

Outils de modélisation de la fissuration des chaussées

O. Chupin, J.-M. Piau, A. Chabot
IFSTTAR/MAST/LAMES

Contexte

**Analyse de la réponse mécanique de chaussées avec discontinuités
(joint de construction, fissuration/décollement d'interface)**

- A état d'endommagement fixé : redistribution des contraintes/déformations et impact sur le comportement global de la structure ?**
- Propagation et évolution de l'endommagement/fissuration**

Avec pour objectifs

- **Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées**
- **Dimensionnement de solutions de renforcement avec prise en compte de couche(s) endommagée(s)**
 - **Exemple : couche de matériau neuf sur support fissuré : remontée de fissure (cinétique) ? délaminage ?**
- **Meilleure connaissance des mécanismes d'endommagement**

Verrous scientifiques

D'un point de vue modélisation et calcul

- besoin d'outils (3D) permettant la prise en compte explicite de ces discontinuités (différent dimensionnement chaussées neuves)
- + spécificités chaussées : géométrie multicouche, matériaux (viscoélasticité), charge roulante, trafic (fatigue), température...

Progrès des méthodes numériques et capacités de calcul

→ Une partie des travaux dans le cadre du PN DVDC (thème 3)

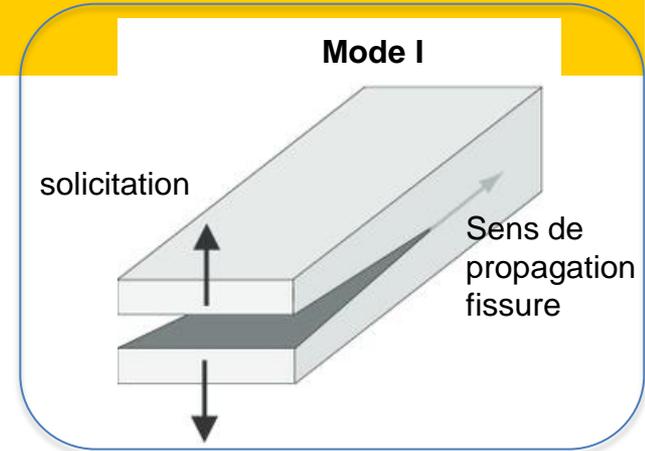
Autres travaux théoriques sur ce thème : U. Limoges, INSA Strasbourg

Plan de la présentation

- **Mécanique de la rupture + modèle de propagation par fatigue**
 - **Modélisation 2D de l'essai de fatigue (flexion 2pt)**
 - **Calcul 2D de structure**
 - **Passage 2D / 3D ?**
- **Modèle de plaques empilées : M4-5n**
 - **Modélisation essai FWD sur structure fissurée (état de fissuration donné)**
- **Adaptation aux chaussées du « nouveau » modèle TLS (propagation endommagement + fissuration)**
 - **Illustration sur l'interprétation d'un problème de gonfle**

Mécanique de la rupture + modèle de propagation par fatigue

- 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)

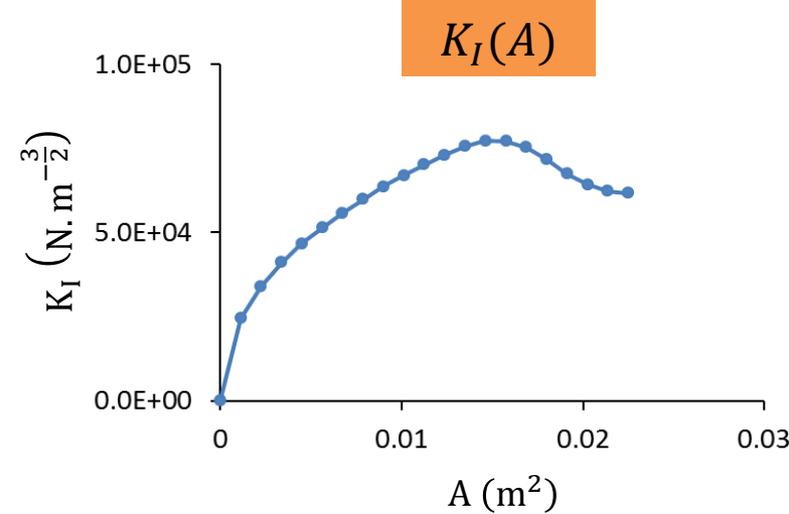
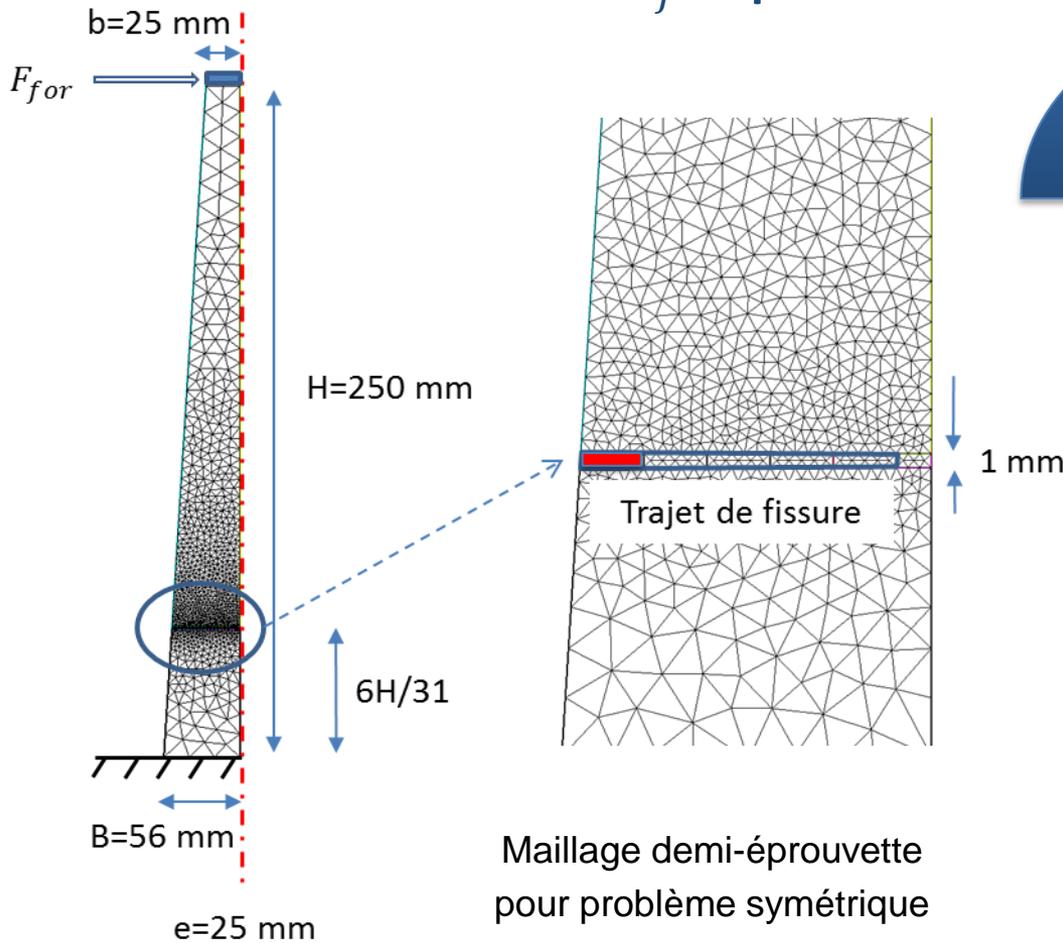
- **Etape 2 : Intégration du modèle de propagation**

