éviter localisation parasite
 - Transition “naturelle” vers la fissuration + $[[u]]$ par usage X-FEM (EF enrichis pour permettre propagation de fissures sans remaillage)
- **Permet initiation endommagement/fissuration + propagation, branchement et coalescence**
- **Code numérique 2D/3D développé à l'ECN**
- **Actuellement : thèse en collaboration IFSTTAR/ECN pour introduire viscoélasticité dans TLS (B. Shiferaw, 2016-2019)**

Approche TLS (Thick Level Set)

- Illustrations en élasticité

A. Salzman, N. Moës, N. Chevaugeon ; Int J Fract (2016) 202:21–49



Fissuration poutre en L
(détection et initiation automatique
de l'endommagement)

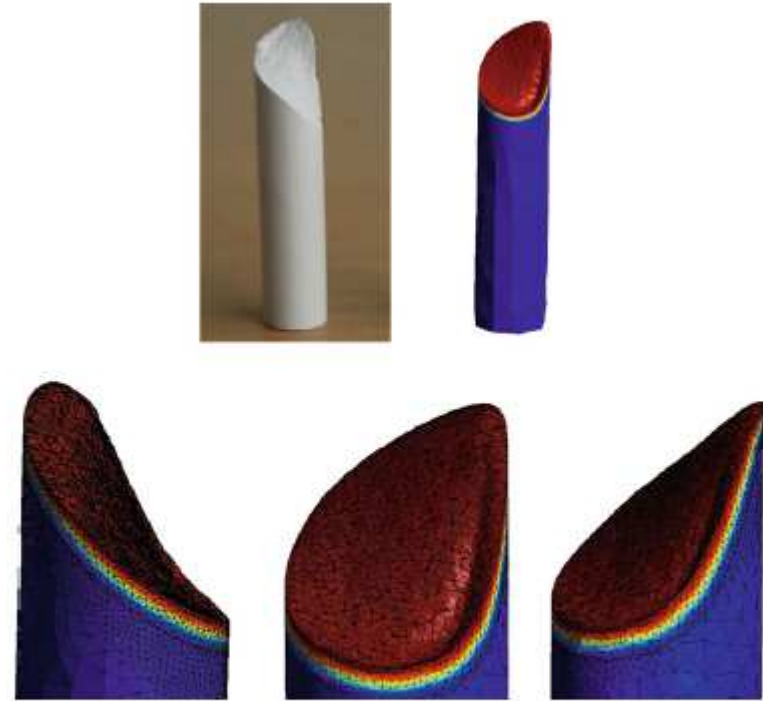
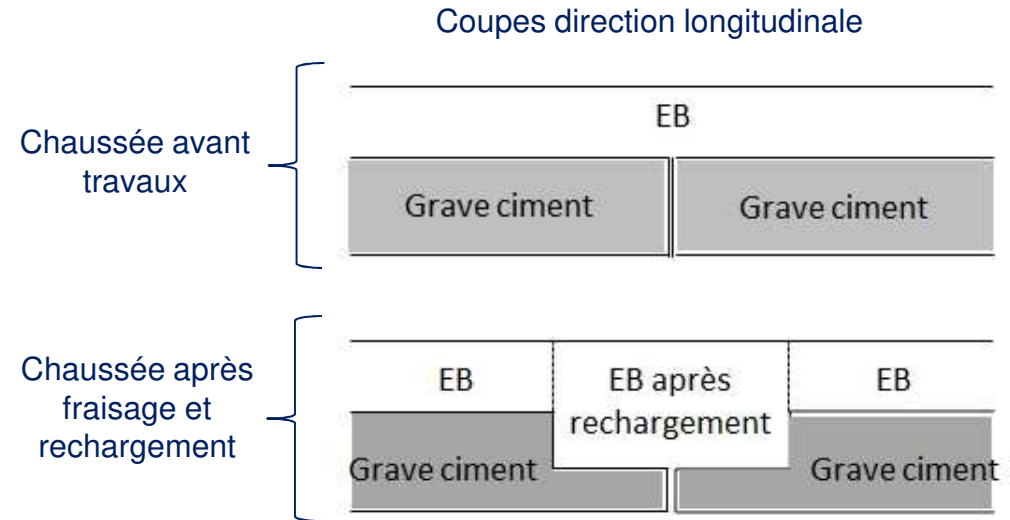


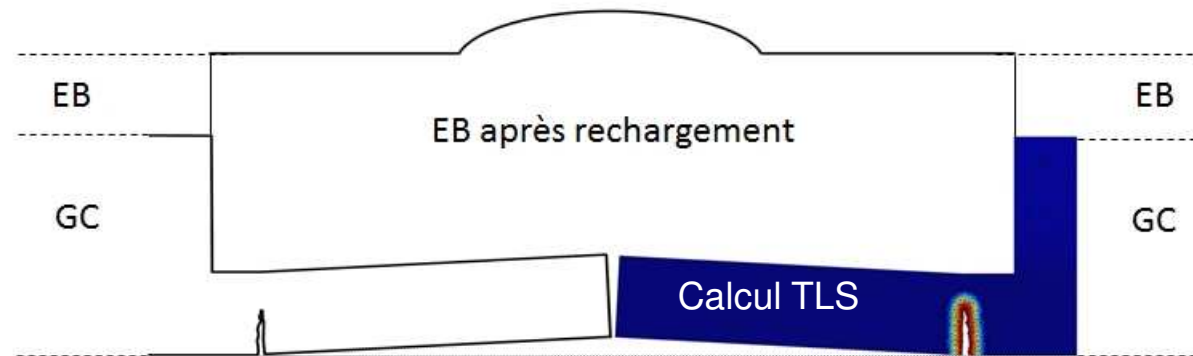
Fig. 17 Chalk comparison of the final state between simulation and experiment presented in [Bordas et al. \(2008\)](#) (Reprinted from [Bordas et al. \(2008\)](#) Copyright (2007) with permission from Elsevier)

Torsion d'une craie

Application (expertise) : explication de formation de gonfle en surface de chaussée semi-rigide (après fraisage GC et rechargement) (Chupin et al., conf. mcd2016)



Calcul TLS : initiation endommagement + propagation de fissure dans GC dus à effet de dilatation empêchée



Mise en « chapeau » GC + viscoplasticité EB → formation gonfle (réf.)

Merci de votre attention

Coordonnées Intervenant

Organisme

Adresse

Tel/Mail