

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 : Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées

DVDC/R/026

LC/18/DVDC/61

Mai 2020

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	5
3.1.3 Chargement.....	6
3.1.4 Les fissures considérées	8
3.2 Modélisation de structures comportant des décollements	10
3.2.1 Effet de la discrétisation	10
3.2.2 Etude de l'effet de la réduction de la capacité portante	11
3.3 Modélisation des structures fissurées transversalement.....	13
3.3.1 Effet de la discrétisation	13
3.3.2 Effet de la réduction de la capacité portante	15
3.4 Conclusion et perspectives	16
3.5 Comparaison des résultats obtenus avec Alizé.....	17
4 Modélisation par éléments de frontière	18
4.1 Etat initial	19
4.1.1 Approche utilisée	19
4.2 Travaux réalisés.....	19
4.2.1 Réutilisation de données et mise à jour rapide de matrices.....	19
4.2.2 Parallélisations en mémoire partagée	20
4.2.3 Nouvelle méthode de stockage de données	20
4.2.4 Performance du code	21
4.3 Résultats obtenus.....	22
4.4 Conclusion et perspectives	26

1 Résumé

Résumé en français

Cette deuxième tranche a permis de poursuivre l'étude de sensibilité menée sur 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 ce travail, une modélisation par éléments finis a été menée en considérant l'effet de la variation d'épaisseur des différentes couches +/- 1 cm, et de celle de la portance des couches de matériaux non liés sur les bassins de déflexion. Des ordres de grandeur ont été obtenus numériquement pour les différentes configurations. Ce travail est mené au moyen d'éléments de contacts.

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

In this second unit, the sensitivity study conducted on the effect of cracking on the deflection basin has been performed. The cracks studied are horizontal (separation between layers) or vertical over the entire thickness of the considered layer or over part of it for thick or low traffic bituminous pavements.

As part of this work, finite element modelling was carried out considering the effect of the variation of thickness of the different layers +/- 1 cm, and that of the bearing capacity of the unbound layers on the deflection bowls. Orders of magnitude were obtained numerically for the different configurations. This work is carried out by means of contact elements.

In the second part, we continued the development of a boundary element modeling tool by integrating fracture mechanics in order to take into account multi-cracking of pavements. This software has been numerically optimized and the first simulations of crack propagation in a loaded pavement structure have been 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.

Deux techniques de calcul sont proposées, l'une d'elle 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.

La seconde repose sur une base de calcul aux éléments finis. Une étude théorique de sensibilité des bassins de déflexion, vis-à-vis de schémas simplifiés de fissuration des chaussées a été menée (Bader et Pereira 2017).

3 Modélisation par éléments finis

3.1 Rappel

3.1.1 Chaussée bitumineuse épaisse

La première structure étudiée est identique à celle de la première tranche. Elle se compose des matériaux suivants (figure 1 et tableau 1) :

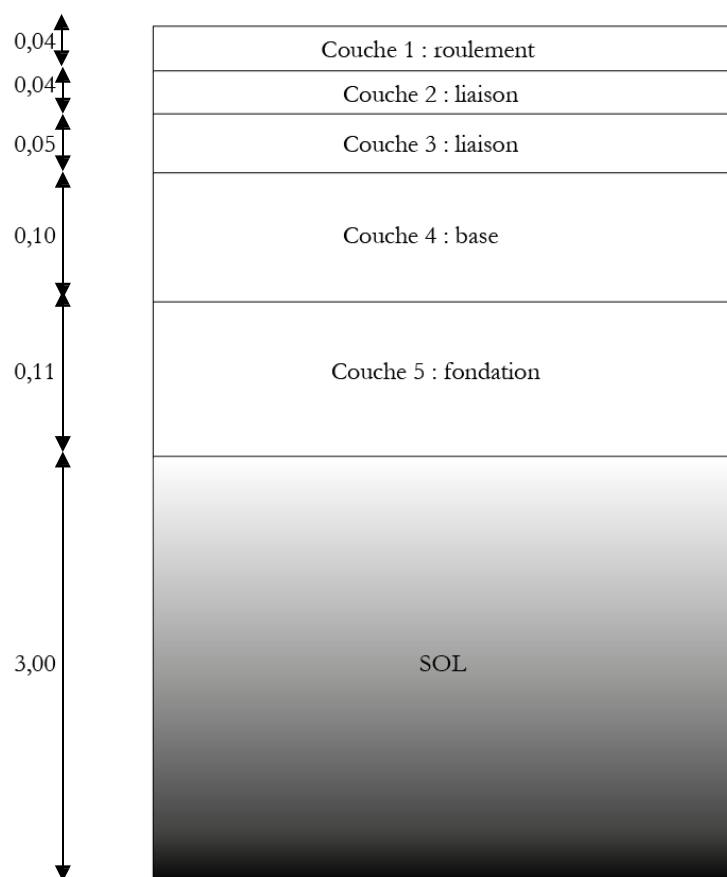


FIGURE 1 : CHAUSSÉE BITUMINEUSE EPAISSE

Projet National de recherche et développement

Couche	CdR (BBM)	Liaison (GB)	Liaison (GB)	Base (GB)	Fondation (MTLH)	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

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.

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.

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.

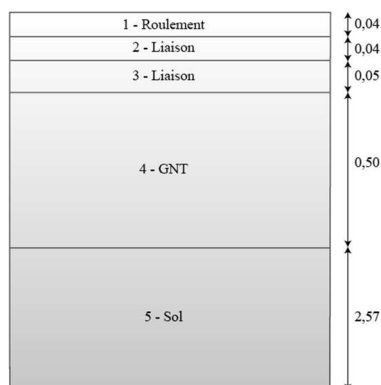


Figure 2 : Chaussée souple 1

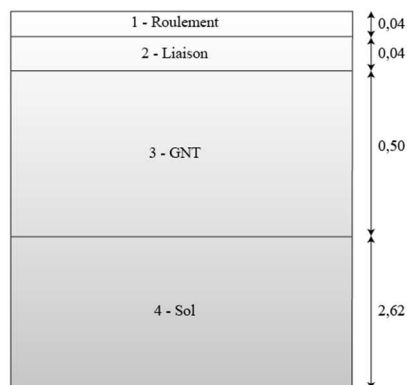


Figure 3 : Chaussée souple 2

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

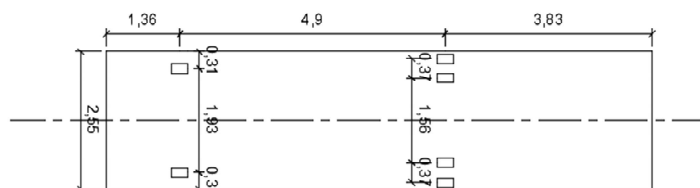
Tableau 2 : caractéristiques de la chaussée souple 1

