



HAL
open science

Apport du multi-échelle dans l'étude de la durabilité des matériaux de chaussées

Ferhat Hammoum

► **To cite this version:**

Ferhat Hammoum. Apport du multi-échelle dans l'étude de la durabilité des matériaux de chaussées. Matériaux et structures en mécanique [physics.class-ph]. Université Nantes Angers Le Mans, 2010. tel-00961957

HAL Id: tel-00961957

<https://theses.hal.science/tel-00961957>

Submitted on 20 Mar 2014

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.



MEMOIRE D'HABILITATION A DIRIGER LES RECHERCHES

de *Ferhat HAMMOUM*
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

sur

**Apport du multi-échelle dans l'étude de
la durabilité des matériaux de chaussées**

HDR soutenue le 03 mars 2010
devant le jury composé de

Président
Pierre-Yves Hicher, Ecole Centrale de Nantes

Rapporteurs
Yves Berthaud, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI
Manfred Partl, KTH- Stockholm & EMPA, Zurich
Christophe Petit, Université de Limoges

Examinateurs
Claude Boutin, ENTPE
Abdelhafid Khelidj, Université de Nantes
Pierre Hornych, LCPC

Table des matières

1	Thèmes de recherche personnels	5
1.1	Préambule : Mon parcours	5
1.2	Introduction	13
1.3	Durabilité des couches superficielles	14
1.3.1	Introduction	14
1.3.2	Les effets d'une charge roulante sur une structure	15
1.3.3	Les effets d'une force tangentielle sur une couche de roulement	21
1.3.4	Les effets des conditions climatiques sur les enrobés bitumineux	31
1.4	Les mélanges bitumineux à l'échelle granulaire : identification géométrique et caractérisation mécanique	33
1.4.1	Introduction	33
1.4.2	Le recours à l'analyse d'image	34
1.4.3	Identification de la structure interne des matériaux bitumineux	34
1.4.4	Application d'une technique de changement d'échelle pour déterminer les propriétés mécaniques du mélange	40
1.4.5	Les déformations locales dans les enrobés bitumineux : facteur de localisation	45
1.5	Comportement d'un film de liant au pseudo-contact intergranulaire	48
1.5.1	Introduction	48
1.5.2	Les développements expérimentaux	49
1.5.3	Les développements numériques	63
1.6	Perspectives de recherche	75
	Bibliographie	79
2	Publications Scientifiques et Techniques	87
2.1	Brevets	87
2.2	Chapitres d'ouvrages	87
2.3	Articles parus dans des revues internationales à comité de lecture	87
2.4	Articles dans des revues nationales à comité de lecture	88
2.5	Articles dans diverses revues technico-professionnelles	88
2.6	Rapports d'étude, de recherche et d'expertise	88

3	Participations à des colloques, congrès et séminaires	91
3.1	Communications à des congrès avec publications des actes	91
3.2	Autres communications dans des congrès sans actes	93
4	Principales collaborations scientifiques	94
5	Principales missions sur le terrain	95
6	Actions de formation et d'encadrement	96
6.1	Actions de formation	96
6.2	Actions de co-encadrement de doctorants	96
6.3	Actions d'encadrement de stagiaires et chercheurs	97
7	Contrats et collaborations avec les industriels	99
8	Actions de valorisation	100
8.1	Logiciels	100
8.2	Mode opératoire et Méthode d'essai	100
8.3	Conception et Développement de moyen d'essai	100
9	Administration de la recherche et autres activités scientifiques	101
9.1	Relecture d'articles, activités éditoriales	101
9.2	Animation de groupe de travail	101
9.3	Participation à des comités, à des commissions et organisation des colloques . . .	101

Le livre de la vie est le livre suprême
Qu'on ne peut ni fermer, ni ouvrir à son choix ;
Le passage attachant ne s'y lit pas deux fois,
Mais le feuillet fatal se tourne de lui-même ;
On voudrait revenir à la page où l'on aime,
Et la page où l'on meurt est déjà sous vos doigts ...

Le livre de la vie
Alphonse de LAMARTINE (1790-1869)

1.1 Préambule : Mon parcours

Dès ma thèse de doctorat, je me suis intéressé au comportement des géomatériaux et au développement d'outils de modélisation et de caractérisation des matériaux hétérogènes et non-linéaires. Ma double formation (matériaux et mécanique) m'a permis de travailler sur plusieurs types de matériaux doués de propriétés intéressantes et largement utilisés en génie civil tant au niveau du sous-sol (géomatériaux) qu'au niveau de la structure elle-même (bois, granulats, bitume). Ces matériaux constituent non seulement le terrain d'expression pour de nombreuses disciplines scientifiques comme la science des matériaux, la physico-chimie, la mécanique et la rhéologie mais également un vecteur de développement économique et social.

Période doctorale ▷ *Les grandes déformations des matériaux inélastiques anisotropes*

Mon travail de thèse concerne la modélisation de matériaux inélastiques en déformations finies qui nécessite la description de l'évolution de la sous-structure matérielle. Cette sous-structure peut être représentée macroscopiquement par des variables tensorielles. La notion de déformation finie repose sur le concept de configuration intermédiaire. Mandel (1971) a proposé une théorie macroscopique des grandes transformations reposant sur ce concept de configuration intermédiaire. Son approche montre la distinction à faire entre la vitesse de rotation de la sous-structure et la vitesse de rotation matérielle du milieu continu. Introduisant la notion de vecteur-directeur, il a clarifié le choix d'une configuration intermédiaire qu'il a implicitement introduite par une décomposition multiplicative du gradient de déformation en une partie élastique et une partie plastique.

Le point capital de cette démarche est la mise en évidence de configurations intermédiaires particulières dites *isoclines*. Ce n'est qu'en 1983 que l'efficacité de cette théorie est exposée indépendamment par Loret (1983) et Dafalias (1983). Ces deux auteurs présentent un cadre de travail dans lequel entre une large famille de matériaux élastoplastiques exhibant une anisotropie dite *induite* par les déformations ou une anisotropie de structure.

La formulation de ces lois de comportement en grandes transformations nécessite certaines précautions sous peine d'obtenir des phénomènes parasites sans signification physique. Poursuivant cette approche, nous avons proposé et analysé numériquement les équations constitutives écrites dans une configuration intermédiaire particulière pour des matériaux présentant une anisotropie induite ou/et de structure (Hammoum, 1993).

Les développements mathématiques et numériques de la thèse ont permis de proposer des algorithmes d'intégration des équations élastoplastiques. Ces algorithmes ont été testés pour décrire le comportement de matériaux anisotropes en y incluant les effets de la vitesse de rotation plas-

tique, pour des chemins de chargement classiques (Loret, Hammoum, and Dafalias, 1993). Cette description est suivie d'une étude sur la précision ; la convergence des différents algorithmes met en évidence les effets dus aux fortes variations de courbure des fonctions de charge, caractéristique des matériaux à anisotropie de structure. Cette étude a montré en particulier que la précision minimale correspond à des incréments de contraintes qui traversent la surface de charge (Loret, Hammoum, and Dafalias, 1992).

A titre d'application, nous avons consacré également une partie de ce travail de thèse pour décrire d'une manière simplifiée l'évolution d'un pli avec conditions aux limites donnant lieu à de grandes transformations 1.2. Cet exemple s'inspire du problème très complexe des plis géologiques bien connus des géologues.

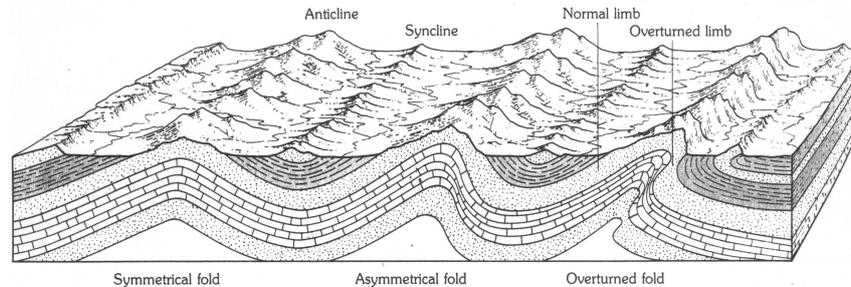


FIGURE 1.1 – Différents types de plis géologiques (Tarbuck and Lutgens, 1987)

En effet, il est fréquent de voir des massifs rocheux présentant des formes géométriques extraordinaires (Figure 1.1) ; Les roches subissent des contraintes élevées sur une longue période de temps, elles se déforment, souvent par plis ou se fracturent en plusieurs morceaux, si le temps d'application de la charge est relativement court (Tarbuck and Lutgens, 1987). Quand on applique un chargement avec une faible vitesse de charge, les roches se déforment d'une manière élastique, les changements qui en résultent sont réversibles, le massif rocheux revient à sa forme initiale et les contraintes s'annulent. Cependant quand la limite d'élasticité est dépassée, la roche se déforme plastiquement, le massif se transforme en pli. Si la déformation se poursuit, il y a création d'un dôme plus ou moins arrondi, où il y a apparition de contraintes de traction. En conséquence, les zones concernées par ces tractions se fracturent et deviennent vulnérables à l'érosion. Dans

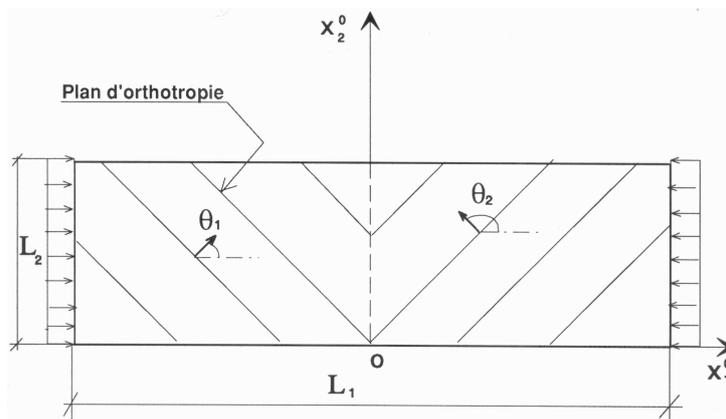


FIGURE 1.2 – Géométrie d'un pli symétrique et conditions aux limites

le travail de thèse, nous n'avons pas étudié numériquement les plis géologiques où les conditions aux limites sont difficiles à estimer ; de plus, il faudrait tenir compte des dimensions réelles des structures géologiques et de la gravité. Néanmoins, nous avons proposé un exemple très simple

pour une utilisation pratique des lois constitutives décrites dans ma thèse (Hammoum, 1993). D'un point de vue comportement du matériau, cette étude constitue un point de départ dans la simulation des plis géologiques.

Afin de modéliser l'exemple décrit ci-dessus, j'ai dû construire les modules nécessaires en grandes déformations, puis les insérer dans un code de calcul. Le matériau constitutif obéit à la loi de comportement élasto-plastique définie par le critère de Hill et décrite dans ma thèse (cf. Hammoum, 1993, Chap.3). Le calcul est effectué à l'aide de la méthode des éléments finis suivant un schéma lagrangien. Il fait apparaître clairement l'influence capitale de la vitesse de rotation plastique sur l'orientation des axes privilégiés et le phénomène est d'autant plus marqué que le degré d'anisotropie est élevé.

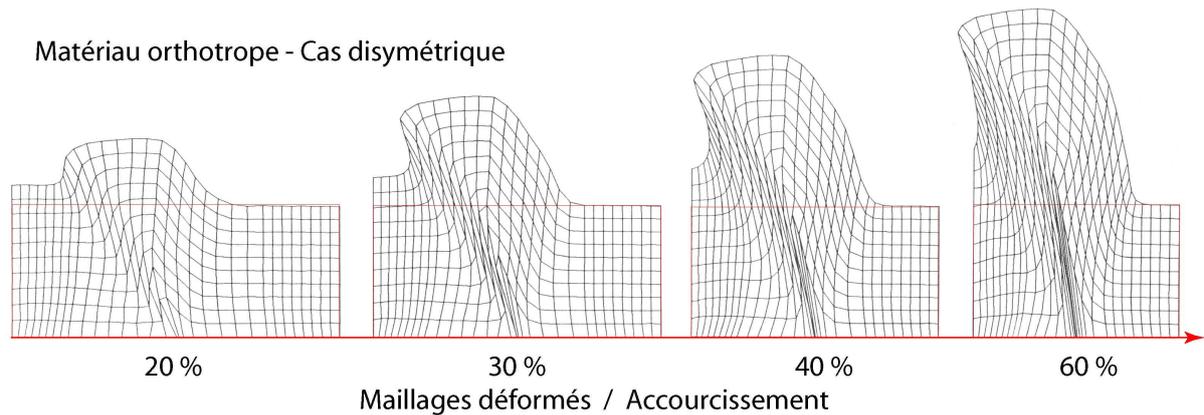


FIGURE 1.3 – Visualisation des maillages déformés en fonction de l'accourcissement : cas dissymétrique

Après avoir examiné l'influence des paramètres matériaux sur un exemple de pli symétrique (cf. Hammoum, 1993, Chap.5), j'ai considéré un cas dissymétrique où la somme des angles $\theta_1 + \theta_2$ n'est pas égale à 180° ; Cette dissymétrie de l'orientation des axes d'orthotropie apparaît dans les maillages déformés de la figure 1.3. On observe le déversement du dôme à partir de 30 % d'accourcissement. On relève également des contraintes de traction au sommet du dôme du fait de l'existence de ce déversement.

En conclusion, cette étude montre que le concept de configuration isocline introduit par Mandel (1971) élimine plusieurs difficultés numériques rencontrées dans la configuration actuelle où les équations constitutives exprimées en vitesse introduisent une dérivée objective. Dans ce travail de thèse, j'ai adopté la même démarche dans l'écriture de la loi élastoplastique pour n'utiliser que la dérivée matérielle. L'écriture des expressions est simplifiée et l'utilisation de la dérivée matérielle permet de retrouver des résultats cohérents avec la réalité. Les possibilités d'application sont nombreuses moyennant quelques améliorations à apporter dans la résolution des problèmes avec la méthode des éléments finis. Ce type de problème suggère le recours à la méthode quasi-newton ou au gradient conjugué qui n'exigent ni linéarisation, ni stockage, ni inversion de matrices et un schéma mixte Eulérien-Lagrangien (A.L.E) pour obtenir un maillage avec moins de distorsions dans les zones les plus sollicitées.

Période post-doctorale ▷ *Le séchage sous vide du bois : Pourquoi et comment ?*

Depuis l'apparition du séchoir traditionnel, les solutions des constructeurs leaders ont connu peu de progrès car il subsiste le gaspillage d'énergie et la pollution qui s'en suit, le séchage à l'air libre est le processus qui présente le plus d'inconvénient avec le surcoût lié au stockage, la coloration, l'apparition des fentes lors du retrait, la dégradation par les insectes sans compter l'immobilisation du capital. Les temps de séchage beaucoup trop longs entraînent un manque de flexibilité pour pouvoir s'adapter aux besoins du marché.

Le développement des séchoirs sous vide constitue une piste de progrès dans ce domaine d'activité. De nombreuses possibilités de pilotage de l'installation s'offrent à l'exploitant en vue d'un meilleur aspect et d'une moindre sollicitation du bois lors du séchage. Cependant, le séchage à la vapeur sous vide n'a pu percer, par rapport au séchoir traditionnel, meilleur marché, qu'en raison d'innovations importantes (Brunner, 1991).

Depuis 1993, plus de 50 séchoirs de tailles diverses, dont 25 séchoirs à vide, ont été suivis et analysés (Brunner, 1997). Environ 1200 cycles de séchage de chênes, de hêtres, de sapins de 27 à 240 mm d'épaisseur ont permis d'étudier systématiquement la durée de séchage, la dispersion du taux d'humidité finale, la courbe de température du bois et le comportement du séchoir. L'enquête détaillée a porté sur les déformations de tous types, les décolorations ou les fissures. C'est la première fois qu'une étude aussi complète et aussi ciblée est réalisée dans ce domaine. Elle donne des résultats pratiques de séchage en fonction des essences et des épaisseurs et offre une base de comparaison entre séchage conventionnel et séchage sous vide. Dans certaines limites, des consignes de température et de vitesse de séchage rapides permettent des durées de séchage très réduites. Malheureusement, elles entraînent aussi des défauts de qualité liés au séchage : déformations, fissures, écarts d'hygrométrie, décolorations et tensions.

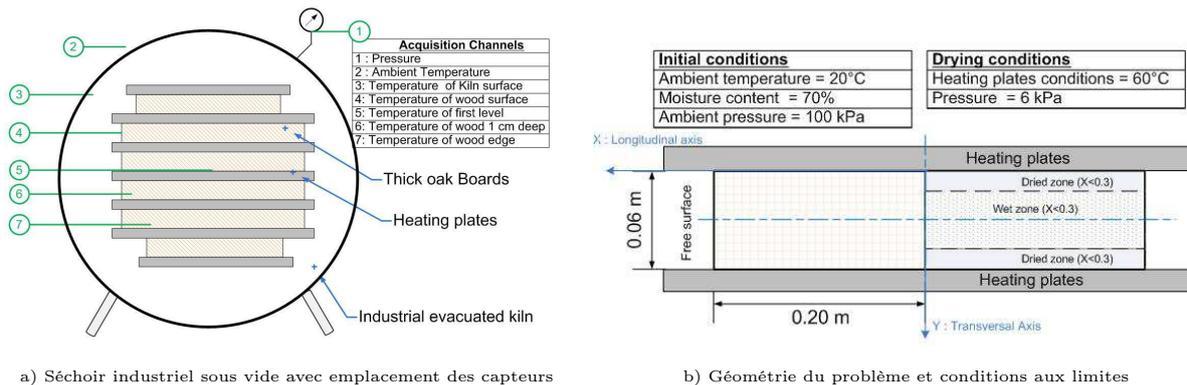


FIGURE 1.4 – Séchage sous vide des planches et modélisation du problème avec conditions aux limites

Ma contribution s'inscrit dans le contexte des recherches entreprises dans le domaine de la rhéologie du bois par le Laboratoire d'études et de Recherche en Mécanique des Structures à Montluçon (Temmar, 1994; Audebert and Temmar, 1997) et (Audebert et al., 1997). Il s'agit de mettre en œuvre puis de valider un modèle thermomécanique qui permet de prévoir l'apparition des fentes et autres imperfections au cours d'un séchage rapide sous vide. Le bois se présente comme un matériau avec une microstructure cellulaire, on distingue essentiellement les fibres longitudinales et une sous-structure poreuse où les transferts d'eau s'opèrent au cours des cycles d'humidification et de séchage. Le taux de saturation de la sous-structure poreuse est en moyenne proche de 12% et varie avec l'essence du bois, l'âge et la provenance.

Selon l'essence du bois destiné au séchage, une valeur critique du taux d'humidité permet de définir l'existence d'un front d'évaporation. Au cours d'un processus de séchage, il existe une zone sèche avec un taux d'humidité proche du taux de saturation ($\approx 10\%$) et une zone humide

où le taux d'humidité reste proche du taux d'humidité initial après entreposage ($\approx 40\%$). En se basant sur l'existence du front de séchage, nous proposons une analyse simplifiée sur le transfert de masse et le transfert de chaleur (Audebert, Temmar, Hammoum, and Basilico, 1997).

J'ai complété la modélisation du problème de séchage avec un modèle rhéologique où sont pris en considération le retrait libre, la relation entre la contrainte et la déformation instantanée (élastique), le fluage induit par le temps (fluage viscoélastique) et le fluage induit par la variation d'humidité (fluage mécanosorptif). La loi constitutive du modèle rhéologique est basée sur un comportement visco-élastique et l'anisotropie a également été prise en considération dans la modélisation. Pour les besoins de l'étude, le calcul montre qu'au cours d'un séchage sévère visant à abaisser le taux d'humidité de 70% à 10%, le matériau peut subir des contraintes internes très importantes qui dépassent les valeurs limites en contrainte du bois.

Afin d'introduire la notion de contrainte limite, j'ai proposé par la suite une loi de comportement

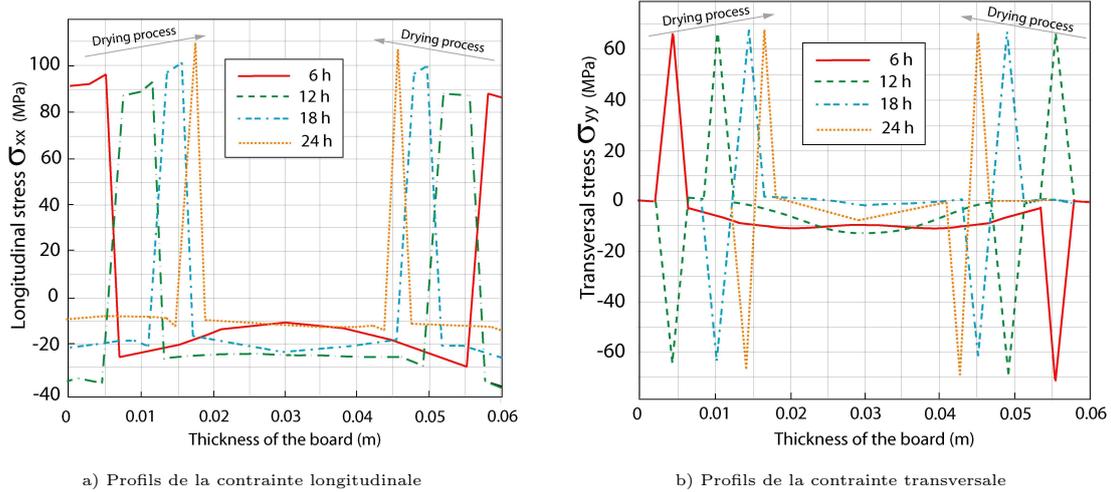


FIGURE 1.5 – Evolution au cours du séchage du profil des contraintes σ_{xx} et σ_{yy} suivant l'épaisseur de la planche de bois

élasto-visco-plastique prenant en compte la dépendance des caractéristiques du bois en fonction du taux d'humidité (Hammoum and Audebert, 1999). L'objectif de ce développement est de rendre plus réaliste le comportement mécanique du bois au cours du séchage. A partir des caractéristiques physiques et mécaniques du bois, les travaux de recherche effectués au LERMES ont permis d'affiner la méthode d'optimisation du processus du séchage sous vide en tenant compte des contraintes internes développées au cours du séchage. L'ajustement des paramètres pression et température permet de réduire ainsi le risque de déformation et de fissuration des pièces en bois.

Période professionnelle ▷ *La durabilité des matériaux de chaussées*

En septembre 1996, j'ai rejoint l'équipe de la Division Structures et Matériaux pour les Infrastructures de Transport (SMIT) du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en tant que chargé de recherche du ministère. Mon intégration a coïncidé avec l'extension des activités du laboratoire sur les liants bitumineux. L'objectif est de regrouper géographiquement tous les moyens humains et matériels dans le même laboratoire.

Les activités du laboratoire étaient à cette époque uniquement orientées vers la technique routière (caractérisation des constituants, formulation des mélanges, essais mécaniques et dimensionnement). Ces activités sont essentiellement centrées sur des approches classiques. Mon positionnement sur le thème principal de la durabilité des matériaux de chaussées n'était pas direct et comme activité de transition, j'ai été amené m'adapter aux activités du laboratoire (à cette époque, il n'y avait pas de moyens pour caractériser et évaluer la durabilité des couches superficielles ou pour lancer des travaux sur la fissuration et l'autoréparation à une échelle plus fine). Pour contribuer au développement du laboratoire, j'ai suivi une formation sur la spectrophotométrie infrarouge à transformée de Fourier à la Faculté des sciences de Nantes. Une formation qui s'avère utile et efficace car elle m'a facilité la mise en place des méthodes d'identification et de dosage des éléments chimiques contenus dans le bitume. J'ai également élaboré une base de données des polymères utilisés dans le domaine routier. La prise en main de la spectrophotométrie infrarouge fût ma première tâche dans le laboratoire. Ensuite, j'ai poursuivi ma mission de développement du laboratoire des liants avec la mise en place d'autres essais de caractérisation (traction directe, pelage, ductilité, etc.). Par rapport à mon profil centré sur la modélisation numérique, cette phase de développement du laboratoire fût une expérience nouvelle et très enrichissante pour moi.

En tenant compte de ma double formation (matériaux et mécanique), mon positionnement scientifique s'est fait ensuite sur le thème central de LA DURABILITÉ DES MATÉRIAUX DE CHAUSSÉES.

Pourquoi ce sujet de recherche ?

Tout simplement, ce sujet constitue une voie d'investigation intéressante pour appréhender à la fois, le fonctionnement mécanique des matériaux routiers, les couplages physico-chimiques et le développement d'outils expérimentaux et numériques.

Depuis les années 70, les gestionnaires routiers utilisent des règles empiriques pour déterminer le revêtement adéquat pour un tronçon routier. Ces règles proviennent de l'expérience terrain accumulée depuis plusieurs années. Pour consolider l'expérience acquise, une approche plus rationnelle est nécessaire pour la transmission des connaissances et du savoir-faire. Cette réflexion permet d'expliquer pourquoi ce thème de recherche présente potentiellement des possibilités de développement et d'innovation.

Abordons l'objectif principal, un tronçon routier doit être optimisé pour répondre aux nouvelles attentes des usagers. Pour y parvenir, les chaussées doivent être correctement dimensionnées, mises en place et entretenues dans les règles de l'art préconisées par la technique routière.

Mais au delà du calcul de dimensionnement et de la mise en œuvre d'une structure de chaussée, sa durabilité dépend également du choix et de la qualité des matériaux utilisés. Dans notre ère d'innovation technologique et de préoccupations environnementales, la qualité des matériaux et la réutilisation des déchets routiers constituent le terrain d'expression des acteurs du domaine routier qui proposent des procédés de construction performants et durables. Pour améliorer les procédés actuels tout en respectant les critères environnementaux, il faut favoriser une certaine synergie entre les différentes disciplines scientifiques concernées.

Quel est l'apport du multi-échelle ?

Le muti-échelle, un dernier mot à la mode ? J'ai utilisé l'approche multi-échelle afin de faire le lien entre les phénomènes physiques et mécaniques observables à l'échelle d'une couche de

chaussée ou d'un échantillon d'enrobé bitumineux et les aspects physiques et physico-chimiques décrits à une échelle micrométrique et nanométrique. Il existe des travaux dans ce sens avec les matériaux cimentaires qui découlent des recherches sur les approches nanotechnologiques (projet européen NanoConex et travaux du groupe RILEM TC197 sur la nanotechnologie dans les matériaux de construction). Les nanotechnologies peuvent-elles apporter une avancée significative dans le domaine des matériaux bitumineux? Des réflexions dans ce sens ont été abordées lors d'un workshop qui s'est déroulé à l'université de Floride en 2006 (Partl et al., 2006).

Depuis les années 70, l'échelle macroscopique utilisée par l'ingénieur routier a permis de lancer les bases de la technique routière actuelle. Par souci de simplification, on a ainsi assimilé l'enrobé bitumineux à un milieu macroscopiquement homogène avec un comportement élastique puis récemment visco-élastoplastique. Des modèles macroscopiques ont été proposés pour décrire le fonctionnement de la structure (Balay et al., 1998; Heck et al., 1998) et évaluer sa durée de vie (Moutier, 1991; de La Roche, 1996; Breyse et al., 2004).

Parallèlement, la chimie des liants bitumineux s'est développée pour appréhender la structure des bitumes, pour évaluer leurs états rhéologiques et leurs évolutions dans le temps. L'échelle nanométrique utilisée par les chimistes a permis d'établir quelques relations entre la structure du bitume et ses propriétés physiques et rhéologiques (Lesueur, 1996). Les recherches entreprises avec les techniques d'analyse modernes (rhéomètre, spectrophotométrie Infrarouge à transformée de Fourier (Mouillet, 1998; Lamontagne et al., 2001), analyse calorimétrique différentielle (ACD), diffraction aux rayons X et fluorescence UV par excitation et émission Synchrones (EES)) ont permis de caractériser la nature chimique du bitume et de décrire plus finement le rôle joué par les constituants de base du bitume, bien connus sous l'acronyme *composition S.A.R.A.*¹. A l'heure actuelle, les progrès accomplis en matière de techniques analytiques permettent de mieux comprendre la chimie et la physico-chimie des bitumes, même s'il faut se rendre à l'évidence que la structure moléculaire du bitume reste trop complexe pour être parfaitement définie (Lesueur, 2009).

Je me suis alors interrogé sur le chaînon manquant pour compléter la compréhension du comportement des mélanges bitumineux. Il est plus que nécessaire de développer des travaux à une échelle intermédiaire pour comprendre non seulement les mécanismes de déformation, de fissuration, d'autoréparation des mélanges bitumineux mais également construire par la suite une démarche plus rationnelle qui englobe les matériaux recyclés et les matériaux alternatifs. C'est pourquoi, le thème principal de la durabilité des matériaux de chaussée doit prendre en compte le caractère multi-échelle du problème.

Après ce préambule utile pour situer un peu le contexte et la motivation qui m'ont amenés à travailler sur ce sujet de recherche, je vais décrire ici un ensemble de projets de recherche en relation avec la technique routière auxquels j'ai participé depuis mon entrée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Ces travaux de recherche s'inscrivent dans les deux axes de recherche du schéma directeur du LCPC que sont la conservation du patrimoine bâti correspondant aux infrastructures et l'utilisation des nouvelles technologies.

Afin de présenter les différents travaux et de les situer dans le contexte général, j'ai pris le parti de rédiger des textes introductifs. J'ai également ajouté quelques compléments concernant des projets en cours. J'espère que cela facilitera la lecture de ce mémoire. L'ensemble de mes travaux sont basés sur les méthodes de calcul et les expérimentations développées et employées au sein du Laboratoire. Je n'ai pas rappelé ici le détail de ces méthodes, ce qui prendrait trop de place. Mais la plupart des articles cités comportent les points essentiels des développements et des résultats présentés ici.

Pour garder une certaine lisibilité dans la description de mes travaux, je présenterais donc uniquement les travaux consolidés autour de quelques thématiques définies dans les orientations du

1. S : Saturé, A : Aromatique, R : Résine et A : Asphalthènes

laboratoire puis j'exposerais le projet scientifique que je compte développer et animer à l'avenir.

Enfin, la dernière partie récapitule l'ensemble de ma production scientifique. J'y distingue les articles dans des revues à comité de lecture (3), les actes de colloques et les communications orales présentées lors des colloques (4), les principales actions de formation et d'encadrement (7) et enfin l'administration de la recherche et autres activités scientifiques (9).

Il y a également les résultats de recherche issus des contrats avec les industriels (8), une occasion d'utiliser l'expertise acquise grâce aux travaux de recherche menés ici dans des applications industrielles. La plupart de ces contrats concernent les études sur les liants modifiés avec une optimisation des performances et un procédé de fabrication. Ces résultats ne sont pas présentés dans ce mémoire et n'ont pas fait l'objet de publications.

Je termine ce préambule en insistant sur le fait que le travail présenté ne se serait jamais fait sans «guides» scientifiques et pédagogiques, sans chercheurs collègues passionnés, sans doctorants motivés, sans industriels compétents, sans techniciens disponibles et sans secrétaires efficaces. Qu'ils et qu'elles soient de Grenoble, Californie, Montluçon, Lyon, Strasbourg, Nantes, Aix-en-Provence, Greenwich, Stellenboch, Santander, Washington, Lausanne, Angers, Rennes, Québec ou Paris, je les en remercie très sincèrement.

1.2 Introduction

Le bitume, matériau issu de la distillation du pétrole, est sans conteste parmi les matériaux les plus répandus et le plus utilisé dans les infrastructures de transport, où il sert de liant aux granulats pour former un enrobé bitumineux. Bien que représentant typiquement 5% en masse d'un mélange bitumineux, son impact sur les performances mécaniques de la couche bitumineuse est considérable (Anderson et al., 1993). Les propriétés recherchées sont la tenue mécanique à froid pour éviter les phénomènes de fissuration et la tenue mécanique à chaud pour résister à l'orniérage. La couche de roulement subit à la fois l'agressivité des charges lourdes avec la problématique du contact pneumatique-chaussée et les conditions environnementales (ensoleillement UV, oxydation par l'air, eau et polluants). Néanmoins, la couche de roulement occupe une place particulière dans une structure de chaussée dans la mesure où l'on recherche également certaines propriétés de surface essentielles pour assurer une sécurité et un confort de conduite quelque soit les conditions climatiques. Elle constitue ainsi une couche protectrice pour la structure et un bon support pour la circulation des véhicules.

Le retour d'expérience dans l'emploi des liants et des mélanges bitumineux dans les couches de roulement reste relativement limité dans la mesure où les interactions entre les différents phénomènes physico-chimiques et mécaniques sont nombreuses. Néanmoins, une des questions essentielles à laquelle il faut répondre est la durabilité globale d'une couche de roulement en tenant compte à la fois de l'intégrité de la couche vis à vis des conditions environnementales et la conservation des propriétés de surface.

Le thème de la durabilité des couches superficielles ne peut être traité correctement sans introduire la notion d'échelle d'investigation. Mes travaux prennent en compte d'une part l'observation avec l'étude des phénomènes à différentes échelles et les expérimentations en laboratoire et sur site. Mes travaux incluent également le développement de moyens d'essai innovants et de modèles de prédiction des caractéristiques des matériaux, afin de prendre en compte le caractère hétérogène et complexe des mélanges bitumineux. Je présente donc mes travaux de recherche selon les trois volets suivants, qui correspondent aux trois échelles d'observation :

1. Volet 1 : Echelle d'une structure pour aborder la durabilité des couches superficielles vis à vis des efforts tangentiels et des conditions climatiques.
2. Volet 2 : Echelle d'un échantillon d'enrobé bitumineux pour définir la structure interne d'un mélange bitumineux pour une meilleure identification du matériau. Grâce aux techniques d'homogénéisation, on peut construire un modèle pour prédire les propriétés mécaniques des mélanges bitumineux.
3. Volet 3 : Echelle d'un film de bitume au pseudo-contact intergranulaire pour cerner le comportement du bitume dans les conditions dans lesquelles il se trouve au sein du matériau bitumineux.

1.3 Durabilité des couches superficielles

1.3.1 Introduction

La pérennité des couches de roulement prend en compte non seulement la durabilité des matériaux vis à vis des pathologies (LCPC, 1998) dont quelques unes seront énumérées ci-après, mais aussi le maintien des propriétés d'usage des revêtements routiers (uni, adhérence, bruit, projection d'eau, etc..) à un niveau satisfaisant pour les usagers. La préoccupation des gestionnaires du réseau routier consiste alors à proposer des solutions durables et économiquement acceptables et pouvant assurer un bon niveau de sécurité et un bon confort de conduite quelles que soient les conditions environnementales.

Récemment, ces préoccupations ont rejoint de nouvelles exigences des pouvoirs publics en matière de développement durable et du respect de l'environnement. La croissance du transport urbain et périurbain démontre encore une fois que le transport des biens et des personnes reste, il faut le rappeler, une nécessité pour le développement économique et social. L'environnement et la préservation des ressources naturelles doivent être pris en compte dans les règles de conception des infrastructures de transport.

Mis à part le cas des couches de roulement très minces, les couches bitumineuses épaisses remplissent un rôle structurel dans la chaussée. On peut se reporter à l'ouvrage de [di Benedetto and de La Roche \(1998\)](#) pour donner une idée des caractéristiques rhéologiques et mécaniques des matériaux bitumineux utilisées dans le domaine des chaussées. Pour simplifier, on relève essentiellement trois types de pathologies sur une structure de chaussée :

1. La fissuration qui peut-être soit d'origine thermique, lorsque le matériau subit une variation de température importante et qui se traduit par des contraintes de traction dans le matériau, soit d'origine mécanique, par le passage d'une charge lourde créant ainsi des efforts de flexion avec des contraintes de traction à la base des couches liées ([de La Roche, 1996](#); [Bodin, 2002](#)). La fissuration dans la couche de roulement constitue un point d'entrée des eaux de pluie et à terme, cette fissure est préjudiciable pour la pérennité de la structure. Plusieurs études ont montré l'influence des paramètres de composition d'un enrobé bitumineux (type de liant, teneur en liant et nature des fines) sur le comportement à la rupture. Toutefois, même s'il a été montré que la fissure qui se propage dans l'enrobé se développe dans le film de liant collant les granulats entre eux, la contribution de la nature du liant reste encore mal connue. Une échelle d'investigation plus fine se révèle nécessaire pour aborder ce problème.
2. La déformation permanente des couches de la chaussée en général et de la couche de roulement en particulier. Ce problème est assez proche du comportement élastoplastique des milieux granulaires liés ou non liés sous sollicitations cycliques. Les graves non traitées par exemple sont largement abordées dans la littérature ([Hornych et al., 1993](#); [Hicher, 1998](#); [Hicher et al., 1999](#); [Abd et al., 2004](#)).
Le risque d'apparition des déformations permanentes dans les couches de roulement augmente dans les régions chaudes. Néanmoins, d'autres facteurs contribuent à favoriser l'orniérage, comme la thermo-susceptibilité du bitume, la forme des granulats, ou encore une densification insuffisante du squelette granulaire lors de la mise en œuvre. L'apparition de l'orniérage, même de faible importance, est synonyme d'une multiplication du facteur risque pour les usagers, avec les problèmes d'accumulation d'eau et d'aquaplaning.
3. Un endommagement avec perte de matériaux à la surface des couches de roulement. Des effets d'origine mécanique et physico-chimique peuvent expliquer ce type de désordre :
 - i) l'effet de l'eau sur l'interface liant-granat. Ce problème touche particulièrement les ré-

gions pluvieuses ou/et les régions où les granulats locaux présentent une mauvaise adhésion avec les liants bitumineux.

ii) l'effet du gel/dégel qui aboutit à terme à la formation des nids de poule. L'effet du gel-dégel est bien connu des gestionnaires routiers et la technique routière française a surmonté ce problème. Seulement, les aspects gel/dégel ont réapparu ces dernières années dans le Nord-est de la France et avec le phénomène du changement climatique et il semble que l'effet du gel/dégel peut devenir une des principales préoccupations du gestionnaire routier.

iii) Enfin, l'effet des efforts tangentiels et les arrachements de granulats en surface constatés au niveau des carrefours giratoires et autres points singuliers. Cependant, la reproduction en laboratoire du phénomène d'arrachement est relativement difficile à faire, car non seulement il faut faire un choix sur le type d'essai qui servira pour le classement des matériaux entre eux mais il faut également cerner les principaux facteurs qui déclenchent l'arrachement de granulats.

On voit bien que la durabilité des couches de roulement est un sujet de recherche assez vaste et nous avons tenté d'apporter quelques contributions dans ce sens.

Je commence cette partie par un travail sur les aspects structurels avec une charge roulante isolée sous différentes conditions de chargement. Sans donner d'emblée au lecteur une description complète du problème de contact pneumatique-chaussée, je présente quelques résultats pour introduire les effets des conditions de chargement sur une structure au travers d'une analyse de l'état de contrainte. Ensuite, j'aborde les travaux expérimentaux effectués en laboratoire pour expliquer certaines pathologies observées dans les couches de chaussée.

1.3.2 Les effets d'une charge roulante sur une structure

Le passage d'une charge roulante engendre un état de contraintes dans la structure. Cet état de contraintes mécanique dépend de la nature des couches de la structure mais également des caractéristiques de la charge. Les couches bitumineuses se déforment par flexion sous le passage de la charge. Comme les matériaux présentent un comportement viscoélastique, l'état de contraintes dépend de la vitesse de passage de la charge et de la température qui règne dans la structure.

Le dimensionnement d'une structure est basée sur le calcul des épaisseurs des différentes couches en fonction du type de trafic, de la portance des sols et des matériaux utilisés. Dans ce cadre, les organismes techniques (LCPC et SETRA, 1994) ont conçu un catalogue des structures pour apporter une aide dans la conception d'une structure de chaussée.

Ce dimensionnement concerne essentiellement les couches de base et les couches de fondation car ces dernières remplissent la fonction de portance de la structure. Cependant, les couches superficielles avec notamment la couche de liaison et la couche de roulement occupent une place importante dans le schéma de conception des infrastructures de transport. Les couches superficielles constituent une surface d'échange de nature mécanique avec les conditions de chargement (freinage, accélération, changement de direction, etc) et une surface d'échange de nature physico-chimique avec les conditions environnementales.

La collaboration avec l'INRETS, l'ENS de Cachan et LOHR (Projet National du groupe 10 du Predit DEVIN : *Durabilité Et Interaction Véhicules-Infrastructure*) a été l'occasion d'examiner l'effet des conditions de chargement (accélération, freinage et roulement libre) sur l'état de contraintes mécanique dans la couche de roulement. A l'origine de ce projet, il y a le concept de tramway sur pneus qui est présenté comme un système de transport moderne et adapté à la circulation des personnes dans des villes de taille moyenne et plus grande.

