

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées

Modèles de dégradation des structures

Chazallon C., Mouhoubi S., Dansou A. / INSA-Strasbourg

Thème de rattachement :

Thème 3

DVDC/R/005
LC/17/DVDC/10
Octobre 2017

Sommaire

| | |
|--|------------------------------------|
| Sommaire | 2 |
| 1 Résumé | 3 |
| 2 Introduction | 4 |
| 3 Modélisation par éléments finis | 4 |
| 3.1 Chaussée semi-rigide | 4 |
| 3.1.1. Chargement..... | 5 |
| 3.2 Chaussées souples..... | 9 |
| 3.3 Perspectives | 11 |
| 4 Modélisation par éléments de frontière | 12 |
| 4.1 Etat initial | 12 |
| 4.1.1 Approche utilisée | 12 |
| 4.1.2 Environnement numérique existant..... | 12 |
| 4.2 Travaux réalisés en 2016-2017..... | 13 |
| 4.2.1 Interfaces artificielles à orientation quelconque | 13 |
| 4.2.2 Analyse paramétrique..... | 13 |
| 4.2.3 Influence de la densité du maillage des fissures..... | 14 |
| 4.2.4 Ouverture de fissure en mode I..... | 15 |
| 4.3 Résultats obtenus : simulations de chaussées..... | Erreur ! Signet non défini. |
| 4.4 Conclusion et perspectives | 19 |
| 4.4.1 Adimensionnalisation du système | 19 |
| 4.4.2 Fissure de surface et fissures traversant les interfaces | 19 |
| 4.4.3 Préconditionnement..... | 20 |
| 4.4.4 Gestion des contacts | 20 |

1 Résumé

Résumé en français

Cette première tranche a permis de mettre en évidence l'effet de la fissuration sur le bassin de déflexion. Les fissurations étudiées sont horizontales (décollement entre couches) ou verticales sur toute l'épaisseur de la couche considérée ou sur une partie de celle-ci pour des chaussées bitumineuses épaisses ou souples.

Dans le cadre de la première partie, une modélisation par éléments finis a été menée et des ordres de grandeur ont été obtenus numériquement pour différentes configurations. Ce travail est mené au moyen d'éléments de contacts.

Dans la deuxième partie, nous travaillons sur le développement d'un outil de modélisation par éléments de frontière intégrant la mécanique de la rupture pour prendre en compte la multi-fissuration des chaussées.

Abstract

This first section revealed the effect of cracking on the deflection basin. The cracks studied are horizontal (peeling) or vertical over the entire thickness of the layer in question or on a part of it.

Within the framework of the first part, a finite element modeling was carried out and orders of magnitude were obtained numerically for different configurations. This work is carried out by means of contact elements.

In the second part, we are working on the development of a tool for modeling by boundary elements integrating the mechanics of the rupture to take into account the multi-cracking of the pavements.

2 Introduction

Le travail proposé vise à analyser les mesures des bassins de déflexion (cf. méthodes d'auscultation, thème 2.2), à la lumière de modélisations mécaniques numériques, de façon à caractériser l'état de fissuration des corps de chaussée.

La technique de calcul proposée est basée sur un couplage entre la mécanique de la rupture et l'utilisation de la méthode des éléments de frontière, qui se prête naturellement à une représentation surfacique des réseaux de fissures.

L'outil de calcul envisagé devrait non seulement constituer une aide au diagnostic, mais aussi une aide au dimensionnement du renforcement des structures fissurées.

Sans attendre l'aboutissement de cet outil, il est prévu d'amorcer ce travail et sur la base de techniques de calcul classiques. Une étude théorique de sensibilité des bassins de déflexion, vis-à-vis de quelques scénarios théoriques, simplifiés, de fissuration des chaussées a été menée. Ceci permettra de comparer les niveaux de perturbation attendue par rapport à la précision des techniques et outils d'auscultation usuels et d'estimer assez tôt dans le projet le potentiel de l'analyse inverse des bassins de déflexion pour la reconnaissance de l'état d'endommagement interne des chaussées.

3 Modélisation par éléments finis

3.1 Chaussée bitumineuse épaisse

La première structure étudiée se compose des matériaux suivants :

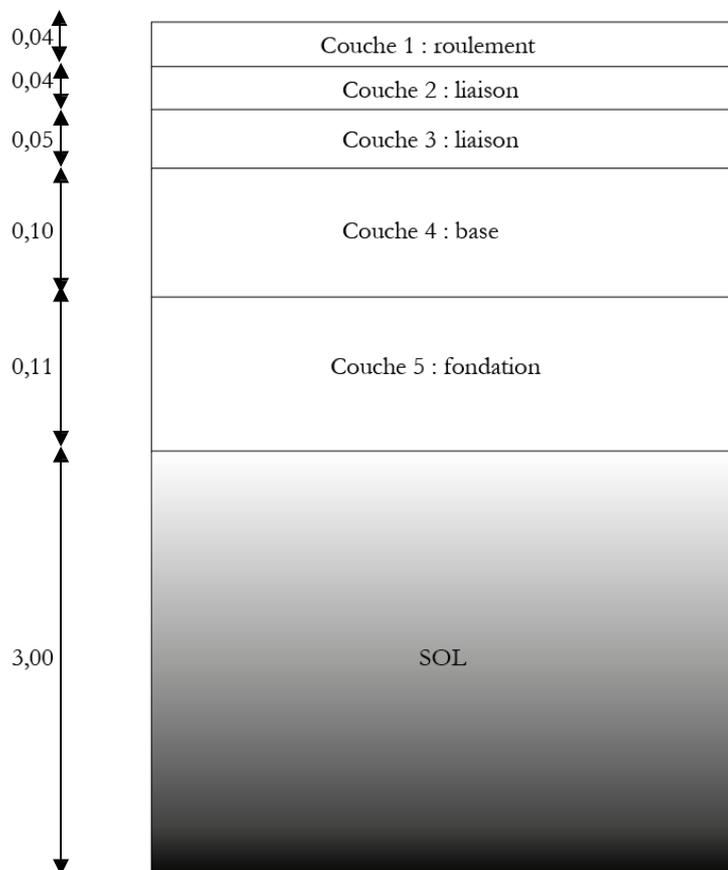


FIGURE 1 : CHAUSSÉE BITUMINEUSE EPAISSE

Projet National de recherche et développement

| Couche | CdR | Liaison | Liaison | Base | Fondation | Sol |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 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

Ces données sont issues des mesures effectuées sur l'A43 à une température de 17 °C et une fréquence de 8,1 Hz (Gaborit 2015). On limite à 3 m l'épaisseur du sol support.

Hypothèse :

- Symétrie de la chaussée
- Chaussée de 5 m * 15 m (effets de bord)
- Interface de glissement centrée lorsqu'elles sont utilisées.

