

Projet National de recherche et développement

**RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE**

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

**Auteur(s) / Organisme(s) :**

Dony Anne / KOUTIRI Imade (ESTP/ENSAM)  
Godard Eric / Brissaud Laurent/ Barrière Philippe  
(Colas pour Route de France)  
Pouteau Bertrand (Eurovia)  
Millien Anne (GEMH-GCD)  
Ollier Stéphane (Pérennise Chaussées)

**Thème de rattachement :**

Thème 1-3

DVDC/R/017

N° lettre de commande LC/18/DVDC/40

Mai 2019

Site internet : [www.dvdc.fr](http://www.dvdc.fr)

Plateforme collaborative : [www.omnispace.fr/dvdc](http://www.omnispace.fr/dvdc)

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Christine LEROY et Simon POUGET

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

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Résumé</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Introduction</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Quelques rappels bibliographiques</b>	<b>6</b>
1.1	Dimensionnement des chaussées	6
1.2	Caractéristiques du liant d'accrochage	7
1.3	Différents essais pour caractériser le collage des couches[3]	7
1.3.2	Essai de collage en cisaillement (shear bond test SBT)	7
1.3.3	Essai de collage en traction (tensile adhesion test TAT)	7
1.4	Les moyens expérimentaux étudiés	8
1.4.1	Essai de torsion manuel	8
1.4.2	Essai de mesure d'adhésion des couches (LAMI)[4-5]	9
1.4.3	Essai de torsion instrumenté en laboratoire	9
1.5	Conclusions des résultats d'études antérieures	10
<b>2</b>	<b>Partie expérimentale</b>	<b>11</b>
2.1	Corps d'épreuve	11
2.1.1	Couche de roulement	11
2.1.2	Couche d'assise	11
2.2	Emulsions de bitume	12
2.3	Carottage	12
<b>3</b>	<b>Prototype</b>	<b>13</b>
3.1	Partie mécanique	13
3.2	Cellule de torsion	14
3.3	Moyen de préhension	14
3.4	Capteur de déplacement	15
3.5	Prise de températures	15
3.6	Fonctionnement du prototype	16
<b>4</b>	<b>Résultats d'essais</b>	<b>17</b>
4.1	Pré-étude pour calage des paramètres d'essais	18

4.1.1 Interface collée .....	18
4.1.2 Interfaces semi-collée (50% de surface collée) .....	19
4.1.3 Interface glissante (10% de surface collée) .....	20
4.1.4 Intérêt de la pré-charge .....	21
4.1.5 Résultats d'essais à 10°C pour une ECR60 au 160-220 .....	22
4.1.6 Résultats d'essais à 20°C pour une ECR60 au 160-220 .....	23
4.1.7 Résultats d'essais à 30°C pour une ECR60 au 160-220 .....	25
4.2 Résultats d'essais dans les conditions définies .....	26
4.2.1 Pour une ECR60 au 160-220 .....	27
4.2.2 Pour une ECR60 au 35-50 .....	28
4.2.3 Pour une ECR au 35-50 modifié .....	29
4.2.4 Vérification glissement du casque .....	30
4.2.5 Bilan des résultats d'essais .....	31
5 Expérimentation sur chantier .....	33
5.1 Résultats chantier .....	33
5.2 Bilan .....	37
<b>6 Comparaison des résultats d'essais à la littérature .....</b>	<b>37</b>
<b>7 Conclusion générale .....</b>	<b>38</b>
<b>8 Perspectives .....</b>	<b>39</b>
<b>9 Références bibliographiques .....</b>	<b>40</b>
<b>10 Annexes .....</b>	<b>41</b>
10.1 Annexe 1 : fabrication des plaques d'enrobé .....	41
10.2 Annexe 2 : Etape de fabrication des corps d'épreuve .....	41
10.3 Annexe 3 : graphes essais laboratoire .....	42
10.4 Annexe 4 : photos chantier .....	43

# 1 Résumé

---

## Français

L'objectif final du groupe de travail est de proposer un essai de caractérisation performantielle in situ des couches d'accrochage. Ce deuxième rapport est intermédiaire et présente l'évaluation de la première version du prototype V0 avec des résultats expérimentaux encore en cours d'exploitation. Une présentation complète du prototype est fournie. Un travail expérimental a été mené au niveau laboratoire sur des complexes enrobés (BBSG sur GB) fabriqués avec des compacités fixées et trois types d'émulsions. Différentes conditions d'essais ont été testées (températures d'essais, qualité d'interface, réglage du prototype...) ; elles ont conduit à identifier des voies d'amélioration du dispositif et des conditions de fonctionnement pertinentes (durée de pré charge et vitesse de montée en charge). Les résultats confirment également l'incidence importante de la température qui devra être maîtrisée. Des premiers essais ont été réalisés sur chantier permettant de juger de l'ergonomie de l'appareil à différents niveaux. Les résultats de cette étude intermédiaire valident le principe du dispositif d'essai in situ et conduisent à proposer une version améliorée qui pourra être testée dans la phase prochaine du projet. L'analyse des résultats sera poursuivie dans la troisième phase également.

## Anglais

The final objective of the working group is to provide a performance test for in situ qualifying the interlayer bonding. This second report is intermediate and presents the evaluation of the first version of the prototype V0 with experimental results (still in interpretation). A complete presentation of the prototype is provided. Experimental work has been carried out at the laboratory level on asphalt complexes (BBSG on GB) manufactured with fixed densities and three types of emulsions. Several conditions have been tested (test temperatures, interface quality, prototype setting...); Ways of improvement were identified for the device and relevant operating conditions (pre-charge time and load speed) were defined. The results also confirm the significant temperature impact that will have to be mastered. First tests were carried out on jobsite allowing to evaluate the ergonomomy of the device at different levels. The results of this intermediate study validate the principle of the in situ test device and lead to an improved version which can be tested in the next phase of the project. The analysis of the results will be continued in the third phase as well.

## 2 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.

Dans un premier temps un état de l'art a été réalisé rappelant que plusieurs études ont été faites sur la tenue mécanique des couches d'accrochage que ce soit au niveau national ou international. Des essais de traction, de cisaillement et de torsion, avec des couplages possibles ont été étudiés et envisagés [1].

L'essai de torsion présente l'avantage de pouvoir être réalisé in situ mais nécessite une bonne maîtrise de l'essai. Dans sa version V0, un prototype développé depuis 2015 par Pérennise Chaussées et GEMH et destiné aux travaux de recherche du consortium, avait fait l'objet d'une première validation par le groupe de travail et notamment le dispositif de préhension de la carotte.

Le travail présenté dans ce rapport présente la deuxième partie du projet et compile essentiellement les résultats d'essais expérimentaux en vue de la qualification du prototype d'essais dans sa version V0.

Ces essais sont réalisés majoritairement par un stagiaire hébergé au CST Colas pour le compte de Routes de France à partir d'échantillons de laboratoire et en suivant un plan d'essais préalablement défini, permettant de valider les dimensions du carottage, de vérifier le pilotage en couple et la mesure associée de la rotation ainsi que la stabilité du dispositif lors de l'essai. Enfin une faisabilité de l'essai sur chantier sera réalisée.

## 1 Quelques rappels bibliographiques

Ce rapport s'inscrit dans un ensemble de livrables réalisés par le sous-groupe 1-3 du GT1 de DVDC. Il est donc dans la continuité de l'état de l'art réalisé préalablement à cette étude expérimentale [1]. Ce travail ayant été réalisé dans le cadre d'un stage, cette première partie expérimentale reprend quelques notions générales permettant de faciliter la lecture du document à un non initié.

### 1.1 Dimensionnement des chaussées

Le dimensionnement mécanique consiste à vérifier que la structure choisie est apte à supporter le trafic poids lourds cumulé, déterminé pour la durée de dimensionnement fixée, sur un support déterminé. Le trafic lié aux véhicules légers est supposé avoir un impact négligeable par rapport aux poids lourds.

La vérification porte sur :

- Le comportement en fatigue et les modules des matériaux liés, notamment les matériaux bitumineux
- Les déformations permanentes des couches non liées
- Le trafic, la durée de vie, la qualité du sol support
- Les conditions de collage à l'interface (modification de la répartition des contraintes/déformations)

Les sollicitations calculées dans la chaussée doivent alors être inférieures ou égales aux sollicitations admissibles. La détermination de l'épaisseur minimale des couches se fait par itérations successives de façon à respecter ce critère.

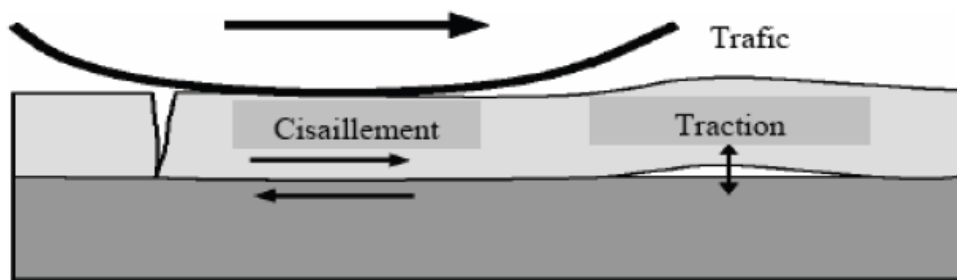


Figure 1. Sollicitations suite au freinage [1]

En matière de dimensionnement des structures de chaussées, les méthodes actuelles ne prévoient que des conditions extrêmes (collée ou glissante) sur toute leur durée de vie (ou une partie).

Au jour d'aujourd'hui il n'existe pas de méthode scientifique qui nous permet d'évaluer et de quantifier la qualité du collage sur chantier.

## 1.2 Caractéristiques du liant d'accrochage

Il existe différents types de liants d'accrochage, les plus répandus étant les émulsions cationiques. Il existe aussi des émulsions de bitume anioniques, utilisées plutôt en Amérique de Nord (Etats Unis, Canada).

La quantité de liant à répandre sur la route varie selon les usages, les types de supports et les revêtements choisis. Cependant les dosages oscillent couramment entre 120 et 450 grammes de liant résiduel par m<sup>2</sup>.

