HAL
open science

Analyses mécaniques d'une structure bi-couches délaminantes par flexion 4 points

Manitou Hun, Armelle Chabot, Ferhat Hammoum

To cite this version:

Manitou Hun, Armelle Chabot, Ferhat Hammoum. Analyses mécaniques d'une structure bi-couches délaminantes par flexion 4 points. 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. 6p. hal-00845906

HAL Id: hal-00845906

https://hal.science/hal-00845906

Submitted on 18 Jul 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Analyses mécaniques d'une structure bi-couches délaminante par flexion 4 points

M. HUN, A. CHABOT, F. HAMMOUM

Université Nantes Angers - le Mans, Institut Français des Sciences et des Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Centre de Nantes, Route De Bouaye - CS4 44344 BOUGUENAIS CEDEX

Résumé :

Pour l'étude de propagations de fissures à l'interface entre couches de chaussée composite, un essai de flexion 4 points spécifique sur structure bi-couches est proposé. Le dimensionnement initial des éprouvettes est effectué par des simulations numériques élastiques pour maximiser l'intensité des contraintes "M4-5n " à l'interface entre couches. Les ruptures d'interface sont attendues en mode mixte (mode I et II). Les résultats sont comparés à ceux obtenus par calculs éléments finis et par de premiers essais en statique sur structure Alu/PVC et béton de ciment/enrobé bitumineux.

Abstract :

In the aim of studying the crack propagation at the interface between layers of composite pavement, a 4-point bending test on specific bilayer structure is proposed. In order to determine the initial dimension of specimen, the stress intensity M4-5n at the interface between layers is maximized by using the elastic numerical simulations. This study especially shows significant rupture at the interface in mixed mode (mode I and II). Both finite element calculations and 4-point static test on structure Alu/PVC and concrete/asphalt provided comparable results.

Mots clefs : Décollement, fissuration, calculs numériques, structure composite, flexion 4 point.

1 Introduction et objectifs

La chaussée est constituée d'un empilement de couches de différents matériaux protégeant ainsi le sol du passage répété de poids lourds. La combinaison de bicouches de chaussées constituée de matériaux hydrauliques et bitumineux présente l'avantage de limiter initialement soit les effets des macro-fissures des bétons hydrauliques soit les effets de l'orniérage. Cependant, la macro-fissure verticale présente dans la couche du matériau hydraulique génère à l'interface entre les deux couches de matériaux des concentrations de contraintes telles qu'elles conduisent à terme à des décollements et/ou à de la fissuration type coin de dalle [1] [2]. Afin d'étudier la propagation de fissures à l'interface entre couches de ces chaussées composites, il est nécessaire de disposer d'un essai de caractérisation des interfaces et de modélisations spécifiques. Suite aux travaux de [3] [4], un essai de flexion 4 points sur structure bi-couches est proposé (figure 1). Le modèle multicouche spécifique utilisé est rappelé et comparé aux résultats éléments finis dans la section 2. Dans le cadre de l'élasticité, la section 3 présente l'optimisation numérique du dimensionnement initial des éprouvettes pour maximiser les effets de décollement à l'interface entre couches. La section 4 valide expérimentalement l'obtention d'une rupture par délaminage entre couches en mode mixte avant de conclure.

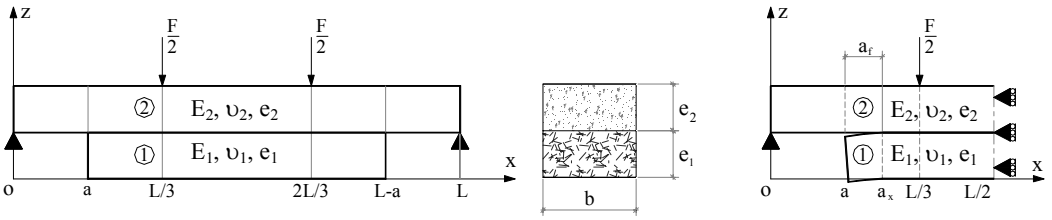

FIG. 1 – Schémas de l'essai de flexion 4pt bi-couches délaminant : (a) géométrie totale, (b) délaminage