Sur ce type d'infrastructure, on adapte la conception de la structure pour tenir compte des spécificités propres au tramway sur pneus. Le tracé est une de ces spécificités requises pour desservir

les quartiers résidentiels. Néanmoins, avec un tracé sinueux, le tramway aura besoin d'accélérer, de freiner et de s'arrêter au niveau des nombreuses stations placées sur le tracé. La recherche d'un compromis entre le temps de parcours du circuit, la desserte locale et la durabilité de la structure constitue l'enjeu principal de ce projet.

Plus précisément, l'expérience montre que les effets de variation de la vitesse à l'approche des stations et le trafic canalisé peuvent influencer la réponse de la structure et à terme réduire la durée de vie de la couche de roulement. Le projet DEVIN a donné l'occasion aux participants d'étudier la cinématique et les conditions de chargement du tramway de Clermont-Ferrand. Ces éléments serviront à simuler la réponse de la structure et à évaluer les contraintes du tracé.

L'un des volets du projet DEVIN est consacré à l'étude des effets des variations de vitesse dans le sens longitudinal (freinage, accélération ou roulement libre) sur la structure.

Afin d'obtenir les efforts appliqués par la roue motrice, on utilise le signal accélérométrique longitudinal en caisse (Figure 1.6). Le signal vitesse réelle au sol, mesuré par dynamo tachymétrique, est pris comme consigne vitesse fonction de l'abscisse pour les simulations.

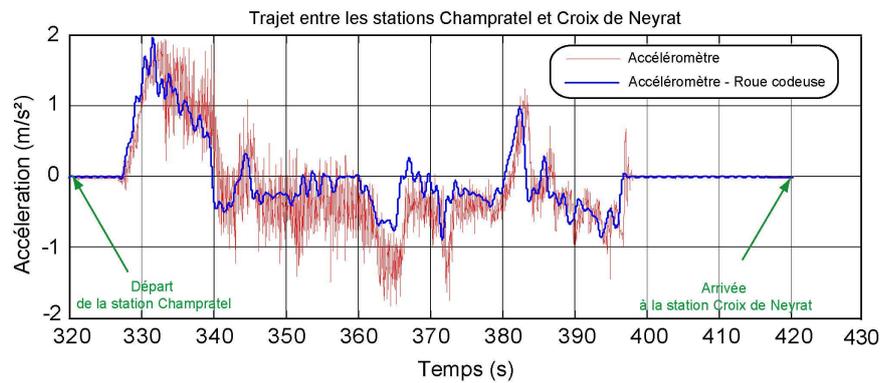


FIGURE 1.6 – Enregistrement du signal accélération longitudinal entre les stations Champratel et Croix de Neyrat

Pour exploiter les courbes, on se rend compte que la difficulté consiste à bien recalculer la consigne de vitesse sur le tracé. Par prudence, nous avons utilisé un système GPS afin d'éviter les erreurs de positionnement. De même, on a dû prendre en compte les conditions initiales non nulles de l'effort horizontal pour intégrer la pente au niveau de la station Champratel. Ceci a entraîné quelques modifications dans le logiciel *VOCOLIN* à l'INRETS pour tenir compte de tous les aspects liés au projet de tramway.

La campagne d'essai réalisée le même jour pour deux allers-retours complets le long de la ligne du tramway a permis d'observer que le comportement du conducteur dans la conduite du tramway peut influencer un peu les résultats de mesure.

Les efforts obtenus sur une roue de l'essieu moteur le long des 200 premiers mètres de l'interstation Champratel-Croix de Neyrat sont reportés sur la figure (1.8). Les courbes de force sont données en fonction de la distance parcourue par le tramway, on voit que la zone où la force horizontale atteint une valeur maximale est assez courte, une dizaine de mètres en sortie de station. Cette portion du tracé sollicitée dans des conditions particulières a été prise en considération.

Ce premier cas retenu comme représentatif d'un effort tangent élevé est obtenu dans une situation où le véhicule accélère à $1,5m/s^2$, en ligne droite, soit un effort longitudinal par pneu de 14000N pour une charge réduite sans doute par le cabrage à 36500N (Balay et al., 2008). Le rapport entre l'effort horizontal et l'effort vertical est de 0,39. A noter au passage que l'effort

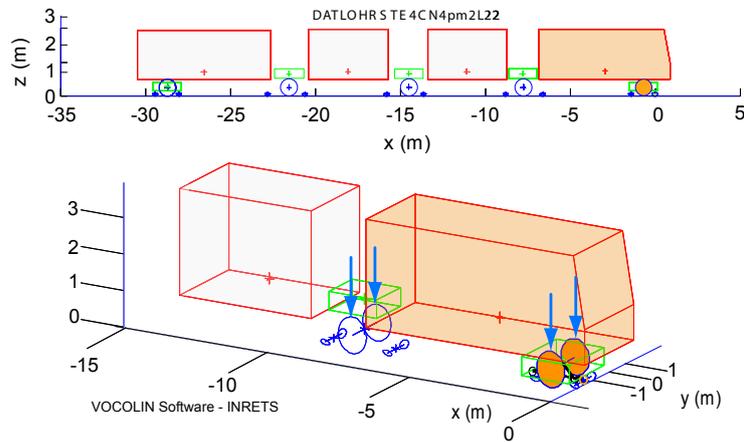


FIGURE 1.7 – Configuration du tramway STE 4 pour la modélisation avec le logiciel Vocolin-INRETS

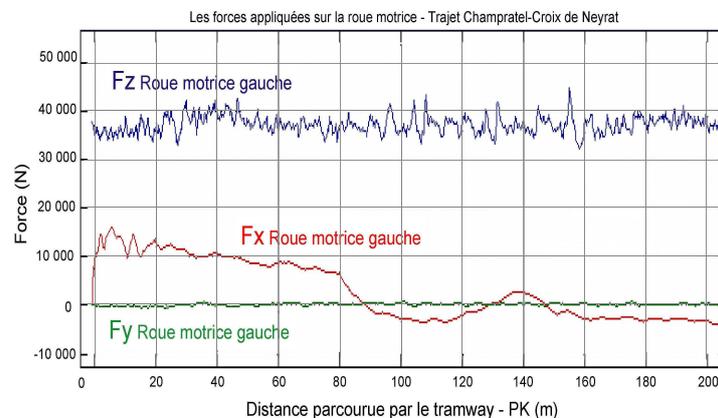


FIGURE 1.8 – Forces agissant au niveau de l'essieu moteur (calcul de dynamique des véhicules-INRETS)

de guidage reste faible avec 200N.

Les forces engendrées par la roue motrice à la sortie de la station seront utilisées comme données d'entrée pour le calcul des efforts internes dans la structure.

Dans la deuxième phase de ce travail, nous avons mené les calculs avec les outils numériques les plus avancés au LCPC (CVCR) (Heck et al., 1998) et VISCOROUTE, (Duhamel et al., 2005; Chabot et al., 2006) pour prendre en compte le caractère viscoélastique des matériaux en place et la cinématique de la roue sur la structure.

Les pressions de contact normale et tangente sous la roue sont considérées comme uniformes. Certes, cette considération n'est pas réaliste mais le travail de représentation du champ de pressions réel n'est pas encore en place pour qu'il soit exploité ici.

Quoiqu'il en soit, le calcul des efforts internes dans la structure se veut avant tout qualitatif et nous avons considéré un cas similaire à la structure utilisée sur le circuit de tramway de Clermont-Ferrand, constituée d'une couche de roulement BBME de 7cm et d'une couche de base avec un enrobé à module élevé, de 19cm d'épaisseur au total, d'une couche de GNT de 30cm et d'un sol de portance moyenne. Les matériaux non liés sont supposés élastiques linéaires et les couches bitumineuses assimilées à un matériau viscoélastique sont définies par le modèle de

Huet-Sayegh (Hammoum et al., 2010).

La simulation numérique montre que la déflexion verticale en surface semble dépendre principalement de la vitesse du véhicule. La couche de roulement est soumise à une déflexion plus marquée lorsque le tramway avance à une vitesse réduite à l'approche et au départ de la station. Par contre, la déflexion verticale semble peu influencée par les effets dus aux variations de la vitesse (accélération et freinage).

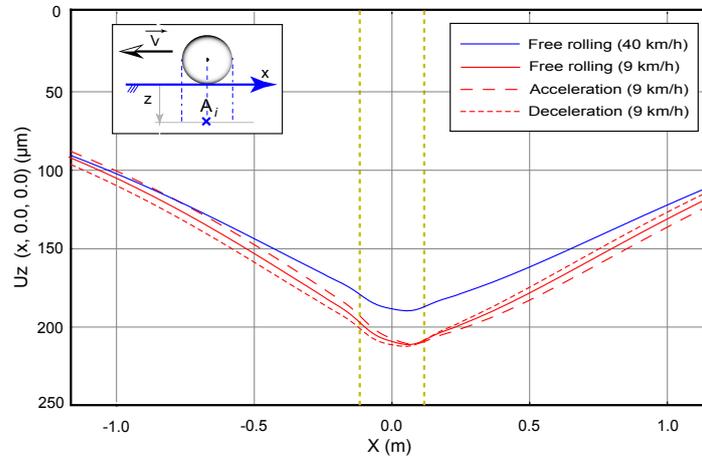


FIGURE 1.9 – Déflexion sous la roue en fonction des conditions de chargement ($\theta = 20^\circ\text{C}$)

L'examen des champs de contrainte dans la couche de roulement révèle un effet majeur de la force horizontale due aux changements de vitesse du tramway. La contrainte de cisaillement σ_{xz} semble dépendre directement de la cinématique du véhicule. Contrairement au roulement libre où la contrainte σ_{xz} est localisée au voisinage des bords du pneumatique, les changements de vitesse se traduisent ainsi par une contrainte de cisaillement non négligeable et répartie sur toute la surface de contact. Ces efforts de cisaillement qui " pétrissent " le matériau s'ajoutent à l'effet de la seule contrainte verticale et peuvent expliquer dans certains cas l'apparition des déformations permanentes. La contrainte longitudinale σ_{xx} est également affectée par les conditions de

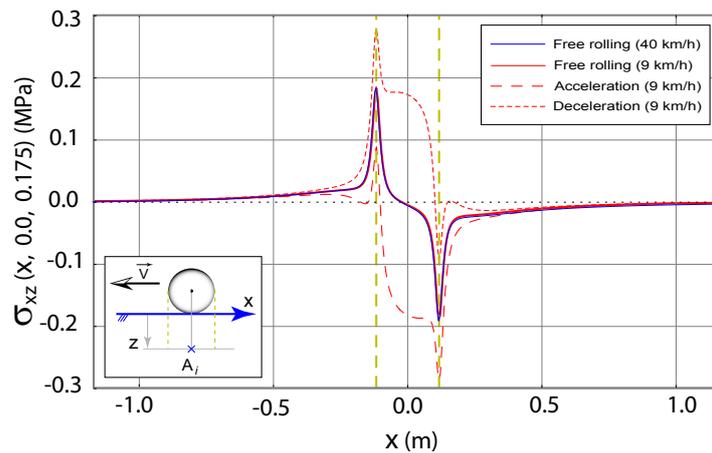


FIGURE 1.10 – Effets des conditions de chargement sur la contrainte de cisaillement dans la couche de roulement ($\theta = 20^\circ\text{C}$)

chargement. Une accélération ou un freinage accentue un peu plus la contrainte longitudinale σ_{xx} .

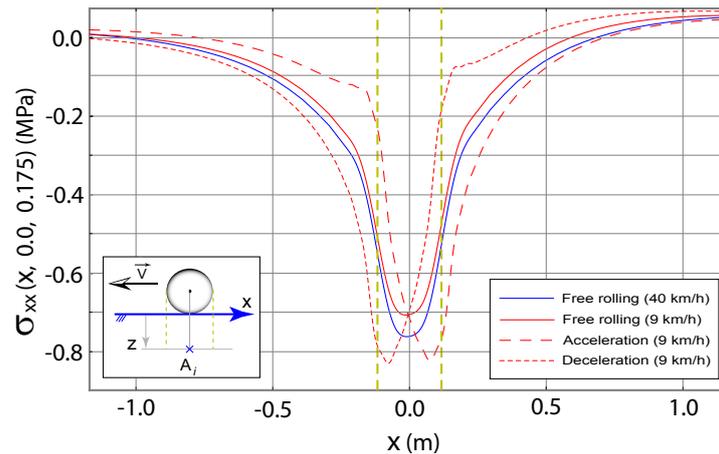


FIGURE 1.11 – Effets des conditions de chargement sur la contrainte de cisaillement dans la couche de roulement ($\theta = 20^\circ\text{C}$)

Le seul examen de ces états de contraintes ne rend toutefois qu'imparfaitement compte du fonctionnement sous trafic des couches bitumineuses dans les structures de chaussée. Notamment, ils ne rendent pas compte, en un point donné, de l'historique de chargement ou du chemin de contraintes lié, à l'approche puis à l'éloignement d'une charge roulante (Heck, 2001).

Pour donner une idée plus précise au lecteur sur l'état de contraintes sous une charge roulante, on propose la représentation tensorielle des états de contrainte, déjà adoptée dans la thèse de J-V Heck (Heck, 2001). Sans dénaturer exagérément le phénomène, nous convenons de restreindre la description à partir des invariants classiques p , q de la Mécanique des Sols ou des Roches, où p est la pression moyenne et q la contrainte déviatoire, associées au tenseur de contrainte en un point donné de la chaussée.

Afin de mieux saisir la globalité du phénomène au passage d'une charge, nous adoptons dans le plan (p, q) une représentation de type "chemin de contraintes", obtenue par élimination en un point donné M , de la variable temps t , entre les quantités $p(M, t)$ et $q(M, t)$. La construction de ces chemins de contraintes est particulièrement simple dans le cas présent de l'étude d'une section courante de chaussée où un unique calcul, opéré dans le repère de la charge roulante, suffit. Si x désigne l'axe de la chaussée et si les coordonnées du point M sont (x, y, z) , le chemin de contraintes s'obtient en éliminant x entre les quantités $p(x, y, z)$ et $q(x, y, z)$, à y et z fixés. On rappelle que tout autre point M' de coordonnées (x', y, z) voit le même chemin de contraintes que M .

Par convention, nous considérons toujours dans la suite, contraintes et déformations négatives en traction (resp. en extension) et positives en compression (resp. en contraction).

Les travaux proposés dans ce sens dans Hammoum et al. (2010) comblent en partie le manque d'information sur les effets des conditions de chargement dans le plan bidimensionnel (p, q) . La figure (1.12) illustre les chemins de contraintes engendrés aux points A_i à différentes profondeurs Z au passage de la charge isolée. Les chemins sont obtenus par représentation paramétrique dans le plan (p, q) des quantités $p(t)$ et $q(t)$, aux points A_i lorsque la charge roulante se déplace le long de l'axe de la chaussée de $+\infty$ à $-\infty$.

Les courbes de la figure (1.12) sont typiques des chemins de contraintes obtenus au voisinage de la surface des chaussées. Elles présentent dans le plan (p, q) l'allure d'une demi-sinusoïde tronquée dans sa partie descendante. Le point α est obtenu à la verticale du centre de la charge. Le

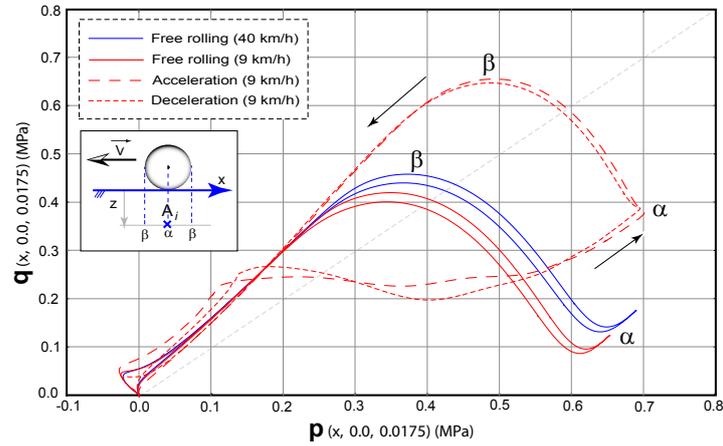


FIGURE 1.12 – Chemin de contraintes dans le plan (P, Q) au voisinage de la surface des chaussées ($\theta = 20^\circ\text{C}$)

sommet β est obtenu, quant à lui, pour les points situés approximativement au voisinage de la périphérie de la charge. Tout au long du déplacement de la charge roulante, le matériau subit une pression de confinement correspondant à une compression. Les conditions de chargement influent sur le degré de confinement, représenté par le paramètre p , mais les effets sont plus visibles sur la partie déviatorique. La valeur maximale du déviateur q subit une augmentation de l'ordre de 55% lorsque la roue freine ou accélère. Les travaux menés dans ce sens montrent que l'effet des conditions de chargement augmente au fur et à mesure qu'on s'approche de la surface.

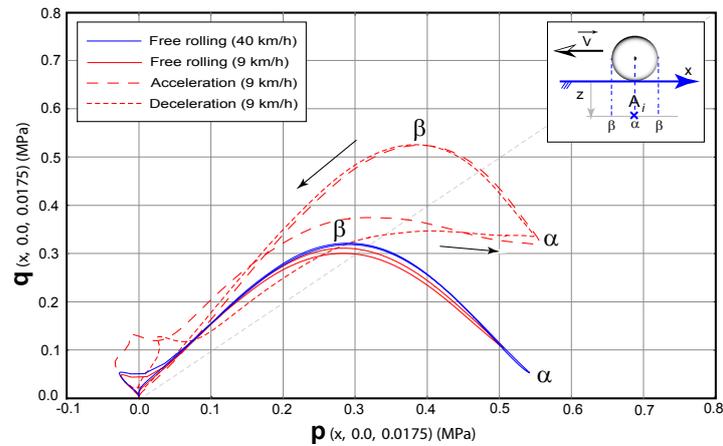


FIGURE 1.13 – Chemin de contraintes dans le plan (P, Q) au voisinage de la surface des chaussées ($\theta = 40^\circ\text{C}$)

Lorsque la température passe de 20°C à 40°C , les valeurs de la contrainte sont plus faibles, mais surtout la partie déviatorique après le point α est plus marquée. Lorsque la charge s'éloigne, le rapport P/Q diminue avec l'augmentation de la température. La valeur maximale du déviateur q subit une augmentation de l'ordre de 69 % lorsque la roue freine ou accélère. Certes, les valeurs de la contrainte sont plus faibles, mais l'écart constaté est encore plus grand avec l'augmentation de la température.

Comme on peut s'y attendre, les résultats proposés dans Hammoum et al. (2010) montrent qu'il

y a peu d'amplitude du déviateur à la base d'une couche structurale et donc peu de rotation de contraintes et que le tenseur de contraintes conserve, quelle que soit la position de la charge, la typologie caractéristique d'une traction biaxiale dans le plan horizontal, associée à la flexion d'une plaque.

Lorsque la température passe de $20^{\circ}C$ à $40^{\circ}C$, les valeurs de contraintes sont plus faibles et les chemins de contraintes sont à peu près superposables. Avec l'augmentation de la température, les effets des conditions de chargement à une profondeur plus importante sont peu significatifs en comparaison avec la couche superficielle.

On voit bien, au travers de cette étude, que les conditions de chargement affectent essentiellement la couche superficielle. Les effets combinés de la température et des conditions de chargement doivent être pris en compte lors d'une étude en laboratoire.

Pour les charges multi-pics, il serait utile d'examiner l'impact du cumul des charges sur le chemin de contraintes. Si l'on tient compte du temps de relaxation relativement long du matériau viscoélastique vis à vis du temps de passage de la charge, on peut supposer que l'accumulation des charges avec un multi-essieu peut modifier d'une manière significative le chemin de contraintes dans le plan (p, q) .

Actuellement, il n'existe pas encore d'appareils de laboratoire susceptibles de solliciter de manière homogène des éprouvettes de matériau, pour des historiques de sollicitation aussi complexes que ceux observées près de la surface de la chaussée. Il n'existe donc pas de réponse expérimentale complète aux questions que nous nous posons au regard du comportement visco-élasto-plastique des enrobés bitumineux et des conditions de chargement.

Toutefois, on peut, en parallèle, proposer des études expérimentales reposant sur des chemins de contraintes plus simples, tirer certaines interprétations des historiques présentés et comprendre le fonctionnement des couches de surface dans une structure.

1.3.3 Les effets d'une force tangentielle sur une couche de roulement

Nous avons vu précédemment que les conditions de chargement peuvent jouer un rôle important dans le comportement mécanique de la couche superficielle d'un tronçon urbain pour tramway sur pneu. Il faut également mentionner que nous pouvons rencontrer des conditions de chargement similaires sur le réseau routier en général et au niveau des points singuliers en particulier.

Cependant, la question sur la quantification des effets des conditions de chargement dans les points singuliers reste ouverte et nous nous sommes alors penchés sur les questions liées aux effets des conditions de chargement qu'on représentera ici par une composante horizontale ou force tangentielle aux abords des points singuliers dans le cadre d'un projet de recherche dénommé "TriboRoute".

Introduction

Les points singuliers soumis à la circulation des poids lourds ont fait l'objet de plusieurs études traitant des aspects liés à la circulation routière et au tracé géométrique, dans lesquelles la mécanique de surface est totalement absente. Il suffit pourtant d'observer les chaussées des ouvrages existants pour constater qu'elles sont parfois le siège de dégradations importantes dès les premiers mois de mise en service. Ces points singuliers posent alors des problèmes d'entretien aux gestionnaires routiers et par la même occasion une certaine gêne aux usagers pendant les travaux.

Examinons ce problème de plus près : En section droite, la surface de la chaussée évolue au jeune âge avec un décapage du bitume présent sur les granulats et un réarrangement des granulats les uns par rapport aux autres sans perte de matériau. Les variations saisonnières et la susceptibilité

thermique des liants interviennent sur le réarrangement des granulats en surface.

Cependant, il existe aussi un autre type de réarrangement de granulats plus rapide et accentué par les sollicitations tangentielles des pneumatiques dans les points singuliers. Dans certaines conditions, qui restent à expliciter, ces efforts tangentiels peuvent donner lieu à la formation de plis à la surface dans les zones de freinage ou simplement à un déplacement horizontal des granulats avec ou sans départ de matériau.

Les zones concernées par le problème d'arrachement ne constituent pas des cas isolés mais correspondent potentiellement à tous les points singuliers (giratoire, courbe serrée, intersection, etc.) où la couche de roulement peut subir des efforts tangentiels intenses lors des manœuvres des conducteurs (freinage, accélération, changement de direction). Selon les caractéristiques de surface de la couche de roulement, ces efforts peuvent produire soit :

1. Une rupture brutale dans le mastic (ou le liant) et un déchaussement du granulat (le phénomène peut se produire à froid par rupture fragile ou à chaud si l'énergie de cohésion est insuffisante). Cette description se retrouve principalement sur les surfaces à texture positive comme les enduits superficiels ou les textures très ouvertes comme les enrobés drainants.
2. Un endommagement progressif après un nombre important de passages de charge roulante avec, à terme, un départ de matériau. La présence de l'eau est un facteur aggravant. On retrouve la grande famille des enrobés qui présentent une surface à texture négative plus ou moins fermée avec les semi-grenus, les enrobés minces et très minces.

Au delà des aspects strictement matériaux qui seront traités ici, il faut savoir que l'endommagement de surface peut-être favorisé ou accéléré par les défauts de mise en œuvre (matériau sous-compacté, ségrégation locale, enrobage insuffisant des granulats, mauvaise jonction au niveau du joint longitudinal, etc.).

Examinons ce qui a été entrepris dans le domaine pour appréhender le phénomène d'arrachement. Le manège Total constitue l'une des premières tentatives pour appréhender le problème d'arrachement en laboratoire ([Jolivet and Malot, 1999](#)). Les études menées dans ce sens montrent qu'il existe bel et bien une dépendance vis à vis du liant même si le protocole expérimental a été adapté pour faciliter le phénomène d'arrachement (réduction de la teneur en liant et compacité plus faible). Les bancs d'essais classiques avec une roue muni d'un bras permettant d'imposer un freinage ou un angle d'envirage ne remplissent pas certaines conditions pour reproduire le phénomène d'arrachement sur site. Prenons le cas d'un manège muni d'une roue, la force centrifuge est reprise par le bras qui relie la roue à l'axe de rotation et l'effort de cisaillement engendré par l'angle de dérive n'est pas contrôlé.

On recense également l'essai Cantabro ([Jiménez and Recasens, 1993](#)) qui est un essai de choc. D'un point de vue mécanique, l'essai relativement empirique est très éloigné du problème de contact roue-chaussée et ne peut fournir un indice de performance pertinent par rapport à la description du phénomène d'arrachement.

Au travers de ces exemples, il apparaît un besoin d'un test pertinent et réaliste. Un test avec la possibilité de contrôler quelques paramètres pour en déduire certaines interprétations en relation avec le terrain.

Dans le cadre d'une collaboration avec le Professeur Pierre-Yves Hicher de l'Ecole Centrale de Nantes, un financement de thèse associant la région Pays de Loire et le LCPC a pu être obtenu pour permettre à Monsieur Hamlat de travailler sur l'évaluation de la résistance aux efforts tangentiels des enrobés bitumineux.

La **thèse de Smail Hamlat** ([Hamlat, 2007](#)) rattachée à l'Ecole Doctorale MTGC de l'université de Nantes a été réalisée à la division SMIT du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées sous l'encadrement du Professeur Pierre-Yves Hicher et moi-même. Ce travail a débouché en mars 2007 à une soutenance de thèse.

Principe de l'essai retenu pour reproduire les efforts tangentiels en laboratoire

Le démarrage de la thèse coïncide avec la mise au point d'un moyen d'essai innovant proposé par Stéfani (Stéfani, 2000). Cet essai est capable de reproduire en laboratoire le phénomène de dégradation de surface par arrachement. La phase conception du moyen d'essai qu'on peut assimiler à un tribomètre particulier a mobilisé une équipe projet de 7 personnes (ingénieurs et techniciens) pour prendre en compte à la fois les aspects techniques et pratiques qu'exige un tel projet. Ce travail original a débouché sur un brevet international (N° FR 06 50 054 du 06 janvier 2006).

Contrairement aux tribomètres usuels, qui imposent un déplacement relatif, le nouvel essai,

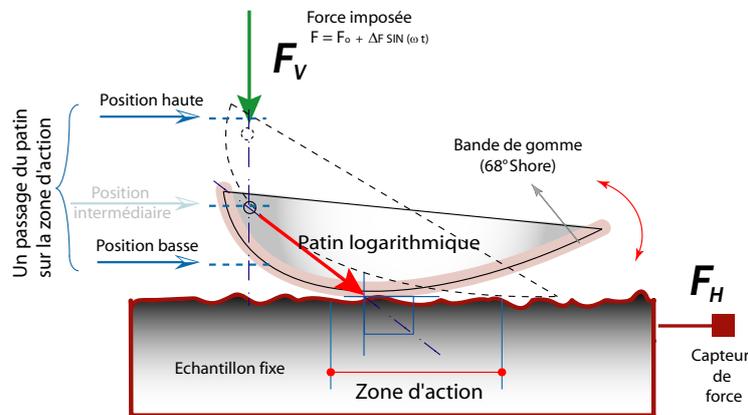


FIGURE 1.14 – Principe de l'essai retenu pour l'évaluation de la résistance aux efforts tangentiels

utilisé pour la première fois durant ce travail de thèse, permet de maintenir un niveau de chargement contrôlé quel que soit l'état de dégradation de la surface. Plus précisément, l'utilisation d'un applicateur de charge dont la forme suit une loi logarithmique permet de maintenir le couple de force (verticale et horizontale) avec un rapport quasi-constant quelle que soit la position du patin logarithmique (figure 1.14). On aura compris que l'innovation principale provient de la forme particulière du patin de gomme. Elle constitue en quelque sorte un élément de réponse pour reproduire en laboratoire un trajet de chargement relativement complexe.

On impose une force de contact cyclique sans changement de signe, d'inclinaison déterminée, pour provoquer une dégradation de surface par déchaussement ou bris de granulats ; le patin ne glisse que par à-coups à la survenue de tels événements, la zone de contact se trouve alors automatiquement décalée vers l'arrière et les débris éjectés dans la direction opposée. Le patin attaque ainsi successivement diverses bandes étroites d'un long rectangle sans interposition de débris. Lorsque le vérin atteint sa butée basse, la phase cyclique est arrêtée. Cette phase correspond à un passage de l'applicateur de charge.

Mise en œuvre de l'essai

Le dispositif dénommé Tribomètre pour Revêtement Routier (T2R) ou *LCPC Raveling tester* est un banc d'essai à deux axes perpendiculaires, posé sur un socle rigide et lourd (figure 1.15). Il se compose d'une colonne verticale contreventée supportant l'ensemble (applicateur de charge et vérin verticale) et d'une table horizontale sur roulement. Cette table peut accueillir une éprouvette parallélépipédique (185 mm x 247 mm) ou une carotte de chantier de diamètre égal à 300 mm. La hauteur des éprouvettes n'excède pas 150 mm. L'applicateur de charge de largeur égale à 140 mm, est revêtu d'une gomme de 8 mm d'épaisseur, de caractéristiques rhéologiques proches de celles de la bande de roulement des pneumatiques (figure 1.15). Cette gomme présente

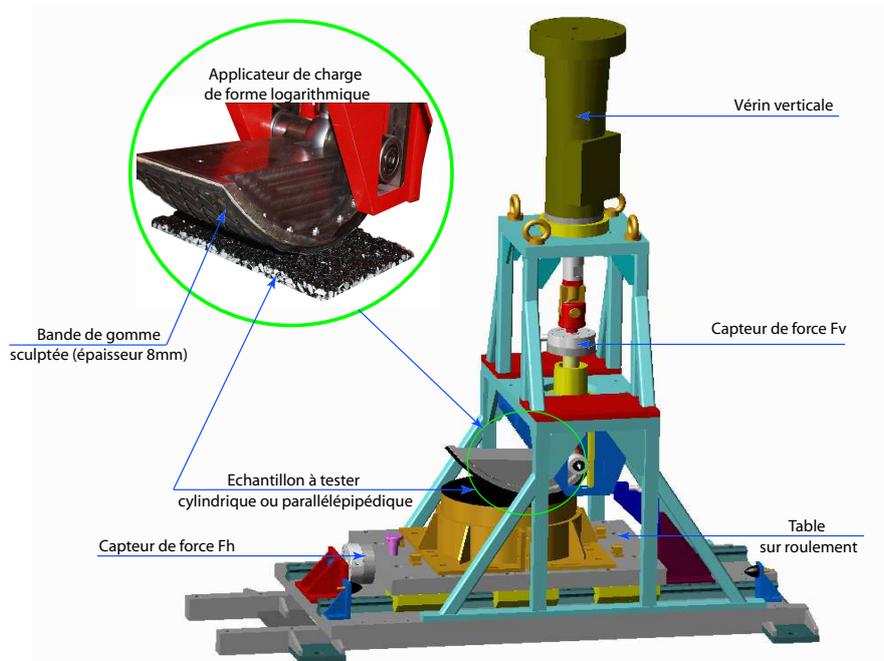


FIGURE 1.15 – Vue d'ensemble du dispositif d'essai pour évaluer la résistance aux efforts tangentiels

sur sa surface des sculptures en forme de losanges et sa dureté à température ambiante est de 68° Shore environ. Le système de pilotage du banc d'essai prévoit les deux types d'asservissement : soit un contrôle en force pour les essais d'arrachement, soit un contrôle en déplacement du patin pour d'autres types d'essai. L'essai de résistance aux efforts tangentiels consiste à appliquer une charge moyenne représentant la sollicitation d'un pneumatique de poids lourd sur le revêtement. Le glissement de la gomme est obtenu à partir d'une modulation de la charge verticale autour d'une valeur moyenne.

Le banc d'essai est muni de capteurs de force, de déplacement et de température. Le déplacement du vérin vertical traduit le glissement sporadique ou répété du patin. La force horizontale subie par l'échantillon est enregistrée tout au long de l'essai, traduisant l'état du contact mécanique entre le patin de gomme et le revêtement à éprouver.

Le protocole d'essai comporte trois phases dont une pour l'évacuation des débris produits éventuellement au cours des sollicitations :

- **Phase de préchargement** : Le patin est mis en contact avec la surface du revêtement par application d'un déplacement imposé. Puis, on passe à un asservissement en force pour poursuivre le chargement sur l'échantillon jusqu'à atteindre la force verticale moyenne imposée. Le temps d'accrochage nécessaire reste en moyenne égal à 40 s. Les conditions d'accrochage dépendent de l'état de surface du revêtement, de la rigidité des matériaux en contact et de la température de l'essai.
- **Phase de chargement cyclique** : Une fois la consigne atteinte, on impose une sollicitation sinusoïdale dont l'amplitude a été fixée à $1/3$ de la force moyenne pour assurer un bon accrochage du patin, à savoir une vitesse de glissement stable et un frottement le plus élevé possible. La charge verticale moyenne est fixée à 2500 N de manière à reproduire une pression de contact apparente équivalente à celle produite par un poids lourd. La fréquence de sollicitation est égale à 1 Hz. Partant d'une position haute du patin notée P_h et d'une position basse du patin notée P_b , le patin sollicite la surface de l'éprouvette sur une longueur L_s égale à la différence entre les positions limites du vérin vertical $P_h - P_b$. Sur une surface

contenant des granulats de taille D , il faut s'assurer que la longueur sollicitée soit au moins 8 fois la taille D du plus gros granulat. Les dimensions du patin sont fixées de telle manière à tester tous les types de revêtements utilisés sur le réseau routier. Le patin logarithmique effectue un passage sur une longueur L_s pendant un temps déterminé t_s . La vitesse de glissement moyenne du patin entre les deux positions P_h et P_b est $V_{moy} = L_s/t_s$.

- **Phase de relèvement du patin** : Le patin est replacé en position haute. Cette position permet de dégager un espace de l'ordre de 15 mm sous le patin pour évacuer éventuellement les granulats arrachés à l'aide d'un système d'éjection par air comprimé. Ce système est placé à la même hauteur que la surface de l'éprouvette afin que l'air comprimé puisse balayer la surface de l'éprouvette avec un angle rasant. La pression de sortie doit être au moins égale à 0.6 MPa de pression. Cette phase dure environ 10 s. Après le nettoyage de la surface, on relance l'essai avec la même force de contact cyclique. Cette procédure décrite avec les trois phases est répétée le nombre de fois nécessaire à l'obtention d'un certain degré de dégradation (figure 1.16). L'essai doit être effectué sur au moins deux éprouvettes pour s'assurer de la réponse du matériau.

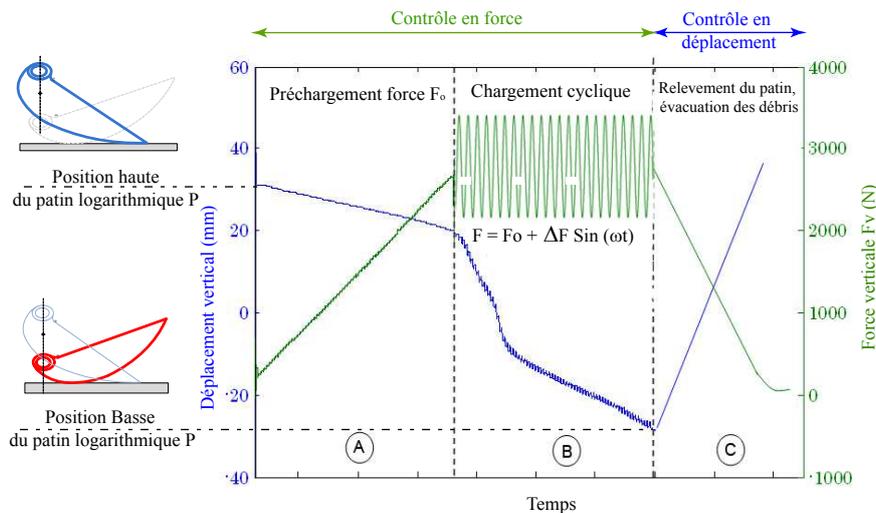


FIGURE 1.16 – Protocole de l'essai de résistance aux efforts tangentiels avec les trois phases

L'essai de résistance aux efforts tangentiels présente une bonne répétabilité. Pour obtenir des essais répétables sur une formule d'enrobé bitumineux, il faut respecter les deux points suivants :

- Les échantillons doivent avoir la même compacité et doivent présenter la même texture en surface.
- Lors des essais, il faut s'assurer que la température est constante et que la vitesse de glissement moyenne d'un essai à un autre est comparable.

Action mécanique du patin logarithmique sur un échantillon

Examinons l'action mécanique du patin logarithmique sur des échantillons d'enrobé bitumineux. On s'interroge alors sur les efforts internes engendrés par le passage du patin à la surface de l'échantillon.

La visualisation des efforts transmis par le patin logarithmique à l'échantillon est nécessaire pour évaluer les niveaux de déformations dans l'échantillon et expliquer ainsi l'endommagement de surface. Comme la structure interne du matériau est relativement complexe, nous nous sommes tourné vers une technique de mesure de champ de déplacement par corrélation d'images car elle permet de fournir des informations assez précises de ce qui se passe sous un patin qui accélère

ou qui freine.

En collaboration avec le Laboratoire de Mécanique et de Technologie de Cachan, nous avons mis en place un dispositif expérimental de mesure par corrélation d'images ; constitué d'une caméra CCD de résolution (1280x1024) pixels munie d'un objectif adapté (Figure). La zone de mesure est éclairée de manière à restituer une image relativement claire de la surface de l'échantillon. Pour la mesure et l'exploitation, nous avons utilisé le logiciel d'analyse des champs de déplacement (Correli) (Berthaud et al., 1998; Cuisinier et al., 2006) pour obtenir la répartition du champ de déplacement engendré par l'action du patin logarithmique. Cette méthode permet de mesurer le champ de déplacement suivant un plan vertical au droit du patin logarithmique. Nous avons complété le système de mesure avec un capteur de déplacement pour mesurer le déplacement hors plan en un point.

Le principe de corrélation d'images est basé sur la construction d'une grille virtuelle dans la zone de mesure *ROI* "Region Of Interest" de l'image numérisée (Figure 1.17). Le déplacement de chaque point de la zone de mesure *ROI* correspond à la valeur moyenne du déplacement du centre de la zone d'étude appelée *ZOI* "Zone Of Interest". Si l'on considère une zone d'étude plus grande que la taille des granulats avec des valeurs de *ZOI* de 128x128 pixels, on obtient une vision macroscopique du champ de déplacement.

Pour récapituler la méthode de mesure, la détermination du champ de déplacement repose sur les trois étapes suivantes :

1. Définir la zone de mesure "*ROI*" qui n'est pas nécessairement toute l'image acquise.
2. Découper la zone de mesure en zones d'études "*ZOI*" plus petites avec un choix sur la taille de la zone d'étude.
3. Calculer le coefficient de corrélation des zones d'étude.

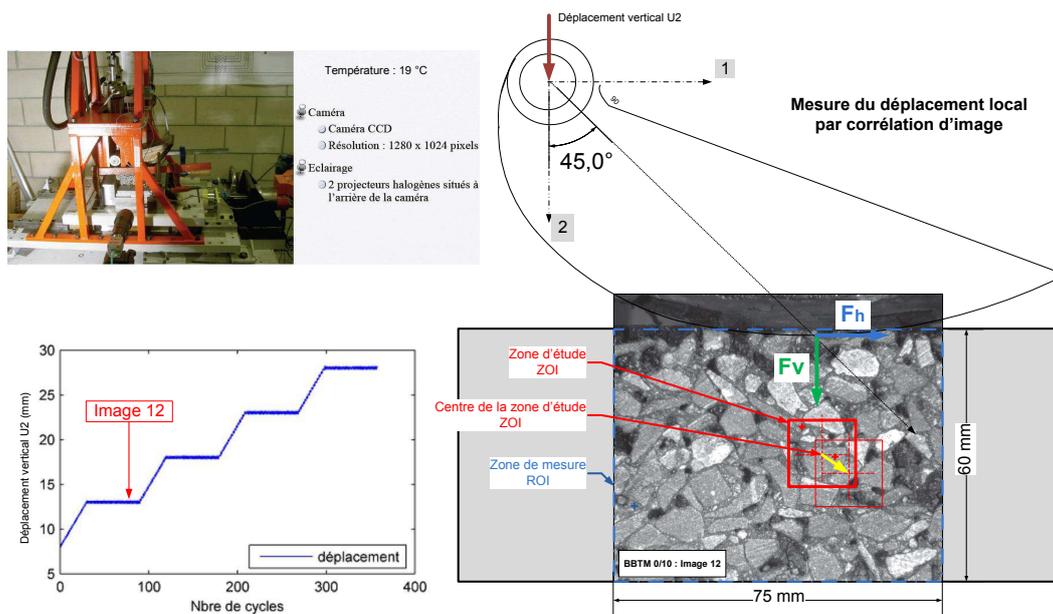


FIGURE 1.17 – Principe de corrélation d'images et définition des zones de mesure *ROI* et d'étude *ZOI*

La figure 1.17 décrit la position de la zone de mesure *ROI* qui reste fixe tout au long des essais et la position du patin à un instant bien déterminé. Nous avons mené les essais sur deux matériaux de granulométrie différente avec un enrobé bitumineux discontinue (BBTM 0/10) présentant une porosité de 23% et un autre matériau du type (BBTM 0/6) avec une porosité de

18%. Pour une même énergie de compactage, la porosité d'un matériau découle de la discontinuité présente dans la courbe granulométrique d'un matériau. De même, la surface spécifique totale des granulats d'un BBTM (0/6) est plus grande que la surface spécifique totale d'un BBTM (0/10). En effet, pour une teneur en liant identique sur les deux matériaux, l'épaisseur du liant autour des granulats est moins importante sur le BBTM (0-6). On peut alors s'attendre à une plus grande concentration des efforts internes sur le matériau de granulométrie (0/6).