Par définition, le dosage en liant résiduel correspond à la quantité de liant (matière sèche) qui reste sur la chaussée après rupture (évaporation) des composés volatils du liant bitumineux.

Le liant est le plus souvent répandu grâce à une rampe épandeuse afin de maîtriser au mieux le dosage.

Le coût des couches d'accrochage est faible par rapport à son apport en termes de durée de vie de la chaussée.

## 1.3 Différents essais pour caractériser le collage des couches [2]

### 1.3.1 Essai de collage en torsion (troque bond test TBT)

Une force de rotation est appliquée sur une plaque en acier qu'on vient coller sur la couche de surface d'une route sur site, ou sur la couche de surface d'une carotte en laboratoire et le couple est mesuré.

La formule pour calculer la résistance de collage en torsion  $\tau_{TBT}$  s'écrit comme suit :

$$\tau_{TBT} = \frac{16 * M * 10^{-6}}{\pi * D^3}$$

Avec :

$\tau_{TBT}$  : Contrainte de torsion en MPa

M : Moment de torsion appliqué en N.m

D : Diamètre de l'éprouvette en mm

### 1.3.2 Essai de collage en cisaillement (shear bond test SBT)

Des éprouvettes cylindriques sont soumises à une sollicitation en cisaillement direct, et à une température d'essai contrôlée

La contrainte de cisaillement  $\tau_{SBT}$  se calcul de la façon suivante :

$$\tau_{SBT} = \frac{F}{\pi * r^2}$$

Avec :

$\tau_{SBT}$  : Contrainte de cisaillement en MPa

F : Force de cisaillement verticale en N

r : rayon initial de l'éprouvette en mm

### 1.3.3 Essai de collage en traction (tensile adhesion test TAT)

L'essai de collage en traction permet la détermination de l'adhérence entre une couche de surface et la couche inférieure perpendiculairement au plan de l'éprouvette

La résistance à la traction est calculée à partir de la force max et de la surface

$$\beta_t = \frac{F_{max}}{A}$$

Avec :

$\beta_t$  : Résistance de collage en torsion en MPa

$F_{max}$  : Force maximale en N

A : Aire de surface à l'intérieur de la gorge annulaire en mm<sup>2</sup>

## 1.4 Les moyens expérimentaux étudiés

L'objectif de ce travail étant d'évaluer un dispositif de mesure de collage des couches d'enrobé in situ par torsion, le travail bibliographique a principalement été concentré sur les travaux réalisés avec des dispositifs similaires.

### 1.4.1 Essai de torsion manuel

Le dispositif (figure 2) qui a été testé en 2013/2015 lors de stages de fin d'année réalisés au sein du campus scientifique et technique COLAS, et dans le cadre d'une coopération ESTP/ENSAM/USIRF permet la réalisation de tests in situ et/ou en laboratoire suivant le projet de norme EN 12697-48. Les échantillons sont de diamètre de 100mm. Ce dernier est fixé à un moule de sorte que l'interface soit à 20mm ( $\pm 10$ mm) 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 ( $\pm 15$ s).



Figure 2. Dispositif de torsion couple-mètre

Un casque est collé sur la surface de l'échantillon et à l'aide d'une douille on vient visser à celui-ci un couple-mètre permettant de mesurer le couple appliqué. 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.

Lors de son évaluation, ce dispositif avait des difficultés d'exécution et montré plusieurs défaillances qui sont :

- ▶ C'est un essai manuel donc l'influence de l'opérateur est très importante
- ▶ L'application de la force par l'opérateur ne peut pas être parfaitement parallèle à l'interface étudiée et nécessite un dispositif spécifique,
- ▶ 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.

#### 1.4.2 Essai de mesure d'adhésion des couches (LAMI) [5-4]

Le ministère des transports du Québec a développé une technique d'essai par traction pour effectuer des tests sur le terrain. Cette méthode présente l'avantage d'être facilement transportable et de pouvoir effectuer des tests pour la réception de chantier peu de temps après la construction de la chaussée afin de valider celle-ci.

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 3. Système de traction québécois avec prise mécanique

Les conclusions de Destrée sont encourageantes mais mettent en avant des précautions à prendre et notamment la nécessité d'un nombre d'essais importants sur chantier avant de proposer des spécifications limites.

#### 1.4.3 Essai de torsion instrumenté en laboratoire

L'essai de torsion manuel 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 pas possible actuellement (voir 1.4.1).

Face à ce constat, et dans le but de pouvoir faire des essais et 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.

Parmi les dispositifs existants, celui présenté par Malick Diakhate dans sa thèse [2] et développé par EUROVIA en 2002, 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. On applique une force verticale qui est transformée en rotation par le biais d'une chaîne et d'un engrenage (figure 4).



Figure 4. Dispositif pour la torsion mécanique (M.DIAKHATE)

Une évolution de ce dispositif a été proposée lors du stage ESTP/ENSAM/USIRF permettant de nouveaux supports des casques du dispositif (Figure 5).

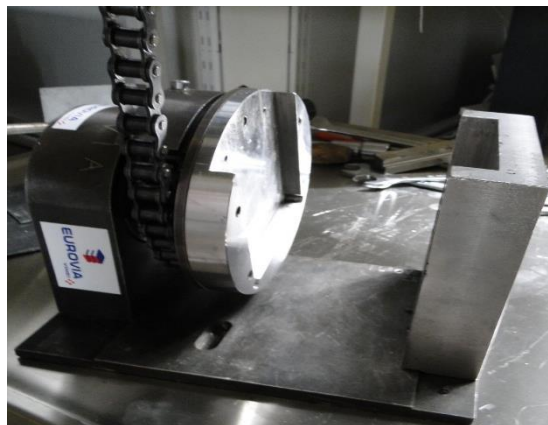


Figure 5. Nouveau dispositif avec modification des supports des casques

Par ailleurs, il est à noter que les laboratoires universitaires, tels que par exemple le GC2D à Egletons ou le laboratoire de l'ENTPE disposent de presses équipées de vérin de torsion qui permettent nativement la réalisation d'une telle modalité d'essai.

## 1.5 Conclusions des résultats d'études antérieures

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

- ▶ L'essai in-situ de torsion existant 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.
- ▶ La littérature fournit un jeu de données intéressantes qui pourraient éventuellement permettre de vérifier la faisabilité d'un nouvel essai in-situ, moyennant la possibilité de se caler sur des conditions expérimentales identiques.

- ▶ Parmi les nombreux paramètres rencontrés 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 température de 20°C.
- ▶ La compacité du support apparait comme un paramètre influent, après celui de la température d'essai.
- ▶ La vitesse de sollicitation apparait, d'après la littérature, peu influente sur les résultats finaux.

## 2 Partie expérimentale

### 2.1 Corps d'épreuve

Ce travail s'inscrit, autant que faire se peut, dans la continuité des travaux réalisés précédemment (stages CST de Guillaume Marmier en 2013 et Ohiane Mendizabal en 2014). Afin de corréliser au mieux les résultats, les conditions de fabrications et d'essais de cette étude seront les plus proches possibles des études antérieures.

Les corps d'épreuves seront constitués par 2 couches d'enrobés de dimension (L x l x h) 600x400x60 mm chacune et collées à l'émulsion de bitume.

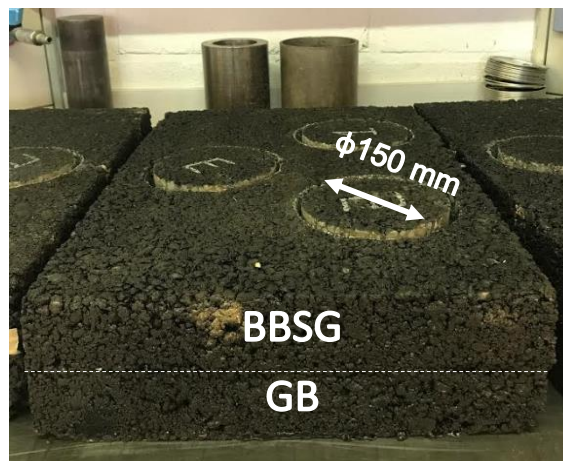


Figure 6. Corps d'épreuve

#### 2.1.1 Couche de roulement

Il s'agit d'une formule de BBSG 0/10 classe 3 composée de matériaux La Noubleau et de bitume pur 35/50.

La teneur en vide visée sera la plus grande possible pour « pénaliser » l'adhésion à l'interface soit 8% pour le BBSG.

#### 2.1.2 Couche d'assise

La couche d'assise sera une formule de GB 0/14 classe 3 composée de matériaux La Noubleau et de bitume pur 35/50.

La teneur en vide visée sera la plus grande possible pour « pénaliser » l'adhésion à l'interface soit 10% pour la GB.

## 2.2 Emulsions de bitume

La formulation d'émulsion de bitume correspond à une émulsion pour couche d'accrochage de type ECR 60.

Elle est déclinée en 3 versions :

- ▶ Emulsion au bitume pur 35/50
- ▶ Emulsion au bitume pur 160/220
- ▶ Emulsion au bitume modifié (35/50 + latex)

L'application de l'émulsion consiste à verser la quantité souhaitée de couche d'accrochage sur la plaque puis à la répartir à l'aide d'un pinceau sur toute la surface de sorte à être homogène.



Figure 7. Répartition homogène de l'émulsion

## 2.3 Carottage

Le carottage s'effectue avec un carottier de laboratoire à avance automatique (butées de début et fin de course). Le prototype est conçu pour travailler sur des carottes en  $\Phi$  150. On utilise donc un carottier de 150 mm de diamètre qui descend jusqu'à 2cm en dessous de l'interface. On effectue trois empreintes uniquement par plaque, de façon à ne pas avoir d'interactions de carottage. Un refroidissement à l'eau est appliqué pendant tout le carottage.

Le délai entre la fabrication d'une plaque et le carottage est de 24 heures.



Figure 8. Carottier de laboratoire

### 3 Prototype

Le prototype est le nouveau dispositif version 0, développé initialement par Pérennise Chaussées et GEMH, et qui n'a jamais été utilisé auparavant. Il a été conçu pour pouvoir réaliser des essais de torsion en laboratoire et sur chantier en se référant au fonctionnement d'autres appareils cités en §1, au projet de norme et en tenant compte des expériences passées.

