



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

**Vers une caractérisation performantielle in
situ des interfaces des couches de surface
Etat de l'art**

Auteur(s) / Organisme(s) :

Dony Anne / KOUTIRI Imade (ESTP/ENSAM)

Godard Eric (Colas pour l'USIRF)

Pouteau Bertrand (Eurovia)

Millien Anne (GEMH-GCD)

Ollier Stéphane (Pérennise Chaussées)

Thème de rattachement :

Thème 1- Mécanismes de dégradation des chaussées

DVDC/R/014

LC/17/DVDC/32à35-37

Juillet 2018

Site internet : www.dvdc.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Eric LAYERLE et Christine LEROY

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

Sommaire

Sommaire	3
1 Résumé	4
2 Introduction	6
3 Rappel de quelques principes mécaniques	6
3.1 Essai mécanique de torsion	6
3.2 Essai mécanique de traction	7
3.3 Essai mécanique de cisaillement	8
4 Recensement des moyens expérimentaux étudiés	9
4.1. Essai de collage en torsion (TBT- Torque Bond Test)	10
4.2. Essai de mesure d'adhésion des couches (LAMI)	11
4.3. OFTC (Oregon Field tack Coat Tester)	12
4.4. Essai de torsion instrumenté en laboratoire	14
4.5 Bilan.....	14
5 Analyse des résultats d'études	15
5.1 Dispersion et reproductibilité.....	16
5.2 Calcul d'erreur sur la torsion.....	16
5.3 Effet du taux d'application de l'émulsion.....	17
5.4 Effet de la température, de la vitesse de sollicitation, du type d'émulsion et de la compacité de la couche de support et de roulement	18
5.5 Influence de la nature du support.....	26
5.6 Retour d'expérience chantier.....	27
5.7 Effet et comparaison laboratoire/chantier	29
6 Conclusion	31
7 Bibliographie	32
8 Annexe	34

1 Résumé

Résumé en français

L'objectif du groupe de travail GT1-3 de DVDC est de développer un essai de torsion in situ pour évaluer le collage des couches. Préalablement, un travail bibliographique est effectué pour ressortir les principales conclusions (publiées ou non) d'études antérieures réalisées principalement en torsion. Tel que proposé dans la prénorme européenne parmi sept méthodes, le dispositif en torsion manuel, utilisable en laboratoire et in situ, se révèle peu fiable et délicat à utiliser. D'autres dispositifs sont par ailleurs développés (par exemple le LAMI (Québec- traction réalisable in situ), l'OFTT (Orégon- torsion réalisable in situ) mécanisé et équipé d'une chambre environnementale pour régulation de température, l'essai de torsion instrumenté en laboratoire...) montrant finalement aucune pratique commune internationale. Bien maîtrisé en laboratoire, l'essai de torsion se révèle assez reproductible et plusieurs paramètres ont pu être identifiés comme importants pour les résultats. Principalement, pour tous les auteurs la température d'essais est un paramètre fortement influent et dans une moindre mesure la vitesse de sollicitation et la compacité ou nature du support (selon cependant des conditions d'essais) ; au-delà d'un seuil mini, l'augmentation de la teneur en émulsion n'améliore pas a priori le collage testé en torsion. Des essais réalisés in situ sur un complexe BBTM/BAC mettent en évidence des écarts significatifs selon les dosages d'émulsion. Une étude comparative du CRR en Belgique montre finalement des écarts moindres entre laboratoire et chantier pour les essais de torsion comparativement à de la traction ou du cisaillement. Ces données de la littérature permettront une comparaison avec nos résultats expérimentaux futurs et vérifier la faisabilité d'un nouvel essai.

Abstract

The aim of the DVDC Working Group GT1-3 is to develop an in situ torsional test to evaluate layer bonding. Beforehand, a bibliographic work is carried out to highlight the main conclusions (published or not) of previous studies carried out mainly in torsion. As proposed in the European pre-standard (among seven methods), the manual torsion device, usable in the laboratory and in situ, is unreliable and difficult to use. Other devices have also been developed (for example the LAMI (Quebec, used in situ), the OFTT (Oregon- used in situ) mechanized and equipped with an environmental chamber for temperature regulation, the test of instrumented torsion in the laboratory ...) finally showing no international common practice. Well-controlled in the laboratory, the torsion test is reproducible and several parameters have been identified as important for the results. Mainly, for all authors, the temperature is the most influential parameter and, to a lesser extent, the load speed and the density or nature of the support (according to test conditions); beyond a minimum threshold, the increase of the emulsion content does not improve a priori the bonding tested in torsion. Field tests on a BBTM / BAC complex highlight significant differences according to the emulsion rates. A comparative study of CRR (Belgium) finally shows that there is less variation between laboratory and site for torsion tests compared to traction or shear tests. This literature data will provide comparison with our future experimental results and check the feasibility of a new test.

2 Introduction

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet national DVDC et plus particulièrement dans le thème 1 ayant pour objectif l'étude des mécanismes de dégradations des chaussées. L'objectif du sous-thème 1.3 est d'évaluer le comportement des interfaces in situ, notamment en développant un essai permettant de quantifier la qualité du collage.

Cet objectif a conduit à sélectionner une approche s'appuyant sur un essai destructif qui pour des raisons pratiques nécessite un carottage sur chaussée. En particulier, les approches visant à évaluer la présence d'un défaut de collage ou d'interface par une méthode non destructive, telles que les technologies radar, ou encore les méthodes d'auscultation par impédance mécanique (statique, ou dynamique) ne font pas partie du champ d'actions des travaux investigués ici. Par ailleurs, la tenue en fatigue de l'interface, qui a fait l'objet de travaux de recherche antérieurs, ne fait pas non plus l'objet des investigations menées ici.

Le développement de cet essai est mené par un consortium regroupant des partenaires académiques et industriels à savoir l'ESTP (associée avec l'ENSAM Paris), l'université de Limoges, PERENNISE CHAUSSEES, EUROVIA et COLAS (pour représenter Routes de France), de par leur expérience antérieure sur le sujet.

De nombreuses études ont déjà été menées sur la tenue mécanique des couches d'accrochage, élément fondamental dans la durée de vie et la tenue mécanique des structures de chaussée. Plusieurs types de sollicitations mécaniques sont étudiées et envisagées (traction, cisaillement, torsion, avec des couplages possibles). Un projet de norme (pr EN 12697-48, 2015) est actuellement en cours de rédaction, pour les matériaux bitumineux, proposant sept méthodes d'essais dont trois normatives (basiques, destructives et monotones) (Dony et al, 2016). En ce qui concerne l'utilisation d'un essai in situ, les deux voies rencontrées dans la littérature portent sur une sollicitation mécanique de traction et de torsion.

L'objectif de ce rapport est de faire un état de l'art sur des méthodes d'essais réalisables sur chantier, ainsi qu'en laboratoire, sur des complexes issus de planches de référence ou de carottages. La bibliographie sera basée sur les travaux antérieurs et les retours d'expérience des différents partenaires ainsi que sur la compilation des publications internationales disponibles. Dans une première partie, après une brève introduction sur les trois types de sollicitation, les différents moyens expérimentaux existants in situ et comparativement en laboratoire seront présentés. Dans un deuxième temps, on se focalisera sur les paramètres variables étudiés et les principaux résultats obtenus dans la littérature, de ces essais réalisés en laboratoire ou in situ réalisés sur des enrobés bitumineux.

3 Rappel de quelques principes mécaniques

3.1 Essai mécanique de torsion

Une structure est sollicitée en torsion lorsqu'elle est soumise à deux couples de moments opposés.

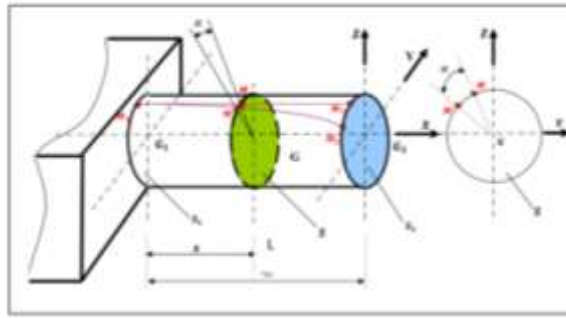


Figure 1 Structure soumise à une sollicitation de torsion

Le déplacement d'une section droite (S) est uniquement une rotation d'un angle α autour de son axe, et cette rotation est proportionnelle à sa distance x par rapport à (S1). L'essai de cisaillement par torsion, également connu sous le terme « napkin-ring test » dans le domaine des matériaux composites, fut développé par Bruyne (De Bruyne N.A. 1962) et consistait à coller bout à bout deux cylindres de fine épaisseur.

La contrainte de cisaillement pour une section pleine, est calculée comme suit :

$$\tau = \frac{F D}{\pi R^3}$$

Avec τ la contrainte de cisaillement, D la distance par rapport à l'axe de rotation d'application de la force de torsion F et R le rayon de l'échantillon testé.

Cet essai mécanique se réalise de manière générale via une machine d'essai de torsion comme illustré à titre d'exemple sur la Figure 2. Les résultats de sortie étant le couple appliqué au cours du temps en fonction de l'angle de rotation d'une section. A partir de ces données, il est ainsi possible de remonter à une contrainte et une déformation de cisaillement.



Figure 2 Machine d'essai INSTRON de torsion

3.2 Essai mécanique de traction

L'essai le plus fréquemment utilisé afin de déterminer le comportement mécanique d'un matériau est l'**essai de traction**. On exerce une force de traction sur un barreau de dimension standardisée, jusqu'à sa rupture, en pilotant la vitesse de chargement ou de déplacement de la traverse de la machine.

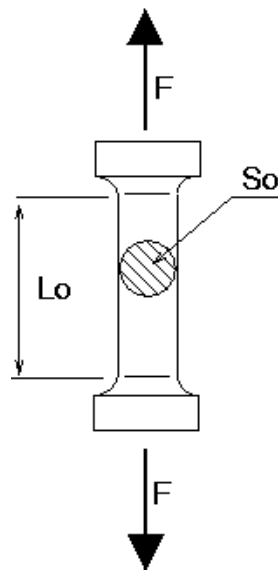


Figure 3 structure soumise à une sollicitation de traction

Contrairement à l'essai de torsion, la section droite subit, hors effets de bords induits par les différences de raideurs mécaniques, une contrainte homogène le long de la zone utile et se calcule par le rapport suivant de l'effort sur la surface utile :

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S}$$

Des machines d'essai existent permettant de piloter de manière précise, l'effort appliqué ou le déplacement imposé afin d'obtenir une courbe contrainte versus déformation.

3.3 Essai mécanique de cisaillement

À la différence d'un essai de traction ou de compression, un essai de cisaillement implique que toutes les sollicitations soient tangentielles à la surface d'application et qu'elles soient parfaitement égales en tous points de cette surface. Il ne doit y avoir aucune sollicitation perpendiculaire à cette surface. C'est un essai très intéressant pour évaluer un collage. Néanmoins sa réalisation n'est pas aisée en raison de l'alignement imposé par la sollicitation afin d'éviter toutes forces parasites faussant les résultats.

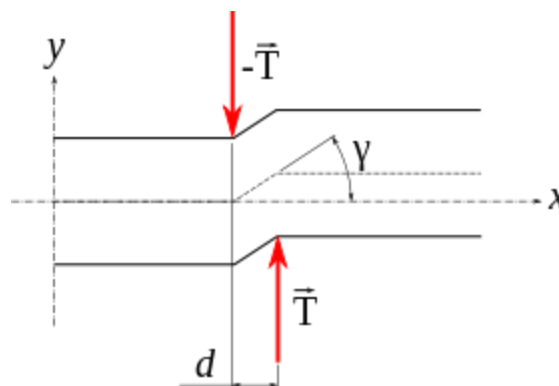


Figure 4 structure soumise à une sollicitation de cisaillement

Comme pour la torsion, le déplacement de la section droite est un glissement de section. La contrainte de cisaillement est égale à :

$$\sigma_{xy} = \frac{T}{S}$$

La spécificité du génie civil face au génie mécanique, qui utilise également fréquemment ce type d'essai, est la taille des éprouvettes. En effet, pour être représentatif du matériau testé, la dimension de ces dernières est bien plus grande et imposante et nécessite quelques ajustements sur les moyens d'essais. Les efforts engendrés ainsi que les déplacements sont relativement faibles.

4 Recensement des moyens expérimentaux étudiés

L'objectif de ce groupe de travail étant de développer un essai in situ en torsion, le travail bibliographique a principalement été concentré sur les travaux réalisables avec des dispositifs similaires, utilisables sur chantiers en précisant le périmètre de l'étude (in situ, en laboratoire, in situ avec une comparaison laboratoire effectuée).

Rappelons que le projet de norme européenne pr EN 12697-48 dans sa version 2014 propose sept essais pour la mesure de la liaison entre deux couches d'enrobés bitumineux :

- Essai de collage en torsion (TBT- Torque Bond Test)
- Essai de collage en cisaillement (SBT- Shear Bond test)
- Essai de collage en traction (TAT- Tensile Adhesion Test)
- Essai de collage en cisaillement en compression (CSBT-Compressed Shear Bond Test)
- Essai cyclique de collage en cisaillement en compression (CCSBT- Cyclic Compressed Shear Bond Test)
- Essai de collage en cisaillement alternatif (ASBT)
- Essai de mesure d'adhésion des couches (LAMI, Layer Adhesion Measuring Instrument)

Les trois premiers essais, TBT, SBT et TAT, présentent un caractère normatif alors que les suivants sont proposés dans des annexes informatives.