On impose un déplacement au patin logarithmique de type pente-palier puis on mesure les trois composantes du champ de déplacement dans la zone de mesure (75 mm X 60 mm). A titre d'exemple, on effectue la corrélation sur l'image 12 d'un enrobé de granulométrie 0/10 par rapport à l'image de référence prise avant chargement. L'image 12 correspond à un niveau de chargement de l'éprouvette avec une force verticale de 3070 N. Ce qui correspond à une pression moyenne verticale de 0.7 MPa sur l'aire de contact entre le patin logarithmique et la surface de l'échantillon.

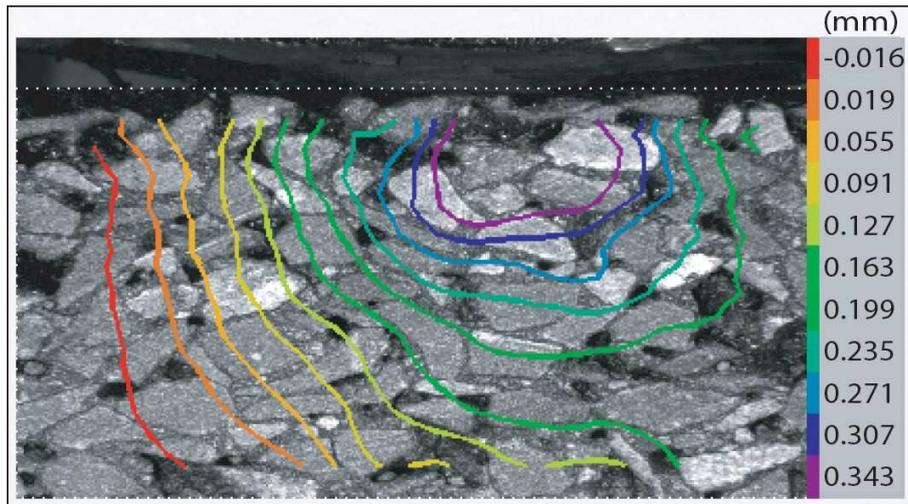


FIGURE 1.18 – Champ de déplacement vertical U_2 mesuré au passage du patin logarithmique $F_v = 3070 N$

L'examen du champ de déplacement vertical (figure 1.18) montre que l'enveloppe du champ de déplacement est inclinée suivant un angle imposé par le patin logarithmique. Cette figure fournit un aperçu macroscopique du champ de déplacement si l'on tient compte de la taille de la zone d'étude. Ce champ diminue rapidement avec la profondeur pour atteindre des valeurs très faibles à 60 mm de la surface de contact. A cause de la visco-élasticité du matériau, cette zone d'action diminue également avec la vitesse de passage du patin (Cuisinier et al., 2006).

L'analyse du champ de déplacement horizontal U_1 semble être une bonne méthode pour examiner le rôle du squelette granulaire dans la transmission et la diffusion des efforts horizontaux. Sur la figure 1.19, l'examen du champ de déplacement horizontal sur les deux matériaux montre que la répartition dépend bel et bien de la granulométrie du matériau. Malgré une épaisseur de liant plus importante, on remarque que le gradient de déplacement est plus marqué avec le matériau de granulométrie 0/10. On peut déduire que la répartition des efforts internes dépend de la taille D_{max} du granulat. On peut supposer aussi que la localisation est encore plus accentuée lorsque le squelette granulaire présente une discontinuité au niveau de la courbe granulométrique ou une porosité importante. Des études complémentaires seront utiles pour compléter ces premières observations.

On reporte sur la figure 1.20, la composante de déformation ϵ_{12} traduisant le cisaillement dans

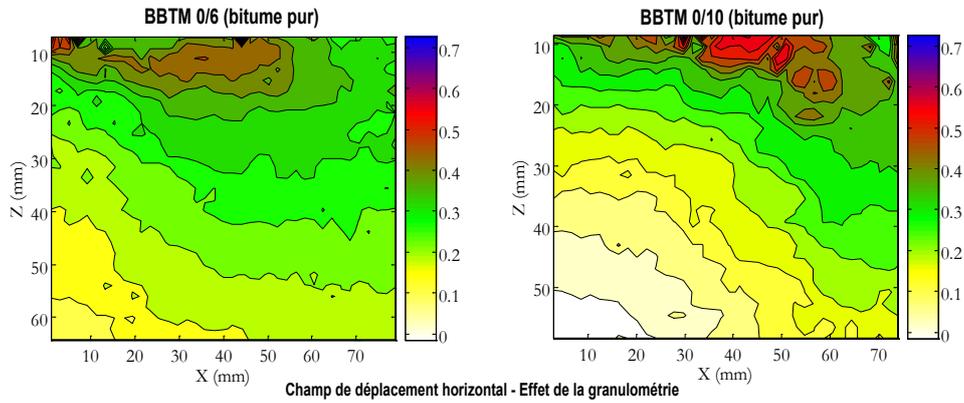


FIGURE 1.19 – Champ de déplacement horizontal U_1 mesuré au passage du patin logarithmique sur deux formules d'enrobé

le matériau. On observe alors près de la surface de contact, un gradient de déformation localisé dans le mastic, la déformation maximale de l'ordre de 1% est localisée sous le patin à une profondeur qui correspond à la taille D_{max} du granulat. Le matériau est-il à ce stade, encore dans son domaine de comportement viscoélastique réversible ? Les mesures effectuées montrent

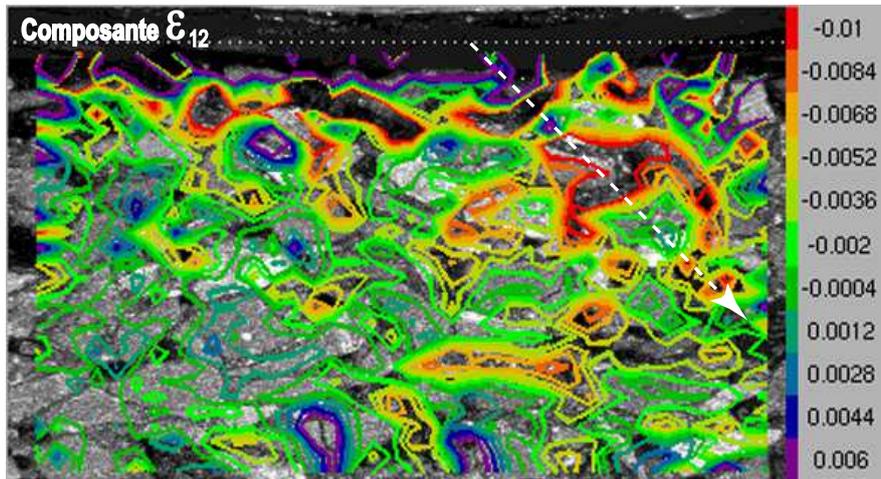


FIGURE 1.20 – Champ de déformation ϵ_{12} mesuré au passage du patin logarithmique

bien que les déformations sont importantes dans la zone proche de la surface. D'autres calculs de corrélation avec une zone d'étude de 16x16 pixels, plus petite que la taille des granulats montrent nettement que les gradients de déformations sont localisés dans la phase du mastic ou du liant. Il semble bien que les performances mécaniques du liant joue un rôle cruciale dans la pérennité de la couche de roulement.

Les observations et les études menées au niveau du réseau technique du ministère sur le problème des arrachements confirment bien le rôle primordial de la nature du liant sur la résistance aux efforts tangentiels et que le choix du liant est encore plus déterminant avec la taille D_{max} du granulat. Par conséquent, les mesures réalisées avec la corrélation d'image corroborent bien avec les observations sur le terrain.

Ce travail tend à confirmer que la performance exigée pour les liants destinés aux couches de roulement dépend non seulement de la charge imposée par le trafic des poids lourd mais dépend

également du squelette granulaire défini par sa compacité et sa granulométrie.

Effet de la nature du liant sur la résistance aux arrachements

Pour une même formule granulométrique, peut-on établir un classement d'un ensemble de liant bitumineux sur le critère résistance aux efforts tangentiels ?

A titre d'application, des essais d'arrachement ont été réalisés sur un ensemble de liants de caractéristiques très différentes. En première approximation, on montre que l'arrachement croît linéairement avec les cycles de chargement et dépend en grande partie des caractéristiques du liant (Hamlat et al., 2007).

Liants	Pénétrabilité à 25 °C (NF EN 1426) (1/10 mm)	Température de ramollissement (NF EN 1427) (°C)	Cohésion au mouton pendule à 40 °C (NF EN 13588) (J/cm ²)	Traction sur éprouvette H2 (5 °C et 100 mm/min) (EN 13587)	
				Contrainte au seuil (MPa)	Allongement au seuil (%)
A (spécial)	61	96,2	1,15	0,5	19,0
B (BmP SBS)	37	64,8	0,65	1,5	16,0
C (Pur 35/50)	28	57,0	0,47	2,6	16,5
D (spécial)	14	78,0	0,22	3,5	16,0
E (bitume-époxy)	0,5	Essai non réalisé	Essai réalisé Pas de valeur	37,5	7,7

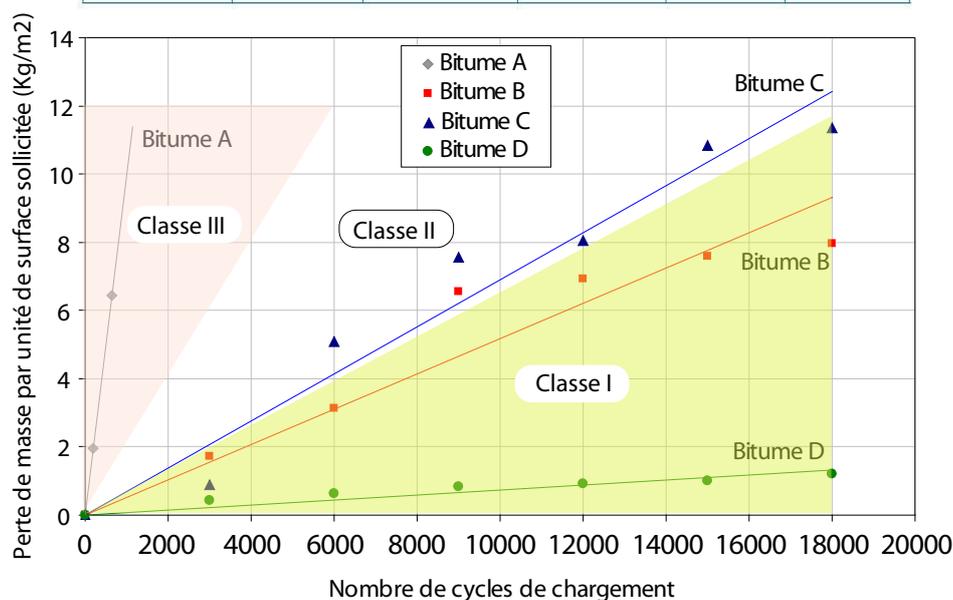


FIGURE 1.21 – Résistance à l'arrachement des enrobés bitumineux : effet de la nature du liant

Nous nous sommes alors posés la question sur la propriété du liant capable de donner une indication sur cette résistance aux arrachements. La réponse n'est pas simple car il existe beaucoup de tests sur liant qui sont utilisés pour classer, identifier le caractère viscoélastique et évaluer les performances mécaniques, mais il n'existe pas de test sur liant permettant de se fixer une idée sur cette résistance aux arrachements.

Pour avancer sur ce sujet, de nombreuses expérimentations ont été menées sur l'enrobé bitumineux afin d'évaluer le potentiel de ce nouvel essai et rechercher la ou les propriétés des liants en lien avec la résistance aux arrachements.

Ainsi, nous avons testé la plupart des formules d'enrobé bitumineux utilisées dans les couches de roulement en France et en Europe. Certaines expérimentations proviennent de contrats passés avec les pétroliers et les entreprises routières. Sur la base des essais réalisés, nous avons ainsi proposé trois classes de résistance avec : la classe *I* pour les matériaux de grande résistance, la classe *III* pour les matériaux de faible résistance aux efforts tangentiels et enfin la classe intermédiaire *II* dont les matériaux offrent une résistance plutôt moyenne.

Globalement, nous n'avons pas pu trouver un essai sur le liant seul capable de traduire la résistance aux arrachements. Toutefois, la recherche de corrélations a permis de proposer l'énergie conventionnelle à 200% obtenue à partir d'un essai de traction *H2*. Même s'il y a une tendance plus ou moins précise sur un ensemble de produit bitumineux. Cette recherche de corrélation semble délicate si l'on tient compte de l'équivalence temps-température. Les tentatives infructueuses pour trouver un essai sur le liant seul conforte l'idée que l'essai d'arrachement sur les mélanges bitumineux reste essentiel pour évaluer la résistance à l'endommagement de surface par arrachement de granulats. La résistance aux arrachements doit être évaluée directement sur un enrobé bitumineux pour prendre en compte la compacité, la répartition du bitume, la taille D_{max} des granulats et l'arrangement granulaire.

Pour avancer dans la compréhension du problème d'arrachement, une étude détaillée sur le champ de déformation local est essentielle pour évaluer la localisation des déformations sous une sollicitation mécanique. Ce point sera abordé dans le paragraphe 1.4.5 du volet 2.

D'autres expérimentations ont été réalisées pour évaluer les effets combinés des efforts tangentiels et de la sensibilité vis à vis de l'eau. Cette étude a été menée dans le cadre d'une collaboration scientifique entre le LCPC et l'université d'Anvers (Artesis College of Antwerp) (Seghers et al., 2010).

Conclusions

L'essai de résistance aux efforts tangentiels constitue une méthode réaliste et pertinente pour étudier en laboratoire la tenue sous circulation des enrobés de surface dans des conditions contrôlées. Le moyen d'essai proposé possède de nombreux avantages car il permet de maintenir un niveau de chargement stable quel que soit l'état de dégradation de la surface. L'asservissement de l'applicateur de charge ne nécessite qu'un seul vérin et le phénomène d'arrachement ne se produit que dans un seul sens par déchaussement de granulats. Les possibilités d'étude sont nombreuses et l'exploitation des résultats des essais d'arrachement permettra de répondre aux interrogations sur le choix des matériaux et l'optimisation des mélanges (effet de la granulométrie, de la nature du liant, de l'adhésion liant/granat, de l'effet de la compacité, etc.).

L'étude des conditions de chargement dans la couche superficielle a permis de proposer un essai d'arrachement comme un essai mécanique spécifique aux enrobés de surface pour évaluer non seulement l'effet de la force tangentielle mais également les effets des conditions environnementales (oxydation par l'air et rayonnement solaire, présence de l'eau et éventuellement des produits chimiques) sur la durabilité des revêtements routiers.

Les expérimentations qui sont menées jusqu'à maintenant permettent d'apprécier l'apport de ce moyen d'essai à l'évaluation des liants bitumineux. A la lumière des résultats obtenus, le nouveau moyen d'essai proposé constitue un outil intéressant pour étudier les caractéristiques mécaniques et tribologiques des revêtements utilisés dans les couches de roulement des infrastructures de transport.

1.3.4 Les effets des conditions climatiques sur les enrobés bitumineux

Dans le cadre des programmes de coopération et d'échanges Franco-Amérique Latine (Programme de coopération Post-graduée Franco-Colombien) de durée limitée (1998-2003), un financement a pu être obtenu pour permettre à Monsieur E. Castañeda Professeur de l'Université industrielle de Santander à Bucaramanga de séjourner en France et de se former aux méthodes d'études et de recherches sur les chaussées françaises.

La thèse d'Eduardo Castañeda rattachée à l'université de Nantes a été réalisée dans la division SMIT du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées sous l'encadrement de Monsieur Christian Such et moi-même pour la partie modélisation. Ce travail a pu être réalisé à temps partagé et a débouché en novembre 2004 à la soutenance d'un mémoire qui a reçu les vives félicitations des membres du jury.

Compte tenu du climat particulier de la Colombie (tropicale pour sa majeure partie), on enregistre des hauteurs de pluie annuelles 10 fois supérieures à celles habituellement observées en France. Dans les pays tropicaux, les enrobés bitumineux périssent rapidement par pénétration de l'eau et par désenrobage (rupture de liaison entre granulats et film de bitume). La plupart des essais traditionnels sont destructifs et nécessitent de nombreuses éprouvettes pour qualifier une formule d'enrobé. De plus, la résistance et la rigidité des matériaux bitumineux sont altérées par les processus thermiques de conditionnement. Des interprétations hâtives ou erronées de la sensibilité à l'eau des enrobés peuvent être alors données si l'on ne prend pas suffisamment de précautions expérimentales. Dans le registre des essais destructifs, il y a la contribution de Gubler et al. (2005) qui présente une comparaison entre les différentes méthodes d'essai utilisées pour évaluer la susceptibilité à l'eau des enrobés bitumineux. Les enrobés avec une teneur en vides peu élevée présentent des dommages moins importants ce qui est probablement dû au fait que la quantité d'eau pouvant pénétrer dans les éprouvettes est faible (Gubler et al., 2005).

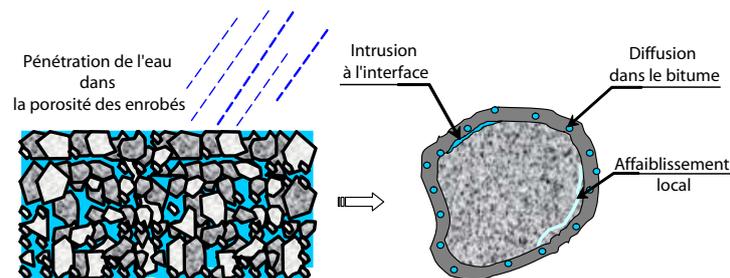


FIGURE 1.22 – Phénomène de désenrobage - Tenue à l'eau des enrobés bitumineux

Pour évaluer l'endommagement des enrobés par l'eau, il faut adopter un suivi continu de la dégradation des caractéristiques mécaniques afin d'analyser les pertes de raideur et la restauration des caractéristiques par l'évaporation de l'eau durant les phases de séchage. Le travail de thèse entrepris par E Castañeda montre que les tests basés essentiellement sur des mesures de modules en traction indirecte conduisent à des évolutions à priori soit de raidissement de l'éprouvette soit de perte de raideur. En fait, les périodes d'humidification et de séchage qui se succèdent conduisent simultanément à une détérioration par l'eau de la liaison bitume-granulat et à un durcissement du liant ; ces deux processus mènent à des réponses opposées et empêchent une évaluation claire de la perte de la capacité du mélange bitumineux à résister à l'action de l'eau. Une analyse de ces observations a été complétée et expliquée par l'utilisation d'un modèle micromécanique qui permet de prendre en compte les effets de perte d'adhésion entre le bitume et la surface des granulats (Pinzon and Such, 2004). Ce modèle est décrit plus précisément dans le paragraphe .

Une méthode non-destructive permet de rassembler plus d'informations avec un nombre d'éprouvettes plus réduit. Nous avons proposé l'essai de module complexe qui permet un suivi des caractéristiques mécaniques. Cet essai apparaît plus précis et peut fournir plus d'informations sur l'état mécanique résiduel de l'éprouvette. Une évolution du module complexe du matériau peut être ainsi mise en relation avec la perte d'adhésion du bitume à la surface du granulat. L'indicateur choisi pour suivre l'état d'endommagement traduit bien une diminution du module

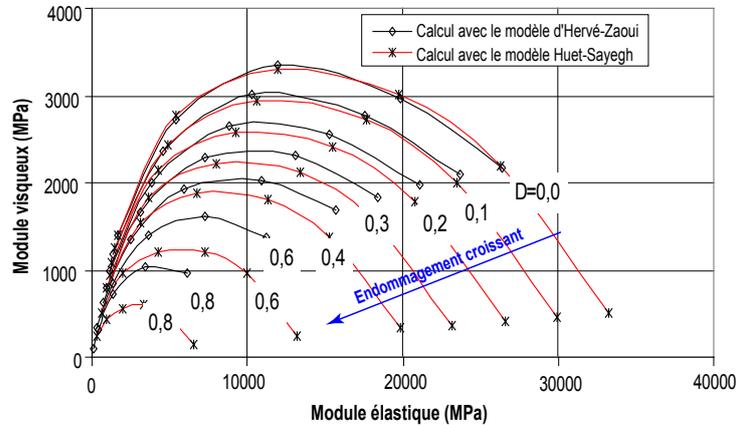


FIGURE 1.23 – Tenue à l'eau : Suivi de l'endommagement dans le plan Cole-Cole

complexe. Sur la figure 1.23, on visualise les différentes courbes du module complexe avec l'endommagement du matériau. Cet indicateur peut être utilisé dans les essais de tenue à l'eau pour situer l'état d'endommagement et suivre son évolution au cours des cycles d'imbibition et de séchage. Ce travail constitue une approche non destructive pour évaluer la sensibilité d'un matériau.

Les travaux de thèse ont permis également de montrer que l'endommagement évolue de manière appréciable avec la température, les temps d'immersion et de séchage. Avec le modèle d'Huet-Sayegh, on propose un facteur d'endommagement (D) pour quantifier et suivre l'endommagement produit par l'eau. La comparaison avec le modèle micromécanique a permis de constater un décalage pour des facteurs d'endommagement supérieurs à 0.2. Globalement, l'association du modèle rhéologique de Huet avec l'approche micromécanique est une voie intéressante pour rendre compte de la dégradation par immersion dans l'eau. Finalement, la méthodologie proposée dans cette thèse peut être étendue à d'autres matériaux et elle peut être adaptée facilement pour reproduire des conditions similaires à celles des climats chauds et humides.

1.4 Les mélanges bitumineux à l'échelle granulaire : identification géométrique et caractérisation mécanique

1.4.1 Introduction

Les matériaux granulaires liés utilisés dans le domaine des infrastructures de transport comportent un assemblage granulaire relativement dense. L'assemblage comporte un liant qui permet de conférer à l'ensemble des propriétés intéressantes comme la cohésion et l'imperméabilité. Il existe une grande variété de liants pour former une matrice organique (bitume, résine, bitume époxy, liant végétal, etc.) ou une matrice minérale (mortier de ciment) ou encore une combinaison des deux matériaux.

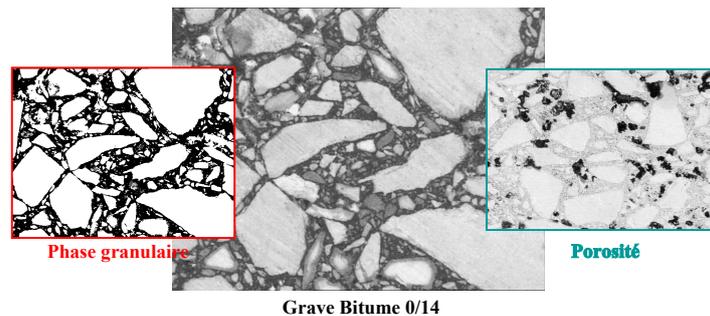


FIGURE 1.24 – Résultat de la discrétisation de Voronoï sur une coupe d'enrobé bitumineux

La structure interne d'un matériau granulaire lié dépend non seulement des constituants utilisés mais également des conditions de fabrication et de mise en œuvre. La disposition des différentes phases du matériau lié et l'arrangement granulaire ont une influence directe et déterminante sur les propriétés mécaniques du mélange. D'une manière complémentaire, la physico-chimie de certains constituants dépendra de la nature des matériaux utilisés, des conditions de fabrication lors de l'étape d'enrobage (procédé à chaud, tiède, semi-tiède, émulsion et mousse) et des conditions environnementales pendant la durée de mise en service (ensoleillement, eau, polluants, etc.). La couche de roulement est plus directement concernée par les conditions environnementales où le vieillissement du liant par oxydation joue un rôle non-négligeable sur les propriétés mécaniques et rhéologiques des matériaux de surface.

Les techniques de caractérisation des matériaux routiers se sont considérablement développées pour pouvoir décrire et identifier les constituants séparément (forme, texture, densité, absorption, raideur, consistance, susceptibilité thermique, etc.). Parallèlement, on évalue les performances des mélanges routiers avec des tests destructifs (fluage, fatigue, retrait empêché, rupture par traction, etc.).

Au delà des caractéristiques macroscopiques mesurées sur un échantillon de matériau lié, ces méthodes destructives ne permettent pas d'apprendre plus sur la structure interne des matériaux et d'en déduire des informations précieuses. Avec le développement des nouveaux procédés d'enrobage et la valorisation des matériaux alternatifs et des fraisats issus de la déconstruction, nous voyons bien que les applications ne manquent pas. Il semble que l'analyse de la structure interne à l'échelle mésoscopique et microscopique présente un intérêt certain et constitue potentiellement une voie de progrès.

1.4.2 Le recours à l'analyse d'image

La technique la plus adaptée pour l'étude des structures granulaires est la tomographie aux rayons X . Elle permet d'effectuer un examen tridimensionnel des échantillons par rotation relative de l'objet entre la source et le détecteur dont le principe a été proposé par [Ellengton and Berger \(1980\)](#). On retrouve dans la littérature des applications concrètes dans le domaine du génie civil ([Guinez, 1987](#)) ou plus récemment une utilisation directe de la tomographie pour analyser la structure tridimensionnelle des mélanges bitumineux ([Ketcham and Shashidhar, 2001](#); [Shashidar, 2000](#)).

Il existe une autre technique moins onéreuse que la tomographie aux rayons X comme l'imagerie optique. Durant les dix dernières années, l'imagerie optique a connu un essor important permettant d'obtenir des images numériques avec une excellente résolution atteignant l'échelle micrométrique. Pour un coût raisonnable, les laboratoires de recherche peuvent se doter d'un équipement d'imagerie de bonne qualité. Avec cette méthode, de nombreuses applications ont vu le jour dans pratiquement tous les domaines d'activité (biologie, biométrie, métallurgie et science des matériaux). Certes, cette technique ne permet d'observer que la surface d'un échantillon, mais elle permet d'obtenir des informations rapides et fiables ([Masad et al., 2001](#)).

L'analyse tridimensionnelle reste possible avec l'imagerie optique grâce à l'apport de la stéréométrie et des lois probabilistes ([Russ and Dehoff, 2001](#)). Ces outils mathématiques permettent ainsi de caractériser la structure volumétrique et interne d'un matériau à partir d'un recoupement d'informations recueillies sur une ou plusieurs faces externes de l'échantillon.

La bibliographie sur le sujet est relativement riche et au regard des avantages et des inconvénients de chaque technique d'observation, j'ai opté pour l'imagerie optique avec la lumière visible pour analyser les différentes phases d'un mélange bitumineux. J'ai entrepris alors la mise en place d'une plate-forme d'imagerie au laboratoire SMIT, afin d'évaluer l'apport de cette technique dans notre domaine d'activité.

Pour compléter la technique d'imagerie, j'ai mis en place également les méthodes de traitement et d'analyse des images obtenues en associant les méthodes mathématiques robustes permettant de déterminer plusieurs quantificateurs de la structure des matériaux hétérogènes ([Coster and Chermant, 1985](#); [Boitier et al., 1997](#)) avec notamment :

- l'identification des phases du matériau hétérogène. Le contraste des phases garantit le succès de cette étape d'identification. Cependant, il existe quelques techniques d'acquisition avec un éclairage en lumière monochromatique (exemple : microscopie en fluorescence UV pour identifier les phases d'un bitume modifié par les polymères).
- la description de la distribution spatiale qui reste le point le plus difficile. Le recours à des méthodes statistiques et probabilistes peut être utile dans certains cas pour répondre à cette question.

1.4.3 Identification de la structure interne des matériaux bitumineux

L'identification de la structure interne d'un assemblage dense comme les matériaux routiers passe généralement par une caractérisation pratique pour l'ingénieur routier comme la granulométrie, la teneur en liant et la porosité. Cependant, une identification complète de la structure interne peut être très utile pour la recherche (mise au point de nouveaux matériaux ou de modèles micromécaniques, prise en compte des matériaux recyclés, etc.) ou pour l'expertise (homogénéité du matériau pour cerner un problème de ségrégation, qualité de fabrication, etc.).

Identification des phases d'un matériau bitumineux

Les surfaces obtenues après sciage doivent être propres. Les traces éventuelles laissées par la scie seront supprimées en procédant à un léger polissage de la surface. Avant de passer à l'étape

d'acquisition de l'image, vérifier au préalable le calibrage du système d'imagerie afin de pouvoir effectuer ultérieurement des mesures de certaines caractéristiques de la phase à étudier. L'erreur de mesure est minimale si l'on procède à des acquisitions d'images de haute résolution ($< 10 \mu\text{m}/\text{pixel}$). La définition d'une telle image permet de mieux distinguer les contours des granulats de petites tailles et les faibles épaisseurs de mastic entre deux granulats très proches (cas typique des assemblages denses). De la même manière, il faut s'assurer de la représentativité des plus gros granulats en choisissant une surface d'acquisition suffisamment grande par rapport à la taille des granulats. Ces exigences sont satisfaites si l'on utilise une table XY automatique et un éclairage uniforme. On effectue une série d'acquisitions d'images élémentaires en 256 niveaux de gris avec un codage sur 8 bits. Les caractéristiques de la surface élémentaire dépendent directement des caractéristiques de la caméra CCD. Pour obtenir l'image finale de la coupe considérée, on réalise un assemblage de toutes les images élémentaires.

L'image finale doit être représentative de l'échantillon à analyser. La taille minimale des images est d'environ 50 cm^2 . Les dimensions de l'image finale dépendent de la taille des granulats contenus dans le mélange bitumineux. En règle générale, plus la taille de l'image finale est grande, plus grande sera sa représentativité. Certes, les moyens d'acquisition et de traitement de l'image finale constituent une limitation dans les dimensions de l'image.

On utilise ensuite des opérations de traitement d'images pour optimiser le contraste entre les granulats et la matrice bitumineuse. Ces opérations sont nécessaires si le matériau contient des granulats de couleur sombre avec un niveau de gris compris entre 150 et 50. La deuxième étape est le seuillage de l'image. Ce seuillage permet d'éliminer le bruit de fond pour ne prendre en compte que les pixels appartenant à la phase à identifier. L'image obtenue après traitement est une image binaire où l'on distingue nettement une des phases du mélange.

On obtient les différentes phases du mélange bitumineux (phase granulats, phase mastic et phase porosité) à partir de 3 opérations de seuillage à faire pour localiser chacune des phases (figure 1.25).

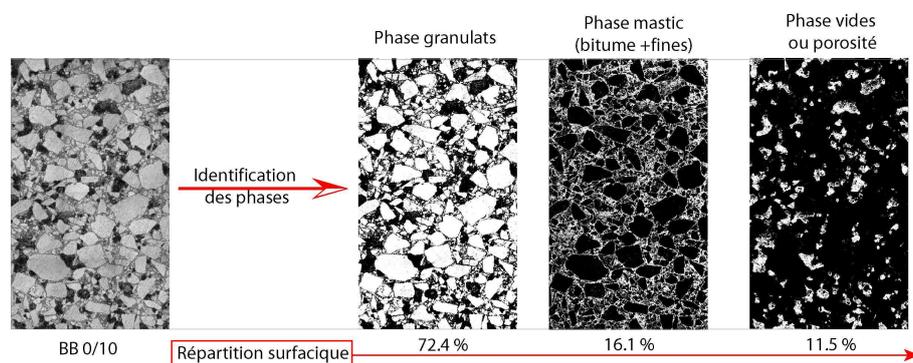


FIGURE 1.25 – Identification des différentes phases d'un enrobé bitumineux par analyse d'image d'une coupe d'échantillon

L'identification des différentes phases permet d'obtenir la répartition surfacique des phases du matériau. Cette répartition surfacique est à relier ensuite avec la composition pondérale des différents constituants ayant servi à élaborer l'échantillon.

Détermination de la granulométrie pondérale par analyse d'image

L'analyse granulométrique est utilisée depuis longtemps dans beaucoup de disciplines scientifiques. Dans le domaine du génie civil, on utilise couramment l'analyse granulométrique en mesure qui consiste en une pesée (*mesure de la masse*) du contenu de chaque tamis. Pour sa

représentation graphique, cette masse est tracée en fonction de la taille du tamis. Ce type d'analyse est aussi appelé granulométrie pondérale. Dans un premier temps, nous avons examiné les meilleures conditions pour mener à bien l'étude de la granulométrie. Nous avons ainsi évalué les effets de la taille de l'image et de la résolution de celle-ci sur la granulométrie. Pour une résolution donnée, la représentativité de toutes les tailles de granulats est directement liée à la taille de l'image finale. Pour assurer une bonne représentativité des informations contenues dans une image, on propose que les dimensions de l'image finale soient au moins 16 fois plus grandes que la taille maximale des plus gros granulats.

La caractérisation de la granulométrie pondérale par analyse d'image s'effectue en trois étapes :

- a) après traitement et analyse de l'image de la coupe considérée, on obtient une distribution des aires des granulats interceptés dans la coupe. Les aires placées sur le bord de l'image sont exclues.
- b) on effectue le passage entre la distribution des aires et la distribution en volume à partir d'une méthode basée sur la stéréométrie (Russ and Dehoff, 2001; Chan, 1989). Un système d'équations dont le nombre dépend de la discrétisation en classes de particules, permet de relier le nombre de sphères de classe i au nombre de disques de la même classe. Cet outil mathématique bien décrit dans (Chan, 1989, cf. pp 147-162) permet ainsi de reconstruire la granulométrie 3D d'un ensemble de sphères à partir de la distribution des aires interceptées dans une coupe donnée. Les granulats utilisés dans le domaine du génie civil sont de forme polyédrique. Cette forme est liée au mode d'élaboration par concassage utilisé dans les carrières. Cependant, on appliquera une représentation des aires de la coupe à partir du diamètre équivalent à un grain réel (Coster and Chermant, 1985). On assimilera notre coupe de granulats à un ensemble de particules sphériques ayant les mêmes surfaces que les granulats réels.
- c) On détermine la masse des granulats pour chaque classe à partir du volume des sphères puis, on calcule la proportion massique de chaque classe. La connaissance de la densité n'est pas nécessaire si les granulats ont la même densité.

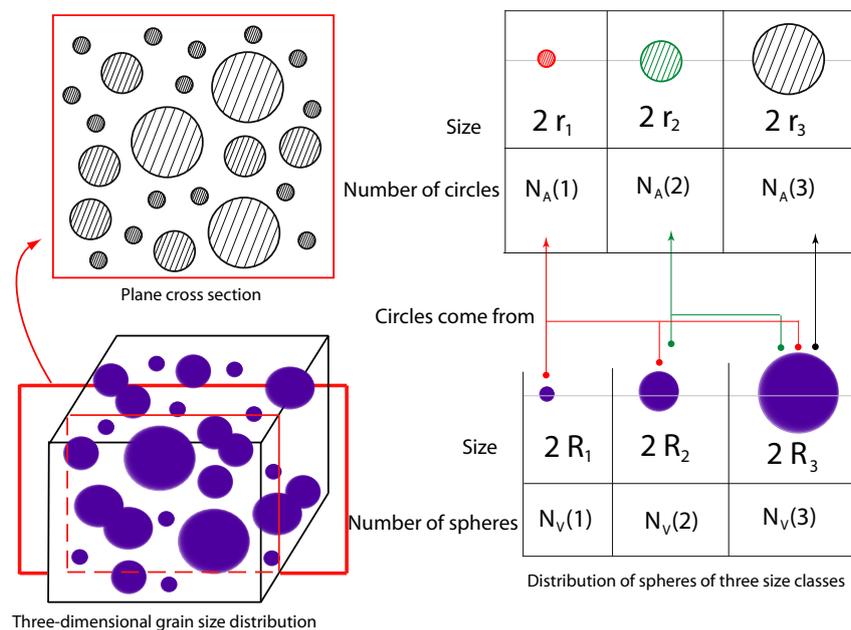


FIGURE 1.26 – Principe de la stéréométrie utilisé pour retrouver la granulométrie pondérale des enrobés bitumineux

Les résolutions et les tailles des images varient peu d'une acquisition à une autre suivant les trois coupes de la figure 1.27. Les résultats obtenus sont globalement satisfaisants à partir d'une certaine résolution qui dépend directement du matériel d'acquisition utilisé. En effet, les résultats montrent qu'une résolution de l'ordre de $35 \mu\text{m}/\text{pixel}$ permet de retrouver la granulométrie pondérale de l'échantillon. Sur la coupe Z, on observe des écarts de l'ordre de 8 à 9% pour les tailles de granulats de 2 mm et 14 mm. Ces valeurs constituent les limites fixées pour la détermination de la granulométrie. La limite inférieure est fixée par le seuil de détection des granulats de petites tailles. En prenant en compte la résolution de l'image, une taille minimale de 2 mm est significative pour la détermination de la granulométrie. Globalement, les différences

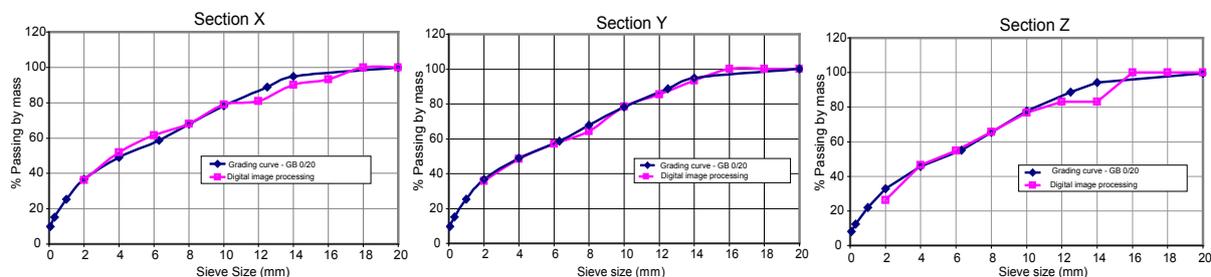


FIGURE 1.27 – Granulométrie pondérale du matériau obtenue par analyse d'image des 3 plans principaux

restent relativement faibles sur les coupes X, Y et Z et les résultats peuvent être amélioré avec une résolution plus fine lors de l'acquisition sur une surface plus grande. Au delà des premiers résultats présentés ici, l'approche est relativement puissante sur un matériau qui contient des granulats de forme complexe et qui présente parfois des fluctuations locales dans la répartition des différentes tailles de granulat.

J'ai voulu démontrer ici qu'il existe une autre approche plus rapide et respectueuse vis à vis de l'environnement. En effet, cette technique par analyse d'image est capable de caractériser rapidement et avec une précision suffisante la granulométrie d'un matériau sans destruction complète de l'échantillon. L'existence d'une alternative aux méthodes traditionnelles comme la dissolution par des solvants chlorés est donc démontrée. Toutefois, on ne peut pas évaluer la granulométrie des granulats de taille inférieure à 1 mm.

Orientation des granulats - anisotropie de structure

Le mode de mise en œuvre par couches des matériaux bitumineux sur une chaussée (répandage du matériau foisonné à l'aide d'un finisseur et compactage par passages successifs du compacteur) confère au matériau une certaine anisotropie avec une orientation privilégiée des granulats. De la même façon, les éprouvettes fabriquées en laboratoire présentent une anisotropie de structure. Des mesures de module en traction-compression réalisées sur des échantillons cylindriques prélevés suivant trois axes de carottage dans des plaques d'enrobé fabriquées en laboratoire, ont montré des variations pouvant atteindre 20 % (Doubbaneh, 1995). Plus récemment, Masad and Button (2000) ont montré sur des échantillons prélevés sur chantier que la rigidité dans l'axe horizontal est 30 % supérieure à la rigidité selon l'axe vertical axisymétrique.

