



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

Modèles de dégradation des structures

*C. Chazallon, Saida Mouhoubi, L. Coulon ICUBE, UMR 7357, INSA de Strasbourg
A. Dansou LTDS, UMR 5513, ENI Saint Etienne*

Modèles de dégradation des structures

Objectifs :

Analyser les mesures des bassins de déflexion à la lumière de modélisations mécaniques numériques, de façon à caractériser l'état de fissuration des corps de chaussée.

- Approche par la méthode des éléments finis : cas de la délamination et de la fissuration verticale sans propagation en géométrie 3D
- Approche par les éléments de frontière : cas de la propagation 3D de fissures

(¹) : P. Gaborit, « Comportement thermo-mécanique de structures de chaussées bitumineuses », thèse de doctorat, ENTPE, 2015



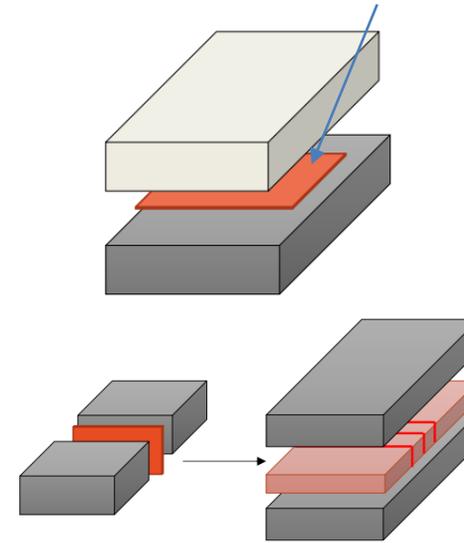
► Les principales dégradations considérées

- **Délamination** entre 2 couches et ouverture de l'interface. Les surfaces considérées peuvent être de grande dimension (**15 m²**) ou réduite (**~ 1 m²**)
- Fissures **transversales** ou **longitudinales** courtes (**1 m**) ou longues (**9 m**) avec un pas d'espacement de 0.2 m
- Variation de l'épaisseur des couches +/-1 cm

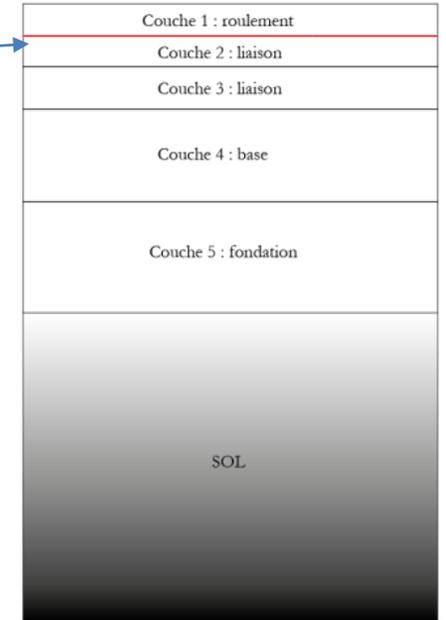
➤ Les déflexions calculées

- **Déflexion absolue**
- **Simulation** de la mesure de la déflexion par le **curviamètre**

Position d'un élément de contact entre la couche 1 et la couche 2



Fissures transversales d'une couche



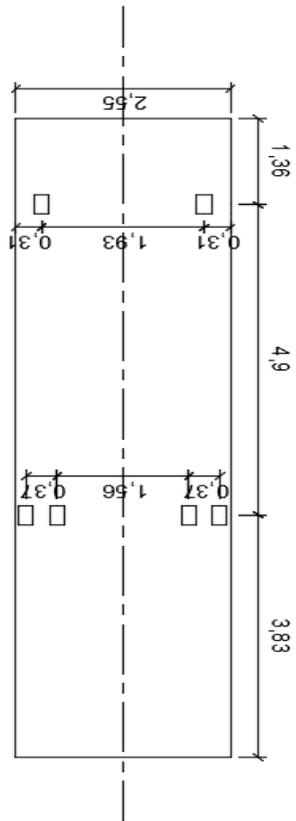
| Couches de chaussée | Roulement CdR (BBM) | Liaison 1 CL1 (GB) | Liaison 2 CL2 (GB) | Base CdB (GB) | Fondation CdF (GB) | Sol (PF3) |
|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|---------------|--------------------|-----------|
| Épaisseur [m] | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,10 | 0,11 | 3,00 |
| Comportement | Élastique | Élastique | Élastique | Élastique | Élastique | Élastique |
| E [MPa] | 4581 | 4581 | 4581 | 5174 | 13680 | 120 |
| ν | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,25 |