Ces différents essais sont réalisés en général sur des carottes prélevés sur des échantillons laboratoire (phase Recherche /Etude) ou directement sur chantier par carottages avec la difficulté d'avoir un carottage maîtrisé ne fragilisant pas l'échantillon.

Seuls deux modalités d'essais sur les sept proposées sont réalisables in situ.

Ainsi Godard et coll. (Godard et coll., 2015) précise que l'essai de collage en torsion est censé pouvoir être réalisé en laboratoire et sur site avec pour objectif d'évaluer la résistance du collage (notamment aux efforts consécutifs au démarrage ou au freinage des véhicules). Il permet donc de tester principalement les couches de roulement ou dans tous les cas les couches d'épaisseur, inférieure à 15 cm.

De même l'essai LAMI, pratiqué depuis plusieurs années au Québec (DLC, 2005), permet de tester la résistance en traction sur site et en laboratoire.

Aux Etats Unis de nombreuses études ont été menées par différents Etats sur l'évaluation des couches d'accrochage et notamment le rapport 712 NCHRP de 2012 (NCHRP Report 712, 2012) présente différentes méthodes pour mesurer la qualité et la performance de couche d'accrochage en laboratoire et in situ. La bibliographie présente un tableau comparatif d'essais réalisés soit au laboratoire soit in situ, soit les deux. Vingt méthodes différentes sont ainsi répertoriées dont cinq sont applicables in situ et en laboratoire et trois uniquement in situ. Le tableau comparatif est donné en Annexe 1.

Nous avons pu référencer huit essais praticables in situ (pour certains : laboratoire + in situ).

4.1. Essai de collage en torsion (TBT- Torque Bond Test) (Marmer G., 2013)

Le dispositif permet la réalisation de tests in situ ou en laboratoire (pr EN .12697-48, 2015) Les diamètres des échantillons sont de 100mm. Ce dernier est fixé à un moule de sorte que l'interface soit à 20mm (+ ou – 10mm) au-dessus du moule. Un disque d'acier est fixé sur la couche de roulement à 20°C. Le couple est appliqué à l'aide d'une clé dynamométrique. Selon la norme européenne, la vitesse de rotation serait de 90° en 30 s (+/- 15s).



Figure 5 Montage de torsion- couple-mètre

Après grenailage, nettoyage et collage du casque sur la surface de l'échantillon, un couple-mètre permettant de mesurer le couple appliqué est vissé au casque via une douille. La réalisation de l'essai consiste à venir, à l'aide d'un bras de levier suffisamment long, appliquer un couple permettant de rompre l'éprouvette. L'avantage de ce dispositif est sa simplicité d'utilisation, permettant d'effectuer les essais directement sur chantier après un pré-carottage ou en laboratoire sur des carottes provenant directement de chantiers.

Selon Marmer (Marmer G., 2013), la difficulté de l'utilisation de ce dispositif est multiple. En effet on constate que :

- L'influence de l'opérateur est très importante. Le couple est appliqué à la main et l'effort nécessaire pour rompre l'éprouvette peut s'avérer important,
- L'application de la force par l'opérateur ne peut pas être parfaitement parallèle à l'interface étudiée et nécessite un dispositif spécifique,
- Si on met en relation l'angle de rupture mesuré de l'éprouvette ($\sim 2^\circ$) et les spécifications de sollicitation de la norme (entre 15 et 45s pour 90°), on constate que l'éprouvette doit rompre en moins d'une seconde. Cette contrainte implique que l'opérateur applique une brève impulsion devant conduire à la rupture de l'interface. L'influence s capacités physiques de l'opérateur est très probablement important pour cet essai.

Enfin Marmer indique que le dispositif qu'il a testé montre des défaillances supplémentaires sur plusieurs points:

- Le système avec une vis ne peut pas fonctionner puisque pendant l'application du couple la vis finit de se serrer complètement dans les filets et commence également à les déformer.
- La prise sur la tête de vis nécessite un acier extrêmement dur puisque lors des essais les têtes de vis ont été déformées.
- Le couple mètre utilisé permettant la détermination également de l'angle de rupture donne une mesure erronée de celle-ci car la mesure prend en compte également la rotation due à la déformation des filets et de la tête de vis. L'application d'une précharge n'a pas permis de résoudre ce problème.
- Le porte à faux entre le casque et la clé en prise sur le couple mètre est trop important et ne permet pas de maîtriser de façon efficace l'angle d'application de l'effort.

Plusieurs solutions peuvent être apportées permettant de palier à l'ensemble de ces problèmes mais montrent les vigilances lors de l'utilisation de ce type de dispositif. Marmer n'a en fait pas pu donner de résultats d'essais avec ce dispositif.

Sutando (Sutando M.H. 2009) s'est aussi intéressé à ce dispositif et s'est confronté aux mêmes problématiques que celles énoncées par Marmer. Les résultats (Figure 4) montrent clairement un écart significatif entre des essais réalisés manuellement et ceux pilotés par une machine d'essai. Les essais ont été réalisés sur des échantillons de SMA/20DBM et un TS1/20DBM avec un diamètre des éprouvettes de 100mm.

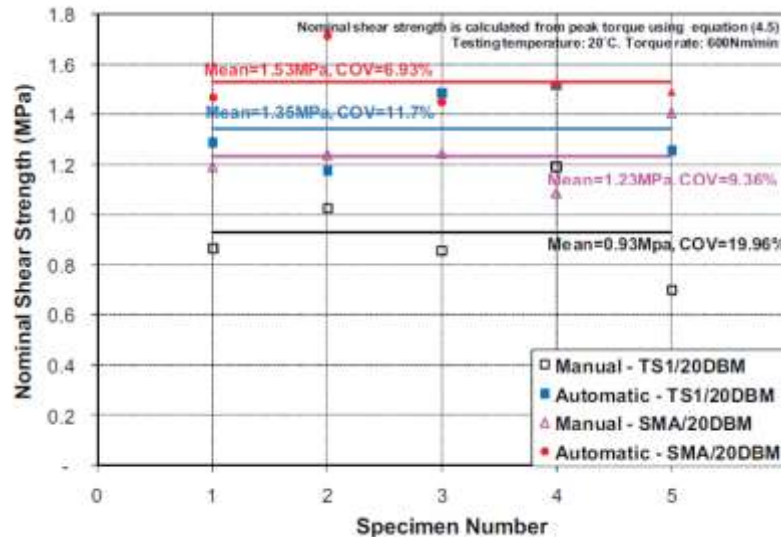


Figure 6 Comparaison résultats d'essai entre système manuel et automatique (machine d'essai)

4.2 Essai de mesure d'adhésion des couches (LAMI) (Destrée, 2016), (DLC, 2005)

Le ministère des transports du Québec a développé une technique de test en traction pour effectuer des tests sur le terrain. Cette méthode présente l'avantage d'être facilement transportable et de pouvoir effectuer des tests peu de temps après la construction de la chaussée afin de valider la livraison ou pas. Le principe est simple : un appareil de traction hydraulique tire sur un câble qui est lui-même collé ou serré autour de l'échantillon de route à tester.



Figure 7 Système de traction québécois avec prise mécanique

4.3 OFTC (Oregon Field tack Coat Tester)

Parmi les derniers essais développés, on retrouve le dispositif OFTT (Oregon Field Torque Tester) présenté par Coleri (Coleri E., 2017) dans sa thèse. Le dispositif est présenté sur la figure 6.

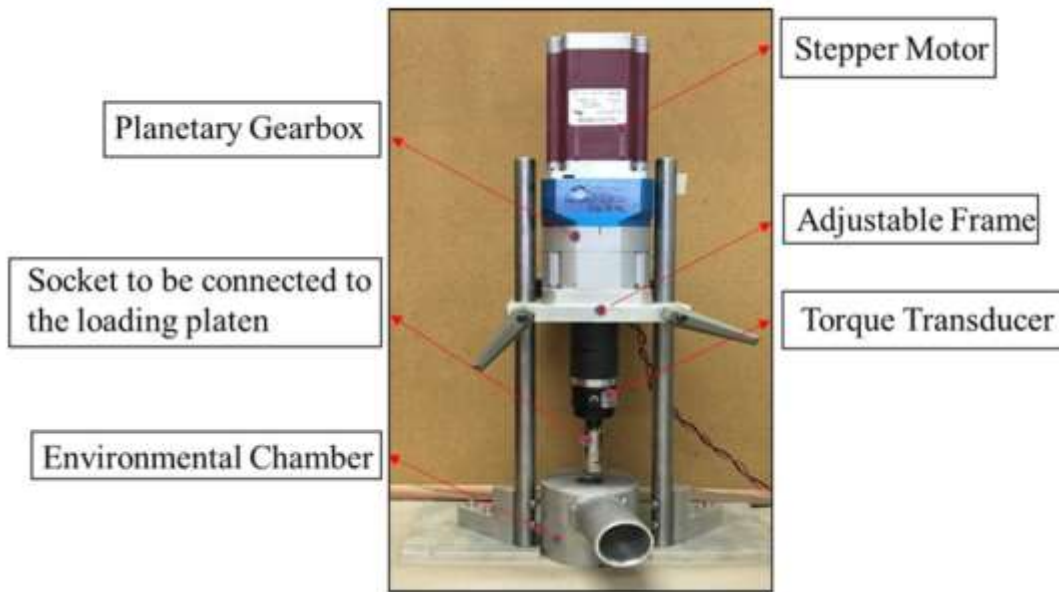


Figure 8 Dispositif OFTT

Les caractéristiques matériaux et conditions d'application sont résumés dans le tableau 1.

Surface	Location	Day	Tack Coat Type	Application Rates (gal/yd ²)
Milled	1	Day 1	CO1_CSS 1H_a	0.08, 0.10, 0.12
	2	Day 2	CO1_New_a	0.08, 0.12, 0.16
	3	Day 3	CO2_New	0.08, 0.12, 0.16
Overlay	1	Day 4	CO1_CSS 1H_b	0.05, 0.07, 0.10
	2	Day 5	CO1_New_b	0.05, 0.07, 0.09
	3	Day 6	CO2_CSS 1H	0.05, 0.07, 0.10

Tableau 1 : Condition d'application des couches d'accrochage

Les diamètres testés des différentes éprouvettes sont de 2,5 inch (63,5 mm). La machine est pilotée en déplacement et non en effort.

Afin de pallier aux problèmes de température, une chambre est disposée près de la zone de test permettant de réguler la température souhaitée. Ici, les essais ont été réalisés à 25°C dans les deux cas (essai labo et essai in-situ).

Les différentes étapes de réalisation des essais in-situ sont les suivantes et décrites par les auteurs.



Figure 9 Procédure générale suivie pour l'essai via le dispositif OFTT

La première étape consiste à venir carotter au niveau d'une chaussée (mis en œuvre il y a 7 mois) en des endroits différents. Une colle est disposée sur la zone à carotter. Un poids est disposé sur la zone carottée afin que la colle adhère correctement à la plaque. Un pistolet chauffant permet d'atteindre et maintenir la température souhaitée. L'essai peut avoir lieu dans un dernier temps.

Les résultats d'essai ont été comparés avec des essais réalisés en laboratoire via un dispositif sur presse dans des conditions optimales d'essai.

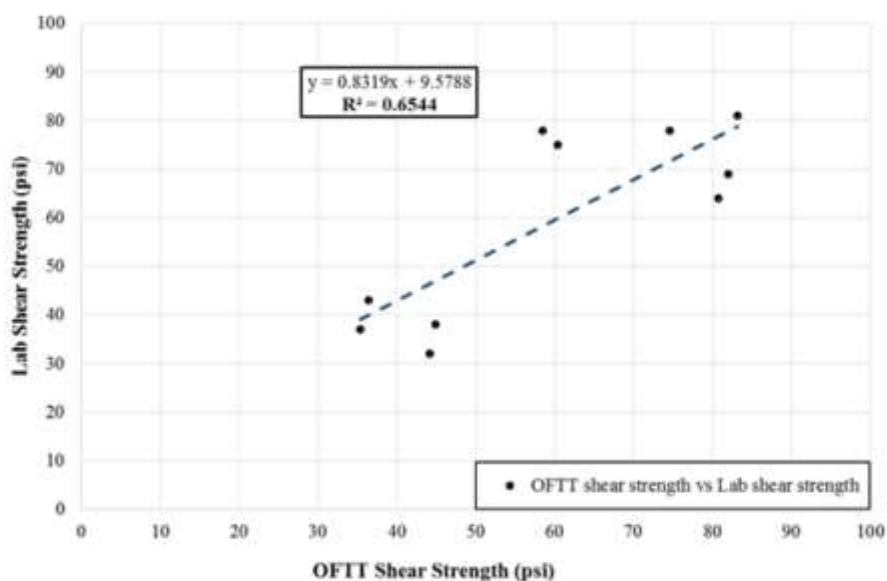


Figure 10 Corrélation entre résultats d'essai en torsion laboratoire et dispositif OFTT