2 Modélisations élastiques de l'essai bicouche délaminant par flexion 4pts

Le modèle spécifique utilisé est issu des Modèles Multiparticulaires des Matériaux Multicouches (M4) [5] [6]. Ces modèles ont pour intérêts de diminuer d'une dimension le problème réel et de rendre l'effet de bord flou, ce qui se traduit par une valeur finie des contraintes près des bords ou fissures permettant une écriture aisée en élasticité de critères de délaminage [7] [8]. Le M4 choisi pour ce problème de flexion possède 5 champs cinématiques par couche *i*, (*i*=1,*n*) : les déplacements moyens $U_\alpha^i(x,y)$ plans, $U_3^i(x,y)$ hors plan et les rotations moyennes $\Phi_\alpha^i(x,y)$ (α=1,2). Il est appelé le M4-5n. Sa construction repose sur une approximation polynomiale des champs de contraintes membranaires de degré 1 en z qui, par l'écriture des équations d'équilibre 3D, donne successivement pour les contraintes de cisaillement et la contrainte normale du degré 2 et 3 en z par couche i. Les coefficients de ces polynômes sont reliés, par couche i, aux champs d'efforts et de moments généralisés classiques de plaque de Reissner. Ce modèle peut être vu comme une superposition de n plaques de Reissner où chaque champ mécanique inconnu ne dépend que des variables de (*x,y*) par couche *i* et par interface *i,i*+1 transformant ainsi l'objet géométrique 3D en un objet 2D. Sur des structures finies, ces champs sont très proches de ceux obtenus finement par éléments finis 3D [9]. Ces types d'approximations ont l'avantage de définir aux interfaces *i,i*+1 des contraintes de cisaillement $\tau_\alpha^{i,i+1}(x,y)$ et d'arrachement $\nu^{i,i+1}(x,y)$ responsables des délaminages au bord ou fissure.

Afin de simplifier l'analyse, l'essai de flexion 4 points retenu (figure 1) est simulé en élasticité sous l'hypothèse des déformations planes aussi les champs mécaniques dépendent uniquement de la variable x. La symétrie par rapport à la mi-portée de l'éprouvette est utilisée. Le problème consiste à résoudre finalement les équations du M4-5n sur deux zones. La première monocouche, entre *x*=0 et *x*=*a*, permet de transmettre analytiquement par les efforts tranchants $Q_1^i(x)$ des couches 1 et 2 et des conditions de raccordement de déplacements, d'effort et de moments entre zones, les conditions d'appuis de la poutre à la zone bicouche. Sur cette zone (*n*=2), entre *x*=*a* et *x*=*L*/2, différentes manipulations des équations du modèle conduisent à poser analytiquement un système d'équations différentielles principal d'ordre 2 en *x* de la forme suivante :

$$AX''(x)+BX(x)=C \text{ avec } X(x)=\begin{pmatrix} U_1^1(x) \\ \Phi_1^1(x) \\ Q_1^1(x) \\ U_1^2(x) \\ \Phi_1^2(x) \end{pmatrix} \tag{1}$$

où A, B et C sont des matrices fonction analytiquement des paramètres géométriques, des caractéristiques élastiques du comportement des matériaux et des conditions de chargement précisés figure1. Pour des raisons de concision, elles ne sont pas données dans ce papier.

Les efforts de cisaillement $\tau_1^{1,2}(x)$ et d'arrachement $\nu^{1,2}(x)$ du M4-5n à l'interface entre la couche 1 et 2, sont obtenus analytiquement en fonction respectivement des inconnues principales du système (1) et de leur dérivée par l'équation de comportement d'interface (2) et l'équation d'équilibre des efforts tranchants (3)

$$\begin{cases} \tau_1^{1,2}(x)=15E^1E^2\dfrac{\left(U_1^2(x)-U_1^1(x)-\dfrac{e^1}{2}\Phi_1^1(x)-\dfrac{e^2}{2}\Phi_1^2(x)-\left(\dfrac{1+\upsilon^2}{5E^2}-\dfrac{1+\upsilon^1}{5E^1}\right)Q_1^1(x)+\dfrac{1+\upsilon^2}{5E^2}\dfrac{F}{2\times1000}\right)}{4\left(e^1E^2(1+\upsilon^1)+e^2E^1(1+\upsilon^2)\right)}, si\, x\in\left[a,\dfrac{L}{3}\right[\\ \tau_1^{1,2}(x)=15E^1E^2\dfrac{\left(U_1^2(x)-U_1^1(x)-\dfrac{e^1}{2}\Phi_1^1(x)-\dfrac{e^2}{2}\Phi_1^2(x)-\left(\dfrac{1+\upsilon^2}{5E^2}-\dfrac{1+\upsilon^1}{5E^1}\right)Q_1^1(x)\right)}{4\left(e^1E^2(1+\upsilon^1)+e^2E^1(1+\upsilon^2)\right)}, si\, x\in\left[\dfrac{L}{3},\dfrac{L}{2}\right] \end{cases} \tag{2}$$