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

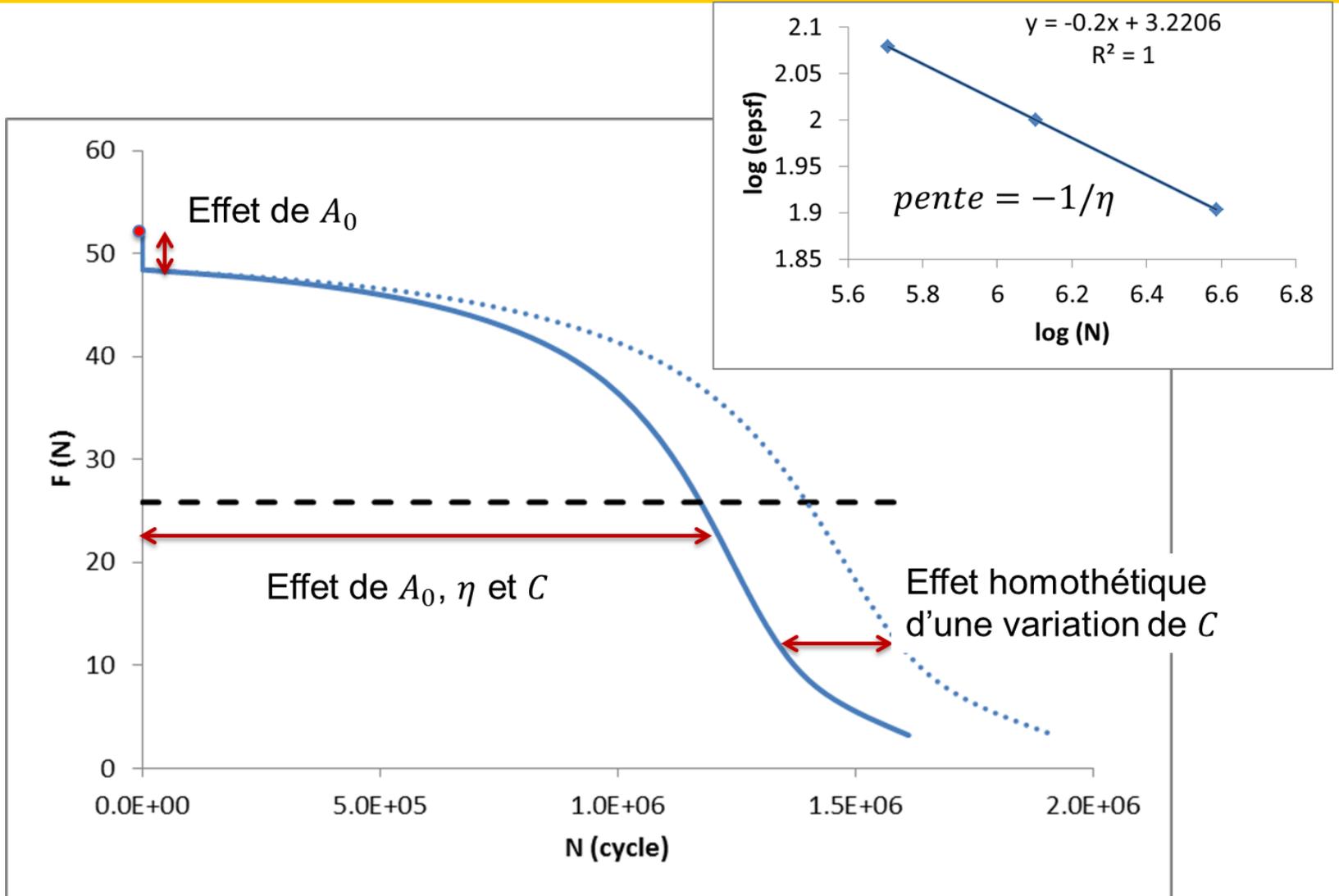
➔ **Implémentation dans un script Freefem++**