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

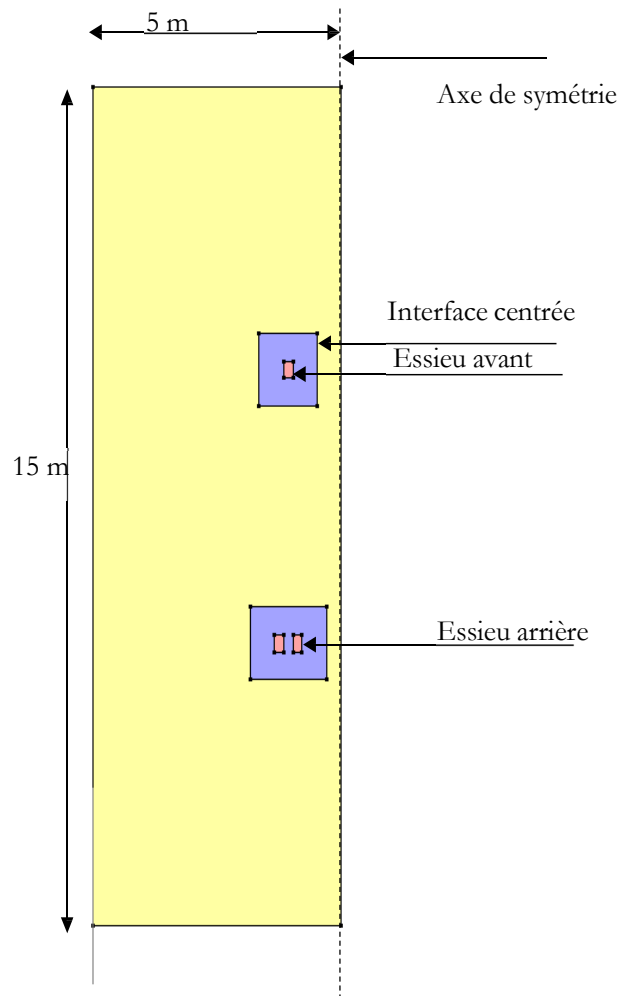
Le chargement (de type curviamètre) est celui utilisé dans la thèse de P. Gaborit (Gaborit 2015).



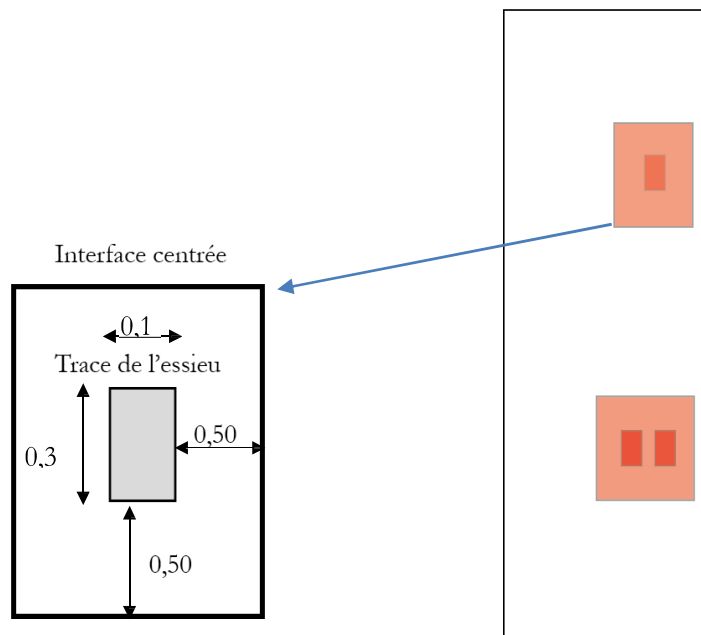
(a) Curviamètre

Contrainte roue avant	0.602 MPa
Contrainte roue arrière	0.713 MPa

(b) Contraintes sous les pneumatiques



(c) Géométrie du chargement considéré



(d) Dimensions de l'interface en mètre

Figure 4 : Modélisation du chargement

3.1.4 Les fissures considérées

Deux catégories de fissures sont considérées, des fissures horizontales (décollement) et des fissures verticales.

Les fissures horizontales (décollement, voir figure 5) seront placées à l'interface entre deux couches (décollement) de la chaussée, sur une surface restreinte. La dimension de la surface de décollement et sa position par rapport au chargement jouent un rôle prépondérant dans l'intensité et les formes des bassins de déflexion observés. Les caractéristiques des éléments d'interface sont choisis de manière à être très déformables, à ne générer aucune résistance au cisaillement et à se placer en condition de glissement à partir d'une faible traction :

- Interface parfaitement glissante, $E = 1 \text{ MPa}$ et $R_t = 1 \text{ kPa}$ (résistance à la traction)
- Interfaces centrées par rapport au chargement appliqué

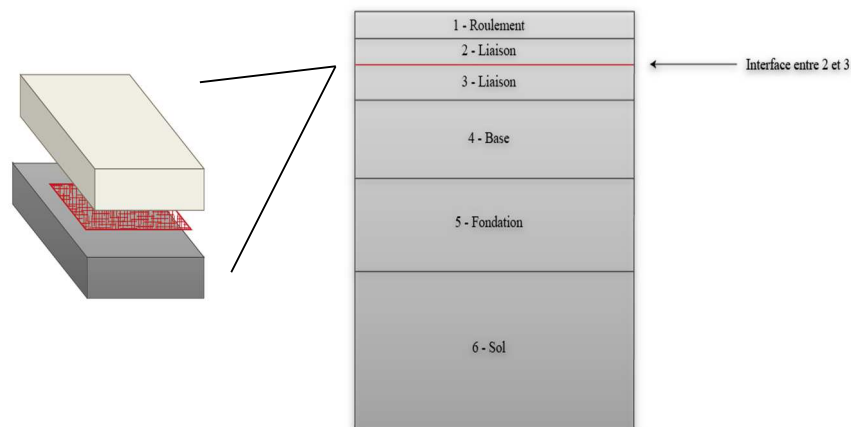


Figure 5 : Décollement partielle entre la couche de roulement et la couche de liaison

Les fissures verticales (figure 6) 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.