$$\nu^{1,2}(x)=-Q_1^{1'}(x) \tag{3}$$

Dans le cas d'une propagation de fissure le long de l'interface (figure 1b), le taux de restitution d'énergie (4) s'exprime à partir de l'énergie de déformation W_e (5) de la structure et du travail des forces extérieures W_{ext}.

$$G=\frac{\partial W_{ext}}{\partial a}-\frac{\partial W_e}{\partial a} \quad ; \quad W_{ext}=F\,U_3^2\left(x=\frac{L}{3},a_x\right) \tag{4}$$

$$W_e = \left[\begin{array}{l} \frac{\left(1-\upsilon^{2^2}\right)}{2e^{2^3}E^2}\left(\frac{F}{1000}\right)^2 a_x^3 + \frac{3\left(1+\upsilon^2\right)a_x}{10e^2E^2}\left(\frac{F}{1000}\right)^2 + \frac{2}{15}\left(\frac{e^1\left(1+\upsilon^1\right)}{E^1}+\frac{e^2\left(1+\upsilon^2\right)}{E^2}\right)\int_{a_x}^{L/2}\left[\frac{e^1E^1}{1-\upsilon^{1^2}}U_1^{1''}\right]^2 dx \\ +\frac{\left(1-\upsilon^{1^2}\right)}{2E^1}\left(\frac{1}{e^1}\int_{a_x}^{L/2}\left[\frac{e^1E^1}{1-\upsilon^{1^2}}U_1^{1'}\right]^2 dx + \frac{12}{e^{1^3}}\int_{a_x}^{L/2}\left[\frac{e^{1^3}E^1}{12\left(1-\upsilon^{1^2}\right)}\Phi_1^{1'}\right]^2 dx\right) \\ +\frac{\left(1-\upsilon^{2^2}\right)}{2E^2}\left(\frac{1}{e^2}\int_{a_x}^{L/2}\left[\frac{e^2E^2}{1-\upsilon^{2^2}}U_1^{2'}\right]^2 dx + \frac{12}{e^{2^3}}\int_{a_x}^{L/2}\left[\frac{e^{2^3}E^2}{12\left(1-\upsilon^{2^2}\right)}\Phi_1^{2'}\right]^2 dx\right) \\ +\frac{13e^1}{70E^1}\int_{a_x}^{L/2}\left[Q_1^{1'}\right]^2 dx + \frac{e^2}{2E^2}\int_{a_x}^{L/2}\left(\frac{\left(2Q_1^{1'}+Q_1^{2'}\right)^2}{4}+\frac{17}{140}\left(Q_1^{2'}\right)^2\right)dx \\ +\frac{6\left(1+\upsilon^1\right)}{5e^1E^1}\int_{a_x}^{L/2}\left[Q_1^1\right]^2 dx + \frac{6\left(1+\upsilon^2\right)}{5e^2G^2}\int_{a_x}^{L/2}\left[Q_1^2\right]^2 dx + \frac{1}{5}\int_{a_x}^{L/2}\left(\frac{\left(1+\upsilon^1\right)}{E^1}Q_1^1+\frac{\left(1+\upsilon^2\right)}{E^2}Q_1^2\right)\frac{e^1E^1}{1-\upsilon^{1^2}}U_1^{1''}dx \end{array} \right] \quad (5)$$

Adapté à cet essai, les méthodes d'adimentionalisation et de résolution numérique des équations par différences finis selon le schéma de Newmark utilisées par [4] [10] et [11] sont programmées sous le logiciel de calcul numérique gratuit Scilab. La résolution des équations est validée, avec les paramètres données dans le tableau 1, par comparaison des résultats M4-5n à ceux issus de simulations éléments finis 2D de César-LCPC pour différents maillages (type1 : régulier ; type2 : régulier fin ; type3 : progressif fin vers l'interface et le bord ; type4 : régulier très fin). Les éléments finis choisis sont quadratiques et le module LINE, basé sur la résolution d'un problème linéaire par méthode directe, est utilisé.