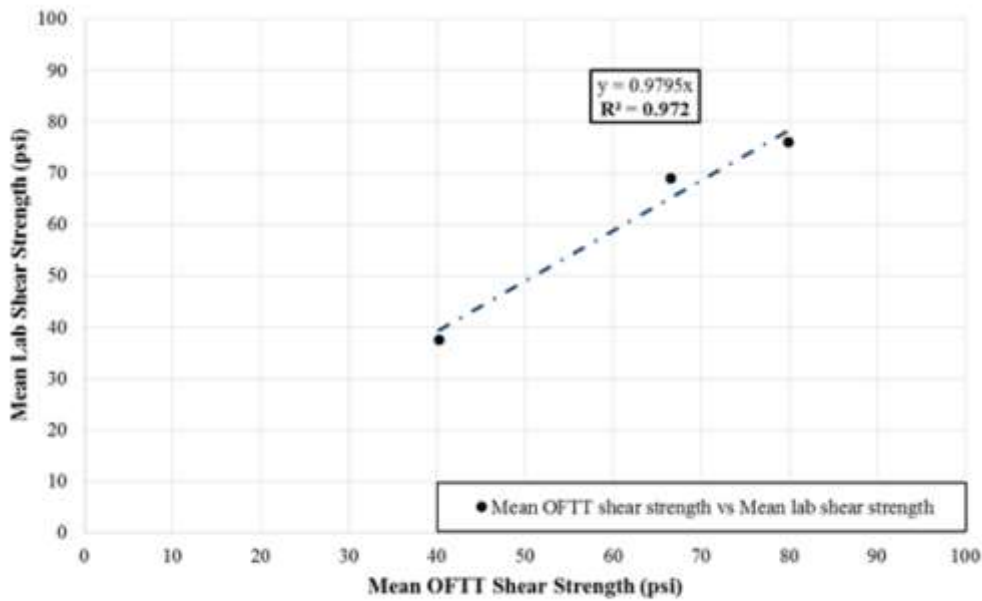


Figure 11 Corrélation entre résultats de contrainte de torsion moyenne issus d'essai du dispositif et d'essai laboratoire

Les auteurs ont observé des différences nettes dans les résultats entre essai laboratoire et essai in situ. En revanche, en réalisant une moyenne sur tous les échantillons de la même zone, ils font observer que les essais sont plus proches des essais laboratoire. La différence provient d'après les auteurs des paramètres de réalisation qui peuvent légèrement changer (tel que le taux d'émulsion, le chargement non homogène, etc.). Cependant cette corrélation n'est faite que sur trois points, conduisant facilement à un R^2 très satisfaisant.

Les valeurs en contrainte pour ce type de matériaux restent relativement élevées en comparaison de nos résultats. Les valeurs oscillent entre 40 et 80 psi, soit entre 2,8 et 4,8 MPa.

4.4 Essai de torsion instrumenté en laboratoire

L'essai de torsion in-situ a l'avantage de pouvoir être réalisé directement sur chantier. Néanmoins, il apparaît que sa réalisation en maintenant une vitesse constante, homogène avec un effort bien parallèle à la surface n'est pratiquement pas possible actuellement (voir 4.1).

Face à ce constat, afin d'obtenir des premiers résultats fiables liés à des sollicitations d'échantillons sous torsion, un dispositif a été développé permettant de réaliser des essais contrôlés avec une acquisition des résultats fiables pouvant être exploités.

On retrouve parmi les dispositifs existants, celui présenté par Malick Diakhate dans sa thèse (Diakhate M., 2007) et développé par EUROVIA en 2002. Ce dispositif permet de réaliser l'essai au moyen d'une presse et ainsi maîtriser, notamment, la vitesse de rotation ainsi que le parallélisme. Le fonctionnement est le suivant : un disque est collé de chaque côté de l'éprouvette. Un des disques est fixé au bâti alors que l'autre est relié à une roue dentée (la torsion à vitesse de rotation constante est obtenue en fixant une des extrémités d'une chaîne à la traverse de la presse et l'autre à la roue dentée) (figure 13). Ainsi, il est possible, à l'aide d'une machine de traction conventionnelle, pilotée électroniquement et disposant d'un asservissement et d'une acquisition, d'obtenir l'effort et le déplacement du vérin qui permettront de remonter au couple transmis et l'angle de rotation de l'échantillon.



Figure 12 Dispositif pour la torsion mécanique (M.DIAKHATE)

Oihane Mendizabal Uriarte (Mendizabal O. 2014) a proposé, en partenariat avec COLAS, ESTP et ENSAM, une évolution de ce précédent dispositif afin de pouvoir mener les essais sans besoin de démontage des pièces pour pouvoir y déposer l'éprouvette (afin d'éviter que l'écart de température soit élevé entre la sortie de l'échantillon de l'étude et la réalisation de l'essai). Les plans de ce dispositif sont disponibles dans l'annexe 1.



Figure 13 Nouveau dispositif avec modification des supports des casques

Le nouveau dispositif reprend les mêmes bases que l'ancien. La variante est essentiellement au niveau des supports des casques du dispositif.

Par ailleurs, on note que des laboratoires universitaires, tels que par exemple le GC2D à Egletons ou le laboratoire de l'ENTPE disposent de presses équipés de vérin de torsion qui permettent nativement la réalisation d'une telle modalité d'essai.

4.5 Bilan

Cet état de l'art sur les moyens expérimentaux montre que :

- La problématique traitée est internationale
- Certains pays, ou états ont bâti des doctrines se basant à chaque fois sur un essai différent.
- Le travail prénormatif européen autour des essais d'accrochage n'a pas fait émerger de pratique commune en Europe
- Des méthodes d'essais applicables au terrain sont décrites mais leur caractère « recherche » ne permet pas de les dupliquer

Sur le plan pratique, l'essai de torsion ressort comme un bon candidat à un déploiement sur site et nécessite une phase de mise au point sur un banc d'essai pilote.

5 Analyse des résultats d'études

Suite à cette première partie de présentation des moyens existants et rencontrés dans la littérature, nous allons nous intéresser au comportement des couches d'accrochage soumis à ce type de sollicitation.

5.1 Dispersion et reproductibilité

Dans sa campagne d'essais, (Mendizabal O., 2014) a utilisé la méthode des plans d'expérience. L'objectif étant d'obtenir des premières valeurs de résistance des couches d'accrochage permettant une analyse de la norme européenne en cours.

Dans un premier temps, des essais de reproductibilité ont été réalisés permettant de s'intéresser à la dispersion des essais. Le dispositif utilisé est celui présenté au premier chapitre (Figure 13).

Les conditions expérimentales établies d'une part dans la norme et d'autre part par l'étude sont les suivantes :

- Température : 20°C
- Emulsion : classique
- Compacité support : 85%
- Compacité roulement : 91,5%
- Vitesse : 180°/min

Chaque essai est répété 6 fois. Selon les résultats des essais de reproductibilité (Figure 14), cela suffit pour tirer des résultats concluants.

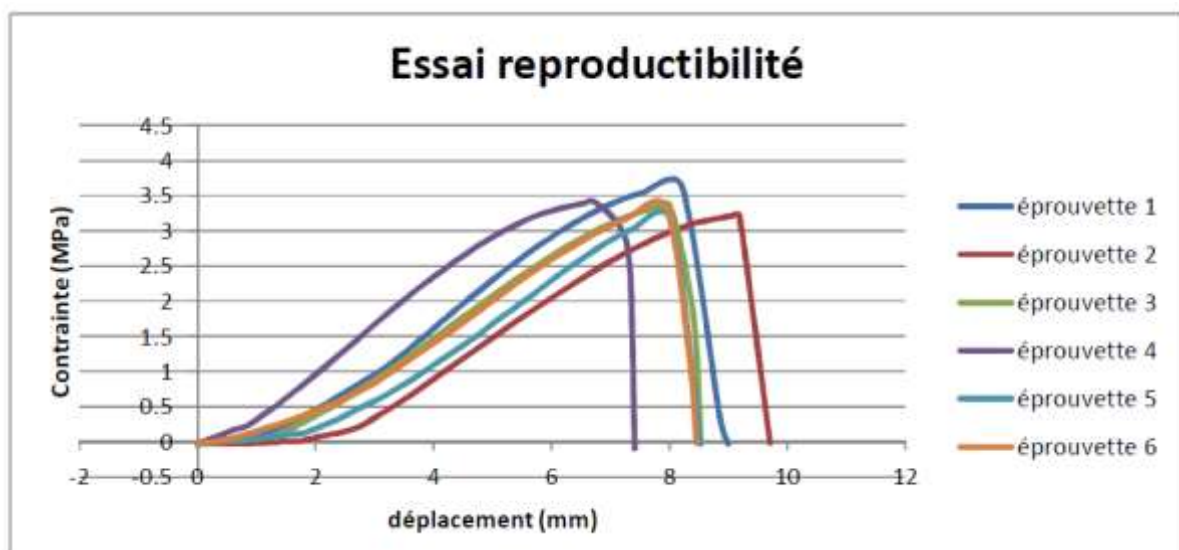


Figure 14 Essais de reproductibilité en torsion

Le dépouillement des courbes permet d'obtenir une contrainte max. à rupture moyenne de 3.385 MPa associée à un écart-type de 0.158 MPa. Suite aux valeurs, il apparaît que le test est assez reproductible due à la faible valeur d'écart-type observé.

5.2 Calcul d'erreur sur la torsion

Des travaux antérieurs, datant de 2006 mais non publiés, ont été réalisés au sein d'Eurovia dans le cadre du Stage de Fin d'étude de Thibault Tremble avec le même dispositif. Un calcul d'incertitude a été mené sur le résultat de l'essai de résistance en torsion afin d'identifier les paramètres géométriques influents sur l'incertitude.

On reprend la formule du paragraphe 3.1 :

$$\tau_{\max} = \frac{16\Omega}{\pi D^3}$$

L'incertitude sur la contrainte est donc :

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\Delta 16}{16} + \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta R_r}{R_r} + \frac{\Delta\pi}{\pi} + 3\frac{\Delta D}{D}$$

$$\text{Or } \frac{\Delta 16}{16} = \frac{\Delta\pi}{\pi} = 0$$

Donc :

$$\frac{\Delta\tau}{\tau} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta R_r}{R_r} + 3\frac{\Delta D}{D}$$

L'incertitude sur F est de 1 % (norme fabricant). L'incertitude mesurée sur le rayon de la roue crantée R_r est de 11,6 % et l'incertitude mesurée sur le diamètre de l'éprouvette est de 0,3 %. **L'incertitude sur la contrainte maximale est donc de 13,5 %.**

5.3 Effet du taux d'application de l'émulsion

O.Mendizabal (Mendizabal O., 2014) a étudié un paramètre identifié comme important à savoir l'influence du taux d'application de l'émulsion d'accrochage. Les taux d'application ont varié de 0 à 500g/m² de liant résiduel avec un pas de 100; tous les essais ont été réalisés à 20°C aux vitesses moyennes de la norme avec une émulsion de bitume pur dans un premier temps.

D'autre part, un essai, sans couche d'accrochage, qui vise définir le seuil de rupture sur des enrobés (GB et BBSG) a été effectué en traction, cisaillement et torsion. Cette évaluation a été menée à la suite des travaux de 2013 de Guillaume Marmer, aux cours desquelles des éprouvettes ont rompu dans l'enrobé et non au niveau de l'interface.

Les résultats en torsion obtenus sont les suivants

Torsion mécanique

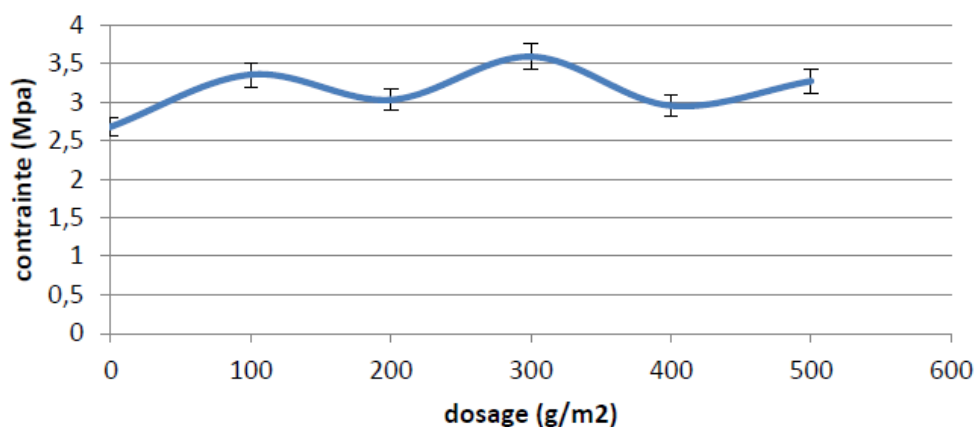


Figure 15 Influence du taux de dosage d'émulsion d'accrochage
(20°C- vitesse de 180°/min)

Quelques travaux ont été menés, dont une étude réalisée par (Raposeiras A.C., 2012), où les auteurs proposent comme taux de dosage idéal pour l'émulsion d'accrochage un intervalle compris entre 250g/m² et 500g/m².

Les travaux de Tremble confirment ces résultats. Une part de cette étude, réalisée avec le dispositif de torsion d'Eurovia, visait à évaluer l'influence du dosage.

Pour cela, quatre dosages en bitume résiduel ont été choisis : 150g/m², 300 g/m², 400 g/m² et 500 g/m² ainsi qu'une référence sans couche d'accrochage.

Deux natures d'émulsions (à rupture rapide ECR ou non noté EC) ont été évaluées. Le support est un BBSG ayant une PMT mesurée en 1 et 1,5. Ces essais ont dans un second temps été complétés par des dosages résiduels à 75 g/m² et 1000 g/m² (dans ce dernier cas, le bitume a été appliqué chaud et non en émulsion).