Prenons la même plaque que dans le paragraphe précédent, obtenue à l'aide du compacteur de plaques LPC. On analyse les données issues des images prises suivant les plans principaux de l'éprouvette. Puis, on en déduit une information sur l'orientation moyenne et tridimensionnelle des granulats dans l'éprouvette. L'examen de l'orientation préférentielle des granulats dans la plaque montre que le matériau présente une anisotropie de structure. Les granulats sont bien orientés suivant les plans verticaux (Coupes X et Y) (cf. figure 1.28). Le passage de la charge a

tendance à faire coucher les granulats. Néanmoins, l'orientation reste aléatoire suivant la coupe Z (Hammoum and Horny, 2004).

Détermination de l'orientation des granulats par analyse d'image

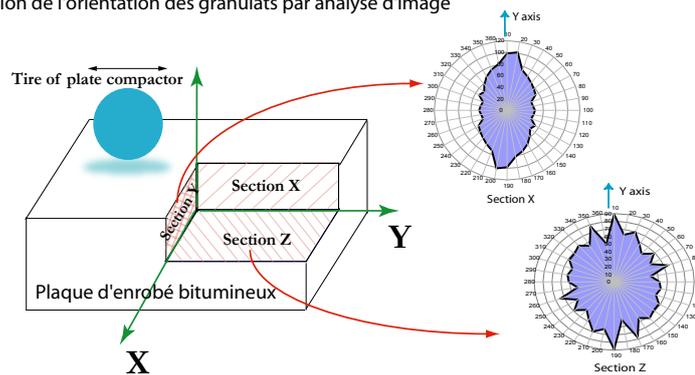


FIGURE 1.28 – Orientation des granulats dans un échantillon d'enrobé obtenu au compacteur de plaques LPC

Lorsqu'on examine les propriétés mécaniques d'un enrobé bitumineux, il est nécessaire de prendre en considération l'anisotropie des matériaux bitumineux pour développer des modèles de comportement plus réalistes en tenant compte des aspects rotation des contraintes principales par exemple et pour mieux interpréter les campagnes de mesures. En se basant sur l'hypothèse d'homogénéité des lois de comportement élastiques, on peut exploiter la matrice de rigidité proposée par Zysset and Curnier (1995) afin de prendre en compte les propriétés microstructurales.

Description de l'arrangement granulaire - Méthode de Voronoï

Le deuxième niveau d'investigation consiste à décrire la répartition locale et globale de ces particules dans l'espace 2D. On peut ainsi analyser le nombre de voisins pour chaque grain ou pour une famille de grains rangée suivant la taille, suivant la forme ou suivant l'orientation. Ces notions sont très utiles pour décrire un assemblage dense de grains.

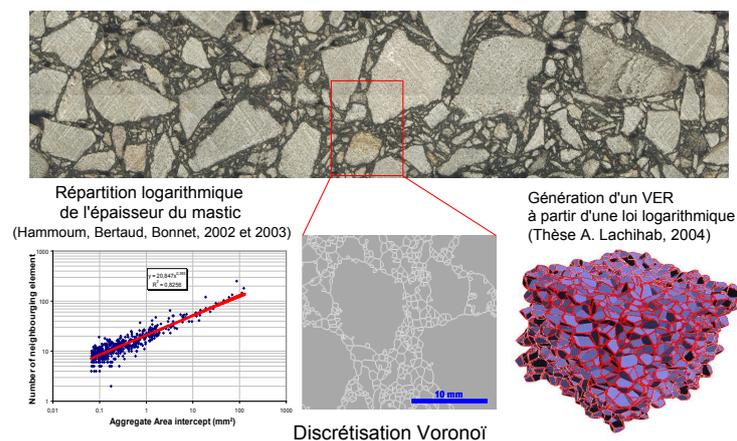


FIGURE 1.29 – Résultat de la discrétisation de Voronoï sur une coupe d'enrobé bitumineux

Pour accéder à ces informations, on utilise une discrétisation du type Dirichlet-Voronoi. On trace les segments de droite pour relier les barycentres des granulats interceptés par la coupe. On forme

ainsi la triangulation de Delaunay. Puis, on définit la médiatrice de chaque segment de droite. L'ensemble de ces médiatrices forme ainsi la discrétisation de Voronoï. Pratiquement, l'image sera décomposée en une sorte de mosaïque de petits pavés qui recouvrent totalement la surface de l'image. Un pavé est une partie de l'image constituée d'une couronne de mastic d'épaisseur variable entourant un granulat. Le mastic entourant le granulat est défini comme la région de Voronoï. La Fraction Volumique Locale d'une inclusion (FVL) est définie comme étant le rapport entre le volume de l'inclusion et celui de sa région de Voronoï.

Avec cette approche, la caractérisation des matériaux hétérogènes très complexes comme les matériaux bitumineux devient aisée pour étudier l'incidence de la répartition du mastic au sein du squelette granulaire et relier ainsi ces caractéristiques morphologiques avec les performances vis à vis de la fatigue ou de la fissuration. Pour plus de détails, on peut se reporter aux travaux de l'université de Southampton (Boselli et al., 1998) ainsi qu'aux travaux de Ghosh et al. (1997). L'étude menée sur les matériaux bitumineux montre que la fraction locale suit une loi linéaire dans le plan semi-logarithmique. Dans une coupe, la fraction surfacique locale d'une inclusion (LAF) est définie comme étant le rapport entre le volume de l'inclusion et celui de sa région de Voronoï (cellule) (Hammoum et al., 2003).

Les études menées sur les différentes coupes permettent de proposer une loi de variation de la fraction volumique en fonction des volumes des granulats de différentes tailles i , du volume moyen $\langle V_g \rangle$ et des paramètres γ et η :

$$FVL^i(l) = \frac{V_g^i}{V_v^i} = \gamma \text{Log} \left(\frac{V_g^i}{\langle V_g \rangle} \right) + \eta \quad (1.1)$$

Les paramètres γ et η décrivent la répartition du mastic autour des granulats ainsi que l'arrangement des granulats les uns par rapport aux autres. Lorsqu'on augmente la teneur en liant pour obtenir un mastic plus riche, on augmente le volume de ce dernier. Dans ces conditions, le paramètre γ diminue et inversement le paramètre η augmente. Les résultats obtenus montrent

Matériau GB 0/20	γ	η	Coefficient de corrélation
Provenance : Compacteur de plaque			
Coupe X	10.8	44.1	0.79
Coupe Y	10.1	39.0	0.83
Coupe Z	10.7	42.4	0.84

TABLE 1.1 – Paramètres de répartition du mastic autour des granulats selon les trois plans principaux de la plaque

que la répartition du mastic est comparable suivant les trois plans principaux de la plaque d'enrobé bitumineux. Par rapport à cet exemple, on montre bien qu'un échantillon d'enrobé bitumineux peut présenter une anisotropie de structure dont l'origine provient de la forme des granulats et de leurs orientations mais le même échantillon peut garder une certaine isotropie dans la répartition du mastic. Les deux caractéristiques semblent indépendantes l'une de l'autre. La thèse de A. Lachihab (Lachihab, 2004) effectuée au LAMI s'est inspirée des résultats obtenus avec l'analyse d'image des enrobés bitumineux (Hammoum et al., 2003; Hammoum and Horny, 2004). En effet, Lachihab (2004) a utilisé cette répartition de la fraction locale pour générer numériquement une microstructure à partir du pavage de Voronoï d'un ensemble de sphères. Au delà des aspects numériques pour étudier la déformabilité des matériaux bitumineux, il apparaît que la représentation de Voronoï soit la plus pertinente pour décrire un tel matériau avec une structure interne aussi complexe.

Il est possible également de déterminer d'autres caractéristiques pour décrire la structure interne d'un mélange bitumineux comme le nombre de voisins ou encore le nombre de contacts.

D'autres développements sont possibles pour mieux cerner le comportement des matériaux incorporant les matériaux recyclés ou encore pour développer des modèles micromécaniques plus réalistes.

Les travaux décrits ici visent à montrer les quelques possibilités de l'analyse d'image pour la caractérisation des assemblages granulaires denses comme les matériaux routiers. Le caractère innovant de ce travail réside dans l'application des méthodes d'analyse d'image sur les matériaux routiers avec notamment la possibilité de décrire la répartition dans l'espace des constituants à partir de la discrétisation de Dirichlet-Voronoi.

Les applications qu'elles permettent de traiter, leur souplesse, les rendent attractives. C'est également un champ de recherche intéressant pour la formulation de nouveaux matériaux aux propriétés optimisées, pour évaluer l'efficacité des différents procédés d'enrobage sur la structure interne ou encore pour la modélisation numérique des matériaux car bon nombre de problèmes pratiques comme le recyclage des matériaux ou encore le développement de nouveaux matériaux sont posés.

Afin de répondre aux problèmes de valorisation des matériaux dont les caractéristiques mécaniques et physico-chimiques sont moins bonnes, il est prévu d'associer les études classiques et l'approche nouvelle décrite ici pour tenter d'identifier la structure interne et de cerner les couplages physico-chimiques à l'échelle d'un film de liant. Ainsi, nous avons démarré une nouvelle opération de recherche *AGREGA-(11L091)* matériaux Granulaires Et Granulats Alternatifs avec la division DDGC pour traiter ces questions.

1.4.4 Application d'une technique de changement d'échelle pour déterminer les propriétés mécaniques du mélange

Le terme même d'enrobé bitumineux évoque la description morphologique de ce matériau formé de particules solides (les granulats et les fines) enrobées d'une matrice (le bitume). L'enrobé bitumineux constitue de ce point de vue un matériau composite particulier auquel on peut être tenté d'appliquer différentes méthodes de passage micro-macro pour déterminer ses propriétés mécaniques et en particulier son module. A l'origine de ce type d'approche, [Hashin \(1968\)](#) étudie un composite à deux phases, constitué de particules sphériques dans une matrice continue. De telles sphères, de taille variable, peuvent remplir tout l'espace, assurant la continuité de la matrice et le caractère inclusionnaire de la phase de renforcement. La distribution spatiale des sphères composites est supposée isotrope.

Différents auteurs ont montré par la suite, l'intérêt d'identifier, dans un matériau hétérogène, des "motifs représentatifs" de taille finie permettant de mieux décrire certaines caractéristiques morphologiques de la distribution spatiale des phases constitutives, difficiles à traduire simplement par l'approche classique, telle qu'une morphologie de type imbriquée ou un modèle à trois phases selon lequel l'une des phases a une morphologie inclusionnaire, l'autre jouant le rôle de matrice continue (morphologie de type inclusion-couronne). Les modèles autocohérents, étendus aux matériaux viscoélastiques selon le principe de correspondance ([Mandel, 1995](#)) donnent les valeurs théoriques du module complexe et de l'angle de phase, déterminées au moyen du modèle de [Christensen \(1979\)](#) en bon accord avec les valeurs expérimentales pour des taux de particules inférieurs à 20%. Cependant, [Alberola et al. \(1994\)](#) ont montré que pour des taux supérieurs, les résultats s'écartent notablement des valeurs expérimentales.

Le béton bitumineux semble a priori proche du modèle de type inclusion-couronne. J'ai supposé que la matrice de bitume est connexe (chaque granulat est enrobé par un film de bitume), ce qui signifie que la phase continue est le bitume ou le mastic si l'on considère que le constituant élémentaire est le mastic à l'échelle micrométrique. De plus, en première approximation, on assimile les grains à des sphères. C'est ce type de description que j'ai appliqué aux enrobés bitumineux dans ce travail.

Modèle à trois phases Dans un premier temps, nous avons utilisé le modèle à trois phases ou *inclusion-couronne* développé par [Hervé and Zaoui \(1990\)](#). Ce modèle apparaît comme un schéma autocohérent pour lequel le problème de localisation concerne une inclusion sphérique élastique isotrope de rayon d . Cette sphère est surmontée d'une couronne de rayon extérieur $d + e$. La sphère composite est située dans un milieu homogène équivalent dont le module de compressibilité est k^{eff} et le module de cisaillement μ^{eff} .

La prédiction des propriétés élastiques ou viscoélastiques de ces matériaux repose sur la détermination des champs de contraintes et de déformations dans un milieu infini. Pour un niveau de déformation fixé, la donnée de deux problèmes élémentaires (compression hydrostatique $P1$ et cisaillement simple $P2$) permet de déterminer les modules effectifs k^{eff} et μ^{eff} en considérant que la déformation moyenne du système inclusion-couronne est équivalente à la déformation dans le milieu équivalent. On retrouve d'ailleurs la validité de cette équivalence dans les travaux de [Hervé and Zaoui \(1990\)](#) en faisant le bilan énergétique d'un problème élastique linéaire. Le module de compressibilité k^{eff} de l'enrobé est alors donné par la relation (1.2) :

$$k^{eff} = k_m + \frac{c(k_i - k_m)}{1 + (1 - c)(k_i - k_m)/(k_m + (4/3)\mu_m)} \quad (1.2)$$

avec

- k^{eff} : module de compressibilité effectif du mélange bitumineux
- k_m : module de compressibilité de la matrice
- k_i : module de compressibilité de l'inclusion
- c : fraction volumique de renfort (rapport volumique entre l'inclusion et la matrice)

Le module de cisaillement complexe est donné par la solution de l'équation quadratique suivante :

$$A \left(\frac{\mu^{eff}}{\mu_m} \right)^2 + 2B \left(\frac{\mu^{eff}}{\mu_m} \right) + C = 0 \quad (1.3)$$

avec

- μ^{eff} : module de cisaillement effectif du mélange bitumineux
- μ_m : module de compressibilité de la matrice

Les valeurs des constantes complexes A , B et C sont déterminées à partir des expressions proposées par [Hervé and Zaoui \(1990\)](#). Ces constantes dépendent de la fraction volumique (inclusion/matrice) et des caractéristiques mécaniques des constituants.

J'ai appliqué le modèle à trois phases à un mélange bitumineux de granulométrie continue (BBSG 0/14 et EME 0/14). Les résultats montrent que la prédiction du module de l'enrobé dépend fortement du rapport volumique entre les granulats et le volume total. A basse température, les valeurs de module calculées avec le modèle à trois phases sont de l'ordre de grandeur des valeurs mesurées. L'écart entre le modèle et les mesures expérimentales augmente sensiblement avec la température. Les mesures expérimentales réalisées sur les enrobés bitumineux montrent que l'angle de phase tend à diminuer à partir d'une température de l'ordre de $40^\circ C$ pour un EME 0/14. Cette diminution semble être liée aux interactions avec le squelette granulaire. Néanmoins, le modèle à trois phases ne traduit pas cette diminution de l'angle de phase.

Au delà des interactions intergranulaires que le modèle ne semble pas reproduire, le modèle à trois phases présente quelques limitations. Pour améliorer le modèle, on doit tenir compte des caractéristiques suivantes :

1. Une quatrième phase avec la porosité. La porosité des enrobés bitumineux peut varier de quelques % jusqu'à 25 à 30 % avec les enrobés drainants.

2. La répartition complexe du mélange bitumineux avec une imbrication d'une phase par rapport à une autre phase.
3. La répartition du film de bitume qui varie avec la taille des granulats. Expérimentalement, Duriez (1950) a trouvé que la variation de l'épaisseur de la pellicule d'enrobage de liant, est pratiquement linéaire en coordonnées logarithmiques avec la taille des granulats.

J'ai proposé dans la thèse de (Pinzon, 2004) et dans le stage de (Alam, 2007) une modification dans la manière d'assembler les phases du matériau et les volumes élémentaires représentatifs. Les étapes d'imbrication des phases découle des observations visuelles des mélanges bitumineux. Cette méthode a permis d'améliorer la précision du modèle.

En effet, dans une coupe d'un échantillon bitumineux, on distingue en premier lieu majoritairement le squelette granulaire qui occupe entre 70% et 72 % en moyenne la surface de l'échantillon. La phase granulaire est contenue par la mastic formé par le mélange du bitume avec les fines minérales. Le mastic occupe entre 16% et 24% en moyenne. Le mastic enrobe chaque granulat du squelette granulaire avec une épaisseur variable dépendant de la teneur en liant et de la taille du granulat. Enfin, le reste de la surface interceptée dans la coupe est constituée par la porosité. Cette phase des vides est répartie dans le mélange bitumineux avec des dimensions variables allant d'une échelle millimétrique à une échelle micrométrique.

A partir de cette description des mélanges bitumineux, on propose une modification dans la représentation du modèle auto-cohérent. On définit alors le mélange bitumineux comme un composite constitué de 4 phases avec les fines, les granulats, le liant bitumineux et les vides.

Les fines présentent des caractéristiques mécaniques assez différentes des granulats. Les fines contribuent à la cohésion de l'ensemble alors que les granulats apportent la rigidité structurelle nécessaire au mélange. Les exigences en terme de caractéristiques mécaniques n'est pas identique. Le choix de distinguer le phase fines de la phase granulat est justifié ici.

A l'aide du modèle à 3 phases, le calcul du module complexe de l'enrobé bitumineux se déroule en trois étapes correspondant à l'imbrication des phases les uns par rapport aux autres (1.30).

A l'étape 1, on considère le bitume entourant les fines comme inclusion et le bitume est considéré comme la matrice. On résout le problème pour déterminer le module effectif du mastic.

A l'étape 2, on considère le mastic entourant le granulat comme inclusion et le mastic est considéré comme la matrice. A cette étape, on résout le problème pour déterminer le module effectif du mélange bitumineux sans la porosité.

A l'étape 3, on considère le mélange bitumineux entourant une porosité comme une inclusion de module nulle et le mélange bitumineux est considéré comme la matrice.

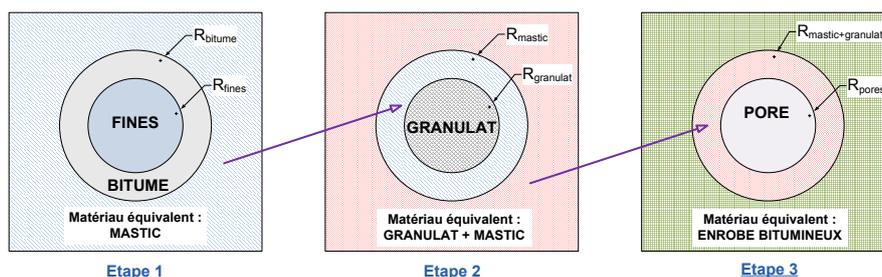


FIGURE 1.30 – Modèle auto-cohérent avec imbrication des phases l'une par rapport l'autre

Pour prédire les propriétés mécaniques du mélange bitumineux, on introduit les informations sur les caractéristiques géométriques et mécaniques des quatres phases définies plus haut :

- Les caractéristiques mécaniques des constituants solides :
- Module élastique et coefficient de Poisson des granulats.

- Module élastique et coefficient de Poisson des fines.
- Module complexe du bitume pour différentes températures et pour différents temps de charge.
- Coefficient de Poisson pour différentes températures et pour différents temps de charge.

Les caractéristiques liées à la formulation du matériau :

- Masse volumique apparente
- Compacité du matériau / Porosité
- Teneur en liant (exprimée en ppc) par rapport à la masse de granulats ou du mélange
- Masse volumique réelle des granulats
- Masse volumique réelle des fines
- Courbe granulométrique du squelette granulaire
- Densité du bitume

Caractéristiques des matériaux / Formule	F-10	F-20	F-30	F-40
Désignation	0/6	0/6	0/6	0/6
Grade et nature du Bitume	pur 50/70	pur 50/70	pur 50/70	pur 50/70
Teneur en liant (ppc)	6.88	5.20	6.88	5.20
Compactage	moyen	moyen	faible	faible
Porosité (% des vides)	3.6	7.8	4.91	10.4
Masse volumique apparente (g/cm^3)	2.47	2.42	2.43	2.35

TABLE 1.2 – Les caractéristiques des formules d’enrobé bitumineux utilisées

Le modèle présenté ici a été utilisé pour prédire le module complexe des mélanges F-10, F-20, F-30 et F-40 dans la gamme de température utilisée pour les mesures expérimentales. Les résultats pour la formule F-10 sont illustrés sur la figure 1.31. Le modèle utilisé avec imbrication

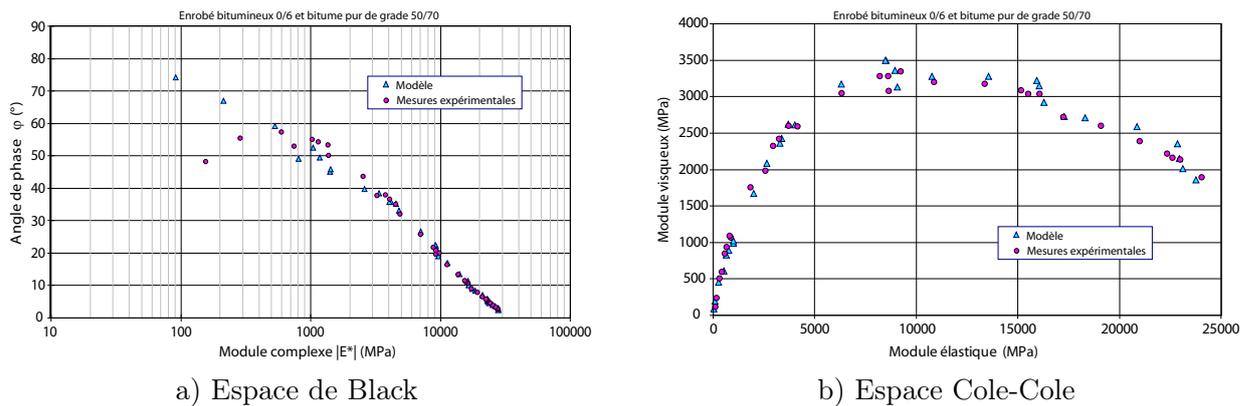


FIGURE 1.31 – Comparaison entre les valeurs expérimentales et le modèle auto-cohérent pour la formule F-10

permet de prédire le module complexe du mélange avec une bonne précision. Cependant, on relève une divergence des valeurs de l’angle de phase vers les températures élevées. Il existe deux raisons pour expliquer cette divergence :

- La première liée au modèle tient à la définition du champ moyen dans un volume élémentaire représentatif. Vers les températures plus élevées, le module du bitume chute à raison de 10 % par degré Celsius. Comme le module du granulat reste inchangé, on se retrouve avec un composite dont le contraste de modules devient important pour atteindre un rapport de module entre le bitume et le granulat de l’ordre de 20 000.
- La deuxième est liée au comportement du matériau lui-même. Vers les températures élevées ($\geq 30^\circ C$), les interactions intergranulaires limitent l’angle de phase et tendent à faire

diminuer ce paramètre avec l'accroissement de la température. Il semble que le modèle présenté ici ne prend pas en compte suffisamment les interactions intergranulaires. Maintenant, on suppose qu'on fournit la même énergie de compactage pour les formules F10 et F20. On observe qu'une augmentation de la teneur en liant bitumineux permet de réduire la porosité du mélange. Il y a substitution d'une partie de la porosité de la formule F20 par du liant bitumineux. Expérimentalement, on constate une augmentation moyenne de 14 % sur les valeurs du module complexe sur une gamme de températures comprise entre -10°C et 20°C .

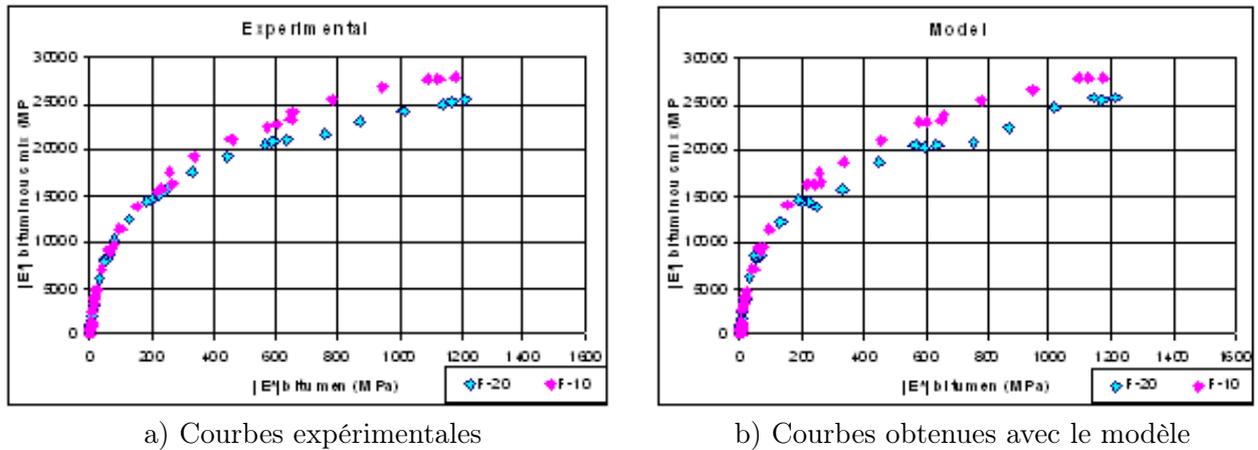


FIGURE 1.32 – Comparaison entre le modèle et les valeurs expérimentales pour les formules F10 et F20

Les méthodes autocohérentes permettent de calculer le module et l'angle de phase d'un enrobé pour une gamme donnée de température et de fréquence, à partir des caractéristiques des constituants, moyennant une description morphologique locale adaptée aux enrobés bitumineux. Ceci constitue une avancée par rapport aux méthodes empiriques classiques. La démarche adoptée dans cette étude par rapport aux travaux antérieurs ne consiste pas seulement à appliquer un modèle micromécanique existant mais nous proposons d'aller plus loin dans la description morphologique de l'enrobé en prenant en compte la variation locale du taux de renfort. Cependant, la prise en compte des interactions intergranulaires dans le modèle micromécanique paraît nécessaire pour pouvoir décrire le comportement avec une meilleure précision vers les températures plus élevées.

1.4.5 Les déformations locales dans les enrobés bitumineux : facteur de localisation

Les essais mécaniques sur les enrobés bitumineux sont complexes à plus d'un titre. Outre les effets dus à la présence de la viscosité, même à basse température, il est généralement délicat de chiffrer les déformations locales effectivement mesurées dans la phase mastic voir dans la phase bitume pour différentes raisons :

- la zone de mesure restreinte de la phase mastic et la trop faible rigidité interdit le collage de tout type de jauges,
- la localisation de la déformation génère une hétérogénéité du champ mesuré et ne permet pas de revenir aux caractéristiques du matériau,
- les grandes déformations interdisent l'utilisation d'extensomètres classiques.

Toutes ces raisons imposent de mesurer la déformation locale par des moyens optiques ne perturbant pas la mesure. Il existe plusieurs équipes en France et dans le monde qui ont développé cette technique de mesure de champ. Dans mes travaux, j'ai collaboré et utilisé un outil de mesure de champ de déplacement par analyse d'images développé par Hild du Laboratoire de Mécanique et Technologique de Cachan pour cerner le champ de déformation sous une force tangentielle. Ces travaux entrent dans le cadre de la thèse de Hamlat (Hamlat, 2007) pour répondre aux interrogations posées sur le problème d'arrachement. J'ai également collaboré avec Michel Bornert du Laboratoire de Mécanique des Solides à l'époque, avec le stage de master de Martelin (2003). Ce stage vise à détecter le mode de localisation de la déformation et les niveaux de chargement conduisant à des irréversibilités locales de la réponse mécanique à l'origine de l'endommagement et de la ruine du matériau sous sollicitation réelle.

La technique de corrélation d'images permet de déterminer le champ de déplacement sur toute une zone plane en comparant l'image de la surface déformée avec l'image non déformée. Sur la surface photographiée, on dépose au préalable un mouchetis aléatoire. C'est le déplacement des points de ce mouchetis qui permet de construire les cartes d'iso-déplacement.

A titre de rappel, j'ai présenté précédemment la microstructure des enrobés bitumineux avec les différentes phases qu'on peut identifier et caractériser géométriquement par un moyen optique. La phase mastic représente en moyenne 16% par rapport à la surface totale d'un échantillon (exemple avec la figure 1.25) et le bitume représente une part encore plus petite avec 10% en moyenne. Le rapport de rigidité entre la phase mastic et les granulats est particulièrement important. Le contraste de raideur implique des hétérogénéités locales du champ de déformation et permet d'expliquer alors que les déformations locales dans le bitume sont nettement plus importantes que les déformations macroscopiques appliquées à l'éprouvette d'enrobé bitumineux. En effet, les études menées à partir de la technique de corrélation d'image (Kose et al., 2000; Masad et al., 2001) montrent que la répartition du champ de déformation est très localisée dans la phase mastic. Cette répartition entraîne la formation de bandes de localisation des déformations dans une zone très proche de l'interface mastic/granat. Pour caractériser d'une certaine manière cette bande de localisation, on utilise le terme de facteur de localisation comme le rapport entre la déformation locale dans le mastic sur la déformation macroscopique de l'éprouvette d'enrobé. Les mesures effectuées par Kose et al. (2000) montrent que le facteur de localisation est de l'ordre de 10 sur un mélange bitumineux de granulométrie 0/20. Le domaine de corrélation utilisé avec 20x20 pixels me semble suffisant pour décrire finement la répartition de la déformation locale dans le mastic. Cependant, la résolution de l'image me paraît insuffisante pour accompagner le calcul de corrélation avec une bonne précision.

Il existe également une approche numérique pour décrire la répartition de la déformation locale. A partir d'une discrétisation par éléments finis de la microstructure du matériau, le calcul

numérique effectué par Bahia et al. (1999) permet d'obtenir le champ de déformation local. Bahia et al. (1999) indique que la répartition du champ de déformation local dépend de l'épaisseur du mastic autour des granulats. Autrement dit, la variation du facteur de localisation dépend de cette épaisseur du mastic. Dans une microstructure composée de 22% de mastic et 78% de granulats, le facteur de localisation varie entre 0.3 et 32 entre le mastic et l'enrobé bitumineux (Bahia et al., 1999). D'après ces auteurs, le facteur de localisation est compris entre 10 et 100 dans le bitume.

J'ai voulu analyser expérimentalement la répartition du champ de déformation par analyse d'image lorsqu'on sollicite le matériau d'une manière homogène pour ne faire intervenir que les effets micro-structurels du matériau à l'aide de deux types d'essais : compression simple et traction simple dans le cadre du stage de master de Martelin (2003). Un travail préliminaire sur le choix du domaine de corrélation est nécessaire. Ce domaine doit être inférieur ou égal à la taille des éléments ou le plus proche possible si ces derniers sont trop petits. En effet, plus le domaine de corrélation est petit, plus il faudra effectuer des étapes intermédiaires de corrélation car ce sera alors beaucoup plus sensible aux variations de contraste ou à l'absence de contraste local dans certaines zones. Ce travail préliminaire a permis de fixer un domaine de corrélation de 30x30 pixels et une résolution de 10 μ m /pixel pour l'acquisition des images (Martelin, 2003). Prenons l'exemple de l'essai de traction simple et appliquons cette technique de corrélation d'image. Le matériau retenu pour le stage de Martelin (2003) est un sable-enrobé composé de sable de Cusset de granulométrie 0/2 avec des fines de la Noubleau (microdiorite). La taille des granulats est suffisamment petite en regard des dimensions de la zone de mesure (5.7mm x 7.6mm). La vitesse de déplacement imposée est de 7 μ m/s et l'essai est réalisé à température ambiante (24°C).

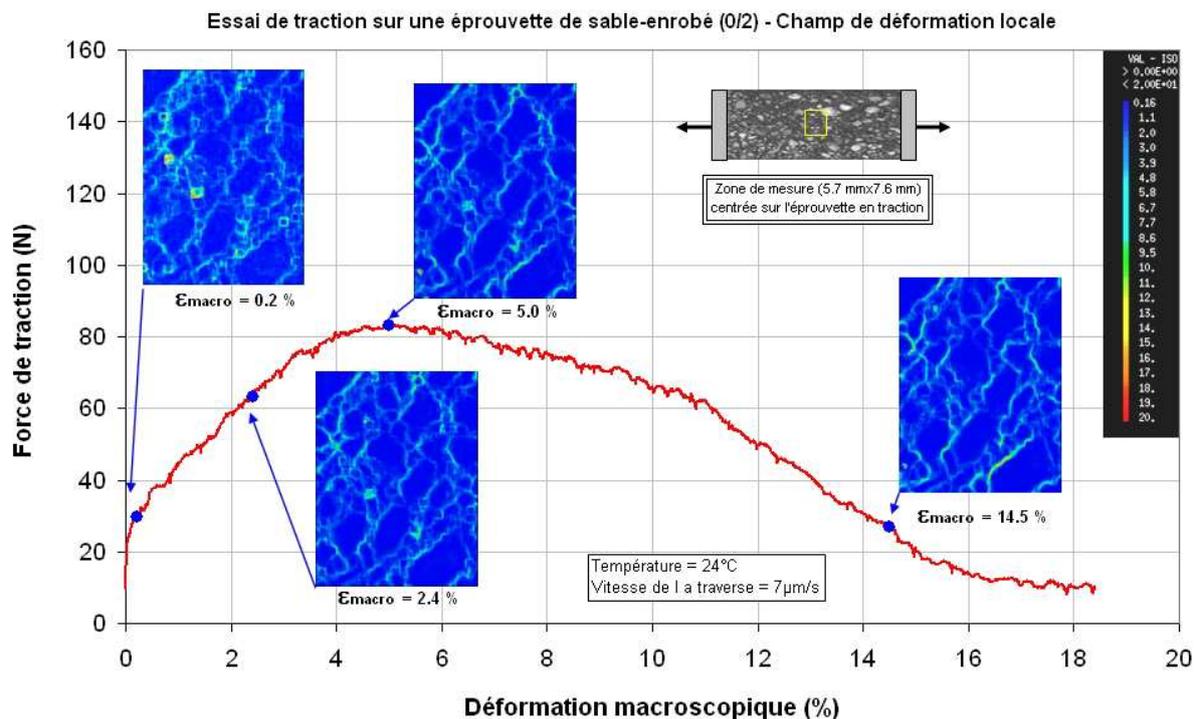


FIGURE 1.33 – Suivi de la déformation locale sur un échantillon de sable-enrobé en traction simple

Il semble, au vu des résultats des essais de traction (figure 1.33), que la localisation en traction se ferait plutôt sous forme de bandes perpendiculaires à l'axe de traction. Dès la mise en charge de l'éprouvette en traction, la déformation est immédiatement répartie sur toute la phase mastic d'une manière plus ou moins uniforme, comme le montre le champ de déformation de la figure 1.33, à un niveau de déformation macroscopique de 0.2%. On distingue nettement la phase mastic et le contour des granulats. A partir du maximum de la force de traction sur la courbe reliant la force et la déformation macroscopique, on remarque que les bandes de localisation se développent à certains endroits du mastic pour arriver à une discontinuité des contraintes et des déformations. Les fissures macroscopiques apparaissent précisément là (figure 1.33).

L'échelle de variation du facteur de localisation est rigoureusement identique tout au long de l'essai de traction. On s'aperçoit que le facteur de localisation dans la zone d'apparition de la fissure macroscopique augmente progressivement de 1 à 10 avant d'atteindre le pic de force puis augmente rapidement pour arriver à un facteur de localisation maximum de 20. La valeur maximale du facteur de localisation semble être liée à la répartition géométrique du mastic et aux caractéristiques mécaniques du liant utilisé.

Conclusions L'objectif de cette étude est de pouvoir remonter aux conditions de sollicitation de la phase mastic concernée par l'apparition d'une fissure macroscopique. Les éléments qualitatifs et quantitatifs fournis dans ce travail montrent que le facteur de localisation dans les enrobés bitumineux est un bon indicateur des performances du liant en lien avec la répartition de ce dernier au sein du squelette granulaire. Intuitivement, on peut penser que le facteur de localisation augmente très vite avec une phase de mastic très confinée (cas des matériaux avec une teneur en liant relativement faible).

J'ai voulu ici focaliser les efforts sur l'approche expérimentale, déterminer les limites de la méthode utilisée pour cerner le domaine de linéarité des mastics et des enrobés bitumineux. On se rend compte qu'il reste beaucoup de marge de progrès, sans oublier la question de l'irréversibilité locale car elle permet d'expliquer précisément la courbe effort-déformation et de remonter au comportement macroscopique du mélange bitumineux.

La présence de défauts (pore, ségrégation, mauvais enrobage, etc...) peut influencer la répartition du champ de déformation local. Cependant, l'étude des défauts qui n'a pas été abordée dans mes travaux constitue une voie de progrès pour le futur.

Le travail développé ici mérite plus de développements avec des applications sur différents types d'essais (module, fatigue, relaxation/fluage, compression/traction, fissuration) pour mieux comprendre le fonctionnement mécanique des enrobés et le rôle du film de bitume/mastic dans le comportement d'un mélange bitumineux.

1.5 Comportement d'un film de liant au pseudo-contact intergranulaire

1.5.1 Introduction

L'examen des carottes d'enrobés bitumineux extraites de chaussées montre que les fissures s'initient principalement dans la partie de l'enrobé la plus fortement sollicitée : le film de mastic contenu entre les granulats ou plus directement le film de bitume présent au sein du mélange bitumineux. Certaines observations sur site ont permis de noter également que les fissures se refermaient entre deux passages de poids lourds. Le bitume a donc la faculté de recoller les lèvres de la fissure contribuant ainsi à augmenter la durée de vie d'un enrobé.

Les observations qui découlent des essais d'arrachement en laboratoire montrent que les granulats arrachés sont recouverts de bitume. Pour une même composition granulaire, la résistance aux arrachements dépend des propriétés du liant bitumineux (?Hamlat2007b).

On recense dans la littérature d'autres exemples de fissuration thermique ou thermo-mécanique qui renforcent l'idée que le bitume contribue pleinement aux performances des enrobés bitumineux. Le problème de durabilité d'une structure de chaussée vis à vis des pathologies décrites ici semble donc être lié à ce qui se passe à l'échelle d'un granulat et en particulier au comportement d'un film de bitume.

Comment aborder le volet sur le comportement d'un film de bitume ?

Ce dernier volet sur le comportement d'un film de liant constitue la plus petite échelle d'un problème de mécanique des matériaux bitumineux. Pour pouvoir aborder ce type de problème, nous devons disposer :

- des observations et des résultats obtenus dans le volet 2 sur la structure interne des matériaux bitumineux.
- d'un modèle physique permettant l'étude en laboratoire d'un film de bitume dans des conditions bien contrôlées.

L'étude sur la répartition du mastic et du bitume au sein du squelette granulaire a orienté nos développements expérimentaux et numériques autour d'une jonction de bitume ou de mastic entre deux granulats. Cette jonction est définie ici comme un pseudo-contact intergranulaire. Dès lors, la performance des enrobés bitumineux vis à vis de la fissuration dépendra des caractéristiques mécaniques de la jonction granulat-granat. Lors d'un chargement, la ruine de cette jonction peut se produire soit par rupture cohésive dans le mastic ou le bitume soit à l'interface liant-granat si les conditions d'adhésivité ne sont suffisantes. Il se trouve que cette jonction s'autorépare localement lors d'une phase de repos. Cette caractéristique bien connue avec les liants bitumineux sera également prise en compte dans les recherches menées au LCPC sur le comportement d'un film mince.

Afin de mieux appréhender la contribution du bitume dans l'endommagement des enrobés, nous présentons les principaux développements théoriques, expérimentaux et numériques effectués au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées pour étudier les conditions d'initiation et de propagation d'une fissure.

Je présente dans ce mémoire l'approche utilisée pour reproduire physiquement cette jonction intergranulaire en laboratoire, les développements expérimentaux qui découlent de l'étude de la rupture cohésive au sein de cette jonction et les méthodes non-destructives utilisées pour identifier la rupture et suivre la cinétique d'autoréparation. Les développements expérimentaux ont pu être menés dans le cadre de la thèse de [Maillard \(2006\)](#) (la thèse a été soutenue le 24 juin 2006) .

Concernant les développements numériques, je présente les travaux de thèse de [Nguyen \(2009\)](#) (la thèse a été soutenue le 05 décembre 2008) pour évaluer les critères locaux et énergétiques

d'une fissure dans un film de bitume lors d'un cycle de chargement, dans le cadre de la mécanique linéaire de la rupture, avec une extension aux matériaux viscoélastiques.

1.5.2 Les développements expérimentaux

Pour comprendre les phases d'initiation, de propagation et d'arrêt d'une fissure dans un film de bitume, un essai de rupture spécifique a été mis au point au laboratoire.