L'appareil est disposé sur une plateforme mobile équipée de 4 roues et peut être manipulé et déplacé facilement sur une chaussée en toute autonomie. Il dispose d'une alimentation sur batterie, ce qui devrait permettre d'aller sur chantier sans nécessiter d'une alimentation sur secteur.



Figure 9. Prototype d'essai de torsion en laboratoire et sur site

#### 3.1 Partie mécanique

Un vérin électromécanique assure la vitesse et le déplacement pendant la durée de l'essai.

### 3.2 Cellule de torsion

Le dispositif est doté d'une cellule de torsion d'une capacité maximale de 500 Nm.



Figure 10. Cellule de torsion

### 3.3 Moyen de préhension

La prise des éprouvettes est réalisée par un « casque » se positionnant sur l'empreinte d'un carottier de Ø150 mm. Le casque prend place dans la rainure et un serrage permet une prise sur l'éprouvette.

Il a été constaté que, sur certains matériaux, un glissement s'opère entre le casque et l'enrobé dès 200 N.m de couple de force appliqué. Pour y remédier une bande de papier de verre est collée à l'intérieur du casque avec une fine couche de colle pour avoir une meilleure adhésion casque/enrobé. Plus que le grain du papier à poncer, c'est la surépaisseur créée qui permet un meilleur maintien.

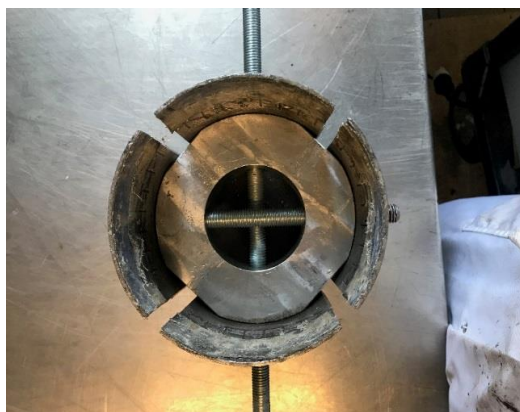


Figure 11. Moyen de mesure (casque)

### 3.4 Capteur de déplacement

Un capteur optique, positionné fixement sur l'enrobé, permet de mesurer l'angle de rotation du casque pendant l'essai et de contrôler les éventuels glissements.

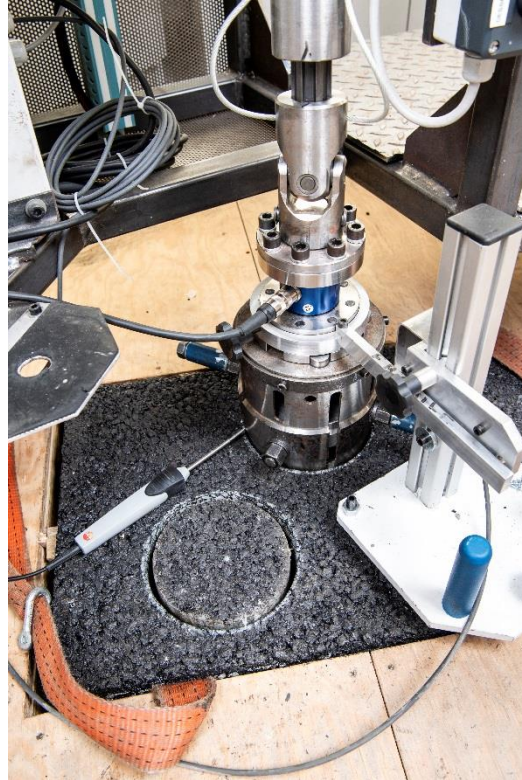


Figure 12. Capteur de déplacement

### 3.5 Prise de températures

La température d'essai a été identifiée par des travaux précédents comme un paramètre majeur pour ce type de test. Une maîtrise parfaite de ce paramètre est donc indispensable à la bonne tenue des essais.

Le prototype de torsion ne dispose pas de moyen de mesure de la température. Cependant, le branchement d'une sonde de température semble possible (branchement électrique et logiciel).

Dans un premier temps, un thermomètre de chantier (PT100) et un thermomètre IR (infrarouge) ont été utilisés au cours des essais pour contrôler la température.

Puis nous avons pu tester un appareil autonome de mesures de température. C'est un appareil qui prend d'une part des mesures de température de l'air ambiant et d'autre part, au moyen d'une sonde déportée des mesures au plus près de l'interface. Les températures sont relevées toutes les 10 minutes et les données sont récupérées sur le site internet dédié.

Cette solution est intéressante de par le double relevé de température et par son fonctionnement autonome, mais ne convient pas complètement à notre besoin du fait de la fréquence de mesures (10 min) inadapté à notre essai.

Finalement nous avons opté pour un appareil ayant le même principe de fonctionnement que l'appareil testé : un thermomètre à double entrée mais cette fois-ci, les valeurs sont prises en continues, à la demande, et sont récupérables via un logiciel gratuit.

C'est cette solution qui est retenue pour la prise de températures.



Figure 13. Différents moyens pour la prise de température

### 3.6 Fonctionnement du prototype

La mise en place de l'appareil s'effectue en différentes étapes :

- ▶ positionner le casque sur l'empreinte d'un carottier, qu'on vient enfoncer dans la rainure jusqu'à 2 cm en dessus de l'interface et serrer à l'aide de tiges filetées,
- ▶ positionner l'appareil au-dessus du casque et déposer le bras de la cellule de torsion sur le casque parfaitement perpendiculaire,
- ▶ placer le capteur de déplacement bien en contact avec l'appareil
- ▶ bloquer les quatre roues de l'appareil pour que l'appareil ne bouge pas.

Ces différentes étapes sont réalisables en 10 minutes.

Une fois la mise en place de l'appareil faite, appliquer une pré-charge de 25 N.m au préalable pour s'affranchir du glissement casque/enrobé et des jeux.

Après la pré-charge, un chargement 500 N.m est appliqué avec une vitesse de chargement de 500 N.m en 30s, puis maintien de la charge pendant 10s avant déchargement de la contrainte.

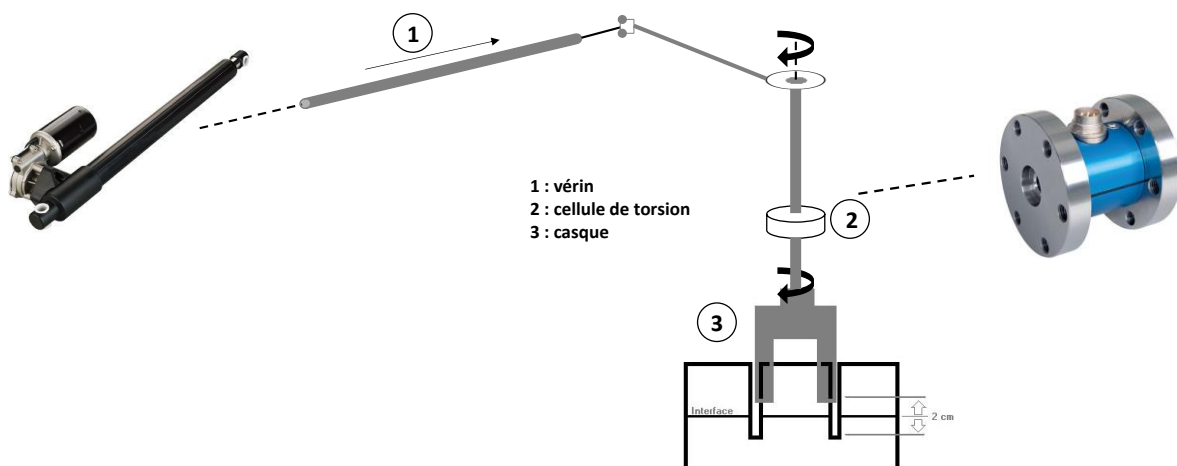


Figure 14. Schéma principe de fonctionnement



## 4 Résultats d'essais

Les grandes lignes du programme d'essai sont définies comme suit :

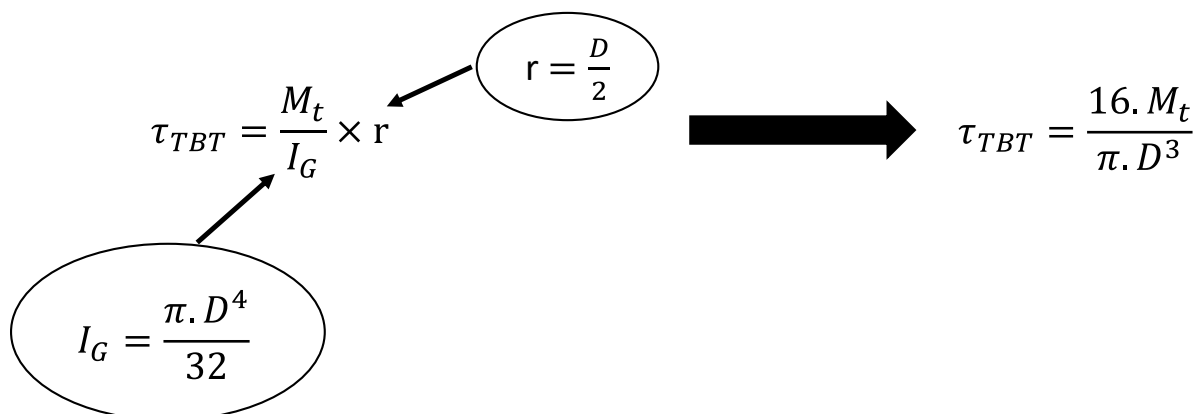
- ▶ La température d'essai est fixée initialement à 20°C. Cela permettra la mise en place d'un protocole de mesure à une température fixée proche de l'ambiante. Deux autres températures sont testées ultérieurement (10°C – 30°C)
- ▶ Les trois types d'émulsion sont utilisés.
- ▶ Il n'est pas possible d'appliquer avec le prototype les vitesses de chargement de la norme et des autres essais (SBT = 50 mm/min, TBT = 180°/min, 1.3MPa/s). Le prototype est piloté en couple avec un couple maxi de 500 N.m ; une pré-étude sera nécessaire pour déterminer le temps de montée en charge le plus adéquate (10, 30 et 90 secondes).
- ▶ Trois niveaux de collage seront testés pour représenter les interfaces collées (100%), semi-collées (50%) et glissantes (10%). Le pourcentage représente la surface d'émulsion recouvrant l'interface.
- ▶ L'essai réalisé avec le prototype ne devrait pas être systématiquement destructif.