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES DE LA CHAUSSÉE BITUMINEUSE ÉPAISSE. CdR à Liaison : données issues de la norme, Base - Fondation : valeurs déduites des essais de module complexe. Température et fréquence mesurée sous le chargement : 17°C et 8.1 Hz

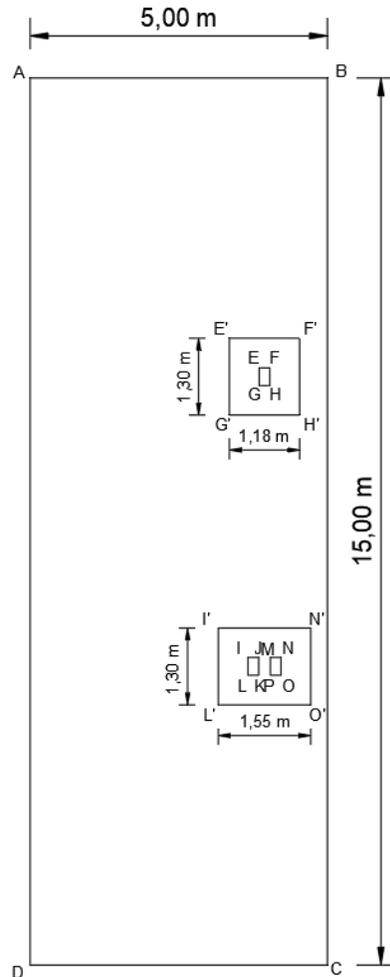
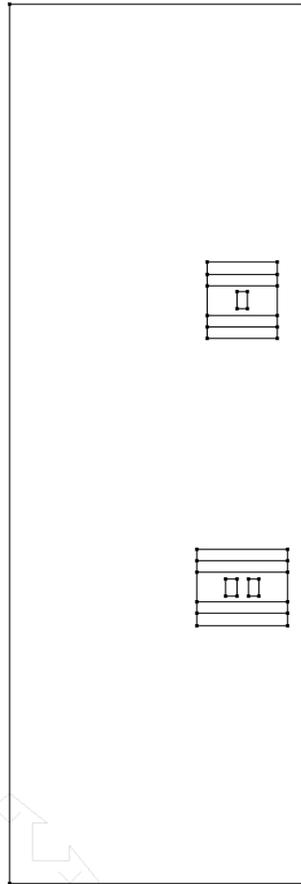


► Chargement de type curviamètre

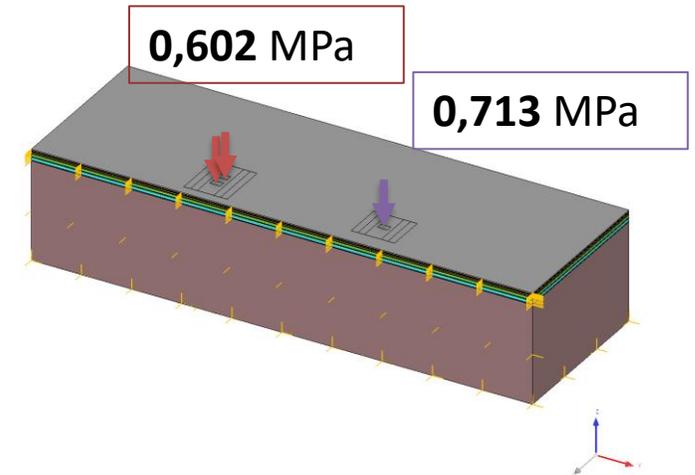
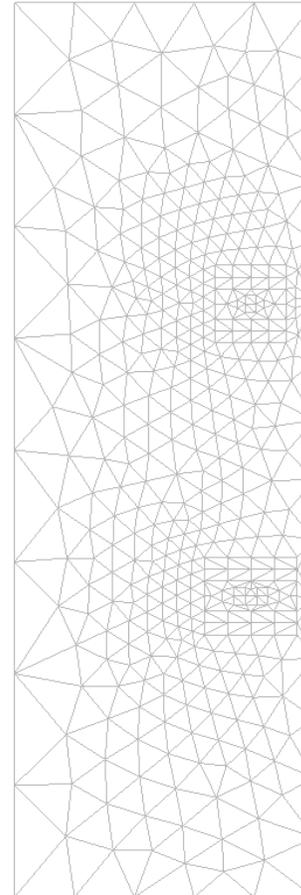
Schéma du chargement
(vue de dessus)