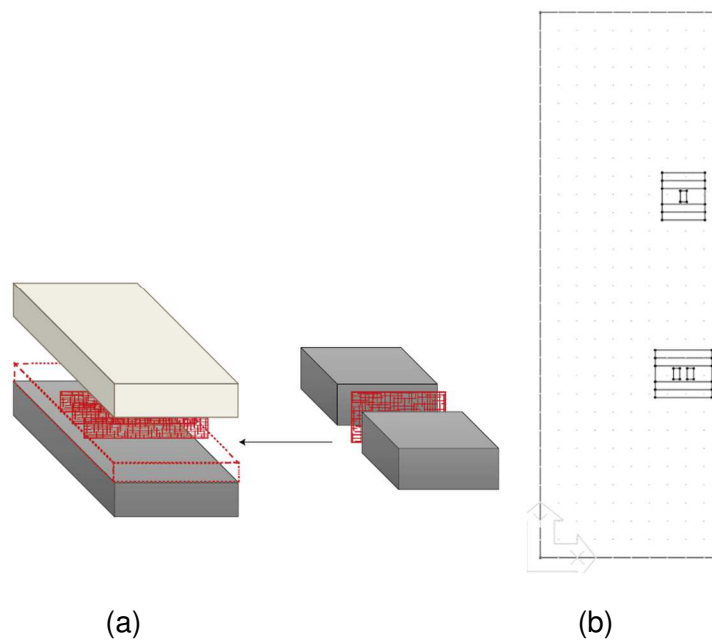


Figure 6 : Réseau de fissures transversales dans une couche (a), positionnement des fissures par rapport au chargement (b).

Les déformées sont mesurées selon les deux axes présentés figure 7.

Étude des résultats selon deux axes

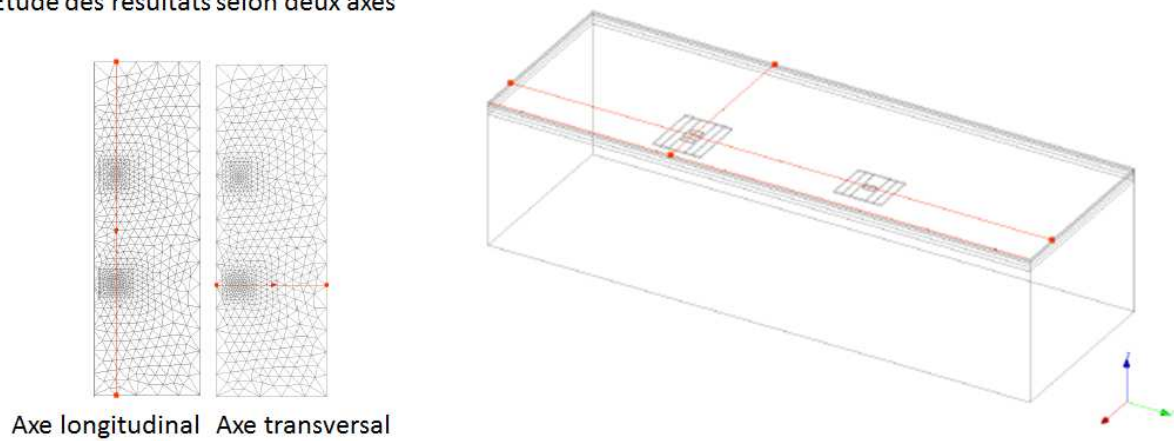


Figure 7 : Positionnement des axes de mesure des déformées.

3.2 Modélisation de structures comportant des décollements

3.2.1 Effet de la discrétisation

Nous avons repris les maillages utilisés lors de la tranche 1 et nous sommes passés de 14000 éléments finis quadratiques (EF) (V5 César), à 43000EF (nécessaires lors de l'étude de sensibilité à l'épaisseur des couches) (V6 César). Les effets de l'augmentation du nombre d'EF vont dans le sens d'une légère augmentation des déflexions, quelle que soit la position de l'interface considérée. On constate par contre que la déflexion est d'autant plus forte que la position de l'interface est haute dans la structure (tableaux 4, 5 et 6).

La condition limite employée est la suivante :

- Blocage de la face inférieure
- Blocage du déplacement orthogonal au plan de symétrie

Position des interfaces glissantes	Axe transversal V6 (43kEF)	Axe transversal V5 (14kEF)	Écart relatif
	w_{\max} [mm]	w_{\max} [mm]	[%]
Sans interface	0,279	0,209	33
CdR - Liaison 1	0,433	0,404	7
Liaison 1 - Liaison 2	0,389	0,307	26
Liaison 2 - Base	0,37	0,295	25
Base - Fondation	0,335	0,269	24

Tableau 4 : Chaussée bitumineuse épaisse, déflexions calculées

Position des interfaces glissantes	Axe transversal v6 (43kEF)	Axe transversal v5 (14kEF)	Ecart relatif
	w_{\max} [mm]	w_{\max} [mm]	(%)
Sans interface	0,517	0,445	16
CdR - Liaison 1	0,71	0,632	12
Liaison 1 - Liaison 2	0,67	0,599	11
Liaison 2 - GNT	0,568	0,521	9

Tableau 5 : Chaussée souple 1, déflexions calculées

Position des interfaces glissantes	Axe transversal v6 (43kEF)	Axe transversal	Ecart relatif
------------------------------------	----------------------------	-----------------	---------------

		v5 (14kEF)		
		w_{max} [mm]	w_{max} [mm]	(%)
Sans interface		0,631	0,568	11
CdR - Liaison 1		0,843	0,756	11

Tableau 6 : Chaussée souple 2, déflexions calculées

Ainsi des facteurs communs sont à noter :

- L'addition d'une interface glissante augmente le déplacement quelle que soit la structure de la chaussée.
- Plus la distance entre la surface des essieux et celle de décollement est réduite, plus l'influence de l'interface est importante sur les déplacements.

3.2.2 Etude de l'effet de la réduction de la capacité portante

Lors de cette étude, nous avons fait varier la position de l'interface comme vu précédemment mais également divisé par deux la capacité portante du sol (tableau 7).

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	60
N	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,25

Tableau 7 : Caractéristiques mécaniques réduites d'une chaussée bitumineuse épaisse

Dans tout ce qui suivra, les encadrés et les flèches associées traduisent les comparaisons relatives qui seront menées dans les tableaux suivants pour les couleurs rouges, vertes et bleues (7-9, 11-12, 16-17, 18-19).