Pour le calcul de la contrainte de torsion  $\tau_{TBT}$  nous avons utilisé la théorie des poutres et en appliquant les hypothèses simplificatrices de Bernoulli, on obtient :

$$\tau_{TBT} = \frac{M_t}{I_G} \times r$$

$$I_G = \frac{\pi \cdot D^4}{32}$$

$$r = \frac{D}{2}$$

$$\tau_{TBT} = \frac{16 \cdot M_t}{\pi \cdot D^3}$$


Avec :

$M_t$  : le moment de torsion en N.m

$I_G$  : le moment quadratique en m<sup>4</sup>

$r$  : le rayon de l'éprouvette en m

$D$  : le diamètre de l'éprouvette en m

Enfin le module de cisaillement  $G$  pour un matériau homogène est donné par la formule suivante :

$$G = \tau_{TBT} / \gamma$$

Avec :

$\gamma$  : la distorsion ou glissement défini par  $\gamma = R \cdot \theta / l = 75 \cdot \theta / 40$

75 : rayon en mm de notre carotte

40 : distance par rapport au point de mesure (+/- 20 mm par rapport à l'interface) (voir Figure 14)

Ce module sera exploité dans la suite de l'étude (Tranche 3).

## 4.1 Pré-étude pour calage des paramètres d'essais

### 4.1.1 Interface collée



Figure 15 : interface 100% collée, dosée à 300g/m<sup>2</sup> de bitume résiduel

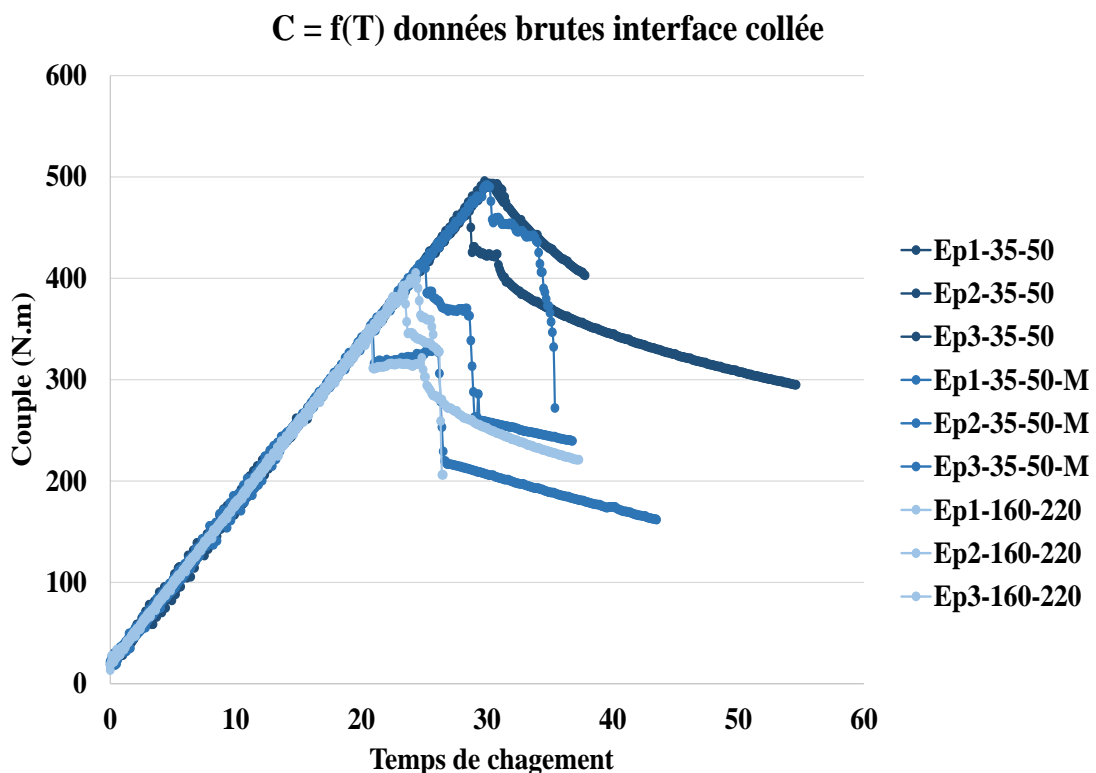
Les résultats obtenus pour les trois types d'émulsion et à une température de 20°C sont présentés dans le tableau suivant :

Emulsion	Ep	Temps de chargement (s)	Couple (Nm)	Dist max (mm)	Angle de Rotation (Radian)	$\tau_{TBT}$ (MPa)	Moyenne Couple (N.m)	Ecartype Couple (N.m)	Moyenne angle de rotation (degré)	Ecartype angle de rotation (s)
35/50	1	28,500	467,200	3,30	2,223	0,705	485,533	15,922	2,001	0,197
	2	29,800	495,900	2,87	1,934	0,749				
	3	30,200	493,500	2,74	1,846	0,745				
35/50 modifié	1	20,700	353,300	2,32	1,563	0,533	420,633	69,384	1,772	0,223
	2	30,000	491,900	2,59	1,745	0,743				
	3	25,000	416,700	2,98	2,008	0,629				
160/220	1	23,300	392,800	3,97	2,674	0,593	381,633	30,902	2,454	0,661
	2	20,800	346,700	2,54	1,712	0,523				
	3	24,300	405,400	4,42	2,977	0,612				

Tableau 1. Valeurs à la rupture des essais pour les trois types d'émulsion

**Le tableau 1** représente les valeurs à la rupture des différents essais effectués sur des plaques 100% collées avec les trois différents types de formulations d'émulsion. Pour chaque plaque nous avons trois empreintes de carottage soit trois répétitions par formulation. L'appareil nous donne les valeurs de couple et d'angle de rotation, et par calcul la contrainte de torsion.

**Le graphique 1** représente les données brutes du couple (moment de torsion) imposé en fonction du temps de chargement pour les trois différents types d'émulsion. A noter, la rupture des éprouvettes est franche, directe et se fait parfaitement à l'interface sans pour autant détériorer les éprouvettes. L'essai a une bonne répétabilité sur le comportement « machine » et les courbes se superposent parfaitement.



Graphique 1. Contrainte de torsion en fonction du temps de chargement (interface collée)

#### 4.1.2 Interfaces semi-collée (50% de surface collée)

On qualifie d'interface semi-collée, une interface dont 50% de la surface de la couche d'accrochage est collée (toujours dosé à 300 g/m<sup>2</sup> de bitume résiduel). Un choix purement mathématique a été pris de sorte à avoir une moitié de surface collée et l'autre moitié non (**figure 16**).



Figure 1616. Interface semi-collée

Il n'a pas été possible de tester les échantillons avec le dispositif dans cette configuration car il a été constaté une dégradation systématique des éprouvettes lors du carottage. La rupture intervenait dans un cas sur deux au retrait du carottier. La configuration « interface semi-collée » n'a donc pas pu être testée dans cette étude ; une nouvelle réflexion devra être menée pour la réalisation d'échantillons plus homogènes.

#### 4.1.3 Interface glissante (10% de surface collée)

Pour ce qui est des interfaces glissantes, un pochoir a été reproduit pour pouvoir représenter 10% de surface collée Figure 17.



Figure 17. Interface glissante

Les essais n'ont pas pu être menés à terme, toutes les éprouvettes rompaient au carottage.



Figure 18. Les différents faciès des éprouvettes (collée, semi-collée et glissante)

Aujourd'hui il est difficile de reproduire des interfaces imparfaites en laboratoire. La suite des essais sera réalisée sur les interfaces collées.

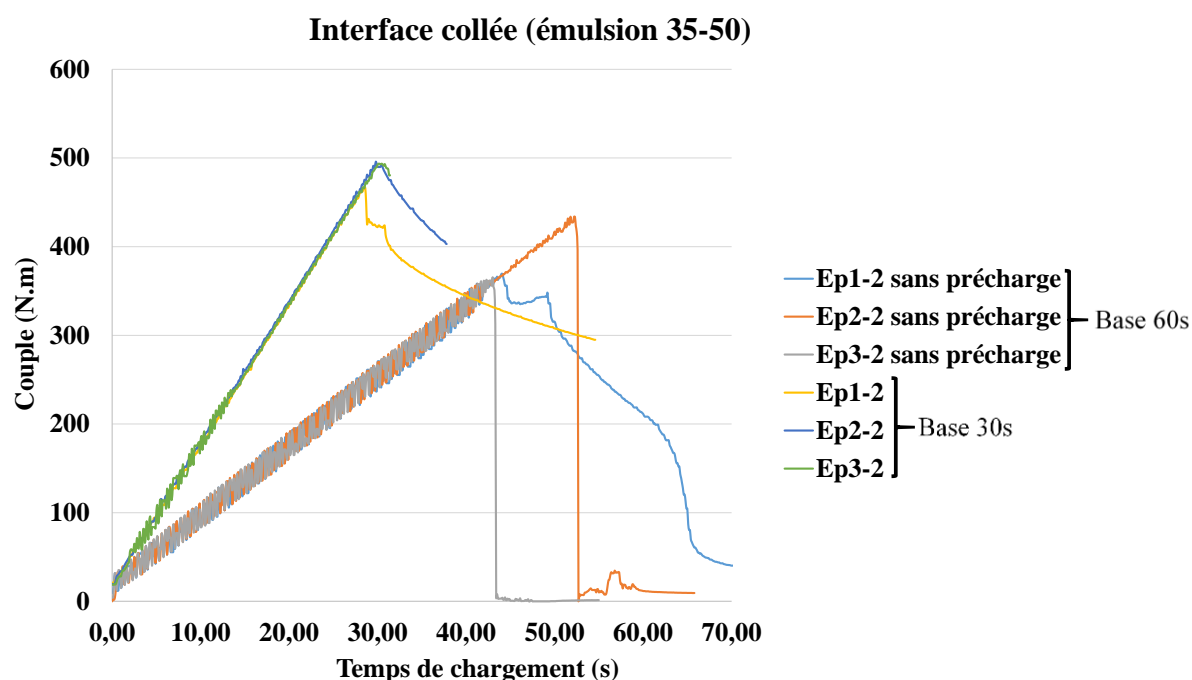
#### 4.1.4 Intérêt de la pré-charge

Le **graphique 2** représente le couple de torsion en fonction du temps de chargement pour des essais effectués avec et sans pré-charge pour une interface à l'émulsion 35-50.