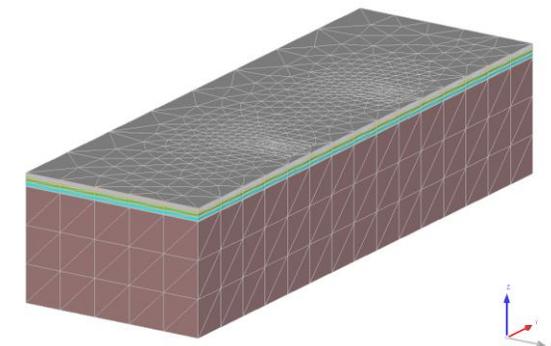
Géométrie



Maillage
 $40 \cdot 10^3$ EF (Q)



Surface de chaque pneumatique
 (0,18*0,3m²)



► Comparaison Alizé - César (EF) Chaussée bitumineuse épaisse

| Déflexion maximale (mm) | Alizé [transversal] | CESAR [transversal] | Alizé [longitudinal] | CESAR [longitudinal] | Ecart Alizé- César [transversal] | Ecart Alizé- César [longitudinal] |
|-------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Sans délamination | -0,2277 | -0,2230 | -0,2115 | -0,2061 | 2% | 3% |
| CdR_L1(*) | -0,2530 | -0,2452 | -0,2337 | -0,2260 | 3% | 3% |
| L1_L2(*) | -0,2800 | -0,2687 | -0,2622 | -0,2506 | 4% | 4% |
| L2_Base(*) | -0,3135 | -0,2973 | -0,2997 | -0,2818 | 5% | 6% |
| Base_Fondation(*) | -0,3263 | -0,3083 | -0,3145 | -0,2944 | 6% | 6% |

* Avec délamination complète de l'interface (5*15 m²)

Caractéristiques de l'interface avec glissement parfait (César (EF))

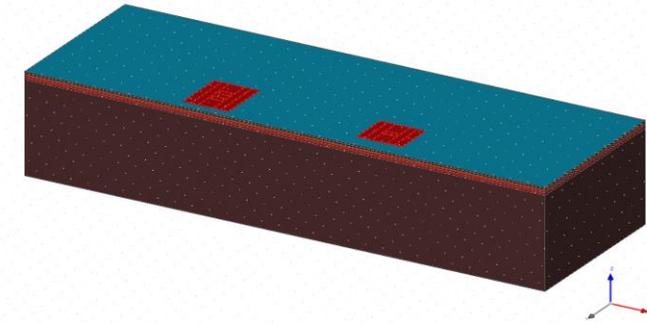
| Interface de Glissement | Rt | E |
|-------------------------|-------|----------|
| CdR – Liaison 1 | 1 MPa | 4581 MPa |
| Liaison 1 – Liaison 2 | 1 MPa | 4581 MPa |
| Liaison 2 – Base | 1 MPa | 4581 MPa |
| Base - Fondation | 1 MPa | 5174 MPa |

Nous constatons que le modèle ALIZE correspond à notre modélisation sur le logiciel CESAR (EF).

Le glissement parfait du logiciel ALIZE correspond à une surface de glissement avec un coefficient de résistance à la traction $R_t = 1 \text{ MPa}$ (limite d'ouverture en traction) et un module d'Young égal au module le plus petit de deux couches en contact.