Position des interfaces glissantes	Axe transversal / Capacité réduite	
	w_{max} [mm]	w_{max} [mm]
Sans interface	0,279	0,452
CdR - Liaison 1	0,433	0,604
Liaison 1 - Liaison 2	0,389	0,567
Liaison 2 – Base	0,37	0,554
Base – Fondation	0,335	0,518

Tableau 8 : Bilan des déplacements pour la chaussée bitumineuse épaisse (CBE)

Position des interfaces glissantes	Effet de la présence d'un décollement [%]	Effet de la présence d'un décollement et d'une capacité portante réduite [%]	Effet de la capacité portante réduite [%]
Sans interface	-	-	62%
CdR - Liaison 1	55 %	33 %	39,5%
Liaison 1 - Liaison 2	39 %	24,4 %	45,8%
Liaison 2 – Base	33%	22,6%	49,7%
Base – Fondation	20 %	14,6 %	54,6%

Tableau 9 : Variation relative des déplacements de la CBE

On observe tableaux 8 et 9 que :

- L'influence des décollements est similaire dans les deux cas de capacité portante, ainsi la présence d'un décollement, comme précédemment, augmente la déflexion et plus la distance entre la surface des essieux et de décollement diminue, plus l'influence du décollement est important sur la déflexion.
- L'influence des décollements est moins importante lorsque la capacité portante de la couche de sol est réduite (de 55% à 33% pour les extrêmes).
- Le changement de capacité augmente les déplacements de 50% en moyenne

Nous présentons ensuite les résultats de la chaussée souple 2 avec la diminution de la capacité portante (tableaux 10).

Couche	CdR	Liaison	GNT	Sol
Épaisseur [m]	0,04	0,04	0,50	2,57
Comportement	Élastique	Élastique	Élastique	Élastique
E [MPa]	4581	4581	90	60
ν	0,35	0,35	0,25	0,25

Tableau 10 : Caractéristiques mécaniques réduites d'une chaussée souple de type 2

Position des interfaces glissantes	Axe transversal	Axe transversal avec capacité réduite	Axe longitudinal	Axe longitudinal avec capacité réduite
	w_{\max} [mm]	w_{\max} [mm]	$W_{\text{arrière}}$ [mm]	$W_{\text{arrière}}$ [mm]
Sans interface	0,631	1,129	0,608	1,121
CdR - Liaison 1	0,843	1,453	0,738	1,367

Tableau 11 : Bilan des déplacements pour la chaussée souple 2 (CS2)

Position des interfaces glissantes	Effet de la présence d'un décollement [%]	Effet de la présence d'un décollement et d'une capacité portante réduite [%]	Effet de la capacité portante réduite [%]
Sans interface	-	-	78,9%
CdR - Liaison 1	31,5 %	28,7 %	72,3%

Tableau 12 : Variation relative des déplacements de la CS2

On observe, tableaux 11 et 12, un comportement amplifié par rapport au cas précédent en ce qui concerne la déflexion maximale, pour laquelle l'augmentation relative passe de 50% à 75% (63% pour la CS1 non présentée). Notons cependant que l'influence du positionnement des décollements est ici du même ordre que celle que soit la capacité portante des couches de GNT et de sol (31,5% et 28,7% pour les deux extrêmes) pour la CS2, et de l'ordre de 30% pour la CS1 (non présentés). Ainsi la capacité portante, dans ce cas, ne semble pas affecter l'effet des interfaces glissantes, ce qui traduit un comportement indépendant vis-à-vis du positionnement des interfaces et des capacités portantes des couches de GNT et de sol.

3.2.3 Etude de l'effet de la variation de l'épaisseur des couches

Afin de poursuivre notre étude du bassin de déflexion, nous avons pris maintenant en compte une variation de l'épaisseur des couches d'une structure de chaussée. Nous changerons l'épaisseur de la couche (± 1 cm) sous l'interface afin de comparer les résultats obtenus avec comme référence, le déplacement de la structure initiale.

Nous avons observé pour les trois structures que les changements d'épaisseur de ± 1 cm n'affecte que très peu le bassin de déflexion (environ $\pm 2\%$). Ceci peut s'expliquer par les dimensions proches des trois couches avant les changements (Couche de surface de 14cm – Couche de base de 10cm – Couche de fondation 11cm).

3.3 Modélisation des structures fissurées transversalement

3.3.1 Effet de la discrétisation

Nous analysons à présent l'influence de la présence de fissures verticales sur toute l'épaisseur de la couche considérée. Le passage de 14kEF (v5 César) à 43kEF (v6 César) conduit

à une augmentation légèrement supérieure à 15% de la déflexion maximale calculée pour la CBE (tableau 13).

Position des fissures	Axe transversal v6 (43kEF)	Axe transversal v5 (14kEF)	Ecart relatif
	w_{\max} [mm]	w_{\max} [mm]	(%)
Sans fissures	0,279	0,226	23
Liaison 1	0,284	0,237	20
Liaison 2	0,286	0,248	15
Base	0,309	0,255	21
Fondation	0,315	0,273	15

Tableau 13 : Bilan des déplacements 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 déplacements.
- La présence de fissures dans les couches de liaison n'augmente que très peu le déplacement.

Pour la chaussée souple CS2, les valeurs de déflexion obtenues sont les suivantes (tableau 14):

Position des fissures	Transversal 43kEF	Transversal 14kEF	Ecart relatif
	w_{\max} [mm]	w_{\max} [mm]	(%)
Sans fissures	0,631	0,555	13
Liaison	0,66	0,594	10

Tableau 14 : Bilan des déplacements pour la chaussée souple de type 2

On observe un comportement similaire à la CBE dans la mesure où la présence de fissures engendre systématiquement une augmentation de la déflexion. Mais la présence de fissures dans les couches de liaison n'augmente que peu le déplacement.

3.3.2 Effet de la réduction de la capacité portante

Lors de cette étude, nous avons fait varier la position des fissures transversales comme cela a été vu précédemment, mais également divisé par deux la capacité portante du sol pour la CBE (tableau 15).

Couche	CdR	Liaison 1	Liaison 2	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	60
ν	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,25

Tableau 15 : Caractéristiques mécaniques réduites d'une chaussée bitumineuse épaisse

On observe alors dans les tableaux 16 et 17 que la présence de fissures augmente la déflexion et que plus la couche qui fissure est profonde, plus l'effet est important sur les déplacements. On notera cependant que l'augmentation des déplacements en fonction de la position des fissures reste du même ordre pour les deux capacités portantes et que l'augmentation par rapport à la capacité portante de base semble assez constante quelle que soit la position des fissures (entre 60% et 64%).

