



Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE / RAPPORT D'ETAPE

Vers une caractérisation performantielle,
in situ, des interfaces des couches de surface

--

Evaluation du dispositif de mesure de collage
des couches d'enrobés in situ par torsion

Synthèse des essais in situ

Auteur(s) / Organisme(s) :

DONY Anne – ESTP Paris

BARRIERE Philippe – Colas CST

OLLIER Stéphane – Pérennise Chaussées

BRISSAUD Laurent – Colas CST

GODARD Eric- Colas CST

Thème de rattachement :

Thème 1-3

DVDC/R/030

N° lettre de commande LC/19/DVDC/75 (ESTP)

LC/19/DVDC/77(Pérennise Chaussées)

LC/19/DVDC/79 (Colas)

JUIN 2020

Site internet : www.dvdc.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Christine LEROY et Simon POUGET

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

1 Table des matières

Résumé.....	3
1 Introduction	4
2 Objectifs et programme d'essais	4
3 Lieu de l'expérimentation - préparation de la zone de travail.....	6
3.1 USSEL (19) –Ancienne RN 89	6
3.2 Manège de fatigue (IFFSTAR) Université Gustave Eiffel - Nantes	7
3.3 Planches du PN MURE situées sur la D909 - MORIAT (63-Puy de Dôme)	8
3.4 Sections d'enrobés neufs N 102 - St Georges D'Aurac (43 - Haute-Loire)	10
4 Mesures de la température de la chaussée.....	11
4.1 Analyse des résultats sur Ussel	11
4.2 Proposition de méthode de mesure de la température	12
5 RESULTATS D'ESSAIS DE TORSION	13
5.1 Manège de fatigue (IFFSTAR) Université Gustave Eiffel - Nantes	13
5.2 Planches du PN MURE situées sur la RD909 - MORIAT (63-Puy de Dôme).....	15
5.3 Sections d'enrobés neufs N 102 - St Georges D'Aurac (43 - Haute-Loire)	16
6 INTERPRÉTATION DES RESULTATS	17
6.1 Non collage de l'interface.....	17
6.2 Collage très faible à faible de l'interface	18
6.2.1 Niveau de contrainte très faible	18
6.2.2 Niveau de contrainte faible	18
6.3 Collage effectif de l'interface	19
6.3.1 Niveau de contrainte élevé	19
6.3.2 Niveau de contrainte moyen.....	21
7 Consultations en vue de l'industrialisation du dispositif.....	21
7.1 Enquête utilisateurs	21
7.2 Cahier des charges.....	23
7.3 Consultations de fournisseurs	24
7.4 Suite à donner	25
8 BILAN	26
9 PERSPECTIVES	27

Résumé

Français

L'objectif final du groupe de travail est de proposer un essai de caractérisation performantielle in situ des couches d'accrochage. Ce troisième rapport présente la synthèse des essais réalisés in situ sur différents chantiers avec une version modifiée du prototype V0 (capteur de force de capacité plus élevée...). Quatre sites ont été testés. Le premier a permis de définir une procédure de maîtrise de la température, paramètre variable et très influent sur le résultat. Cette procédure a été expérimentée voire améliorée sur les autres sites. Des mesures avec le dispositif de mesures ont été menées sur un des anneaux du manège de fatigue, permettant des essais hors circulation, sur des structures maîtrisées avec des interfaces différentes et parfaitement connues. Les deux autres sites présentaient la particularité, l'un d'avoir des interfaces décollées, l'autre des enrobés neufs avec un support en enrobé neuf ou support fraisé. Une procédure simple de prise de température est proposée et les essais démontrent la nécessité d'une mesure à une profondeur proche de l'interface. Les différents résultats obtenus avec le dispositif de mesure ont été exploités principalement par le biais des contraintes obtenues en fonction des températures mesurées. Il convient de bien réaliser le pré-carottage pour ne pas fausser le résultat et d'associer les mesures au contexte du chantier. Des températures trop élevées sur chantier rendent délicates les mesures. A partir des chantiers réalisés, trois cas pratiques ont pu être dégagés (absence de collage : pas de mesure possible ; collage très faible à faible : < 0.15 MPa ; collage effectif de moyen à très bon). La logistique relative à l'essai a pu être validée avec des recommandations. Des essais complémentaires sur chantier sur une large gamme de températures permettraient de compléter ce travail. En outre une enquête sur l'accueil du projet par la profession a été réalisée, Le cahier des charges d'un matériel destiné à la mesure routinière a été établi et des fournisseurs potentiels consultés.

Anglais

The final objective of the working group is to provide a performance test for in situ qualifying the interlayer bonding. This third report presents the summary of the tests carried out in situ on various sites with a modified version of the V0 prototype (force sensor of higher capacity, etc.). Four sites were tested. The first provided to define a procedure for controlling the temperature, a variable parameter and very influential on the result. This procedure has been tested or even improved on other sites. Measurements with the device were carried out on one of a ring of the "manège de fatigue", allowing tests without traffics, on controlled structures with different and well-known interfaces. The other two sites had the particularity, one of having unbonded interfaces, the other with new asphalts (with a new asphalt support or milled support). A simple temperature measurement procedure is proposed and tests demonstrate the need for measurement at a depth close to the interface. The various results obtained with the measuring device were used mainly through the strain as a function of the temperatures. The pre-coring should be carried out carefully (to not distort the result) and results must be associated to the context of the site. Too high temperatures on site make the measurements difficult. From our sites, three cases could be identified (no bonding: no possible measure; very low to low bonding: < 0.15 MPa; effective bonding from intermediate to very good). The logistics of the test could be validated with recommendations. Additional field tests over a wide range of temperatures would complete this work. In addition, a survey on the reception of the project by the profession was carried out. Specifications for equipment intended for routine measurement were established and potential suppliers consulted.

1 Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet national DVDC (Durée de Vie des Chaussées), administré par l'IREX et soutenu par la DGITM et l'ANR, projet de recherche et de développement collaboratif qui mobilise des organismes publics et privés concernés par la conception, la construction et la gestion des infrastructures routières.

Il s'inscrit dans le thème 1 du projet sur les mécanismes de dégradation des chaussées, plus précisément vise à proposer et évaluer un dispositif de mesure de collage des couches d'enrobé in situ par torsion, la couche d'accrochage étant un élément fondamental dans la durée de vie et la tenue mécanique des chaussées.

Cette étude est menée par un groupe de travail regroupant des partenaires académiques et industriels à savoir l'ESTP, l'ENSAM, l'université de Limoges, PERENNISE CHAUSSEES, EUROVIA et COLAS qui représente Routes de France, anciennement USIRF.

Elle s'inscrit dans la continuité d'un travail initié en 2015 pour le compte de Routes de France qui avait pour objectif d'évaluer les trois essais figurant dans le projet de Norme EN 12697-48 (Essais de collage des couches).

Dans la continuité des deux premiers rapports (tranche 1- Etat de l'art et tranche 2- Evaluation du prototype en laboratoire), ce rapport s'inscrit dans l'action menée par Colas, ESTP et PERENNISE CHAUSSEES dans la tranche 3 du projet et présente les expérimentations sur différents sites pour valider ou pas le dispositif de mesure et disposer de premières données dans différentes configurations.

L'étape de mise en application courante de ce type de mesure a été envisagée d'une part en organisant une consultation des laboratoires pouvant être concernés et d'autre part en jetant les bases d'une production commerciale d'un dispositif de mesure opérationnel.

2 Objectifs et programme d'essais

Dans cette troisième action, trois objectifs à atteindre ont été définis :

→ **Proposition d'une procédure permettant la maîtrise de la mesure de la température de la chaussée au moment de l'essai de collage**

Toute chose étant égale par ailleurs, la température a été identifiée comme un paramètre très influent du niveau de contrainte obtenue lors de l'essai de torsion [1]. Par ailleurs, in situ, ce paramètre est très fluctuant en fonction de la saison, la région, la période dans la journée. Il convient donc d'associer aux résultats d'essais de torsion cette donnée en température.

L'objectif est de définir un protocole de mesure de la température fiable, représentatif de l'interface et applicable sur terrain sans trop de contrainte (c'est-à-dire rapide). Un suivi de la température ambiante est également réalisé.

→ **Réalisation d'essais de mesure du collage des couches par torsion avec le prototype en version I**

La validation en laboratoire du prototype V0 a conduit à réaliser des modifications (amélioration du grippage du casque et augmentation de la force nominale du capteur à 1000N). L'objectif de cette étape est de réaliser plusieurs essais in situ

sur des structures différentes de chaussées (âges et épaisseurs) et avec des interfaces différentes, collées ou non, pour déterminer les paramètres « chantier » influents éventuellement sur la mesure. Tous les essais ont été menés avec le prototype V1.