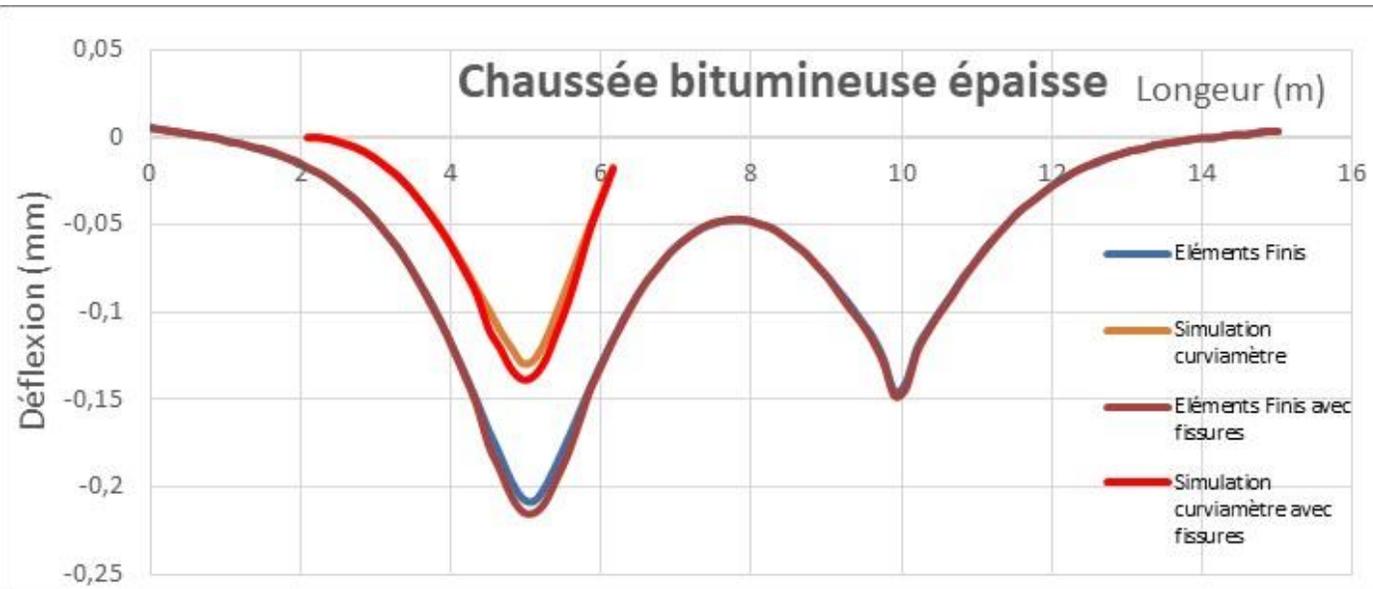
Surface de glissement réduite (1,3*1,18 m²) et interface sans résistance

| Interface de glissement avec ouverture | |
|--|-------|
| Rt | E |
| 1 kPa | 1 MPa |



| Interface | Déflexion maximale (mm) | |
|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| | César (EF) [transversal] | Augmentation/sans délamination |
| Sans Délamination | -0,223 | - |
| CdR – Liaison1 | -0,353 | +56,88 % |
| Liaison1 – Liaison2 | -0,316 | +40,44 % |
| Liaison2 – Couche de Base | -0,302 | +34,22 % |
| Couche de Base – Fondation | -0,272 | +20,88 % |

- ▶ Structure bitumineuse épaisse.
Simulation des bassins de déflexion par un calcul de type curviamètre.



Bassins de déflexion issus du calcul aux éléments finis et simulation du bassin par un calcul de type curviamètre. (fissures longitudinales courtes)

| Position des 6 fissures longitudinales courtes | Axe transversal (EF) | Axe longitudinal (EF) | Curviamètre (calcul longitudinale) |
|---|----------------------|---|---|
| | w_{max} [mm] | w_{max} [mm] / écart relatif par rapport au cas non fissuré | w_{max} [mm] / écart relatif par rapport au cas non fissuré |
| Sans fissures | 0,226 | 0,209 | 0,130 |
| Couche de roulement | 0,229 | 0,215 / 2.9% | 0,139 / 6.9% |
| Liaison 1 | 0,231 | 0,213 / 1.9% | 0,136 / 4.6% |
| Liaison 2 | 0,235 | 0,232 / 11% | 0,156 / 20% |
| Base | 0,245 | 0,227 / 8.6% | 0,149 / 14% |
| Fondation | 0,247 | 0,232 / 11% | 0,156 / 20% |