3.1.1. Chargement

Proposition de CHARGEMENT (thèse P. Gaborit)

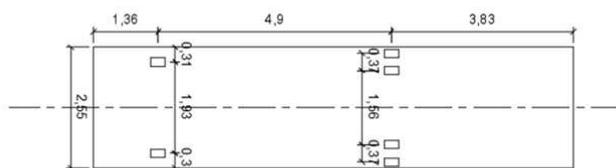
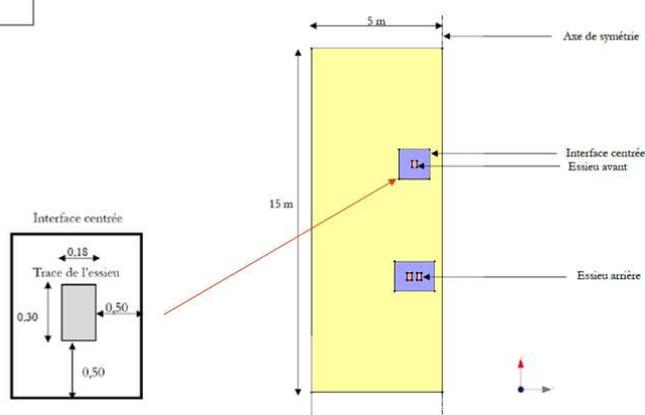


Figure 1 : schéma modèle curviamètre

Contrainte sous les essieux :

| | |
|-------------------------|-----------|
| Contrainte roue avant | 0,713 MPa |
| Contrainte roue arrière | 0,602 MPa |

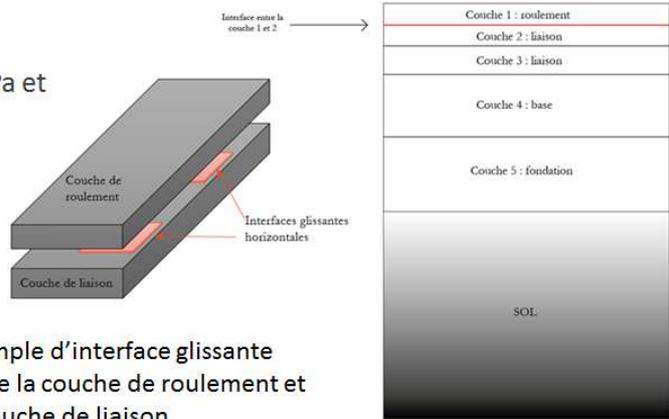


1^{er} type de fissure

1^{er} type de fissures étudiées

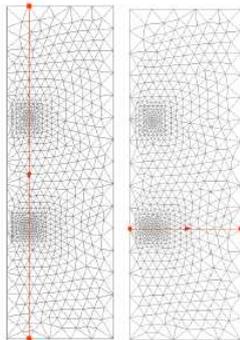
Fissures horizontales :

- Interface parfaitement glissante $E = 1 \text{ MPa}$ et $R_t = 0,001 \text{ MPa}$.
- Entre deux couches de chaussée
- Uniquement sur la zone d'interface

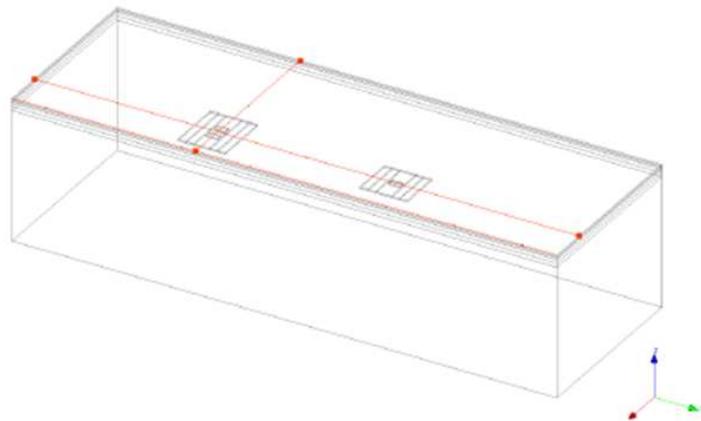


Exemple d'interface glissante entre la couche de roulement et la couche de liaison

Étude des résultats selon deux axes

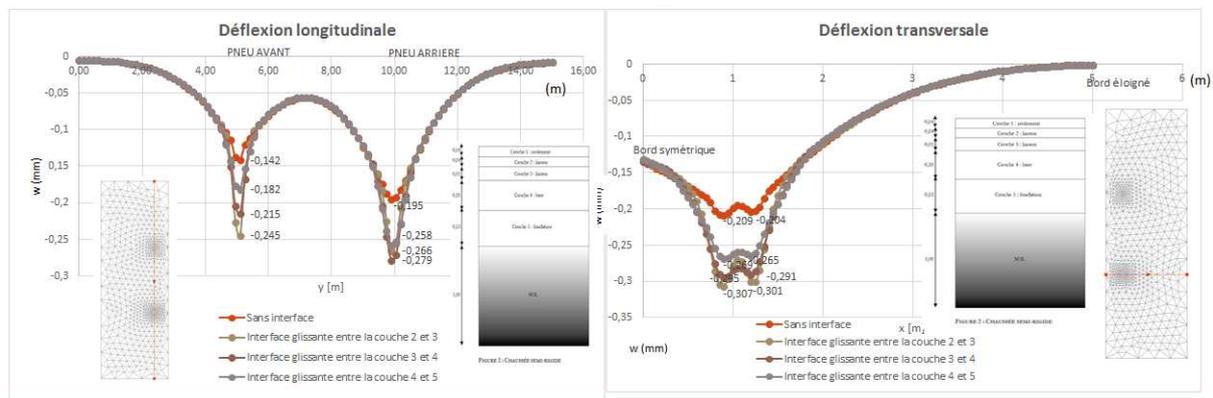


Axe longitudinal Axe transversal



Résultats obtenus : interfaces horizontales

Chaussée bitumineuse épaisse



Conclusion

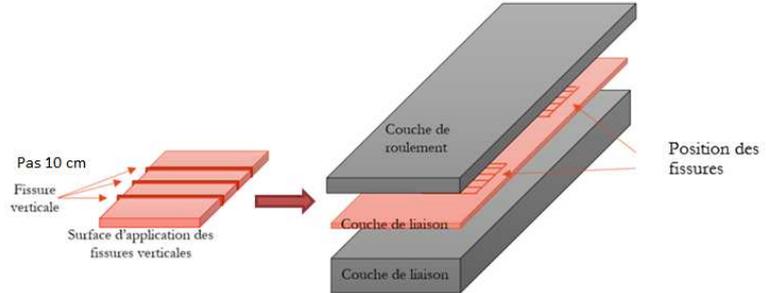
- Augmentation du déplacement lorsqu'il y a une interface
- Plus l'interface est proche de la surface, plus le déplacement est important

2^{eme} type de fissure

2^{eme} type de fissures étudiées

Fissures verticales :

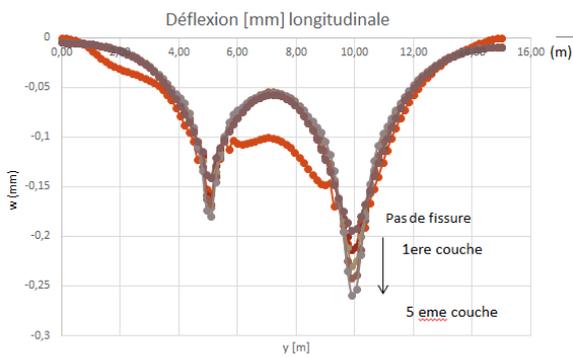
- Interface parfaitement glissante
- Non interpénétration
- Sur toute la hauteur de couche
- Uniquement sur la zone d'interface