→ **Interprétation des résultats et corrélation de données**

L'objectif est de comparer les résultats d'essais de collage des couches par torsion in situ avec des essais de collage en laboratoire. (cf. figure 21 et tableau 4)

Le programme d'essai s'est déroulé sur 4 sites :

→ **USSEL (19) – Ancienne RN 89 –**

Cette première zone a permis de travailler en amont sur la procédure de prise de température et les conditions de carottages. Les essais ont été menés le 26 avril 2019. Aucun essai de collage des couches n'a été réalisé.

→ **Manège de fatigue Université Gustave Eiffel (ex IFSTTAR)**

Des mesures de collages des couches ont été réalisées le 22 mai 2019 au droit de l'un des anneaux du manège de fatigue IFSTTAR avant sa déconstruction comme suite à la fin de cette expérimentation. Cet ouvrage offre la possibilité de pouvoir réaliser, hors circulation, des essais in situ de collage des couches par torsion à l'aide du prototype sur des structures présentant a priori des interfaces plus ou moins bien résistantes.

→ **D909 Planches PN MURE**

Des mesures de collages des couches ont été réalisées le 18 juillet 2019 sur les planches du PN MURE situé sur la RD909 de la commune de MORIAT (63-Puy de Dôme). Cet ouvrage composé de 4 planches successives offre la possibilité de pouvoir réaliser des essais in situ de collage des couches par torsion à l'aide du prototype au niveau d'interfaces peu résistantes.

→ **N102 Enrobé neuf**

Des mesures de collages des couches ont été réalisées le 26 septembre 2019 sur la N 102 sur des enrobés neufs à la sortie de St Georges D'Aurac (43 - Haute-Loire), mis en œuvre au maximum 15 jours avant. Cet ouvrage neuf s'étend sur plusieurs centaines de mètres et offre la possibilité de pouvoir réaliser des essais in situ de collage des couches par torsion à l'aide du prototype au niveau d'interfaces neuves et bien collées sur une grande distance.

3 Lieu de l'expérimentation - préparation de la zone de travail

3.1 USSEL (19) –Ancienne RN 89

L'expérimentation a été menée en sortie Ouest de la ville d'Ussel (19), sur une voirie désormais communale et non circulée (sécurité pour les essais). La structure en place est constituée d'une épaisseur conséquente d'enrobés (ancienne RN).

La zone de travail a été préparée par Pérennise Chaussées le 25 avril 2019. Trois stations de mesures ont été matérialisées au sol (à -8 cm / -6 cm / -4 cm / -2 cm) ainsi qu'une station de mesure de la température du corps de la chaussée (emplacement à - 20 cm au droit de la zone de travail).

La préparation de la zone de travail et la réalisation du programme d'essais se sont faites sous des conditions climatiques peu favorables et peu contrastées à savoir des températures extérieures variant de 3°C à 6°C, une pluie fine plus ou moins en continue et un temps légèrement venteux.

Les pré-carottages permettant de mettre en place l'outil de serrage du prototype de torsion ont été réalisés à l'aide d'une carotteuse Energydiam équipée d'un carottier de 150 mm. Des chevilles ont été utilisées pour protéger les trous de mesures des températures et à cette occasion, elles ont permis d'empêcher partiellement l'eau de ruissellement en provenance de la pluie de remplir ces orifices.

Une seringue équipée d'un petit tuyau en plastique a été utilisée pour aspirer l'eau de refroidissement du carottier ayant remplie l'entaille de carottage.



Figure 1 : Pré-carottage et prises de température dans la chaussée

Les températures du corps de la chaussée à différentes profondeurs ont été relevées trois fois dans la matinée du 26 avril 2019 au droit des 10 perçages réalisés la veille, entre 8h40 et 12h30.

La température ambiante a fait l'objet de quelques mesures à l'aide des mêmes thermomètres équipés d'une sonde thermocouple K (=TCK) en positionnant leur sonde à une vingtaine de centimètres de la surface du sol.

3.2 Manège de fatigue (IFFSTAR) Université Gustave Eiffel - Nantes

Un des anneaux du manège de fatigue de l'IFFSTAR a été mis à la disposition du projet DVDC (Thème de rattachement 1-3) juste avant que cet ouvrage soit déconstruit.

Cet anneau est scindé en 6 sections dont la structure est constituée de 6 cm de BBSG reposant avec ou sans dispositif d'interfaces de différentes natures sur 6 cm de BBSG :

- S1 : pas d'interface – Collage ECR 69 à 350 gr/m² de bitume résiduel
- S2 : Interface type 1 – Collage ECR 69 à 700 gr/m² de bitume résiduel
- S3 : Interface type 2 – Collage ECR 69 à 700 gr/m² de bitume résiduel
- S4 : Interface type 3 – Collage ECR 69 à 700 gr/m² de bitume résiduel
- S5 : Interface type 4 – Collage ECR 69 à 700 gr/m² de bitume résiduel
- S6 : Interface type 5 – Collage ECR 69 à 700 gr/m² de bitume résiduel

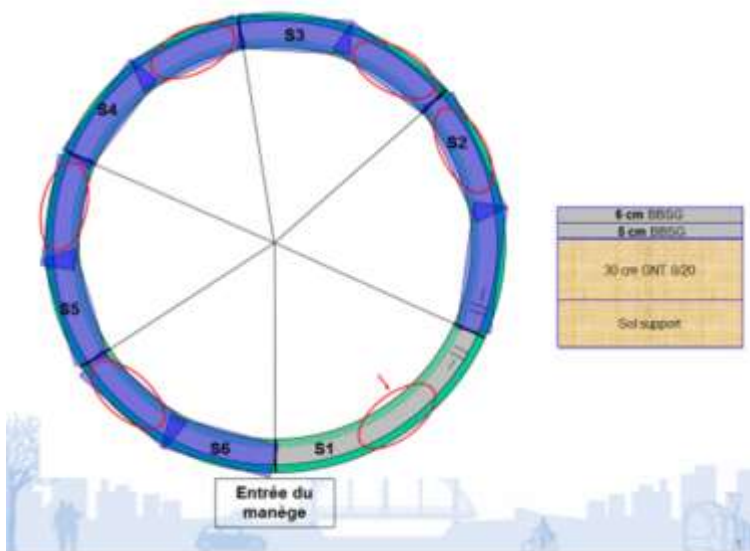


Figure 2 : Présentation des différentes zones d'essais

La préparation des zones de travail a été réalisée le 21 mai 2019 en fin d'après-midi.

3 pré-carottages selon les points de mesures définis par section y ont été réalisés.



Figure 3 : Repérage des points de mesures par section

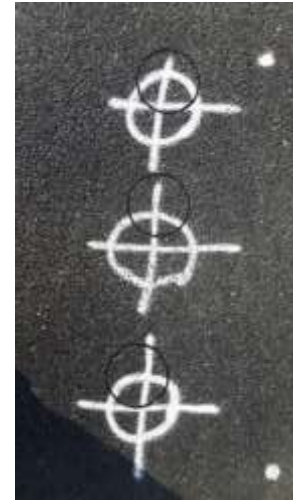


Figure 4 : pré-carottage

Aucune précaution particulière n'a été prise concernant la réalisation des pré-entailles nécessaires à la mise en place de l'outil de préemption qui équipe le prototype. Seule la profondeur de pré carottage a été définie en fonction de l'épaisseur supérieure d'enrobé de façon à se situer à ~2 cm en dessous de l'interface.

3.3 Planches du PN MURE situées sur la D909 - MORIAT (63-Puy de Dôme)

Sur le site ouvert à la circulation de la D 909 situé sur la commune de MORIAT, dans le cadre du PN MURE, des planches d'essais avaient été réalisées pouvant s'avérer intéressantes à mesurer pour le projet DVDC car attendues comme peu collées.

Distribution des sections :

- E1 : Interface type 1
- E2 : Interface type 2
- E3 : Interface type 3
- E4 : Interface type 4

Aucune précision n'a été fournie sur l'utilisation ou non de couche d'accrochage et dosage associé.

La D909 sur la commune de Moriat est composée de 4 sections comme suit (cf. Figure 5) :



Figure 5 : Repérage des 4 sections



Figure 6 : Installation du matériel sur site



Figure 7 : Pré-carottage



Figure 8 : Réalisation des essais en présence du Conseil Départemental du Puy de Dôme, représenté par B. ESPINASSE, qui avait mis à disposition la zone d'essai.

Cette portion était sous circulation pendant la durée des essais. Le carottage et les mesures ont eu lieu à la suite. (Cf. Figure 7)

Une première carotte est extraite par section afin de connaître l'épaisseur de mise en œuvre non communiquée et d'affiner le carottage pour l'essai (2 cm sous l'interface).