La figure 16, présentant les résultats, amène les commentaires suivants :

- A partir d'une certaine valeur du dosage en bitume résiduel proche de 100 g/m², les performances mécaniques se stabilisent. Au-delà, l'augmentation du dosage ne semble guère améliorer les performances. Ceci est vrai pour les deux émulsions.
- L'influence du dosage sur la performance de l'accrochage a été vue dans un cas bien particulier : support enrobé, avec une hauteur au sable fixée. On ne peut à ce stade tirer de généralité.

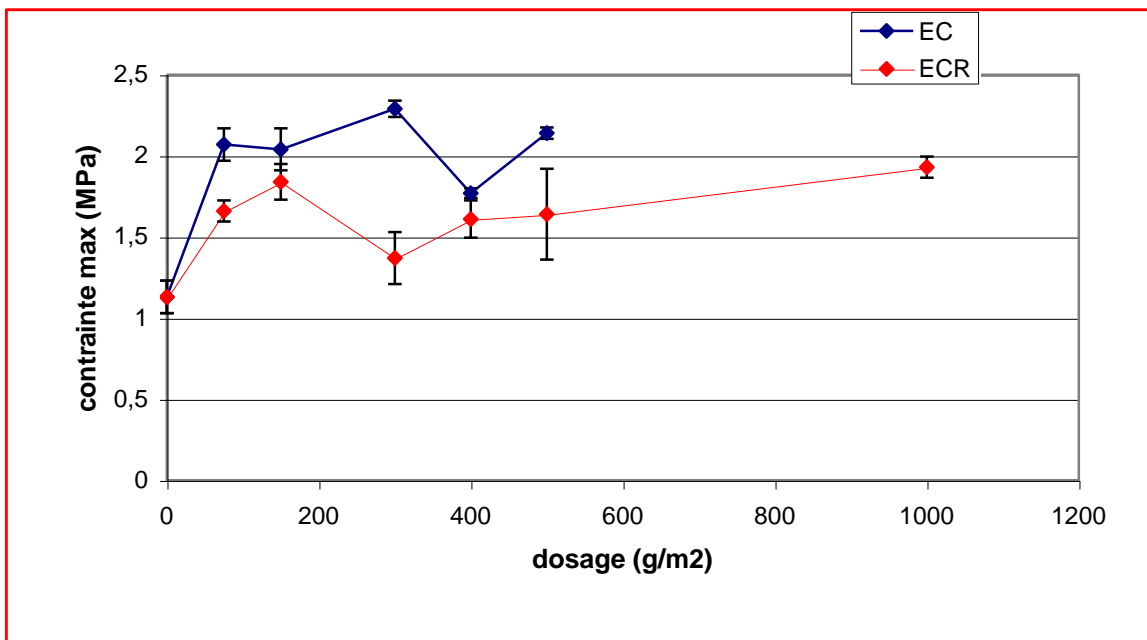


Figure 16 Influence du taux de dosage d'émulsion d'accrochage (1,3 MPa / s ; 20°C)

5.4 Effet de la température, de la vitesse de sollicitation, du type d'émulsion et de la compacité de la couche de support et de roulement

O.Mendizabal (Mendizabal O., 2014) a mis en place un plan d'expérience permettant de tester différents facteurs. Ce plan d'expérience a été réalisé sous les trois principales sollicitations proposées par la prénorme à savoir traction, cisaillement et torsion. Nous présenterons uniquement les résultats en torsion dans ce rapport.

La table testée est la suivante, dans laquelle on retrouve 5 paramètres qui sont :

- Le type d'émulsion
- La vitesse de sollicitation
- La température
- La compacité de la couche de roulement
- La compacité de la couche du support

N°	Type d'émulsion	Vitesse de sollicitation (°/min)	1x2	Température (°C)	1x4	Compacité (roulement) (%)	Compacité (support) (%)
1	Modifiée	120	1	5	1	85	75
2	Modifiée	120	1	35	-1	95	95
3	Modifiée	360	-1	5	1	95	95
4	Modifiée	360	-1	35	-1	85	75
5	Classique	120	-1	5	-1	85	95
6	Classique	120	-1	35	1	95	75
7	Classique	360	1	5	-1	95	75
8	Classique	360	1	35	1	85	95

Tableau 2 Table du plan d'expériences

Différentes observations de modes de rupture sont effectuées pour les différentes combinaisons de paramètres.

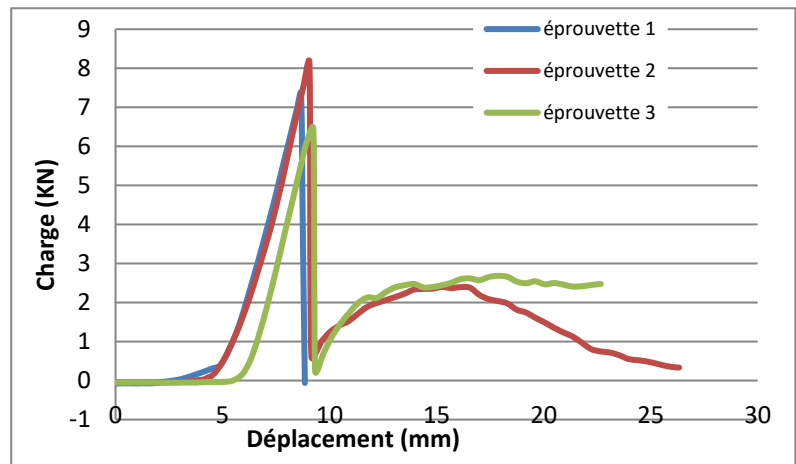


Figure 17 Mode de rupture : éprouvettes torsion mécanique, première ligne du plan d'expériences

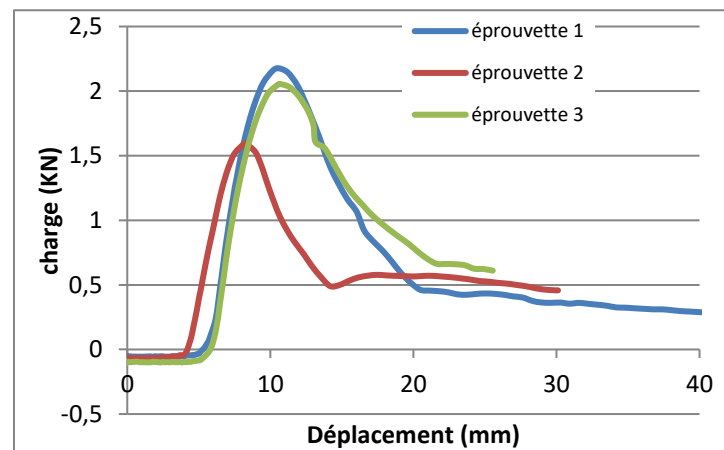


Figure 18 Mode de rupture : éprouvettes torsion mécanique, deuxième ligne du plan d'expériences

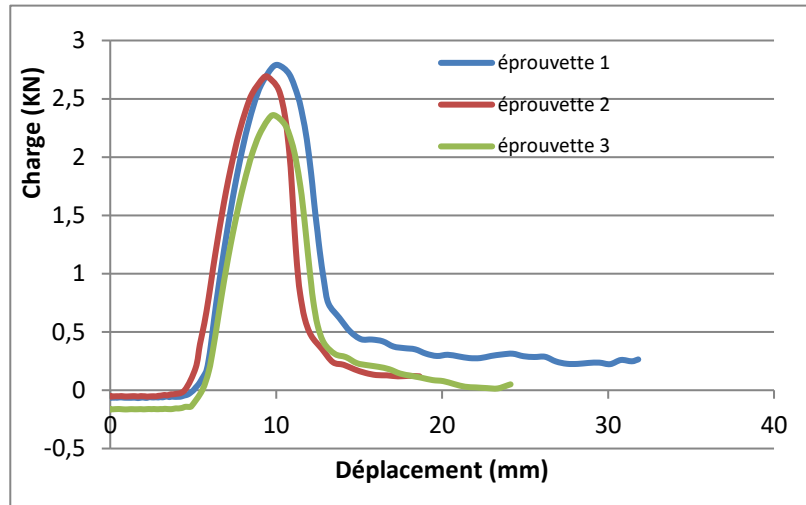


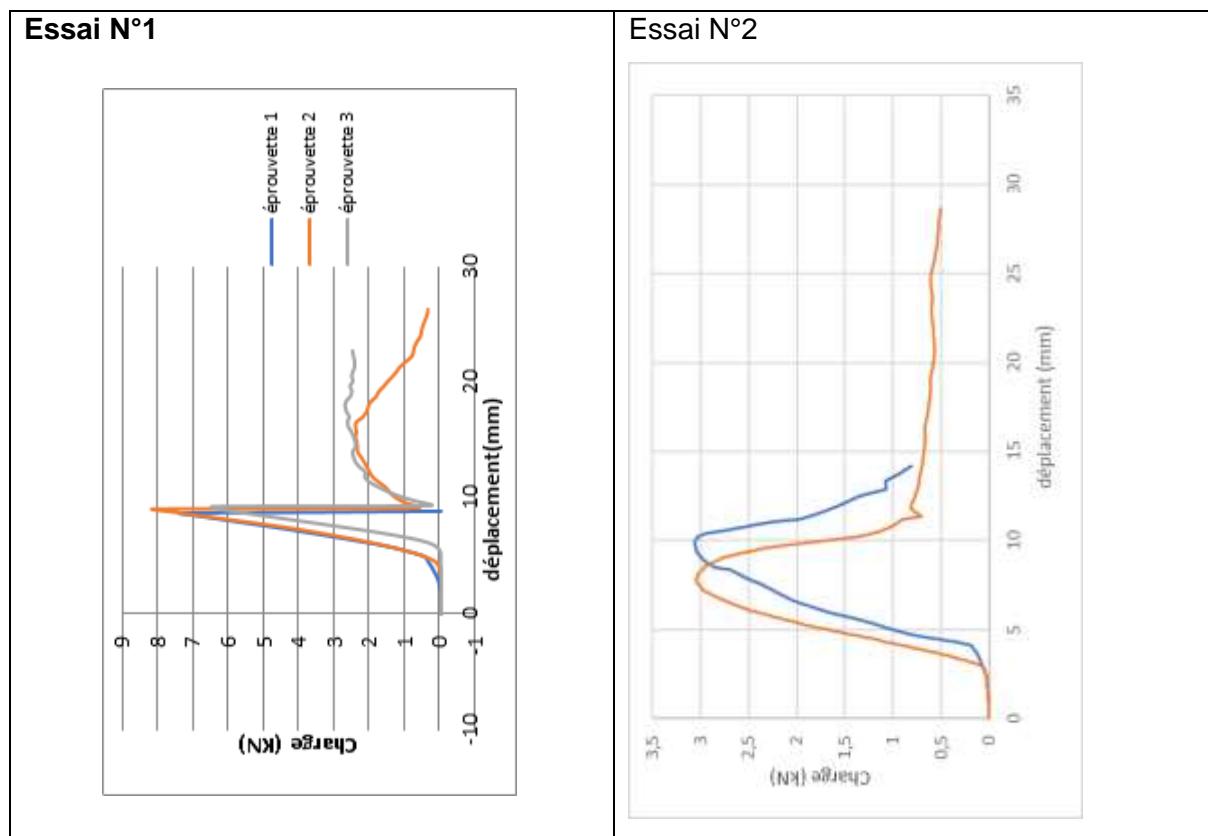
Figure 19 Mode de rupture : éprouvettes torsion mécanique, sixième ligne du plan d'expériences

Trois cas sont analysés par les auteurs. On distingue les différents modes de rupture dans l'allure des éprouvettes après rupture et dans les graphiques force-déplacement. Si on prend la Figure 17, on voit que la rupture a partiellement lieu à l'interface mais qu'elle se propage aussi le long de l'enrobé et de la colle. L'émulsion est modifiée et les conditions de l'essai se font à basse température et à basse vitesse avec des enrobés peu compactés. Ainsi à basse température l'émulsion modifiée a une résistance proche de celle de l'enrobé peu compacté et celle de la colle. Si on compare avec la Figure 18, pour les mêmes valeurs de vitesse et des compacités et une température plus hautes, on voit que la rupture est plus nette et des niveaux de force plus faibles liés à la température. Dans la Figure 19, la rupture se fait à l'interface mais celle-ci est plus ductile, due là aussi à une plus haute température d'essai.

Les résultats obtenus des essais sont les suivants et présenter en fonction de la ligne du plan d'expérience. Pour chaque cas du plan d'expériences, trois essais ont été réalisés (excepté pour les conditions du plan N°2).