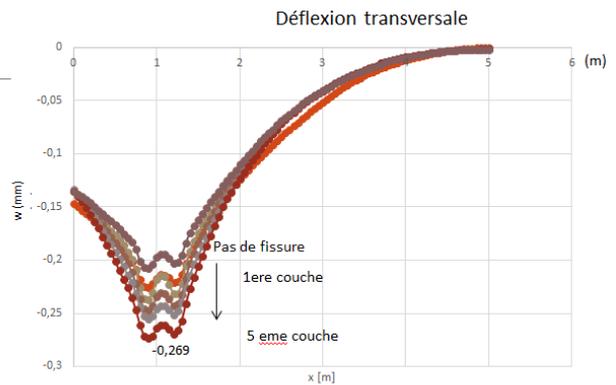
Exemple de fissures verticales dans la couche de liaison

Résultats obtenus, interfaces (fissures) verticales

— Chaussée bitumineuse épaisse



- Fissures dans la 1ère couche
- Fissures dans la 2ème couche
- Fissures dans la 3ème couche
- Fissures dans la 4ème couche
- Fissures dans la 5ème couche
- Pas de fissure

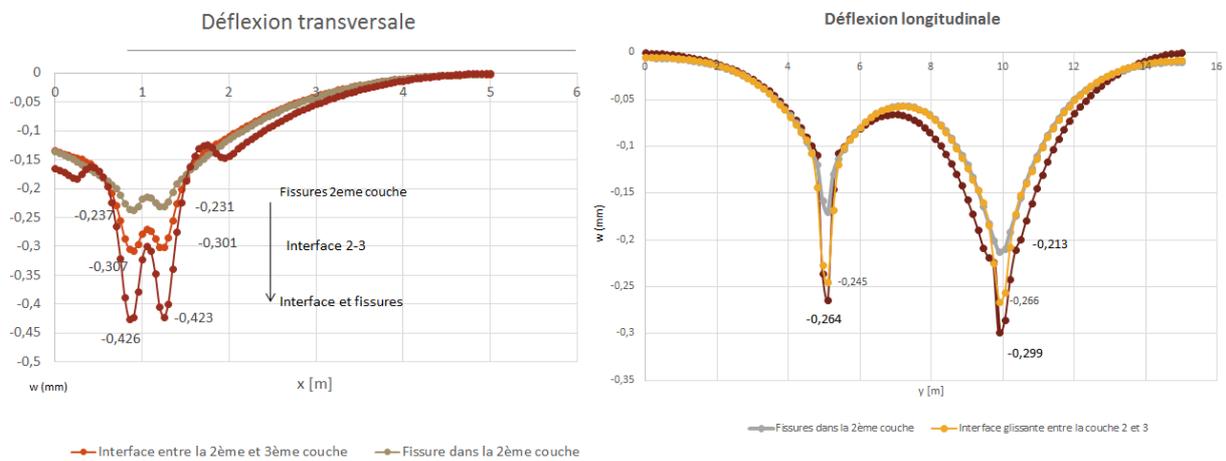


- Fissures dans la 1ère couche
- Fissures dans la 2ème couche
- Fissures dans la 3ème couche
- Fissures dans la 4ème couche
- Fissures dans la 5ème couche
- Pas de fissure

En combinant les 2 types de fissures.

Résultats obtenus

Interfaces glissantes et fissures transversales combinées



Bilan

- Etude d'une chaussée bitumineuse épaisse avec 2 types de fissures simples ou combinées (interfaces glissantes horizontales et/ou verticales)
- Interface (fissure) : augmentation du déplacement
- Interface (fissure) horizontale : déplacement plus important lorsque proche de la surface
- Interface (fissure) verticale : déplacement plus important lorsqu'on s'éloigne de la surface
- Interfaces (fissures) horizontales + verticales : déplacements plus importants ($\sim 1.5x$)

3.2 Chaussées souples

➤ Etude de chaussées souples avec interfaces glissantes horizontales

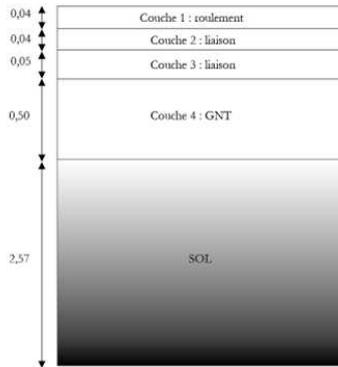


FIGURE 3 : CHAUSSEE SOUPLE 1

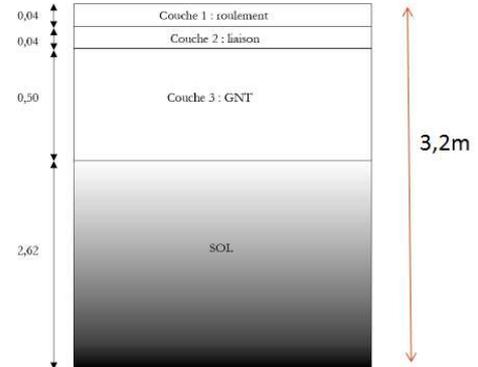


FIGURE 4 : CHAUSSEE SOUPLE 2

| Couche | CdR | Liaison | Liaison | GNT | Sol |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Épaisseur [m] | 0,04 | 0,04 | 0,05 | 0,50 | 2,57 |
| Comportement | Élastique | Élastique | Élastique | Élastique | Élastique |
| E [MPa] | 4581 | 4581 | 4581 | 180 | 120 |
| ν | 0,35 | 0,35 | 0,35 | 0,25 | 0,25 |

TABLEAU 2 : CARACTÉRISTIQUES DE LA CHAUSSEE SOUPLE 1

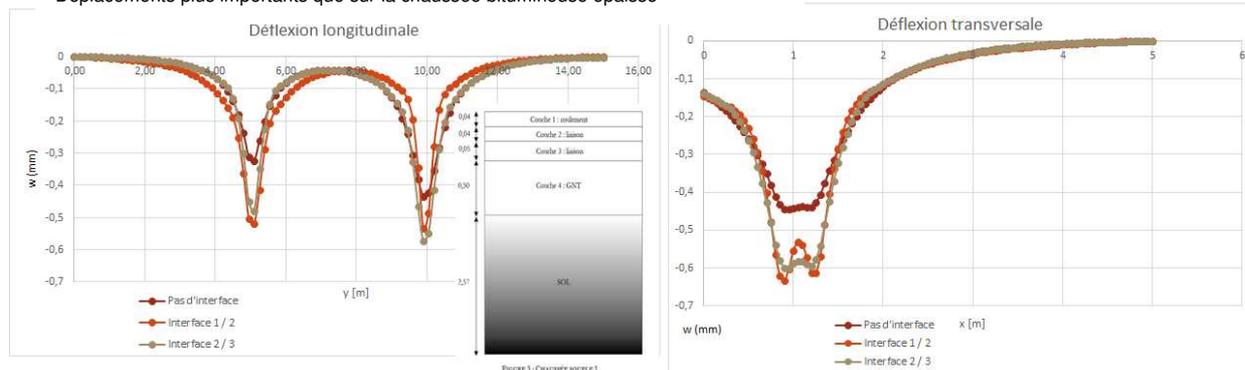
| Couche | CdR | Liaison | GNT | Sol |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Épaisseur [m] | 0,04 | 0,04 | 0,50 | 2,62 |
| Comportement | Élastique | Élastique | Élastique | Élastique |
| E [MPa] | 4581 | 4581 | 180 | 120 |
| ν | 0,35 | 0,35 | 0,25 | 0,25 |