En effet, [Stéfani \(1988\)](#) propose un modèle physique afin de reproduire au mieux l'état mécanique du bitume dans un enrobé bitumineux : une quantité de bitume est placée entre deux protubérances convexes en acier, formées chacune d'un tronc de cône et terminées par une demi-sphère de 6 mm de rayon qui représente le granulat (figure 1.34). Après refoidissement, le bitume forme une jonction bitumineuse qui relie les deux protubérances convexes. Cet échantillon est alors soumis à une traction uniaxiale répétée, selon une loi de déplacement imposée, de façon à simuler ce qui se passe entre deux granulats au sein d'un mélange bitumineux. Le porte échantillon a été conçu de telle sorte que lorsqu'aucun chargement n'est appliqué, l'épaisseur de bitume au centre de l'échantillon peut être fixée à une valeur comprise entre 0,1 et 0,3 mm à une température de 0°C. Cette épaisseur est de l'ordre de grandeur de celle d'un film de bitume entourant les granulats dans les enrobés bitumineux, comme cela a été montré par [Duriez \(1950\)](#) et plus récemment par [Kose et al. \(2000\)](#).

Ce modèle physique d'un film de liant au pseudo contact intergranulaire permet l'étude de l'initiation d'une fissure interne au film de liant sous un effort de traction monotone dans les conditions dans lesquelles se trouve le bitume au sein du matériau bitumineux. Lorsque le film de liant est soumis à des tractions répétées, l'évolution de la rigidité de l'éprouvette traduit la fissuration interne du matériau.

Une telle géométrie assure, dans une éprouvette non fissurée, une concentration de 90% des contraintes dans un cylindre de rayon 3 mm et d'axe confondu avec celui des protubérances ([Hammoum et al., 2002](#)). Cette géométrie favorise ainsi l'apparition de la fissure au centre de l'éprouvette. Ce nouvel essai est appelé *Essai de Rupture Locale Répétée sur Bitume*.

Un premier dispositif a été conçu et la faisabilité d'un tel essai a été confirmée avec différents matériaux, dans plusieurs configurations [Roth \(1997\)](#); [Brachet \(1999\)](#); [Jurine \(2000\)](#). A partir de ces résultats et afin d'optimiser les conditions d'essai, des modifications ont été apportées au dispositif expérimental ([Chenevez, 2001](#)).

L'essai de rupture locale répétée sur bitume a été utilisé dans le cadre de la thèse de [Maillard \(2006\)](#). Par la suite, je décris le déroulement d'un essai de rupture locale, l'exploitation des résultats des essais pour cerner le comportement viscoélastique du matériau et expliciter la phase de propagation de la fissure. Puis, j'aborde la méthodologie suivie pour mettre en évidence l'autoréparation du matériau après une phase de repos.

A-Déroulement d'un essai

La méthode de préparation de l'éprouvette et la définition des différentes phases de l'essai avec les paramètres de pilotage ont été optimisées durant les travaux de thèse de [Maillard \(2006\)](#).

Lors des phases de sollicitation, nous imposons à l'échantillon une loi de déplacement permettant d'obtenir une vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\dot{l}}{l}$ constante au cours de l'essai.

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\dot{l}}{l} = \frac{d}{dt} \ln \left(\frac{l(t)}{l_i} \right) = \text{constante} \quad (1.4)$$

D'où :

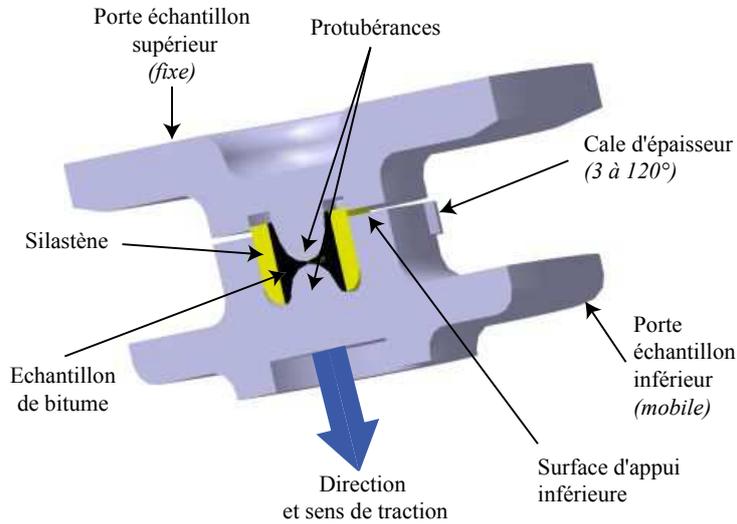


FIGURE 1.34 – Dispositif utilisé pour l'étude du comportement du liant en film mince

$$l(t) = \alpha e^{\beta t} \quad (1.5)$$

avec $l(0) = l_i$ et $l(t_f) = l_f$.

La loi de déplacement retenue est alors donnée par l'équation 1.6.

$$\frac{l(t)}{l_i} = \left(\frac{l_f}{l_i} \right)^{\frac{t}{t_f}} \quad (1.6)$$

où :

- $l(t)$ est la distance entre les protubérances dans l'axe de traction à l'instant t ;
- l_i représente l'épaisseur initiale de bitume ;
- l_f est la distance entre les protubérances à la fin de la phase de traction ;
- t_f est la durée de la phase de traction.

Avant le démarrage de l'essai proprement dit, l'échantillon est mis en compression à -5 daN .

Au début de la phase de traction, pour les valeurs de force comprises entre -5 et 0 daN , quelles que soient les conditions d'essai, l'évolution de la force est linéaire en fonction du déplacement. Ceci correspond à une "décompression" progressive des cales d'épaisseur. La sollicitation de l'échantillon de bitume ne commence qu'à partir des valeurs de force positives.

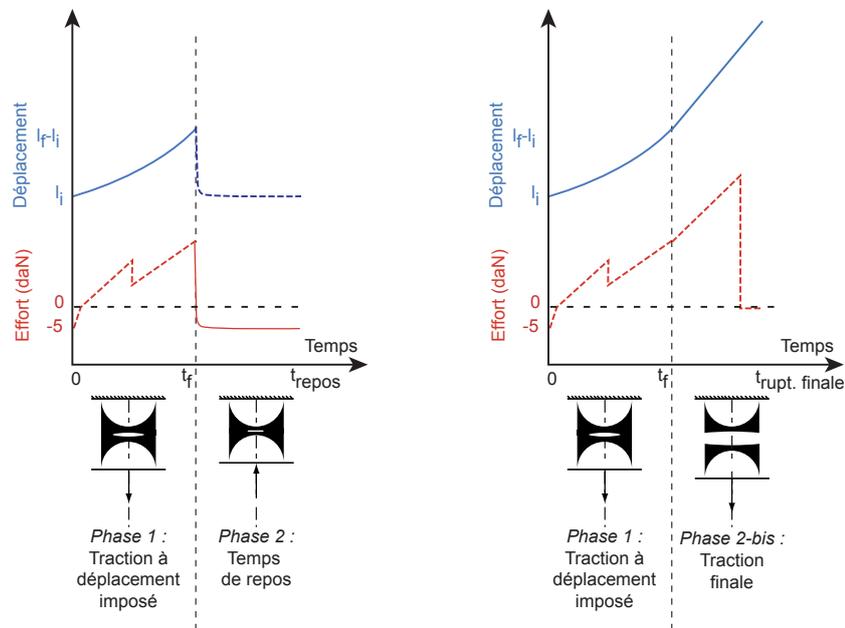
A l'issue de la phase de traction et afin de solliciter plusieurs fois le même échantillon, le dispositif est ramené dans sa configuration initiale, c'est à dire que les cales reviennent en légère compression (-5 daN) sur le porte-échantillon supérieur.

Cette phase, de durée variable, est appelée *temps de repos* et est censée permettre le recollement des lèvres de la fissure qui se serait créée pendant la phase de traction.

A la fin de l'essai, l'échantillon est rompu au cours d'une phase de traction à une vitesse de déplacement élevée pour permettre l'analyse des surfaces de rupture.

Au cours d'un essai de Rupture Locale Répétée sur bitume, les séquences de traction à une vitesse de déplacement imposée et les phases de repos sont enchaînées pendant les $n - 1$ premiers cycles (figure 1.35a).

Lors du dernier cycle ou lors d'un chargement monotone (figure 1.35b), la séquence de traction à une vitesse de déplacement imposée est directement enchaînée avec la traction finale.



a) Phases du cycle 1 à $n - 1$ b) Phases du cycle n ou du cycle unique

FIGURE 1.35 – Les différentes phases de chargement pour un essai à 1 cycle unique ou à plusieurs cycles n

B- Comportement viscoélastique de la jonction bitumineuse

Le bitume est un matériau viscoélastique c'est à dire que son comportement mécanique varie avec les conditions de sollicitation : vitesse, temps de chargement. Il est également thermiquement susceptible.

Les essais conventionnels tels que la température de ramollissement ou la pénétrabilité à l'aiguille ne permettent de déterminer les caractéristiques des bitumes que pour une température et un temps de charge donnés.

Afin de caractériser l'évolution du comportement du bitume depuis l'état liquide jusqu'à celui d'un solide viscoélastique, l'essai de mesure du module complexe est le plus approprié (Huet, 1963; Christensen and Anderson, 1992; The, 1990; Ramond and Such, 2003). Il permet de déterminer les caractéristiques intrinsèques du matériau (module et angle de phase) pour un grand nombre de couples température/fréquence.

Si les liants bitumineux vérifient le principe d'équivalence temps/température (Mandel (1955)), il est alors possible de connaître les propriétés du bitume pour n'importe quelle température par construction de sa courbe maîtresse (Chambard et al. (2003)).

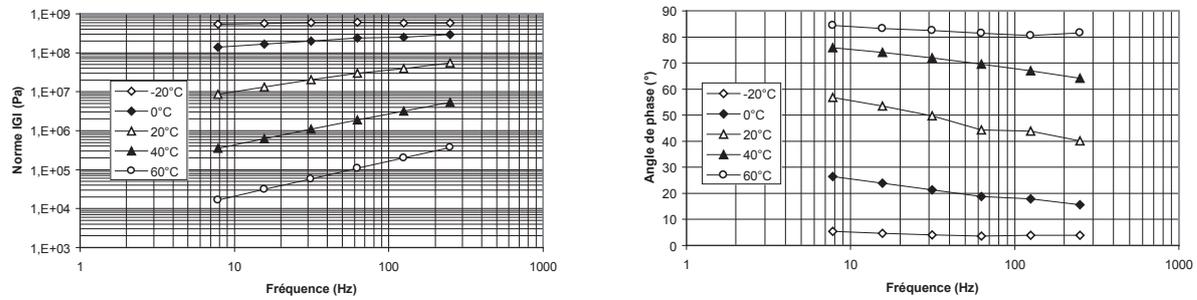
A partir des résultats de module complexe, différentes représentations du comportement rhéologique sont couramment employées. Les exemples proposés ici correspondent aux résultats obtenus sur un bitume pur 50/70 (Chambard et al. (2003)).

Pour chaque température, il est possible de tracer l'évolution de la norme du module complexe $|E^*|$ (ou $|G^*|$) et de l'angle de phase en fonction de la fréquence de sollicitation. Les *isothermes* d'un bitume pur 50/70 sont représentées sur la figure 1.36.

A une température donnée, la pente d'une courbe isotherme renseigne sur la susceptibilité cinétique du bitume considéré.

A l'aide d'un modèle rhéologique, il est alors possible de décrire le comportement d'un bitume dans le domaine fréquentiel et temporel tout en tenant compte de sa susceptibilité thermique.

Toutefois, il faut préciser que les bitumes modifiés (par soufflage ou par adjonction de polymères) ont des angles de phase à haute température qui ne décrivent pas une courbe



Isothermes du module complexe $|E^*|$

Isothermes de l'angle de phase δ

FIGURE 1.36 – Isothermes de la norme du module complexe $|E^*|$ et de l'angle de phase δ pour un bitume de grade 50/70 ?)

unique dans l'espace de Black et dans ce cas, les modèles fondés sur le principe d'équivalence temps/température donnent de moins bons résultats.

L'essai de rupture locale (RULOB) est un essai de traction sur une éprouvette de bitume en film mince qu'on appelle donc une jonction bitumineuse reliant les deux protubérances convexes. Cette jonction bitumineuse est caractérisée d'une part par sa géométrie et d'autre part par les propriétés viscoélastiques du matériau.

La réponse d'une telle éprouvette est fortement influencée par la capacité de contraction du matériau. Cette capacité de contraction est appelée coefficient de Poisson et est notée ν . Sa détermination expérimentale reste délicate, ce paramètre est très souvent pris égal à 0.5 aux moyennes et hautes températures pour les liants bitumineux ; le bitume est alors considéré comme un matériau incompressible dans les conditions pratiques pour l'ingénieur.

Cependant, quelques études théoriques (Tschoegl et al., 2002) et expérimentales sur des matériaux polymères (Kumar et al., 2003; Pritz, 2000) ont montré que le coefficient de Poisson d'un matériau viscoélastique thermo-susceptible dépend des conditions de sollicitations. Pour étudier la rupture des liants bitumineux à basse température, les chercheurs du programme SHRP américain (the Strategic Highway Research Program (SHRP, 1994) remettent en cause cette incompressibilité du bitume et proposent des valeurs proches de 0.3 mais sans justification expérimentale. Plus récemment, di Benedetto et al. (2007) ont étudié la dépendance du coefficient de Poisson avec la température à l'aide d'un essai de traction uniaxiale sur une éprouvette de bitume ou de mastic. Les auteurs présentent le comportement des matériaux bitumineux dans le domaine linéaire et fournissent quelques précisions sur le caractère complexe du coefficient de Poisson. La norme du coefficient de Poisson $|\nu^*|$ dépend de la fréquence et de la température. Ce coefficient varie de 0.5 à basse fréquence et/ou températures élevées à 0.35 à haute fréquence et/ou basses températures.

En tenant compte des recommandations données dans la littérature (Ferry, 1980), (Tschoegl et al., 2002) afin de mesurer le coefficient de Poisson des matériaux viscoélastiques, des dispositifs expérimentaux ont été utilisés dans la thèse de Maillard (2006) (mesure du champ de déplacement sur une éprouvette haltère soumise à une traction uniaxiale et mesures ultrasons sur des éprouvettes cylindriques) pour évaluer la dépendance du coefficient de Poisson du bitume avec la température.

Revenons à l'essai RULOB afin d'examiner la réponse viscoélastique du bitume ; ce test rend bien compte de la dépendance de la rigidité du bitume vis à vis de la température et de la vitesse de déformation. La pente de la courbe dans la première phase de réponse du matériau décroît notablement avec la température (Fig. 1.37)a.

Pour une température d'essai fixé à 0°C , la figure 1.37b illustre les différentes réponses du

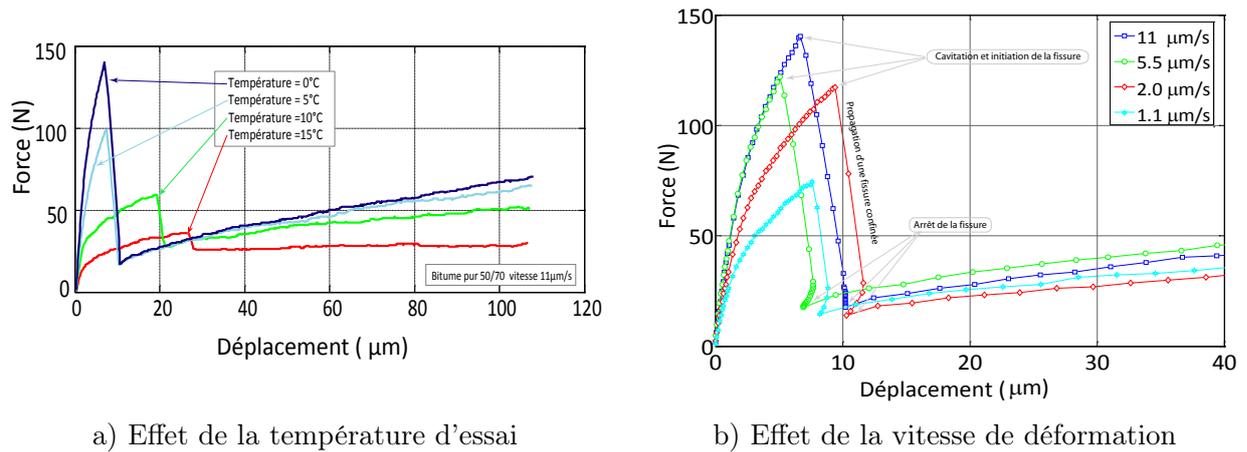


FIGURE 1.37 – Effets des conditions d'essais sur le comportement du film de bitume

matériau lorsqu'il est soumis à une vitesse de chargement croissante. L'analyse de la phase d'étiement permet d'apprécier le comportement rhéologique du bitume : une diminution de la vitesse de chargement se traduit par une diminution de la raideur de l'échantillon.

A cette température autour de 0°C et après l'amorçage et l'ouverture d'une fissure, il subsiste une force résiduelle qui s'explique par le fait que l'éprouvette n'est pas complètement rompue. La fissure qui s'est propagée à partir du centre n'a pas atteint la surface extérieure de l'éprouvette et reste ainsi confinée à l'intérieur de l'échantillon. L'analyse post-mortem de l'échantillon révèle une surface de rupture bien lisse et bien délimitée par un anneau circulaire contenu à l'intérieur de l'échantillon (figure 1.38). On peut supposer que la fissure s'est propagée en une seule fois pour former un anneau circulaire d'un diamètre dépendant de la vitesse de chargement. On note que le diamètre de l'anneau circulaire augmente avec la vitesse de chargement (figure 1.38). On remarque également sur la figure 1.38 que la force de traction nécessaire pour déclencher

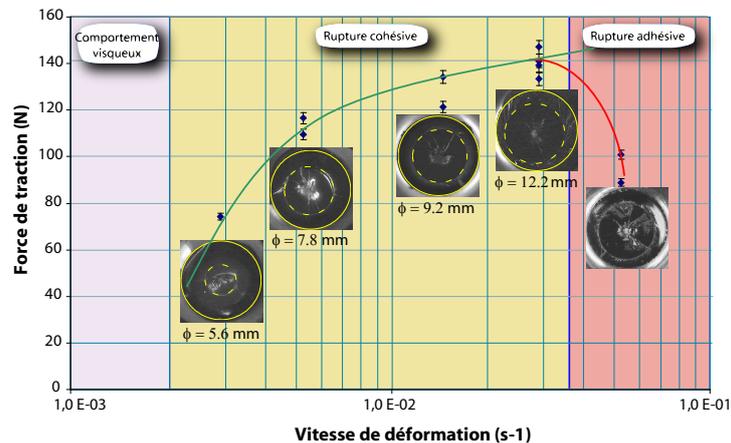


FIGURE 1.38 – Influence de la vitesse de chargement sur la taille de la fissure (température $=0^{\circ}\text{C}$)

l'ouverture de la fissure augmente avec la vitesse de chargement. Vers les faibles vitesses, l'ouverture de la fissure se produit à un niveau de déformation plus important ce qui témoigne d'une

certainne ductilité du matériau. Ces essais montrent que les conditions de déclenchement de la fissure dépendent des propriétés viscoélastiques du matériau qui elles-mêmes interagissent avec les conditions de confinement au centre de l'échantillon.

Au delà d'une certaine vitesse de déformation, on observe une diminution de la force de traction et l'analyse post-mortem révèle un des deux sommets de la protubérance en acier non recouvert par du bitume (figure 1.38). Initialement, on a supposé que la rupture s'est amorcée à l'interface acier/bitume puis s'est propagée dans le matériau. L'utilisation d'une technique non-destructive avec les émissions acoustiques confirme l'hypothèse d'un amorçage à l'interface acier/bitume (Maillard et al., 2004). Dans les cas similaires, on qualifie alors l'essai de rupture avec un amorçage adhésif.

C- Etude de la propagation d'une fissure interne

Compte tenu de la géométrie retenue et des conditions expérimentales, on a bien vu que cette rupture prend naissance à l'intérieur du film de bitume avec dans un premier temps la naissance d'une cavité au centre de l'éprouvette par cavitation. La présence d'une bulle d'air macroscopique dans le matériau peut perturber les conditions d'amorçage de la fissure. Face à ce problème, nous avons pris quelques précautions pour éviter la présence des bulles d'air dans l'éprouvette et en respectant la procédure de nettoyage des protubérances. Ainsi, le phénomène de cavitation reste lié uniquement aux conditions de confinement et aux propriétés rhéologiques du matériau.

Tant que cette fissure ne débouche pas à l'extérieur, elle est protégée de toutes pollutions externes (air, poussières). Afin d'étudier l'effet de la répétition des chargements, il est donc préférable d'éviter de se mettre dans des conditions expérimentales qui amènent la fissure à atteindre la surface extérieure de l'éprouvette.

Si on poursuit l'étirement avec une faible vitesse de déformation, la fissure se déforme et s'étire dans le sens de la traction sans pour autant se rompre.

Si on applique une vitesse de déformation plus importante, la cavité centrale se fissure radialement (portion de courbe AB sur la figure 1.39) et se propage en formant des anneaux concentriques du centre vers l'extérieur de l'éprouvette (Fig. 1.39).

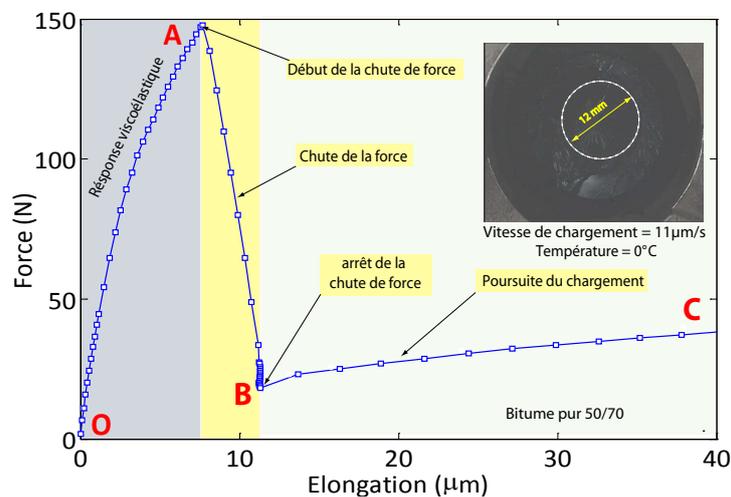


FIGURE 1.39 – Interprétation d'un essai type de rupture locale avec un bitume pur de grade 50/70

L'essai décrit ici fournit des informations sur le comportement du film de bitume lorsqu'il est soumis à un chargement monotone. Le rayon de l'anneau concentrique traduit l'aire de la fissure

obtenue durant la chute de force observable sur la portion de courbe AB.

Pour analyser plus finement l'amorçage et la propagation de la fissure, nous avons exploité une technique d'analyse non-destructive très répandue dans le domaine des matériaux avec l'émission acoustique. Elle consiste à étudier les caractéristiques des événements acoustiques en fonction du temps ou de tout paramètre d'essai (contrainte, déplacement, température, etc.). Après avoir été largement utilisée pour le contrôle des métaux, cette technique commence à trouver des applications dans le domaine du génie-civil (Jolivet et al., 1993; Lenain et al., 1999; Gaillet et al., 2004) et plus particulièrement avec les matériaux bitumineux (SHRP, 1994; Xolin, 2002; Cordel et al., 2003).

La mesure des émissions acoustiques est très utilisée par exemple dans le suivi de la propagation d'une fissure car elle présente l'intérêt qu'un défaut rendu actif (en se développant) signale sa présence à un observateur passif par l'apparition d'une onde mécanique.

La détection de cette onde permet alors de repérer les instants où un défaut se crée ou se propage dans la géométrie considérée et l'analyse des caractéristiques de la salve mesurée permet de caractériser la propagation de la fissure.

Une représentation également souvent utilisée est l'évolution de la distribution cumulée de l'énergie ou du nombre de coups des salves (Fantozzi, 1995; Quispitupa et al., 2004). De telles études permettent alors de qualifier la rupture rencontrée dans le bitume. Cette technique est utilisée également pour examiner la réouverture d'une fissure sous un chargement répété (Xolin, 2002).

C1- Suivi des événements acoustiques lors de la propagation d'une fissure Nous avons utilisé cette technique non-destructive dans l'essai de Rupture Locale Répétée. Les mesures ont été réalisées en collaboration avec la division *Matériaux, Armatures et Câbles pour Ouvrages d'Art* du LCPC à Nantes.

Nous avons utilisé un seul capteur qui nous permet de détecter les instants où le défaut évolue. Les caractéristiques de ce capteur et de la chaîne d'acquisition des émissions acoustiques sont données dans la thèse de Maillard (2006).

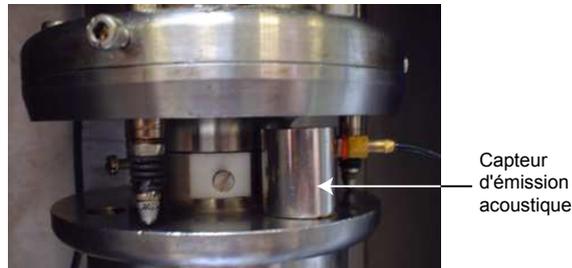
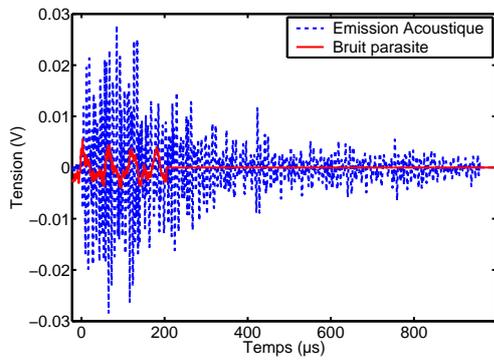


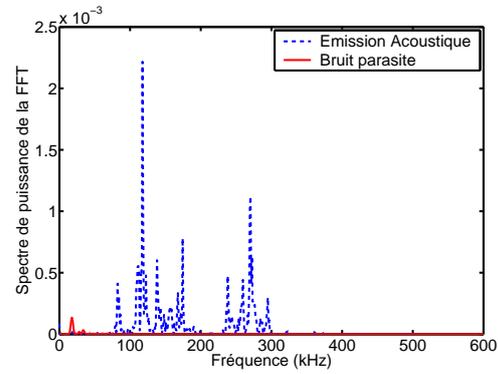
FIGURE 1.40 – Photographie du dispositif expérimental avec un capteur d'émissions acoustiques

Les instants d'enregistrement des émissions acoustiques sont reliés aux signaux de force et de déplacement utilisés comme entrée paramétrique du dispositif d'acquisition. Les émissions acoustiques sont enregistrées lorsqu'elles dépassent un seuil fixé à 35 dB. Mais, certains bruits parasites qui ne correspondent pas à une émission liée à une propagation de fissure, peuvent avoir une amplitude supérieure à cette limite et sont enregistrés dans le fichier de résultats. Toutefois, de telles mesures sont facilement identifiables : les signaux temporels et les composantes fréquentielles d'un bruit parasite sont très différents des propriétés d'une émission acoustique (figure 1.41).

Une telle analyse permet de filtrer les signaux pour ne conserver que ceux qui traduisent l'activité acoustique liée à l'évolution du défaut dans l'échantillon.



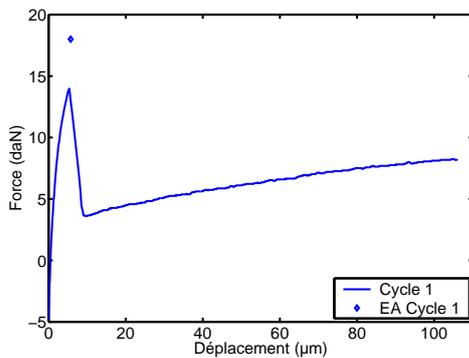
Comparaison des signaux bruts



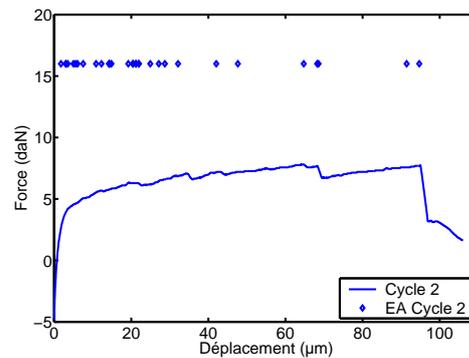
Spectre de puissance de la FFT des signaux

FIGURE 1.41 – Caractéristiques des signaux entre un bruit parasite et une émission acoustique liée à une propagation de fissure

C2-Exemple de mesure des émissions acoustiques Pour chaque cycle, nous pouvons analyser l'évolution de l'activité acoustique en fonction du déplacement appliqué à l'échantillon. Les instants d'apparition des émissions acoustiques signifient que le défaut évolue. Un exemple d'activité acoustique est représenté sur la figure 1.42 pour deux cycles de chargement successifs.



Cycle 1



Cycle 2

FIGURE 1.42 – Exemple de mesures d'émissions acoustiques enregistrées pour deux cycles de chargement

Au début de la campagne de mesure, nous avons effectué quelques enregistrements lors de la mise à la température d'essai de l'échantillon afin de vérifier qu'aucune fissure ne se produit pendant cette phase de préparation de l'échantillon et avant l'essai de rupture proprement dit. Ce résultat conforte le choix d'une vitesse de refroidissement de l'éprouvette adaptée aux exigences de l'essai.

Lors du premier cycle de chargement (figure 1.42a), une seule émission est enregistrée à l'instant où la rigidité de l'éprouvette diminue brutalement. L'émission ainsi détectée par le capteur a une intensité de $100dB$. Ceci correspond, à l'amorçage puis à la propagation de la fissure. En revanche, pendant le second chargement (figure 1.42b), les émissions enregistrées sont plus nombreuses et réparties pendant toute la phase de traction. Cette répartition des événements acoustiques traduit une propagation progressive de la fissure pas à pas tout au long de la phase de chargement.

L'intérêt de la mesure des émissions acoustiques réside également dans la mise en relation entre les caractéristiques de la première salve acoustique enregistrée et le lieu d'amorçage de la fissure définissant ainsi le type de rupture (cohésive ou adhésive) tout au moins au début de la propagation de la fissure.

Lorsque l'amorçage de la fissure se produit dans le liant bitumineux, l'amplitude de la salve est de l'ordre de $99dB$ et le nombre de coups est supérieur à 500. Lorsque la fissure s'est initiée à l'interface acier/bitume, l'amplitude de la salve diminue pour atteindre une valeur autour de $50dB$ et le nombre de coups est plus faible ne dépassant pas quelques dizaines.

D- Mise en évidence de l'autoréparation

En faisant suivre chaque phase de traction par une période où le dispositif retrouve sa configuration initiale, nous simulons le retour à la position de repos de la jonction bitumineuse entre deux chargements. Ces phases de repos, d'une durée variable, permettent à la fois d'étudier l'effet des sollicitations répétées et les propriétés d'autoréparation du matériau testé.

La phase de repos séparant chaque traction a pour but de favoriser le recollement des lèvres de la fissure. A l'issue de cette phase, la taille du défaut résiduel peut être estimée au moyen de la rigidité initiale de l'éprouvette.

Ainsi, au début de chaque phase de chargement n , la pente de la courbe effort/déplacement K_{exp_n} (Maillard et al., 2005) est calculée pour les points situés au voisinage du zéro de force pour des déplacements de l'ordre de $1 \mu m$ (fig. 1.43).

La valeur de la rigidité de l'échantillon au premier cycle K_{exp_1} est prise comme une valeur de référence et son évolution relative $K_{F/d}(n) = \frac{K_{exp_n}}{K_{exp_1}}$ est déterminée à chaque cycle de chargement n .

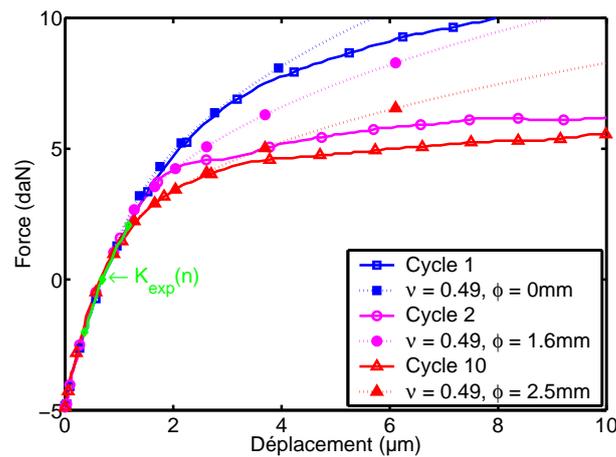


FIGURE 1.43 – Estimation de la rigidité K_{exp_n} et de la taille de la fissure ϕ_{ini} initiales lors des phases de traction 1, 2 et 10

En utilisant un modèle rhéologique *Maxwell généralisé, Huet-Sayegh modifié*, il est également possible de déterminer la taille du défaut résiduel par ajustement de la courbe expérimentale avec la réponse du modèle rhéologique. On détermine alors la rigidité de l'éprouvette mesurée au début de chaque cycle (figure 1.43). Le diamètre de la fissure $\phi_{ini}(n)$ est calculé au début de chaque sollicitation n .

La figure 1.44 donne les évolutions de la rigidité relative $K_{F/d}$ et de la taille de la fissure ϕ_{ini} en fonction du nombre de cycles de chargement. Lors des premiers cycles de chargement,

la rigidité initiale relative de l'éprouvette diminue et la taille de la fissure résiduelle augmente. Ensuite, à partir du dixième cycle, ces deux grandeurs deviennent stables.

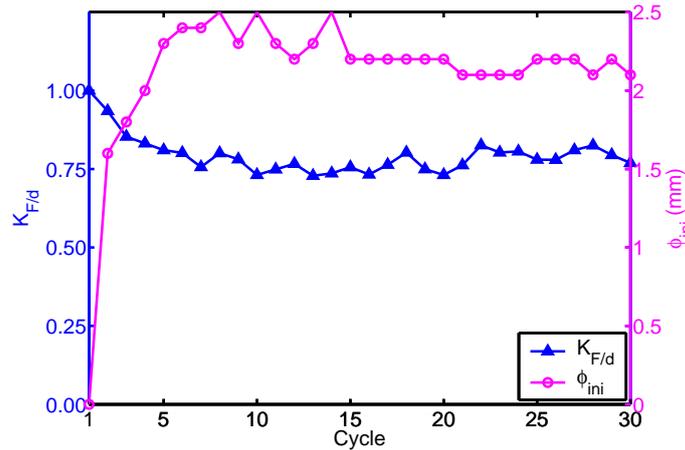


FIGURE 1.44 – Evolution de la rigidité relative $K_{F/d}$ de l'éprouvette et de la taille de la fissure initiales ϕ_{ini} en fonction du nombre de cycles

D1- Suivi de l'auto-réparation à partir de la quantité de signal ultrason Le contrôle non destructif à l'aide de méthodes ultrasons est couramment pratiqué pour mettre en évidence l'apparition et l'accroissement de la taille d'un défaut. Cette méthode fondée sur l'étude de l'évolution des propriétés d'un signal ultrasonore dans l'épaisseur du corps d'épreuve permet d'estimer la position et la taille du défaut (Saka and Uchikawa, 1995). Cet outil nous est apparu intéressant pour le suivi de la taille du défaut au cours de l'essai de Rupture Locale Répétée.

Pour effectuer de telles mesures, il faut faire passer une onde longitudinale dans l'axe de traction de l'éprouvette et recueillir ce même signal après transmission à travers l'échantillon. Le capteur placé sur la protubérance supérieure est l'émetteur. Le récepteur ultrason est placé sur la protubérance inférieure.

Toute évolution de la taille du défaut pourra se traduire par une variation de la quantité de signal ultrason. Lors des phases de repos (figure 1.5.2), la quantité de signal ultrasonore q_{US} traversant l'échantillon augmente traduisant le recollement des lèvres de la fissure. Lorsque la taille de la fissure devient inférieure à la surface d'étude couverte par le capteur ultrason, une étude spécifique de l'évolution de ce signal lors des phases de repos permet de s'intéresser à deux caractéristiques de l'auto-réparation :

- la cinétique du phénomène de recollement des lèvres de la fissure ;
- la capacité du matériau à s'auto-réparer.

La quantité de signal traversant l'échantillon est liée à la taille de la fissure présente au cœur de l'échantillon. Le niveau atteint à la fin de la phase de repos traduit alors la capacité du bitume à s'auto-réparer durant un laps de temps donné pour des conditions d'essais fixées :

- un retour à une amplitude de signal maximale traduit une cicatrization complète de la fissure ;
- lorsque, juste avant la phase de traction, la vitesse de réparation est nulle, la quantité de signal traversant l'échantillon traduit la valeur limite de la capacité de réparation.

D2- Relation entre la quantité de signal ultrasonore q_{US} et la taille de la fissure ϕ Les indicateurs de la fissuration et de l'auto-réparation qui sont définis dans la thèse de Maillard (2006) décrivent l'état mécanique de la fissure à chaque instant de l'essai.

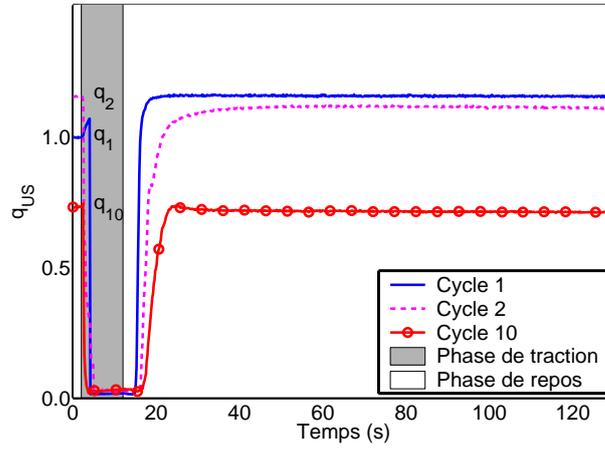


FIGURE 1.45 – Comparaison de l'évolution du signal ultrasons lors des cycles 1, 2 et 10 de l'essai de référence ($T=0^{\circ}C$ et $V= 11\mu m$)

Parmi ceux-ci, l'évaluation expérimentale $K_{F/d}$ de la rigidité initiale de l'éprouvette, l'estimation de la taille ϕ de la fissure résiduelle à l'aide du modèle et la quantité du signal ultrasonore q_{US} au début de chaque traction donnent toutes trois des informations sur la taille du défaut à plusieurs instants identiques de l'essai.

Dans la thèse de Maillard (2006), nous avons comparé ces grandeurs pour des essais à différentes températures et sur différents matériaux. L'évolution de la rigidité initiale relative de l'éprouvette et celle de la quantité relative du signal ultrasonore mesurée au début de chaque cycle sont reportées sur la figure 1.46. L'écart maximal observé est de l'ordre de 0.1. Nous considérons alors que les valeurs de $K_{F/d}$ et q_{US} sont corrélées lorsque la taille de la fissure est inférieure à 7.0 mm . Cette limite supérieure de la taille de fissure est fixée par les caractéristiques du capteur ultrason. Au delà de cette taille limite, la quantité de signal est nulle. A partir de ces résultats,

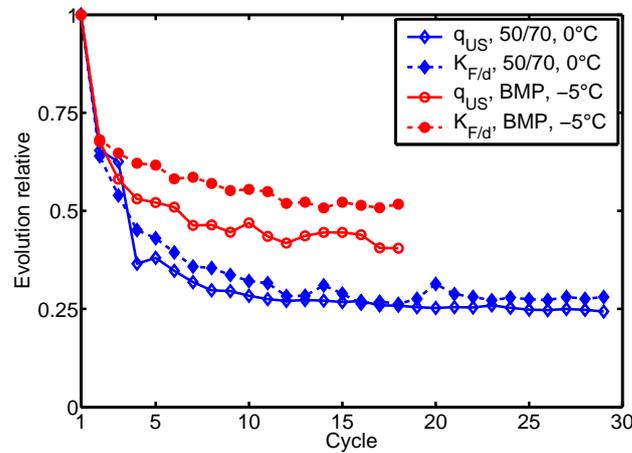


FIGURE 1.46 – Evolution de la rigidité initiale relative $K_{F/d}$ et de la quantité de signal initial relative q_{US} en fonction du nombre de cycles

nous avons tracé l'évolution de la taille de la fissure ϕ estimée à l'aide du modèle en fonction de la quantité de signal ultrasonore q_{US} traversant l'échantillon (figure 1.47) et nous proposons

une relation linéaire entre l'évolution de q_{US} et le diamètre ϕ de la fissure lorsque celui-ci est inférieur à $\sim 7.0 \text{ mm}$.