Bilan des déplacements verticaux maximums calculés (w_{max}) (éléments finis et curviamètre) en valeur absolue pour la chaussée bitumineuse épaisse

| Position des 6 fissures longitudinales longues | Axe transversal (EF) | Axe longitudinal (EF) | Curviamètre (calcul longitudinale) |
|---|----------------------|---|---|
| | w_{max} [mm] | w_{max} [mm] / écart relatif par rapport au cas non fissuré | w_{max} [mm] / écart relatif par rapport au cas non fissuré |
| Sans fissures | 0,226 | 0,209 | 0,130 |
| Couche de roulement | 0,263 | 0,216 / 3.3% | 0,140 / 7.7% |
| Liaison 1 | 0,262 | 0,247 / 18.2% | 0,171 / 31.5% |
| Liaison 2 | 0,260 | 0,244 / 16.8% | 0,168 / 29% |
| Base | 0,259 | 0,241 / 15.3% | 0,165 / 26.9% |
| Fondation | 0,265 | 0,250 / 19.6% | 0,174 / 33.8% |

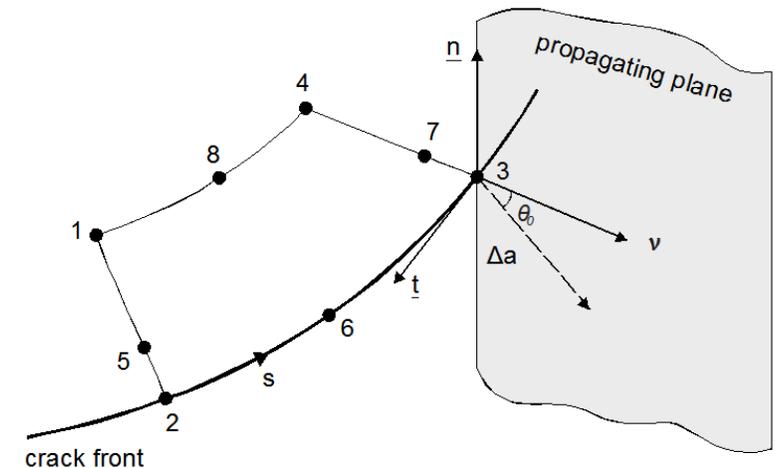


► Propagation 3D de réseaux de fissures

- Les développements sont menés en élément de frontière (Boundary Element Model)
 - Grande souplesse à mailler les géométrie 3D**
 - Grande **précision** dans la détermination des champs singuliers au **voisinage des fissures**
 - Couplage avec la méthode multipôle rapide pour mettre en place un code de calcul de structures en **élasticité 3D** et en **mécanique de rupture 3D**.
- La loi de Paris

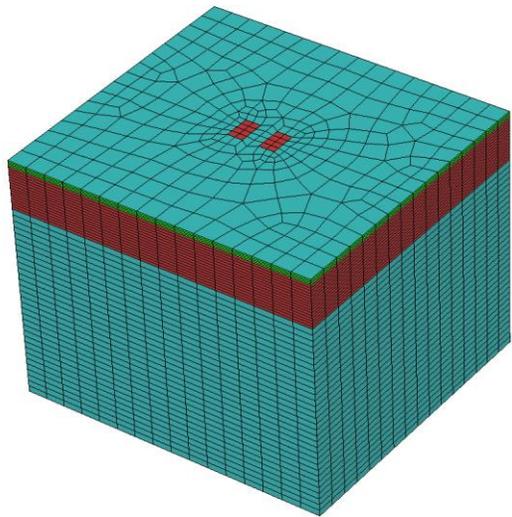
$$\frac{da}{dN} = A \cdot \Delta K^m \quad \Delta K = K_{\max} - K_{\min}$$

- Les facteurs d'intensité de contraintes au nœud 2 sont déterminés pour les **modes I, II, III de propagation**
- L'angle de propagation** est donné par le critère de la contrainte tangentielle maximale