TABLEAU 3 : CARACTÉRISTIQUES DE LA CHAUSSEE SOUPLE 2

1^{er} type de fissure (interface glissante)

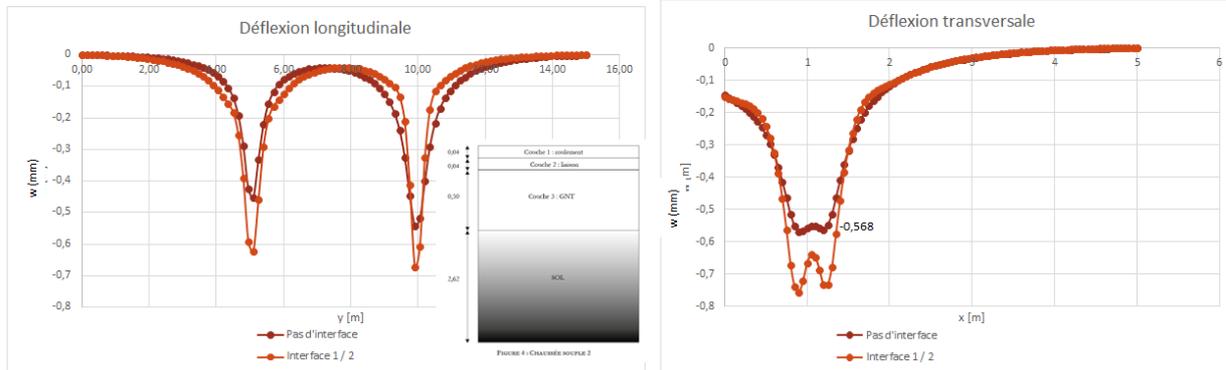
Chaussée souple 1

- résultats similaires
- Déplacements plus importants que sur la chaussée bitumineuse épaisse



Chaussée souple 2

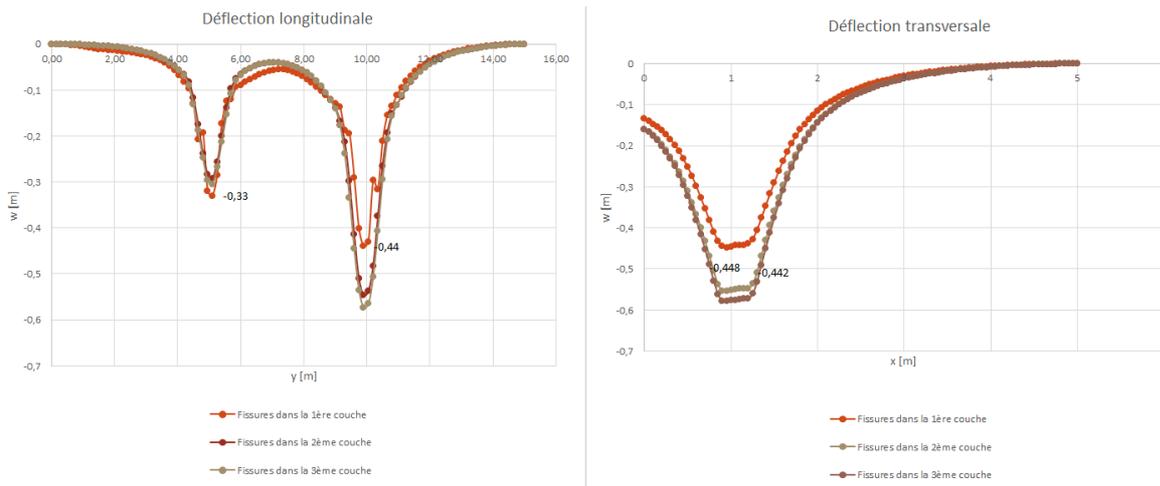
- résultats similaires
- Déplacements plus grands que pour la chaussée souple 1



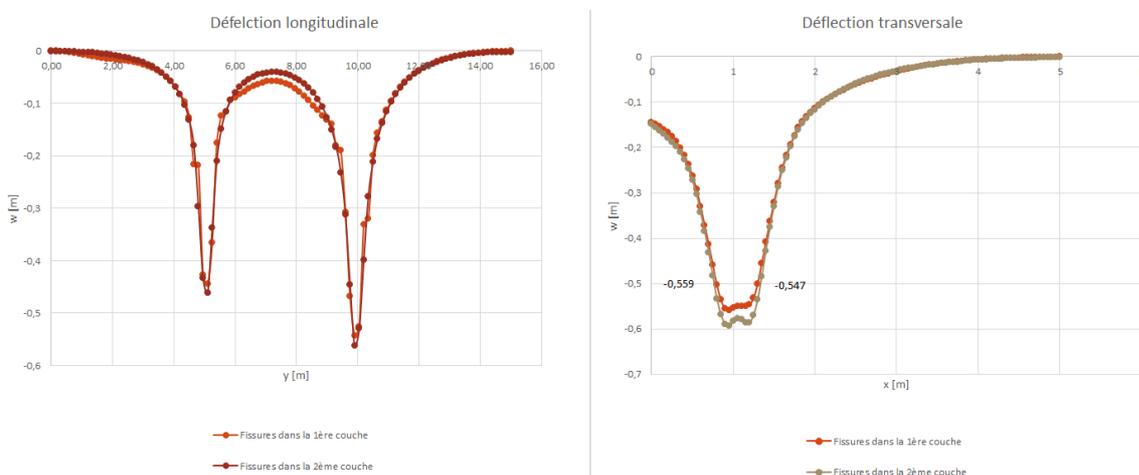
2^{ème} type de fissure

Fissures verticales

Chaussée souple 1



Chaussée souple 2



Bilan

- Etude de chaussées souples avec 2 types de fissures simples (interfaces glissantes horizontales ou verticales)
- Interface : augmentation du déplacement
- Interface (fissure) horizontale : déplacement plus grand lorsqu'on est proche de la surface
- Interfaces (fissures) verticales : déplacement plus grand lorsqu'on s'éloigne de la surface

3.3 Conclusion et perspectives

Les ordres de grandeur des déflexions des structures non fissurées bitumineuse épaisse et souples sont comparables à ce qui peut être mesuré in situ sur des structures équivalentes (Gaborit, P., 2015) et (Le Boursicaud et al., 2017).

Concernant l'étude des chaussées souples, elle se poursuivra avec 2 types de fissures simples ou combinées (interfaces glissantes verticales et/ou horizontales).

