

Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées

Modèles de dégradation des structures

Chazallon¹ C., Mouhoubi¹ S., Dansou^{1,2} A.

¹ INSA-Strasbourg, ICUBE (UMR 7357),

Actuellement à ² ENI Saint Etienne, LTDS (UMR 5513)

Thème de rattachement :

Thème 3 : Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées

Numéro de rapport (à établir par l'IRES)

N° lettre de commande : LC/19/DVDC/70

Date 15/09/2021

Sommaire

Sommaire	2
1. Résumé	3
2. Introduction	4
3. Modélisation par éléments finis	4
3.1. Rappel.....	4
3.1.1. Chaussée bitumineuse épaisse	4
3.1.2. Chaussée souples 1 et 2	6
3.1.3. Chargement.....	7
3.1.4. Les fissures considérées	9
3.2. Modélisation de structures comportant des fissures verticales.....	11
3.2.1. Maillage	11
3.2.2. Conditions limites.....	12
3.2.3. Effet de la position des fissures dans les différentes couches.....	13
4. Conclusion et perspectives	17
5. Modélisation par éléments de frontière	18
5.1. Etat initial et approche utilisée	19
5.2. Travaux réalisés.....	19
5.2.1. Loi de Paris.....	19
5.2.2. Fissures débouchantes	21
5.3. Résultats.....	21
5.3.1. Fissure débouchante horizontale	21
5.3.2. Fissure débouchante inclinée.....	23
5.3.3. Chaussée avec fissures internes	24
5.3.4. Chaussée avec fissure débouchante	26
6. Conclusion et perspectives	28

1. Résumé

Résumé en français

Cette troisième tranche a permis de poursuivre l'étude de sensibilité menée sur l'effet de la fissuration sur le bassin de déflexion de la tranche 2. Les fissurations pouvant être étudiées sont verticales longitudinales ou transversales 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 ce travail, une modélisation par éléments finis a été menée en considérant l'effet de la longueur de fissures longitudinales sur les bassins de déflexion, le pas transversal de ces fissures étant gardé constant dans les 2 cas. Des ordres de grandeur et des tendances ont été obtenus numériquement pour les différentes configurations. Ce travail est mené au moyen d'éléments de contacts qui permettent de simuler l'ouverture ou la refermeture d'une fissure, en précisant les lois de frottement et d'ouverture.

Une comparaison a été faite systématiquement avec la simulation du bassin de déflexion réalisée par un curviamètre.

Dans la deuxième partie, nous avons poursuivi les développements d'un outil de modélisation par éléments de frontière en intégrant la mécanique de la rupture pour prendre en compte la multi-fissuration des chaussées. Ce logiciel a été optimisé numériquement et les premières simulations de propagation de fissure dans une structure de chaussée chargée ont été menées.

Abstract

This third phase continued the sensitivity study conducted on the effect of cracking on the deflection basin in phase 2. The cracks that can be studied are vertical, longitudinal or transverse over the entire thickness of the layer under consideration or over a part of it for thick or flexible bituminous pavements.

Within the framework of this work, finite element modelling was carried out by considering the effect of the length of longitudinal cracks on the deflection basins, the transverse pitch of these cracks being kept constant in both cases. Orders of magnitude and trends were obtained numerically for the different configurations. This work is carried out by means of contact elements that allow the opening or reclosing of a crack to be simulated, specifying the friction and opening laws.

A comparison was made systematically with the simulation of the deflection basin carried out by a curviameter.

In the second part, we continued the development of a modelling tool using boundary elements by integrating fracture mechanics to take into account the multi-cracking of pavements. This software was numerically optimised and the first simulations of crack propagation in a loaded pavement structure were carried out.

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.

Dans les études précédentes nous avons étudié l'effet de fissures transversales, de variation de capacité portante du sol, de variation d'épaisseur des couches et de non-collage entre les couches, sur les bassins de déflexion issus du calcul par éléments finis. Dans le cadre de ce travail, une modélisation par éléments finis a été menée en considérant l'effet de la longueur de fissures longitudinales sur les bassins de déflexion, le pas transversal de ces fissures étant gardé constant dans les 2 cas. Des ordres de grandeur et des tendances ont été obtenus numériquement pour les différentes configurations. Ce travail est mené au moyen d'éléments de contacts qui permettent de simuler l'ouverture ou la re-fermeture d'une fissure, en précisant les lois de frottement et d'ouverture.

Une comparaison a été faite systématiquement avec la simulation du bassin de déflexion réalisée par un curviamètre (Avila et Borel 2021).

Dans la deuxième partie, nous avons poursuivi les développements d'un outil de modélisation par éléments de frontière en intégrant la mécanique de la rupture pour prendre en compte la multi-fissuration des chaussées. Ce logiciel a été optimisé numériquement et les premières simulations de propagation de fissure dans une structure de chaussée chargée ont été menées.

3. Modélisation par éléments finis

3.1. Rappel

3.1.1. Chaussée bitumineuse épaisse

La première structure étudiée est identique à celle de la deuxième tranche du projet national DVdc [3], [4]. Elle se compose des matériaux suivants (figure 1 et tableau 1) :

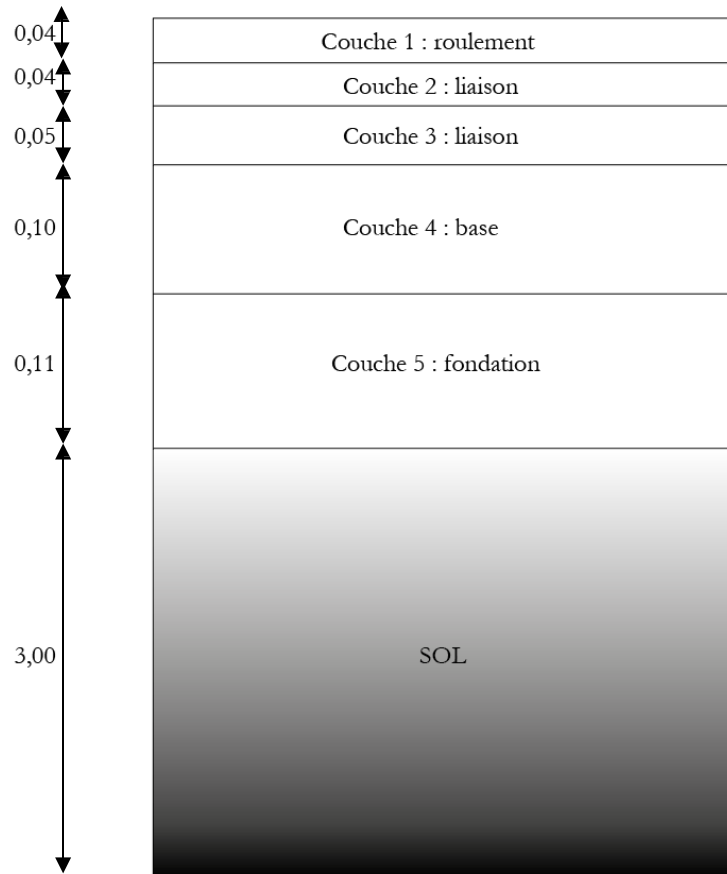


FIGURE 1 : CHAUSSÉE BITUMINEUSE EPAISSE

Projet National de recherche et développement

Couche	CdR (BBM)	Liaison (GB)	Liaison (GB)	Base (GB)	Fondation (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
Nu	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,25

TABLEAU 1 : CARACTÉRISTIQUES DE LA CHAUSSEE BITUMINEUSE EPAISSE. CdR à Liaison : données issues de la norme, Base - Fondation : valeurs déduites des essais de module complexe selon la référence [2]

Ces données sont issues des mesures effectuées sur l'A43 à une température de 17 °C et une fréquence de 8,1 Hz [2]. On limite à 3 m l'épaisseur du sol support.

Les hypothèses sont les suivantes :

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

Ces hypothèses sont nécessaires dans le cadre de la modélisation qui sera effectuée et dont la représentation des différentes discontinuités est précisée figure 4.

3.1.2. Chaussée souples 1 et 2

Les caractéristiques géométriques sont données figures 2 et 3, et les propriétés dans les tableaux 2 et 3.