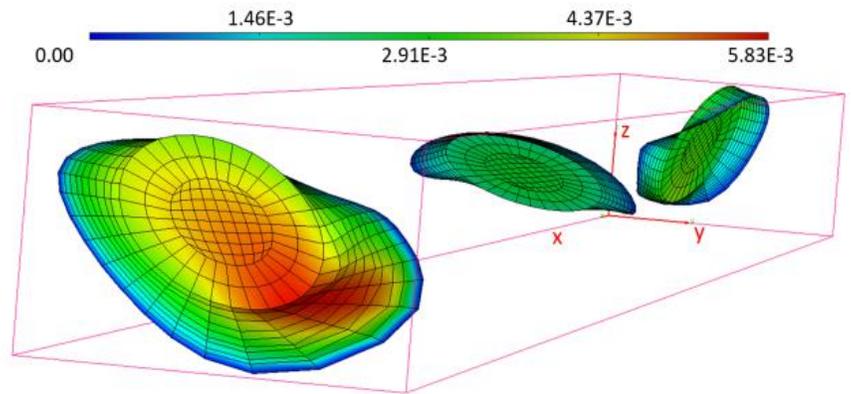
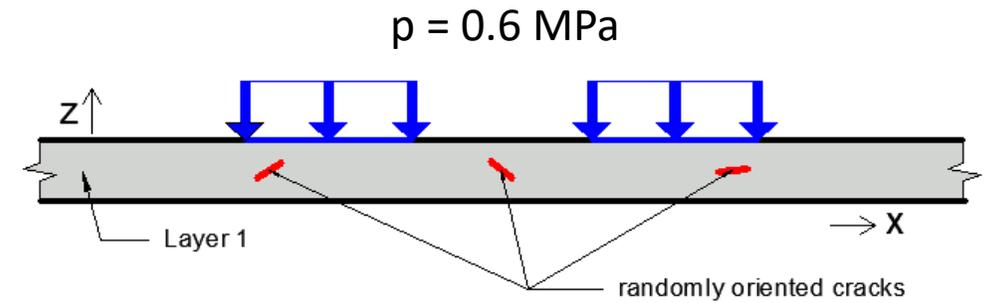
► Simulation d'une chaussée avec fissures internes

| | Epaisseur (mm) | E (MPa) | ν |
|---------------------|----------------|---------|-------|
| Couche de roulement | 66 | 6610 | 0,35 |
| Couche granulaire | 500 | 180 | 0,30 |
| Sol | 2220 | 80 | 0,25 |



| # | N_c | N_{init} | N_{end} | $T_{pre}(s)$ | $T_{sol}(s)$ | $T_{tot}(s)$ |
|---|-------|------------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| 1 | 1 | 15 441 | 18 033 | 201 | 667 | 883 |
| 2 | 3 | 17 559 | 25 335 | 345 | 1 382 | 1 749 |
| 3 | 5 | 19 677 | 32 637 | 1 241 | 3 166 | 4 434 |

Temps de calcul pour 1, 3 et 5 fissures

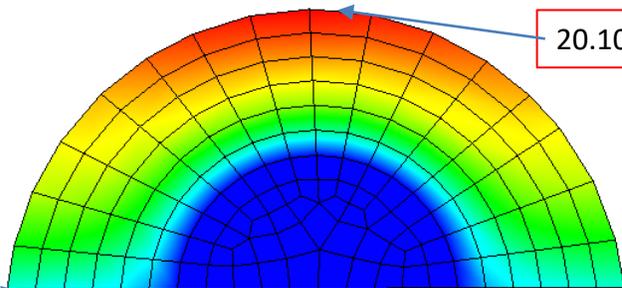
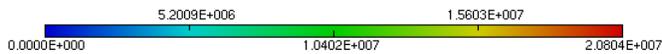
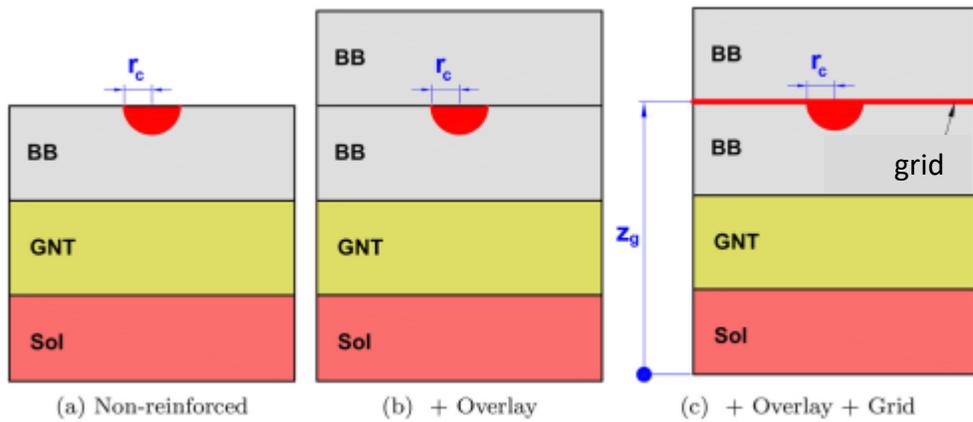