Les effets suivants seront présentés sur l'ensemble des structures :

- Variation d'épaisseur des différentes couches
- Variation de portance sur la déflexion

BIBLIOGRAPHIE

Gaborit, P., COMPORTEMENT THERMO-MECANIQUE DE STRUCTURES DE CHAUSSEES BITUMINEUSES, ENTPE, 19/06/2015

Le Boursicaud V., Simonin J.M., Horny P., Optimization of deflection bowl measurements, BCRR 2017, Athènes, Grèce

4 Modélisation par éléments de frontière

Thèse :

Contribution à la modélisation des infrastructures multi-fissurées : approche par la méthode des éléments de frontière couplée à la méthode multi-pôle rapide

Doctorant: Anicet DANSOU¹
Directeur de thèse: Cyrille CHAZALLON¹
Co-directeur de thèse: Marc BONNET²
Encadrement scientifique: Saida MOUHOUBI¹

(1) *Laboratoire ICUBE - INSA de Strasbourg, UMR 7357, CNRS, Université de Strasbourg*
(2) *ENSTA, UMA (Dept. of Appl. Math.), POems, UMR 7231 CNRS-INRIA-ENSTA*

4.1 Etat initial

4.1.1 Approche utilisée

L'approche retenue dans le cadre de nos travaux est basée sur l'utilisation des concepts des équations intégrales de Galerkin (3D) accélérés par la méthode multipôle rapide (Fast Multipole Method). Les méthodes intégrales (méthode des éléments de frontière) sont bien connues pour leur souplesse à définir des géométries complexes, spécialement celles des domaines tridimensionnels et pour la grande précision qui caractérise ses résultats dans la détermination des champs singuliers au voisinage de la fissure.

Les travaux de thèse ont pour principal objectif de développer les environnements existants en intégrant la propagation de fissures aux interfaces, les fissures traversant selon les deux principaux modes de propagation avec application à la problématique de renforcement d'infrastructures routières.

4.1.2 Environnement numérique existant

Ce sujet est la suite des travaux menés par Duc PHAM¹ (thèse soutenue en 2010) et Quoc-Tuan TRINH¹ (thèse soutenue en 2014). Il s'agit de la mise en œuvre numérique de FMM- SG-BEM dans les 2 contextes : l'élasticité 3D et la mécanique de rupture 3D (avec la prise en compte la propagation de fissures aux interfaces et les fissures traversant). Ces

travaux ont permis la mise ne place d'un code de calcul de structures par éléments de frontière. Bien que le code soit capable de résoudre les problèmes mixtes en élasticité et des problèmes de rupture, il n'arrive pas à traiter efficacement les problèmes réels tels que les chaussées multi-fissurées : les calculs ne convergent pas. Il est ainsi nécessaire, dans une première étape, de mener un travail d'optimisation du code existant, pour permettre le calcul des chaussées multi-fissurées avant de passer à la modélisation de la propagation de la fissure aux interfaces.

4.2 Travaux réalisés en 2016-2017

4.2.1 Interfaces artificielles à orientation quelconque

En présence de géométries très élancées (Figure 1), il est numériquement plus efficace d'effectuer une décomposition en de petits sous-domaines (Figure 2). Le code existant ne prend en compte que des géométries avec des interfaces dans le plan horizontal. Un important travail de programmation a été réalisé pour tenir compte des interfaces ayant une orientation quelconque. Ainsi il est désormais possible de subdiviser les domaines élancés en utilisant des interfaces artificielles.



Figure 1 : Domaine élancé



Figure 2 : Domaine élancé décomposé en sous domaines.

4.2.2 Analyse paramétrique

Les paramètres d'entrée peuvent avoir une très grande influence sur le calcul (convergence et temps de calcul). Pour utiliser la méthode multipôle, on partitionne successivement le domaine en cellule et la plus petite cellule est appelé feuille. Le paramètre max_elem définit le nombre maximal d'éléments que doit contenir une feuille. Si ce nombre est élevé, l'évaluation des interactions proches est couteuse mais la convergence est rapide. Si ce nombre est faible, les interactions proches s'évaluent très rapidement mais la convergence est lente. Il faut donc trouver une valeur optimale pour ce paramètre. Les résultats (figure 3) montrent l'influence de ce paramètre pour le calcul d'une chaussée à

faible trafic (tracouche (mm): 66, 500, 2220) non fissurée supposée homogène. La valeur optimale de ce paramètre dépend du modèle étudié. Pour les études ultérieures, nous avons donc ajusté le paramètre au besoin.

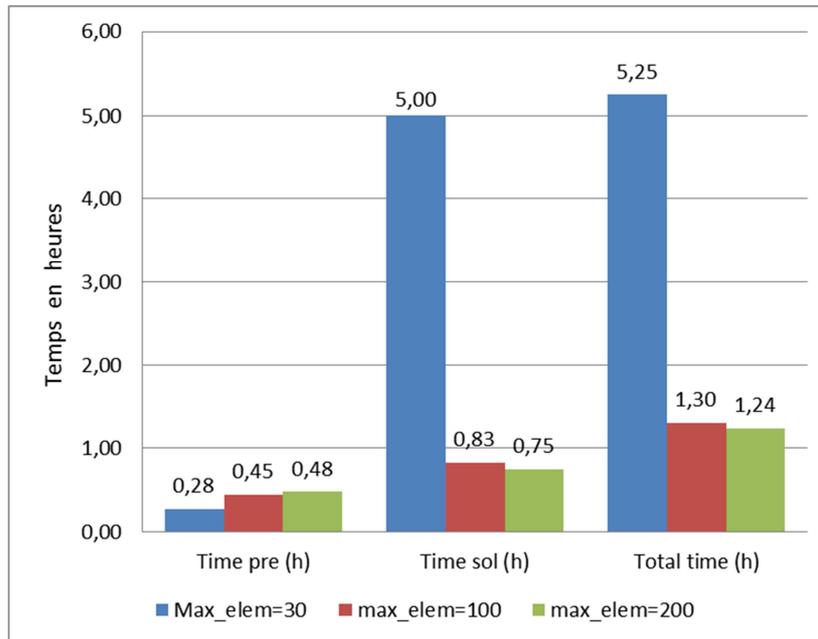


Figure 3 : Temps de calcul en fonction du paramètre max_elem

4.2.3 Influence de la densité du maillage des fissures

En chaussée multi-fissurées, l'augmentation du nombre de fissures alourdit considérablement les calculs. Nous avons donc étudié l'influence de la densité du maillage des fissures sur le temps de calcul. Pour cette étude, une fissure rectangulaire de 3000 mm sur 60 mm de hauteur est insérée dans la 1ere couche d'une chaussée à trois couche (figure 6 et 7). Trois maillages sont utilisés pour les fissures: un maillage de référence comportant 1800 éléments, un maillage de 512 éléments et un troisième maillage de 120 éléments.

Les résultats (figure 4) montrent que nous pouvons gagner énormément en temps de calcul sans perdre en précision.