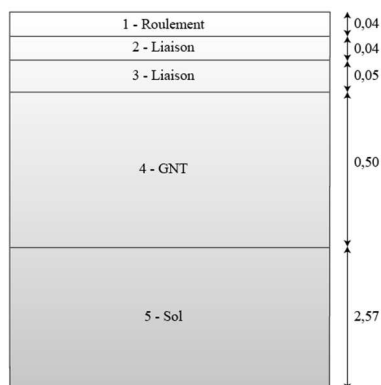


Figure 2 : Chaussée souple 1

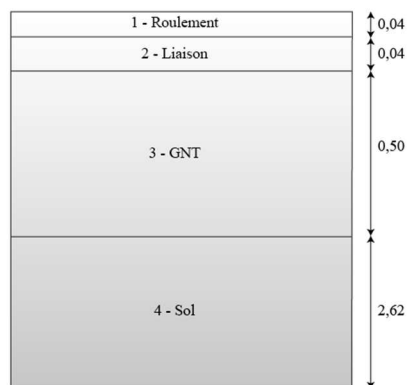


Figure 3 : Chaussée souple 2

Couche	CdR (BBM)	Liaison (GB)	Liaison (GB)	GNT	Sol (PF3)
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
Nu	0,35	0,35	0,35	0,25	0,25

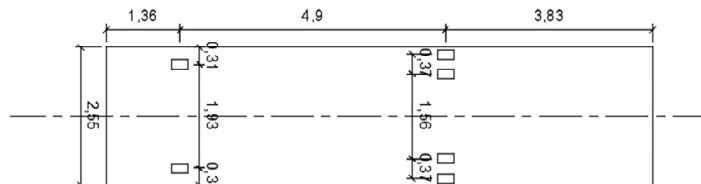
Tableau 2 : caractéristiques de la chaussée souple 1

Couche	CdR (BBM)	Liaison (GB)	GNT	Sol (PF3)
Épaisseur [m]	0,04	0,04	0,50	2,62
Comportement	Élastique	Élastique	Élastique	Élastique
E [MPa]	4581	4581	180	120
Nu	0,35	0,35	0,25	0,25

Tableau 3 : caractéristiques de la chaussée souple 2

3.1.3. Chargement

Le chargement (de type curviamètre) est celui utilisé dans la thèse de P. Gaborit [2], figure 4.

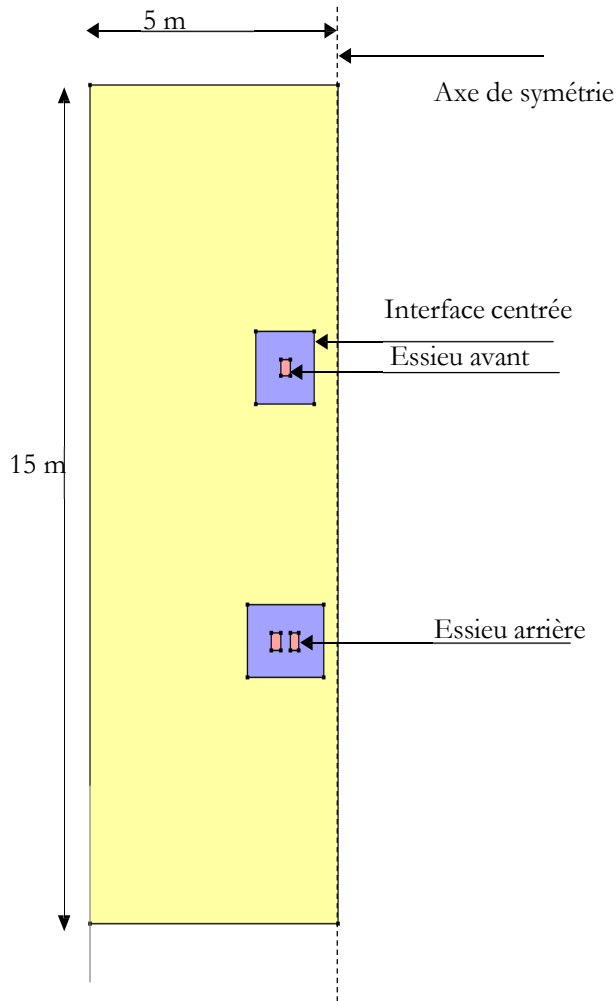


4.a Curviamètre

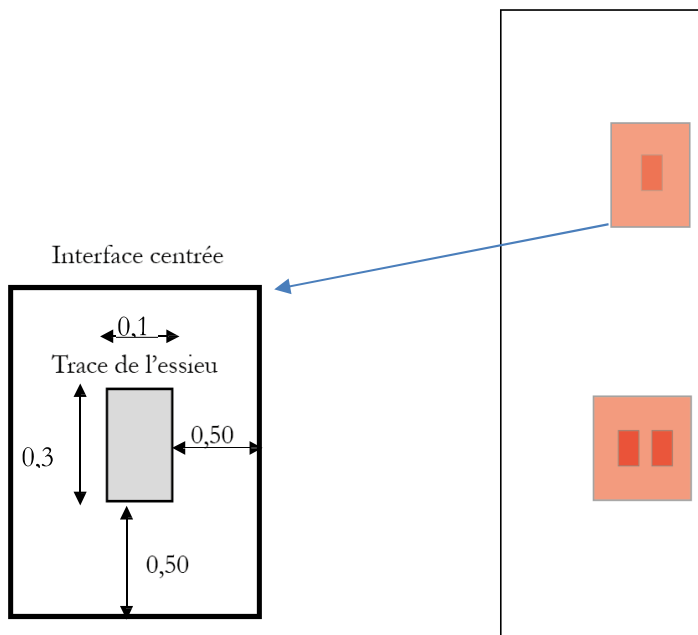
Contrainte roue avant	0.713 MPa
Contrainte roue arrière	0.602 MPa

Les données sont issues de la référence [2].

4.b Contraintes sous les pneumatiques



(4.c) Géométrie du chargement considéré



(4.d) Dimensions de l'interface en mètre

Figure 4 : Modélisation du chargement, 4.a : le curviamètre, 4.b : les pressions appliquées, 4.c : géométrie du chargement, 4.d : dimension de l'interface.

3.1.4. Les fissures considérées

Deux catégories de fissures verticales peuvent être considérées, des fissures longitudinales et des fissures transversales.

Les fissures longitudinales ou transversales (figure 5) courtes (1.1m) seront parfaitement glissantes, sur toute la hauteur de la couche considérée, positionnées sur la même surface restreinte que les surfaces de décollement, avec un pas de 20 cm. Les caractéristiques des éléments d'interface sont identiques aux précédentes. Cette catégorie de fissures transversales a fait l'objet d'une étude paramétrique dans le second rapport. Les paramètres des éléments d'interface utilisés dans l'étude sont $R_t = 1\text{kPa}$ et un $E = 1\text{MPa}$, équivalent à un contact glissant parfait puis une ouverture au-delà du seuil de résistance en traction.

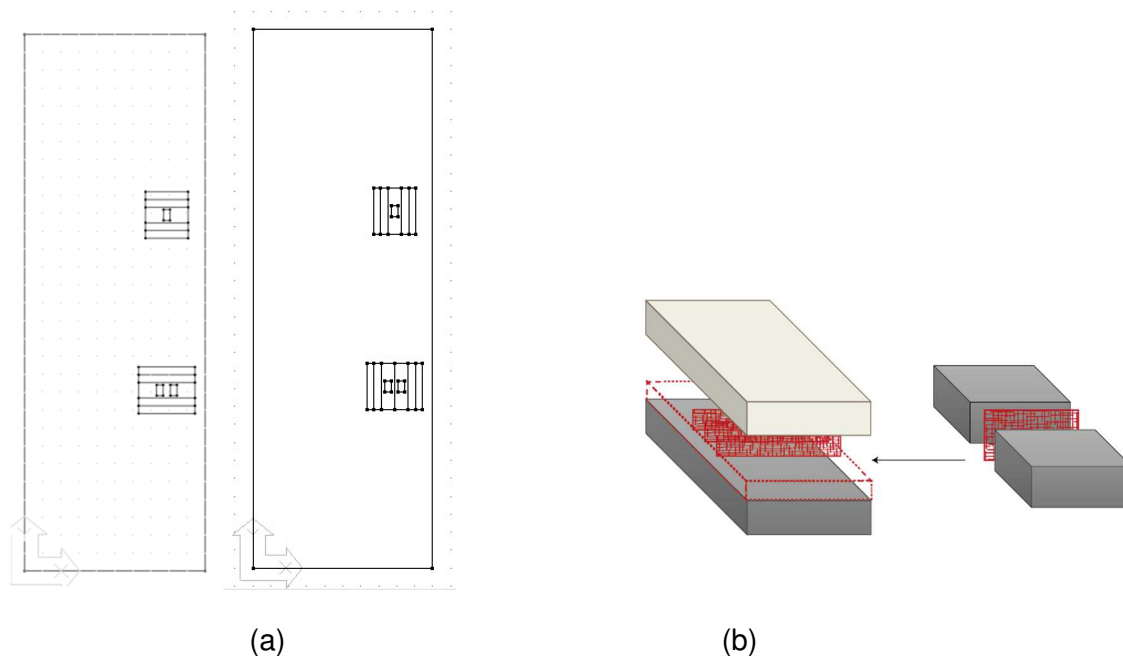


Figure 5 : Réseau de fissures transversales ou longitudinales et positionnement des fissures par rapport au chargement (a), fissures transversales dans une couche (b),

faisant suite à l'étude sur des fissures courtes nous avons cherché à étudier la sensibilité du bassin de déflexion vis-à-vis de réseaux de fissures longues, permettant d'inclure entièrement le véhicule et plus de 85% du bassin de déflexion, et de libérer l'ouverture des fissures sur une distance conséquente. Nous avons ainsi étudié des fissures longitudinales de plus grandes dimensions (9.2m) (figure 6).