Sans la pré-charge, des oscillations de régulation de l'effort apparaissent sur la rampe de montée. Ce phénomène n'apparaît pas avec une pré-charge même minimale (20 à 25 N.m).

L'intérêt de la pré-charge porte sur :

- La stabilité de l'essai
- Affranchir les glissements (casque/enrobé)
- Rattraper les jeux mécaniques



Graphique 2. Couple de torsion en fonction du temps de chargement pour une émulsion 35-50

Compte tenu de ces résultats, une pré-charge de 25N sera systématiquement appliquée.

#### 4.1.5 Résultats d'essais à 10°C pour une ECR60 au 160-220

Dans ces conditions d'essais et à 10 °C, on constate aucune rupture des éprouvettes.

Pour des vitesses de montée en charge de 10 et 30 secondes pour 500 N.m, les valeurs de couple maximum sont similaires.

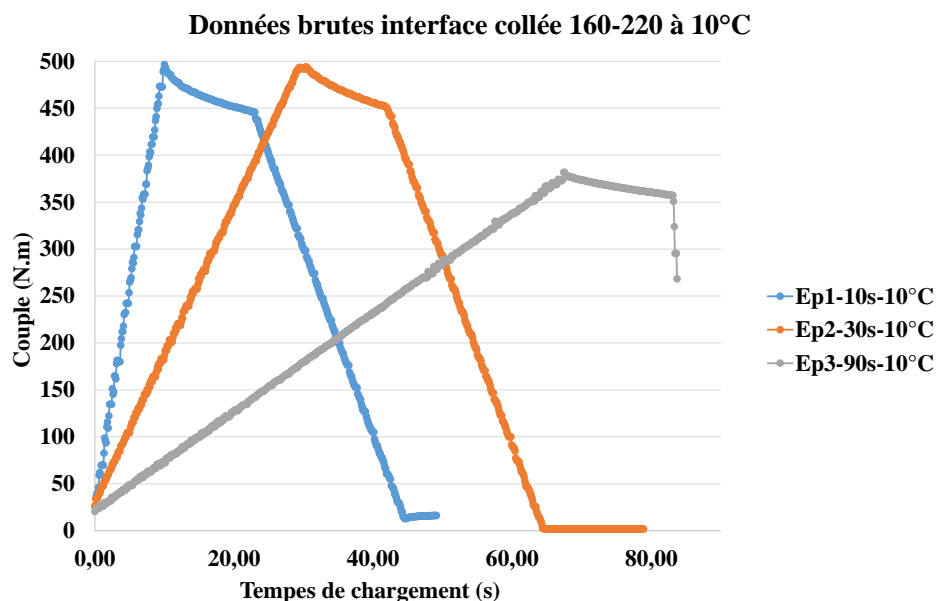
A la vitesse de 90 secondes pour 500 N.m, le couple maximum n'est pas atteint.

Emulsion	Ep	T (s)	C (Nm)	Dist max (mm)	Rotation (degré)	$\sigma_{TBT}$ (MPa)
160/220	1-10s	10,00	471,10	1,30	0,876	0,711
	2-30s	30,20	466,70	1,90	1,281	0,704
	3-90s	67,50	361,40	0,61	0,411	0,545

Tableau 2. Valeurs à la rupture à différents temps de chargement et pour une température de 10°C

Le **tableau 2** présente les valeurs à la rupture des essais effectués à différents temps de chargement (10, 30 et 90s) et pour une température d'essai de 10°C.

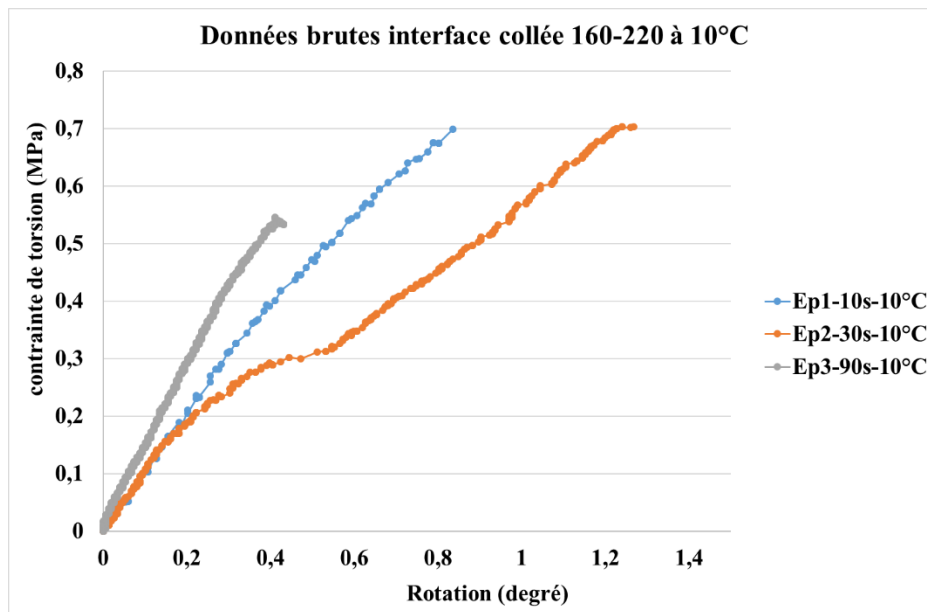
Le **graphique 3** représente les données brutes du couple en fonction du temps de chargement. A 10 °C, il n'y a pas rupture des éprouvettes, et il apparaît que, lors du maintien en charge maxi, un phénomène soit lié à l'appareil soit lié à l'éprouvette, conduit à croire à une « relaxe » de l'effort.



Graphique 3. Couple en fonction du temps de chargement à 10°C pour une émulsion 160-220

Une première analyse des résultats est menée à partir des courbes Contrainte en fonction de la rotation, la contrainte étant directement liée au couple appliqué.

Dans ces courbes, seules seront considérées les mesures faites jusqu'à la charge maxi représentatives du comportement de l'interface.



Graphique 4. Contrainte en fonction de l'angle à 10°C pour une émulsion 160-220

On constate sur le graphique 4 qu'un temps de montée en charge de 90s ne permet pas à la machine de fournir un résultat fiable (limite mécanique) : on n'atteint pas la contrainte de torsion maximale malgré une non rupture des éprouvettes.

#### 4.1.6 Résultats d'essais à 20°C pour une ECR60 au 160-220

A 20°C, il y a rupture à l'interface pour toutes les vitesses de chargement.

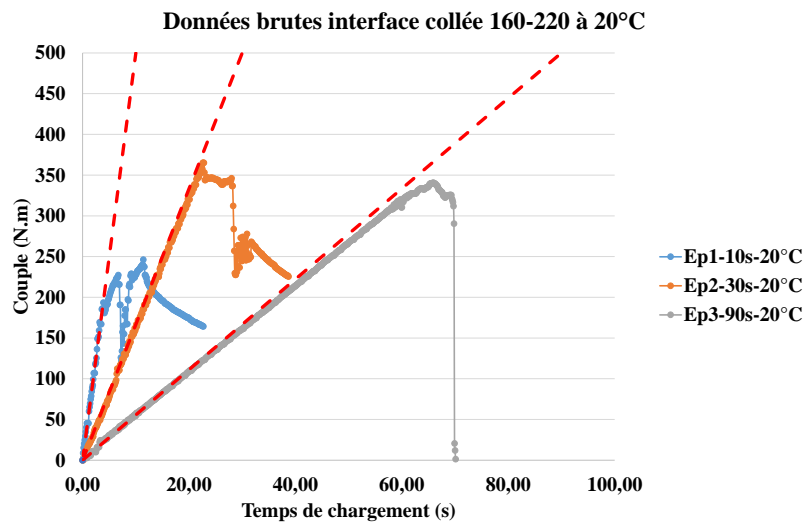
Les trois vitesses de chargement sont présentées sur le graphique 5. À 10 secondes de temps de chargement, on est encore en limite mécanique et on n'obtient pas les 550N.m exigé. Par ailleurs on constate un décrochement significatif sur la courbe par rapport à la consigne (en pointillé sur le graphe)

Emulsion	Ep	T (s)	C (Nm)	Dist max (mm)	Rotation (degré)	$\sigma_{TBT}$ (MPa)
160/220	1-10s	6,70	227,30	8,06	5,417	0,343
	2-30s	22,80	365,10	2,39	1,611	0,551
	3-90s	66,00	340,40	16,82	11,193	0,514