Position des fissures	Axe transversal	Axe transversal avec capacité réduite
	w_{\max} [mm]	w_{\max} [mm]
Sans fissures	0,279	0,452
Liaison 1	0,284	0,464
Liaison 2	0,286	0,469
Base	0,309	0,496
Fondation	0,315	0,504

Tableau 16 : Bilan des déplacements pour la chaussée bitumineuse épaisse

Position des fissures	Effet de la présence de fissures transversales [%]	Effet de la présence de fissures transversales et d'une capacité portante réduite [%]	Effet de la capacité réduite [%]
Sans fissures	-	-	62,0
Liaison 1	1,8	2,7	63,4
Liaison 2	2,5	3,8	64,0
Base	10,8	9,7	60,5
Fondation	13	11,5	60

Tableau 17 : Évolution relative du déplacement de la chaussée bitumineuse épaisse

En ce qui concerne l'étude de la structure de chaussée souple 2 (CS2), les modules des couches de GNT et de sol ont été divisés par 2. Nous comparons alors l'influence du positionnement des fissures transversales pour les deux cas de capacité portante (tableaux 18 et 19):

Position fissures	Transversal (selon x)	Transversal (selon x) avec Capacité réduite
	w_{max} [mm]	w_{max} [mm]
Sans fissures	0,629	1,143
Liaison	0,66	1,211

Tableau 18 : Bilan des déplacements pour la chaussée souple de type 2

Position des interfaces glissantes	Effet de la présence de fissures transversales [%]	Effet de la présence de fissures transversales et d'une capacité portante réduite [%]	Effet de la capacité portante réduite [%]
Sans fissures	-	-	81,7%
Liaison	4,9%	5,9%	83,5%

Tableau 19 : Évolution relative du déplacement de la chaussée souple de type 2

On observe que la présence de fissures transversales engendre systématiquement une augmentation du déplacement maximum, ainsi la fissuration de la couche de liaison engendre un déplacement relatif équivalent à celui observé sur la chaussée avec la capacité portante de base.

3.4 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 pu observer que l'ajout de surfaces de glissement horizontales ou verticales influence de manière significative les valeurs de la déflexion.

Dans le cas de surfaces de décollement entre deux couches, plus le décollement à lieu proche de la surface, plus les déplacements sont importants.

Pour les fissures transversales verticales, le phénomène est inverse. En effet, plus la couche qui fissure est profonde, plus l'effet sur les déplacements est important.

Dans un second temps, notre projet s'est porté sur l'influence des capacités portantes du sol et des couches de GNT (chaussées souples). Nous avons comparé les résultats obtenus lors de

décollement et de fissures transversales pour des structures ayant une capacité portante réduite avec celles obtenues avec la capacité portante initiale.

Dans tous les cas le changement de capacité portante augmente le déplacement. L'effet est différent en fonction du type de chaussée et de rupture.

Pour la chaussée bitumineuse épaisse :

- Avec les interfaces de glissement horizontales, on note un amoindrissement de l'influence de la position des interfaces. Le changement de capacité portante affecte les déplacements différemment en fonction de la position des interfaces, ce qui se traduit par le fait qu'il n'y a aucune relation de proportionnalité entre les modèles à capacité portante différentes, le gain variant alors de 40% à 55%.
- Avec les fissures transversales verticales, le phénomène est inverse, l'influence des positions des fissures n'est pas modifiée et une proportionnalité entre les deux modèles est visible, le changement de capacité augmente d'environ 60% les déflexions pour tous les cas.

Pour les chaussées souples, les conclusions sont inversées :

- Avec interfaces de glissement horizontales, l'influence des positions des fissures n'est pas modifiée et une proportionnalité entre les deux modèles est visible, le changement de capacité augmente d'environ 75% et 63% les déflexions pour CS2 et CS1 dans tous les cas.
- Avec fissures transversales verticales, l'influence des positions des fissures n'est plus la même entre les deux modèles à capacité portante différente et aucune proportionnalité n'est visible.

Pour finir, nous avons étudié l'influence sur les déplacements des épaisseurs des couches avec les interfaces de glissement horizontales, en augmentant ou diminuant de 1 cm les différentes couches de chaque structure.

Dans tous les cas, la variation d'épaisseur n'a que très peu d'effet sur le bassin de déflexion (de l'ordre de +/- 2%).

La transposition de ces résultats théoriques à une situation de terrain, pour laquelle il n'y a pas de valeur de déflexion de référence, conduit à considérer des écarts relatifs entre les différents scénarii. Ces derniers conduisent à des écarts mesurables, dans l'état actuel des moyens de mesure, pour les chaussées à faible trafic de l'étude réalisée.

3.5 Comparaison des résultats obtenus avec Alizé

Une étude a été menée avec Alizé dans laquelle on a pris en compte le véhicule complet comme dispositif de chargement (ou la 1/2 du véhicule si on considère la symétrie) et mis en évidence que :

- Dans le cadre d'une structure monolithique où les interfaces sont collées, le calcul analytique et le modèle aux éléments finis fournissent le même bassin de déflexion
- Dans le cadre d'une structure modélisée possédant des interfaces glissantes représentant des décollements, les modélisations donnent des résultats identiques à 5% près, quelque soit la position de l'interface de glissement, si pour le modèle aux éléments finis :
 - o On considère des éléments d'interface sur toute la surface considérée (75 m² pour le cas étudié).
 - o On fixe le paramètre contrôlant l'ouverture de l'interface à une valeur forte relativement aux charges imposées (1 MPa pour le cas étudié) pour maintenir l'interface fermée.
 - o Le module de rigidité de l'interface est pris égal au minimum des 2 matériaux entourant l'interface (quelques milliers de MPa dans le cas étudié).

BIBLIOGRAPHIE

V. Le Boursicaud « Nouvelles utilisations des mesures de déflexion pour caractériser l'état structurel des chaussées » (thèse IFSTTAR, 2018)

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

Bader Lison et Jérôme Pereira, Modélisation par éléments finis d'une structure de chaussée multi-fissurée. Effets de la multi-fissuration sur la mesure du bassin de déflexion, PRT, INSA Strasbourg 2017

Antonio LAVADO RAMIREZ et Fernando ZAPATA LAUREANO, Modélisations sur le logiciel Alizé, Projet de Recherche Technologique, INSA Strasbourg 2020

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.

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

4.2.1 Réutilisation de données et mise à jour rapide de matrices

Lors des simulations en propagation de fissures, de nouveaux éléments sont ajoutés au maillage et le système doit être actualisé. Cette actualisation revient au recalcul des matrices. Une technique de réutilisation de données est mise en place. Cette technique consiste pour un cycle donné, à sauvegarder les valeurs des matrices correspondant aux intégrales entre les éléments existants au cycle précédent et à les réutiliser pour accélérer le cycle en cours (figure 8a). Ainsi à chaque cycle, seules les intégrales faisant intervenir les nouveaux éléments sont calculées. Cette technique de réutilisation de données a permis de réduire significativement les durées de calcul des matrices (figure 8b : propagation de 16 fissures).