Ligne PE	Charge Max (kN)	Déplacement	Couple (N.m)	Contrainte (Mpa)	Angle (°)
1	7,425	8,71	464,0625	2,363450905	7,98879
	8,197	9,06	512,3125	2,609186137	8,309809
	6,513	9,24	407,0625	2,073152289	8,474904
2	3,061	8,405	191,3125	0,974346562	7,709045
	3,042	7,93	190,125	0,968298674	7,273376
3	6,94682	8,035	434,17625	2,211241484	7,369682
	14,363228	11,99	897,70175	4,57195747	10,9972
	11,626794	10,53	726,674625	3,700923475	9,658089
4	2,17708	10,55	136,0675	0,692986087	9,676433
	1,593801	8,295	99,6125625	0,507322615	7,608153
	2,054841	10,67	128,4275625	0,654076205	9,786497
5	10,738	9,075	671,125	3,418011558	8,323567
	10,989	8,16	686,8125	3,497907339	7,484331
	13,709	9,715	856,8125	4,36371023	8,910573
6	1,719	6,785	107,4375	0,547174694	6,223185
	1,684	6,885	105,25	0,536033848	6,314904
	1,392	6,185	87	0,443087362	5,672866
7	5,990639	9,545	374,4149375	1,906879618	8,75465
	4,760934	4,74964	297,558375	1,51545236	4,356358
	8,608437	7,78	538,0273125	2,740150602	7,135796
8	2,788157	10,14	174,2598125	0,887497937	9,300382
	2,688461	9,485	168,0288125	0,855763715	8,699618
	2,35908	9,88	147,4425	0,750918486	9,061911

Tableau 3 Résultats Contrainte Max/ angle de rotation



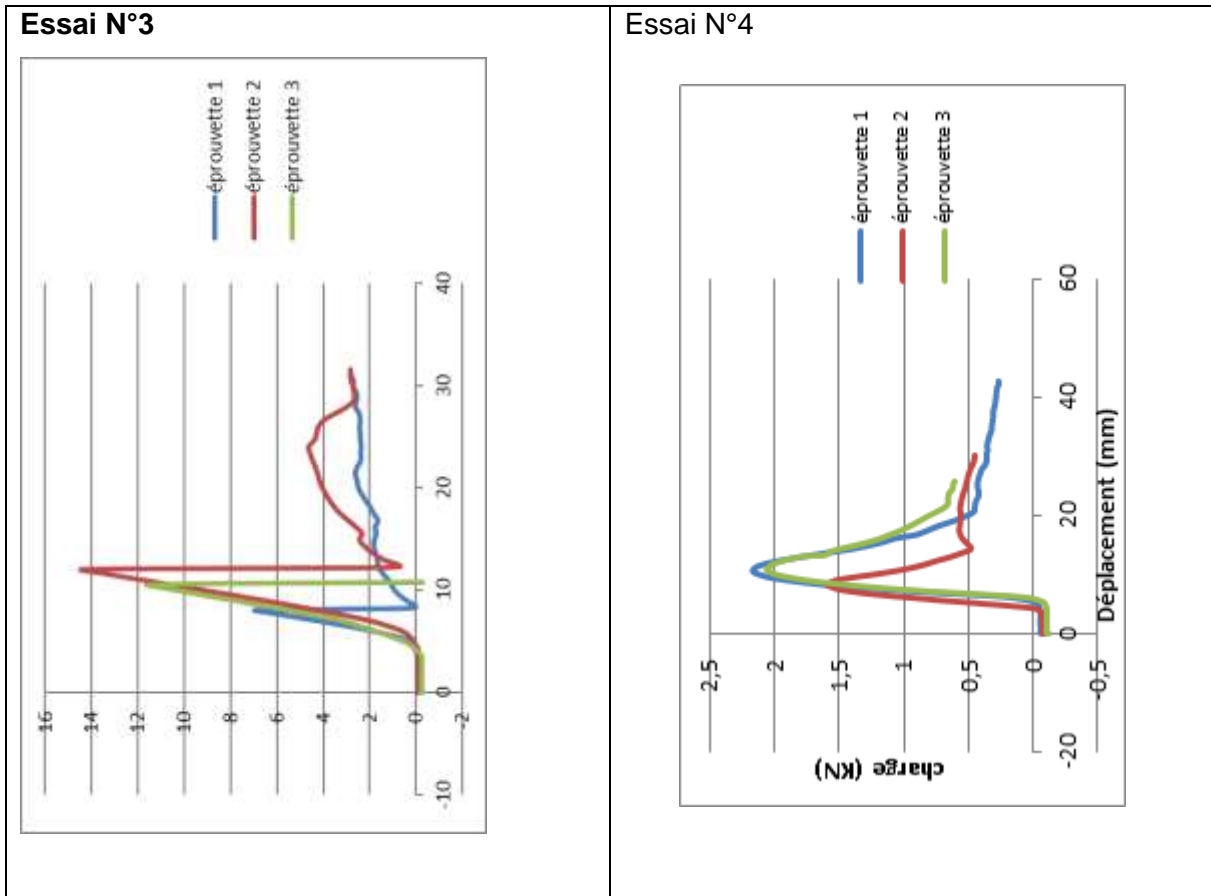
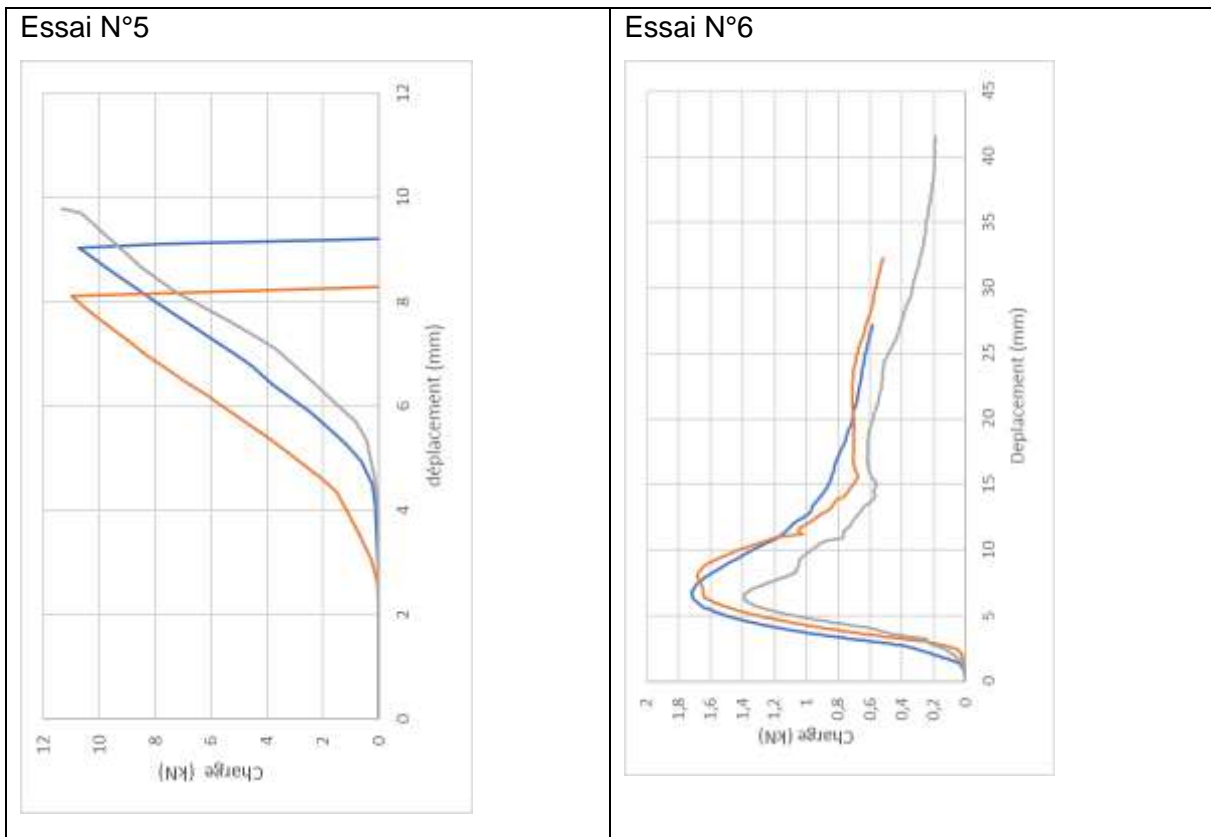


Figure 20 Résultats des essais de torsion du plan d'expériences (essai 1 à 4)



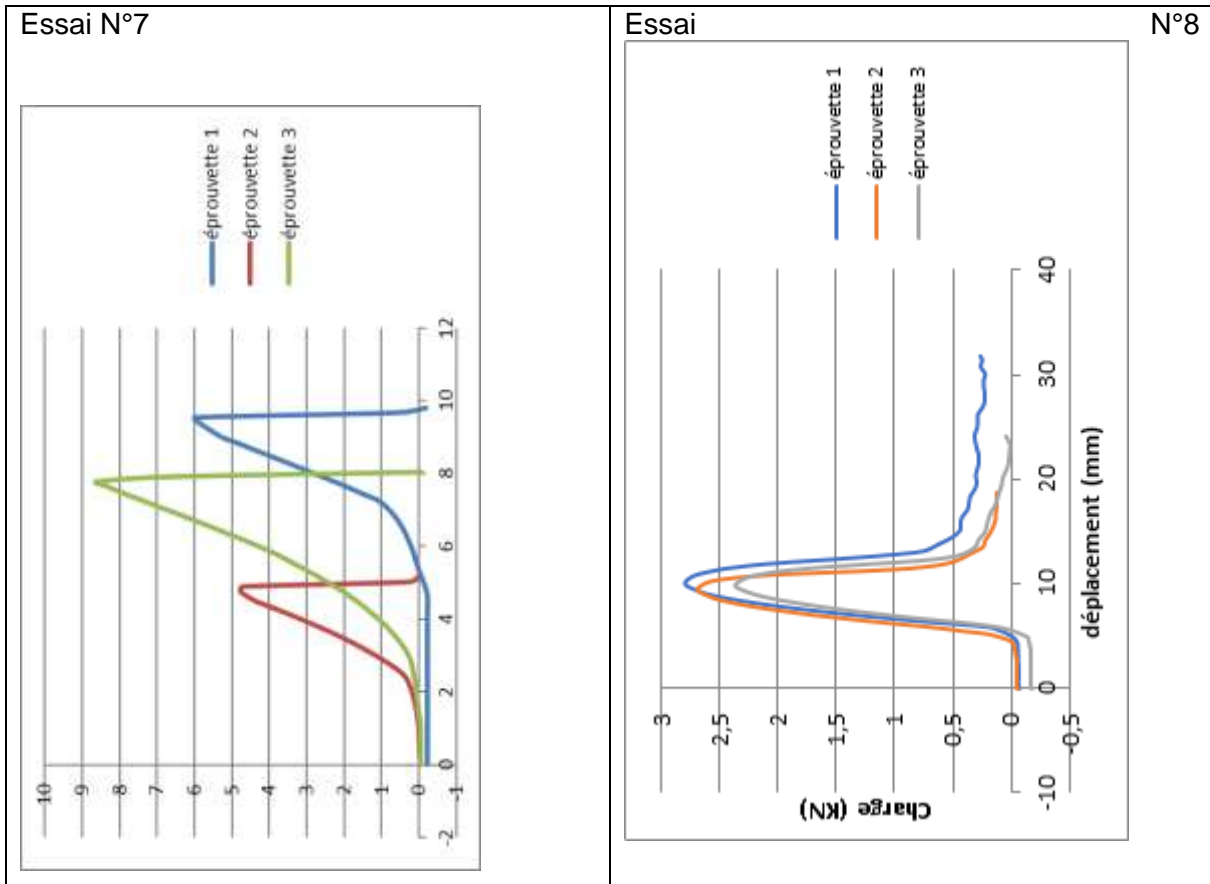


Figure 21 Résultats des essais de torsion du plan d'expériences (essai 5 à 8)

Finalement l'analyse du plan d'expériences conduit les auteurs aux conclusions suivantes :

Comme pour les cas de traction et cisaillement, la température est de loin le facteur le plus influent, trois fois plus influent que le deuxième paramètre, même si la variation est moins importante (augmentation de 300% de la contrainte entre 35°C et 5°C). Pourtant, cette fois-ci, il existe une hiérarchie plus claire. Le deuxième paramètre le plus influent est, comme pour la traction, la compacité du support.

Dans les conditions de cette étude, les autres paramètres apparaissent peu influents. La vitesse de sollicitation apparaît avoir une très faible influence. Ainsi, selon cette étude, sa maîtrise ne nécessite pas d'être parfaite lors de la réalisation d'un essai d'après les résultats présentés.

Dans ses travaux, Diakhaté (Diakhate M., 2007) a réalisé une série d'essais sur des éprouvettes en torsion et étudié l'effet température et vitesse de sollicitation. La couche d'accrochage testée dans cette étude est une émulsion bitumineuse classique à rupture rapide de type C65B4 selon la norme prEN 13808:204. Elle est dosée à 65% de bitume pur de grade 35/50 et uniformément répandue à raison de 300 g/m² de bitume résiduel. La couche d'accrochage est mise en œuvre à l'interface de deux couches d'enrobés formulés différemment mais avec un bitume identique à celui de l'émulsion. Quelques caractéristiques des bétons bitumineux semi grenu (BBSG) et très mince (BBTM) sont présentées dans le tableau suivant.