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

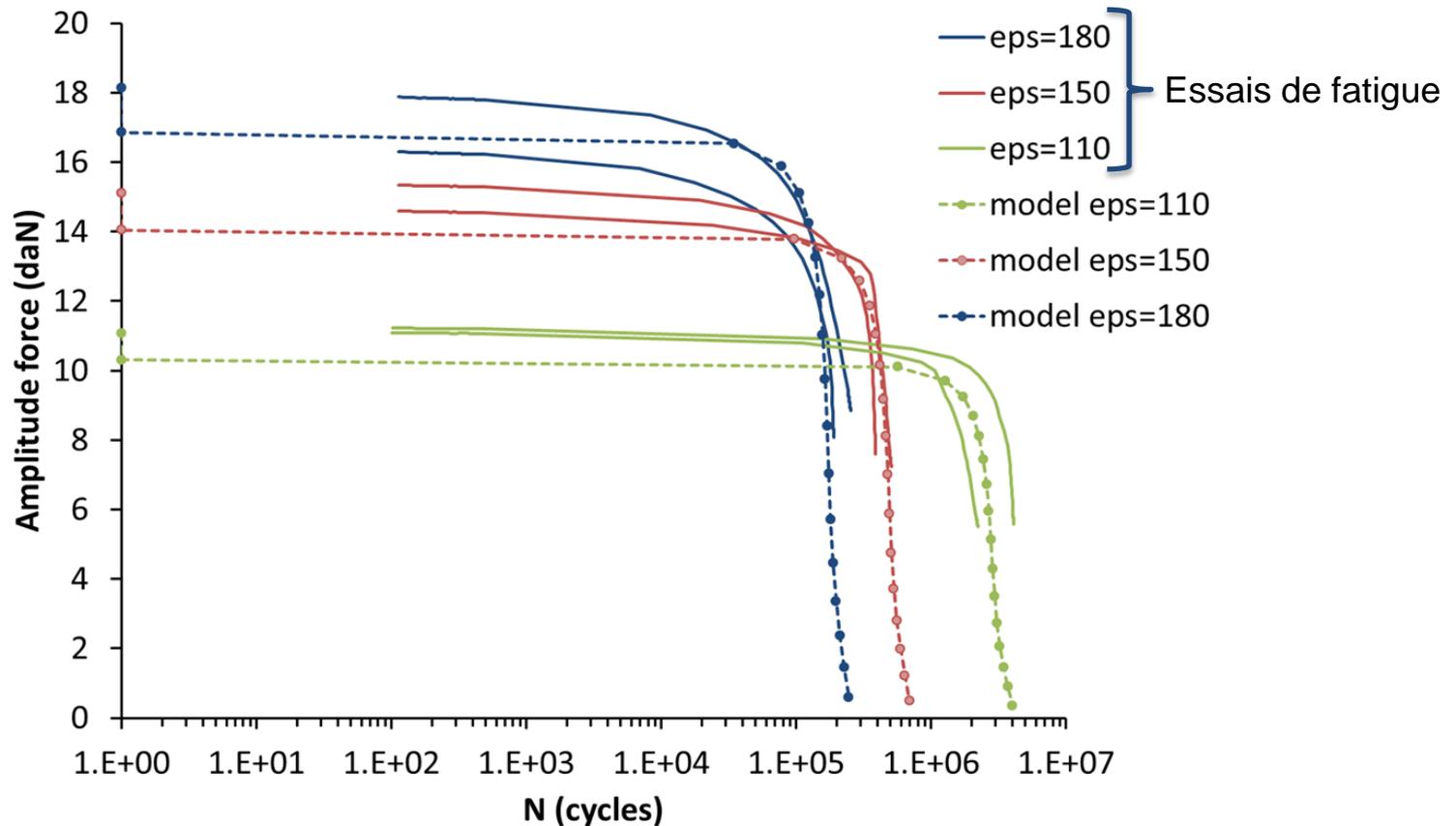


Intégration loi de Paris : résultat générique



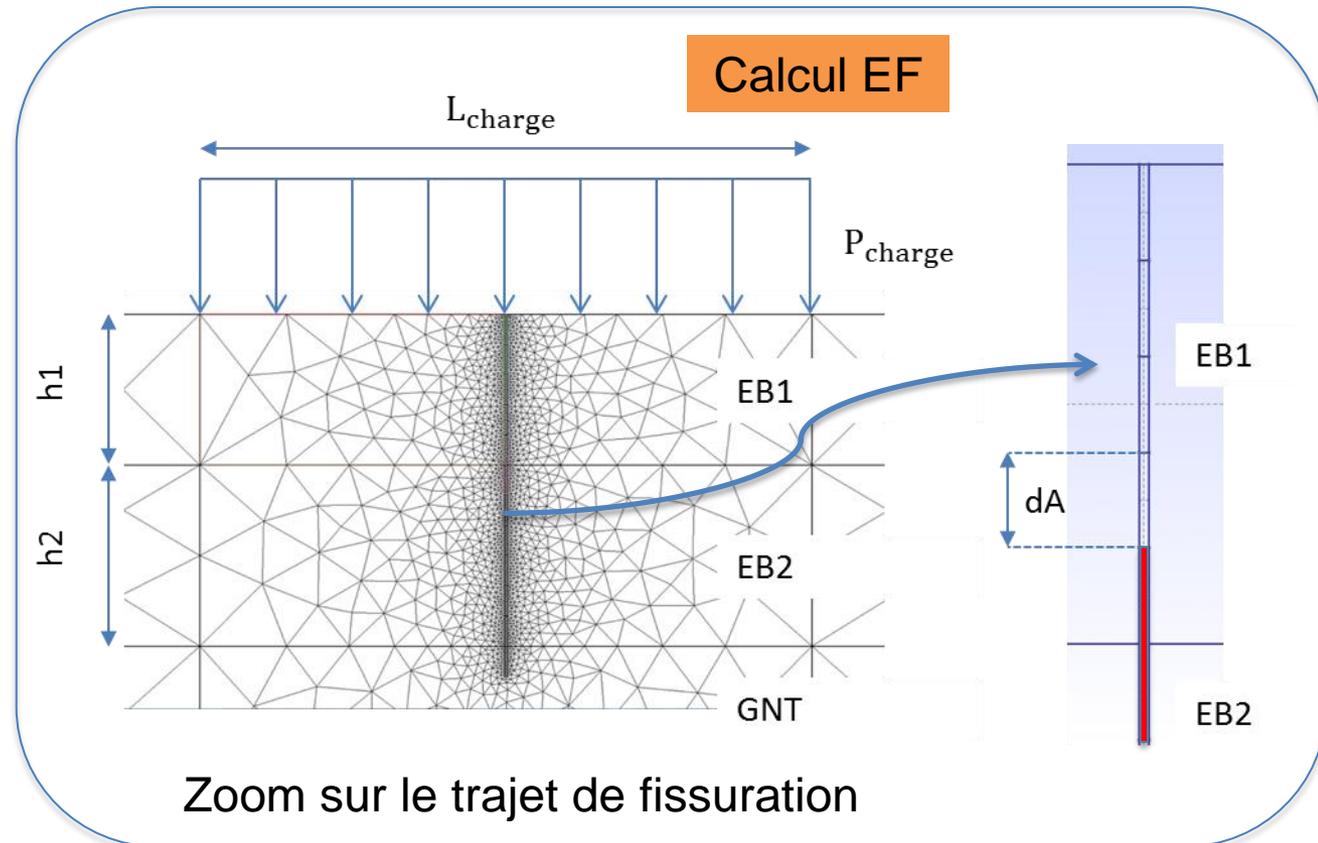
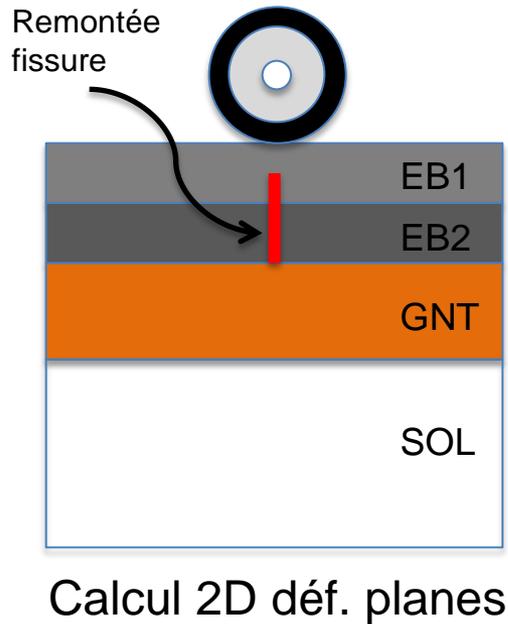
Confrontation à des résultats d'essai