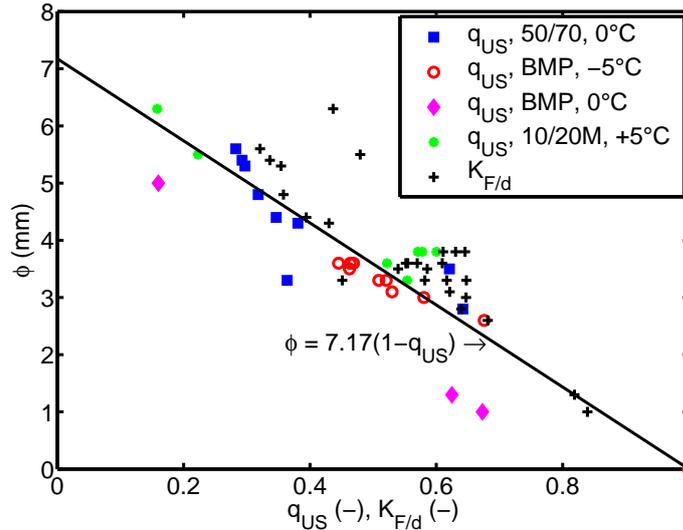


FIGURE 1.47 – Estimation de la taille ϕ de la fissure en fonction de la quantité de signal ultrasonore q_{US} et de la rigidité initiale relative $K_{F/d}$

Nous remarquons alors que l'écart maximal de 0.1 entre les rigidités relatives et la quantité de signal ultrasonore (figure 1.46) correspond à une erreur d'environ 1.0 mm sur le diamètre estimé de la fissure. Ainsi, en utilisant les mesures ultrasons (ou l'estimation de la rigidité initiale relative de l'éprouvette) et l'équation donnée sur la figure 1.47, il est possible d'estimer la taille de la fissure à chaque instant de l'essai. Par la suite, celle-ci sera notée ϕ_{US} , signifiant que cette taille de fissure est obtenue à partir des résultats ultrasons couplés avec les résultats du modèle.

Les mesures ultrasonores constituent alors un indicateur privilégié de l'évolution de la taille de la fissure à chaque instant de l'essai lorsque le diamètre de la fissure est inférieur à 7.0 mm. En revanche, la comparaison entre les essais doit tenir compte d'une marge d'erreur de $\pm \sim 1.0 \text{ mm}$. Nous représentons sur la figure ?? l'évolution de la taille de la fissure à partir d'un indicateur issu des mesures ultrasons.

La quantité de signal ultrasonore ainsi traduite en taille de fissure, il est également possible de recalculer la cinétique de refermeture de la fissure exprimée en $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

E- Exploitation de l'essai de rupture locale pour une étude comparative des produits bitumineux

Les études menées dans le cadre de la thèse de Maillard (2006) ont permis de montrer que la cinétique de recollement des lèvres de la fissure dépend de la structure physico-chimique des liants bitumineux pour des conditions expérimentales comparables. Les bitumes étudiés sont présentés en détail dans la thèse de Maillard et les modifications au niveau de la structure interne concernent soit l'ajout de polymère (bitume BMP réticulé à 3.5%) soit le recours à un procédé industriel d'oxydation par soufflage (10/20M)

Il semble donc que les bitumes purs (50/70 et 10/20) ont un comportement à l'autoréparation différent de celui des bitumes modifiés BMP et 10/20M. Les modifications de la structure physico-chimique des liants ont donc un effet sur les interactions moléculaires et sur l'interdiffusion supposée lors de la phase d'autoréparation.

En règle générale, cette méthode de mesure permet de comparer les liants bitumineux entre eux et de définir un classement des performances des liants bitumineux.

Sur la figure 1.48, nous montrons l'évolution de la vitesse de recollement des lèvres de la fissure après répétition des cycles de chargement/repos pour des conditions identiques. Ainsi, la vitesse maximale d'auto-réparation diminue avec la répétition des chargements tandis que le temps d'évolution de la taille de la fissure augmente. Il semble donc qu'après plusieurs chargements,

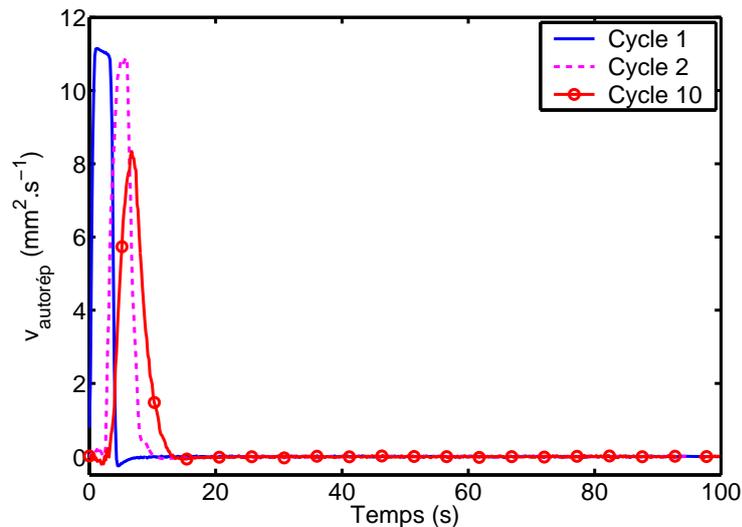


FIGURE 1.48 – Evolution de la vitesse de recollement des lèvres de la fissure (en $mm^2.s^{-1}$) au cours des phases de repos des cycles 1, 2 et 10

les propriétés d'auto-réparation soient dégradées. Toutefois, il est intéressant de noter que, pour tous les essais et pour chacun des cycles, la vitesse d'évolution de la fissure est nulle pendant au moins 60 secondes au cours de la phase de repos. Pour toutes les configurations expérimentales, la taille de la fissure est donc stabilisée avant la fin de la phase de repos.

Il pourrait ainsi être intéressant de diminuer la durée de la phase de repos et d'estimer la rigidité de l'éprouvette, et donc la taille du défaut, lors d'une phase de traction alors que la vitesse de réparation est encore en train d'évoluer. A contrario, l'augmentation de la durée de cette phase de repos pourrait permettre d'étudier si un temps de contact plus long contribue à une augmentation de la rigidité liée à une meilleure interdiffusion des molécules.

Le lien avec la fatigue des enrobés bitumineux a également été abordé. Bien que l'essai de rupture locale répétée soit réalisé à des températures inférieures et sur un faible nombre de cycle par rapport à l'essai de fatigue sur les enrobés bitumineux, un premier croisement du comportement des bitumes entre l'essai de rupture locale et l'essai de fatigue a été réalisé dans la thèse de [Maillard \(2006\)](#). Le classement obtenu semble cohérent et les investigations effectuées à l'échelle d'un film de bitume reflètent bien ce qui se passe à cette échelle lors d'un essai de fatigue sur un enrobé bitumineux.

Conclusions Le travail important en volume et en qualité réalisé durant la thèse ([Maillard, 2006](#)) a permis de fixer les modalités pratiques pour l'évaluation des phénomènes de fissuration et d'auto-réparation. A travers la synthèse qui est donnée ici, on peut énoncer quelques pistes pour l'étude de ces phénomènes :

1. L'émission acoustique est l'outil adéquat pour détecter et suivre la fissuration dans les matériaux bitumineux. Si l'on considère le mélange bitumineux comme un ensemble de plusieurs

jonctions bitumineuses de différentes tailles, on peut supposer qu'une ou plusieurs fissures peuvent se propager dans la microstructure du matériau. Dans ce cas, l'enregistrement des événements acoustiques constitue un bon outil pour suivre la fissuration dans les enrobés bitumineux.

2. Le suivi de l'évolution du signal ultrason pendant la phase repos est un bon moyen pour évaluer l'auto-réparation et quantifier la vitesse de recollement des lèvres de la fissure. Cette technique semble répondre aux problèmes de quantification de l'auto-réparation des bitumes dans les conditions contrôlées. Il semble également que l'étude sur une jonction bitumineuse seule permet de répondre aux attentes des fournisseurs de liant bitumineux et des entreprises routières. L'outil développé ici permet de classer les liants à la fois sur la résistance à la fissuration mais également sur la capacité à s'auto-réparer.

Les techniques expérimentales développées dans la thèse de [Maillard \(2006\)](#) ont permis de comprendre et de caractériser les deux principaux phénomènes susceptibles de modifier la réponse mécanique de la jonction bitumineuse. Ce travail de recherche a permis de déduire un premier indicateur pour évaluer les performances des liants bitumineux vis à vis de la fissuration et un deuxième indicateur pour cerner la capacité d'auto-réparation des liants bitumineux. L'originalité de ce travail réside dans la méthode de détermination de ces deux indicateurs à partir d'un essai unique. Sur le plan de la valorisation, l'essai de rupture locale a été utilisé dans plusieurs contrats industriels pour classer les liants bitumineux entre eux.

1.5.3 Les développements numériques

En collaboration avec Monsieur Alain Ehrlacher de l'Institut Navier, on a poursuivi nos recherches sur le comportement de la jonction bitumineuse avec la **thèse de Hoai Nam Nguyen (soutenue le 05 décembre 2008)**.

Cette thèse vise à examiner les aspects théoriques et numériques pour modéliser la fissuration dans un milieu viscoélastique comme le bitume.

Le code de calcul Abaqus a été utilisé pour exploiter les approches numériques de la mécanique de la rupture. L'objectif était de compléter et de préciser les interprétations de l'essai de rupture locale à l'aide d'indicateurs spécifiques de fissuration comme le facteur d'intensité de contrainte et le facteur d'ouverture de la fissure.

2.5.3.1 Simulation de l'essai de rupture locale avec la méthode des éléments finis

a- Matériau Dans le code Abaqus, on peut représenter le comportement viscoélastique dans le domaine temporel à l'aide des séries de Prony.

Considérons un essai en petites déformations dans lequel on applique une déformation $\gamma(t)$ au matériau viscoélastique. La réponse en contrainte de cisaillement $\tau(t)$ est définie comme suit :

$$\tau(t) = \int_0^t G_R(t-s)\dot{\gamma}(s)ds \quad (1.7)$$

d'où $G_R(t)$ est le module relaxé de cisaillement caractérisant la réponse du matériau viscoélastique. Ce module de relaxation peut s'écrire sous forme unidimensionnelle :

$$g_R(t) = \frac{G_R(t)}{G_0} \quad (1.8)$$

où $G_0 = G_R(t = 0)$ est le module relaxé de cisaillement instantané. L'équation constitutive (1.7) devient alors :

$$\tau(t) = G_0 \int_0^t g_R(t-s)\dot{\gamma}(s)ds \quad (1.9)$$

Le matériau utilisé dans les simulations numériques est un liant pur de grade 50/70 (pénétrabilité à l'aiguille exprimée en 1/10 mm à 25°C). Les propriétés rhéologiques de ce liant sont représentées sous forme d'une série de Prony et ont été identifiées pour chaque température de l'essai dans la thèse de [Nguyen \(2009\)](#).

À titre d'exemple, pour une température $T = 0^\circ C$, on introduit dans le code de calcul Abaqus un module élastique isotrope instantané $E_0 = 1924.96MPa$ et la série de Prony est donnée dans le tableau 1.3 :

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$\tau_i(s)$	4.519e-7	2.77e-6	2.261e-5	8.647e-5	4.893e-4	3.811e-3	2.595e-2	0.1692	1.1961	10.372	39.52	212.2	1650
g_i	0.1088	0.0882	0.1255	0.0945	0.1878	0.1369	0.1125	0.0795	0.0427	0.0167	0.0045	0.002	3e-4

TABLE 1.3 – Tableau récapitulatif des valeurs des séries de Prony à température $T = 0^\circ C$. Le module infini $E_\infty = 0.0624MPa$.

b- Maillage Généralement, le coût de calcul d'un modèle de fissuration peut s'avérer important. Un travail d'optimisation du maillage a été mené. Nous avons choisi un maillage plus fin uniquement dans la zone voisine de la ligne de propagation de la fissure où apparaissent les fortes concentrations de contraintes. Cependant, le générateur de maillage Abaqus présente certaines limitations dans la construction d'un maillage régulier adapté à la géométrie spécifique de l'essai. Pour surmonter cette limitation, nous avons utilisé le code d'éléments finis **Cast3M-CEA (2005)** pour discrétiser le domaine défini par la géométrie de l'éprouvette. Le maillage obtenu par Cast3M est ensuite transformé dans un format compatible avec le code Abaqus grâce à un script écrit en Perl.

L'étude sur la dépendance du maillage avec la fissure vis à vis du calcul a été menée dans la thèse de **Nguyen (2009)**. Cette étude a permis d'adopter les éléments réguliers rectangulaires (*CPE4*, *CAX4*, etc.) qui donnent les meilleurs résultats. Etant donné que le nombre maximal d'éléments pris en compte par l'histoire de chargement est limité dans le code de calcul, nous avons retenu l'élément bilinéaire axisymétrique avec quatre nœuds *CAX4*.

Etant donné la géométrie particulière de l'éprouvette de l'essai **Rulob²**, on ne considère qu'un quart de l'échantillon dans la modélisation. En fonction de son épaisseur e^3 (L_6), les dimensions de ce maillage 2D axisymétrique indiquées dans la figure 1.49 sont données dans le tableau 1.4 ci-dessous :

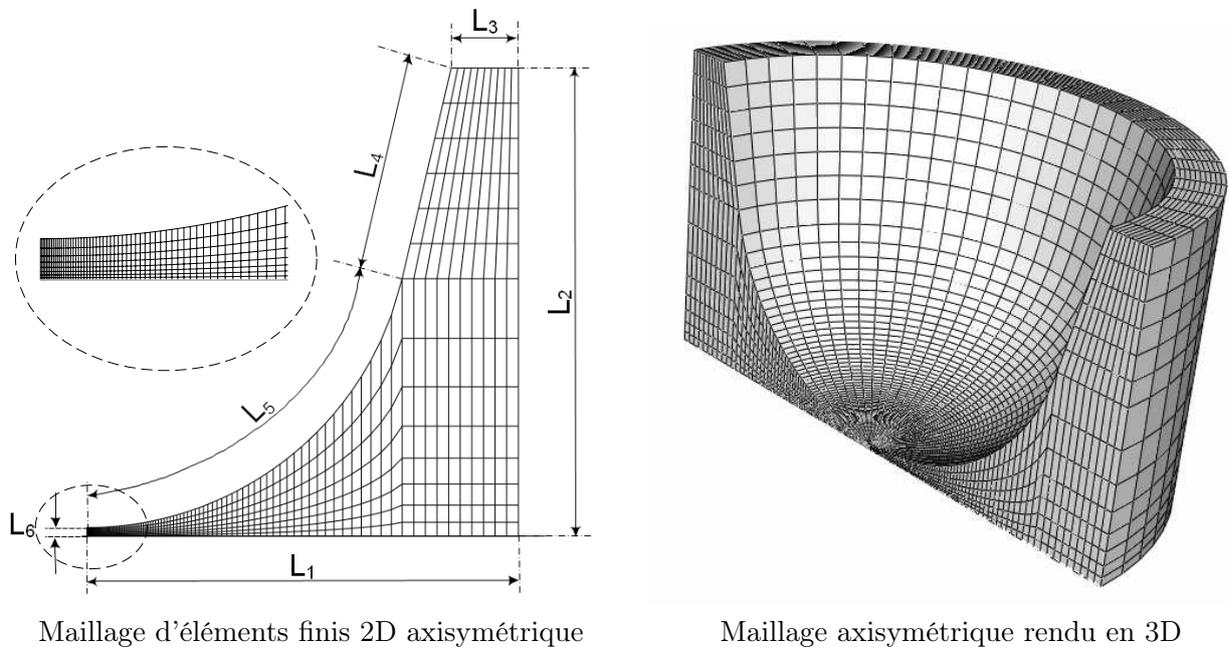


FIGURE 1.49 – La discrétisation : les dimensions (c.f tableau 1.4) et le rendu 3D

L_6	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5
$e = 0.072/0.220/0.32$	8.0	$8.586+e$	1.245	4.0308	8.0624

TABLE 1.4 – Les dimensions du modèle Rulob en *mm*

2. La géométrie de l'échantillon présente à la fois un axe de symétrie horizontal et une axisymétrie autour de l'axe vertical (c.f la figure 1.34)

3. L'épaisseur indiquée correspond à l'une des trois cales d'éprouvette de 70, 220 ou 320 μm .

En tenant compte du temps de calcul, l'étude de la dépendance du maillage vis à vis du calcul a permis de proposer une discrétisation optimisée avec les caractéristiques suivantes :

- L'élément axisymétrique bilinéaire CAX4 ;
- Le nombre total de nœuds : 2474 ;
- Le nombre total d'éléments : 2330 ;
- Le nombre total de variables générées par le modèle : 2337 ;
- Le plus petit élément se trouve au centre de l'éprouvette avec une taille de $7.28 \times 8.24 \mu m$.

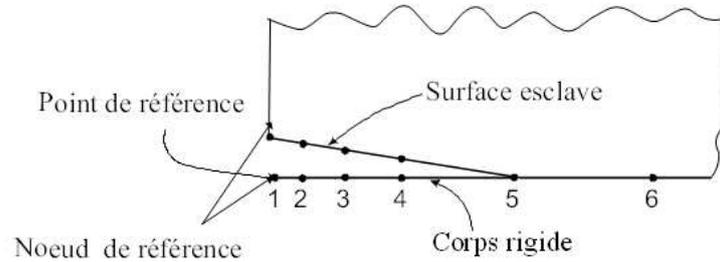


FIGURE 1.50 – Le maillage et le chargement du modèle de validation

En tenant compte des caractéristiques de l'essai de rupture locale décrites dans le paragraphe 1.5.2 ; la fissure s'initie au centre de l'éprouvette et se propage concentriquement vers l'extérieur. L'axe de propagation de la fissure coïncide donc avec l'axe de symétrie (L_1). Dans ce cas, nous avons besoin de raffiner le centre de l'éprouvette, lieu d'amorçage de la fissure. Pour le maillage retenu, les plus gros éléments se trouvent loin du centre de l'éprouvette (figure 1.49).

C- Chargement et conditions aux limites Avec le maillage retenu précédemment, on prend en compte les axes de symétrie et d'axisymétrie de l'éprouvette (voir figure 1.53 dans la définition des conditions aux limites, les coordonnées locales sont illustrées par la figure 1.51 :

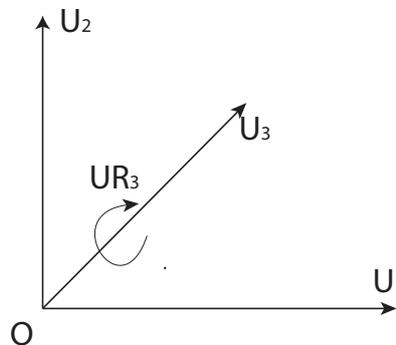


FIGURE 1.51 – Coordonnées locales utilisées pour les conditions aux limites

Condition de symétrie : $U_2 = UR_1 = UR_3 = 0$ sur L_1 . Les nœuds font partie du chemin de propagation prédéfini et ils se trouvent entre deux surfaces l'une esclave liée au matériau et l'autre maîtresse liée à l'axe de symétrie. La surface maîtresse se caractérise par un corps rigide fixé par un point de référence. Ces nœuds sont donc bloqués suivant la normale ce qui est nécessaire dans un problème de fissuration en mode I ;

Condition d'axisymétrie : $(U_1 = U_2 = UR_3 = 0)$ sur l'axe d'axisymétrie L_6 ;

Bords libres : Il n'y a aucun chargement sur les bords L_2 et L_3 .

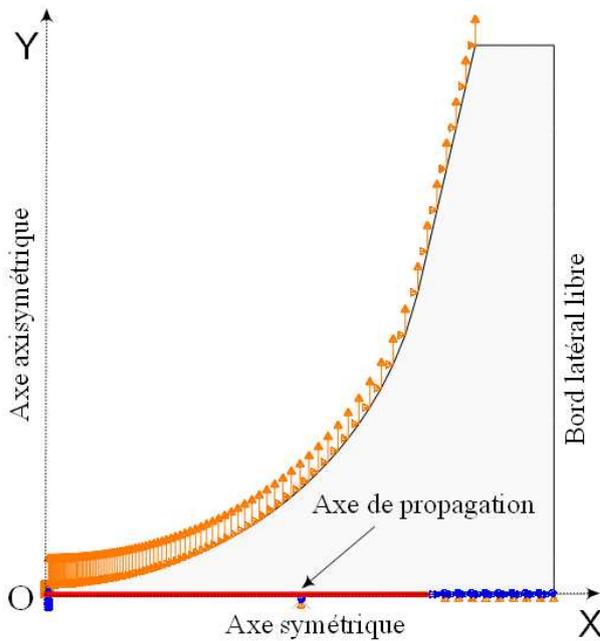


FIGURE 1.52 – Les conditions aux limites appliquées à l'échantillon

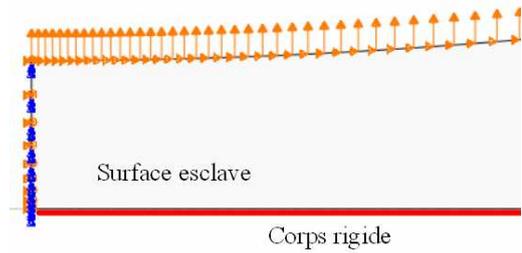
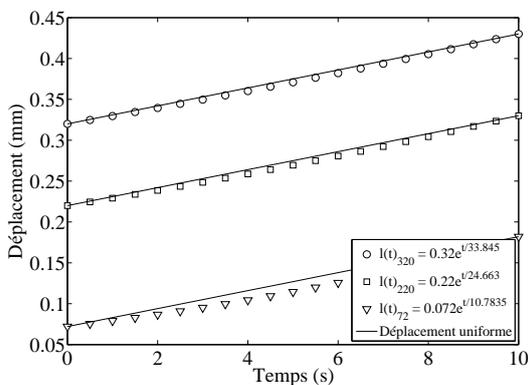
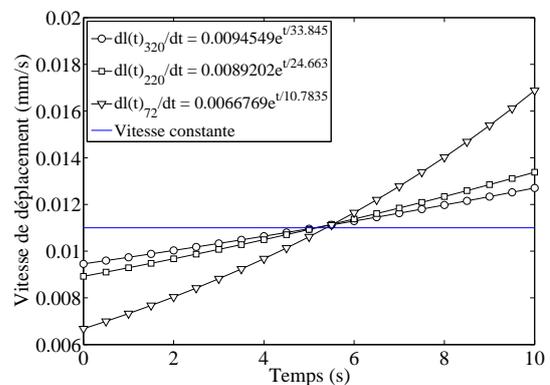


FIGURE 1.53 – Le chargement et les conditions aux limites au centre du maillage

Lors de la phase de traction, on applique une loi de déplacement exponentielle imposée sur la surface libre supérieure de l'échantillon. Ce déplacement imposé varie en fonction de l'épaisseur de l'échantillon (correspondant à 72, 220, et 320 μm) de telle sorte que la vitesse de déformation reste constante et que sa valeur critique se trouve dans la plage de la vitesse de déformation de l'essai introduite dans le paragraphe §1.5.2. La figure 1.54 montre les évolutions du déplacement imposé et de la vitesse de déformation correspondante en fonction du temps pour les trois cales qui correspondent aux trois épaisseurs 72, 220, et 320 μm .



(a) Déplacement



(b) Vitesse de déplacement

FIGURE 1.54 – Comparaison du déplacement (a) et de la vitesse de déplacement exponentielle (b) pour les différentes épaisseurs de cales lors d'un étirement $d_f = 110 \mu m$ pendant $t_f = 10 s$

D- Mise en œuvre dans le code de calcul Dans l'essai de rupture locale, les déplacements liés à l'initiation et à l'arrêt de la fissure sont déterminés à partir des mesures expérimentales. On

connaît donc le temps d'initiation et le temps d'arrêt de la fissure au cours de l'essai. En adoptant l'hypothèse simplificatrice sur une vitesse de propagation uniforme pendant cette phase, on impose une progression de la taille de la fissure déterminée à partir des mesures expérimentales en fonction du temps.

À titre d'exemple, nous considérons les tests réalisés sur un film de bitume dont l'épaisseur minimale est de $320\ \mu\text{m}$ à la température $T = 0^\circ\text{C}$. On impose une vitesse de déplacement moyenne de $v = 11\ \mu\text{m/s}$. Les résultats de ces tests sont présentés dans le paragraphe §1.5.2. Avec une vitesse de déplacement imposée et une vitesse de propagation supposée uniforme, nous en déduisons les temps liés à l'initiation et à l'arrêt ainsi que la vitesse de propagation (tableau 1.5).

θ ($^\circ\text{C}$)	t_f (s)	d_{ini}^a (μm)	t_{ini}^b (s)	d_{arr}^c (μm)	t_{arr}^d (s)	a_f^e (mm)	v_a^f (mm/s)
0	10	7.06	0.642	10.65	0.965	11.65	18.02

- a. La valeur du déplacement au point d'initiation de la fissure
- b. Le temps au point d'initiation de la fissure
- c. La valeur du déplacement au point d'arrêt de la fissure
- d. Le temps au point d'arrêt de la fissure
- e. La taille de la fissure finale après la rupture
- f. La vitesse moyenne de propagation de la fissure

TABLE 1.5 – Les temps liés à l'ouverture et à l'arrêt de la fissure à une température de 0°C et à une vitesse de $11\ \mu\text{m/s}$

À partir de ces temps d'initiation et d'arrêt de la fissure et de la vitesse d'ouverture, nous pouvons discrétiser la longueur de la fissure en fonction du temps.

Au niveau du maillage, l'ouverture d'une fissure se traduit par une libération des nœuds. Dès le relâchement d'un nœud sur la ligne d'ouverture de la fissure, la force interne est remplacée par une force de traction opposée sur les deux nouvelles surfaces créées. Ces forces de traction se réduisent à zéro après un temps relatif qui reste à définir. Pour ce faire, on introduit dans le code de calcul Abaqus une fonction linéaire en fonction du temps de relâchement du nœud situé à la pointe de la fissure. La valeur de la fonction est initialement prise égale à 1, puis se réduit rapidement à 0.

E- Analyse de l'essai de rupture locale L'identification rhéologique du bitume expliquée dans la thèse de Hoai-Nam permet l'obtention de la loi de comportement viscoélastique. Avec 13 éléments de Maxwell, on représente la loi viscoélastique du bitume avec la série de Prony associée.

Dans la résolution du problème, on suppose que les temps de relaxation volumique et déviatorique sont identiques ($\tau_i = \tau_K^i = \tau_i^G$).

Puis, on discrétise le domaine défini par la géométrie de l'échantillon de l'essai Rulob à l'aide du code Abaqus version 6.4 [Abaqus \(2004\)](#) et de [Cast3M-CEA \(2005\)](#). Le maillage contient 940 éléments 2D axisymétriques bilinéaires (*CAX4*). Le rapport entre l'élément le plus petit situé au centre a et le rayon de l'éprouvette R est de l'ordre de $a/R = 9.1e - 4$.

Les propriétés rhéologiques sont calées à partir des essais uniaxiaux Métravib sous forme d'une série de Prony à température $T = 0^\circ\text{C}$ (tableau 1.3).

On effectue alors la simulation numérique des différentes phases de l'essai de rupture locale suivant la méthodologie adoptée lors de la mise en œuvre du modèle numérique comme suit :

E1- Phase étirement : calage du coefficient de Poisson Lors de la phase d'étirement de l'échantillon, la réponse du bitume dépend fortement de sa capacité de contraction. On rappelle que le coefficient de Poisson constitue un des paramètres importants dans la simulation de l'essai. Lorsque le bitume est dans un état fluide plus ou moins visqueux, la valeur absolue du coefficient de Poisson est prise égale à 0.5. Lorsque la température baisse, ce paramètre décroît jusqu'à ce que le bitume atteigne un état vitreux. Le coefficient de Poisson atteint alors une valeur proche de 0.35 (Shaterzadeh, 1997; Maillard et al., 2005).

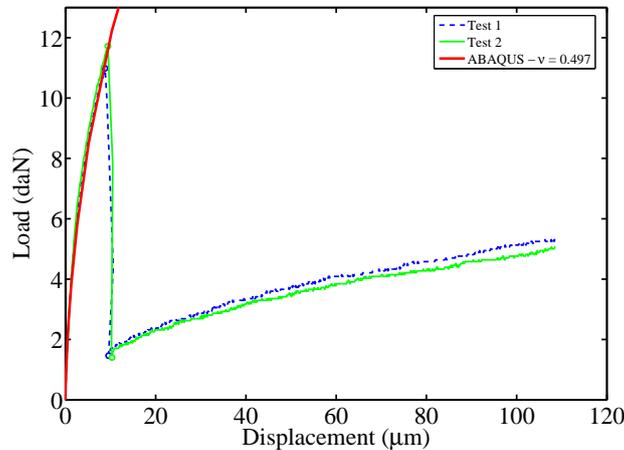


FIGURE 1.55 – Calage du coefficient de Poisson sur la phase étirement - Essai à 0°C - $t_f = 55\text{s}$

En se basant sur les résultats expérimentaux, la taille de la fissure est nulle au début de l'essai. Par conséquent, la phase d'étirement traduit la réponse rhéologique du matériau et la forme particulière de l'éprouvette. Le coefficient de Poisson est fixé alors de telle manière à reproduire la phase d'étirement de la courbe expérimentale (force-déplacement). La valeur du coefficient de Poisson ainsi trouvée constitue une détermination d'une caractéristique du matériau dépendant des conditions de l'essai (température, vitesse de sollicitation). Cette approche constitue un moyen indirect et original pour déterminer le coefficient de Poisson.

A titre d'exemple, la figure 1.55 présente un ajustement du coefficient de Poisson sur des essais à 0°C et à une vitesse de déplacement $v = 2 \mu\text{m}/\text{s}$. Après calage du calcul numérique sur la courbe expérimentale, la valeur du coefficient de Poisson retenue est égale à $\nu = 0.497$.

E2- Phase d'ouverture de la fissure Les nombreux calculs menés sur des maillages plus ou moins fins montrent qu'une bonne précision du calcul peut-être obtenue sur des maillages présentant un raffinement autour de la zone d'ouverture de la fissure. Dans la simulation numérique, on impose une vitesse constante d'ouverture de la fissure. Cette vitesse moyenne est estimée à partir de la durée de la chute de force et de la taille de la fissure. On représente sur la figure 1.56, le champ de contrainte verticale dans le matériau au pas de temps $t=0.6557\text{s}$. Sur cette figure, on observe un déchargement local au droit de la fissure et une concentration de la contrainte au niveau de la pointe de la fissure.

Le champ de contrainte est majoritairement orienté dans le sens normal à la surface de la fissure et contribue ainsi à la force de traction globale. Le champ de contrainte forme ainsi une région ellipsoïdale autour de la pointe de fissure. On remarque également que cette région est

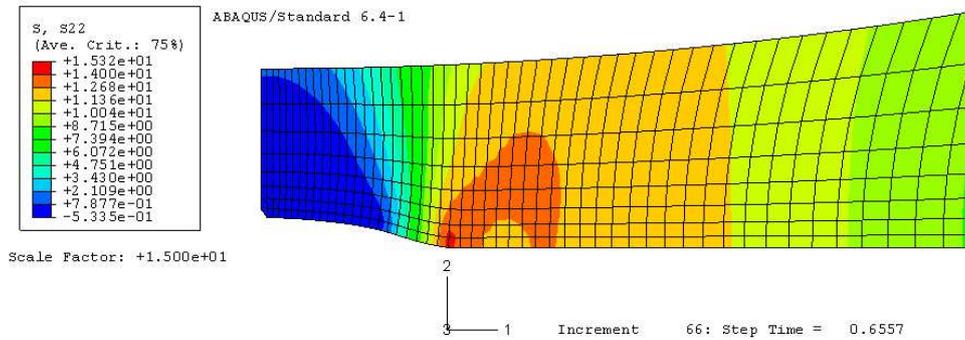


FIGURE 1.56 – Distribution du champ de contrainte verticale autour de la pointe de fissure (Temp = $0^{\circ}C$ et vitesse moyenne $v = 11 \mu m/s$)

relativement large par rapport à l'épaisseur du film de bitume. Le champ de contrainte dans cette région proche de la pointe décroît très vite avec l'ouverture de la fissure. Cette observation locale corrobore la chute de force brutale observée sur la courbe force-déplacement.

E3- Phase de poursuite de l'essai après rupture Après cette chute de force qui traduit l'ouverture d'une fissure dans le matériau, la figure 1.57 montre que la courbe de traction repart avec une raideur plus faible que celle relevée lors de la phase étirement. Cette nouvelle rigidité correspond à une raideur résiduelle d'une éprouvette fissurée. Comme le coefficient de Poisson est déterminé précédemment, la taille finie de la fissure peut-être déterminée par un calage de la simulation sur la portion de la courbe expérimentale *BC* (figure 1.39). La taille de la fissure ainsi calculée peut-être comparée avec la valeur issue de l'analyse post-mortem de l'anneau circulaire visible sur la surface de rupture.

La figure 1.39 montre la surface de rupture obtenue à la fin de l'essai. On observe un anneau circulaire d'un diamètre de $12mm$ qui délimite la propagation de la fissure durant la première chute de force. Cette mesure confrontée avec le calcul par la méthode des éléments finis tend à valider complètement la méthode de détermination de la taille de la fissure liée à la chute de force.

A ce stade, la modélisation adoptée ici permet de reproduire les trois phases de l'essai de rupture locale. Le calcul effectué a permis de retrouver le coefficient de Poisson du matériau et de vérifier la bonne correspondance entre la taille de la fissure mesurée sur l'échantillon post-mortem et la taille de la fissure calculée à partir de l'ajustement sur la portion de courbe *BC*.

Dans ce travail de simulation, quelques hypothèses simplificatrices ont été prises. En effet, on considère que la vitesse de propagation de la fissure est uniforme et que le problème peut-être traité en petites déformations. Ces deux hypothèses ont été examinées dans la thèse de [Hoai-Nam \(2009\)](#). Avec la première hypothèse, il semble que la cinématique d'ouverture n'a pas d'incidence sur la réponse de la jonction bitumineuse et en particulier sur la chute de force qui correspond à la portion de courbe *AB*. La deuxième hypothèse n'a pas été vérifiée complètement. Il faut savoir que le phénomène d'émoussement de la fissure peut se produire sur des liants modifiés par les polymères dans des conditions de chargement bien déterminées. Une étude en grandes déformations serait nécessaire pour vérifier l'incidence sur le comportement d'une jonction bitumineuse.

F- Calcul des facteurs d'intensité En mécanique de la rupture, on utilise souvent la méthode des éléments finis pour déterminer les paramètres de fissuration avec le taux de restitution d'énergie (G) ou le facteur d'intensité de contraintes (K_I^{σ}). Cette méthode est plus adaptée pour

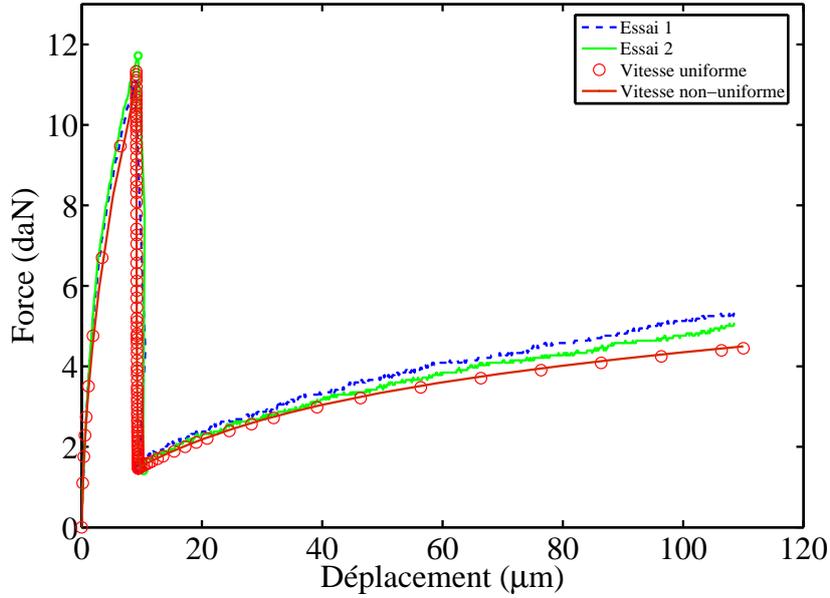


FIGURE 1.57 – Modélisation de l’essai de rupture locale avec le code Abaqus

résoudre des problèmes de structures présentant une géométrie complexe.

Habituellement, le facteur d’intensité de contrainte critique est défini pour les conditions d’initiation quasi-statique. Cependant, la rupture locale se présente comme une fissure qui se propage juste après une cavitation dans le film de bitume. Les conditions d’initiation de la fissure sont donc relativement différentes.

Par ailleurs, on ne reproduit pas le phénomène de cavitation dans la simulation mais on prévoit dans le maillage une cavité initiale équivalente à la taille du plus petit élément ($7\mu m$). Cette fissure initiale est très pratique pour l’étude de la phase d’ouverture de la fissure et les vérifications nécessaires ont été réalisées pour évaluer son incidence sur la réponse du matériau durant la phase d’étirement.

En prenant en compte les aspects liés à l’initiation, on détermine le facteur d’intensité de contrainte connaissant le champ des contraintes proche de la pointe de fissure. On détermine de la même manière le facteur d’intensité en déplacement à partir du champ des déplacements des nœuds proches de la pointe de fissure. Le mode I qui est le mode d’ouverture de la fissure correspond bien au mode de rupture de l’essai RULOB. Avec ce mode d’ouverture, on exploite ainsi le résultat donné par la mécanique de la rupture à l’aide de l’expression du facteur d’intensité de contrainte d’une fissure interne.

$$K_I^\sigma(a) = \lim_{r \rightarrow a^+} \sqrt{2\pi(r-a)} \sigma_{22}(r, 0) \quad (1.10)$$

$$K_I^u(a) = \lim_{r \rightarrow a^+} 2\sqrt{2\pi/(r-a)} u_2(r, 0) \quad (1.11)$$

La solution asymptotique s’obtient à partir de la résolution de l’équation intégrale du cas axisymétrique d’un problème de rupture avec les équations (1.10) et (1.11). En exploitant les résultats du champ des contraintes σ_{22} obtenu par la méthode des éléments finis, on peut déduire le facteur d’intensité de contrainte à la pointe de la fissure.

Sanford (2002) suggère une méthode basée sur le calcul par éléments finis. Cette méthode a déjà été appliquée sur un essai de flexion 3 points par Chailleux (2006) pour évaluer le facteur d'intensité de contrainte. Ce facteur est déterminé à partir du champ des contraintes proche de la pointe de la fissure. Si on trace la contrainte normale suivant la distance à partir de la pointe de fissure, on montre que le profil de la contrainte dans la zone de validité suit une loi linéaire.

La contrainte à proximité de la pointe de la fissure peut être développée en série comme suit (voir la thèse de Nguyen (2009)) :

$$\sigma = \frac{A_{-1}}{\sqrt{r}} + A_1\sqrt{r} + \dots + \mathcal{O}(r^{\frac{3}{2}}) = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} + A_1\sqrt{r} + \dots + \mathcal{O}(r^{\frac{3}{2}}) \quad (1.12)$$

Soit encore :

$$\sigma\sqrt{2\pi r} = K_1 + B_1\sqrt{r} + B_2r^{\frac{3}{2}} \quad (1.13)$$

Le facteur d'intensité de contrainte est déterminé à partir de l'intersection de la portion linéaire de la courbe de contrainte avec l'axe des ordonnées. Cette méthode permet ainsi d'obtenir une bonne approximation du facteur d'intensité de contrainte mais sa détermination dépend beaucoup du choix de la région linéaire.