Couche	Enrobés	Granularité	Dosage en liant	Epaisseur	% des vides
Supérieure	BBTM	0 – 10 mm	5,6 p.p.c.	30 mm	12
Inférieure	BBSG	0 – 10 mm	6,0 p.p.c.	50 mm	7

Tableau 4 Caractéristiques des couches d'enrobés bitumineux

Les éprouvettes de forme cylindrique sont prélevées sur une plaque fabriquée en laboratoire au moyen d'un compacteur de plaque (NF EN 12697-33) dans un moule de dimensions en plan 400 mm x 600 mm et d'épaisseur 150 mm. Les matériaux (granulats et bitume) nécessaires à la fabrication du BBSG sont mélangés dans un malaxeur à 160°C puis compactés dans le moule pour obtenir une épaisseur de 50 mm. Après deux heures de repos (température à la surface de l'enrobé : 45°C), l'émulsion bitumineuse est uniformément répandue à la surface de la couche de BBSG. Un temps d'attente de deux heures est observé afin d'atteindre la rupture de l'émulsion et l'évaporation de sa phase aqueuse. Puis la couche de BBTM est mise en œuvre pour obtenir une épaisseur de 30 mm après compactage. Par plaque bicouche, un plan de carottage (respectivement de sciage) permet d'extraire 11 éprouvettes de diamètre 100 mm et de hauteur 80 mm (respectivement 12 éprouvettes de dimensions 70 mm x 105 mm x 50 mm). Les éprouvettes sont par la suite collées sur les casques métalliques pour assurer la transmission des efforts.

L'essai monotone est réalisé à différentes vitesses de sollicitation et aux températures d'essai de 10 et 20°C.

Emulsion et température d'essai		Classe de la vitesse de sollicitation appliquée $\dot{\tau}_R$ [MPa/s]			
		Lente	Moyenne	Rapide	Très rapide
		$0,001 \leq \dot{\tau}_R \leq 0,010$	$0,010 < \dot{\tau}_R \leq 0,100$	$0,100 < \dot{\tau}_R \leq 1,000$	$1,000 < \dot{\tau}_R$
C65B4	10°C	1	3	4	2
35/50	20°C	1	1	9	1

Tableau 5 Nombre d'essais en fonction de la vitesse de sollicitation

Les auteurs observent, par analyse visuelle, des ruptures des éprouvettes testées, les résultats montrent, qu'à 20°C, quelle que soit la vitesse de sollicitation appliquée, la rupture macroscopique de l'éprouvette est localisée à l'interface BBTM / BBSG. Cependant, les résultats montrent, qu'à 10°C, une vitesse de sollicitation dite très rapide conduit à l'arrachement d'un bloc d'enrobé au voisinage de l'interface. Cette dernière observation laisse penser qu'à la température de 10°C, l'interface réalisée avec une émulsion bitumineuse 35/50 est aussi résistante que la couche d'enrobé. Il faut souligner que cette analyse est basée sur l'observation de la rupture macroscopique de l'éprouvette, et qu'une information sur la rupture microscopique de l'éprouvette pourrait apporter d'autres conclusions. De plus, cet arrachement de bloc d'enrobé est influencé par l'effet combiné de la vitesse de sollicitation (inertie du vérin) et du phénomène d'engrènement des granulats à l'interface.

Les résultats d'essais monotones à 10 et 20°C sont les suivants.

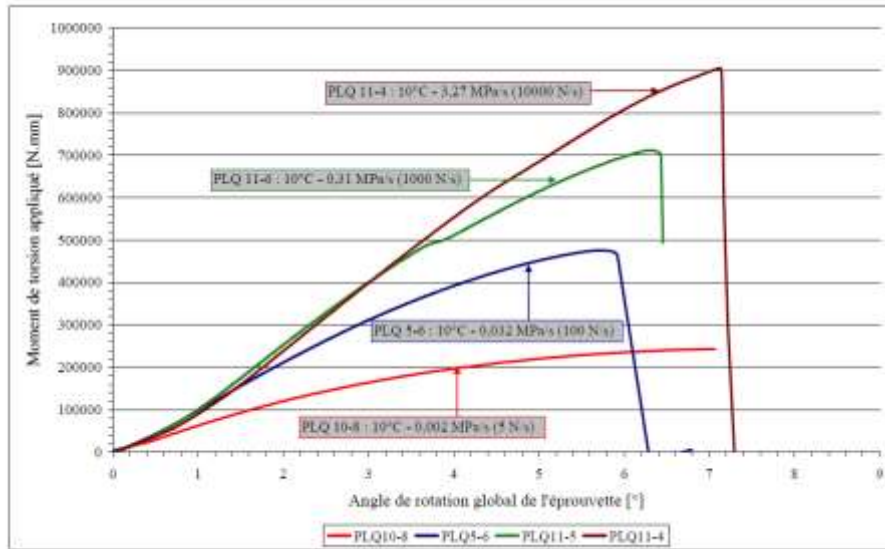


Figure 22 Essai de torsion à 10°C

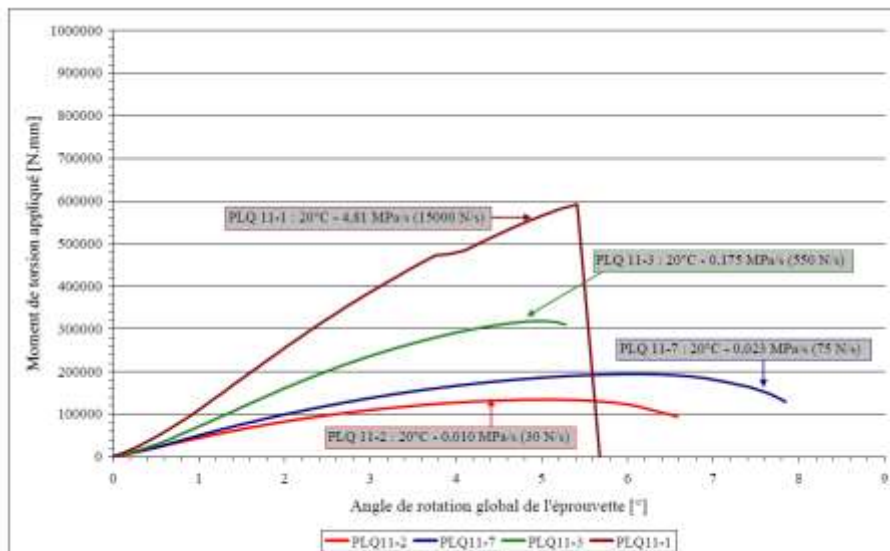


Figure 23 Essai de torsion à 20°C

Selon les auteurs, les graphes présentés montrent, qu'à 10°C et pour des vitesses de sollicitation comprises entre 0,03 et 3 MPa/s, les courbes sont confondues en début d'essai (tant que l'angle de rotation global de l'éprouvette α_G reste inférieur à 1,6°). Notons que par angle de rotation global, on intègre l'ensemble des rotations pouvant se développer dans l'échantillon et le dispositif de maintien. Sur cette portion de courbe, le moment de torsion semble évoluer linéairement avec l'angle α_G , comme si la combinaison de matériaux étudiée présentait un comportement élastique. Cette observation n'est pas mise en évidence à travers les essais réalisés à 20°C, ceci pourrait s'expliquer par le fait que le comportement viscoélastique du produit testé soit plus marqué à 20°C qu'à 10°C. Sur la base des résultats présentés, on remarque que, dans une première phase, l'angle de rotation α_G augmente linéairement avec le moment de torsion appliqué. Au-delà de cette phase linéaire, l'évolution du moment de torsion en fonction de l'angle α_G décrit une cloche.

L'ensemble des résultats sont synthétisés dans le tableau 6.

Produit testé	N° Eprouvette	Température [°C]	Sollicitation mécanique		Résultats expérimentaux		
			$\dot{\tau}_R$ [MPa/s]	\dot{F} [N/s]	F^{\max} [N]	τ_R^{\max} [MPa]	T_R [s]
Emulsion à base de bitume pur 35/50	PLQ 10/8	10	0,002	5	4058	1,27	811,5
	PLQ 5/7		0,024	75	8262	2,65	110,2
	PLQ 5/8		0,027	85	7889	2,49	92,8
	PLQ 5/6		0,032	100	7938	2,55	79,4
	PLQ 5/5		0,161	500	10429	3,36	20,9
	PLQ 11/5		0,282	900	11245	3,52	12,5
	PLQ 11/6		0,312	1000	11869	3,70	11,9
	PLQ 5/1		1,023	3272	12362	3,87	3,8
	PLQ 5/4		3,127	10000	14488	4,53	1,5
PLQ 11/4	3,265	10000	15101	4,93	1,5		
Emulsion à base de bitume pur 35/50	PLQ 11/2	20	0,010	30	2245	0,72	74,9
	PLQ 11/7		0,023	75	3238	1,01	43,5
	PLQ 11/3		0,175	550	5305	1,69	9,8
	PLQ 10/1		1,000	3272	8589	2,63	2,7
	PLQ 10/3		1,000	3272	8365	2,56	2,7
	PLQ 10/4		1,000	3272	8858	2,71	2,9
	PLQ 10/5		1,000	3272	8468	2,59	2,7
	PLQ 10/6		1,000	3272	8668	2,65	2,7
	PLQ 3AR/2		1,000	3272	8620	2,63	2,8
	PLQ 3AR/3		1,000	3272	8451	2,58	2,7
	PLQ 3AR/1		1,000	3272	7645	2,34	2,4
	PLQ 11/1		4,808	15000	9864	3,16	0,7

Tableau 6 Résultats essai de torsion monotone

Les auteurs, par la suite, proposent des lois mécaniques permettant de relier la résistance au cisaillement du collage à la vitesse de sollicitation et à la température d'essai dans un premier temps, puis dans un deuxième temps de corrélérer à chaque température, la résistance au cisaillement et le temps de rupture de l'interface.

(Sutando M.H., 2009) a réalisé une étude similaire. Il s'est notamment intéressé à la température, au temps de rupture de l'échantillon et à la vitesse de sollicitation. Ils observent une forte influence de la température d'essai avec une forte chute de la résistance max en torsion de l'échantillon. Une comparaison a été faite entre une vitesse de déplacement angulaire imposé (180°/min) et une vitesse de chargement imposé (600 Nm/min). Il apparaît que le matériau ait une résistance plus importante à déplacement imposé qu'à vitesse imposé. Cette dépendance à la vitesse signifie que le matériau a un comportement visqueux. Il souligne aussi qu'à cette vitesse de déplacement imposé, les rotations de section sont très faibles (entre 3 et 7°) et le temps à la rupture est très court (moins de trois secondes).

5.5 Influence de la nature du support

Toujours dans le cadre des travaux de Tremble en 2006, des essais conduits en laboratoire ont porté sur l'évaluation expérimentale de l'impact du support : béton de ciment ou enrobé bitumineux (BBSG) sur la résistance de la couche d'accrochage. Les essais ont été réalisés avec un dosage unique de 300 g/m² ; la vitesse de torsion est de 1.3 MPa/ s et la température d'essai de 20°C. Un total de 6 natures d'émulsion ont été testées, elles sont notées A à F.

Le graphique suivant présente les résultats des essais pour un support en béton (BE300) ou un support en enrobé (EE300) avec une indication de la résistance frais / frais, c'est-à-dire sans mise en œuvre de couche d'accrochage (qui est bien sûr une pratique non recommandée par les auteurs).

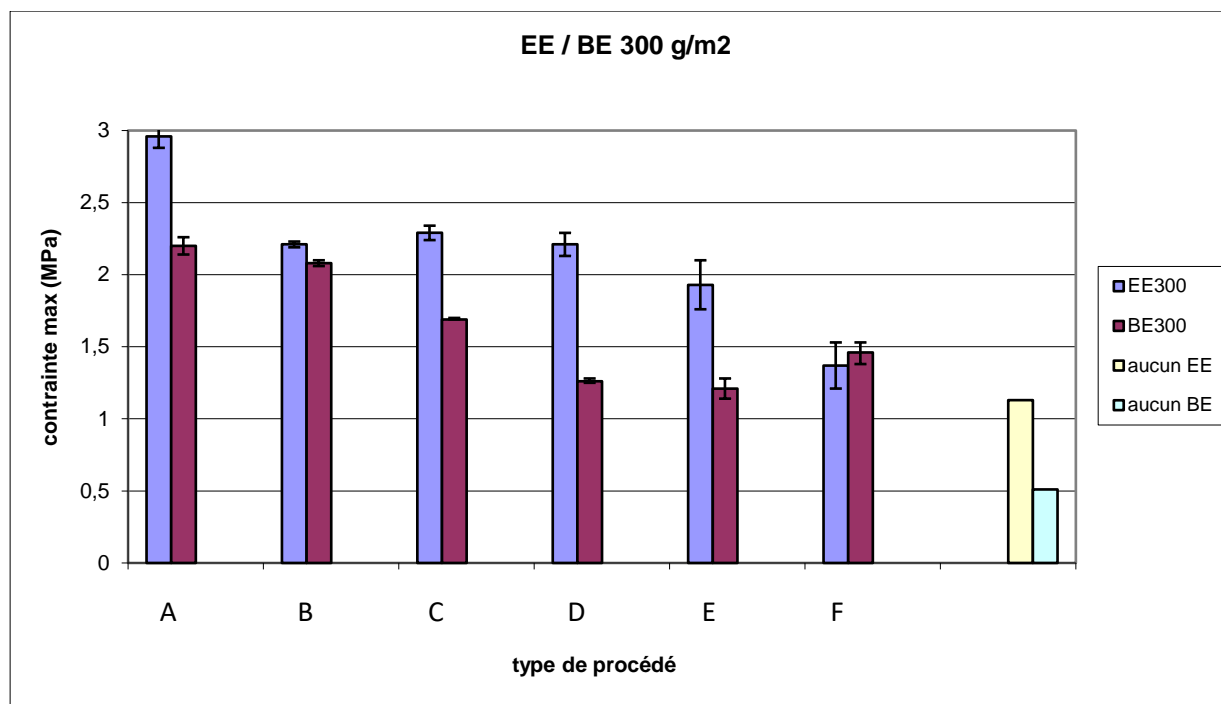
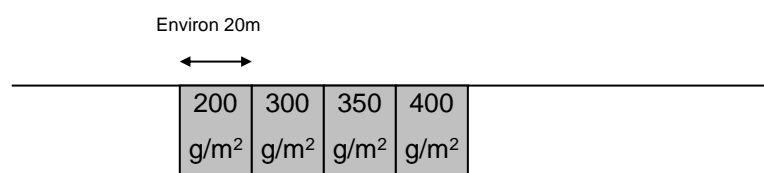


Figure 24 Comparaison enrobé/béton pour 300 g/m²

Ces essais soulignent l'influence du support sur les résultats ainsi que la nécessité d'adapter la nature de l'émulsion au support.