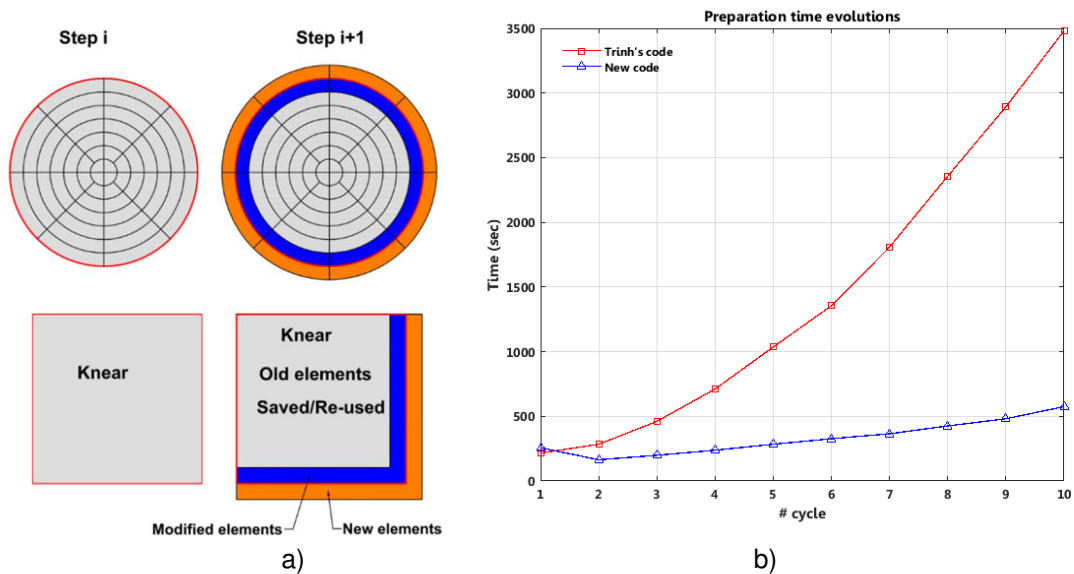


Figure 8 : Mise à jour rapide de matrices

4.2.2 Parallélisations en mémoire partagée

La parallélisation vise à diviser un calcul en plusieurs tâches pouvant être exécutées simultanément par plusieurs unités de calcul, réduisant ainsi le temps total. Dans ce travail nous avons utilisé l'interface OpenMP. OpenMP facilite en effet l'écriture d'applications parallèles sur des architectures à mémoire partagée en utilisant des directives du compilateur ou des fonctions de bibliothèque. Les parties du code nécessitant le plus de temps de calcul sont d'abord identifiées. Ensuite les calculs sont réorganisés pour ces parties afin de les rendre parallélisable. Les commandes de l'interface OpenMP sont enfin utilisées pour réaliser la parallélisation. Sur un ordinateur de bureau de 20 cœurs, le facteur d'accélération est de 13.0 sur la partie parallélisée. Ce qui est très satisfaisant car le facteur d'accélération est limité.

4.2.3 Nouvelle méthode de stockage de données

Lors des simulations à grande échelle, surtout avec un code parallélisé, il faut faire attention à l'utilisation de la mémoire vive. L'utilisation d'un format dense comprimée à la fin des calculs, provoque des pics d'utilisation de mémoire qui peuvent rendre certaines simulations impossibles. Une grande partie de la mémoire réservée reste inutilisée. Une nouvelle méthode de stockage de données basée sur le format coordonnées COO et le format comprimé CSR est mise en place (figure 9). Cette méthode élimine les réservations inutiles de la mémoire, en mettant en place une allocation progressive. De plus, chaque matrice est comprimée dès que son calcul est terminé, ce qui libère de la mémoire pour le calcul des matrices restantes. Cette méthode a permis d'éviter les pics d'utilisation de mémoire et donc rend le code plus performant (voir figure 10). Cela a permis d'étudier

des structures à grande échelle qui étaient auparavant impossible à simuler en raison de l'atteinte de la capacité de stockage.

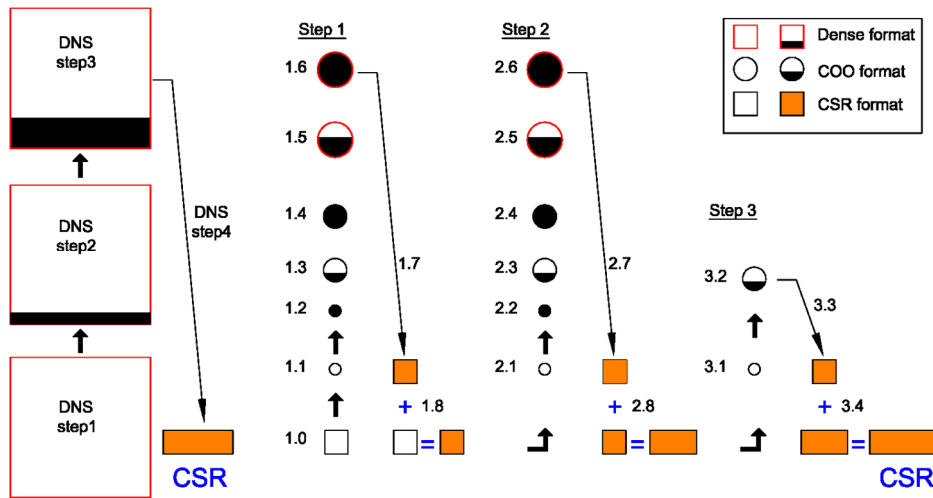


Figure 9 : Méthode de stockage UBI-COO

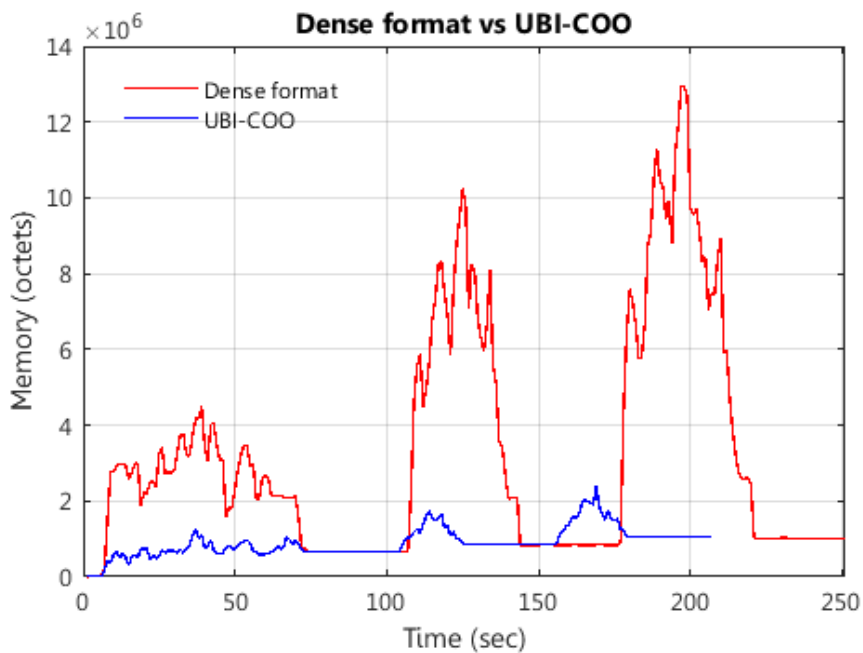


Figure 10 : Comparaison entre la méthode initiale et UBI-COO

4.2.4 Performance du code

Pour mesurer la performance du code, considérons un cube homogène multi fissurés en traction (voir Figure 11). Les fissures sont orientées aléatoirement et leur forme après propagation est présentée à la figure 12 pour le cas de 8 fissures. Le tableau 20 présente l'accélération obtenue par rapport à la version initiale du code lors de calculs élastostatiques (sans propagation). Le tableau

21 présente les performances en propagation. On arrive à faire propager des fissures et générer jusqu'à 1 million de degrés de liberté en moins d'une journée.