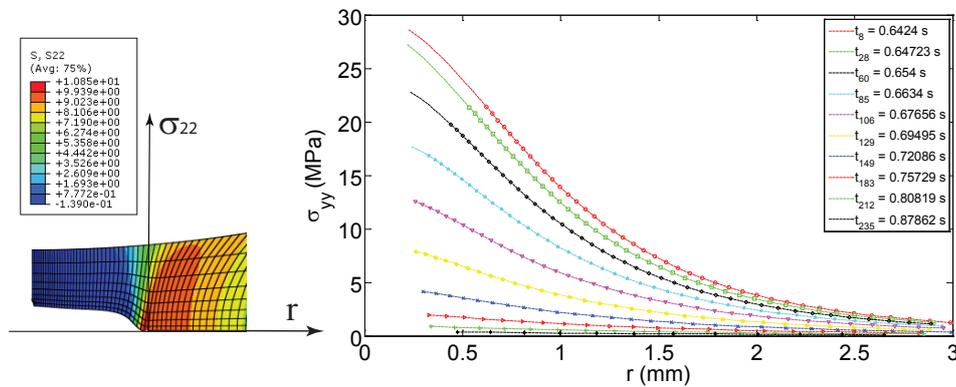


FIGURE 1.58 – Détermination du facteur d'intensité de contrainte à partir du champ des contraintes

Dans cette étude, la détermination du facteur d'intensité de contrainte s'effectue grâce à un programme de traitement écrit sous l'environnement PYTHON. Ce programme de traitement utilise comme données d'entrée les résultats issus du calcul ABAQUS. La figure 1.60 montre que le facteur K_I^σ décroît rapidement avec la taille de la fissure. Cette décroissance est observée pour toutes les vitesses de chargement.

Facteur d'intensité d'ouverture Le facteur d'intensité d'ouverture peut être déterminé à partir du champ de déplacement des lèvres de la fissure (Nguyen, 2009). Cette méthode dite cinématique permet de réécrire la relation du facteur d'intensité d'ouverture et le déplacement des lèvres de la fissure sous forme d'une droite :

$$[u_2]^2 = \left(\frac{1}{8\pi} (K_I^\varepsilon)^2 \right) \cdot r \quad (1.14)$$

Nous ne prenons en compte que les premiers points les plus proches de la pointe de la fissure car ces points respectent la linéarité de la relation (1.14).

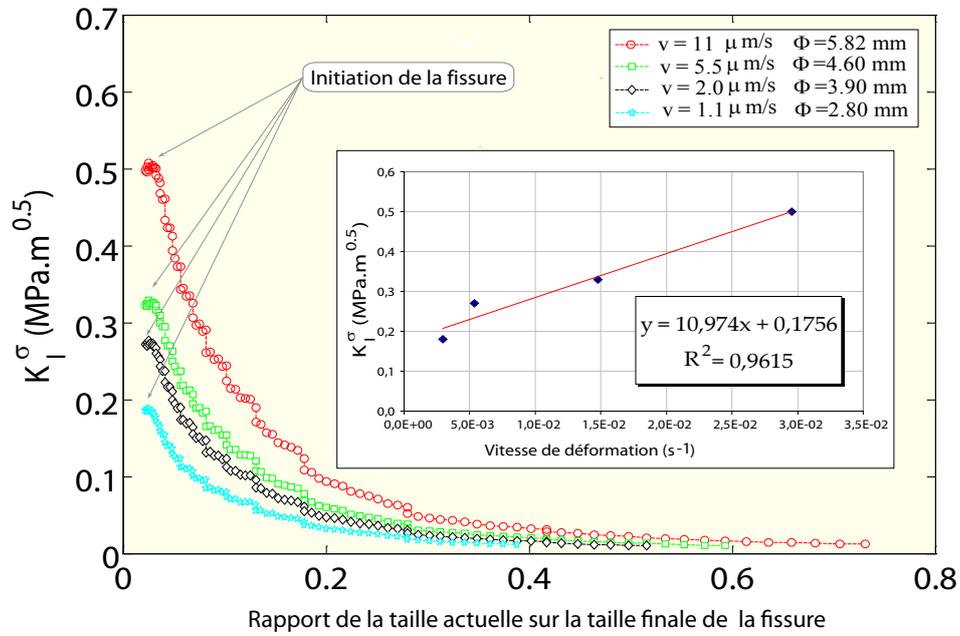


FIGURE 1.59 – Effet de la vitesse de déformation sur le facteur d'intensité des contraintes

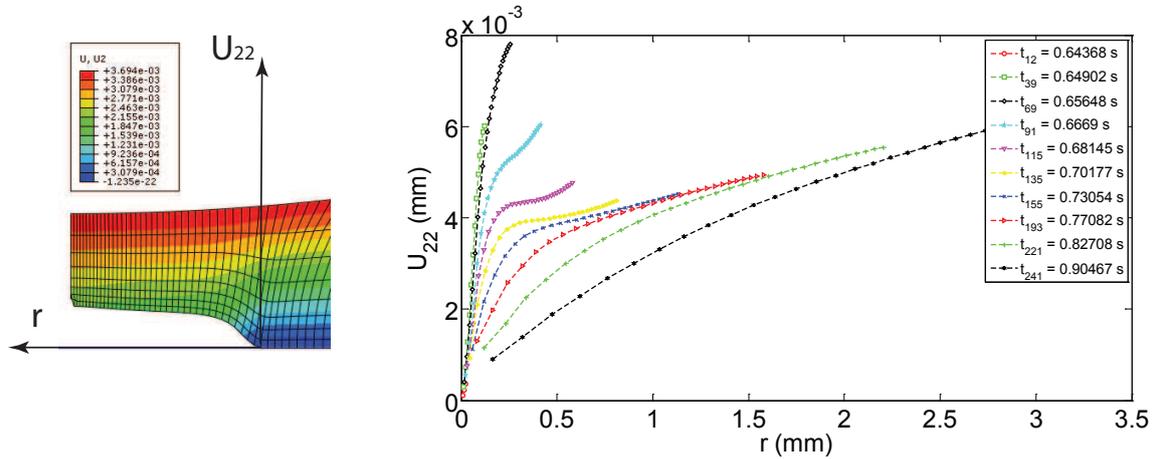


FIGURE 1.60 – Détermination du facteur d'intensité d'ouverture de la fissure à partir du champ de déplacement

I- Analyse de la propagation de la fissure à partir des facteurs d'intensité Habituellement, on utilise les trois paramètres suivants : le taux de restitution d'énergie G_I , le facteur d'intensité de contrainte K_I^σ et le facteur d'ouverture de la fissure K_I^u . Une fissure s'initie et se propage dans un matériau lorsque la contrainte dans la zone proche de la pointe de la fissure atteint une valeur critique. Cette valeur dépend uniquement des caractéristiques du matériau. Avec cette hypothèse, le facteur d'intensité de contrainte peut-être défini à l'aide du critère suivant : $K_I^\sigma = K_{IC}^\sigma$ (figure 1.61) ou plus généralement, le critère d'apparition d'une fissure peut s'exprimer comme suit :

$$\mathfrak{S}(K_I^\sigma, K_I^u) = 0 \quad (1.15)$$

Où \mathfrak{S} est une fonction dépendant du matériau.

En élasticité, le critère de Griffith en mode I est défini par une hyperbole $K_I^u \cdot K_I^\sigma = cste$ et le critère classique $K_I^\sigma = K_{IC}^\sigma$ est représenté par une demi-droite verticale ayant pour origine un point sur la bissectrice. Cette représentation est utilisée par différents auteurs pour interpréter la ténacité dynamique du verre par exemple (Kobayashi et al., 1983). Dans notre cas, la description de l'ouverture de la fissure dans le matériau est relativement difficile pour deux raisons : i) la fissure est créée par cavitation ii) le matériau est viscoélastique.

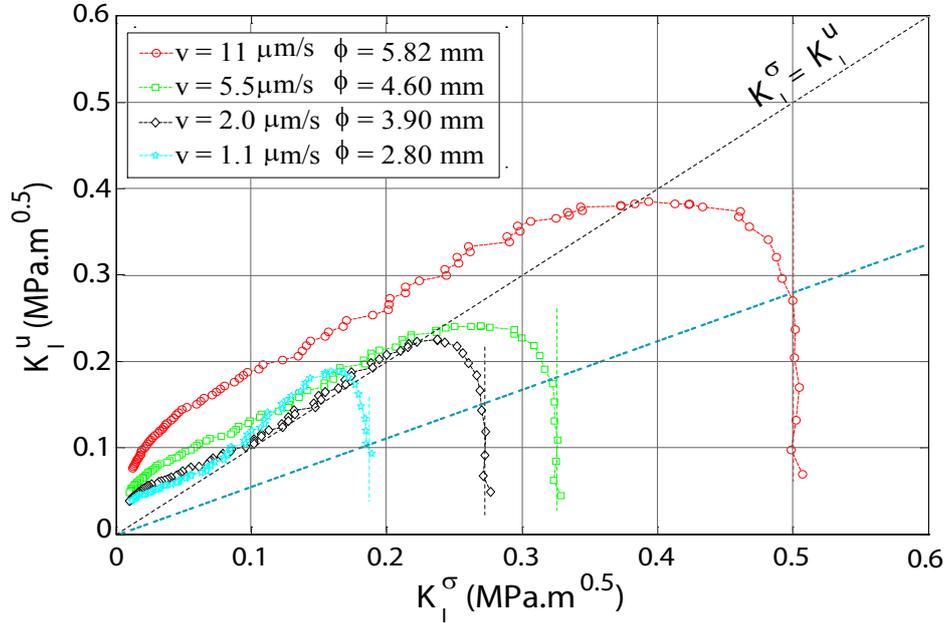


FIGURE 1.61 – Description de l'ouverture de la fissure dans le plan $K_I^u - K_I^\sigma$ à différentes vitesses de déformation

La représentation sur la figure 1.61 montre que le facteur d'intensité de contrainte à un instant proche du point d'initiation augmente avec la vitesse de déformation. Le facteur d'ouverture de fissure K_I^u atteint une valeur maximale lorsqu'on obtient l'égalité. À partir de la bissectrice, le facteur d'ouverture K_I^u décroît. On note au passage une dépendance linéaire entre le facteur d'intensité de contrainte avec l'aire de la fissure mesurée à la fin de la phase d'ouverture de la fissure.

$$K_I^\sigma = 0.078 * S_f \quad (1.16)$$

avec S_f la surface de la fissure.

Cette dépendance linéaire entre le facteur d'intensité de contrainte et la surface de rupture est un résultat satisfaisant car on retrouve ainsi une certaine cohérence des résultats obtenus entre les différentes vitesses d'essai.

Pour les faibles vitesses de déformation, l'approximation $K_I^\sigma \approx K_I^u$ reste valable et peut être utilisée dans la résolution des problèmes de fissuration par fluage par exemple. Lorsque la vitesse de déformation est plus importante, l'égalité entre K_I^σ et K_I^u n'est plus valable.

Conclusions

Après avoir proposé une approche pour déterminer la valeur du coefficient de Poisson lors de la phase d'étirement d'un film de bitume, on présente une interprétation de l'ouverture de la fissure à partir des champs locaux des contraintes et des déplacements dans la zone proche de la pointe de la fissure.

On montre également que le facteur d'intensité de contrainte croît linéairement avec la vitesse de déformation et qu'il existe une relation linéaire entre la taille de la fissure et le facteur d'intensité de contrainte.

En première approximation, l'égalité entre le facteur d'ouverture de la fissure et le facteur d'intensité de contrainte peut-être admise pour des vitesses de déformation relativement faibles. Cette égalité n'est plus valable pour des vitesses de déformation plus élevées.

Il serait intéressant de compléter les résultats présentés ici par d'autres études sur des liants de natures différentes. De même, des essais sur mastic (mélange de bitume avec des fines minérales) permettraient d'approcher encore mieux le comportement du bitume dans un enrobé. L'étude du mastic bitumineux permet de cerner l'influence des fines sur les conditions de propagation d'une fissure.

1.6 Perspectives de recherche

⊙ Contexte et état des connaissances

Les granulats forment le squelette rigide du mélange et présentent des pseudo-contacts intergranulaires avec une faible épaisseur de mastic difficilement quantifiable dans l'espace mais suffisant pour assurer un collage entre les granulats. Autrement dit, la répartition du mastic semble définir la phase continue d'un composite avec les granulats comme inclusions rigides.

L'observation des enrobés bitumineux avec un fort grossissement ($X50$ à $X100$) permet de distinguer une phase intermédiaire qu'on ne peut attribuer exclusivement ni au granulat ni au mastic. Elle est constituée par la rugosité de surface du granulat et les interstices remplis par le liant bitumineux. On peut définir cette zone intermédiaire comme l'interphase entre le granulat et le bitume. L'épaisseur de cette interphase dépend de la nature des granulats. Elle peut-être relativement épaisse avec les granulats poreux (cas des calcaires tendres) ou faible voir inexistante avec d'autres granulats comme le quartzite siliceux ou le quartz par exemple. Pour aller plus loin, l'examen détaillé de l'interphase et la connaissance de la physico-chimie des matériaux en contact permettent de comprendre les problèmes liés à l'adhésivité liant-granulat.

Cependant, l'adhésivité dépend également de la viscosité du liant lors de l'enrobage. Plus la viscosité du bitume est faible, meilleure sera le collage à l'interface. Dans le cas de l'application à chaud, on vérifie que les granulats sont bien secs puis on procède à l'enrobage à des températures élevées ($\approx 160^\circ\text{C}$) pour former un enrobé bitumineux (ce procédé d'enrobage représente 60 % du marché en France). La fluidité du bitume à cette température permet un mouillage convenable des granulats pour couvrir et remplir les pores présents à la surface du granulat.

L'engouement récent des industriels pour les enrobés tièdes et semi-tièdes traduit le besoin de réduire à la fois les émissions de fumées et le coût énergétique lors de la fabrication. Par rapport à l'application à chaud, on réduit la température d'enrobage et on accepte une teneur en eau non nulle pour les granulats.

Lors de la fabrication, la présence de l'eau va modifier énormément les conditions de mouillage du liant avec la surface des granulats. Les aspects physiques et électrochimiques interviennent directement lors du malaxage des constituants. Les caractéristiques physico-chimiques aux interfaces seront probablement influencées. Toutes choses égales par ailleurs, l'écart constaté sur la raideur après murissement entre une grave-émulsion (application à froid) et une grave-bitume (application à chaud) permet de considérer que cette zone intermédiaire ou interphase peut jouer un rôle non négligeable sur les performances des matériaux routiers. Un examen détaillé de ce qui se passe à l'interface liant-granulat. Plus généralement, un examen des interfaces y compris entre liant recyclé et liant d'apport est devenu incontournable.

⊙ Nouvelle approche proposée

Si les essais mécaniques sur les enrobés bitumineux permettent d'apprécier les différences de comportement selon le procédé d'enrobage utilisé, on relève peu d'études sur l'interface liant-granulat et encore moins sur l'interface liant recyclé-liant d'apport.

La complexité du comportement du bitume autorise alors un grand nombre de types d'essais de caractérisation (chimique, mécanique et physique). Ces essais indépendants et donc de caractéristiques définissables ne permettent que difficilement des corrélations pour expliquer des interactions et finalement obtenir un indice de qualité et de performance dont la représentativité et la pertinence peuvent être remises en cause.

Plutôt que de traiter séparément la rhéologie (écoulement, fluage, relaxation), la physico-chimie ou la mécanique de la rupture, il semble qu'on peut également adopter un raisonnement pluri-

disciplinaire prenant en compte les deux types d'interface :

1. L'interface granulat-bitume : affirmer qu'en sein d'un mastic le bitume se présente en pellicule me semble constituer une approche trop simpliste ou affirmer que l'évaluation du liant peut se faire dans la masse est irréaliste. D'ailleurs, les essais mécaniques et physico-chimiques dans la masse du bitume ne reflètent pas les conditions réelles. Si on isole un granulat seul, on remarque que le mastic forme une couche intimement liée et de faible épaisseur mais variable. Nous avons ainsi une interface mixte minéral-organique très complexe, avec des phénomènes de restructuration et de migration de certains éléments constitutifs du bitume dans la porosité du granulat. L'étude sur des films de mastic ou de liant me semble plus réaliste et les couplages physico-chimiques seront pris en compte tout naturellement.
2. L'interface liant recyclé-liant d'apport : La prise en compte de cet interface permet de prendre en compte à la fois le recyclage des fraisats d'enrobé et les procédés d'enrobage (à chaud, tiède, semi-tièdes, froid, etc.). Lorsqu'on recycle un matériau, on recouvre l'ancienne couche de mastic par une nouvelle couche. Nous obtenons ainsi une interface organique-organique avec probablement des phénomènes de restructuration et de migration de certains éléments chimiques.

Par rapport à ces deux types d'interface, la généralisation à d'autres cas de figure avec d'autres types de liant (ciment, liant végétal, résine) ou une combinaison des procédés d'enrobage, pour reproduire le recyclage, reste possible.

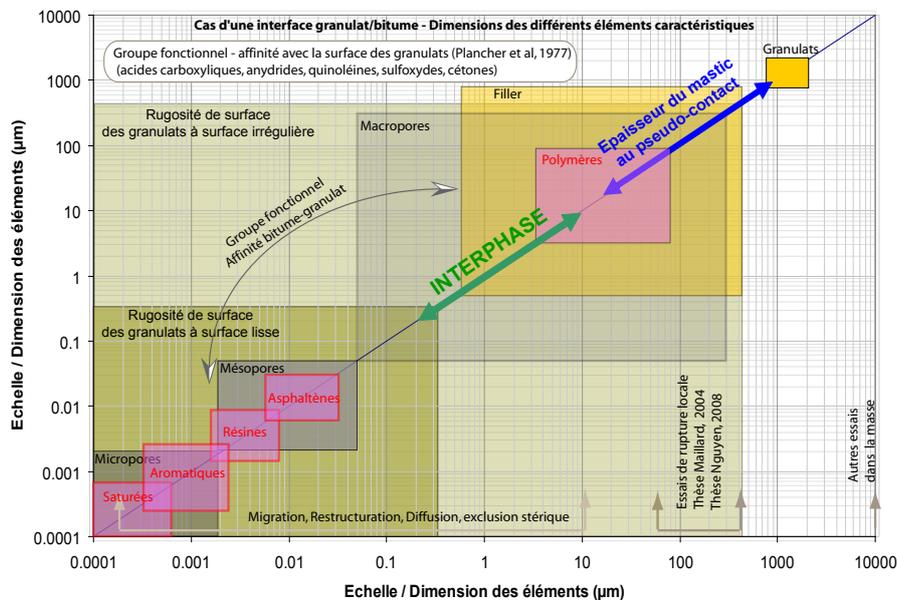


FIGURE 1.62 – Description générale des éléments caractéristiques de l'interface granulat/bitume

Cette nouvelle approche s'inspire de l'expérience acquise durant les années passées au LCPC. Elle introduit des notions de la physique et de la chimie des interfaces et des films minces qui sont largement utilisées dans d'autres domaines d'application (optique, micro-électronique et plus généralement les techniques de traitement de surface).

Les objectifs du projet proposé doivent répondre à l'attente des gestionnaires routiers et des collectivités en matière de durabilité et du respect de l'environnement. Certes, il y a le développement de nouvelles méthodes d'analyse et de caractérisation des interfaces minéral-organique pour le couple granulat-bitume et organique-organique pour l'étude de la compatibilité liant

recyclé-liant d'apport. Mais, il faut également intégrer la valorisation des travaux de recherche dans le domaine industriel. Cette partie valorisation comporte implicitement la recherche de solutions innovantes et pratiques pour réduire les émissions de fumées, accroître la compatibilité liant recyclé et liant d'apport. Pour répondre à ces objectifs, le projet de recherche comporte

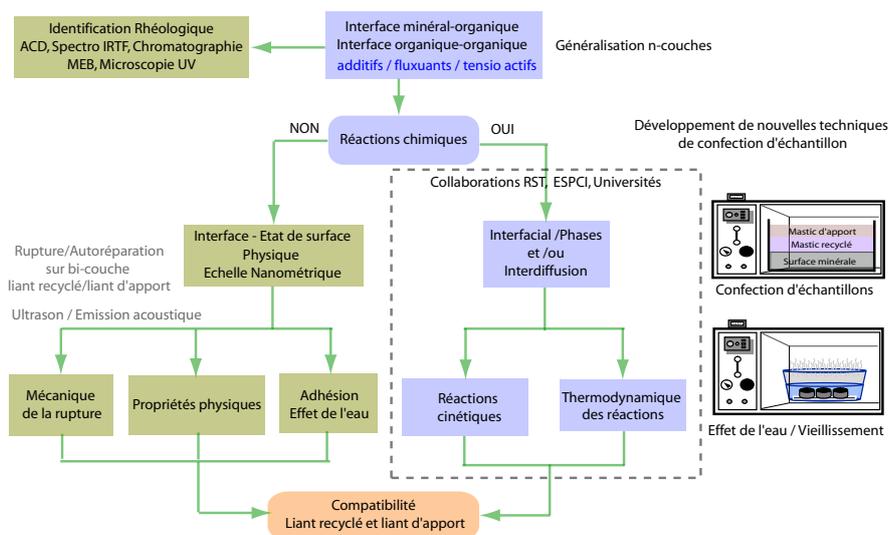


FIGURE 1.63 – Schéma de principe pour traiter le volet physico-chimie des interfaces

trois volets :

1. Le premier volet est fondamental car il comporte toutes les investigations physico-chimiques sur les liants et les matériaux routiers. Un effort de recherche important reste à faire dans l'étude des interfaces en utilisant toutes les techniques d'analyse actuelles IRTF-ATR, ACD, diffraction aux rayons X, Microscopie UV, etc. Des interprétations de ces techniques sont à construire pour suivre et évaluer l'interdiffusion aux interfaces. Dans cette partie, une collaboration avec d'autres équipes de recherche très en amont sur la chimie des interfaces sera nécessaire (ESPCI, Institut Sardon, etc.) Des tests de traction et de rhéologie classiques complètent les expériences de probe-tack qui déterminent l'énergie d'adhésion et les mécanismes de décollement à l'interface. Cette combinaison de tests permet de comprendre les caractéristiques à l'interface des matériaux et ainsi d'orienter la chimie pour améliorer les propriétés de l'interface. Par ailleurs, il y a nécessairement des innovations à apporter en termes de matériel d'essai pour simuler les opérations de fabrication (émissions de fumées et enrobage du liant recyclé par le liant d'apport). Elle peut se faire sur un ensemble de granulats mais on peut aussi l'étudier plus localement sur une surface plane (granulat scié par exemple) et procéder ensuite à un empilement par étalement d'un ou de plusieurs films de bitume. L'ensemble sera testé sous un environnement contrôlé (température, humidité, poussière, etc.). En exploitant les travaux de thèse de Valérie Viranaiken(2007-2010), un système miniaturisé de récupération des fumées ou d'éléments volatils (COV) à l'aide de capteurs appropriés doit également être étudié.
2. Le deuxième volet concerne la compatibilité liant recyclé-liant d'apport ou les émissions de fumées par exemple à l'échelle d'un mélange bitumineux. Ce deuxième volet repose essentiellement sur les méthodes classiques utilisées pour la caractérisation des enrobés bitumineux (module, fatigue, arrachement, etc.). On exploitera les résultats des travaux de thèse E. Castaneda sur la tenue à l'eau et l'apport des travaux de la thèse de [Maillard \(2006\)](#) pour identifier la rupture et l'autoréparation des liants bitumineux. La capacité

d'autoréparation peut-être exploitée comme un indicateur de compatibilité liant recyclé-liant d'apport.

3. Le troisième et dernier volet concerne la valorisation des résultats des travaux en laboratoire. Dans cette partie, il y a un effort à faire dans le développement de solutions techniques pour améliorer la durabilité tout en réduisant l'impact environnemental des procédés de construction. Un partenariat avec les entreprises dans le développement des solutions techniques paraît essentiel pour promouvoir les avancées scientifiques et répondre ainsi aux préoccupations de notre société.

Bibliographie

- Abaqus. Abaqus users's documentation, version 6.4, 2004. URL www.hks.com.
- A. E. Abd, P. Horny, D. Breyse, A. Denis, and C. Chazallon. A simplified method of prediction of permanent deformations of unbound pavement layers. In *UNBAR 6, International Symposium on Unbound Aggregates in Roads*, Nottingham, 2004.
- Y. Alam. Détermination des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux à partir des caractéristiques des constituants. Master's thesis, Research report in english, Université de Marne-la Vallée, Master Génie Civil et Mécanique, Spécialité Mécanique des Structures, 2007.
- N. Alberola, C. Bas, and P. Mele. Composites particuliers : modélisation du comportement viscoélastique, assortie du concept de percolation. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, t319, Série II, 1994.
- D. Anderson, L. Champion-Lapalu, M. Marasteanu, Y. L. Hir, D. Martin, and J. Planche. Low temperature thermal cracking of asphalt binders as ranked by strength and fracture properties. In *Transportation Research Board*, 1993.
- P. Audebert and A. Temmar. Comparison of experimental results with analytical solutions and two dimensional model of oak drying in an evacuated kiln. *Drying Technology*, 15 Issue 5 : 1633–1652, 1997.
- P. Audebert, A. Temmar, F. Hammoum, and C. Basilico. Vacuum drying of oak wood : moisture, strains and drying process. *Drying Technology*, 15 Issue 9 :2281–2302, 1997.
- H. U. Bahia, H. Zhai, K. Bonnetti, and S. Kose. Non-linear viscoelastic and fatigue properties of asphalt binders. *Journal Association of asphalt Paving Technologists*, 68 :1–34, 1999.
- J. Balay, A. G. Correia, P. Jouve, P. Horny, and J. Paute. Etude expérimentale et modélisation du comportement mécanique des graves non traitées et des sols supports de chaussées : Dernières avancées. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 216 :Juillet–Août 1998, 1998.
- J.-M. Balay, H. Chollet, D. Cuisinier, F. Hammoum, and F. Kuhn. Bilan du projet devin - durabilité et interaction véhicule infrastructure. Technical report, INRETS-LCPC-LMT, 2008.
- H. D. Benedetto, B. Delaporte, and C. Sauzéat. Three-dimensional linear behavior of bituminous materials : Experiments and modeling. *International Journal of Geomechanics*, 7(2) :149–157, 2007.

- Y. Berthaud, S. Calloch, F. Collin, F. Hild, and Y. Ricotti. Analysis of the degradation mechanisms in composite materials through a correlation technique in white light. In *IUTAM Symposium on Advanced Optical Methods and Applications in solid Mechanics*, 1998.
- D. Bodin. *Modèle d'endommagement cyclique : Application à la fatigue des enrobés bitumineux*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes, 2002.
- G. Boitier, J. Chermant, L. Chermant, F. Doreau, and J. Vicens. Morphologie par analyse d'image de composites à fibres longues : principes et résultats. *La revue de Métallurgie CIT / Science et Génie des matériaux*. Décembre 1997, Décembre 1997 :1517–1536, 1997.
- J. Boselli, P. Pitcher, P. Gregson, and I. Sinclair. Quantitative assessment of particule distribution effects on short crack growth in sicp reinforced al-alloys. *Scripta materialia*, 38 N° 5 :839–844., 1998.
- N. Brachet. L'essai de rupture locale répétée sur bitume : effet de la température et du temps de charge. Rapport de projet de fin d'études, IUP Lorient - LCPC, 1999.
- D. Breyse, V. Domec, S. Yotte, and C. de La Roche. Better assessment of bituminous materials lifetime accounting for the influence of rest periods. In *Cracking in pavements, Fifth international RILEM conference*, Limoges, 2004.
- R. Brunner. Die schnittholz-trocknung im vakuum - eine echte alternative bietet sich an / le séchage du bois sous vide : une véritable alternative. *Holz-Zentralblatt*, 54, 55 & 56, 1991.
- R. Brunner. Die tage der konventionellen schnittholz-trocknung sind gezahlt - dampf statt luft / séchage du bois : fini le séchoir conventionnel, la vapeur remplace l'air. *Holz-Zentralblatt*, 52 & 53, 1997.
- Cast3M-CEA. *Castem 2007, Notice d'utilisation*. Castem. CEA, Direction des réacteurs nucléaires, 2005.
- A. Chabot, P. Tamagny, D. Duhamel, and D. Poché. Visco-elastic modeling for asphalt pavements software viscoroute. In *10th International Conference on Asphalt Pavements*, 12-17 August, Québec, Canada, 2006.
- E. Chailleux. A mathematical-based master-curve construction method applied to complex modulus of bituminous materials. *International Journal of Road Materials and Pavement Design*, 2006.
- R. Chambard, L. Francken, J. Lesage, A. Stawiarski, and C. Such. *Les liants hydrocarbonés*. Ed. Hermès-Lavoisier, 2003.
- S. Chan. *Fractography and failure mechanisms of polymers and composites*. Edited by Anne C. Roulin-Moloney - Elsevier Science Publishing Co Inc, pp. 147-162, 1989.
- O. Chenevez. Essai de rupture locale répétée du bitume. Rapport de projet de fin d'études, École Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg, 2001.
- R. Christensen. Solutions for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 27 :315–330, 1979.
- R. Christensen and D. Anderson. Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cement. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 61 :67–116, 1992.

- S. Cordel, H. di Benedetto, M. Malot, P. Chaverot, and D. Perraton. Fissuration à basse température des enrobés bitumineux - essai de retrait empêché et émission acoustique. In *6th RILEM Symposium PTEBM'03*, 2003.
- M. Coster and J. Chermant. *Précis d'analyse d'image*. Les presses du CNRS, 560 pages., 1985.
- D. Cuisinier, Y. Berthaud, M. Francois, F. Hild, and F. Hammoum. Utilisation de la corrélation d'images pour déterminer les paramètres élastiques d'un enrobé bitumineux. In *Colloque National Mecamat / Ecole de Mécanique des Matériaux - Approches multiéchelles en mécanique des matériaux*, 2006.
- Y. Dafalias. Corotational rates for kinematic hardening at large plastic deformations. *Journal of Applied Mechanics*, 50 :561565., 1983.
- C. de La Roche. *Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux. Expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 1996.
- H. di Benedetto and C. de La Roche. Bituminous binders and mixtures : State of the art and interlaboratory tests on mechanical behavior and mix design. Technical Report L. Francken ed. - RILEM Report 17 : 137180, RILEM, 1998.
- E. Doubbaneh. *Comportement mécanique des enrobés bitumineux des petites aux grandes déformations*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1995, 1995.
- D. Duhamel, A. Chabot, P. Tamagny, and L. Harfouche. Viscoroute : Modélisation des chaussées bitumineuses. *Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées*, 258-259 :89-103, 2005.
- M. Duriez. *Bétons hydrocarbonés - Technologie des essais*. Ed. Dunod, 1950.
- W. Ellington and H. Berger. Three-dimensional radiographic imaging. *Academic Press, London Research Technics Non destructive testing*, 4 :1-39., 1980.
- G. Fantozzi. Rupture des matériaux, 3ème partie. Notes de cours, INSA, 1995.
- J. Ferry. *Viscoelastic Properties of Polymers*. John Wiley and sons, New York, 1980.
- L. Gaillet, C. Tessier, D. Bruhat, and R. Michel. Auscultation par émission acoustique d'ancrages de câbles multicouches. *Bulletin de Liaison du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 250-251 :55-3, Août 2004 2004.
- S. Ghosh, Z. Nowak, and K. Lee. Tessellation-based computational methods for the characterization and analysis of heterogeneous microstructures. *Composite Science and Technology*, 57 : 1187-1210, 1997.
- R. Gubler, M. Partl, F. Canestrari, and A. Grilli. Influence of water and temperature on mechanical properties of selected asphalt pavements. *Materials and Structures*, 38 :523-532, 2005.
- R. Guinez. La tomographie analogique aux rayons x et gamma. In *Journées Physique : les méthodes d'auscultation et d'imagerie - Les arcs - 14-17 décembre 1987*, p.57-60, 1987.
- S. Hamlat. *Apport de la mécanique du contact dans la prédiction des caractéristiques de surface d'un revêtement routier*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2007.
- S. Hamlat, F. Hammoum, P.-Y. Hicher, C. Stéfani, and J.-P. Terrier. Evaluation de la résistance aux efforts tangentiels des revêtements routiers. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 267 :49-60, 2007.

- F. Hammoum. *Etude numérique des grandes transformations de matériaux élastoplastiques anisotropes*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1993.
- F. Hammoum and P. Audebert. Modelling and simulation of (visco)-plastic behaviour of wood under moisture change. *Mechanics Research Communications*, 26, N° 2 :203–208, 1999.
- F. Hammoum and P. Hornych. Quantitative study of bituminous materials microstructure by digital image analysis. In *3rd Eurasphalt and Eurobitume Congress*, volume 2, pages 1946–1955, Vienne, 2004.
- F. Hammoum, C. de La Roche, J. M. Piau, and C. Stefani. Experimental investigation of fracture and healing of bitumen at pseudo-contact of two aggregates. In *International Society for Asphalt Pavements*, Copenhagen, 2002.
- F. Hammoum, V. Bertaud, and P. Bonnet. Identification de la structure interne des matériaux routiers par analyse d'images. In *Journées des Sciences de l'Ingénieur 2003, Dourdan*, 2003.
- F. Hammoum, A. Chabot, D. Saint-Laurent, and H. Chollet. Accelerating and decelerating effects of tramway loads moving on bituminous pavement. *Materials and Structures*, 2010.
- Z. Hashin. Assessment of the self consistent scheme approximation : conductivity of particulate composites. *Journal of Composite Materials*, 2 :284, 1968.
- J. Heck, J. Piau, J. Gramsammer, J. Kerzreho, and H. Odéon. Thermo-visco-elastic modelling of pavements behaviour and comparison with experimental data from lcpc test track. In *Proc 5th International Conference on Bearing Capacity of Roads and Airfields, Trondheim, Norway*, 1998.
- J. V. Heck. *Modélisation des déformations réversibles et permanentes des enrobés bitumineux - Application à l'orniérage des chaussées*. Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2001.
- A. Hervé and A. Zaoui. Modelling the effective behavior of nonlinear matrix-inclusion composites. *European Journal of Mechanics, A/Solids*, 9, N° 6 :505–515., 1990.
- P. Hicher. *Experimental behavior of granular materials*. B. Cambou (Ed.) Behavior of Granular Materials - Springer Wien New York, 1998.
- P. Hicher, A. Drouadji, and D. Fedghouche. Elastoplastic modelling of the cyclic behaviour of granular materials. In *Proc. International Workshop on modelling and Advanced Testing for Unbound Granular Materials, Lisbonn, Portugal*, 1999.
- N. Hoai-Nam. *Etude numérique de la fissuration d'un milieu viscoélastique : Analyse de l'essai de rupture sur bitume*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, juin 2009.
- P. Hornych, J. Corté, and J. Paute. Etude des déformations permanentes sous chargements répétés de trois graves non traitées. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 184, mars-avril, 1993.
- C. Huet. *Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés*. Thèse de doctorat d'ingénieur, Faculté des Sciences de l'Université de Paris, 1963.
- F. Jiménez and R. Recasens. Characterization procedure of asphalt binders with the cantabro test u.c.l method. In *Proceedings of 5th Eurobitume Congress, Stockholm Vol. IA (June 1993) pp.209-213.*, 1993.

- Y. Jolivet and M. Malot. Evaluation de la résistance aux efforts tangentiels des enrobés drainants et bétons bitumineux très minces sur le manège total. *Revue Générale des Routes et Aérodrômes*, 770 :46–50, 1999.
- Y. Jolivet, M. Malot, and B. Roncin. Apport de l'émission acoustique dans la simulation de l'endommagement de structures bitumineuses. In *5th Eurobitume congress*, pages 526–530, Stockholm, 1993.
- I. Jurine. Essai de rupture locale répétée du bitume. Master's thesis, Rapport PFE à l'École Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg, 2000.
- R. Ketcham and N. Shashidhar. Quantitative analysis of 3-d images of asphalt concrete. In *Annual Meeting of the Transportation Board, January 2001, Washington DC*, 2001.
- A. Kobayashi, A. Emery, and B. Liaw. *Dynamic fracture toughness of glass*. in Fracture Mechanics of Ceramics, New York, Bradt R.C. and Coll, plenum press edition, 1983.
- S. Kose, M. Guler, H. Bahia, and E. Masad. Distribution of strains within asphalt binders in hma using imaging and finite element techniques. In *Annual Meeting of the Transportation Board, January 2000, Washington DC.*, 2000.
- A. Kumar, T. Jayakumar, B. Raj, and K. K. Ray. Correlation between ultrasonic shear wave velocity and poisson's ratio for isotropic solid materials. *Acta materialia*, 51 :2417–2426, 2003.
- A. Lachihab. *Un modèle numérique pour les composites biphasés matrice -inclusions rigides : Application à la détermination des propriétés élastiques et en fatigue des enrobés bitumineux*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004.
- J. Lamontagne, P. D. P, V. Mouillet, and J. Kister. Comparison by fourier transform infrared (ftir) spectroscopy of different ageing techniques : application to road bitumens. *Fuel*, 80 : 483–488, 2001.
- LCPC. *Catalogue des dégradations de surface des chaussées*. Ed. LCPC, Paris Cedex 15, 1998.
- LCPC et SETRA. *Conception et dimensionnement des structures de chaussées - Guide technique*. LCPC et SETRA, Paris, Dec 1994.
- J. C. Lenain, A. Proust, and D. Leroy. Applications avancées de l'émission acoustique dans le domaine du génie civil. In *Méthodes d'évaluation non destructives pour le génie civil*, Nantes, 1999.
- D. Lesueur. *Propriétés mécaniques des liants routiers - Relation structure -propriétés*. Thèse de doctorat, INSA Lyon, 1996.
- D. Lesueur. The colloidal structure of bitumen : Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145 :4282, 2009.
- B. Loret. On the effects of plastic rotation in the finite deformation of anisotropic elastoplastic materials. *Mechanics of Materials*, 2 :287304, 1983.
- B. Loret, F. Hammoum, and Y. F. Dafalias. A note on the accuracy of stress-point algorithms for anisotropic elastic-plastic media. *Computer Methods in applied Mechanics and Engineering*, 98 :399–409., 1992.

- B. Loret, F. Hammoum, and Y. F. Dafalias. Computational aspects of large elastoplastic deformations in the presence of anisotropy and plastic spin. *Computer Methods in applied Mechanics and Engineering*, 105 :151–180., 1993.
- S. Maillard. *Fissuration et autoréparation des liants bitumineux - Apport de l'essai de Rupture Locale Répétée sur Bitume*. Thèse de doctorat, l'École Central de Nantes et l'Université de Nantes, Juin 2006.
- S. Maillard, C. de La Roche, F. Hammoum, C. Such, and J.-M. Piau. Bitumen healing investigation using a specific fracture test. *International of Road Materials and Pavement Design*, 5 Special Issue EATA :45–63, 2004.
- S. Maillard, C. de La Roche, F. Hammoum, E. Castaneda, and C. Such. Desarrollo de un ensayo de caracterización del comportamiento a la ruptura y a la autoreparación del asfalto en película delgada. *Rev. Asfaltos y Pavimentos*, 11 :14–18, Décembre 2005 2005.
- J. Mandel. Sur les corps visco-élastiques à comportement linéaire. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences*, 241 :1920–1912, 1955.
- J. Mandel. *Plasticité classique et viscoplasticité*. Courses and Lectures, No. 97, ICMS, Udine Springer, New York, 1971.
- J. Mandel. Sur les corps visco-élastique à comportement linéaire. Technical Report 241, Compte Rendu de l'Académie des Sciences, 1995.
- T. Martelin. Technique de corrélation d'images appliquée à la localisation des déformations dans un enrobé bitumineux. Master dea, Laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique - Ecole des Mines, 2003.
- E. Masad and J. Button. Unified imaging approach for measuring aggregate angularity and texture. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 15 N° 4 :273–280, 2000.
- E. Masad, N. Somadevan, H. U. Bahia, and S. Kose. Modelling and experimental measurements of strain distribution in asphalt mixes. *Journal of Transportation Engineering*, 127 :477–485, 2001.
- V. Mouillet. *Spectroscopies des liants routiers : nouvelles approches macroscopique et microscopique*. Thèse de doctorat, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille III, 1998.
- F. Moutier. Etude statistique de l'effet de la composition des enrobés sur leur comportement en fatigue et leur module complexe. *Bulletin de Liaison du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées*, 172 :33–41, 1991.
- H.-N. Nguyen. *Etude Numérique de la fissuration d'un milieu viscoélastique : Analyse de l'essai de rupture sur bitume*. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2009.
- M. N. Partl, K. Scrivener, and P. J. Bartos. From nanocem to nanobit nanobit ? - perspective on nanotechnology in construction materials with a focus on asphaltic materials. In *NSF Workshop on Nanomodifications of Cementitious Materials - 8th – 11th August 2006, University of Florida - Gainesville FL*, 2006.
- E. C. Pinzon. *Contribution de méthodes non destructives à l'évaluation de l'effet de l'eau sur les enrobés bitumineux*. Thèse de doctorat, Université de Nantes - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2004.