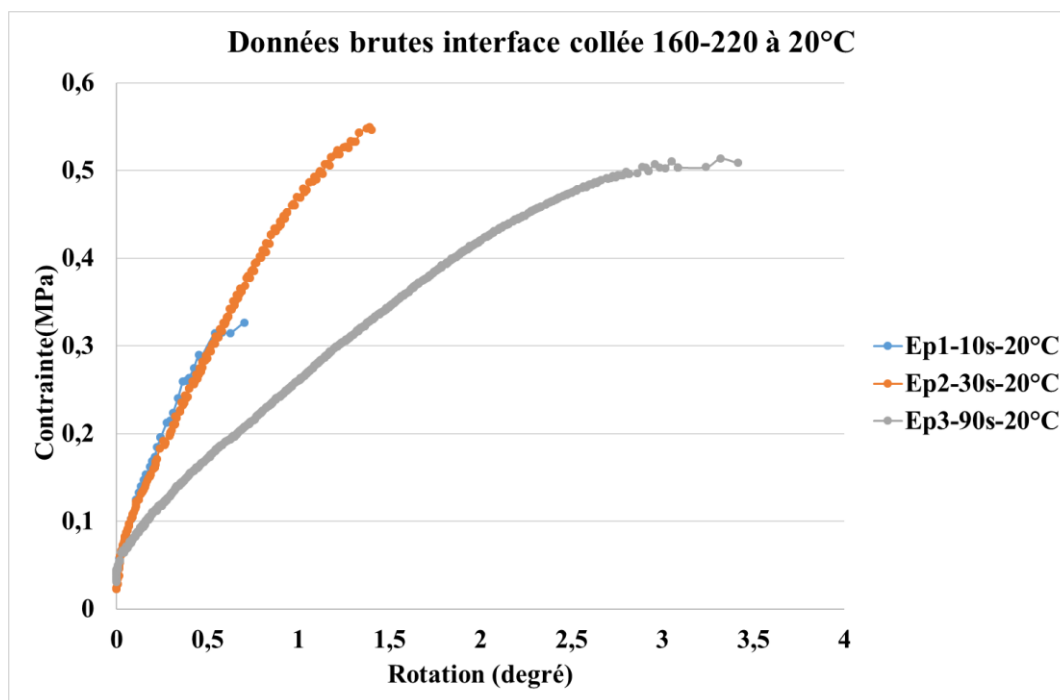
Tableau 3. Valeurs à la rupture des essais à différents temps de chargement et pour une température de 20°C

Le **tableau 3** présente les valeurs à la rupture des essais effectués à différents temps de chargement (10, 30 et 90s) et pour une température d'essai de 20°C.

Le **graphique 5** représente les données brutes du couple de torsion en fonction du temps de chargement sur des plaques collées pour une température de 20°C. Il y a rupture directe des éprouvettes testées à 30 et 90 secondes.



Graphique 5. Couple en fonction du temps de chargement à 20°C pour une émulsion 160-220



Graphique 6. Contrainte en fonction de la rotation à 20°C pour une émulsion 160-220

Les courbes à 10s et 30s présentent une raideur en torsion étonnamment très proche et supérieure à la raideur en torsion à 90s. Le niveau de contrainte maximum mesurée est quant à lui proche pour les temps de 30s et 90s alors qu'il est plus faible pour le temps de 10s. Ces résultats sont obtenus sur des essais unitaires et mériteraient des essais complémentaires pour confirmer les tendances observées et discuter des comportements des matériaux.



#### 4.1.7 Résultats d'essais à 30°C pour une ECR60 au 160-220

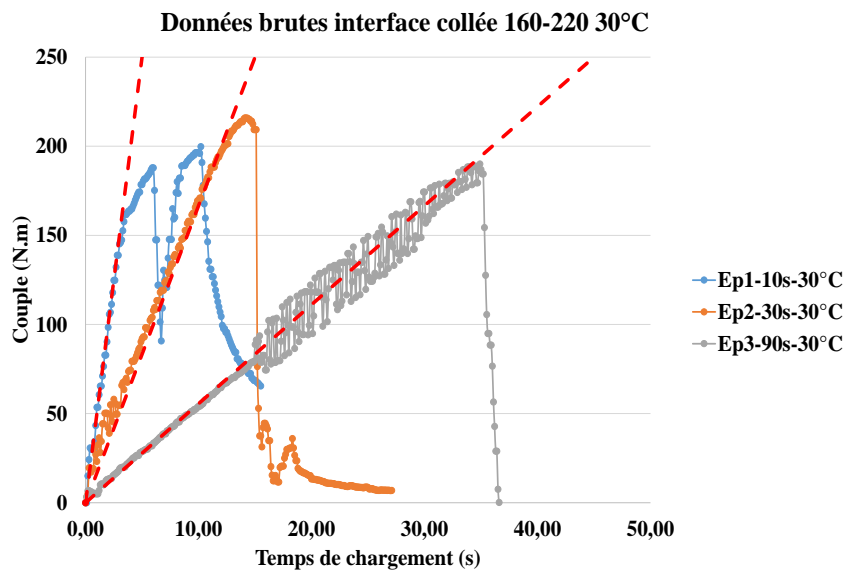
A 30°C, il y a rupture pour toutes les vitesses. On remarque néanmoins le même phénomène à 10 secondes que celui observé pour l'essai à la température de 20°C (décrochement de la montée théorique faisant penser à une rupture). On note par ailleurs toute une zone de montée en charge à la vitesse de 90 secondes présentant des effets parasites. (Graphique 7)

Emulsion	Ep	T (s)	C (Nm)	Dist max (mm)	Rotation (degré)	$\sigma_{TBT}$ (MPa)
160/220	1-10s	6	187,9	8,42	5,657	0,284
	2-30s	14,3	215,8	13,52	9,038	0,326
	3-90s	34,9	190	12,53	8,386	0,287

Tableau 4. Valeurs à la rupture des essais à différents temps de chargement et pour une température de 30°C

Le **tableau 4** présente les valeurs à la rupture des essais effectués à différents temps de chargement (10, 30 et 90s) et pour une température d'essai de 30°C.

Le **graphique 7** représente les données brutes du couple de torsion en fonction du temps de chargement sur plaques collées pour une température d'essai de 30°C. Même constatation que pour l'essai fait à 20°C sur la pente à 10 secondes de temps de charge, avec une rupture en 2 temps. On remarque également un phénomène d'oscillation sur la pente à 90 secondes (peut-être dû à la viscoélasticité du matériau plus sensible au-delà de 30 secondes d'essai à cette température).

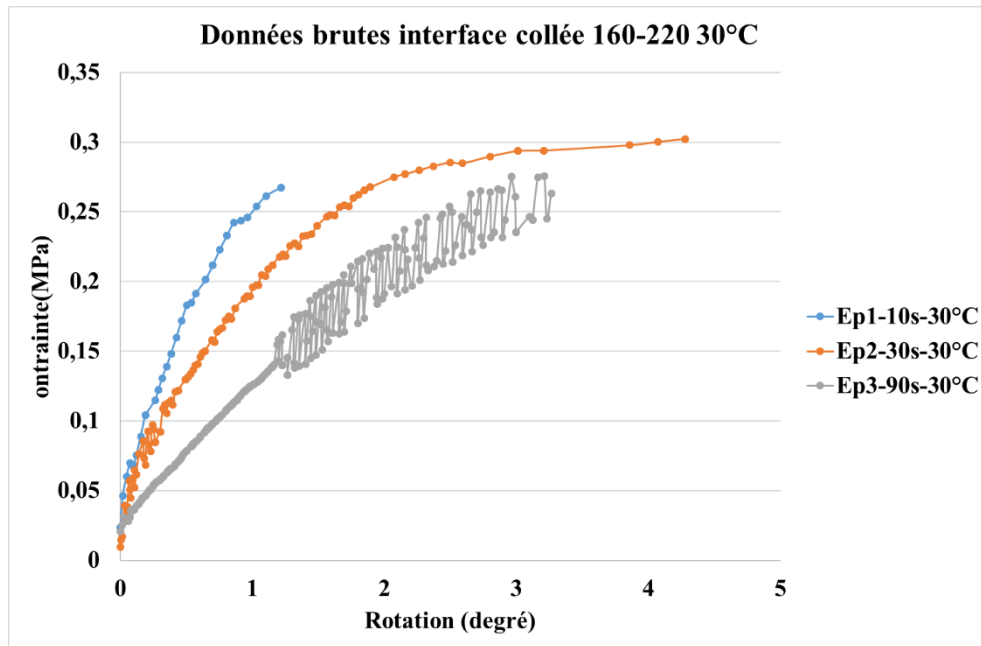


Graphique 7. Couple en fonction du temps de chargement à 30°C pour une émulsion 160-220

Le balayage des 3 vitesses a permis de mettre en évidence les limites mécaniques de l'appareil.

Même si l'optimum n'a pas été mesuré, compte tenu de nos essais préliminaires, une valeur de 30 secondes est retenue pour la suite de l'expérimentation.

La poursuite de l'étude se fera donc à la force de torsion de 500 N.m avec un temps de montée en charge de 30 secondes.



Graphique 8. Contrainte en fonction de la rotation à 30°C pour une émulsion 160-220

Les courbes présentent des raideurs en torsion décroissante avec la vitesse de sollicitation ce qui est un comportement attendu. Le niveau de contrainte maximum mesuré ne permet pas de distinguer les différentes conditions d'essai. Un signal très bruité est observé pour la courbe à 90s. L'origine de ce bruit reste à identifier.

## 4.2 Résultats d'essais dans les conditions définies

Les conditions d'essais retenues sont donc :

- Une pré charge de 25s
- Une montée en charge de 500N.m en 30s
- 

Pour les trois types d'émulsions, il n'y a pas eu de rupture à la température d'essai de 10°C. Aux températures de 20°C et 30°C, il y a rupture à l'interface.