La préparation des zones de travail a été réalisée le 17 juillet 2019 en fin d'après-midi. Les pré-carottages pour les essais in-situ ont réalisés le 18 Juillet 2019. Aucune précaution particulière n'a été prise concernant la réalisation des pré-entailles nécessaires à la mise en place de l'outil de préemption qui équipe le prototype. Seule la profondeur de pré carottage a

été définie en fonction de l'épaisseur supérieure d'enrobé de façon à se situer à ~2 cm en dessous de l'interface. L'épaisseur de la couche d'enrobé supérieure est de 8 cm, les empreintes de carottage ont été réalisées jusqu'à 10 cm. 3 mesures ont été réalisées par section réparties sur la journée (Figure 8) ; des mesures ont été réalisées dans les deux sens de circulation (notés R, pour le sens retour).

3.4 Sections d'enrobés neufs N 102 - St Georges D'Aurac (43 - Haute-Loire)

Sur le site ouvert à la circulation de la N102 située à la sortie de commune de St Georges d'Aurac, les enrobés neufs mis en œuvre dans le cadre de la réfection de la route nationale s'avèrent intéressant à mesurer pour le projet DVDC car considérés parfaitement collés à la couche inférieure, avec deux conditions de support.

Plan des mesures :

- 6 cm de BBSG sur GB (cf. Figure 8)
- 6 cm de BBSG sur rabotage (cf. Figure 9)
- Couche d'accrochage au bitume modifié (300g/m² résiduel) + lait de chaux (200 à 250g/m²)

La N102 sur la commune de St Georges d'Aurac est composée comme suit ([cf. Figure 7](#)) :



Figure 9 : implantation du chantier de la RN102

Cette portion est sous circulation pendant la durée des essais. Le carottage et les mesures ont lieu à la suite.



Figure 10 : Structure BBSG sur GB



Figure 11 : Structure BBSG sur chaussée rabotée

Les pré-carottages pour les essais in-situ ont été réalisés le 26 septembre 2019. Aucune précaution particulière n'a été prise concernant la réalisation des pré-entailles nécessaires à la mise en place de l'outil de préemption qui équipe le prototype. L'épaisseur de la couche d'enrobé supérieure est de 6 cm. La profondeur de pré carottage a donc été définie à 8 cm de la surface de l'enrobé de façon à se situer à ~2 cm en dessous de l'interface.

4 Mesures de la température de la chaussée

4.1 Analyse des résultats sur Ussel

Ce premier chantier a permis de définir des conditions et paramètres pertinents de mesure de la température lors de la réalisation des essais de torsion.

Les températures relevées lors des essais sont résumées sur la figure 12.

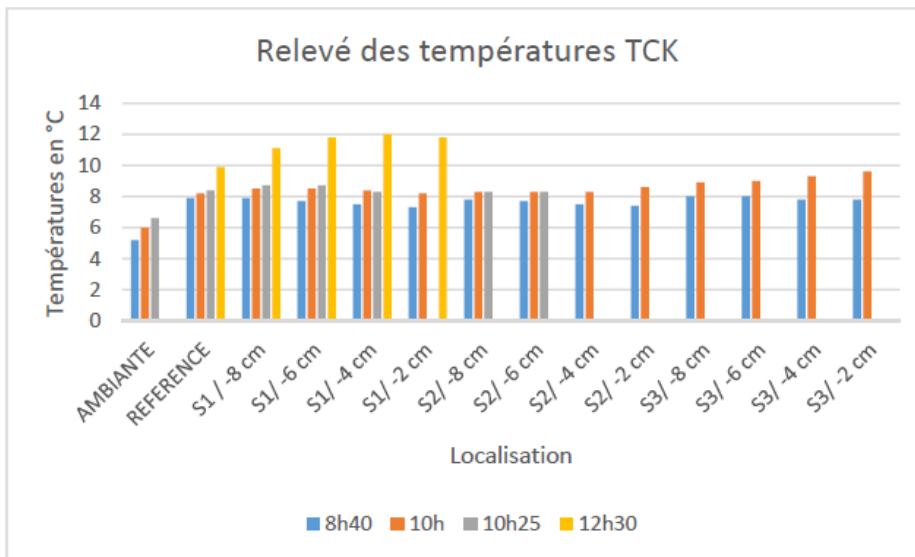


Figure 12 : Suivi des températures relevées avec les sondes de température (thermocouple K noté TCK) à différentes profondeurs de la chaussée - comparaison avec la température ambiante (+ 20cm du sol) et une température dit « de référence » (- 20 cm, réalisée avec thermomètre PT100)

En l'absence de contraste thermique durant la matinée de travail (températures basses), on observe que les mesures de température à -20 cm au droit de la référence principale sont à +/- 1,5°C près les mêmes que celles des références des 3 stations aux 4 profondeurs.

Par contre, quand la température augmente (en fin de matinée avec l'ensoleillement), on pressent qu'un écart de température significatif se crée entre la référence principale et les références ayant les plus faibles profondeurs (soit à -4 cm et -2 cm).

Il paraît opportun de relever à minima la température ambiante « en continu » ou fréquemment (tous les 30 minutes par exemple) mais aussi, et dans la mesure du possible, la présence de vent et l'ensoleillement durant les essais.

4.2 Proposition de méthode de mesure de la température

Fort de cette première expérimentation et des essais menés sur les autres chantiers cités dans des conditions climatiques différentes, une méthode pour la prise de température in-situ est retenue et proposée.

Seules les températures situées au même niveau de profondeur que l'interface sont représentatives.

Les mesures de températures du corps de la chaussée sont réalisées à l'aide d'un thermomètre équipé d'une sonde thermocouple K. Un bouchon obturateur vient boucher le trou de mesure pour stabiliser la mesure en coupant la circulation d'air.



Figures 13-14-15 : dispositif de mesure de la température proposé

Un bouchon conique (par exemple : en caoutchouc 1 trou pour tubes à essais de laboratoire) a été utilisé pour tenter de supprimer les fluctuations de températures au fond des trous de mesures pour les faibles épaisseurs de perçage. Le diamètre du trou du bouchon est parfaitement centré et il correspond sensiblement à celui de la sonde du thermomètre (6 mm environ). Les dimensions du bouchon conique percé sont de 50 mm pour son diamètre supérieur et de 40 mm pour son diamètre inférieur, sa hauteur est de 40 mm. Pour plus d'efficacité et de stabilité il est posé sur sa face la plus large sur le trou de prise de mesure.

Dans les conditions des expérimentations, la profondeur de perçage pour la mesure de la température doit être la même que celle du carottage (2 cm sous l'interface) et doit être située à 1 mètre au droit de la zone de mesure de la torsion.

Le perçage pour la mesure de la température doit être réalisé à sec, d'un diamètre proche de celui de la sonde utilisée et suffisamment tôt avant la mesure pour ne pas fausser celui-ci de la température issue du forage.

La prise de mesure de la température ambiante se fait de manière classique, à l'abri du soleil et du vent, au plus proche de la zone d'essai.

5 RESULTATS D'ESSAIS DE TORSION

5.1 Manège de fatigue (IFFSTAR) Université Gustave Eiffel - Nantes

Les mesures réalisées sur les 6 sections du manège de fatigue permettent de décomposer les sections comme suit :

S1 : section de référence avec un bon collage

S2 : absence de collage, séparation au carottage (pas de mesures possibles)

S3/S4 et S5 : des sections collées avec un niveau de collage moindre car perturbées

S6 : section avec très faible collage mais sans séparation lors du carottage (mesures possibles)

Les températures lors des essais se situent entre 21°C et 35°C, avec une concentration de points sur une gamme de 24°C à 32°C.

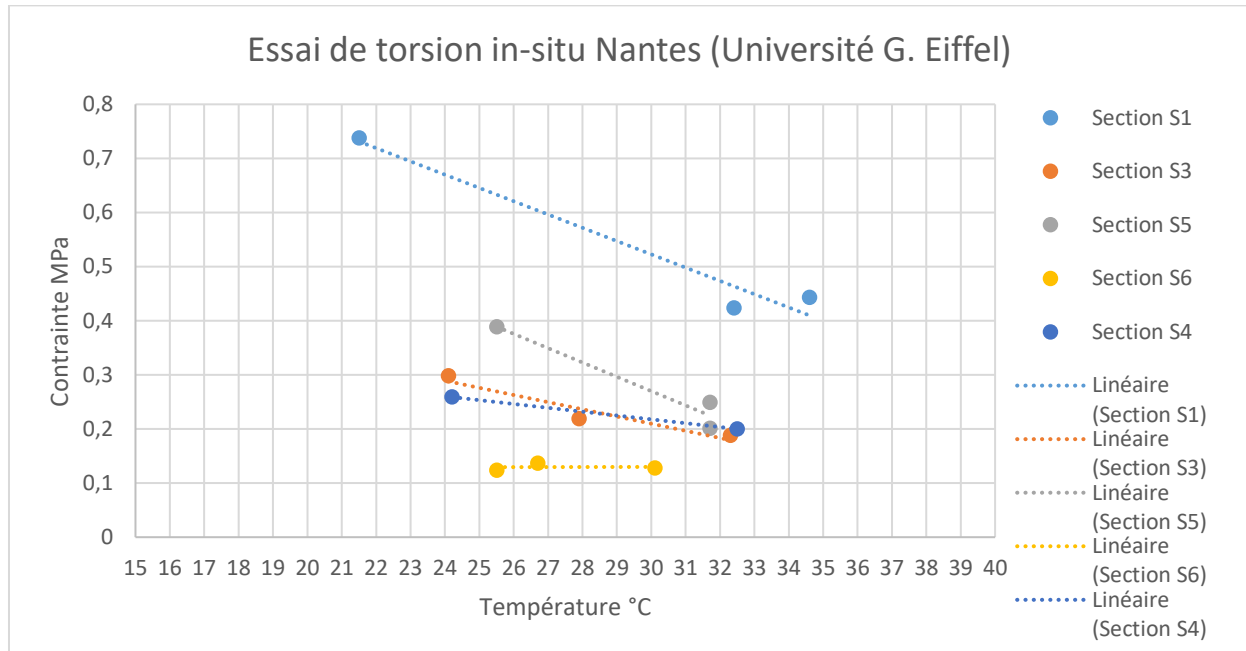


Figure 16 : Influence de la température sur la contrainte de rupture par section d'essais sur manège de fatigue