Forme de trois fissures (**diamètre 20 mm**) après propagation
(ouverture de fissure en mm)

Maillage 3D et empreintes du jumelage : 2 * (0.18m * 0.3m)



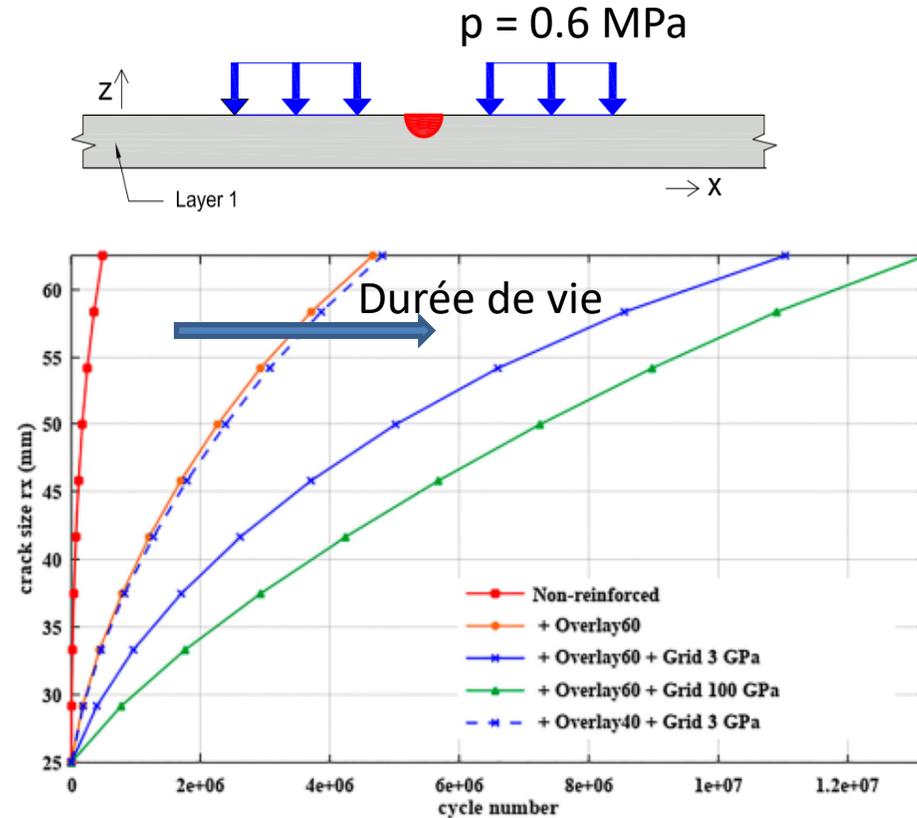
► Simulation d'une chaussée avec fissure débouchante, renforcement par grille et rechargement



20.10⁶ cycles

5.10⁶ cycles

Cartographie du nombre de cycle en fonction de l'avancement de la fissure



Effets des renforcements sur la propagation selon X de la fissure (diamètre 50 mm)



► Conclusion et perspectives

■ Calculs aux éléments finis

- Pour la **délamination** : importance des caractéristiques de l'interface, de la position et de la surface
- Pour les **fissures longitudinales** (ou **transversales**) **verticales** : effet de la position et de la longueur de la fissure sur le bassin de déflexion.
La déflexion longitudinale relevée par un **calcul de type curviamètre** suit cette évolution. On note une sensibilité un peu plus importante de ce calcul (20%/11% (fissures courtes) - 30%/17% (fissure longues)).
- La **déflexion relative maximale** (comparaison fissurée / non fissurée) issue d'une mesure longitudinale théorique (calcul aux éléments finis) est de **4/100 mm** et celle estimée par un calcul de type curviamètre est de de l'ordre de **5/100 mm**.

■ Calculs en éléments de frontière

- **Cheminement** 3D des fissures fortement piloté par la direction de la contrainte tangentielle maximale
- Le modèle montre une **propagation plus rapide des fissures à la surface** que dans le matériau

■ Perspectives

- Développement de méthodes relatives à l'intersection de réseaux de fissures et de directions de propagation
- Recherche d'expériences instrumentées ou de benchmark