Tableau 1 : Géométrie de l'éprouvette et caractéristiques des matériaux étudiés

Géométrie d'éprouvette		Caractéristiques des matériaux	
		Grave bitume	Béton de ciment
L = 480mm	e_1 = 50mm	E_1 = 9300MPa à 15°C	E_2 = 35000MPa
a = 80mm	e_2 = 50mm	υ_1=0,35	υ_2=0,25

Sur les figures 2a et 2b, au bord en *x=a*, contrairement aux différents maillages éléments finis, on vérifie l'excellente convergence des contraintes de cisaillement et d'arrachement du M4-5n à l'interface entre couches (1200 mailles suffises). L'essai mené à rupture, s'il rompt à l'interface, devrait l'être en mode mixte (mode I et II). En dehors des bords, ces contraintes hors plan sont comparables à celles obtenues par les différents calculs éléments finis et, entre les deux charges, ces contraintes sont bien quasi nulles.

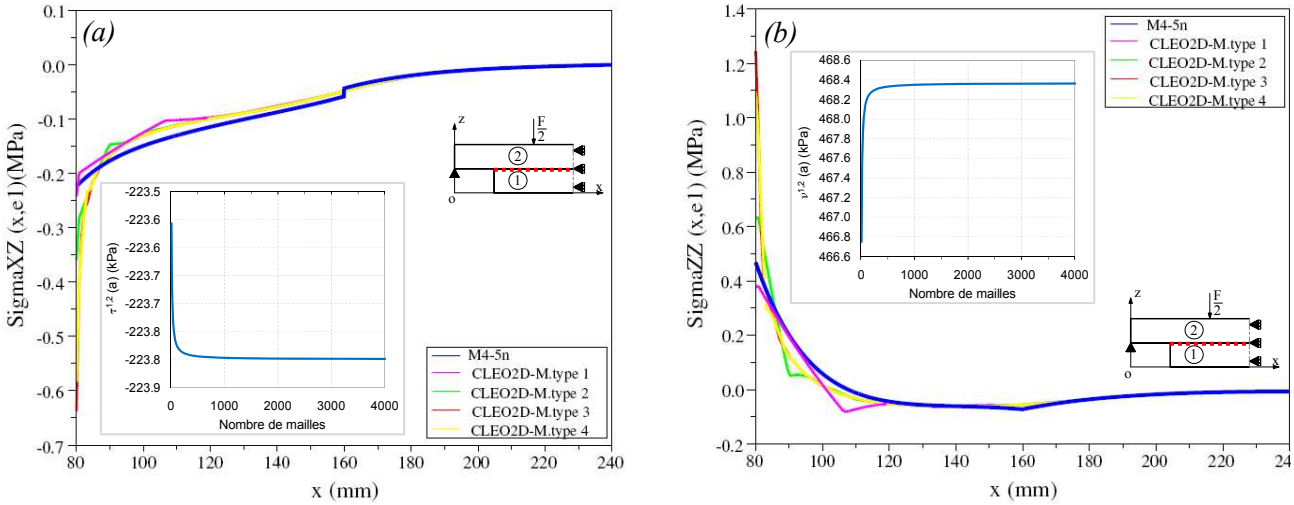

FIG. 2 – Convergence et comparaison des calculs par M4-5n avec les calculs par éléments finis : (a) Contrainte de cisaillement à l'interface 1,2; (b) Contrainte d'arrachement à l'interface 1,2

L'intensité finie de ces contraintes M4 en *x=a* est utilisée par la suite dans des calculs paramétriques afin de favoriser la rupture à l'interface entre couches plutôt que celles issues par traction en base des couches.