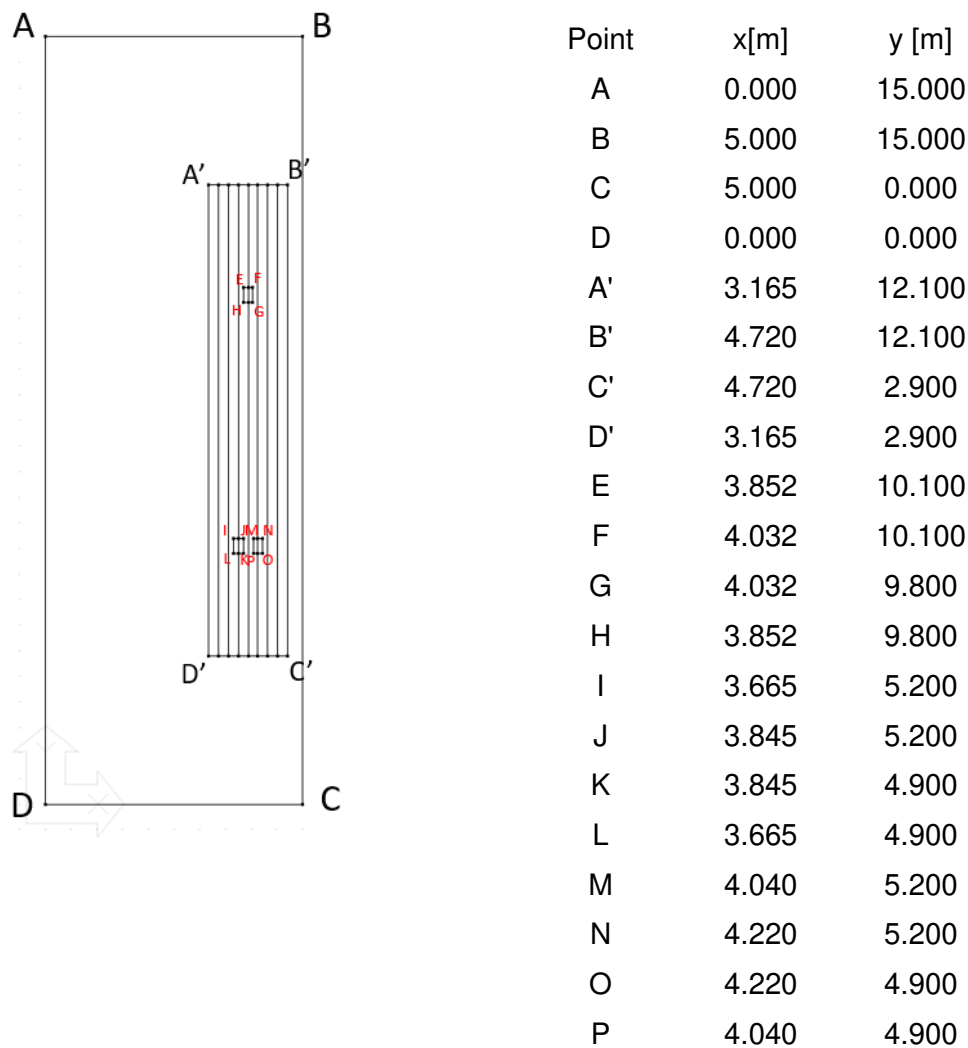


Figure 6 : Vue du réseau de fissures longitudinales longues dans le repère local.

Les déformées sont mesurées selon les deux axes rouges présentés figure 7, pour cela, l'axe transversal, selon x, passe par le milieu des empreintes des pneumatiques du demi-essieu arrière tandis que l'axe longitudinal dans le sens du roulement, selon y, passe par le milieu des empreintes des pneumatiques du demi-essieu arrière et du pneumatique avant.

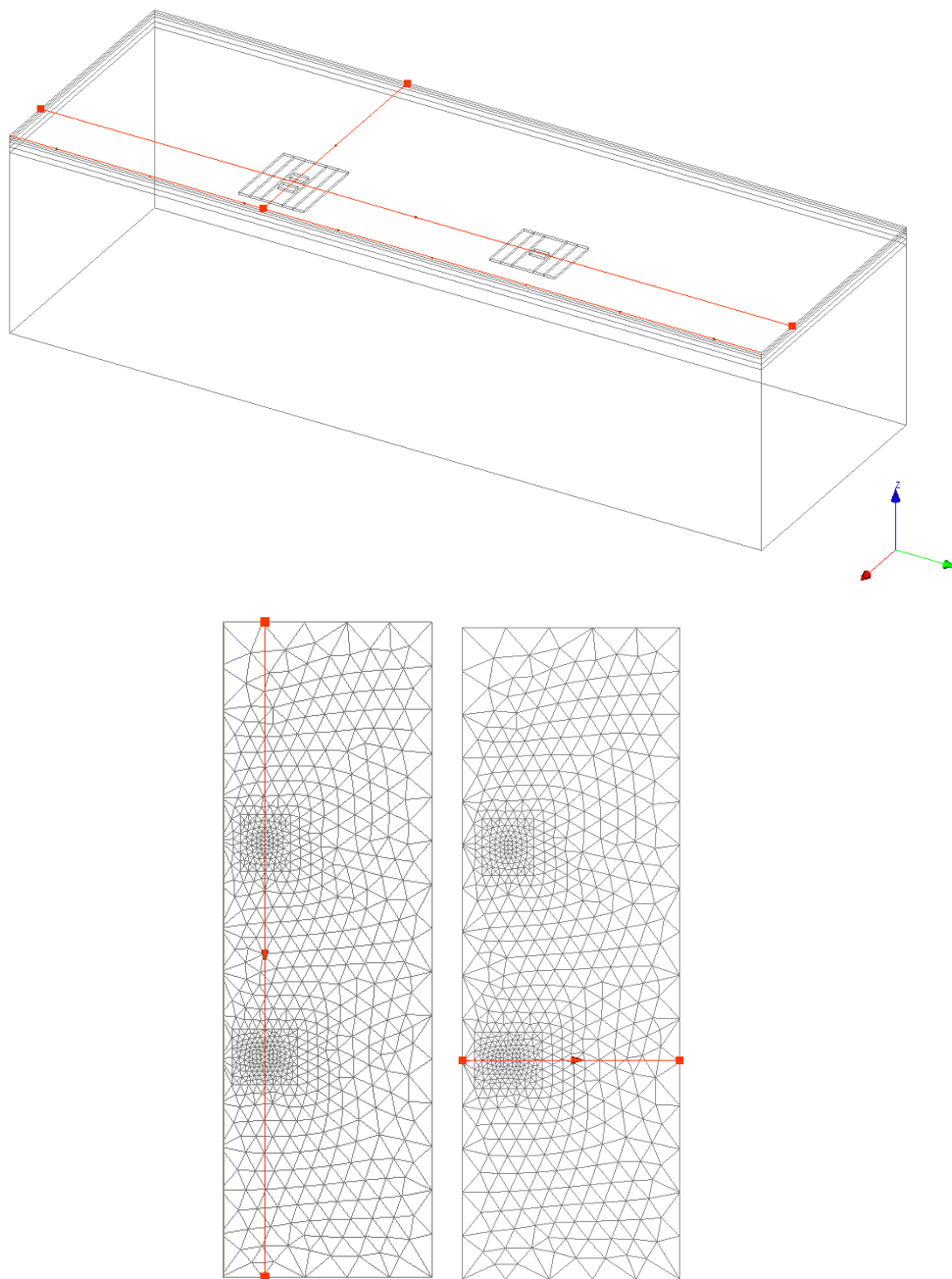


Figure 7 : Positionnement des axes de mesure des déformées.

3.2. Modélisation de structures comportant des fissures verticales

3.2.1. Maillage

Nous avons utilisé des densités de maillages à plus de 47000 EF quadratiques pour la chaussée bitumineuse épaisse. Cette densité d'éléments permet une précision satisfaisante comme ceci a été précisé dans l'étude menée en 2019 – 2020 mentionné dans les rapports [3] et [5]. Pour chaque type de modèle nous avons eu :

Demi – chaussée :

Maillage	Interpolation	Nb éléments
Fissures longitudinales		
<i>Chaussée bitumineuse épaisse</i>	Q	47405
<i>Chaussée Souple type 1</i>	Q	50182
<i>Chaussée Souple type 2</i>	Q	45647
Fissures transversales		
<i>Chaussée bitumineuse épaisse</i>	Q	42779
<i>Chaussée Souple type 1</i>	Q	50562
<i>Chaussée Souple type 2</i>	Q	33599
Longues fissures longitudinales		
<i>Chaussée bitumineuse épaisse</i>	Q	55413
<i>Chaussée Souple type 1</i>	Q	48637

Tableau 4: Les différents maillages utilisés.

3.2.2. Conditions limites

Plusieurs types de conditions limites sont possibles. Nous nous sommes basés sur quelques simulations et avons étudié l'effet de différentes conditions limites :

Conditions limites 1 : Appuis perpendiculaires aux faces latérales et à la base de la chaussée.

Conditions limites 2 : Axe de symétrie et blocage dans le sens x,y et z à la base de la chaussée.

Conditions limites 3 : Axe de symétrie et blocages sur toutes les autres faces.