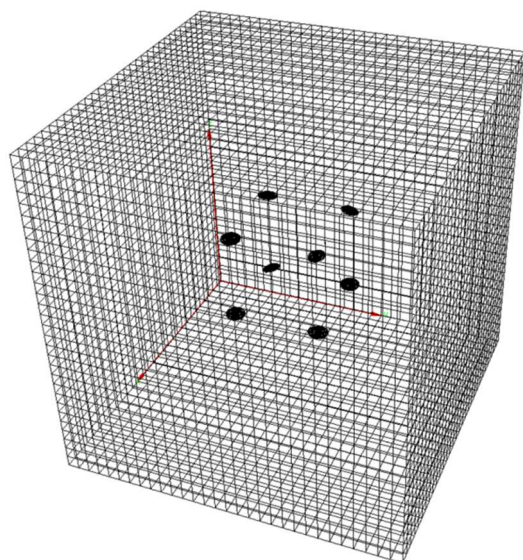


Figure 11 : Cube fissurée sous traction uniforme

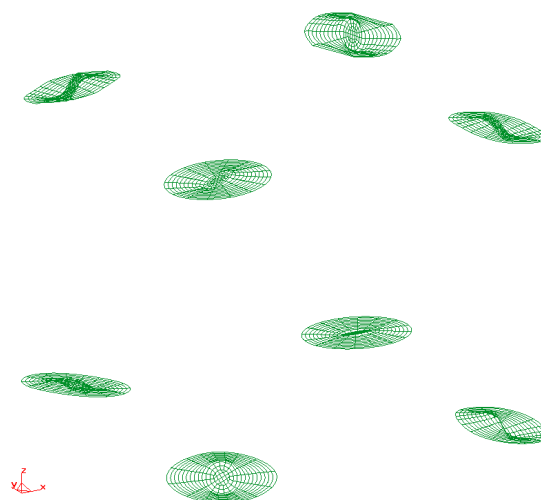


Figure 12 : Maillage des fissures propagées

#	N_c	N	T_{pre} (s)	N_{iter}	T_{sol} (s)	T_{tot} (s)	SpeedUp
1	8	19 302	83	24	84	169	8.7
2	64	40 974	98	41	509	611	10.5
3	1 000	403 206	1 209	38	2 931	4 478	16.1
4	1 728	684 942	2 299	39	4 823	8 721	13.7
5	1 000	1 075 206	3 539	42	6 471	15 446	10.8
6	8 000	3 112 206	20 160	38	24 840	52 500	15.9

Tableau 20 : Cube homogène avec des fissures statiques

#	N_c	N_{init}	N_{cycles}	N_{end}	T_{pre}	T_{sol}	T_{tot}	SpeedUp
1	8	19 302	10	29 670	398	479	889	35.3
2	64	40 974	10	123 918	2 286	5 872	8 217	52.6
3	512	199 950	12	1 010 958	22 159	45 158	71 905	—
4	1000	388 806	6	1 108 806	28 390	27 485	61 500	—

Tableau 21 : Cube homogène avec des fissures en propagation

4.3 Résultats obtenus

Une fois le code optimisé, des simulations sur chaussées sont effectuées. Une chaussée à trois couches est considérée. Les caractéristiques des couches sont présentées dans le tableau 22. La figure 13 présente le maillage adopté et la figure 14 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 15).

	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

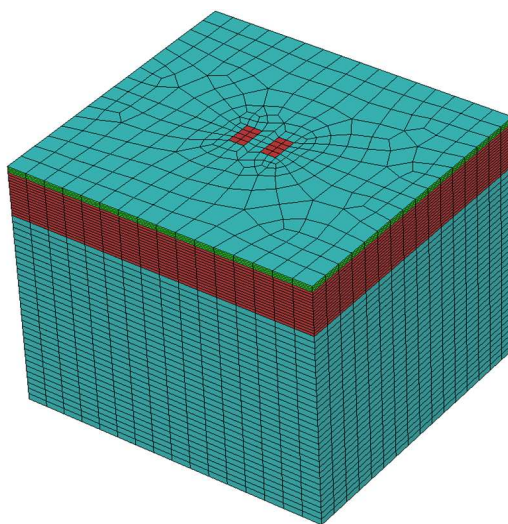


Figure 13 : Maillage

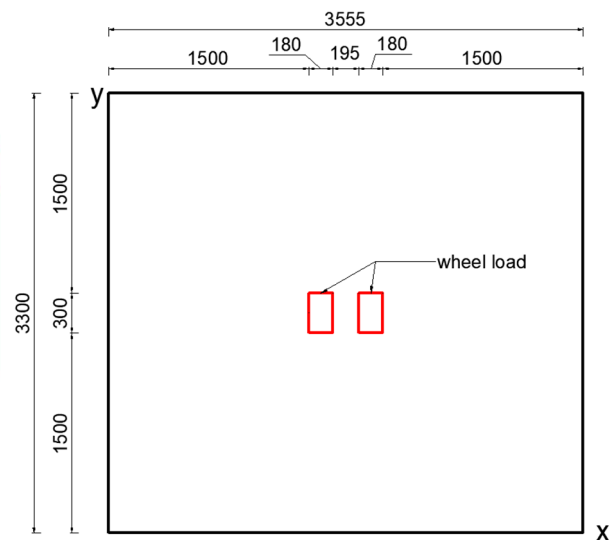


Figure 14 : Géométrie et chargement

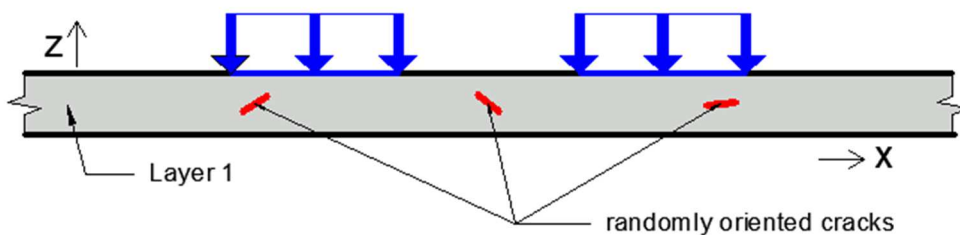


Figure 15 : Fissures aléatoires dans la couche de surface

Le champ de déplacement étant singulier le long du front de fissure, l'approche classique des éléments à nœuds au quart (voir figure 9) est utilisée pour évaluer les facteurs d'intensité de contraintes [1] au nœud 2. Ainsi on a pour les modes I, II, III :