3 Analyses des géométries bicouches favorisant une rupture par délaminage

Dans ce paragraphe, la géométrie de l'éprouvette de longueur 420mm entre appuis, de largeur de 120mm et d'épaisseur de 60mm de chaque couche tient compte des contraintes d'encombrement de l'essai et des questions d'homogénéités des matériaux de chaussées que l'on souhaite tester finalement. Les figures 3 présentent les simulations M4-5n pour une longueur variable de *a*, les caractéristiques des matériaux sont celles présentées dans le tableau 1. Le béton choisi ayant une contrainte à rupture d'environ 3,4MPa, on suppose que l'éprouvette est soumise à une charge maximale de 3,5kN. On observe que plus la taille de la « consolette » *a* est grande, plus l'intensité de la contrainte de traction en base de la couche 2, maximale en *x=a*, est augmentée (figure 3a) et plus le rapport des contraintes d'arrachement et de cisaillement diminue (figure 3b). Ce rapport permet de nuancer les modes de ruptures de cet essai en fonction de cette longueur.

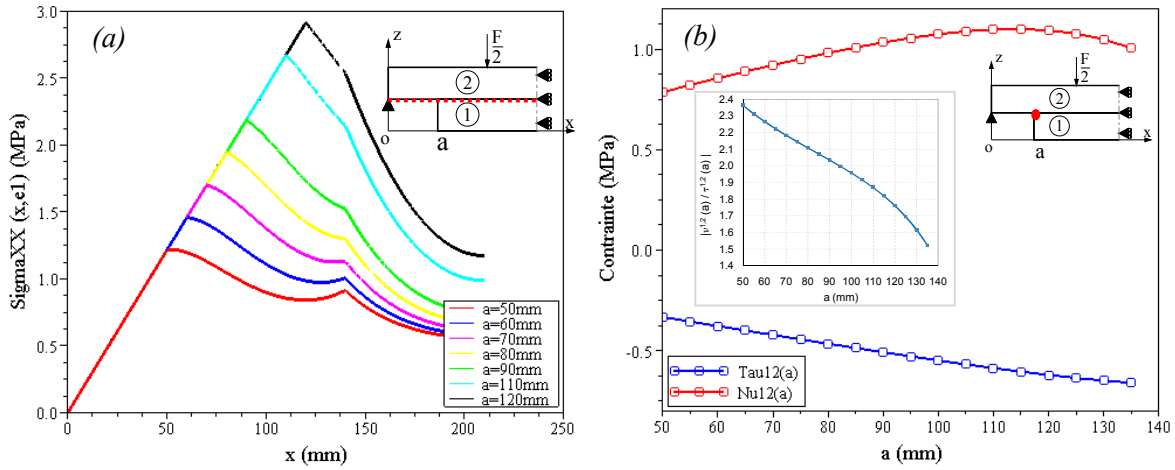

FIG. 3 – Effets des variations de la longueur « a » sur : (a) $\sigma_{xx}(x,e_1)$; (b) $\tau_1^{1,2}(x)$ et $\nu^{1,2}(x)$ du M4-5n

Le module équivalent élastique du matériau bitumineux de la couche 1 étant susceptible de varier en fonction de la température et de la vitesse de chargement de l'essai, les figures 4 présentent les résultats en fonction de cette variation pour une plage de module allant de 500 à 9000MPa dans les conditions des simulations précédentes avec *a*= 70mm retenu en compromis. Sur les figures 4, on constate que plus le module de l'enrobé est grand, plus l'intensité de la contrainte de traction en base de la couche 2 est maximale en *x=a* par rapport à *x=L*/3 (figure 4a) et plus les intensités des contraintes d'arrachement et de cisaillement à l'interface sont élevées en valeur absolue (figure 4b).