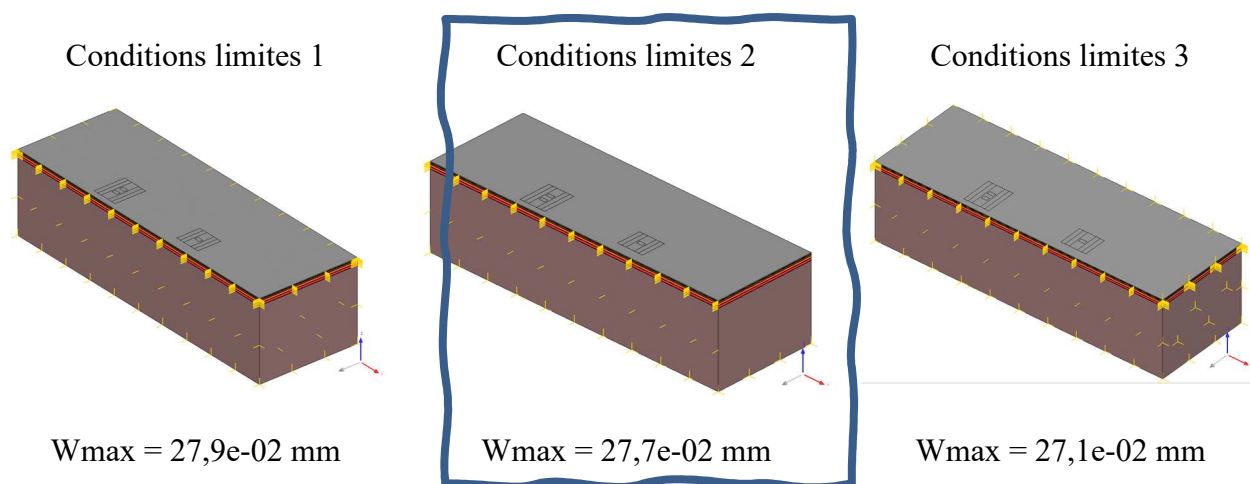


Figure 8 : Types de conditions limites

Nous gardons la deuxième configuration car nous considérons que ces conditions s'approchent le mieux de la réalité.

3.2.3. Effet de la position des fissures dans les différentes couches

L'effet des fissures transversales ayant été menée dans le rapport précédent, nous analysons à présent (tableau 5) l'influence de la présence de fissures verticales longitudinales sur toute l'épaisseur de la couche considérée. Les paramètres des éléments d'interface sont $R_t = 1\text{kPa}$ et un $E = 1\text{MPa}$, équivalent à un contact glissant parfait puis une ouverture au-delà du seuil de résistance en traction.

Le calcul du bassin de déflexion théorique du curviamètre a été réalisé à partir du bassin simulé par le calcul aux éléments finis. Dans ce calcul statique nous n'avons pas considéré l'effet des non linéarités matériels liés à la présence des fissures sur la forme du bassin de déflexion lors de l'avancement du véhicule comme ceci a été fait dans [1]. Rappelons brièvement que le curviamètre réalise une mesure avec des géophones posés en surface et qu'il progresse à une vitesse de 18km/h.

La méthodologie de ce calcul statique est la suivante :

- On calcul la pente du bassin absolu (éléments finis) interpolés sur le maillage : Dy/Dx ;
- On affecte cette valeur au centre du segment des points du maillage ($Dx/2$) ;
- A 3 mètres de la charge maximale, on impose $Dy/Dx = 0$.
- On intègre ensuite le diagramme des pentes en imposant une déflexion nulle à 3m.
- On obtient ainsi le bassin de déflexion longitudinale théorique mesuré par le curviamètre.

3.2.4 Structure bitumineuse épaisse

On observe figure 9 l'effet de la fissuration longitudinale courte (figure 6.a) de la couche de roulement sur les différents bassins calculés par la méthode des éléments finis et par le curviamètre.

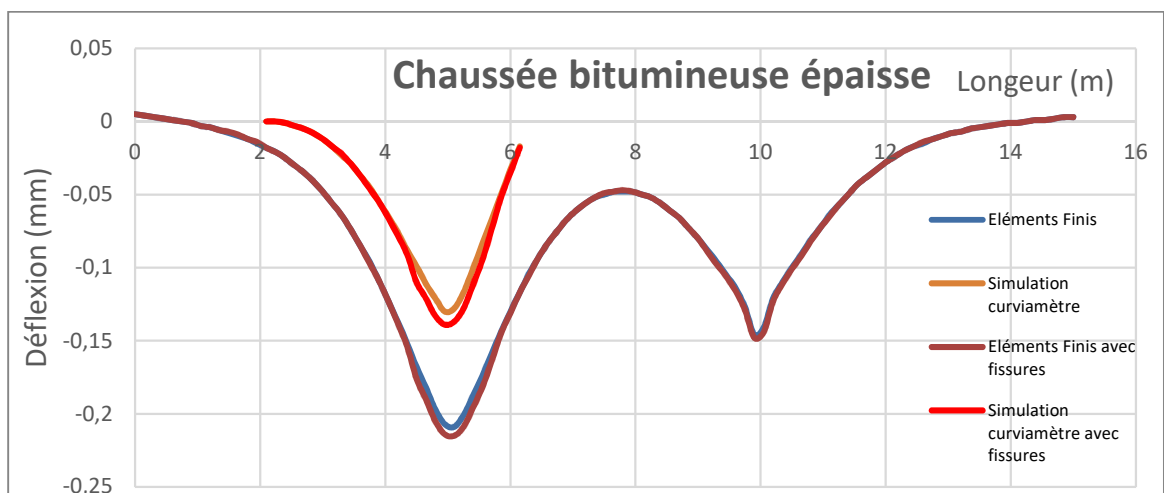


Figure 9: Bassins de déflexion issus du calcul aux éléments finis et de la simulation de ce dernier par un calcul de type curviamètre. Les simulations avec fissures prennent en compte les fissures longitudinales courtes (figure 6.a).

L'étude a été poursuivie en réalisant des simulations pour différentes positions altimétriques des fissures longitudinales courtes depuis la couche de roulement jusqu'à celle de fondation en considérant systématiquement les hauteurs de fissure sur toute l'épaisseur de la couche considérée et la charge centrée selon la figure 6a, ceci rendant la déflexion maximale. Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau 5.

Position des fissures longitudinales (courtes)	Axe transversal (EF)	Axe longitudinal (EF)	Curviamètre (simulé)
	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%

Tableau 5 : Bilan des déplacements verticaux maximums calculés (w_{\max}) (éléments finis et curviamètre) en valeur absolue pour la chaussée bitumineuse épaisse

On observe ainsi que :

- La présence de fissures engendre systématiquement une augmentation du déplacement maximum.
- Plus la couche qui fissure est profonde, plus l'effet est important sur les déflexions maximales. Cette tendance a été également observée dans le rapport n°2 avec des fissures transversales courtes.
- On observe pour la simulation du bassin de déflexion du curviamètre, une tendance à suivre le bassin calculé avec les éléments finis (sens longitudinal), avec relativement à la structure non fissurée des déflexions plus importantes.
- L'écart relatif relevé avec le curviamètre est compris entre 0.6/100 mm et 2.6/100 mm. Les aspects détectables et quantifiables des états de fissuration dépendent de la capacité de détection expérimentale. Sur des chaussées bitumineuses épaisses ceci est à la limite du détectable.
- A noter que les modélisations avec les fissures **transversales courtes** considérées figure 6.a, des tendances similaires ont été obtenues dans le rapport numéro 2.

Nous avons repris l'étude en considérant des fissures **longitudinales longues** positionnée à différentes altitudes. On retrouve (tableau 6) les tendances précédentes amplifiée avec un écart

relatif maximal plus important de l'ordre de 4.4/100 mm, qui apparait détectable par une mesure sur site.

Position des 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%

Tableau 6 : Bilan des déplacements pour la chaussée bitumineuse épaisse avec des fissures longues

Notons que si les paramètres de l'interface E et R_t viennent à augmenter passant ainsi d'une interface parfaitement glissante à une interface rugueuse avec $E = E_{min}$ (module minimal des matériaux entourant la fissure) et $R_t = 1 \text{ MPa}$, les déflexions longitudinales maximales chutent de **10%** environ.

3.2.5 Structure souple 1

L'étude précédente a été déclinée pour la structure souple 1 selon le même principe.

On observe tableau 7 l'effet de la fissuration longitudinale sur les différents bassins calculés par la méthode des éléments finis et par le curviamètre.

Position des 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	0.436	0,423	0,374
Couche de roulement	0.46	0,454 / 7.3%	0,402 / 7.5%
Liaison 1	0.451	0,435 / 2.8%	0,383 / 2.4%
Liaison 2	0.466	0,455 / 7.5%	0,403 / 7.8%

Tableau 7 : Bilan des déplacements pour la chaussée souple 1

On constate avec ces simulations que :

- Les tendances observées pour la chaussée bitumineuse épaisse sont présentes avec une amplification des écarts relativement à la chaussée sans fissure.
- On constate un rapprochement des valeurs de déflexion maximale issue du calcul aux éléments finis et celles du curviamètre. Les écarts relatifs obtenus pour le calcul du bassin de déflexion par le curviamètre sont similaires à ceux du calcul aux éléments finis.
- A noter que l'écart relatif relevé avec les éléments finis ou le curviamètre est de 3/100 mm et il apparaît plus homogène dans pratiquement toute la chaussée, suivant l'évolution du bassin théorique. Cette mesure est à la limite du détectable pour ce type d'appareil.

L'analyse a été poursuivie en considérant des **fissures longitudinales longues**. La synthèse des résultats obtenus est présentée dans le tableau 8. On retrouve les tendances précédentes avec une amplification moindre, l'écart relatif maximal est relativement homogène dans la structure de chaussée et suit l'évolution du bassin théorique. Il est de l'ordre de 3.5/100 mm, ce qui pourrait être détectable par une mesure sur site.