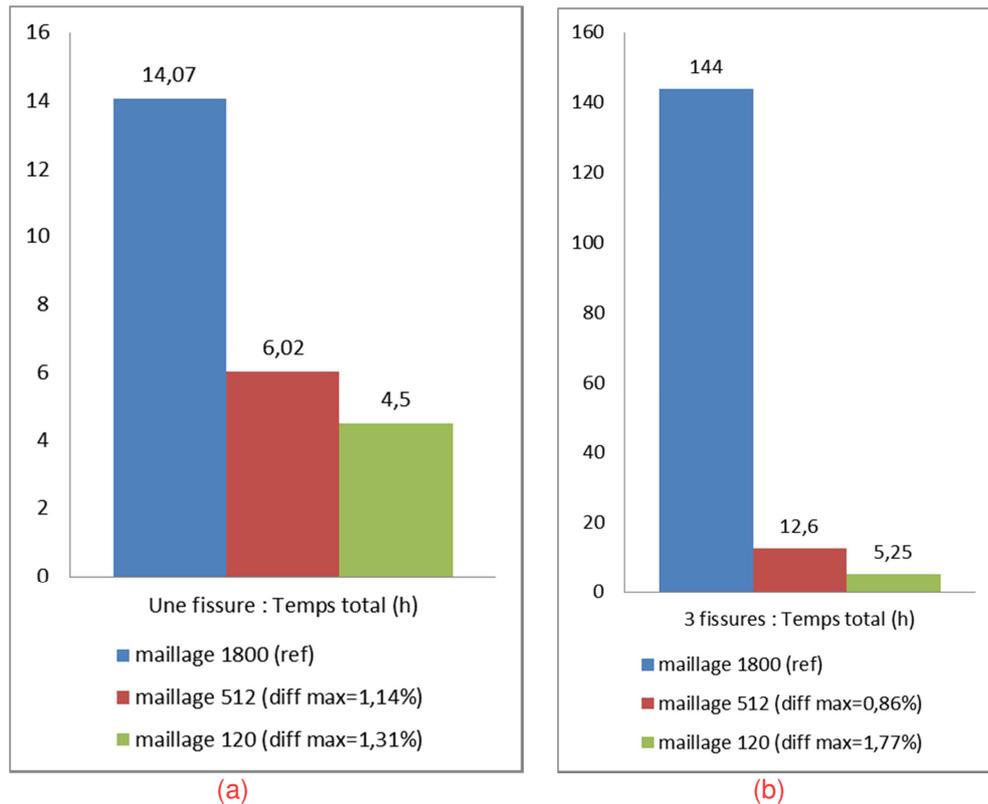


Figure 4 : Temps de calcul en fonction du maillage (a- Une fissure ; b- Trois fissures) et différence par rapport au maillage de référence

4.2.4 Ouverture de fissure en mode I

Le code existant a été corrigé pour éviter le chevauchement des lèvres de fissures en mode I. La figure 5 montre les résultats sur une fissure circulaire dans un cube en flexion. Les valeurs négatives affichées par l'ancien code indiquent qu'il y a chevauchement des lèvres de fissures. Ce qui est physiquement impossible. Notons que des vérifications sur les tensions restent à effectuer pour s'assurer que toutes les conditions de contact sans frottement de Signorini [1] sont respectées.

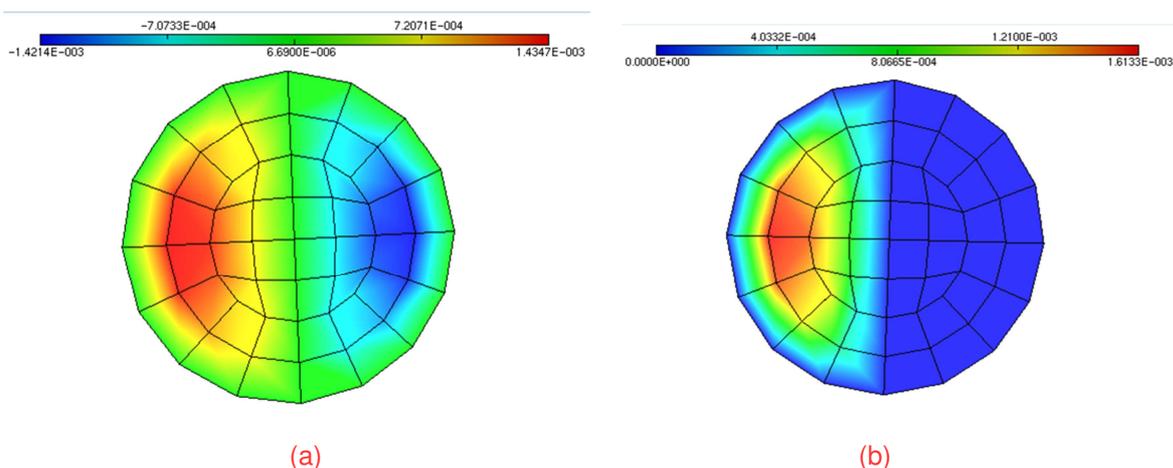


Figure 5 : (a) Ancien résultat (b) Nouveau résultat (après correction)

4.3 Résultats obtenus

4.3.1 Simulation de chaussées

Avec les changements apportés, nous avons pu calculer des chaussées avec plusieurs fissures transversales de grandes tailles insérées dans la première couche (figures 6 et 7). Les caractéristiques du modèle sont présentées dans le tableau 1. Les figures 8 et 9 montrent les déflexions obtenues dans les deux directions.

Tableau 1 : Caractéristiques des couches de chaussées

| | Epaisseur (mm) | E (MPa) | N |
|----------|----------------|---------|------|
| Couche 1 | 66 | 6610 | 0,35 |
| Couche 2 | 500 | 180 | 0,30 |
| Couche 3 | 2220 | 80 | 0,25 |