5.6 Retour d'expériences chantiers

En 2005, dans le cadre de la préparation d'un chantier de réfection des couches de roulement d'une voie rapide dans le sud de la France, une étude de l'impact du dosage en émulsion sur un support en BAC raboté a été conduite. Pour cela une planche d'essai est réalisée sur une longueur de 80 m. Elle comporte 4 zones distinctes pour lesquelles on a fait varier le dosage en émulsion (exprimé en g/m² de bitume résiduel). La planche d'essai est représentée schématiquement ci-dessous :



L'émulsion utilisée est une émulsion à rupture rapide à base de bitume 35/50. La structure étudiée se présente comme suit :

- BBTM 0/6 (25 mm) ;
- Émulsion;
- BAC (après rabotage).

Les essais suivants ont été réalisés :

- Carottages ;

- Mesure de la résistance en cisaillement de l'accrochage des couches in situ à la clef dynamométrique.

Les carottages des zones 1 et 2 (200 et 300 g/m² de bitume résiduel) ayant conduit à la rupture de l'interface BBTM / BAC, aucun essai de torsion n'a été réalisé sur ces deux zones. Ainsi seules les zones 3 et 4 ; ainsi que l'ancienne chaussée, ont été testées.

Les résultats des différents essais sont consignés dans le tableau 25. La température moyenne d'essai est de 11°C :

Localisation de l'essai		Résistance τ (MPa)	Commentaires
Ancienne chaussée	Axe – Voie lente	2,40	
Zone 1 (200 g/m ²)	Valeur moyenne	0	Ruptures au carottage
Zone 2 (300 g/m ²)	Valeur moyenne	0	Ruptures au carottage
Zone 3 (350 g/m ²)	Axe – Voie lente	0,07	
	Bande droite – Voie lente	0,07	
	Valeur moyenne	0,07	
Zone 4 (400 g/m ²)	Axe – Voie lente	0,65	Essai sur joint de dilatation
	Axe – Voie lente	0,70	
	Bande droite – Voie lente	1,60	
	Valeur moyenne	0,98	

Figure 25 Résultats de l'expérimentation 2005 sud de la France

Les résultats obtenus conduisent aux commentaires suivants :

- La mesure réalisée sur l'ancienne chaussée traduit une très bonne performance mécanique de la couche d'accrochage. Cependant, elle ne doit pas être prise en référence car la tenue mécanique des produits a très certainement été améliorée par leur vieillissement d'une part et l'absence de mûrissement de la nouvelle couche d'accrochage d'autre part ;
- Différents dosages de couche d'accrochage ont été appliqués sur cette planche d'essai : 200, 300, 350 et 400 g/m² de bitume résiduel. Pour les dosages de 200 et 300 g/m², l'interface BBTM / BAC ayant rompu lors du carottage la résistance mécanique est proche de zéro. Pour un dosage de 350 g/m², l'accrochage mesuré est très faible (résistance en cisaillement de 0,07 MPa) ; et pour le dosage à 400 g/m², on obtient un bon accrochage (environ 1 MPa) ;
- On note l'écart important mesuré entre la résistance de la couche d'accrochage dans l'axe de la voie et sur la bande de roulement droite pour la zone 4. Cet écart pourrait provenir de la dispersion de l'essai. Cependant après consultation de l'équipe ayant participé à la réalisation de la planche d'essai, il apparaît que le temps de rupture de l'émulsion fut assez important et dans le même temps, le pendage de la chaussée n'est pas négligeable. Ceci a pu provoquer un écoulement de l'émulsion vers la bande de roulement côté droit, occasionnant un écart de dosage entre l'axe de la voie et la bande de roulement, traduit finalement par une tenue mécanique différente. Ainsi pour de tels chantiers, **le temps de rupture de l'émulsion doit être bien maîtrisé** ;
- Cette planche d'essai nous met en évidence que l'accrochage sur BAC est un travail bien particulier et qu'il est nécessaire de mettre une quantité d'émulsion adaptée au chantier.

5.7 Effet et comparaison laboratoire/chantier

Parmi les autres essais en torsion, on retrouve les essais de Destree (Destree.A, 2013) qui a réalisé des essais de torsion via le dispositif manuel de torsion. Les essais ont été effectués sur la chaussée de l'autoroute E40 (en province de Liège). Les échantillons ont été prélevés sur la bande d'arrêt d'urgence. Après analyse des couches et sous-couches, ces échantillons ont été reconstitués en laboratoire. Le tableau suivant présente les types d'enrobé rencontrés.

Section	Type de revêtement	Type d'enrobé (Epaisseur)	Couche de collage (g/m ² de liant résiduel)
A et B	Couche de roulement	SMA-6,3-2 (25 mm)	C60B1 (AA) (300)
A	Sous-couche	EME-14base-8 (80 mm)	
B		AC-10Surf4-1 (40 mm)	

Tableau 7 Caractéristiques matériaux des éprouvettes

L'étude a comparé des essais laboratoire et en chantier afin de visualiser d'éventuels écarts. On observe peu d'écarts pour l'essai de torsion, bien que les auteurs précisent que cet essai est le moins précis en ce qui concerne son exécution. L'essai a été réalisé sur deux sections différentes.

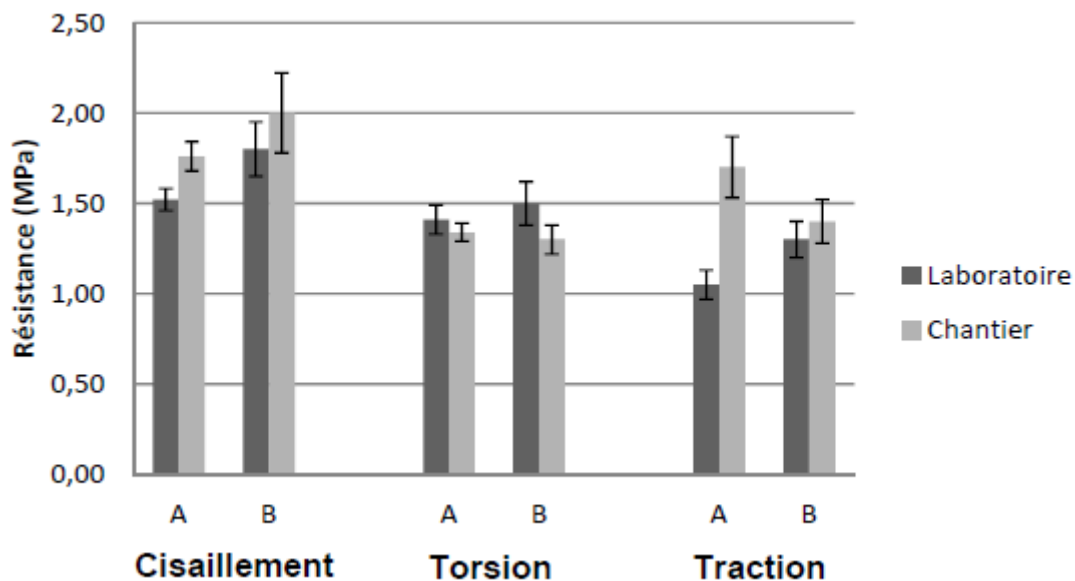


Figure 26 : Résistances inter-couches mesurées sur des échantillons fabriqués en laboratoire et prélevés en chantier

6 Conclusion

Suite à la synthèse des résultats effectués sur des enrobés sous sollicitation de torsion, plusieurs points ressortent :





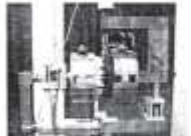
- L'essai in-situ de torsion existant et proposé dans la pré-norme nécessite plusieurs améliorations, notamment sur le contrôle de la charge à appliquer.
- L'essai en laboratoire plus fiable, via une machine d'essai de traction et un dispositif adéquat, permet de réaliser des essais contrôlés. Les conditions restent en revanche éloignées de ceux rencontrés en chantier.
- Une base de données existe dans la littérature permettant de vérifier la faisabilité d'un nouvel essai in-situ.
- Des dispersions apparaissent lors de la reproductibilité d'un essai. Celles -ci sont très importantes sur l'allongement angulaire de l'échantillon et moins importante sur la contrainte maximale à rupture en torsion.
- Parmi les nombreux paramètres identifiés et étudiés lors de l'élaboration d'un essai, la température reste le paramètre le plus influent. Les résultats sur la contrainte maximale de torsion pouvant varier du simple au double pour un écart de 20°.
- La compacité et la nature du support apparait comme un paramètre influent, après celui de la température d'essai.
- La vitesse de sollicitation apparait, d'après la littérature, plus ou moins influente sur les résultats finaux selon les conditions d'étude.

7 Bibliographie

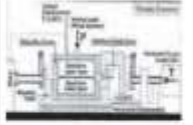
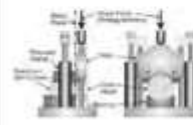

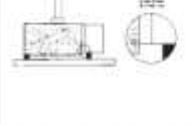
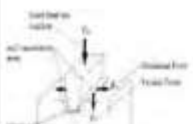

- Coleri E. (2017). HMAC layer adhesion through tack coat. *thèse*.
- Destree A., D. V.-P. (2013). L'importance des couches de collage et de l'adhésion inter-couches pour la durabilité des voiries. *Centre de Recherches Routières*, 1-10.
- Diakhate M. (2007). Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée. *Thèse Univ. de Limoges*.
- DLC - Direction du laboratoire des chaussées, 2005. Mesure de la force de liaison entre deux couches d'enrobé, Bulletin d'information technique (No. 7).
- Dony A., Koutiri I., Yvinec B., Godard E., Analysis of the draft European standard on interlayer bonding and understanding of the influencing factors, 8th Rilem International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements (poster), Nantes, 7-9 juin 2016
- Godard E., Yvinec.B, Dony.A; Koutiri.I, Collage des couches d'enrobés bitumineux Evaluation des méthodes d'essais du projet de norme européenne EN 12697-48, RGRA | N° 928 • juin 2015
- prEN 12697-48, Bituminous mixtures — Test methods — Part 48: Interlayer Bonding, version de 2015
- Marmer G. (2013). Analyse du projet de norme européenne sur la tenue des couches d'accrochage des chaussées et compréhension des facteurs influents.
- Mendizabal O. (2014). Analyse du projet de norme européenne sur la tenue des couches d'accrochage des chaussées et compréhension des facteurs influents.
- Raposeiras A.C., V.-Z. A.-P.-F. (2012). Influence of surface macro-texture and binder dosage on the adhesion between bituminous pavement layer. *Construction and building materials* 28, 187-192.
- Sutando M.H., S. M. (2009). Assessment of bond between asphalt layers. *These université of Nottingham*.


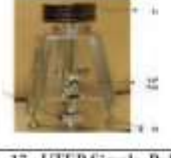

8 Annexe

Annexe 1



Apparatus	Significance and Use	Procedure	Specimen	Test Results	Lab or in situ	Remark
1. Leutner Shear Test 	The maximum shear load and corresponding displacement are measured to evaluate the bonding property of interface. The bonding property is used to determine the appropriateness of the material for use as tack coat.	A vertical shear load is applied to a double-layered specimen with a strain controlled mode at a constant rate of 2.0 in/min at 21.1°C until failure.	6.0-in-diameter specimen cored from laboratory-compacted composite (12 in x 12 in width by 2.8 in height)	(1) Maximum shear load (2) Corresponding maximum displacement	Lab	No normal load is applied
2. LTRC Direct Shear Test 	Shear strength of the tack coat interlayer is measured to evaluate the bonding property of tack coat. The bonding property is used to determine the appropriateness of the material for use as tack coat.	A horizontal shear load is applied to a dual-layer specimen of asphalt concrete with a stress control mode at a constant rate of 50 lbs/min at a given temperature until the sample is separate. With a climate chamber, the temperature can be set in the range from -20 to 80°C.	(1) 5.9-in-diameter dual-layered specimen cored from the pavement or fabricated in laboratory (2) To be trimmed before testing to ensure the two ends are flat to fit the shear mold (3) Gap width between the shearing platens is around 1 in (25.4 mm)	Shear stress at failure	Lab	(1) Normal load is optional (2) Developed by Louisiana Transportation Research Center (LTRC)
3. TTI Torsional Shear Test 	Plastic shear strength in torsion is measured to evaluate the shear resistance of the interface and the quality of the tack coat.	A twisting moment with constant rate of 2.9 E-04 radian/sec and a normal load is applied on the top of a double-layered cylinder specimen at a constant rate until failure.	(1) Dual-layered cylinder specimen with diameter of 6-in compacted in laboratory using two half-molds (2) Space between the two halves is 0.08 in (2 mm)	(1) Shear strength (2) Construct Mohr-Coulomb failure envelopes to get the cohesion and the tangent of internal friction angle	Lab	Developed by Texas Transportation Institute (TTI)
4. Florida Direct Shear Test 	Bond strength of the tack coat interlayer is measured to evaluate the performance of tack coat.	A vertical shear load is applied to dual-layer asphalt concrete specimen with strain control mode at a constant rate of 2.0 in/min at 25°C until failure.	(1) Dual-layered cylinder specimen with diameter of 6-in (2) Samples can be roadway cores or laboratory-fabricated specimens and do not need to be trimmed to accommodate the device (3) Gap width between shear plates is 0.19 in	Shear strength at failure	Lab	(1) No normal loads can be applied during the test (2) Developed by Florida DOT
5. Virginia Shear Fatigue Test (36) 	The number of shear loading cycles at failure is used to determine the optimum application rate of asphalt binder tack at interface between two layers.	Cyclic shear load [μ 0.015-in deflection] was applied to the specimen in the form of a 0.10-s half-sine wave, followed by a relaxation period of 0.9 s (the total cycle is 1s) is applied at the geocomposite membrane interface of dual-layer sample composed of concrete and HMA specimens until failure at ambient temperature.	(1) Composite cylinder specimen with diameter of 3.7 is composed of concrete core, geocomposite membrane, HMA, and tack coat applied on the interface. (2) Concrete core is cored from laboratory-prepared concrete slabs. (3) The upper HMA layer is gyratory-compacted on the top of concrete core after applied geocomposite membrane and tack coat.	(1) Maximum shear stress of each cycle (2) Maximum shear stress against the number of cycles of failure (3) Optimal tack coat application rate	Lab	Developed by Virginia Polytechnic Institute & State University and the Virginia Tech Transportation Institute