Position des fissures longitudinales longues	Axe transversal (EF)	Axe longitudinal (EF)	Curviamètre (calcul longitudinale)
	w_{\max} [mm]	w_{\max} [mm]	w_{\max} [mm]
Sans fissures	0.436	0,423	0.374
Couche de roulement	0,497	0,457 / 8%	0.405 / 8.3%
Liaison 1	0,461	0,437 / 3.3 %	0.385 / 3%
Liaison 2	0,483	0,461 / 9%	0.409 9.4%

Tableau 8 : Bilan des déplacements pour la chaussée souple 1

3.2.6 Structure souple 2

On observe tableau 9 l'effet de la fissuration longitudinale sur les différents bassins calculés par la méthode des éléments finis et par le curviamètre.

Position des fissures longitudinales courtes	Axe transversal (EF)	Axe longitudinal (EF)	Curviamètre (calcul longitudinale)
	w_{\max} [mm]	w_{\max} [mm]	w_{\max} [mm]
Sans fissures	0.553	0.524	0.472
Couche de roulement	0.565	0.545 / 4 %	0.493 / 4.4 %
Liaison 1	0.573	0.539 / 2.9 %	0.487 / 3.2 %

Tableau 9 : Bilan des déplacements pour la chaussée souple 2

On constate avec ces simulations que :

- Les tendances observées pour les chaussées bitumineuses épaisses, ou souples sont confirmées avec une amplification des écarts relativement aux chaussées précédentes.
- On constate un rapprochement des valeurs de déflexion maximale issue du calcul aux éléments finis et celles du curviamètre. Les écarts relatifs obtenus pour la calcul du bassin de déflexion par le curviamètre sont similaires à ceux du calcul aux éléments finis.
- A noter que l'écart relatif maximal relevé avec les éléments finis ou le curviamètre est de 2/100 mm, et son évolution est identique pour les éléments finis ou l'estimation par le curviamètre. Il apparaît plus homogène dans pratiquement toute la chaussée,

Le cas des **fissures longitudinales longues** a été traité, la synthèse des résultats obtenus est présentée dans le tableau 10. On retrouve les tendances précédentes avec une faible amplification des déflexions. L'écart relatif maximal est relativement homogène dans la structure de chaussée, il est de l'ordre de 1/100 mm, ce qui est non détectable par une mesure sur site.

Position des fissures longitudinales longues	Axe transversal (EF)	Axe longitudinal (EF)	Curviamètre (calcul longitudinale)
	w_{max} [mm]	w_{max} [mm]	w_{max} [mm]
Sans fissures	0.553	0.524	0,472
Couche de roulement	0.637	0.517 / -1.3 %	0,465 / -1.5 %
Liaison 1	0.605	0.536 / 2.3 %	0.484 / 2.5 %

Tableau 10 : Bilan des déplacements pour la chaussée souple 2

4. Conclusion et perspectives

Notre étude a porté sur l'influence de fissures sur un bassin de déflexion selon trois types de chaussées différentes, même si à ce jour, nous n'avons exploité que les déflexions maximales :

- une chaussée bitumineuse épaisse composant le réseau autoroutier français
- deux chaussées souples qui sont des simplifications de la chaussée précédente,

A la suite d'une modélisation par éléments finis à l'aide de CESAR-LCPC V6, nous avons calculé le bassin de déflexion avec les hypothèses du curviamètre, tel qu'il serait calculé avec l'hypothèse de déflexion nulle, de tangente horizontale à 3m et de non prise en compte de l'effet de la non linéarité matériel sur la forme du bassin de déflexion lors du déplacement de la charge.

Pour les fissures longitudinales verticales, plus la couche qui fissure est profonde, plus l'effet sur le bassin de déflexion est important. La déflexion longitudinale relevée par un calcul de type curviamètre suit cette évolution. Ces tendances sont fortement amplifiées lorsque l'on considère des fissures longitudinales longues.

La déflexion relative maximale (comparaison fissurée / non fissurée) issue d'une mesure longitudinale théorique (calcul aux éléments finis) ou estimée par un calcul de type curviamètre est identique pour les chaussées souples (CS1 ou CS2) générant peu d'écart relatif (inférieur à 10%),

confirme le peu d'intérêt de ce dispositif pour cette catégorie de structure et ce type de mesure. Le calcul de la pente du bassin de déflexion avec des pas de mesure tous les 0.1m serait capable de détecter ces discontinuités discontinuités en raison du contraste de rigidité. On tend à observer toujours pour cette catégorie de chaussée des déflexions relatives maximales homogènes dans l'épaisseur de ces structures. Les niveaux de la déflexion relative maximale sont au maximum de l'ordre de 3.5/100 mm à la limite du détectable.

Pour la chaussée bitumineuse épaisse étudiée, la déflexion relative maximale fluctue de la même manière pour la simulation aux éléments finis et le calcul par la méthode du curviamètre. L'amplitude de variation de la déflexion relative maximale est plus importante lorsqu'elle est estimée à l'aide du calcul de type curviamètre. Les niveaux de la déflexion relative maximal sont au maximum de 4.4/100 mm pour les couches les plus profondes cette grandeur étant alors détectable.

La comparaison réalisée permet de constater qu'un calcul de type curviamètre est d'une sensibilité satisfaisante permettant de retrouver celle du bassin de déflexion absolue avec relativement à la structure non fissurée un écart relatif de 33%.

Elle reste homogène sur l'épaisseur de la structure de la chaussée bitumineuse épaisse pour les altitudes de fissures les plus profondes et permet d'interpréter la présence d'une discontinuité géométrique de manière plus certaine que sur une structure souple. Une mesure de type curviamètre est d'avantage recommandée sur des chaussées bitumineuses épaisses. Cette étude complète l'étude menée en [1].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] V. Le Boursicaud « Nouvelles utilisations des mesures de déflexion pour caractériser l'état structurel des chaussées » (thèse IFSTTAR, 2018)
- [2] Gaborit, P., COMPORTEMENT THERMO-MECANIQUE DE STRUCTURES DE CHAUSSEES BITUMINEUSES, thèse ENTPE, 19/06/2015
- [3] Antonio Lavado Ramirez et Fernando Zapata Laureano, Modélisations sur le logiciel Alizé, Projet de Recherche Technologique, INSA Strasbourg 2020
- [4] Diégo Avila Mendoza et Borel Yonke Mbeng, Modélisation analytique et par les éléments finis d'une structure de chaussée multi-fissurée. Effet de la fissuration sur la mesure du bassin de déflexion, Projet de Recherche Technologique, INSA Strasbourg 2021.
- [5] Chazallon C., Mouhoubi S., Dansou A., Rapport de Livrable DvDc/R/026.

5. Modélisation par éléments de frontière

Les résultats sont issus de thèse (soutenue en Novembre 2019) dont le titre est Méthode des éléments de frontière accélérée pour les structures multifissurées : application au renforcement des chaussées

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

5.1. Etat initial et approche utilisée

Les méthodes basées sur des équations intégrales sont bien connues pour leur souplesse à définir des géométries complexes, spécialement celles des domaines tridimensionnels et pour la grande précision qui caractérise les résultats dans la détermination des champs singuliers au voisinage des fissures. Ces méthodes sont utilisées en association avec la méthode multipôle rapide (Fast Multipole Method) pour mettre en place un code de calcul de structures en élasticité 3D et en mécanique de rupture 3D. Ce code développé dans les travaux de Duc PHAM¹ (thèse soutenue en 2010) et Quoc-Tuan TRINH¹ (thèse soutenue en 2014) nécessite des améliorations numériques et mécaniques pour simuler des problèmes réels tels que les chaussées multi-fissurées.

Dans les travaux présentés dans ce rapport, nous avons dans un premier temps proposé et implémenté plusieurs techniques d'optimisation telles que : la mise à jour rapide des données de matrices, la parallélisation en mémoire partagée et une nouvelle technique de stockage compressé. Ces travaux ont permis une accélération très significative du code initial. Nous avons ensuite amélioré l'environnement numérique existant pour simuler la propagation des fissures dans des structures de chaussées. Ces travaux concernent l'implémentation d'une loi de propagation et la gestion de la propagation des fissures débouchant sur des interfaces. Dans ce document, ces travaux d'optimisations mécaniques sont présentés.

5.2. Travaux réalisés

5.2.1. Loi de Paris

Parmi les nombreuses lois de propagation proposées dans la littérature, la loi de Paris [1] est la plus simple et la plus populaire. La vitesse d'avancement de la fissure dépend de la variation cyclique des facteurs d'intensité de contrainte.

$$\frac{da}{dN} = A.\Delta K^m$$

avec N le nombre de cycles de propagation, da l'avancement de la fissure, ΔK est la variation du facteur d'intensité de contrainte $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$, A et m étant des paramètres dépendant du matériau, de l'environnement, de la fréquence, de la température et du niveau de chargement.