Tous les résultats obtenus sont rappelés dans le tableau 1 ci-dessous :

	S1-1	S1-2	S1-3	S3-1	S3-2	S3-3	S4-1	S4-2	S4-3	S5-1	S5-2	S5-3	S6-1	S6-2	S6-3
Temp interface* (°C)	21,5	32,4	34,6	24,1	32,3	27,9	24,2	27,9	32,5	25,5	31,7	31,7	25,5	26,7	30,1
Temp S5 ref -6cm (°C)	22,9	35,5	37,5	24	37,5	38	27,5	37,5	37,9	28,8	37,5	39,6	30	37,5	39
Temp S5 ref -10cm (°C)	21,5	29,5	32	23	32	33,5	31,8	32,5	24	24,6	31	33,8	30,4	34	34
Torsion (Nm)	489,2	280,7	294	197,7	124,4	145,3	171,5	56,3	132,5	257,7	133,4	164,8	82,4	90,8	84,5
Contrainte (Mpa)	0,738	0,424	0,443	0,298	0,188	0,219	0,259	0,085	0,2	0,389	0,201	0,249	0,124	0,137	0,128
Angle (rad/mm)	3,61	2,87	3,92	2,57	3,06	3,83	2,49	2,26	3,07	3,85	3,04	3,01	4,41	2,98	2,24
* au moment de l'essai (prise dans la rainure du carottage)															

Tableau 1 : Récapitulatif des températures et mesures avec le dispositif d'essai de torsion sur les différentes sections sur manège de fatigue

Sur la base de ces résultats, on observe que :

- Plus le niveau de contrainte est élevé (meilleur collage), plus il sera sensible à la température (par exemple, S5 et S6 sur une gamme de températures comparables)
- Au-delà de 30 °C, l'effet de la température sur le collage ne semble plus impactant sur le niveau de contrainte

5.2 Planches du PN MURE situées sur la RD909 - MORIAT (63-Puy de Dôme)

Les mesures réalisées sur les 4 sections du site du PN MURE permettent de décomposer les sections comme suit :

E1 : section à très faible niveau de collage sans séparation lors du carottage

E2/E3/E4 et E1-R/E2-R/E3-R (sens « Retour »): section à très faible niveau de collage sans séparation lors du carottage mais impossibilité de réaliser l'essai au-delà de 30°C

E4-R : absence de collage, séparation au carottage (pas de mesures possibles)

La figure 17 présente l'évolution des contraintes en torsion obtenues en fonction des températures et sections. Le tableau 2 résume l'ensemble des mesures effectuées.

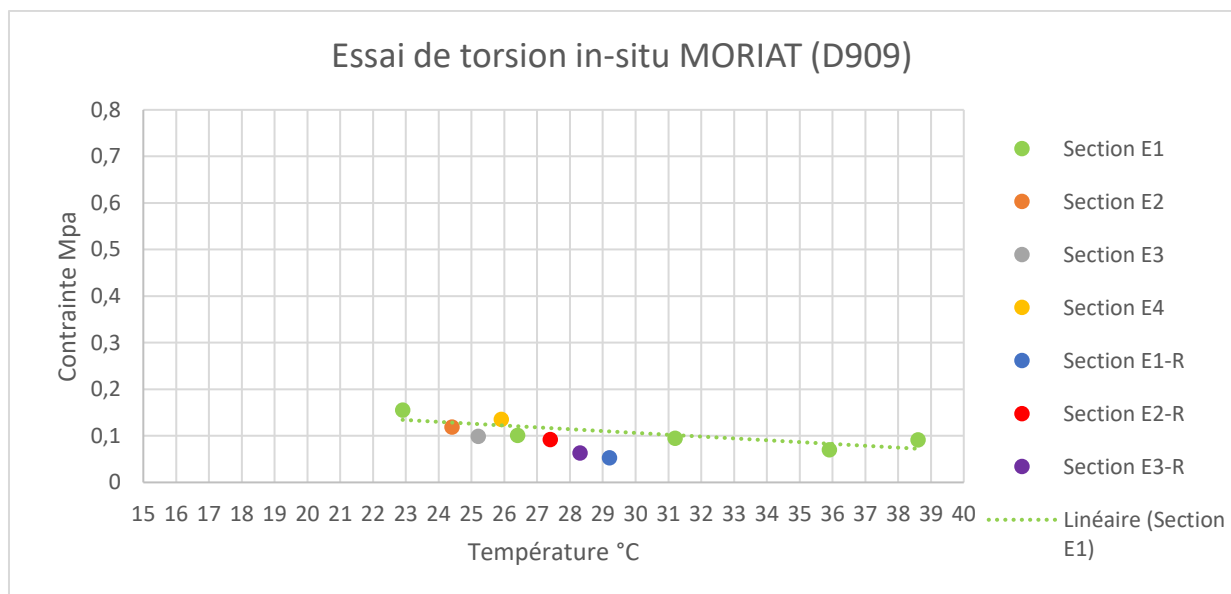


Figure 17 : Influence de la température sur la contrainte de rupture par section d'essais sur RD909-Moriat

	E1-1	E1-2	E1-3	E1-4	E1-5	E2-1	E3-1	E4-1	E1-1R	E2-1R	E3-1R
Temp ambiante °C	16.2	25.4	27.4	33.1	32.4	16,6	19,2	20,3	25.4	25.3	24.2
Temp interface °C	22.9	26.4	31.2	35.9	38.6	24,4	25,2	25,9	29.2	27.4	28.3
Couple max (Nm)	102.4	66.9	63	46.2	60	79	65,4	89,3	35.1	61	41.6
Contrainte max (MPa)	0.155	0.101	0.095	0.07	0.091	0,119	0,099	0,135	0.053	0.092	0.063
Angle de torsion unitaire (rad/mm)	2.94	2.54	1.84	2.66	2.42	2,55	1,44	1,67	1.74	2.46	1.7

Tableau 2 : Récapitulatif des températures et mesures avec le dispositif d'essai de torsion sur les différentes sections sur RD909-Moriat

On observe :

- Des niveaux de contraintes très faibles ($\leq 0,15\text{MPa}$)
- Des conditions climatiques sévères (températures élevées)
- Souvent une seule mesure réalisée en dessous de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Des mesures de torsion peuvent être réalisées dès lors qu'il n'y a pas rupture au carottage...

5.3 Sections d'enrobés neufs N 102 - St Georges D'Aurac (43 - Haute-Loire)

Les mesures réalisées sur les 2 sections du site de la N102 permettent de décomposer les sections comme suit :

BBSG/GB : Zone étendue avec une répartition des points de mesures sur 100 m. Section avec interface collée avec un bon niveau de collage.

BBSG/Rabotage : Zone située sur un carrefour avec une répartition des points de mesures sur 20 m. Section avec interface collée avec un niveau de collage « intermédiaire ».

La figure 18 présente l'évolution des contraintes en torsion obtenues en fonction des températures et sections. Le tableau 3 résume l'ensemble des mesures effectuées.