- 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



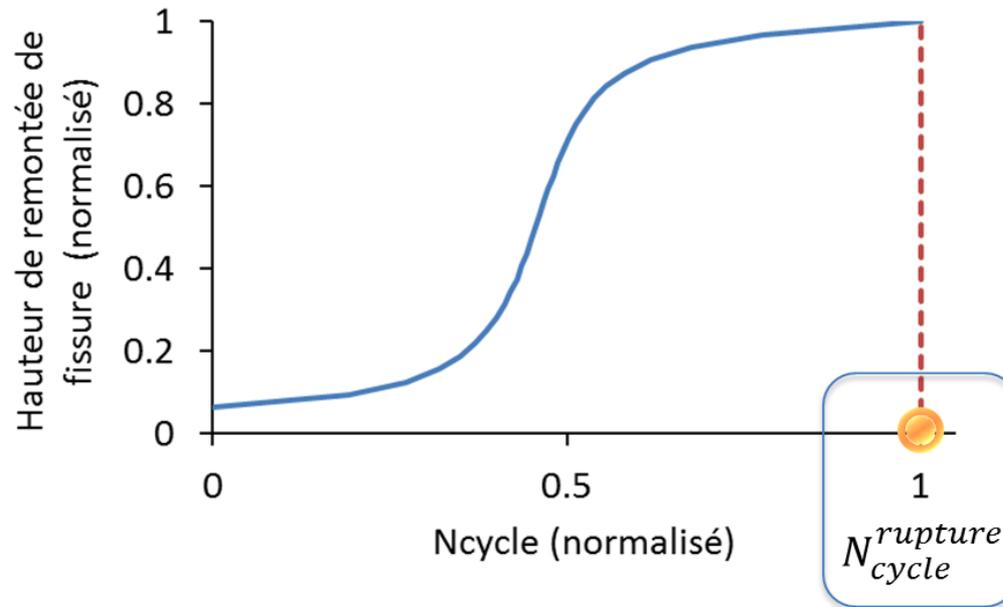
Calcul 2D de structure

- 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



- Pb du calcul 2D : P_{charge} représentative du cas réel 3D ?