(continued on next page)

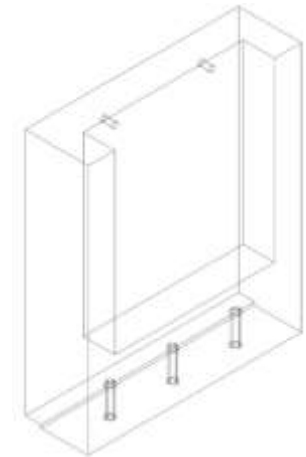
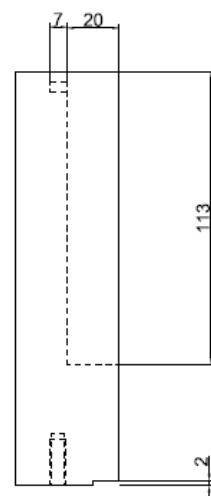
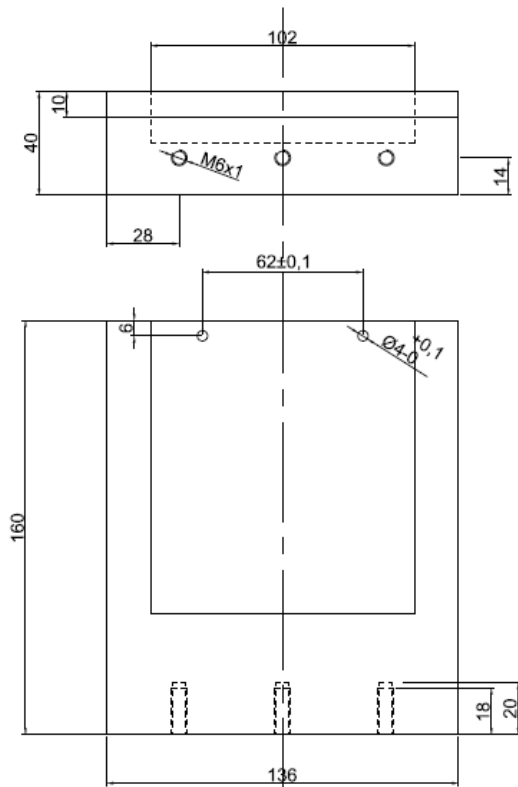
Apparatus	Significance and Use	Procedure	Specimen	Test Results	Lab or in situ	Remark
6. ASTRA Interface Shear Test 	Maximum interface shear stress is measured to evaluate the shear resistance property of interface. The shear resistance property is used to evaluate the tack coat properties.	Horizontal load is applied along the interface of dual-layered sample at constant rate until failure; meanwhile, a constant normal load is applied on top of the specimen.	(1) Dual-layered cylindrical specimen with diameter of 3.94 in (2) Laboratory-fabricated or extracted from pavement	Shear stress at failure	Lab	If carried out at different normal load, a Mohr-Coulomb failure envelope can be obtained.
7. Layer-Parallel Direct Shear (LPDS) 	Nominal average shear stress and maximum shear stiffness are measured to determine the in-layer and interlayer shear properties of asphalt concrete layers. The in-layer shear properties are used to evaluate the quality of the mixture and the interlayer shear properties are used to evaluate the tack coat properties.	Vertical shear load is applied to a composite specimen with strain control mode at constant rate.	(1) Cylindrical composite specimen of 3.94-in diameter (2) Laboratory-fabricated sample and pavement core (3) The specimen needs to be glued	Tensile strength	Lab	(1) Shear-plane can be along interface or within the layers (2) Modified by EMPA, Swiss Federal Laboratory for Materials Testing and Research
8. Switzerland Pull-Off Test 	Tension strength values are measured to evaluate the interlayer shear performance between different asphalt concrete layers. Shear performance is used to evaluate the quality of the tack coat and in comparison of various tack coat materials.	A tensile load is applied to asphalt concrete specimen composed of two layers at constant rate.	(1) Cylindrical composite specimen of 3.94-in diameter (2) Laboratory-fabricated sample and pavement core (3) The specimen needs to be glued	Tensile strength	Lab	Test is carried out according to German testing specification ZTV StB 90
9. Laboratorio de Caminos de Barcelona Shear Test (LCB) 	Shear strength of the tack coat interlayer is measured to evaluate the bonding property of tack coat. The bonding property is used to determine the appropriateness of the material for use as tack coat.	The dual-layer specimen with tack coat interlay is used as a beam located over two supports and a vertical load is applied to the specimen at a constant deformation speed of 0.05 in/min in the middle of the two supports until failure.	(1) Cylindrical composite specimen of 3.94-in diameter and 7.0-in high (2) Laboratory-fabricated sample and/or pavement core	(1) Shear strength (2) Shear modulus and the specific cracking energy	Lab	(1) No normal load can be applied during this test (2) Developed by DOT, Technical University of Catalonia, Spain
10. Wedge Splitting Test 	Maximum horizontal force (F_{max}) and specific fracture energy (G_f) are determined to characterize the fracture-mechanical behavior of layer bonding. The fracture-mechanical behavior is used to determine the appropriateness of the material for use as tack coat.	A vertical load is applied through a wedge to a dual-layered specimen with a groove and starter notch along the interface at a constant rate until complete separation of the specimen.	(1) Cubic or cylindrical composite specimen with interface in the middle and a start notch in the interface (2) Laboratory-fabricated or cored or cut from pavement	(1) Maximum horizontal force (2) Specific fracture energy	Lab	Developed by Technical University, Austria
11. Dynamic Interaction Test 	Interlayer reaction complex modulus KP^* is determined for the pavement structure analysis. The pavement structure analysis evaluates the capacity of the pavement and can be used to predict the remaining life of the pavement.	A sinusoidal shear force is applied to dual-layered specimen at particular temperature and given load frequency.	Cylindrical composite specimen of 3.94-in diameter, cored from laboratory-compacted twin layer slab or from pavement.	The norm of Interlayer reaction complex modulus KP^* and phase angle	Lab	Developed by University of Naples, Italy

Apparatus	Significance and Use	Procedure	Specimen	Test Results	Lab or in situ	Remark
12. NCAT Shear Test 	The interface shear strength of core samples is measured to evaluate the bonding property of pavement layers. The bonding property is used to determine the appropriateness of the material for use as tack coat.	A vertical shear force is applied to dual-layered specimens along the interface with strain control mode at constant rate until failure.	(1) Cylindrical composite specimen with 5.9 in (2) Height of the core above the interface being tested is greater than 3 in. The height of each layer should be greater than 1.97 in, less than 5.9 in.	Bond shear strength	Lab	Developed by National Center for Asphalt Technology (NCAT)
13. HasDell EBSTTM Emulsion Shear Test 	The bond strength between two layers is measured to determine the appropriateness of the material for use as tack coat.	A shear force is applied along the interface until failure.	(1) Cylindrical composite specimen with 5.9 in diameter (2) 2.95-in x 2.95-in-square composite specimen	Bond shear strength	Lab or in situ	Marketed by R/H Specialty and Machine, Terre Haute, Indiana
14. Traction Test 	Tensile strength of the tack coat interlayer is measured to evaluate the bonding property of tack coat. The bonding property is used to determine the appropriateness of the material for use as tack coat.	A tensile force is applied at constant rate of 54 lb/s to a cylindrical sample until failure.	Cylindrical lab or field sample of 4-in diameter	Bond tensile strength	Lab or in situ	Developed by Ministère des Transports du Québec, Canada
15. The ATacker™ Test 	Shear and/or tensile strength of tack coat material are measured to evaluate its bonding property. The bonding property is used to determine the appropriateness of the material for use as tack coat.	A pull and/or torque force is applied to detach the tack-coated plates or detach the contact plate and tack-coated pavement.	Tack-coated plates or attach plate to tack-coated pavement	Tensile strength and/or shear strength	Lab or in situ	Developed by Introtek, Inc.
16. UTEP Pull-Off Test 	Tensile strength of tack coat material is measured to determine its bonding property. The bonding property is used to determine the appropriateness of the material for use as tack coat.	A torque force is applied to detach the tack-coated plates or detach the contact plate and tack-coated pavement	Tack-coated plates or attach plate to tack-coated pavement	Tensile stress at the point of failure	Lab or in situ	Developed by University of Texas at El Paso
17. UTEP Simple Pull-Off Test 	Tensile strength of tack coat material is measured to determine its bonding property. The bonding property is used to determine the appropriateness of the material for use as tack coat.	A tensile force is applied directly to pull off the contact plate from the tack-coated surface.	Tack-coated plates or attach plate to tack-coated pavement	Tensile stress at failure	Lab or in situ	Developed by University of Texas at El Paso
18. Impulsive Hammer Test 	The vertical dynamic response of pavement and fractal dimension (FD) are determined to evaluate the bond condition between asphalt layers in field. The bonding condition is used to determine the appropriateness of the material for use as tack coat.	An impulsive loading is applied with a hammer to the pavement surface at particular locations and given loading frequency.	Pavement in field	FD number	In situ	Under development at Nottingham University

Complément : Essais COLIBRI 2 : thèse JM SIMONIN + B. POUTEAU (2003 & 2004), un peu comme l'essai 18.

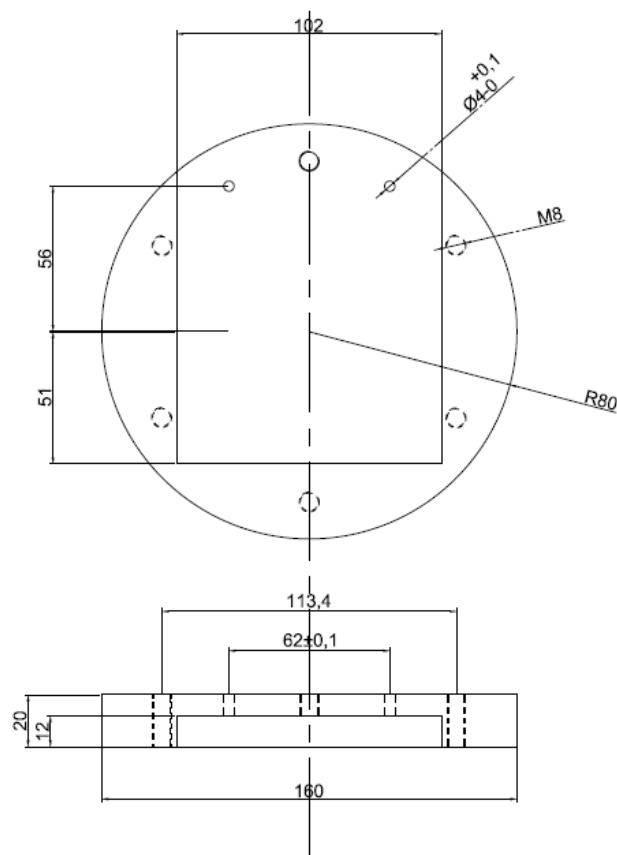
Apparatus	Significance and Use	Procedure	Specimen	Test Results	Lab or in situ	Remark
19. Torque Bond Test 	Torque force at failure is measured to evaluate the in-place bond effectiveness of wearing course system.	A torque force is applied to core sample from pavement with a torque wrench to failure.	Core sample of 3.94-in or 5.9-in diameter	Bond strength	In situ	Developed by Highway Agency, United Kingdom
20. In situ Shear Stiffness Test 	The shear strength is measured to evaluate the shear properties of asphalt concrete pavements in the field. Shear properties of pavement relate to the performance of the pavement.	A rotational force is applied to the pavement through a test plate, meanwhile a normal weight is provided by the test equipment.	Pavement in field	Shear strength and shear modulus	In situ	Developed by Carleton University, Canada

Annexe 2 GAUCHE



DISQUE DROIT

Casques



butoir

adaptateur