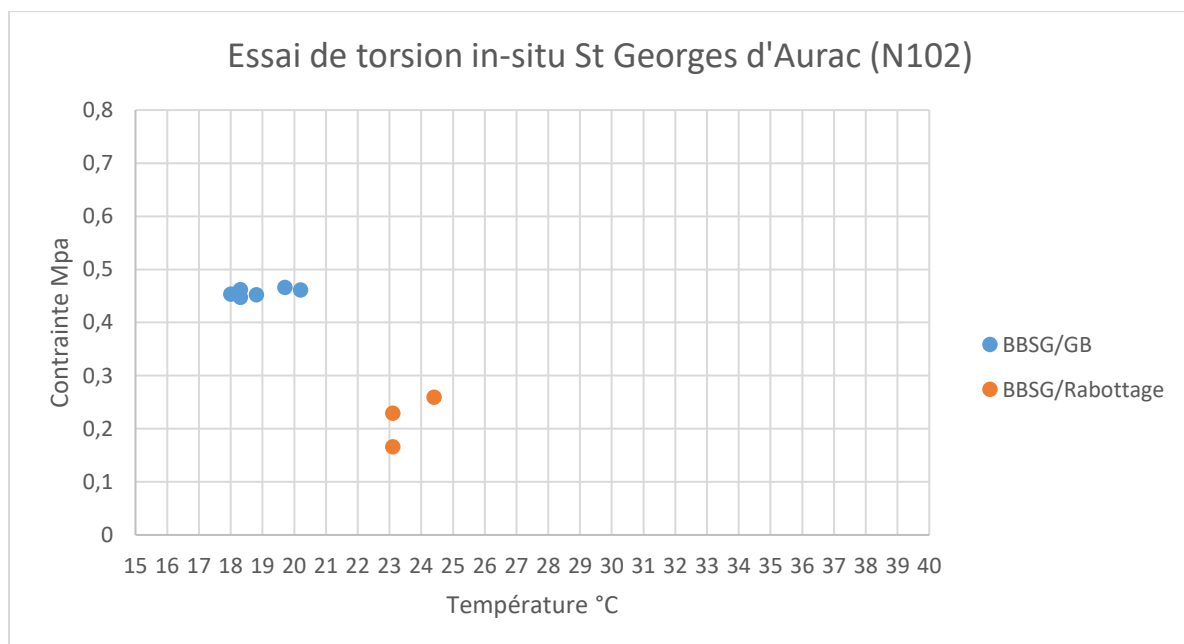


Figure 18: Influence de la température sur la contrainte de rupture par section d'essais sur N102- St Georges d'Aurac

	BBSG/GB						BBSG/Rabotage		
	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	E 8	E 9
Temp ambiante °C	17.0	18.2	18.3	23.5	23.5	23.5	24.6	24.7	24.6
Temp interface °C	18.3	18.3	18.0	18.8	19.7	20.2	23.1	23.1	24.4
Couple max (Nm)	296.1	305.9	300.1	299.4	309.1	305.6	152	110	171.7
Contrainte max (MPa)	0.447	0.462	0.453	0.452	0.466	0.461	0.229	0.166	0.259
Angle de torsion unitaire (rad/mm)	1.03	1.40	0.69	0.96	1.76	0.72	1.85	0.43	2.07

Tableau 3 : Récapitulatif des températures et mesures avec le dispositif d'essai de torsion sur les différentes sections sur N102- St Georges d'Aurac

On observe que :

- Pour un même enrobé et une même émulsion, le type de support (enrobé neuf ou support raboté) semble influencer le niveau de collage (contrainte divisée par deux) (nota : essais réalisés à des températures différentes de 3 à 6°C supérieures pour la zone rabotée).
- Dans une fourchette de température de +/- 2°C, le niveau de contrainte n'est pas affecté.

6 INTERPRETATION DES RESULTATS

Suite aux expérimentations réalisées in situ, il apparait plusieurs niveaux de collage des interfaces. Chaque situation est rendue unique par les facteurs influents le niveau de contrainte (temps, température, support, âge de l'ouvrage, circulation, type d'interface, etc...) et il convient d'être prudent sur l'interprétation en associant à chaque mesure les conditions et environnement d'essais.

Pour mener cette première interprétation des résultats in situ, il convient de considérer que le pré-carottage effectué (même s'il ne demande pas de précaution spécifique, tel que décrit précédemment) a été réalisé dans les règles de l'art avec un technicien formé à cette pratique.

6.1 Non collage de l'interface

C'est la situation la plus évidente à déterminer. Le non collage de l'interface est déterminé par le décollement de celle-ci pendant l'action de carottage. La valeur de contrainte est de ce fait nulle. Aucune valeur de contrainte ne peut être mesurée.

Cette situation est donc synonyme d'une absence totale de collage ou d'encastrement à l'interface.

Remarque : il convient de valider qu'aucune mesure ne peut être réalisée dans ces conditions. Il est recommandé de multiplier les carottages dans la zone pour s'assurer qu'il ne s'agisse pas d'un cas isolé.

6.2 Collage très faible à faible de l'interface

Dans cette situation l'action de carottage n'a pas séparée les interfaces et les essais de mesures peuvent avoir lieu.

6.2.1 Niveau de contrainte très faible

Un niveau de collage très faible s'appréhende rapidement par un test du tournevis. Le ressenti est immédiat, la carotte bouge sans forcer et semble se séparer. Il y a une adhésion minime mais présente. Deux cas se présentent :

- Lors de l'installation du matériel de mesure de torsion, l'éprouvette peut se séparer pendant le montage.
- L'installation du matériel de torsion se réalise sans séparation, la séparation a alors lieu au moment du pré chargement ou très rapidement après démarrage de l'essai. Les valeurs de contraintes obtenues sont inférieures à 0.1 MPa (cf. Figure 19).

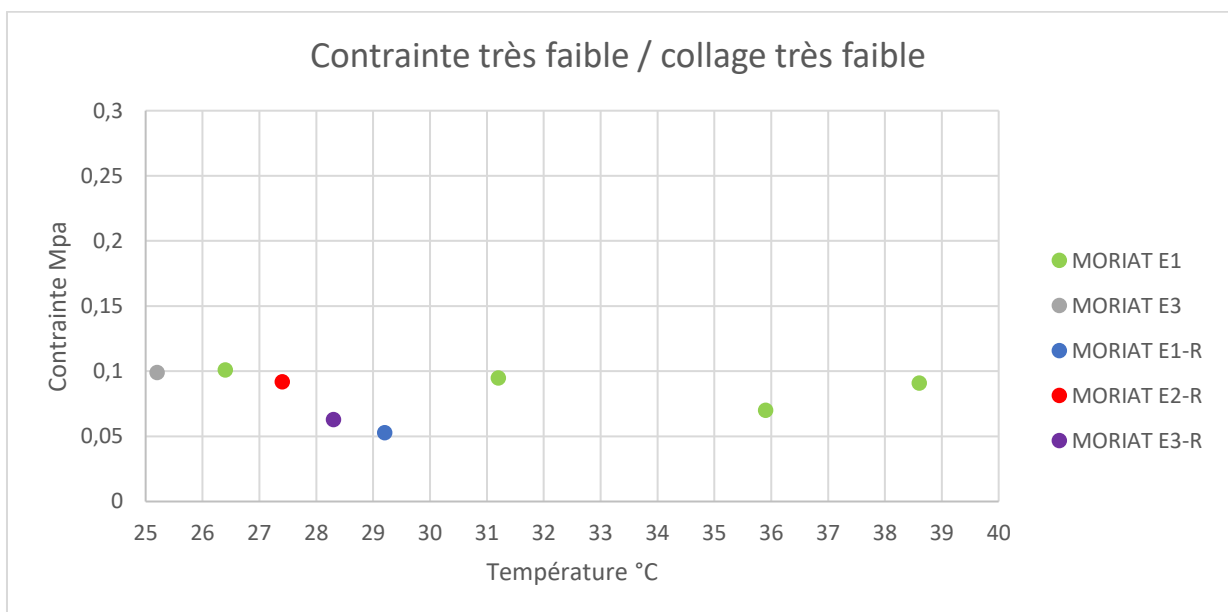


Figure 19 : Mesures de torsion conduisant à un niveau de collage très faible

Remarque : Les mesures sont très délicates à réaliser. La température n'a pas d'influence à ce niveau de collage. Le test au tournevis conduit facilement à une séparation des carottes et peut suffire pour valider le non collage.