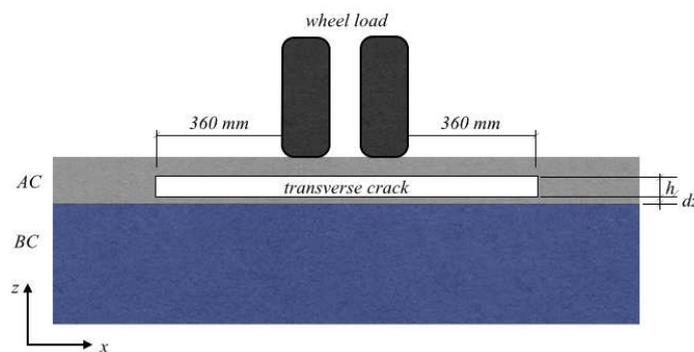


Figure 6 : Fissure transversale dans la couche de surface

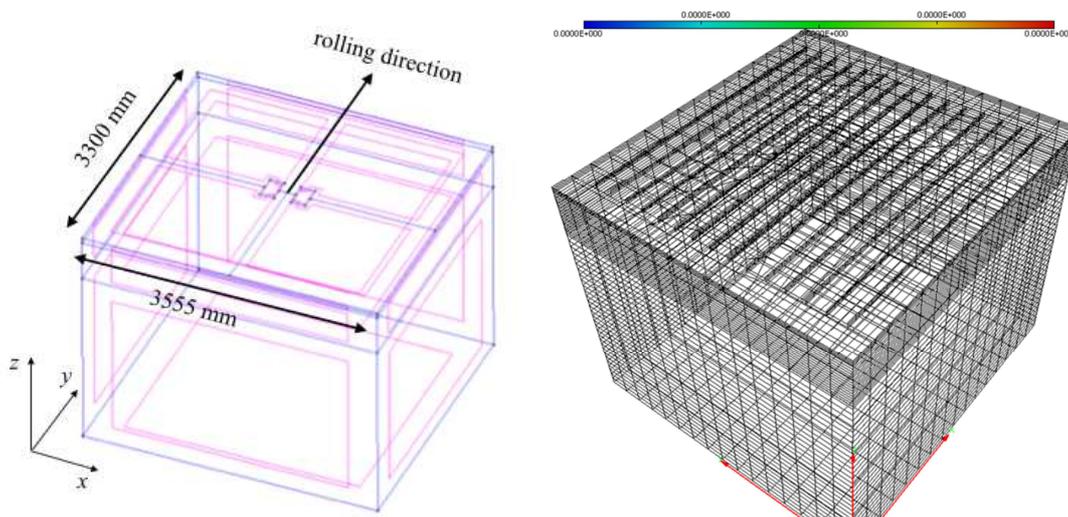


Figure 7 : (a) Géométrie , (b) maillage d'une chaussée fissurée

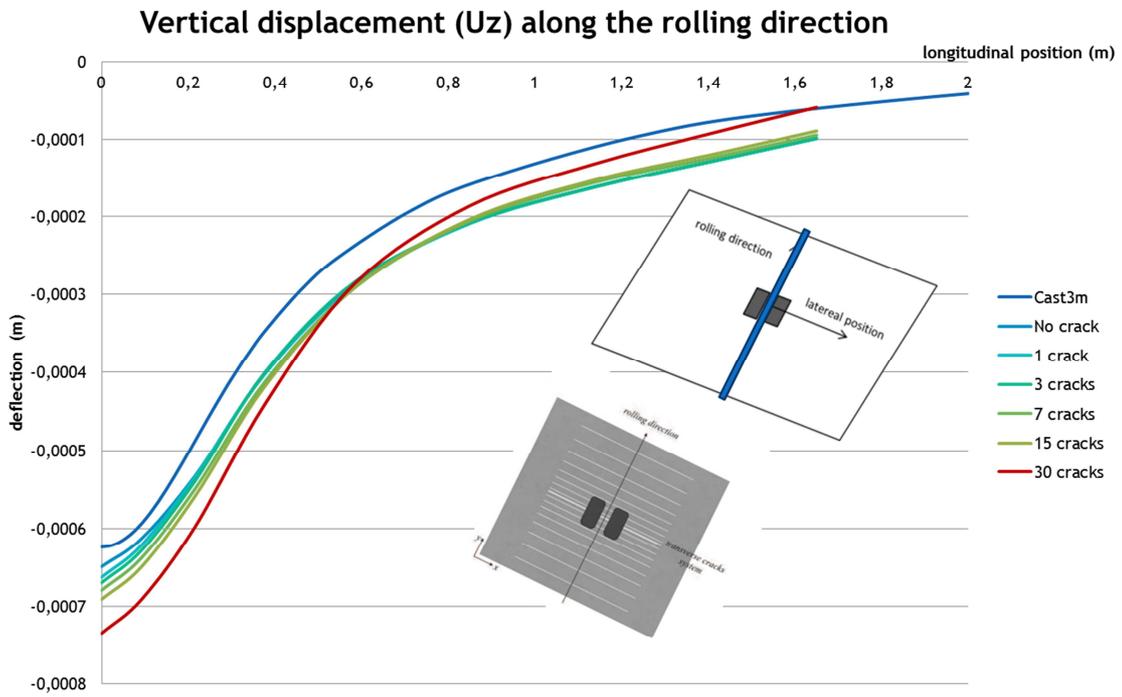


Figure 8 : Déflexion dans la direction de roulement

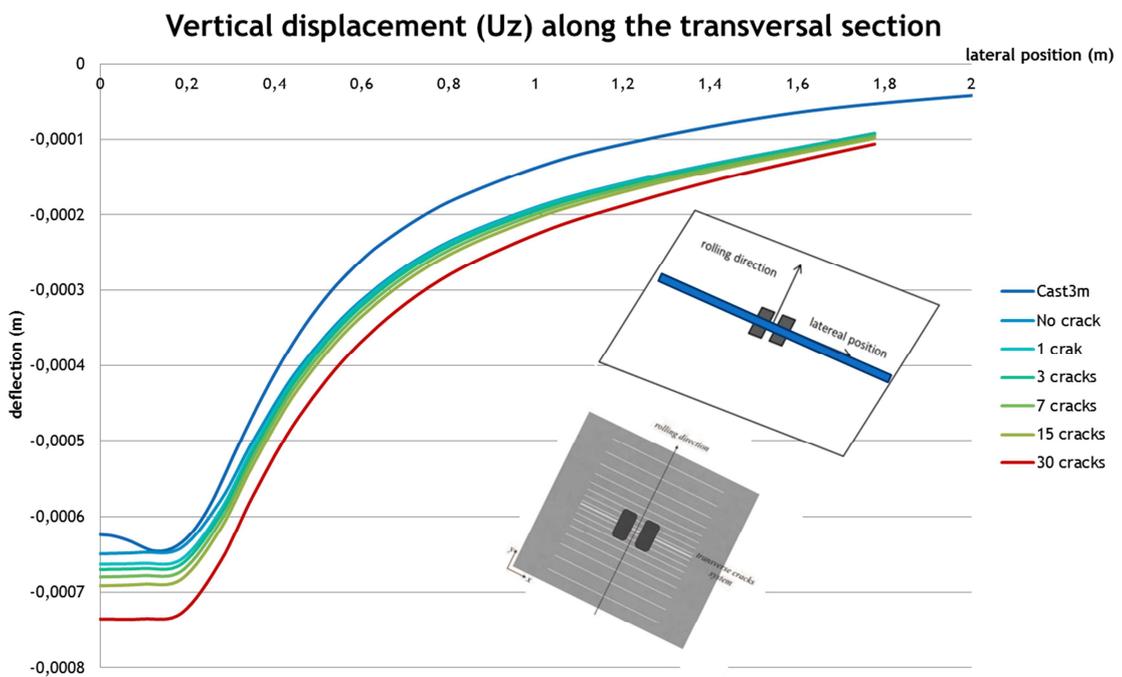


Figure 9 : Déflexion dans la direction transversale

4.3.2 Propagation de fissures

A chaque cycle de la propagation, de nouveaux nœuds sont créés et le calcul élastostatique est repris. On remarque que le nombre d'itérations effectué pour trouver la solution augmente, et donc la durée de résolution augmente. Nous avons trouvé une stratégie pour diminuer cette durée. La stratégie consiste à réutiliser une partie du vecteur solution actuel comme solution initiale pour le prochain cycle. Cela a permis de réduire le nombre d'itérations et donc la durée de la résolution itérative. La figure 10 montre l'exemple d'un cube de coté 3000 mm, contenant huit fissures circulaires de rayon 25 mm orientées aléatoirement, sous traction uniforme. La figure 11 montre le maillage des fissures après 10 cycles de propagation où le rayon atteint 75 mm. Le cube étant sous traction uniforme, les fissures se propagent dans la direction horizontale comme le montre la figure 12. La diminution du nombre d'itérations est présentée à la figure 13. Pour cet exemple la durée de résolution est passée de 3h30min à 1h.