Le champ de déplacement étant singulier le long du front de fissure, l'approche classique des éléments à nœuds au quart (voir figure A) est utilisée pour évaluer les facteurs d'intensité de contraintes [2] au nœud 2. Ainsi on a pour les modes I, II, III :

$$K_I^2 = \frac{\mu}{8(1-\nu)} \sqrt{\frac{2\pi}{a}} (4\phi^5 - \phi^1) \cdot \underline{n}$$

$$K_{II}^2 = \frac{\mu}{8(1-\nu)} \sqrt{\frac{2\pi}{a}} (4\phi^5 - \phi^1) \cdot \underline{\nu}$$

$$K_{III}^2 = \frac{\mu}{8} \sqrt{\frac{2\pi}{a}} (4\phi^5 - \phi^1) \cdot \underline{t}$$

avec a le rayon de la fissure, ϕ^1 et ϕ^5 les sauts de déplacements aux nœuds 1 et 5 (Fig. A)

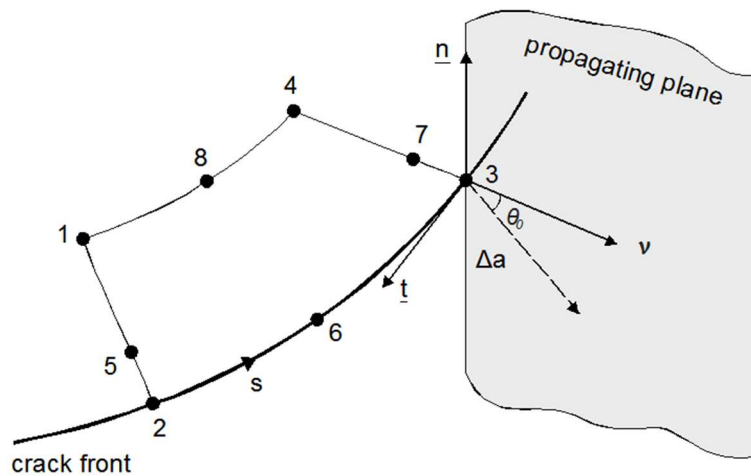


Figure A : Éléments à nœud au quart

L'angle de propagation est donné par le critère de la contrainte tangentielle maximale [3, 4]. Les relations sont rappelées ci-dessous. Le pilotage de la propagation est alors effectué en appliquant la loi de Paris.

$$\tan \frac{\theta_0}{2} = \frac{1}{4} \left(\frac{K_{I\text{eff}}}{K_{II}} - \text{sign}(K_{II}) \sqrt{\left(\frac{K_{I\text{eff}}}{K_{II}} \right)^2 + 8} \right)$$

$$K_{I\text{eff}} = K_I + B|K_{III}|$$

B étant un paramètre du matériau.

Etant donné que des critères appropriés pour la propagation des fissures font encore l'objet de beaucoup de recherches, l'implémentation effectuée ici est flexible et donne la possibilité d'ajouter sans difficultés de nouvelles lois de propagation.

5.2.2. Fissures débouchantes

L'étude des fissures débouchantes et de leur évolution est d'un grand intérêt car elles favorisent la pénétration de l'eau et des agents agressifs qui peuvent entraîner la ruine des ouvrages. L'intersection entre la fissure et la surface de débouchement est spéciale car plusieurs inconnues doivent être déterminées aux nœuds de maillage présents : les déplacements de part et d'autre de la fissure ainsi que le saut de déplacement (Fig. B). Pour prendre en compte ces multiples inconnues, la technique des nœuds multiples [5] est implémentée. Cette technique permet d'utiliser plusieurs nœuds avec la même position, chacun portant l'une des inconnues à déterminer.

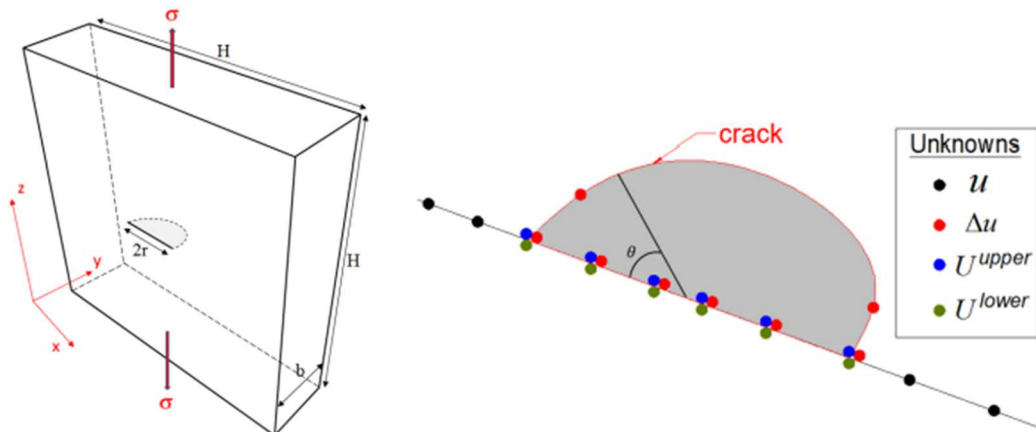


Figure B : Fissure débouchante : géométrie (à gauche), Inconnues à l'intersection (à droite)

Une fois ces fissures traitées, l'étude de leur propagation est explorée à travers la mise en place d'un algorithme détectant et gérant automatiquement les nœuds spéciaux présents aux intersections fissure-surface de débouchement. Cette contribution permet d'envisager le calcul de structures réelles fissurées, car les fissures qu'elles comportent sont souvent des fissures débouchant en surface ou démarrant d'une interface (un joint par exemple).

5.3. Résultats

5.3.1. Fissure débouchante horizontale

Considérons la plaque fissurée de la figure 17 avec $H=10r$, $b=2.5r$ et soumis à la traction sur l'axe vertical. Ces dimensions sont telles que le modèle représente raisonnablement une fissure dans un domaine infini, dont les résultats (ouverture de fissure) sont disponibles. Le maillage de la structure est composé de 1 395 éléments à 8 nœuds (Fig. C). La figure D présente les résultats d'ouverture de fissure comparés aux résultats théoriques de Feng et Hong [6] avec les facteurs de correction de Frangi [3]. Le champ de déplacement vertical de la plaque est présenté à la figure E.

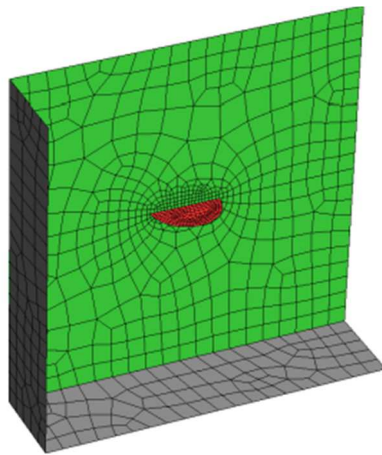


Figure C : Plaque fissurée (maillage)

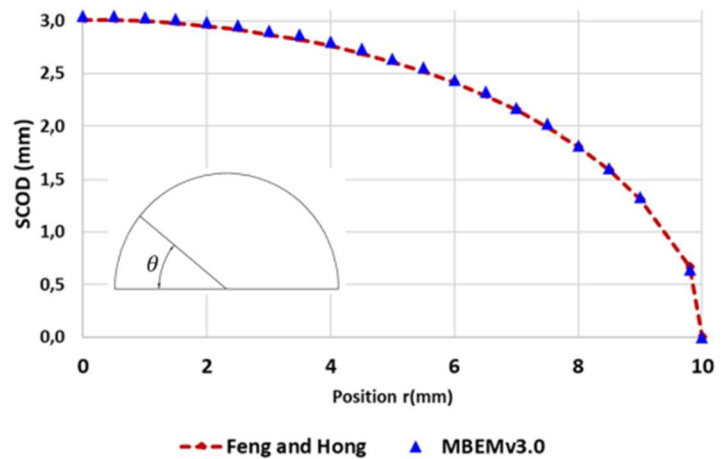


Figure D : Validation de l'ouverture de fissure

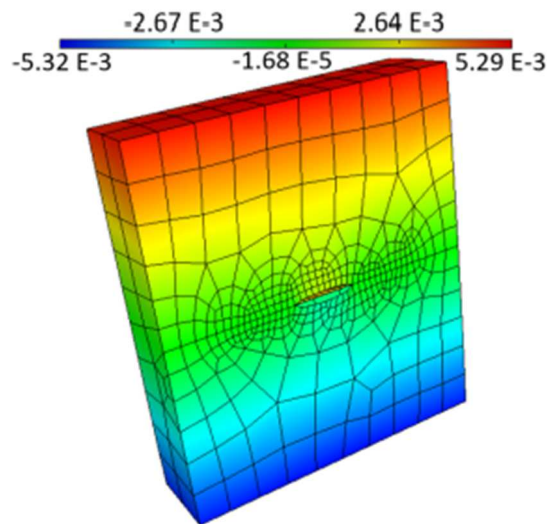


Figure E : Plaque fissurée : champ de déplacement vertical

Pour gérer numériquement la propagation des fissures, deux options sont possibles. La première consiste à fixer le nombre de cycle dN et à calculer le pas d'avancement da correspondant en utilisant la loi de Paris ($A = 10^{-8}$ mm/cycle et $m = 4.5$ pour les bétons bitumineux [7]). La seconde consiste à fixer le pas da et à calculer le nombre de cycle correspondant. Si la première option est la plus réaliste, elle pose cependant des problèmes numériques car les pas d'avancement calculés peuvent être très différents d'un nœud à l'autre d'une même fissure. Nous avons donc implémenté la seconde option dans ce travail. Par ailleurs, cette dernière permet de gérer plus facilement la propagation des nœuds présents à l'intersection surface-fissure. Deux variantes d'implémentation sont possibles avec cette option : la première consiste à imposer l'avancement da au nœud où ΔK est maximal et à calculer les avancements des autres nœuds du front proportionnellement, la seconde consiste à fixer le même avancement da pour tous les nœuds. Pour cette seconde variante, le nombre de cycle calculé n'est donc pas constant d'un nœud à un autre. C'est cette seconde variante qui a été implémentée dans ce travail, les travaux étant en cours pour la première variante.