6.2.2 Niveau de contrainte faible

Un niveau de collage faible s'appréhende de même avec l'essai du tournevis. Sans forcer la carotte bouge sans se séparer. L'installation du matériel de mesure ne détériore pas le collage. Le pré chargement sollicite déjà le collage en contrainte mais ne les sépare pas. Seul l'essai de torsion casse rapidement la liaison entre les couches. Les valeurs de contraintes sont entre 0,1 MPa et 0.15 MPa (cf. graphique 5)

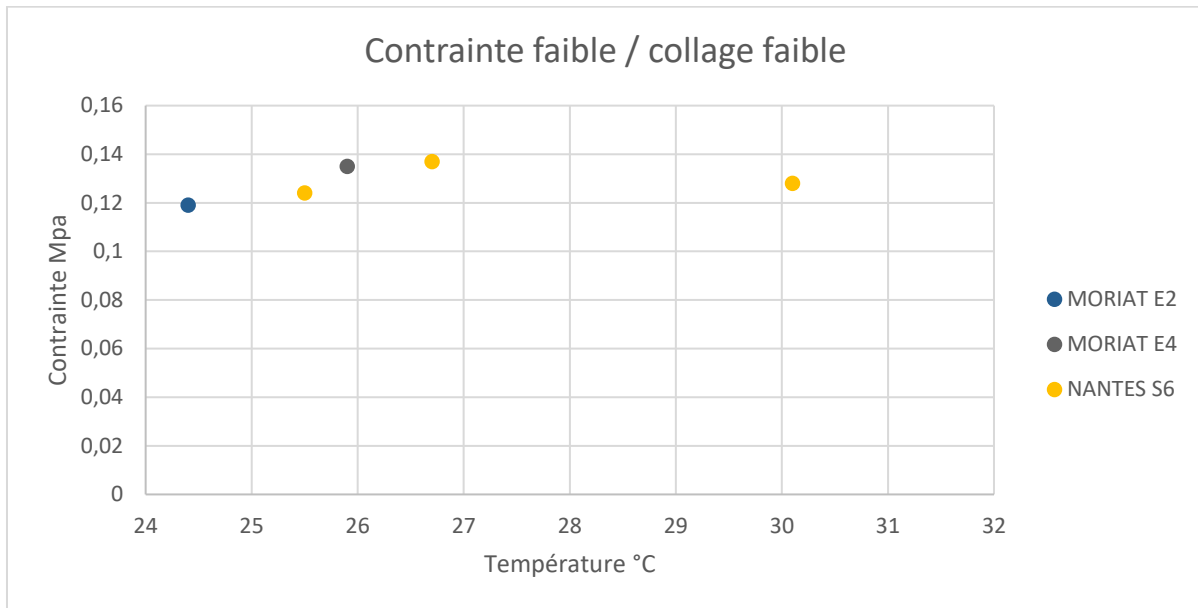


Figure 20 : Mesures de torsion conduisant à un niveau de collage faible

Remarque : Les mesures sont délicates à réaliser. La température n'a pas d'influence à ce niveau de collage. Le test au tournevis suffit.

6.3 Collage effectif de l'interface

Un collage effectif se définit par la non séparation des couches lors du carottage ou du montage ou du test du tournevis.

6.3.1 Niveau de contrainte élevé

Un bon niveau de collage et le maintien d'un niveau de contrainte élevé sur une grande étendue de températures préfigure de conditions de collages idéales.

Remarque : Entre 20 et 30°C, le niveau de contrainte baisse systématiquement avec une augmentation de la température de l'ordre de 0.03MPa/°C.

Au-delà de 30°C, l'influence de la température est moindre et la mesure semble atteindre un seuil mais comme constaté précédemment, la sensibilité à la température n'est pas à 2 degrés près.

Les valeurs de contraintes sont supérieures à 0.2 MPa à 30°C ou supérieures à 0.35 MPa en tout point de température inférieure à 30°C.

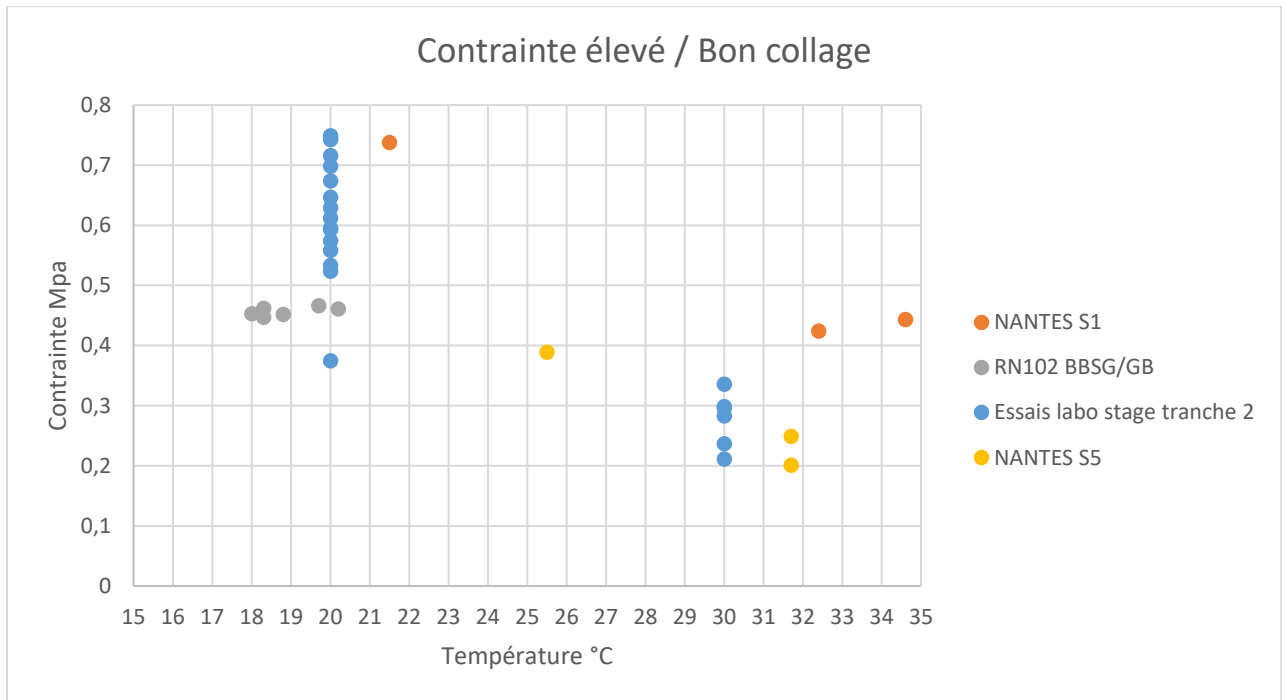


Figure 21 : Mesures de torsion conduisant à un niveau de collage élevé

Si on reprend les valeurs obtenues sur les essais réalisés en laboratoire avec trois types d'émulsions à différentes températures, on constate une bonne cohérence des résultats obtenus :

Emulsion	T(°C)	Contrainte max obtenue (MPa)		
		Moyenne	Stdev.	CV
Bitume pur 35/50	10	Pas de rupture	-	-
	20	0,673	0,06	10%
	30	0,312	0,07	22%
Bitume modifié équivalent 35/50	10	Pas de rupture	-	-
	20	0,64	0,08	13%
	30	0,254	-	-
Bitume 160/220	10	Pas de rupture	-	-
	20	0,575	0,04	7%
	30	0,335	-	-

Tableau 4 : Rappel des résultats obtenus en laboratoire sur le prototype V0 sur un complexe BBSG/GB avec un dosage à 300g/m² résiduel

6.3.2 Niveau de contrainte moyen

Un bon niveau de collage mais un niveau de contrainte moyen sur une grande étendue de température semble préfigurer de conditions de collages respectées mais non optimales du fait soit de l'aspect de surface du support (rabotage, béton) soit d'un élément à l'interface (grille, géotextile).

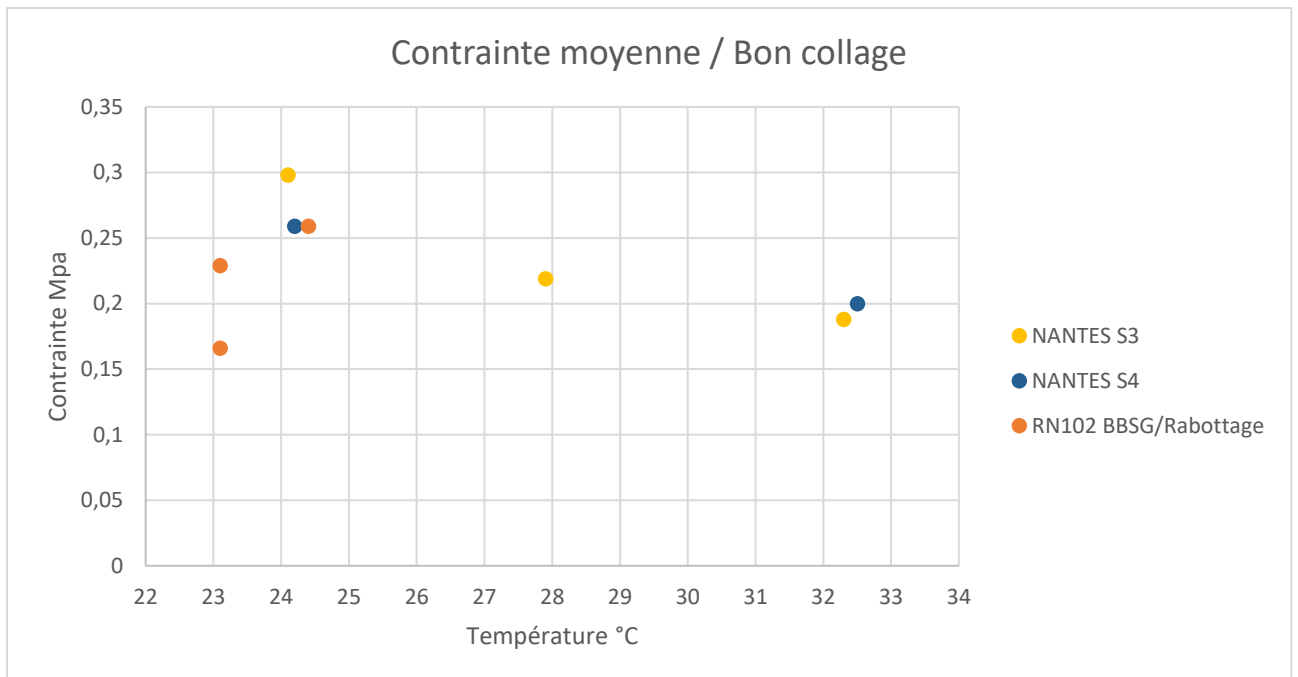


Figure 21 : Mesures de torsion conduisant à un niveau de collage moyen

Remarque : A ce niveau de contraintes, seule une connaissance du support et/ou de l'interface permet d'expliquer les résultats. Dans ce cas précis, NANTES S3 et S4 avaient une grille à leurs interfaces (bien collée) et sur la RN102, le support était fraisé grossièrement (grosses rainures).