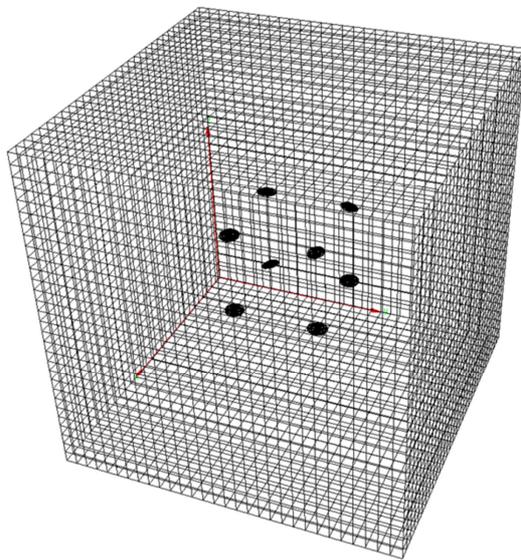


Figure 10 : Cube fissurée sous traction uniforme

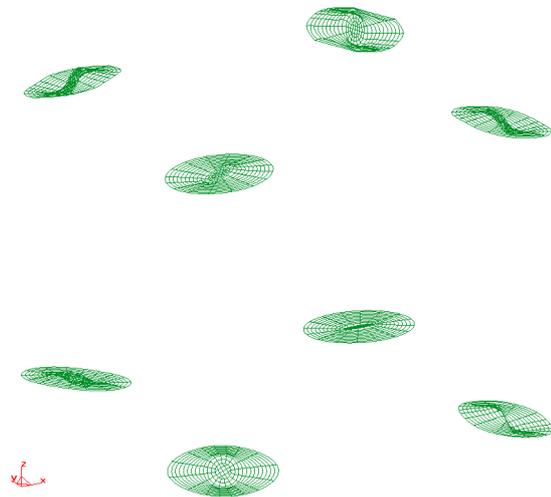


Figure 11 : Maillage des fissures

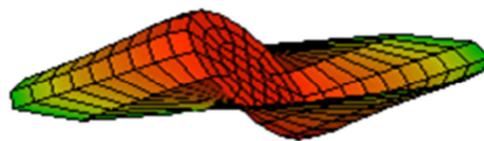


Figure 12 : Fissure après propagation

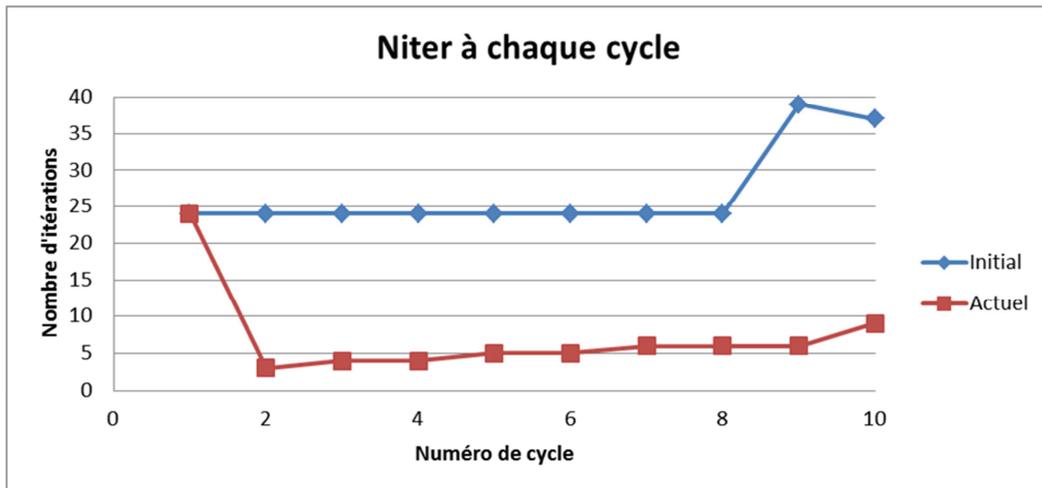


Figure 13 : Diminution du nombre d'itérations

4.4 Conclusion et perspectives

La FM-SGBEM développée et mise en œuvre dans le cadre de nos travaux en élastostatique et en mécanique de la rupture pour le contexte des chaussées multi-fissurées a conduit à des résultats encourageants. Cependant beaucoup de tâches restent à faire.

4.4.1 Adimensionnalisation du système

Les propriétés des matériaux ont une grande influence sur la convergence des calculs. Un changement de module dans le cas homogène peut permettre de diviser le temps de calcul par trois. Nous allons rendre adimensionnel le système et utiliser des valeurs de calcul permettant d'effectuer les calculs en une durée minimale.

4.4.2 Fissure de surface et fissures traversant les interfaces

Les fissures calculées jusque-là sont situées complètement à l'intérieur du domaine (figure 10a). Pour la suite, nous allons aborder les fissures qui débouchent sur la frontière ou sur une interface (figure 10b) et les fissures qui traversent les interfaces (figure 10c)

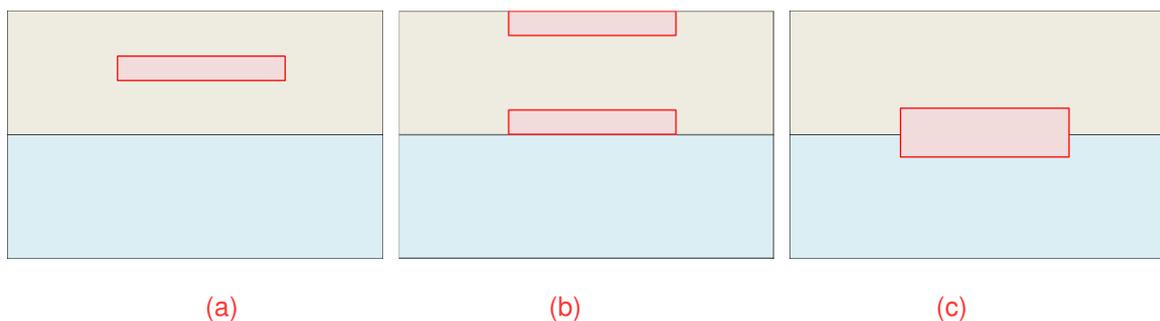


Figure 10 : (a) fissure interne, (b) fissure de surface, (c) fissure traversant

4.4.3 Préconditionnement

Le conditionnement ayant une grande influence sur le temps de calcul, nous allons trouver d'autres stratégies de préconditionnement afin d'accélérer les calculs.

4.4.4 Gestion des contacts

La correction effectuée pour les signes d'ouverture de fissure en mode I n'est pas complète. Pour terminer cette correction, nous allons mettre en place une stratégie pour vérifier toutes les conditions de contact sans frottement de Signorini [1].

Bibliographie

[1] A. Signorini, Questioni de elasticita non linearizzata e semi-linearizzata, Rend. De Matematica, 18(1959), pp. 95–139.