$\frac{P_{charge}^{deformation}}{P_{charge}^{deflexion}} \approx 2 \rightarrow$ ratio de l'ordre de 50 à 100 sur $N_{cycle}^{rupture}$

- Calcul 2D utile pour étude comparative entre matériaux et structures \rightarrow sinon 3D mais complexité géométrie des fissures + propagation

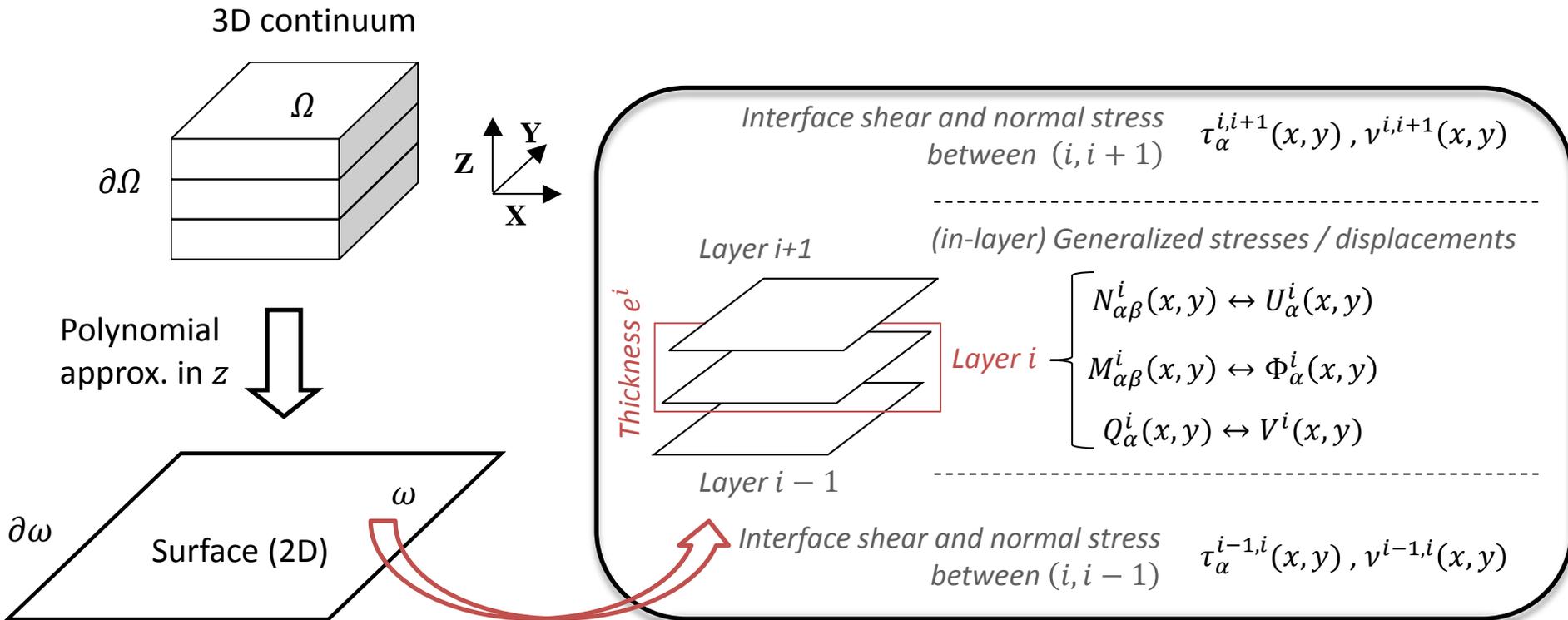
Calcul 3D avec M4-5n (géométrie de fissuration donnée)

(Nasser et al., 2018)

- **Modèle de « plaques superposées » sur ressorts de Winkler**
 - **Formulation (éq. équilibre, éq. compatibilité, LC, CL) écrite en termes de champs généralisés (déplacements, déformations, efforts) par couche**
- **Problème « réel » 3D traité par calcul EF 2D**
- **Valeurs finies des efforts généralisés en front de fissure**
- **Prise en compte aisée de géométrie de fissure**
- **Résolution par méthode éléments finis mixte + implémentation dans script Freefem++ (thèse H. Nasser, 2016) → outil opérationnel**

Description du M4-5n (Chabot, 1997)