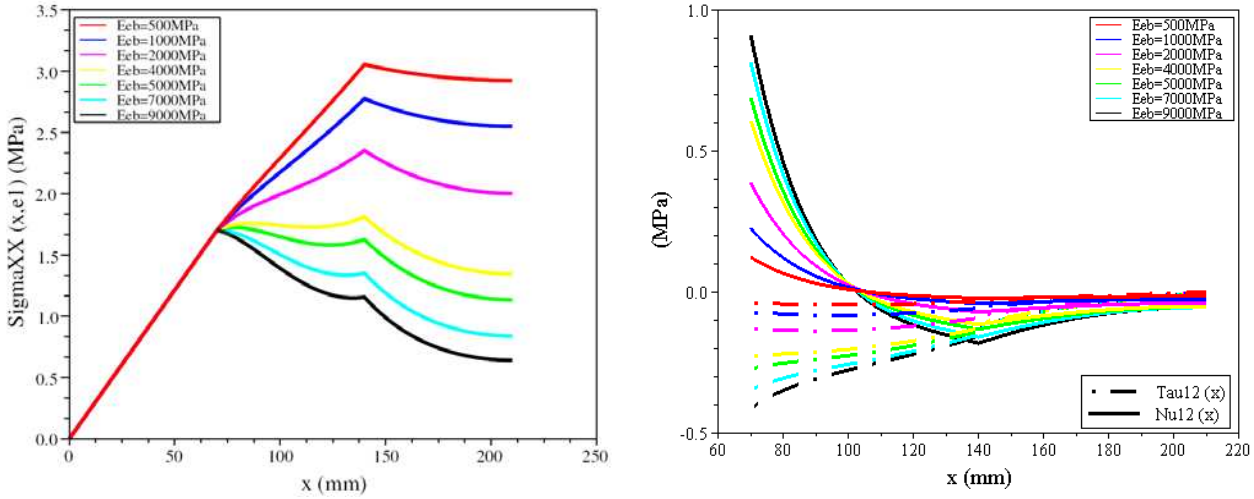

FIG. 4 – Effets des variations du module de la couche 1 sur : (a) $\sigma_{xx}(x,e_1)$; (b) $\tau_1^{1,2}(x)$ et $\nu^{1,2}(x)$ du M4-5n

4 Premières validations expérimentales

Les deux premiers résultats obtenus sur bi-couches Alu/PVC et béton/enrobé sont présentés ici. Ces résultats sont obtenus sur des essais statiques pilotés en force à l'aide du capteur de force de la presse MTS utilisée. La couche PVC est collée sur la couche d'aluminium à l'aide d'une colle à jauge (type X60 de HBM). A la

fabrication des éprouvettes, la couche de béton de ciment est coulée sur celle de l'enrobé. Les caractéristiques des différents bi-couches sont données dans le tableau 2 sachant, qu'à ce stade, il manque les paramètres du matériau bitumineux non encore déterminés par des essais de module complexe standards (NF EN 12697-26). La taille des granulats des matériaux béton de ciment et enrobé bitumineux varie de 0 à 10mm. Le pourcentage de vide de l'enrobé bitumineux est élevé (environ 10%) afin d'augmenter sa porosité en vue d'examiner ultérieurement les effets de l'eau sur la caractérisation par cet essai de ce type d'interface.

Tableau 2 : Géométrie et caractéristiques des matériaux des éprouvettes bi-couches

Eprouvette	Matériau	L / e / b (mm)	a (mm)	E (MPa)	ν	L_{tot} (mm)
Alu/PVC	Aluminium	420 / 40,6 / 125	71	74000	0,34	478
	PVC	278 / 30,6 / 125		3300	0,30	
BC/EB	Béton de ciment (BC)	420 / 60 / 120	70	34878	0,25	480
	Enrobé bitumineux (EB)	280 / 60 / 120		Non disponible	0,35	

Le montage de l'essai de flexion 4 points spécifique sur structure bi-couches est présenté sur la figure 5a. Sur la figure 5b, on observe que la rupture de l'éprouvette béton/enrobé s'est produite comme espérée par délaminage entre la couche de béton de ciment et celle de l'enrobé pour (T=23°C, vitesse=100N/s).

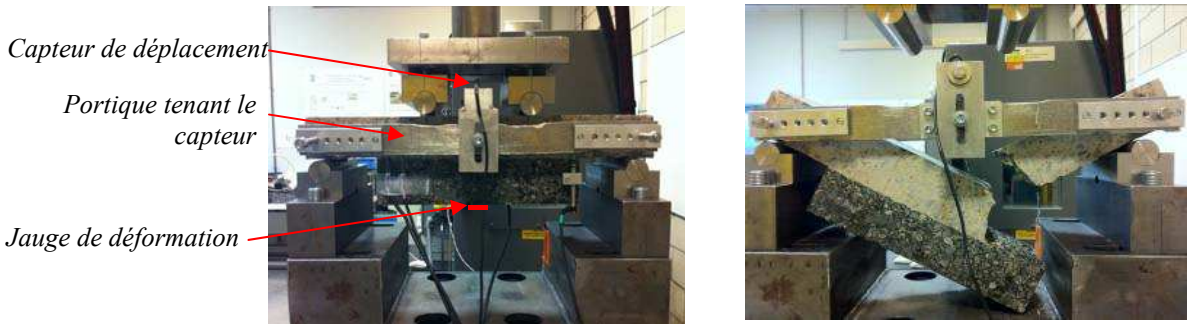

FIG. 5 – (a) Montage de l'essai délaminant pas flexion 4pts (b) 1er essai statique de rupture d'interface béton/enrobé (T=23°C, vitesse = 100N/s)