Les valeurs de contraintes sont comprises entre 0.15 et 0.35 MPa.

7 Consultations en vue de l'industrialisation du dispositif

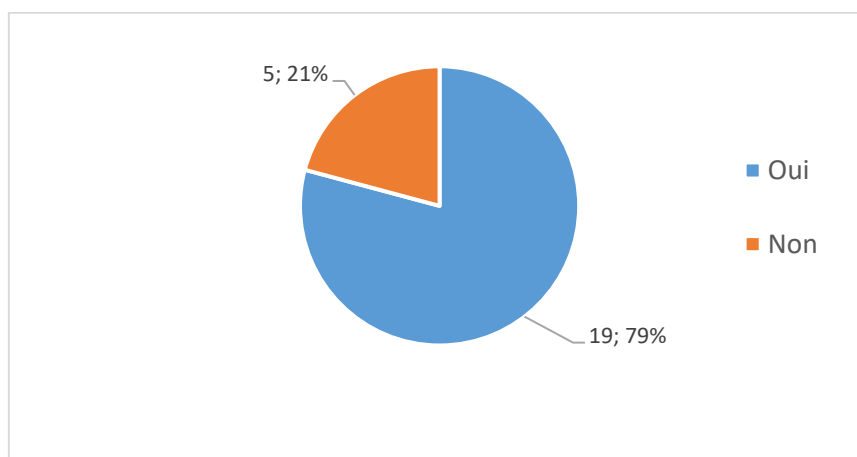
7.1 Enquête utilisateurs

Le GT 1.3 a sollicité l'IDRRIM pour consulter les laboratoires routiers agréés Laboroute sur leur intérêt pour la réalisation d'un essai de terrain destiné à évaluer la qualité du collage d'une couche d'enrobés sur une couche inférieure, en réception d'ouvrage ou en auscultation, et pour l'acquisition éventuelle d'un appareillage de mesure in situ du collage d'une couche d'enrobé sur une couche inférieure.

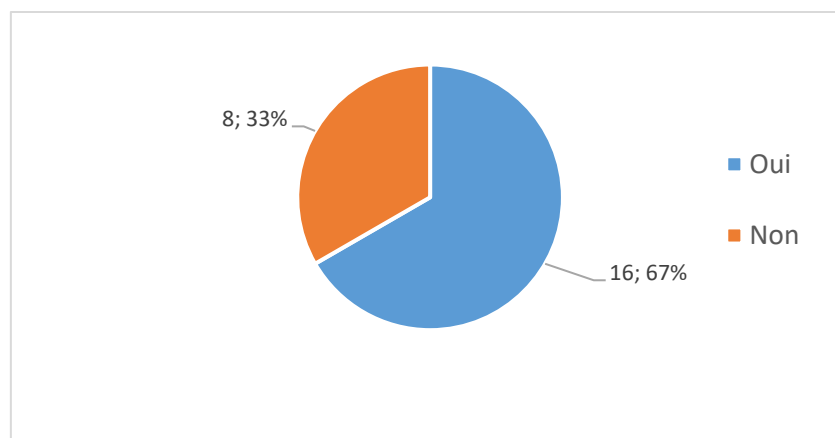
Une enquête a ainsi été réalisée du 9 au 20 décembre 2019 auprès de l'ensemble des laboratoires agréés Laboroute. Le message d'envoi a été accompagné de la note présentant le descriptif du projet de machine de mesure in situ du collage des couches. Les résultats

présentés ci-dessous s'appuient sur les retours de 24 laboratoires ayant participé à cette enquête.

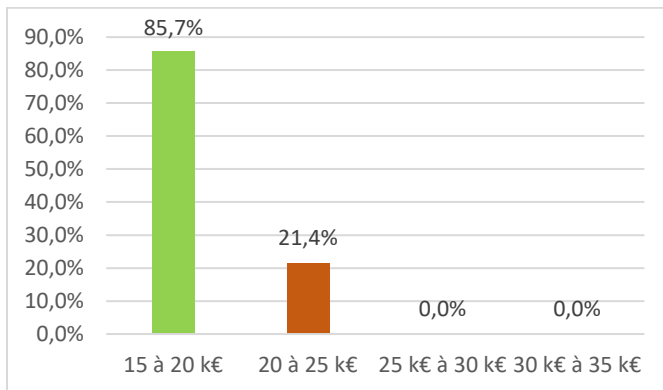
Question n°1 : Seriez-vous intéressés pour réaliser ce nouvel essai de torsion visant à mesurer le collage des couches in situ ? (24 réponses)



Question n°2 : Le cas échéant, seriez-vous prêt à investir dans l'achat d'un matériel spécifique permettant la réalisation de cet essai ? (23 réponses)



Question n°3 : Quel investissement seriez-vous prêt à réaliser pour acquérir ce matériel ?
(Non obligatoire – 13 réponses)



Le taux de réponse supérieur à 100 % s'explique par le fait que certains laboratoires ont indiqué plusieurs tranches de prix.

Commentaire : Au moins une dizaine de laboratoires seraient prêts à investir une somme maximale de 20 k€ pour ce type de matériel. D'autres n'envisagent pas de pouvoir investir cette somme ou n'ont pas répondu à la question. Un coût de 5 à 10 k€ (non proposé dans l'enquête) paraîtrait plus acceptable à un certain nombre de répondants.

Synthèse de remarques faites par les répondants répondants

- La reconnaissance ou la normalisation de l'essai reste un préalable pour certains. La question de la spécification associée se pose.
- Certains s'inquiètent de l'augmentation de la durée de l'intervention sur site, même s'ils pratiquent déjà ou acceptent l'idée des prélèvements de carottes in situ pour mesure de collage en laboratoire.
- Certains pensent qu'il n'a pas de plus-value par rapport au carottage qui permet en outre la mesure des épaisseurs.
- La maîtrise de la température reste une préoccupation pour certains.
- Les entreprises s'interrogent sur l'intérêt des maîtres d'ouvrage pour cette méthode.
- Le besoin de simplicité et de rapidité est une nécessité.

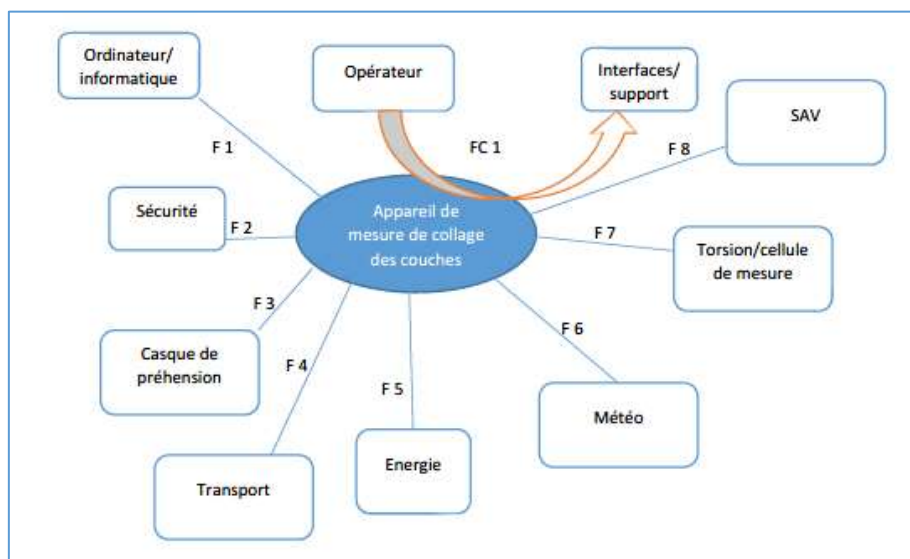
7.2 Cahier des charges

Un cahier des charges fonctionnel détaillé du dispositif de mesure attendu pour une utilisation routinière a été rédigé à l'attention des fabricants consultés en vue de l'industrialisation de cet outil de mesure du collage des couches.