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

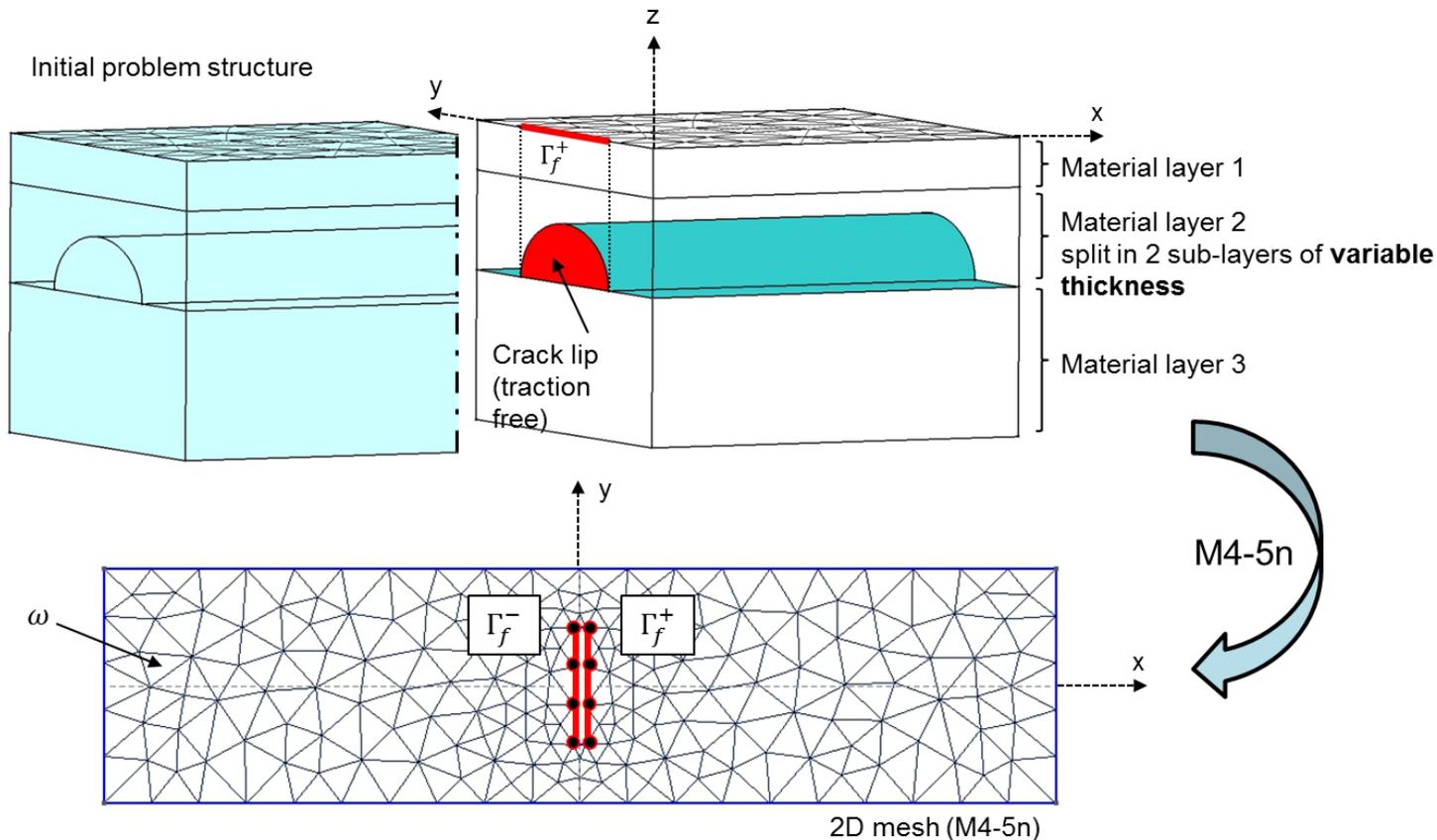


For layers 1 and $n + 1 \rightarrow$ surface loading in terms of interface stresses

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

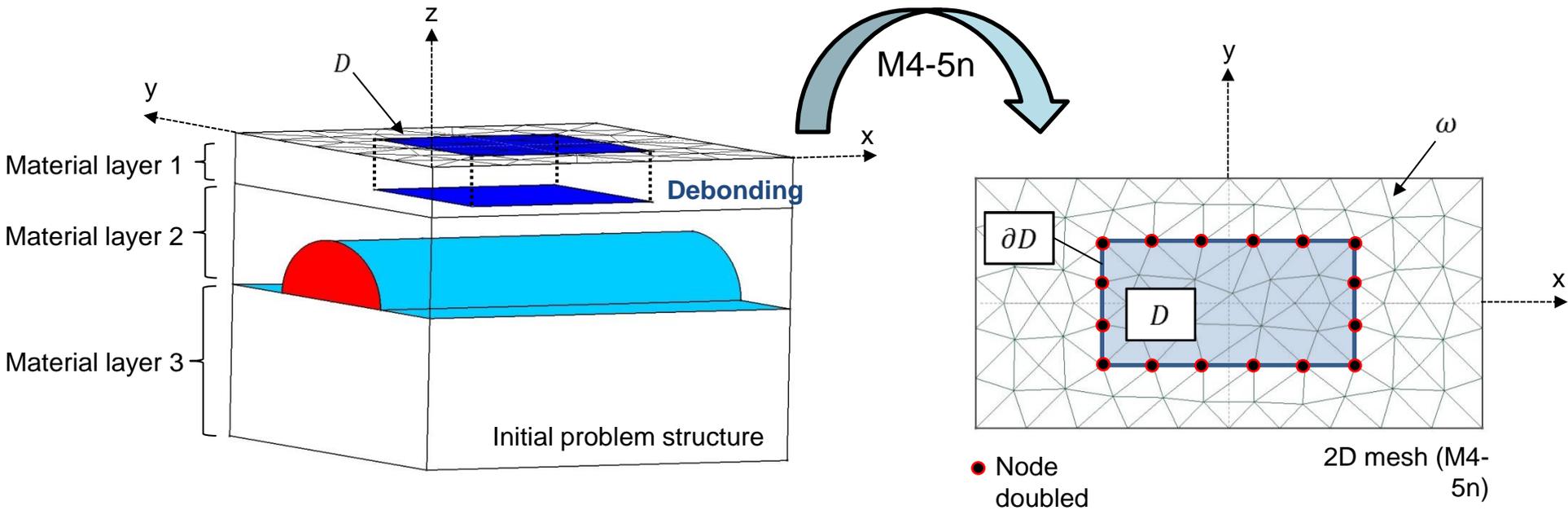
Prise en compte de fissures verticales (ex. plan (y, z))