L'éprouvette bicouche Alu/PVC sert à calibrer le dispositif et à valider le modèle M4-5n élastique. Ces matériaux sont choisis afin de s'approcher au mieux, à faible coût, du comportement des matériaux béton/enrobé. L'essai est effectué à la vitesse de chargement de 500N/s, la température d'essai est ambiante (20°C). La flèche à mi-portée de l'éprouvette est mesurée par un capteur de déplacement (Fogale ±0,5mm) posé sur un portique maintenu sur l'éprouvette elle-même (figure 5a). Ces mesures sont comparées aux résultats M4-5n et éléments finis sur la figure 6. On note une relativement bonne concordance des résultats dans le cadre des mesures et hypothèses effectuées (élasticité, déformations planes, modèles utilisés, …). Comme pour le bi-couches précédent, la rupture se produit heureusement à l'interface entre les matériaux.

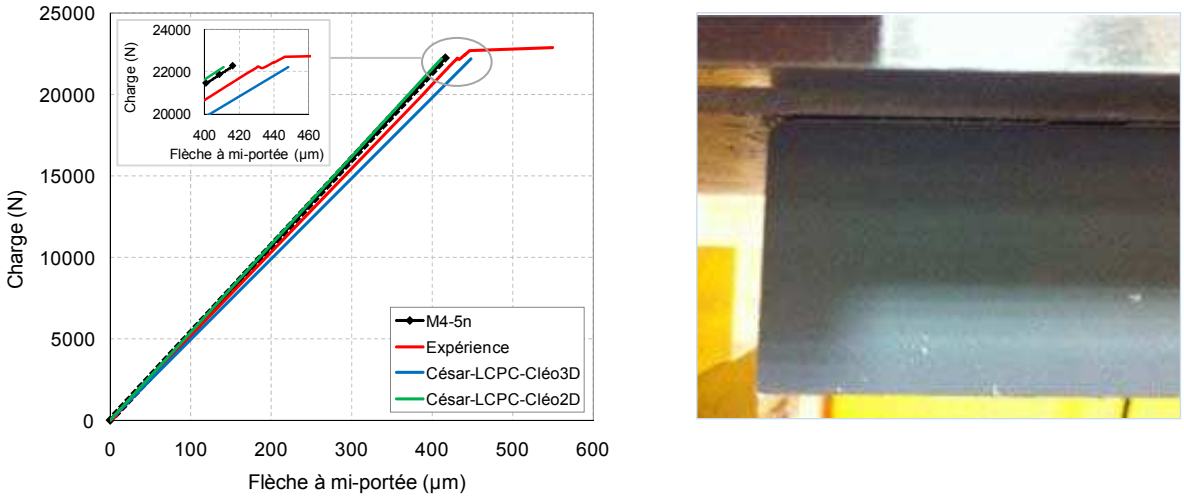

FIG. 5 – Comparaison modèles/expérience de la flèche du haut de la couche 2 sur éprouvette Alu/PVC

En première approximation, on détermine graphiquement à 22200N la valeur de la force à rupture de

l'interface alu/PVC. Le calcul M4-5n donne alors les valeurs critiques suivantes : $\left(\tau_1^{1,2}(a)\right)^c = 1{,}21MPa$, $\left(\nu^{1,2}(x)\right)^c = 3{,}24MPa$ et G^c = -3,3J/m².