Pour ne pas surcharger les graphiques, ce sont les valeurs moyennes qui sont présentées (intégralité des valeurs en [Annexe 3](#))

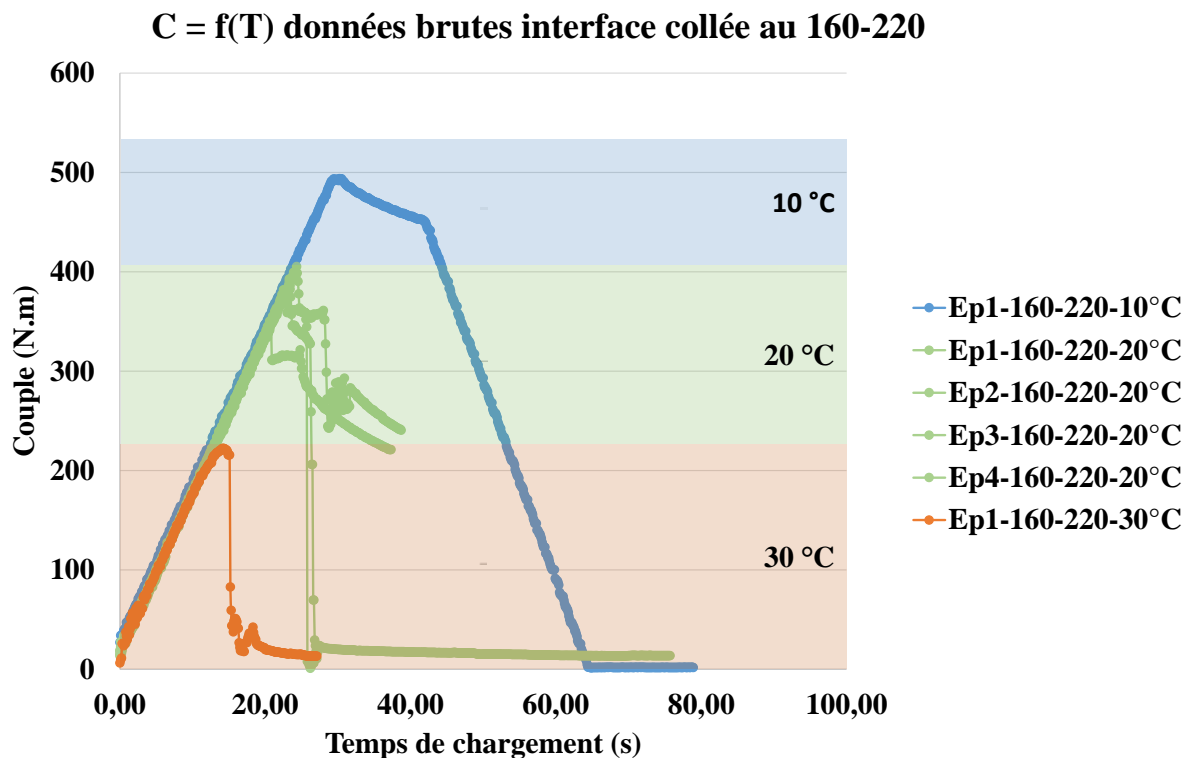
#### 4.2.1 Pour une ECR60 au 160-220

Emulsion	Temp (°C)	Ep	Temps de chargement (s)	Couple (Nm)	Dist max (mm)	Angle de Rotation (Radian)	$\tau_{TBT}$ (MPa)	Moyenne Couple (N.m)	Ecartype Couple (N.m)	Moyenne angle de rotation (degré)	Ecartype angle de rotation (s)
160/220	20	1	23,300	392,800	3,970	2,674	0,593	381,275	25,242	2,243	0,685
		2	20,800	346,700	2,540	1,712	0,523				
		3	24,300	405,400	4,420	2,977	0,612				
		4	22,800	380,200	2,390	1,611	0,574				
	30	1	14,100	222,300	13,180	8,814	0,336				

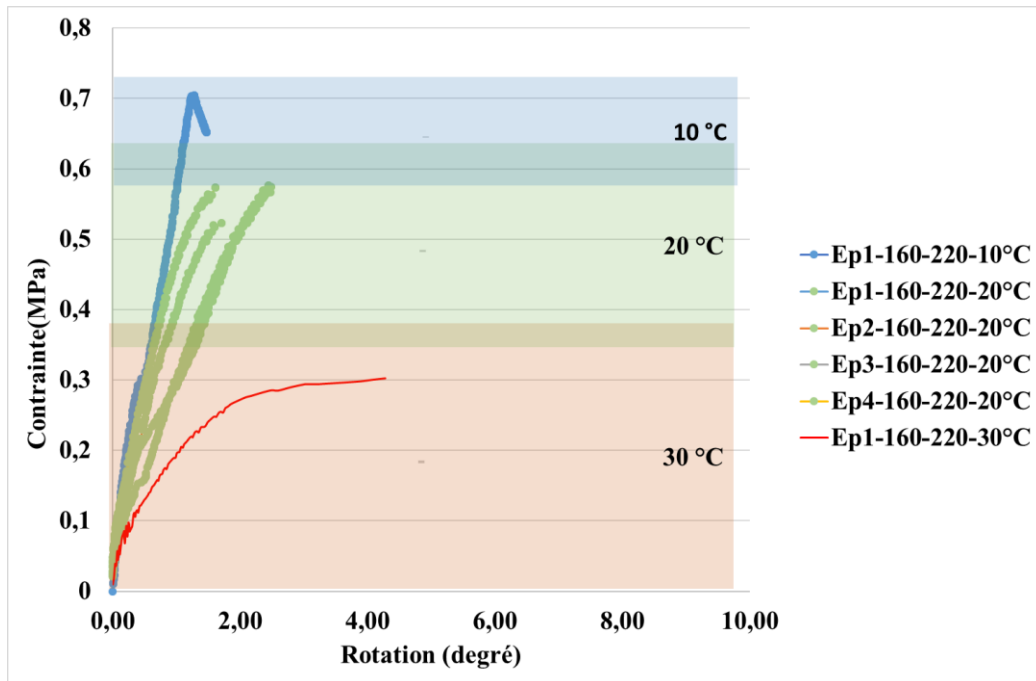
Tableau 5. Valeurs à rupture à différentes températures et à temps de chargement de 30s pour une ECR60 au 160-220

Le tableau 5 regroupe les différentes valeurs des essais effectués pour un type d'émulsion ECR60 au 160-220 pour un chargement de 500 N.m et un temps de monté en charge de 30s. Une éprouvette a été testée à 10 et 30 °C.

Le graphique 7 représente le couple en fonction du temps de chargement pour une ECR60 au 160-220 à 30s et pour différentes températures (10, 20 et 30 °C). Des niveaux de résistances par gamme de température semblent se dessiner.



Graphique 9. Couple en fonction du temps de chargement pour une ECR60 160-220 aux températures de 10, 20 et 30 °C



Graphique 10 : Evolution de la contrainte en fonction de la rotation à 10, 20 et 30°C pour une émulsion 160-220

On note sur le graphique 10, 3 zones de contraintes max ou de rupture variant en fonction de la température. Il faut remarquer que pour 10°C la contrainte ne correspond pas à une rupture.

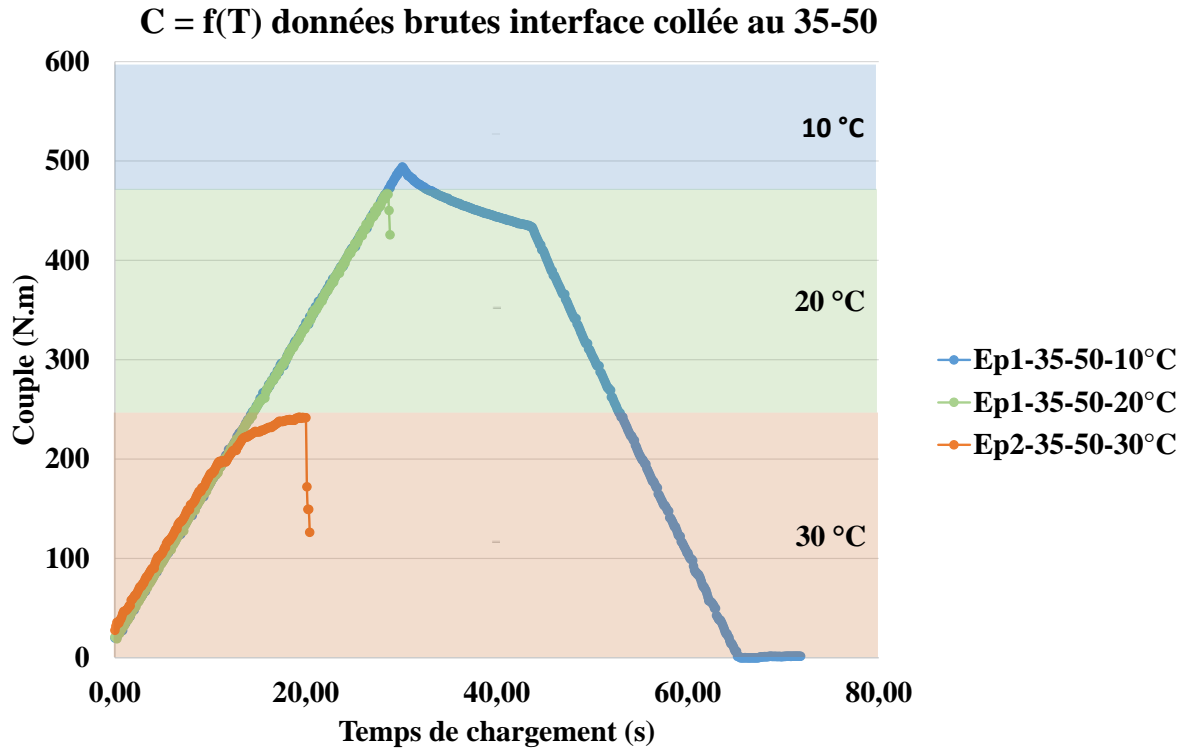
#### 4.2.2 Pour une ECR60 au 35-50

Emulsion	Temp (°C)	Ep	Temps de chargement (s)	Couple (Nm)	Dist max (mm)	Angle de Rotation (Radian)	$\tau_{TBT}$ (MPa)	Moyenne Couple (N.m)	Ecartype Couple (N.m)	Moyenne angle de rotation (degré)	Ecartype angle de rotation (s)
35/50	20	1	28,500	467,200	3,300	2,223	0,705	424,800	98,280	1,844	0,330
		2	29,800	495,900	2,870	1,934	0,749				
		3	30,200	493,500	2,740	1,846	0,745				
		4	14,800	248,000	2,030	1,368	0,374				
		5	28,400	474,300	3,170	2,136	0,716				
		6	22,100	369,900	2,310	1,557	0,558				
	30	1	8,400	156,800	13,670	9,136	0,237	180,633	21,297	4,501	4,028
		2	11,000	197,800	3,730	2,513	0,299				
		3	10,800	187,300	2,750	1,853	0,283				

Tableau 6. Valeurs à rupture à différentes températures et à un temps de chargement de 30s pour une ECR60 au 35-50

Le **tableau 6** représente les différentes valeurs d'essais pour une ECR60 au bitume 35-50 a différentes températures.