- E. C. Pinzon and C. Such. Evaluation of moisture sensitivity of bituminous mixtures by a complex modulus approach. *Transportation Research Record*, 1891 :62–67, 2004.
- J. Pritz. Measurement methods of complex poisson's ration of viscoelastic materials. *Applied Acoustics*, 60 :279–292, 2000.
- A. Quispitupa, B. Shafiq, F. Just, and D. Serrano. Acoustic emission based tensile characteristics of sandwich composites. *Composites : Part B*, 35 :563–571, 2004.
- G. Ramond and C. Such. Le module complexe des liants bitumineux. Rapport technique CR32, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2003.
- S. Roth. L'essai de rupture locale répétée du bitume. Mise au point du protocole expérimental et premiers résultats. Rapport de projet de fin d'études, École National Supérieur des Arts et Industries de Strasbourg, 1997.
- J. C. Russ and R. T. Dehoff. *Practical Stereology*. Published by Plenum Press, New York, NY - 2nd Edition, 2001.
- M. Saka and T. Uchikawa. Simplified nde of a closed vertical crack using ultrasonics. *NDT&E International*, 28(5) :289–296, 1995.
- R. Sanford. *Principes of fracture mechanics*. Prentice Hall, 2002.
- D. Seghers, J. Stoop, W. Van den bergh, S. Vansteenkiste, J. De Visscher, F. Hammoum, and R. Reynaert. Research to the applicability of the its-r test as a ravelling indicator for evaluation of water sensitivity of sma mixtures. In *11th International Conference on Asphalt Pavements - ISAP*, Nagoya (japan), 2010.
- N. Shashidar. X-ray tomography of asphalt concrete. *Journal of Transportation Research Board*, 1681 :186–192, 2000.
- M. Shaterzadeh. *Etude et modélisation physique et mécanique du comportement viscoélastique et plastique de composites particuliers à matrice polymère*. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 1997.
- SHRP. Binder characterization and evaluation, volume 3 : Physical characterization. Technical report, Strategic Highway Research Program, 1994.
- C. Stéfani. Etude du phénomène de fatigue dans les matériaux composites bitumineux - additif à la note du 25 juin 1987 : essai de rupture locale répétée du bitume. Note interne, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 1988.
- C. Stéfani. Proposition d'un essai d'arrachement. Note interne, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2000.
- E. Tarbuck and F. Lutgens. *The earth : an introduction to physical geology*. Merril Publishing Company, Columbus, Ohio, 1987.
- A. Temmar. *Contribution à l'étude des phénomènes de transfert lors du séchage sous vide par contact du bois massif*. Thèse de doctorat, Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand, 1994.
- Relations between the composition of bitumen and their rheological properties*, volume 2, Bruxelles, 1990. Theoretical and Applied Rheologica - Proceedings XIth International Congress of Rheology.

- N. W. Tschoegl, W. G. Knauss, and I. Emri. Poisson's ratio in linear viscoelasticity - a critical review. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 6 :3–51, 2002.
- E. Xolin. Comportement à la fissuration de matériaux routiers. Rapport de projet de fin d'études, INSA, 2002.
- P. Zysset and A. Curnier. An alternative model for anisotropic elasticity based on fabric tensor. *Mechanics of Materials*, 21 :243–250, 1995.

Publications Scientifiques et Techniques

2.1 Brevets

1. Stéfani C., Hammoum F., Merliot E., Cottineau L.-M, Dispositif et procédé permettant la mesure de phénomènes tribologiques, Brevet N° FR 06 50 054 déposé le 06 janvier 2006, 15 pages.
Brevet européen - EP 1806573(<https://data.epo.org/publication-server/search>)

2.2 Chapitres d'ouvrages

1. Hammoum F. (*coordinator of chapter 8*), Harrington P., Chandler J., Heinrichsen A., Thoergesen F., Nielsen E., Lloyd W., Vulcano-Greullet N., *Construction issues, Economic Aspects and Risk Assessment*, Chapter 8 of the report - Long-Life Surfaces for Busy Roads, ISBN : 9789282101209, OECD Publishing (version en langue anglaise), Lavoisier (version en langue française), pp.137-146
(<http://www.internationaltransportforum.org/jtrc/infrastructure/pavements/07LongLifeSumma.pdf>)

2.3 Articles parus dans des revues internationales à comité de lecture

1. Mauduit C., Hammoum F., Piau J-M., Mauduit V., Ludwig S., Hamon D. (2010) *Quantifying expansion effects induced by Freeze-Thaw cycles in partially water saturated bituminous mix : Laboratory Experiments*, International Journal of Road Materials and Pavement Design, Special Issue, EATA 2010, article soumis le 23 juillet 2009 - *Review de l'article attendu pour 1 février 2010.*
2. Hammoum F., Chabot A. Saint-Laurent D., Chollet H. (2010) *Accelerating and decelerating effects of tramway loads moving on bituminous pavement*, Materials and Structures, pp. 22, DOI 10.1617/s11527-009-9577-9.
3. Maillard S., Hammoum F., de La Roche C. et Such C. (2010) *Towards a better understanding of self-healing phenomenon in a thin film of bitumen*, Mechanics of Advanced Materials and Structures, pp 16, article en révision.
4. Hammoum F., Chailleux E., Nguyen H-N, Erhlacher A., Piau J.-M. and Bodin D.(2009), *Experimental and numerical analysis of crack initiation and growth in thin film of bitumen*, International Journal of Road Materials and Pavement Design,1, 2009.

5. Maillard S., de La Roche C., Hammoum F., Such C. et Piau J.-M.(2004), *Bitumen Healing investigation using a specific fracture test*, International Journal of Road Materials and Pavement Design, 5, Special Issue, EATA 2004, pp. 45-63.
6. Hammoum F. and Audebert P.(1999), *Modelling and simulation of (visco)-plastic behaviour of wood under moisture change*, Mechanics Research Communications, 26, N° 2, pp. 203-208, 1999.
7. Audebert P., Temmar K., Hammoum F. and Basilico C. (1997), *Vacuum drying of oakwood : moisture, strains and drying process*, Drying Technology : An international Journal, 15, Issue 9, pp. 2281-2302, 1997.
8. Loret B., Hammoum F. and Dafalias Y.F.(1993), *Computational aspects of large elastoplastic deformations in the presence of anisotropy and plastic spin*, Computer Methods in applied Mechanics and Engineering, 1993, 105, pp. 151-180.
9. Loret B., Hammoum F. and Dafalias Y.F.(1992), *A note on the accuracy of stress-point algorithms for anisotropic elastic-plastic media*, Computer Methods in applied Mechanics and Engineering, 1992, 98, pp. 399-409.

2.4 Articles dans des revues nationales à comité de lecture

1. Hamlat S., Hammoum F., Hicher P.-Y., Stefani C. et Terrier J.-P. (2007), *Evaluation de la résistance aux efforts tangentiels des revêtements routiers*, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol 267, pp. 49-60 (<http://media.lcpc.fr/ext/pdf/blpc/bl267-049.pdf>)
2. de Larrard F., Garcin O., Hammoum F., Travers F. (2005), *Essais préliminaires d'un enduit hydraulique pour couche de roulement à longue durée de vie*, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol. 258-259, pp.121-128 (<http://media.lcpc.fr/ext/pdf/blpc/bl258-259-121.pdf>)
3. de La Roche C., Hammoum F., Piau J.-M. et Stefani C.(2003) *Comportement du bitume en film mince au pseudo-contact entre deux granulats*, Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, vol. 242, pp. 3-14. (<http://media.lcpc.fr/ext/pdf/blpc/bl242-003-en.pdf>)
4. Hammoum F. (1995) *Modélisation du comportement du bois soumis à des gradients évolutifs d'humidité*, Les cahiers de rhéologie, 1995, V.14, N° 1, pp 305-314

2.5 Articles dans diverses revues technico-professionnelles

1. Hammoum F., Hamlat S., Terrier J-P. (2008) *Développement d'un moyen d'essai en laboratoire pour évaluer la tenue mécanique des enrobés de surface*, Revue Générale des Routes et Aérodrômes, 864, Février 2008.
2. Maillard S., de La Roche C., Hammoum F., Castaneda E., Such, C. (2005) *Desarrollo de un ensayo de caracterización del comportamiento a la ruptura y a la autoreparación del asfalto en película delgada*, Rev. Asfaltos y Pavimentos, 11, 14-18, Décembre 2005.

2.6 Rapports d'étude, de recherche et d'expertise

1. Balay J-M., Chollet H., Cuisinier D., Hammoum F. Kuhn F. (2008) *Bilan du projet DEVIN - Durabilité Et interaction Véhicule Infrastructure*, Rapport final INRETS-LCPC-LMT, p 82.

2. Alam S. Y., Hammoum F. (2007) *Détermination des propriétés mécaniques d'enrobés bitumineux à partir des caractéristiques des constituants*, Rapport de stage Master recherche - Université Marne La Vallée.
3. Hammoum F., Terrier J-P., Buisson S. (2006) *Reproduction de la texture routière : Etude de faisabilité des essais de compactage avec vibration*, Rapport de recherche interne, OD N° 21K06261.
4. Hammoum F., Terrier J-P., Hamlat S. (2006) *Apport des liants bitumineux sur la résistance aux efforts tangentiels*, rapport d'étude, contrat SHELL/LCPC N° 13K06252.
5. de La Roche C., Hammoum, F., Hamon D. (2006) *Evaluation of the fatigue resistance of bituminous mixes with wheel-tracking test*, Rapport d'étude, Contrat NYNAS/LCPC N° 11N04253.
6. Hammoum F., Terrier J-P., Burban O. (2006) *Evaluation of the resistance to shear stress of cement matrix HPCM with the LCPC tribometer, Technical report on laboratory testing*, Project IM3 : Economic Evaluation of Long Life pavements - Phase II.
7. Hammoum F., Travers F., de la Roche C., Burban O.(2006) *Resistance to stripping of Cement matrix HPCM with fibre with the LCPC wheel tracking test*, Technical report on laboratory testing, Project IM3 : Economic Evaluation of Long Life pavements - Phase II.
8. de La Roche C., Hammoum, F., Cosquer J. (2005) *Détermination de la transition mécanique ductile/fragile par l'essai de rupture locale du bitume*, Rapport d'étude, Contrat SHELL/LCPC N° 53N05324.
9. Tardet R., Hamlat S., Hammoum F. (2005) *Caractérisation du frottement sec entre une gomme viscoélastique et un revêtement routier*, Rapport de stage TFE - Université de la Rochelle
10. Martelin T., Bornert M. et Hammoum F.(2003) *Etude des modes de déformation locaux et des irréversibilités d'un enrobé bitumineux*, Rapport de stage DEA - Ecole Polytechnique - Ecole des Mines
11. Daouben E., Maillard S., de La Roche C. et Hammoum F.(2003) *Analyse de l'essai de rupture locale répétée du bitume à l'aide de méthodes de contrôle non destructif*, Rapport de stage TFE - IUP de Lorient.
12. Fresnel H., Hammoum F. et Cottineau L-M (2003) *Mise au point d'un banc d'essai innovant destiné à étudier les problèmes d'endommagement de surface des revêtements routiers*, Stage TFE - IUP de Poitiers.
13. Arnaud L., Thinet S., Boutin C. et Hammoum F.(1999) *Suivi de l'évolution d'une grave-émulsion au jeune âge : Etude de faisabilité au vibroscope*, Rapport de recherche LCPC/ENTPE, Septembre 1999.
14. Hammoum F.(1999) *Etude des effets de la nature des additifs sur les enrobés*, Rapport d'étude, contrat LHOIST/LOGMA/LCPC, N° 302.422.98, Juillet 1999
15. Hammoum F.(1998) *Expérimentation des méthodes résistive et capacitive pour l'évaluation de la prise d'une grave-émulsion*, Rapport de recherche LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
16. Hammoum F. et Detrez M.(1998) *Identification et dosage des goudrons : utilisation de la spectrophotométrie infrarouge à transformée de Fourier*, Rapport de recherche LCPC, 1998, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
17. Hammoum F. et Detrez M. (1998) *Les polymères utilisés dans le domaine routier : base de donnée infrarouge*, Document de recherche LCPC, 1998, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

18. Hammoum F. et Detrez M.(1997) *Pratique de la spectrophotométrie infrarouge à transformée de Fourier*, Rapport de recherche LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
19. Hammoum F., Guilloux R. et Ollier S.(1997) *Evaluation du microductilimètre LPC*, Rapport interne LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
20. Hammoum F. et Audebert P.(1994) *Comportement mécanique du bois durant le séchage*, Rapport de recherche, Laboratoire d'études et Recherche en Mécanique des Structures-Montluçon
21. Hammoum F. et Loret B. (1990) *Etude mécanique des effets de la viscosité sur des structures géologiques*, Rapport de recherche, Groupement Scientifique de Mécanique des roches.

Participations à des colloques, congrès et séminaires

3.1 Communications à des congrès avec publications des actes

1. Seghers, D. and Stoop, J. and Van den bergh, W. and Vansteenkiste, S. and De Visscher, J. and Hammoum, F. and Reynaert, R. (2010), *Research to the applicability of the ITS-R test as a ravelling indicator for evaluation of water sensitivity of SMA mixtures* - 11th International Conference on Asphalt Pavements, Nagoya, Japan, 1 au 6 août 2010.
2. Hamlat S., Hammoum F. *Evaluation de la distribution des pressions locales de contact entre un pneumatique et un revêtement routier*, 19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille, France, 24-28 août 2009.
3. de Larrard F., Chandler J., Christensen J., Hammoum F., Henrichsen A., Himerik T., Sliwa N., J. Tanesi J., Thoegersen F., Vorobieff G., J. White J., Youtcheff J., (2008) *A Cementitious Long-Life Wearing Course to Reduce Frequency of Maintenance Works on High-Traffic Roads*, Transport Research Arena Europe 2008, Ljubljana
4. Hammoum F., Hamlat S., et Hicher P-Y. (2008), *Laboratory evaluation of the resistance to tangential forces of bituminous surfacing*, 4th Euroasphalt & Eurobitume congress, Copenhagen, Danemark, 20-23 mai 2008 (<http://www.eecongress.org>)
5. Nguyen H-N, Hammoum F., Ehrbacher A., Chailleux E. (2007), *Analyse de la rupture d'un film de bitume par la méthode des éléments finis*, 18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, France, 27-31 août 2007.
6. Cuisinier D., Berthaud Y., Francois M., Hild F., Hammoum F. (2006), *Utilisation de la corrélation d'images pour déterminer les paramètres élastiques d'un enrobé bitumeux*. Colloque National Mecamat / Ecole de Mécanique des Matériaux "Approches multiéchelles en mécanique des matériaux".
7. Hamlat S., Hammoum F. et Hicher P-Y (2006), *Contact problem between rubber and road texture : determination of pressure and contact area distribution*, 6th European Solid Mechanics Conference, Budapest, Hungary.
8. Hammoum F., Hamlat S., Hicher P-Y (2005), *Friction of different surface layer of pavements in contact with a rubber*, Proceedings of WTC III : World Tribology congress & Exhibition, Washington DC, USA. (<http://www.conferencetoolbox.org/WTC05/pdfs/WTCprogram.pdf>)
9. Hammoum F., Stefani C., Cottineau L-M, Desroches J-P (2005), *Quantification of accelerated wear for road materials by using a new testing apparatus*, Proceedings of WTC III : World Tribology congress & Exhibition, Washington DC, USA. (<http://www.conferencetoolbox.org/WTC05/pdfs/WTCprogram.pdf>)

10. Hamlat S., Hammoum F. et Hicher P-Y (2005) *Caractérisation mécanique du contact gomme-revêtement*, 17ème congrès Français de Mécanique, Troyes.
11. Maillard S., de La Roche C. Hammoum F. et Such C. (2005), *Towards a better understanding of healing in a thin film of bitumen*, Proceedings of McMat 2005 : 2005 Joint ASME/ASCE/SES Conference on Mechanics & Materials, June 1-3, 2005, Baton Rouge, Louisiana, USA.
(<http://www.mcmat2005.eng.lsu.edu/techprogram/McMat2005Proceedings.pdf>)
12. Cuisinier D., Bertaud Y., François M., Hammoum F., Hamlat S. et Hild F. (2005), *Recherche des paramètres élastiques d'un enrobé bitumineux à partir d'un essai structurel*, Colloque Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie, Marseille.
13. Coiret A., Galenne M-L et Hammoum F. (2005), *Faisabilité de la mesure du torseur de force appliquée par un véhicule léger depuis la chaussée*, Journées Française de Tribologie, 11-13 mai 2005, Tarbes.
14. Maillard S., de La Roche C., Hammoum F., Gaillet L., Such C., (2004) *Experimental investigation of fracture and healing of bitumen at pseudo-contact of two contact of two aggregates*, 3rd Euroasphalt & Eurobitume congress, Vienne, Autriche, 12-14 mai 2004
15. Arnaud L., Dierkens M. and Hammoum F. (2004) *Rheological measurements on cold bitumen mix during setting*, The AEMA International Symposium on Asphalt Emulsion Technology, October 28 - 31, 2004, Washington DC (<http://www.aema.org/newsletters/AEMA20051.pdf>)
16. Hammoum F. and Hornych P. (2004), *Quantitative study of bituminous materials microstructure by digital image analysis*, 3ème congrès Euroasphalt and Eurobitume, Vienne, Autriche, 12-14 mai 2004
17. Castenada E., Such C., Hammoum F., (2004) *Evaluating the moisture sensitivity of bituminous mixtures : complex modulus approach*, 3ème congrès Euroasphalt & Eurobitume, Vienne, Autriche, 12-14 mai 2004
18. Maillard S, Hammoum F, de La Roche C. (2003) *Méthode expérimentale pour l'étude de la fissuration et de l'autoréparation des liants bitumineux*, 16ème Congrès français de mécanique, Nice, France, 1-5 septembre 2003
19. Hammoum F., de La Roche C., Piau J-M and Stefani C.(2002) *An experimental investigation of fracture and healing in bitumen at the pseudo-contact of aggregate particles*, Ninth International Conference on Asphalt Pavements - Copenhagen -August 17-22,2002
20. Do M-T. and Hammoum F.(2002) *A mechanical model for the prediction of the tire/road friction*, BCRA 2002 - Lisbonne
21. Hammoum F.(2000) *Modélisation micromécanique du béton bitumineux, actes des journées scientifiques sur le changement d'échelle*, Editions du LCPC, Octobre 2000.
22. Hammoum F. et de La Roche C.(2000) *Utilisation d'une approche microstructurale pour la détermination du module complexe des enrobés bitumineux*, Colloque physique et Mécanique des Matériaux granulaires- Septembre 2000.
23. Hammoum F.(2000) *Development of a methodology to follow evolution of texture under repeated loading*, 2nd Eurasphalt & Eurobitume Congress- 2000, Barcelone.
24. Hammoum F. and Tshepe O. (1999) *New methodology to follow evolution of macro texture in laboratory*, paper 114, 7th conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Victoria Falls, Zimbabwe, 29 august-2 September 1999.
25. Hammoum F., de La Roche C., Boutin C. (1999) *A self-consistent estimate of bituminous mixes complex modulus*, paper 38, Eurobitume Workshop 99, Luxembourg, May 1999

26. Sauger-Vauthier E., Hammoum F., Ollier S. and Such C. (1999) *Towards a better understanding of binder properties using SHRP direct tensile test*, Eurobitume Workshop 99, Luxembourg, May 1999
27. Hammoum F.(1995) *Effet de la vitesse de rotation plastique sur l'évolution des directions d'orthotropie*, 12ème Congrès Français de Mécanique, Strasbourg, Sept 95
28. Hammoum F. (1995) *Modélisation du comportement du bois soumis à des gradients évolutifs d'humidité*, 30ème Colloque annuel du Groupe Français de Rhéologie, Bordeaux, Sept 95.
29. Hammoum F.(1995) *Précision des algorithmes de calcul de la contrainte en mécanique non-linéaire*, 27ème Congrès National d'Analyse Numérique, Super-Besse, Puy de Dôme, Mai 95.

3.2 Autres communications dans des congrès sans actes

1. Hammoum F. (2008) *Description of internal structure by optical imaging*, TG2 Meeting of the Technical Committee 206-ATB Advanced Testing and Characterization of Bituminous Material, Washington DC, USA.
2. Hammoum F., Hamlat S., Hicher P-V. (2007) *A new experimental device to evaluate the tangential force effects on bituminous surfacing*, Annual Meeting of the Technical Committee 206-ATB Advanced Testing and Characterization of Bituminous Material, 3 October 2007, Nantes, France
3. Brosseaud Y., Hammoum F. (2007) *Techniques routières innovantes - Méthode de formulation des matériaux bitumineux*, Colloque Franco-Algérien organisé par UBI-France et sous l'égide de la mission économique de l'Ambassade de France, Alger, 27 nov. 2007, (sur invitation).
4. Cuisinier D., Y. Berthaud, François M., Hild, F., Hammoum F. (2006) *Utilisation de la corrélation d'images pour déterminer les paramètres élastiques d'un enrobé bitumineux*, Colloque National MECAMAT / Ecole de Mécanique des Matériaux -Approches multi-échelles en mécanique des matériaux.
5. Hammoum F. and Vulcano-Greullet N. (2006) *Design and Testing of Long Life Wearing Course : Evaluation of epoxy asphalt*, Berkshire - UK.
6. Hamlat S, Hammoum F, Hicher PY (2005), *L'importance du phénomène d'indentation dans l'adhérence gomme-revêtement*, Journée d'étude thématique SF2M Ouest, Angers, France, 16-17 mars 2005
7. Hammoum F. et Mazars A. (2005) *Comportement des enrobés sous train d'atterrissage*, Journée d'échange STBA/LCPC, 15 mars 2005 - DGAC - Paris.
8. Youtcheff Y., Elliott R., Hammoum F. (2005) *Epoxy asphalt : first results from OCDE group*, 5th Annual Pavement Performance Prediction Symposium Adhesion & Cohesion of Asphalt Pavements, Cheyenne, Wyoming June 22nd and 24th , 2005
9. Hammoum F., Bertaud V., Bonnet P. (2003) *Critères pour la détermination de la granulométrie des composites routiers par analyse d'image*, 26ème journée de la section française de la société internationale de stéréologie, Paris, France.
10. Hammoum F. (2001) *Introduction sur les arrachements des granulats dans les revêtements routiers*, Journée Plénière ECRIN - Abrasifs et processus d'abrasion- 20 novembre 2001-ESPCI-Paris.
11. Audebert P., Temmar K., Hammoum F. and Basilico C.(1996) *Séchage du bois de chêne sous vide par contact, humidité, contraintes internes et processus de séchage sur un séchoir expérimentale et sur un séchoir industriel*, Journée commune SFT-AFSIA, Paris, Jan. 96

Principales collaborations scientifiques

- Projet ERA-NET ROAD (Mars 2009 - Fév. 2011) : Optimisation of thin asphalt layers, Trans-national project funded by Austria, Denmark, Norway, Sweden, Switzerland, France and United Kingdom - Project Leader : Richard Elliot (Scott Wilson Ltd)
- Collaboration scientifique LCPC/Arteris University college of Antwerp (2009-2010) -Influence of the mixture design method on the raveling of Splitmastic Asphalt mixtures - Correspondants : Wim Van den bergh et Dieter Seghers.
- Projet LLP3-OCDE (2009-2010) Membre du groupe de travail sur les revêtements à longue durée de vie - OCDE/CEMT *Economic and technical evaluation of long life pavements*, du joint Transport Research Center, organisation issue de l'OCDE et du Forum International des Transports (ex-CEMT).
Project leader : F. de larrard (LCPC) Programme 3 sous label Pôle de compétitivité PGCO avec la validation sur site des solutions proposées lors de la phase 2 du projet. En partenariat avec le conseil général de la Sarthe (72) et le centre de recherche d'Eurovia, la solution au bitume-époxy sera expérimentée sur un giratoire de la RD21 près de l'autoroute A28.
- Projet DEVIN (2004-2007) : Responsabilité scientifique du Projet DEVIN *Durabilité Et interaction Véhicules -Infrastructure* / Groupe 10-VIDI
(Leader du Projet : Hughes Chollet (INRETS) Ce projet porte sur la durabilité des infrastructures urbaines des nouveaux systèmes de transport en commun, les tramways sur pneumatiques ou : *systèmes intermédiaires*. L'objectif est d'évaluer sur le site de Clermont-Ferrand l'impact d'une combinaison de charges élevées et d'efforts tangents importants, notamment en courbe, au freinage ou au démarrage. Les observations recueillies sur le site de Nancy permet de penser que le risque d'un endommagement prématuré des couches proches du contact par usure abrasive, par fluage, ou par décollement inter-couche est réel.
- PROJET LLP2-OCDE (2005-2008) : Membre du groupe de travail sur les revêtements à longue durée de vie - OCDE/CEMT *Economic and technical evaluation of long life pavements*, du joint Transport Research Center, organisation issue de l'OCDE et du Forum International des Transports (ex-CEMT).
Project Leader : (J . Christensen) Alors que les corps de chaussées sont dimensionnés pour 20 à 30 ans, les couches de roulement possèdent des durées de vie beaucoup plus courtes. Soumises à de forts trafics, elle doivent être renouvelées tous les 7 ans environ, ce qui perturbe la circulation, gênant usagers de la route et riverains. Le LCPC a pris part aux travaux menés par le groupe de travail qui a étudié depuis 2005, deux solutions techniques susceptibles d'assurer, pour 30 à 40 ans, toutes les fonctions des couches superficielles.
OCDE/CEMT (2008) Long Life Surfaces for Busy Roads -Economic evaluation of long-life pavements-Phase II, OECD 77 2007 031 P1/ISBN :978-92-821-0158-2

Principales missions sur le terrain

- Mission Qatar (17 au 20 fév. 2008) Evaluation des laboratoires QGOSM suivant la norme ISO 17025 : The objective of the audit is to examine the current situation of the three QGOSM laboratories involved in the field of Roads and Civil Engineering through ISO 17025 requirements and to propose recommendations for the improvement of the quality system.
- Mission Algérie (28 et 29 nov. 2007) Assistance technique pour le montage d'un laboratoire en géotechnique et construction routière auprès de l'Ecole Nationale des Travaux Publics - Alger, Algérie.
- Mission France (Septembre 2006) : Participation au groupe de travail chaussées APRR/CETE/LCPC pour l'expertise des désordres constatés sur un tronçon d'autoroute A31 Nord.
- Mission France (Février 2005) : Expertise et assistance technique sur les dégradations de surface constatées sur la piste du centre d'enseignement de la conduite et de la sécurité routière de La Wantzenau près de Strasbourg, R. Civ. 04/00597 - SAS SIFA Prévention /SA Colas Est.

Actions de formation et d'encadrement

6.1 Actions de formation

J'ai débuté mes activités d'enseignant en octobre 1993 sur un demi-poste ATER à l'Ecole Nationale d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble. Puis, j'ai poursuivi sur l'année universitaire 1994-1995, sur un demi-poste ATER à l'Institut Universitaire de Montluçon. Lorsque j'ai rejoint le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en septembre 1996, j'ai maintenu mes activités d'enseignement à l'Ecole Centrale d'Electronique de 1997 à 1999 puis à l'IUP de Saint-Nazaire de 2005 à aujourd'hui. Vu ma double formation (matériaux et mécanique) et l'ensemble des compétences dans l'utilisation des outils numériques et des connaissances acquises tout au long de ces dernières années au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, j'ai enseigné dans diverses structures et filières des établissements d'enseignement :

- Formation d'ingénieur - ENHMG à Grenoble - 1ère année
- Formation d'ingénieur - ENHMG à Grenoble - 2ème année
- DUT génie mécanique - IUT de Montluçon - 2ème année
- Formation d'ingénieur - Ecole Centrale d'Electronique - 4ème année
- Master 2ème année - IUP Infrastructures du Génie civil
- Formation Doctorale - MTGC - Ecole Centrale de Nantes - Doctorant 1ère année

Les différentes disciplines enseignées sont les suivantes :

- Mécanique des Solides (TD 34h/an)
- Introduction aux méthodes numériques linéaires (TD 18h/an)
- Résistance des matériaux (TD 26h/an)
- Modèles dynamiques appliqués à la mécatronique (cours 12h/an)
- Propagation de contraintes dans les milieux solides (cours 8h/an)
- Introduction sur les pathologies des matériaux de chaussées (cours 8h/an)
- Notion de modèle et place de la modélisation physique dans la recherche (Cours 3h/an)
- Mécanique générale (30h/an)

6.2 Actions de co-encadrement de doctorants

Les différentes thématiques de recherche que j'ai développé m'ont amené à participer à l'encadrement de plusieurs doctorants et d'étudiants en master et à assurer la supervision scientifique de différents travaux de recherche en France et à l'étranger.

- Hoai-Nam Nguyen (oct. 04-dec. 08)- Ecole doctorale MODES - Paris

- Sujet de thèse : *Approche théorique de la fissuration d'un milieu viscoélastique : analyse des régimes fragiles et ductiles*. Directeur de thèse : Alain Ehrlacher (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées)
 Conseillers d'étude : F. Hammoum et E. Chailleux (LCPC/SMIT)
 Financement LCPC - Taux d'encadrement : 50 % - Thèse soutenue le 05 décembre 2008
 Devenir du Doctorant : Ingénieur dans un bureau d'étude de conception des ouvrages d'art - Quebec - Canada
- Smail Hamlat (oct. 03 - mars 07) - Ecole doctorale MTGC -Nantes
 Sujet de thèse : *Apport de la mécanique du contact dans la prédiction des caractéristiques de surface d'un revêtement routier*
 Directeur de thèse : Professeur Pierre-Yves Hicher (Ecole Centrale de Nantes)
 Conseiller d'étude : F. Hammoum
 Financement LCPC/Région pays de Loire
 Taux d'encadrement : 50 % - Thèse soutenue le 08 mars 2007
 Devenir du doctorant : Chargé de recherche - co-responsable de l'ERA 36 à Angers
 - Samuel Maillard (oct. 02 - juin 06)- Ecole doctorale MTGC - Nantes
 Sujet de thèse : *Etude du comportement à la rupture sous chargements répétés du bitume en film mince* Directeur de thèse : Christian Such (LCPC/MSM)
 Conseillers d'études : F. Hammoum et C. de la Roche (LCPC/SMIT).
 Financement LCPC. Taux d'encadrement : 30 % - Thèse soutenue le 24 juin 2006
 Devenir du doctorant : Ingénieur en contrôle non destructif - CETIM à Senlis.
 - Eduardo Alberto Castaneda Pinzon (oct. 98 - Nov. 04)- Univ. de Nantes/Univ. de Santander
 Sujet de thèse : *Contribution de méthodes non destructives d'évaluation de l'effet de l'eau sur les enrobés bitumineux*. Directeur de thèse : Christian Such
 Conseillers d'étude : F. Hammoum
 Financement : Programme de Coopération Post-graduée Franco-Colombien.
 Taux d'encadrement : 20 % - Thèse soutenue le 25 novembre 2004
 Devenir du doctorant : Professeur à l'Université de Santander en Colombie

6.3 Actions d'encadrement de stagiaires et chercheurs

- Hallysson C. Nascimento (Avril-août 2008) - INSA Lyon - TOTAL - LCPC
 Sujet de stage : *Apport des liants bitumineux dans la durabilité des revêtements routiers*
- Eileen France Chane Ki (mars-juillet 2008) - Master 2 en Génie Mécanique - Lorient
 Sujet de stage : *Evaluation mécanique des mélanges bitumineux obtenus avec différents processus d'enrobage*
- Yasir Alam (Mars-juillet 2007)- Master 2 Mécanique des Structures - Univ. Marne la Vallée
 Sujet de stage : *Détermination des propriétés mécaniques d'enrobés bitumineux à partir des caractéristiques des constituants*
- Romain Tardet (Mars-juillet 2005)- Master 2 Physique et chimie de la matière - Univ. De la Rochelle
 Sujet de stage : *Caractérisation du frottement sec entre une gomme viscoélastique et un revêtement routier*
- Thibault Martelin (Février -Juin 2003) DEA Ecole Polytechnique - Ecole des Mines
 Sujet de stage : *Etude des modes de déformation locaux et des irréversibilités d'un enrobé*

bitumineux

- Harold Fresnel (Février -Juin 2003) 3ème année de l'IUP - Génie des matériaux de Poitiers
Sujet de stage : *Mise au point d'un banc d'essai innovant destiné à étudier les problèmes d'endommagement de surface des revêtements routiers*
- Estelle Daouben (Février -Juin 2003) 3ème année de l'IUP -Génie des matériaux de Lorient
Sujet de stage : *Analyse de l'essai de rupture locale répétée du bitume à l'aide de méthodes de contrôle non destructif*
- Valentine Bertaud (Février -Juin 2002) 3ème année de l'IUP -Génie des matériaux de Poitiers
Sujet de stage : *Visualisation de la structure interne des enrobés par analyse d'image : contrôle qualité*
- Olivier Chenevez (Février-Juin 2001) - élève- ingénieur 3ème année ENSAIS (Strasbourg)
Sujet de stage : *Essai de rupture locale répétée du bitume : Etude de la fissuration et de l'auto-réparation*
- Pierre Bonnet (Mai- Août 2001) élève 2ème année - Ecole Polytechnique de l'université de Nantes
Sujet de stage : *Analyse morphologique des enrobés bitumineux par analyse d'image*
- Isabelle Jurine (Février -Juin 2000) élève- ingénieur ENSAIS (Strasbourg)
Sujet de stage : *Essai de rupture locale répétée du bitume : Etude de la fissuration et de l'auto-réparation*
- Nicolas Brachet (Mars- Juillet 1999) IUP de Lorient - Génie des systèmes industriels, option mécanique et matériaux
Sujet de stage : *Essai de rupture locale répétée du bitume : effet de la température et du temps de charge*
- Otto Tshepe (Mars 1998- Jan. 1999)-Ingénieur en génie civil de l'université de Pretoria (Afrique du sud)
Convention ATLANTEC (Pays de la Loire- Afrique du sud) Sujet de stage : *Etat actuel des moyens permettant de suivre l'évolution de la macro-texture sur des échantillons de laboratoire : étude de l'effet de la nature du liant.*

Contrats et collaborations avec les industriels

1. *Evaluation de la résistance aux cisaillement d'un enrobé de surface : effet du vieillissement chimique* Contrat Colas/LCPC N°53L08063
2. *Apport des liants bitumineux dans la résistance aux efforts tangentiels : effet de la température sur la tenue sous trafic-* Contrat TOTAL/LCPC N° 53L08066.
3. *Effet du vieillissement sur les propriétés élastiques des liants modifiés par l'association de l'acide polyphosphorique-* Contrat INNOPHOS/LCPC N° 53N07026
4. *Comportement des liants durs dans la résistance par fatigue des enrobés : Essai de fatigue sous charge roulante -* Contrat Nynas/LCPC N° 11N04253.
5. *Evaluation de la résistance aux arrachements des enrobés drainants-* Contrat Shell/LCPC N° 13K06252.
6. *Détermination de la transition ductile/fragile des bitumes-* Contrat Shell/LCPC N° 53N05324
7. *Polymers for paving : Use of modified bituminous binder (Elvaloy AC and AM) in road pavements : characteristics and performances-* contrat DuPont de Nemours/LCPC N° 33B03J11
8. *Etude des effets de la nature des additifs sur les enrobés : 3 chaux hydratée et 2 polymères-* contrat LHOIST/LOGMA/LCPC N° 302.422.98.

8.1 Logiciels

- PREDICTA, Programme sous Scilab de prédiction des propriétés mécaniques d'un mélange bitumineux par passage micro-macro, Version 3.0 - juin 2007 par Hammoum F. et Alam S. Y.
- Programme de calcul du dosage en polymère sous Visual Basic par la méthode de rapport des bandes aromatique/aliphatique, Avril 1997 par F. Hammoum et M. Detrez
- BigBen Code de calcul en grande déformation - Manual of the Finite Element Program BigBen " 1992, revised 1992, 1993, Laboratoire Sols, Solides et Structures- Grenoble par B. Loret, F. Hammoum et O. Harireche

8.2 Mode opératoire et Méthode d'essai

- Méthode de détection et de dosage des goudrons par spectrophotométrie infrarouge - Hammoum F., Detrez M., Bertau R. (ELF ATOCHEM).
- Mode opératoire de détermination de la granulométrie pondérale par analyse d'image - Hammoum F.
- Mode opératoire de l'essai de rupture locale sur bitume - Hammoum F., Maillard S. et Cosquer J.
- Mode opératoire de l'essai d'arrachement de granulat - Hammoum F., Hamlat S. et Terrier J-P

8.3 Conception et Développement de moyen d'essai

- Projet Triboroute : Conception d'un tribomètre pour revêtement routier - Opération de développement N° 600297 - 1I024 - terminé en janvier 2005.
- Reproduction texture routière : Développement d'un module vibration sur le compacteur de plaque MLPC - Un exemplaire opérationnel au LRPC d'Angers
- Mise à niveau du microductilimètre pour les produits bitumineux (logiciel et matériel)- Hammoum F., Le Pen M. et Guilloux R.

Administration de la recherche et autres activités scientifiques

9.1 Relecture d'articles, activités éditoriales

- Depuis 2005, review annuel de 1 à 2 articles pour le compte des journaux suivants :
Mechanics of materials (1)
International Journal of Road Materials and Pavement Design (3)
Canadian Journal of civil engineering (3)
- Depuis 2008, en tant que membre du comité scientifique, review des articles proposés pour la conférence EATA : (<http://www.eataconference.eu/committee>)

9.2 Animation de groupe de travail

- Responsable de l'opération sur la réduction de l'impact climatique sur les infrastructures linéaires Climat et Infrastructures-(11LEP1) - approuvé par le Comité d'Orientation Stratégique du LCPC(réunion du 06 juillet 2009) - préparation en 2010 - (2011-2014)
- Responsable du sujet sur la relation entre la performance des matériaux granulaires et les caractéristiques des granulats de l'Opération de Recherche AGREGA-(11L091) mAtériaux Granulaires Et Granulats Alternatifs - approuvé par le COS (réunion du 16 juin 2008)
- Responsable du sujet sur la durabilité à long terme des couches de roulements de l'opération de Recherche EcoSurf-(11L102) - approuvé par le Comité d'Orientation Stratégique du LCPC
- Animation de l'équipe projet (7 personnes) : Opération de développement de matériel MLPC (reproduction de la texture routière au compacteur de plaque - 21K06261) - le démonstrateur est opérationnel au LRPC d'Angers - (Déc. 2006 - Sept. 2009)
- Animation de l'équipe projet (7 personnes) : Opération de développement d'une prototype maquette destiné aux essais d'arrachement de granulats - Projet Triboroute - 11I021-OP600297 (Juin 2000 - déc. 2003)
- Co-responsable de l'opération de recherche 11G021-Propriétés des Matériaux Hétérogènes clôture de l'opération effectuée en 2005.

9.3 Participation à des comités, à des commissions et organisation des colloques

- Depuis 2008 - Chargé de l'organisation et de l'animation de la journée d'échanges du réseau Scientifique et technique en liaison avec la Direction technique Infrastructure et Sécurité

routière (60 personnes)

(<http://intra.lcpc.fr/pages/partage/seminaires>)

- Membre du comité scientifique de *4rd European Asphalt Technology Association EATA conference* - June 15-16th, 2010, Italy, (<http://sed.siiiv.it>)
- Membre RILEM - Technical Committee Nanotechnology-based bituminous materials - Task Group 4/ modeling needs and techniques (2008 -2013)
- Membre RILEM -Technical Committee 206-ATB Advanced Testing and Characterization of Bituminous Material - Task Group 2 / Evaluation of laboratory compaction methods and models with respect to field compaction (2004-2009) (https://mywebpace.wisc.edu/cmjohnson3/RILEM/About_RILEM_TG2.html)
- Membre du comité de suivi de thèse CIFRE TOTAL/LCPC - Malo Le Guern (2008-2011).
- Membre du comité scientifique de *3rd European Asphalt Technology Association EATA conference* - April 14-15th, 2008, Lyon, France (100 participants) (<http://heberge.lcpc.fr/eata08/>)
- Membre élu du comité d'évaluation des chercheurs du ministère (2004-2008) (membre de jury pour les concours de chargé de recherche, examen des dossiers de titularisation, évaluation légère et lourde des chargés de recherche, participation aux réflexions et à l'amélioration des règles de fonctionnement du comité)
Conformément à l'article 11 du décret n° 94-943 du 28 octobre 1994 relatif aux statuts particuliers des corps de Chargés de Recherche et de Directeur de Recherche, la nomination des membres du Comité d'évaluation a été fixée par décision du ministre chargé de l'Equipement signée le 30 avril 2004.
- Depuis 2006 Membre du groupe Matériaux /France - ECTP (European Construction Technology Platform) - Focus Area Matériaux (<http://www.ectp.org/groupes>)
- Chairman of session in Joint ASME/ASCE/SES Conference on Mechanics & Materials - ASCE 2005