En utilisant la seconde variante, il est alors important d'afficher pour chaque cycle de calcul, le nombre de cycle réel à chaque nœud. La figure F suivante présente cette cartographie pour la fissure horizontale considérée. On peut remarquer que la fissure se propage beaucoup plus à l'intersection qu'en profondeur de la plaque.

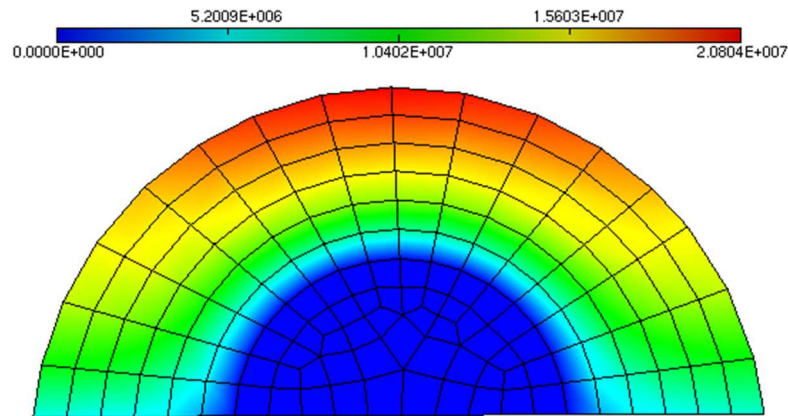


Figure F : Plaque fissurée : cartographie du nombre de cycle

5.3.2 Fissure débouchante inclinée

Considérons le cas d'une fissure débouchante inclinée dans la plaque précédente. Pour ces cas un remaillage de la plaque s'impose dans la direction de propagation de la fissure. En attendant de bien gérer ce remaillage, la propagation de la fissure débouchante inclinée est simulée en considérant un maillage initial adapté au problème (voir Fig. G). Les figures H et I présentent les déplacements et saut de déplacements dans la direction verticale sur la plaque et sur la fissure. Les figures J et K présentent les perspectives de la plaque fissurée.

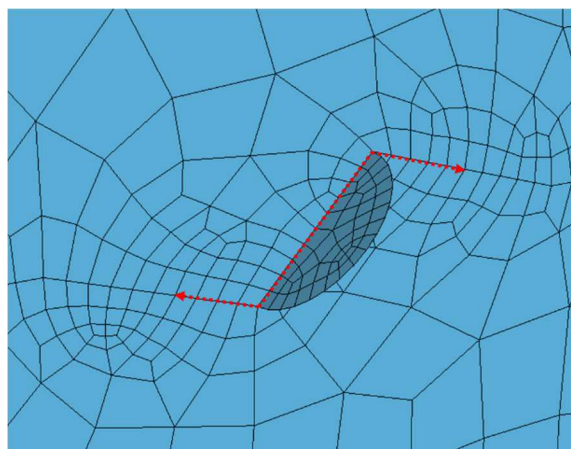


Figure G : Fissure inclinée : maillage

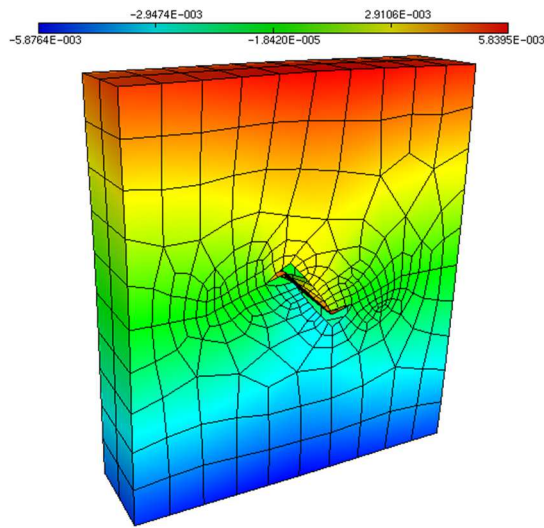


Figure H : Fissure inclinée : déplacements u3

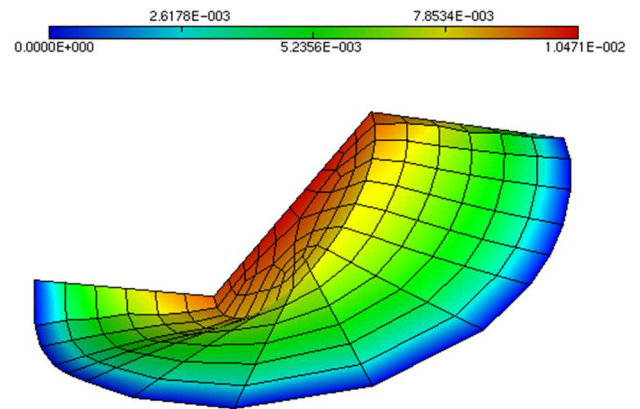


Figure I : Fissure inclinée : sauts de déplacement

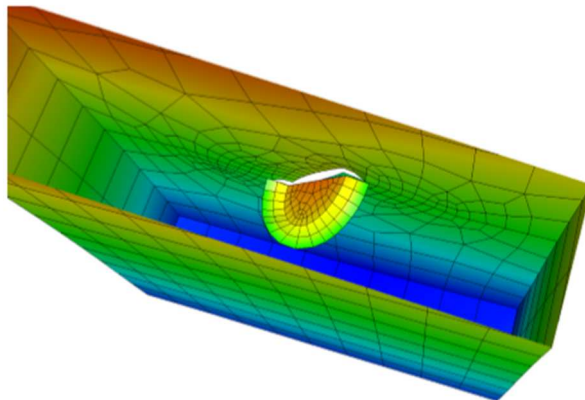


Figure J : Fissure inclinée : Perspective 1

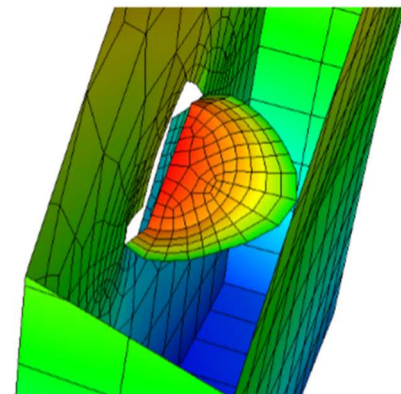


Figure K : Fissure inclinée : Perspective 2

5.3.3. Chaussée avec fissures internes

Considérons à présent une chaussée à trois couches dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau A. La figure L présente le maillage adopté et la figure M montre les dimensions et la position du chargement $p=0.6$ MPa. Les fissures sont initialement circulaires de rayon 10 mm, positionnées dans la couche de surface et orientées aléatoirement (figure N).

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

Tableau 22 : Caractéristiques des couches de chaussées

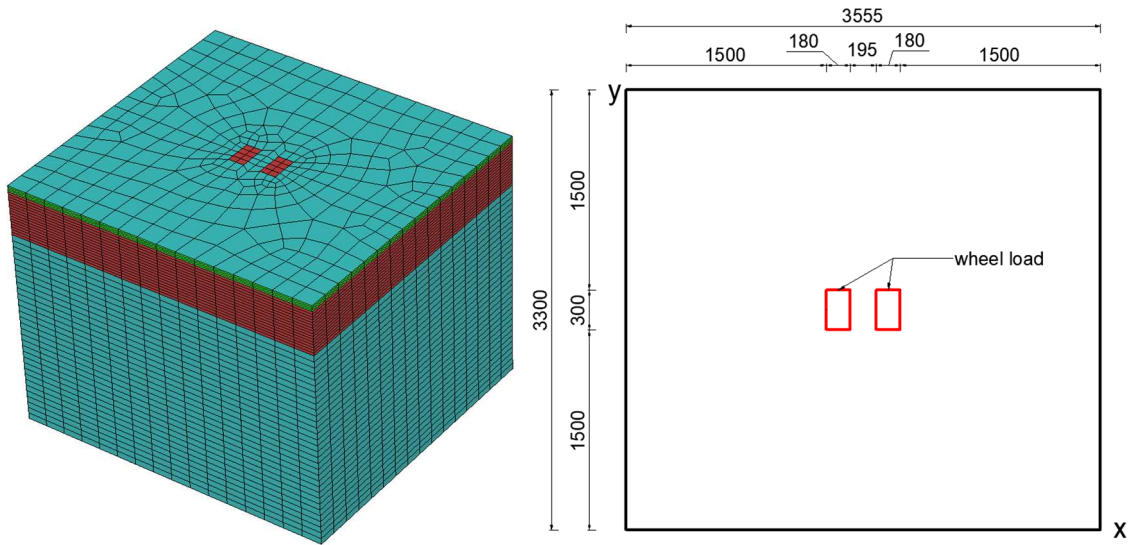


Figure L : Maillage

Figure M : Géométrie et chargement

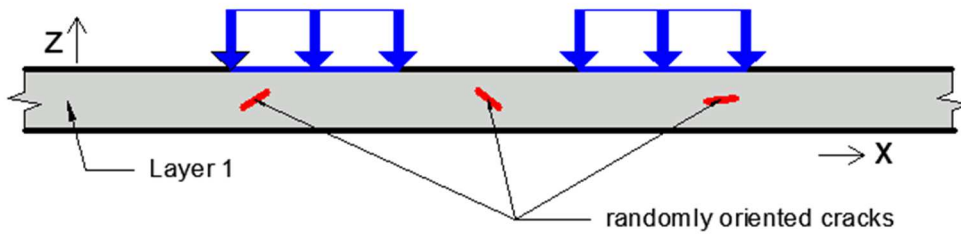


Figure N : Fissures aléatoires dans la couche de surface

Le tableau B suivant montre les durées de calcul pour une, trois et cinq fissures qui se propagent sur dix cycles. La figure O montre sous deux angles différents la forme d'une fissure après propagation. La figure P montre la forme de trois fissures qui se propagent dans la chaussée.