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

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

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

avec a le rayon de la fissure, ϕ^1 et ϕ^5 les sauts de déplacements aux nœuds 1 et 5 (Fig. 16)

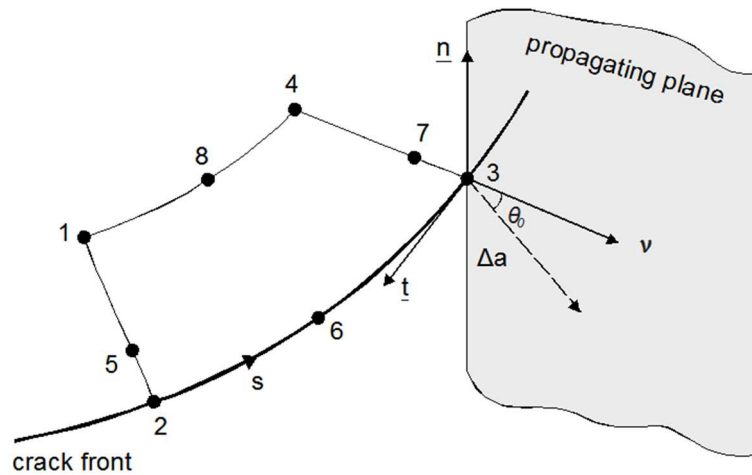


Figure 16 : Éléments à nœud au quart

L'angle de propagation est donné par le critère de la contrainte tangentielle maximale [2, 3]. Les relations sont rappelées ci-dessous. Le pilotage de la propagation est effectué en pas d'avancement, ce dernier est pris égal au quart du rayon initial de la fissure. Le tableau 23 suivant montre les durées de calcul pour une, trois et cinq fissures qui se propagent sur dix cycles. La figure 17 montre sous deux angles différents la forme d'une fissure après propagation. La figure 18 montre la forme de trois fissures qui se propagent dans la chaussée. La loi de Paris [4] sera programmée prochainement pour la simulation du pas d'avancement de la propagation en fatigue.

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

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

B est un paramètre du matériau.

#	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 23 : Propagation de fissures en chaussées

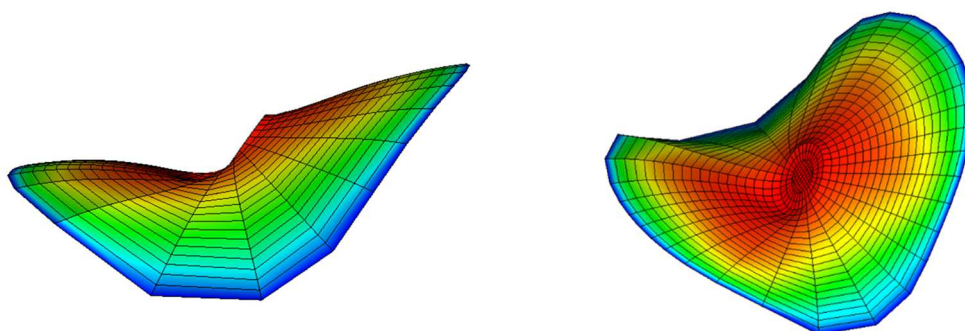


Figure 17 : Forme d'une fissure après propagation

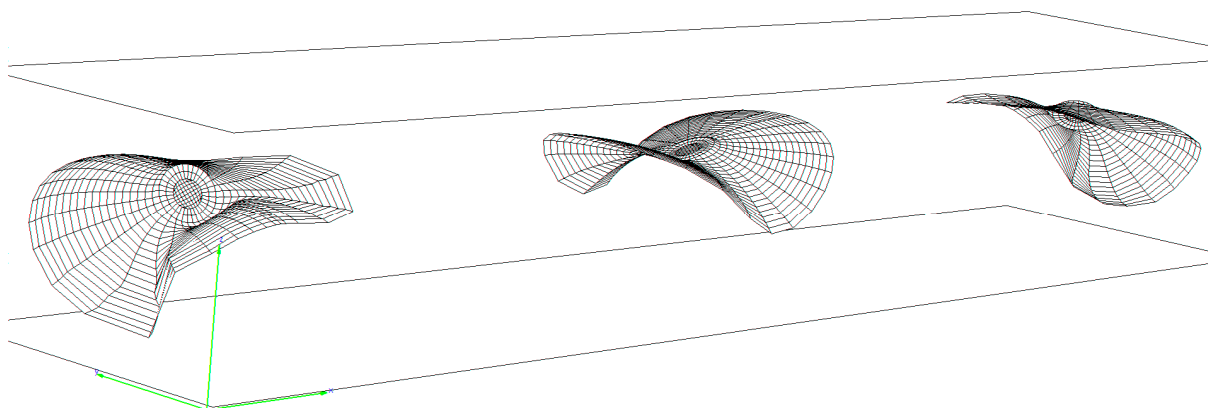


Figure 18 : Forme de trois fissures après propagation

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.

Lorsqu'on utilise un pas de propagation constant, la géométrie utilisée pour le calcul n'est pas exactement la même que la géométrie du problème à résoudre. Cela pourrait influencer les résultats même si le nombre de cycle correspondant est calculé. Il faudra donc implémenter une propagation de fissures à pas variable. Les fissures calculées jusque-là sont situées complètement à l'intérieur du domaine. Pour la suite, nous allons aborder les fissures qui débouchent sur la frontière ou sur une interface et les fissures qui traversent les interfaces. Le code développé est validé avec de nombreuses comparaisons avec des résultats théoriques et numériques. Dans la suite nous ferons une comparaison avec un cas réel.

Bibliographie

- [1] Bonnet, M. (1999). Boundary integral equation methods for solids and fluids. Wiley editor
- [2] Frangi, A. (2002). Fracture propagation in 3D by the symmetric Galerkin boundary element method. Int. J.Fract., 116:313-330.
- [3] Erdogan, F., Sih, G. C. (1963). On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. J.Basic Eng., 85:519-525.
- [4] Paris, P., Erdogan, F. (1963). A critical analysis of crack propagation laws. J. Basic Eng., 85:528-533.