5 Conclusions et perspectives

En vue de caractériser la propagation de fissures à l'interface entre couches de chaussées composites, un essai de flexion 4 points sur structure bi-couches est proposé. L'analyse de l'initiation de cette rupture sous essai statique est réalisée en élasticité dans le cadre des déformations planes. Les comparaisons des simulations entre le modèle spécifique dédié pour ce faire, le M4-5n, et les calculs EF valident la bonne écriture et résolution par différences finies de la programmation des équations. Le problème étant rendu unidimensionnel et l'intensité des contraintes du M4-5n responsables des délaminages au bord ou fissure à l'interface entre couche étant de valeur finie, le logiciel réalisé sous scilab permet très aisément d'engager des optimisations de géométrie d'éprouvettes favorisant la rupture souhaitée. Pour les géométries choisies finalement, les ruptures d'interface en mode mixte sont observées expérimentalement sur éprouvettes Alu/PVC et béton/enrobé. Les résultats des simulations et le montage des premiers essais sont validés par comparaison des flèches sur structure Alu/PVC. Des valeurs critiques de rupture sont données par le M4-5n.
Dès que le matériau bitumineux sera caractérisé, il reste à confronter les simulations du M4-5n sur structure béton/enrobés à partir des mesures de flèche et utilisation par exemple de jauge de déformation collée au milieu de l'éprouvette sous la couche de l'enrobé (figure 5a). Ces essais statiques devraient finalement pouvoir être pilotés en déplacement imposé afin d'éviter de rompre trop brutalement les éprouvettes. Pour analyser expérimentalement plus finement la propagation des décollements, plusieurs pistes sont envisagées. A moindre coût, comme pour la technique des capteurs CMOD, il est prévu d'utiliser deux capteurs LVDT, placés près et à quelques centimètres du bord, afin de mesurer en deux endroits l'ouverture de la fissure. La difficulté de l'essai consiste à pouvoir instrumenter les différents côtés susceptibles de générer la fissuration en premier. La présence d'eau, quelque soit sa phase, ajoute à ce système complexe des dégradations irréversibles qui ne peuvent être ignorées. Dans ce but, l'essai présenté devra être adapté.

References

[1] Pérez-Roméro, S., Approche expérimentale et numérique de la fissuration réflective de chaussée. Thèse de l'Université de Limoges, 2008.

[2] CIMbéton., Une solution durable contre l'orniérage : Le béton de ciment mince collé "BCMC", Collection Technique CIMbéton, déc. 2004.

[3] Pouteau B., Chabot A., De Larrard F., Etude en laboratoire du collage béton/ matériaux bitumineux, Matériaux 2002, Tours, 21-25 octobre 2002.

[4] Pouteau B., Durabilité mécanique du collage blanc sur noir dans les chaussées, Thèse de l'Ecole Centrale de Nantes, déc. 2004.

[5] Chabot A., Analyse des efforts à l'interface entre les couches des matériaux composites à l'aide de Modélisations Multiparticulaires des Matériaux Multicouches (M4). Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Juin 1997 (http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00197853/en/).

[6] Chabot A., Ehrlacher A., Modèles Multiparticulaires des Matériaux Multicouches M4_5n et M4_(2n+1)M pour l'étude des effets de bord. C.R. aux 11ème Journ. Nat. sur les Composites (JNC11), Arcachon, 1389-1397, 18-20 nov. 1998 (http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00325238/en/).

[7] Chabot A., Cantournet S., Ehrlacher A., Analyse de taux de restitution d'énergie par un modèle simplifié pour un quadricouche en traction fissuré à l'interface entre 2 couches. C.R. aux 12ème Journ. Nat. sur les Composites (JNC12), ENS de Cachan, ISBN 2-9515965-0-2, 2, 775-784, 15-17 nov. 2000.

[8] Caron J. F., Diaz Diaz A., Carreira R. P., Chabot A., Ehrlacher A., Multi-particle modelling for the prediction of delamination in multi-layered materials. Comp. Sc. and Technology, 66 (6): 755-765, 2006.

[9] Carreira R.P., Caron, J.P., Diaz Diaz Z., Model of multilayered materials for interface stresses estimation and validation by finite element calculations. Mechanics of Material 34, 217-230, 2002.

[10] Chabot A., Tran Q. D., Ehrlacher A., A simplified modeling for cracked pavements - Modèle simplifié pour le calcul des chaussées. Bulletin des Laboratoires des Ponts et chaussées (http://www.lcpc.fr/en/sources/blpc/index.php), (258-259), 105-120, 2005.

[11] Le Corvec G., Simulations des effets du retrait du béton de ciment sur la flexion de matériaux de chaussées fissurées, Rapport du Master, Université de Nantes, 2008.