Ce document regroupe l'expression du besoin, notamment en termes de

- Généralité du projet et usage
- Phases du cycle de vie
- Liste des fonctions et services attendus, incluant l'ergonomie, les conditions d'essai, la métrologie, le pilotage numérique, la maintenance, les consommables et pièces d'usure
- Souhaits en matière de planning

- Objectifs budgétaires suite à l'enquête

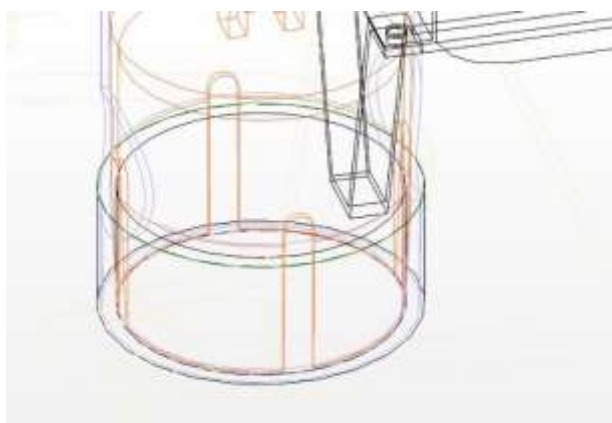
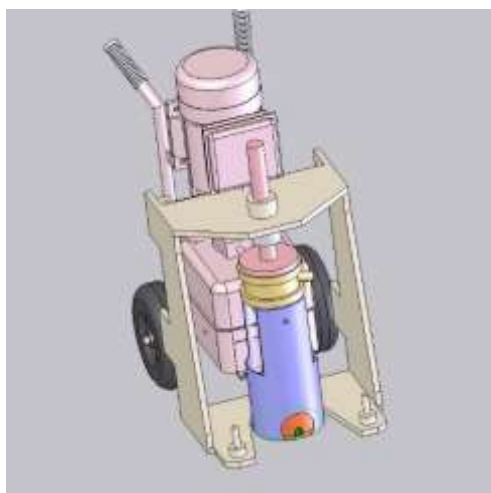


Synoptique fonctionnel du dispositif

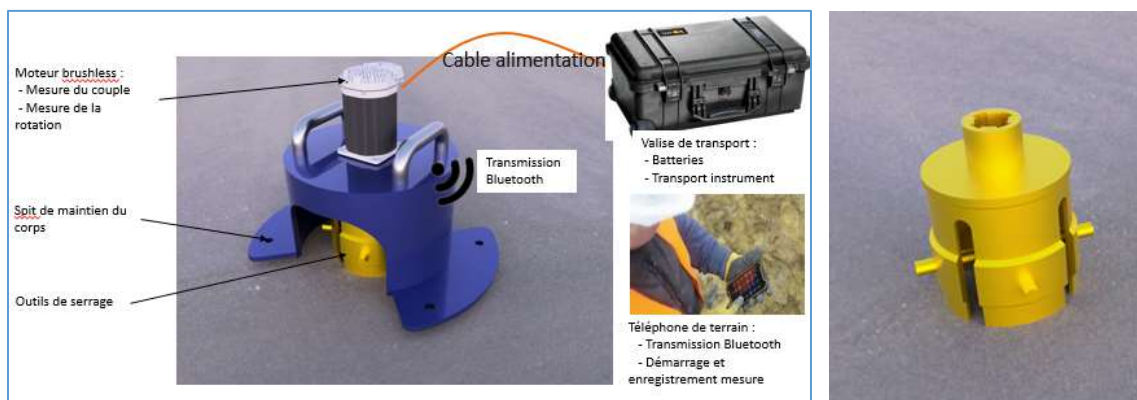
7.3 Consultations de fournisseurs

Trois entreprises ont été consultées et ont retourné un projet de concept dont un aperçu est présenté ci-dessous.

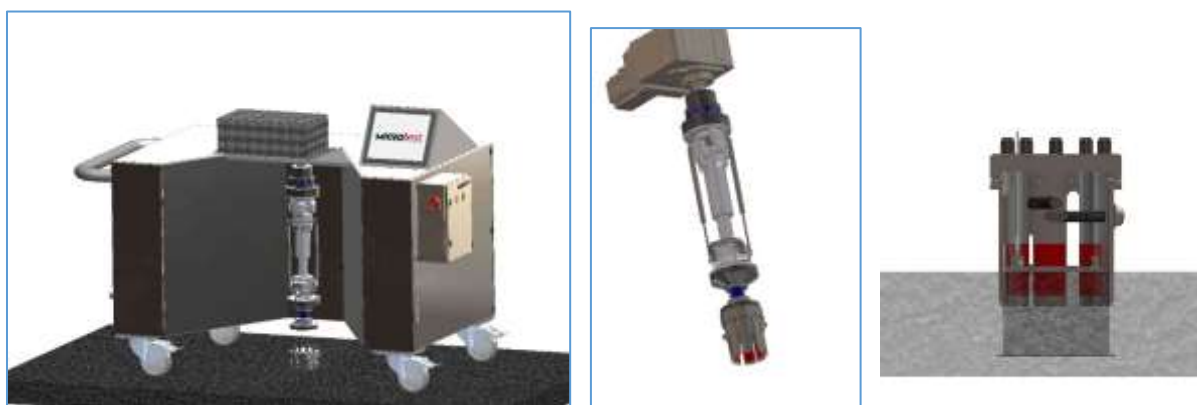
- Energydiam



- Rincent Laboratoires / ND Technologies



- Proviteq



7.4 Suite à donner

La suite qui sera donnée à ce travail préparatoire dépendra des retours consolidés de la profession. A cette fin une journée de séminaire est organisée pour confronter le projet à la profession et aux autres projets en cours touchant à la problématique du collage des couches.

A l'issue de ce séminaire une décision sur les modalités de poursuite du projet et sur le lancement ou non du développement d'un dispositif commercial doit être actée.

8 BILAN

Les différents essais menés sur site ont permis :

- De proposer des recommandations et une méthode fiable de mesures de la température d'essais lors de la réalisation des essais de torsion (notamment prendre la mesure à l'interface, avoir systématiquement un suivi de cette température ...)
- De disposer d'un premier jeu de données avec le prototype dans sa version V1 dans différentes conditions de chantier.
- De valider la logistique de chantier pour la pratique de l'essai
- De valider l'intérêt d'un essai sur site.

L'interprétation menée à ce stade de l'étude n'a été réalisée que sur les valeurs de contrainte obtenues.

Avec un essai au tournevis bien réalisé, il est possible de déterminer un collage faible jusqu'à une équivalence de torsion de 0.15 MPa.

Au-delà de cette contrainte, un appareil de mesure est nécessaire pour déterminer un niveau de collage.

Nous pouvons dégager différents niveaux de collage des couches :

Décollé : absence de collage

Collage Très faible à faible :

- contrainte < 0.1 MPa, se décolle avec le tournevis
- contrainte < 0.15, bouge avec le tournevis (considéré comme décollé)

Collage Moyen :

- 0.15 MPa < contrainte < 0.35 MPa (zone d'expertise)

Collage Bon :

- contrainte > 0.35 MPa, quel que soit la température de l'interface (entre 18 et 30°C)

Une comparaison avec les résultats de laboratoire permet de valider la cohérence de ces résultats.

Du point de vue opérationnel le principe de mesure proposé recueille une forte proportion d'avis favorables de la part des laboratoires actifs dans la construction de chaussées. Ces avis très positifs sont tempérés par quelques questions importantes qu'il convient de traiter comme :

- la reconnaissance de l'essai et les spécifications associées
- le rendement comparé avec d'autres méthodes
- la question de la mesure et de la stabilité de la température d'interface
- le coût du matériel d'essai de chantier

9 PERSPECTIVES

La mesure en torsion du collage des couches in-situ permet de collecter de la donnée. Un suivi d'une ou plusieurs sections témoins permettrait rapidement de mesurer l'influence des différents facteurs que sont la température, le type d'interface, le support et de voir leurs évolutions dans le temps. Ceci demande alors le développement de ce nouvel outil dans différents laboratoires.

Il serait surtout intéressant de concentrer le travail sur une zone de collage moyen comme identifié ici (contrainte entre 0.15 et 0.35 MPa).

Un travail sur la modélisation des niveaux de contraintes pourrait être mené de front en corrélant directement les résultats obtenus in-situ.

Réaliser des mesures régulières sur un laps de temps assez court (1 an) permettrait déjà d'obtenir l'influence de la température sur un spectre de 5 à 35°C, et de tracer une droite de régression pour une correction de température éventuelle à une valeur de référence.

Outre ces aspects scientifiques, l'avenir de la méthode devra être acté en prenant en compte les avis et les moyens des professions. Une première journée de séminaire sera organisée à l'automne 2020 afin de favoriser les échanges sur le projet et de s'enrichir des résultats ou avis émanant d'autres études en cours sur des sujets proches.