- Couche fissurée séparée en 2 couches d'épaisseur variable pour prise en compte de la géométrie de fissure
- Conditions de bord libre appliqué sur les lèvres de la fissure (de la couche fissurée)
- Géométrie de la fissure pour calcul EF : projection dans plan (x, y) (maillage simple)



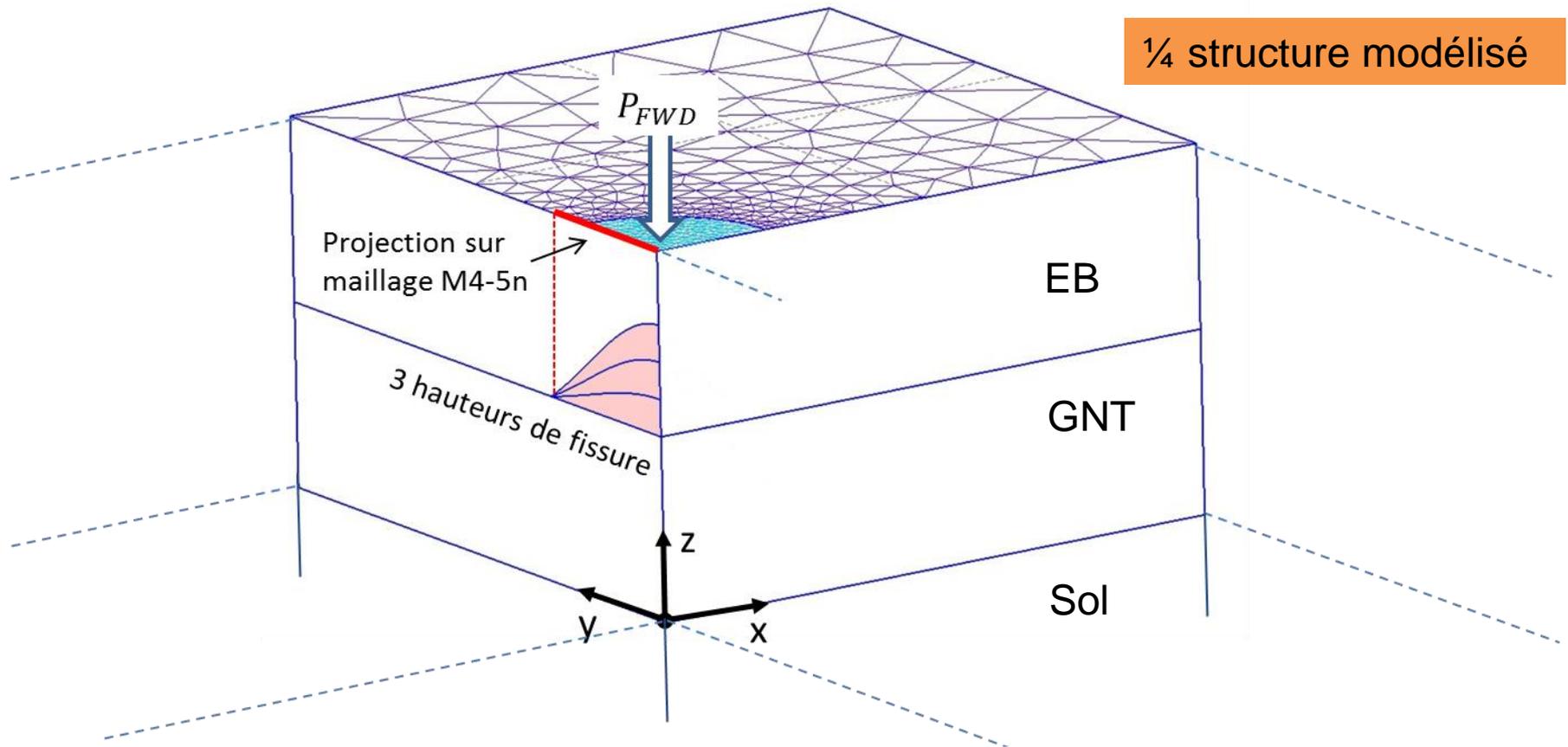
Prise en compte de décollement d'interface

- Rendre les efforts d'interface nuls sur la surface décollée
- Idem : dédoublement des nœuds sur contour de la surface décollée