#	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

Tableau B : Propagation de fissures en chaussées

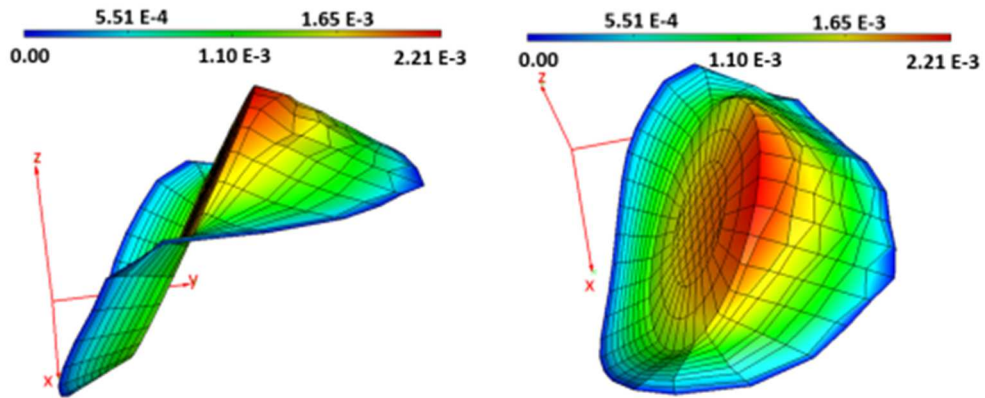


Figure O : Forme de fissure après propagation (ouverture de fissure en mm)

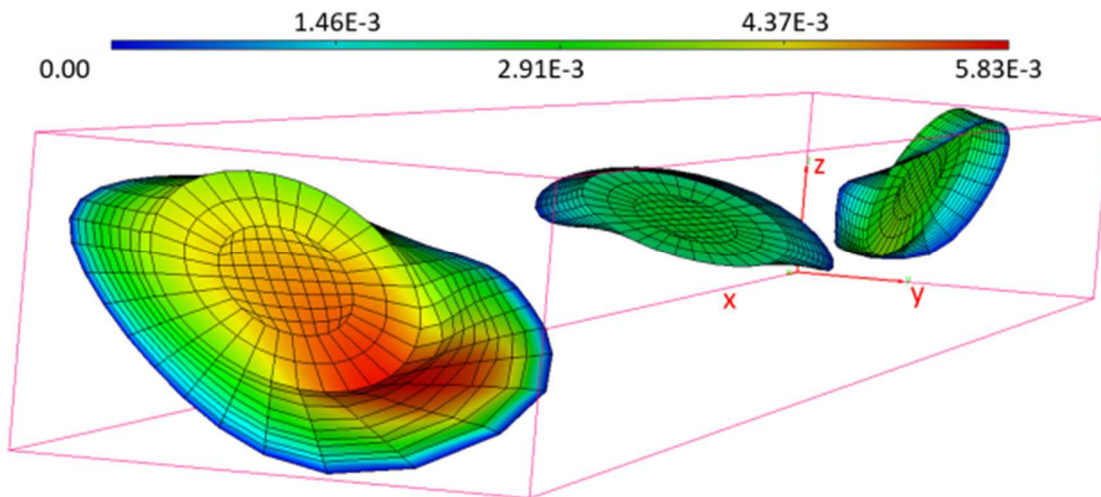


Figure P : Forme de trois fissures après propagation (ouverture de fissure en mm)

5.3.4. Chaussée avec fissure débouchante

Considérons une fissure semi-circulaire débouchante de rayon initiale 25mm située dans la première couche d'une chaussée à trois couches dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau C. La fissure est située dans le plan xz à la position $y=1650\text{mm}$, entre les empreintes de chargement (voir figures L, Q et R). La propagation de cette fissure est simulée et la figure S montre l'évolution de la taille de la fissure (r_x) en fonction du nombre de cycle.

	Epaisseur (mm)	E (MPa)	ν
Couche 1	50	11364	0,35
Couche 2	300	400	0,35
Couche 3	2600	200	0,35

Tableau C : Caractéristiques des couches de chaussées

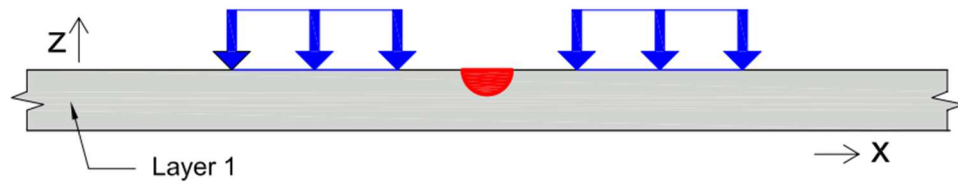


Figure Q : Fissure débouchante : plan xz à y=1650m

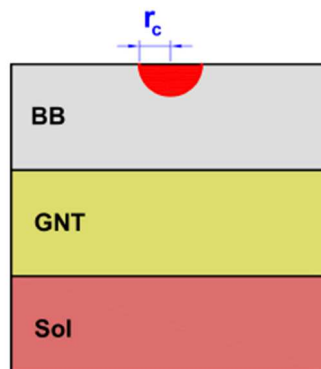


Figure R : Fissure débouchante dans la couche de surface

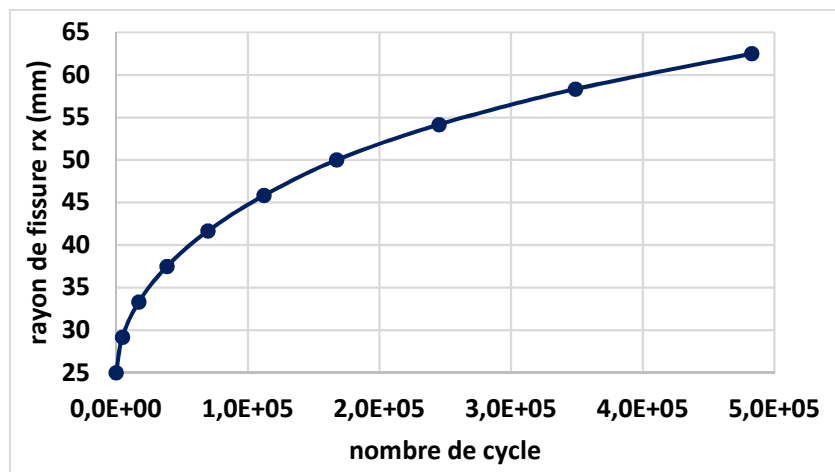


Figure S : Evolution du rayon rx de la fissure en fonction du nombre de cycle

6. Conclusion et perspectives

Le code basé sur la méthode des éléments de frontière accélérée, développé 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 très encourageants. Cependant beaucoup reste à faire pour envisager une utilisation industrielle.

La loi de Paris implémentée ici est très simple et ne reflète pas forcément le comportement réel des matériaux. Il faudra donc implémenter d'autres lois de propagation plus robustes afin d'améliorer la fiabilité des résultats. Le code développé est validé avec de nombreuses comparaisons avec des résultats théoriques et numériques. Dans la suite nous ferons des comparaisons avec des essais en laboratoires ou in-situ.

Bibliographie

- [1] Paris, P., Erdogan, F. (1963). A critical analysis of crack propagation laws. J. Basic Eng., 85:528-533.
- [2] Bonnet, M. (1999). Boundary integral equation methods for solids and fluids. Wiley editor
- [3] Frangi, A. (2002). Fracture propagation in 3D by the symmetric Galerkin boundary element method. Int. J.Fract., 116:313-330.
- [4] Erdogan, F., Sih, G. C. (1963). On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. J.Basic Eng., 85:519-525.
- [5] Sutradhar, A., Paulino, G. H. et Gray, L. J. (2008). Symmetric Galerkin Boundary Element Method. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [6] Feng, D.-Z., Hong, Q.-C. (1992). Investigation of surface crack opening displacement and its application in pressure vessels and piping. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 52(2):227 – 239.
- [7] Di Benedetto, H., & Corté, J.-F. (2004). Matériaux routiers bitumineux: Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges. Hermès science publications.