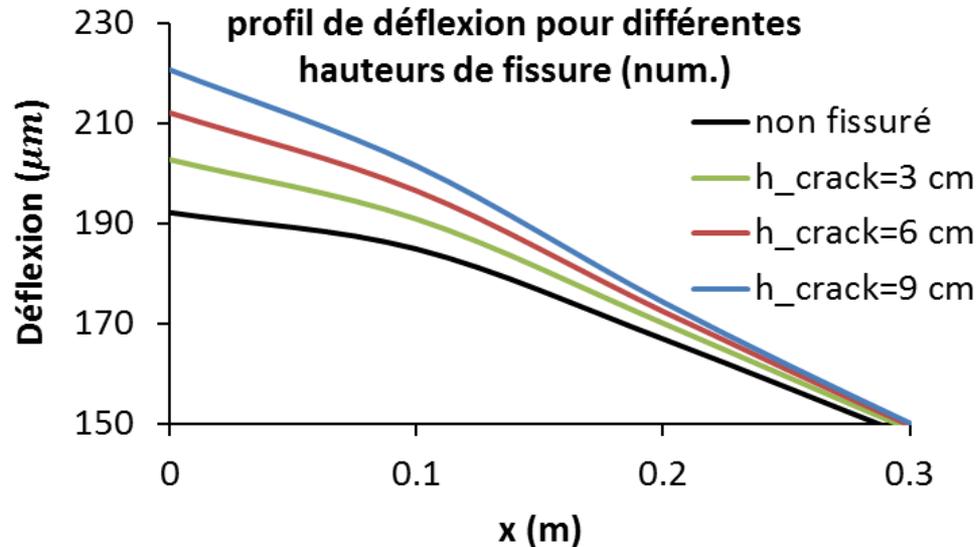


Exemple d'application : sensibilité de la déflexion à la présence d'une fissure verticale (FWD)

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



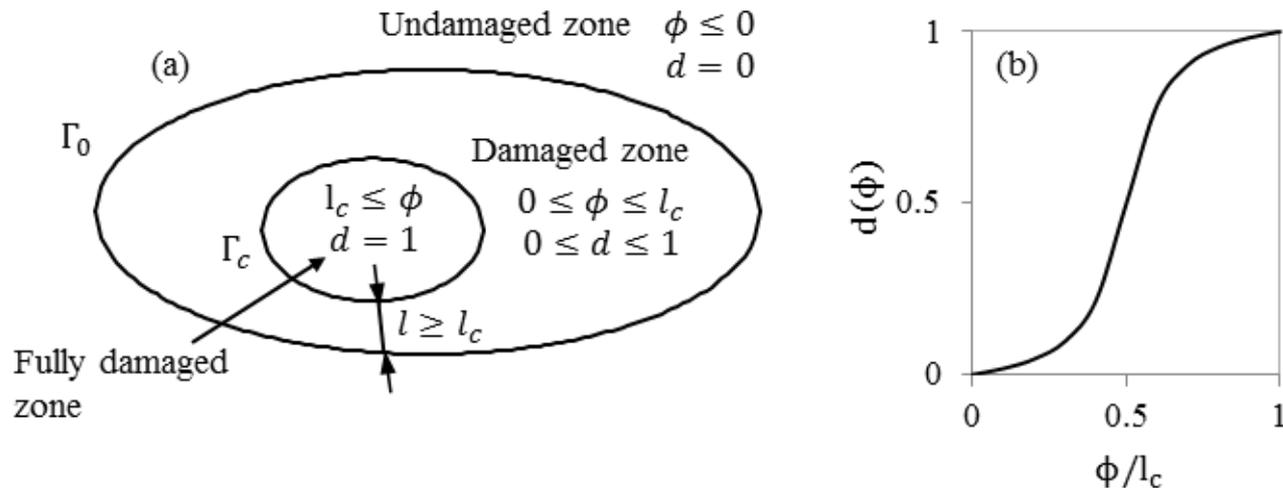
Déflexion vs. hauteur de fissure



- 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
- Perspectives M4-5n (DVDC) : vers la propagation de fissure (critère en efforts généralisés, algorithme d'avancée de front fissure...)

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**



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

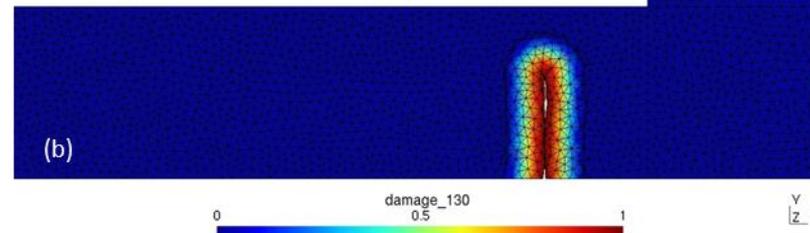
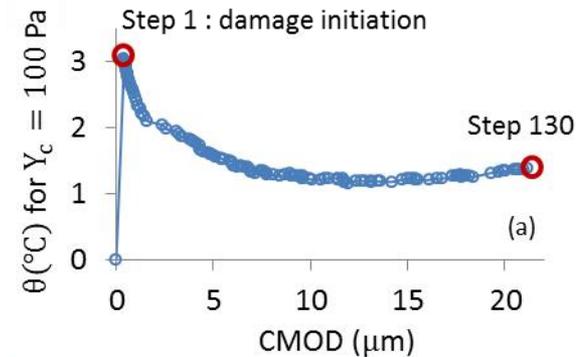
- **Permet initiation endommagement/fissuration + propagation, branchement et coalescence**
- **Code numérique 2D/3D développé à l'ECN**
- **Actuellement : thèse en collaboration IFSTTAR/ECN pour introduire viscoélasticité dans TLS (B. Shiferaw, 2016-2019)**

Application : mécanisme de formation de gonfle en surface de chaussée (cf. Chupin et al., conf. mcd2016)



Gonfle sur chaussée semi-rigide réhabilitée :

Explication par TLS d'un mécanisme basé sur fissuration de la couche de grave ciment suite à dilatation empêchée



E (Mpa)	20000
ν	0.2
Y_C (Pa)	100
l_C (m)	0.02
α (strain/°C)	10^{-5}

Material parameters

Merci de votre attention