Le **graphique 11** représente la moyenne des valeurs du couple en fonction du temps de chargement pour une émulsion au bitume pur 35-50 avec un temps de chargement de 30s et à différentes températures. Même constatation que pour l'émulsion au 160-220, des niveaux de performances par température se dessinent.



Graphique 11. Couple en fonction du temps de chargement pour une ECR60 au bitume 35-50 à différentes températures

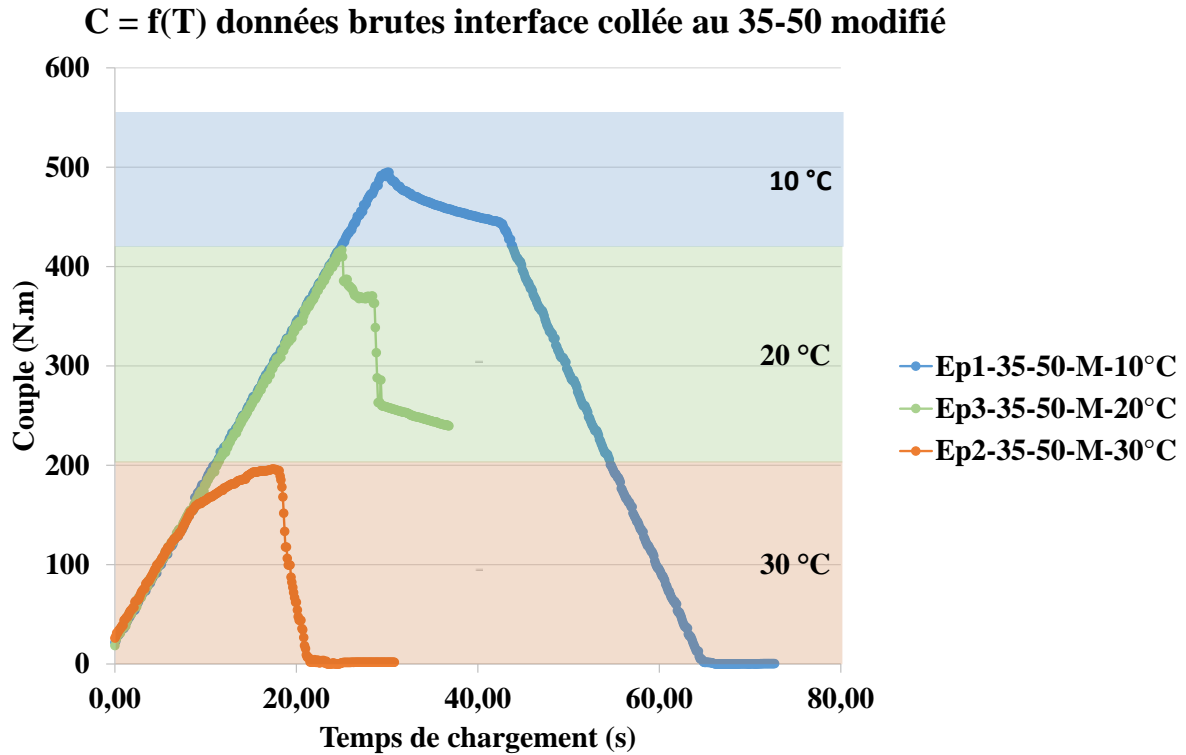
#### 4.2.3 Pour une ECR au 35-50 modifié

Emulsion	Temp (°C)	Ep	Temps de chargement (s)	Couple (Nm)	Dist max (mm)	Angle de Rotation (Radian)	$\tau_{TBT}$ (MPa)	Moyenne Couple (N.m)	Ecartype Couple (N.m)	Moyenne angle de rotation (degré)	Ecartype angle de rotation (s)
35/50 modifié	20	1	20,700	353,300	2,320	1,563	0,533	424,483	49,147	2,267	0,842
		2	30,000	491,900	2,590	1,745	0,743				
		3	25,000	416,700	2,980	2,008	0,629				
		4	22,900	394,000	2,750	1,853	0,595				
		5	27,800	462,700	3,870	2,607	0,699				
		6	25,500	428,300	5,680	3,823	0,647				
	30	1	18,100	139,900	15,880	10,582	0,211	168,000	39,739	10,677	0,133
		2	17,400	196,100	16,170	10,771	0,296				

Tableau 7. Valeurs à rupture à différentes températures et à un temps de chargement de 30s pour une ECR60 au 35-50 modifié

Le **tableau 7** indique les résultats d'essais obtenus à différentes températures pour une émulsion au bitume modifié.

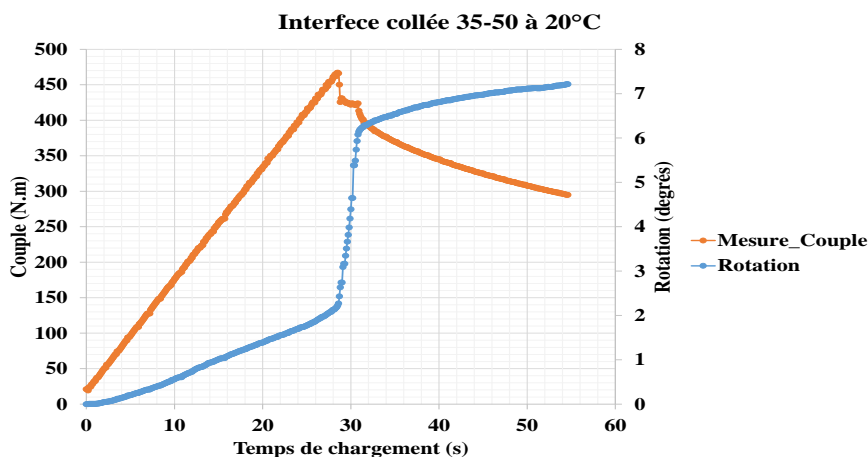
Dans le **graphique 12** est représentée la moyenne du couple en fonction du temps de chargement pour une émulsion au bitume modifié (500N.m en 30 secondes). Mêmes constatations, des niveaux de résistance par gamme de température se dessinent.



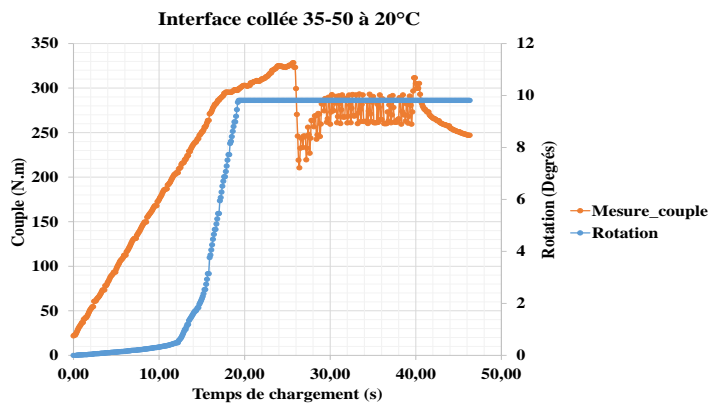
Graphique 12. Couple en fonction du temps de chargement pour un bitume modifié à différentes températures

#### 4.2.4 Vérification glissement du casque

Afin de contrôler d'éventuels glissements du casque il est nécessaire de le vérifier en exploitant les données de déplacements angulaires comme montré sur les graphiques suivants :



Graphique 13. Couple et rotation en fonction du temps de chargement pour une ECR60 au 35-50 à 20°C (avec glissement du casque)



Graphique 14. Couple et rotation en fonction du temps de chargement pour une ECR60 au 35-50 à 20°C (avec glissement du casque)

Les **graphiques 13 et 14** représentent le couple et la rotation en fonction du temps de chargement pour une émulsion au bitume pur et à une température de 20°C. Il est constaté que quand il y a glissement du casque (graph 14) la courbe de la rotation en fonction du temps de chargement ne suit plus celle du couple, comme montré sur le graphique 13.

#### 4.2.5 Bilan des résultats d'essais

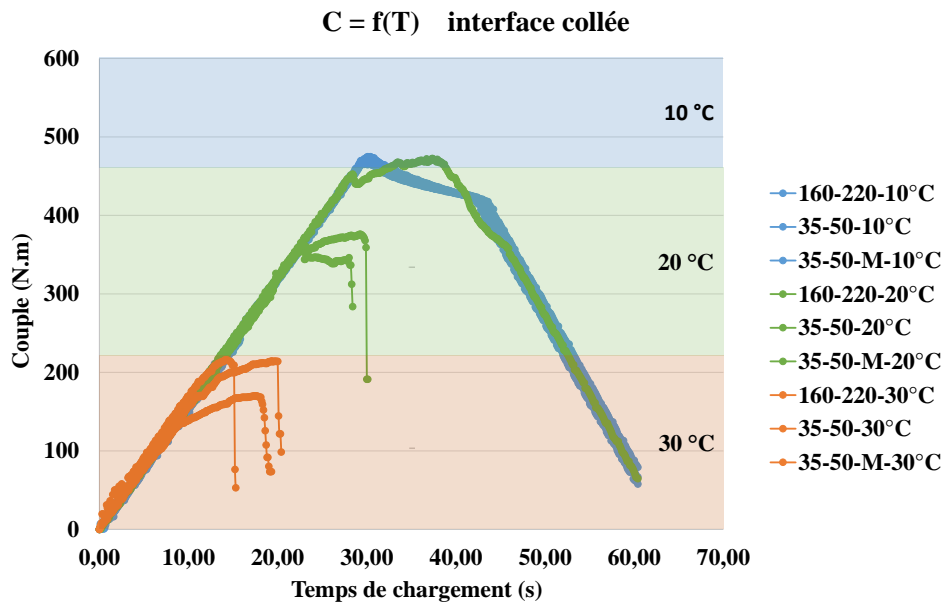
L'analyse des résultats (graphique 15) sous la forme **couple de torsion / temps de chargement** ne permet pas de distinguer les différentes émulsions, et ne donne pas toutes les informations nécessaires aux traitements des données.

Les essais à la température de 10°C n'ayant pas atteint la rupture avant la capacité maximale du capteur de couple, on n'obtient pas un seuil de rupture mais une valeur de contrainte minimale.

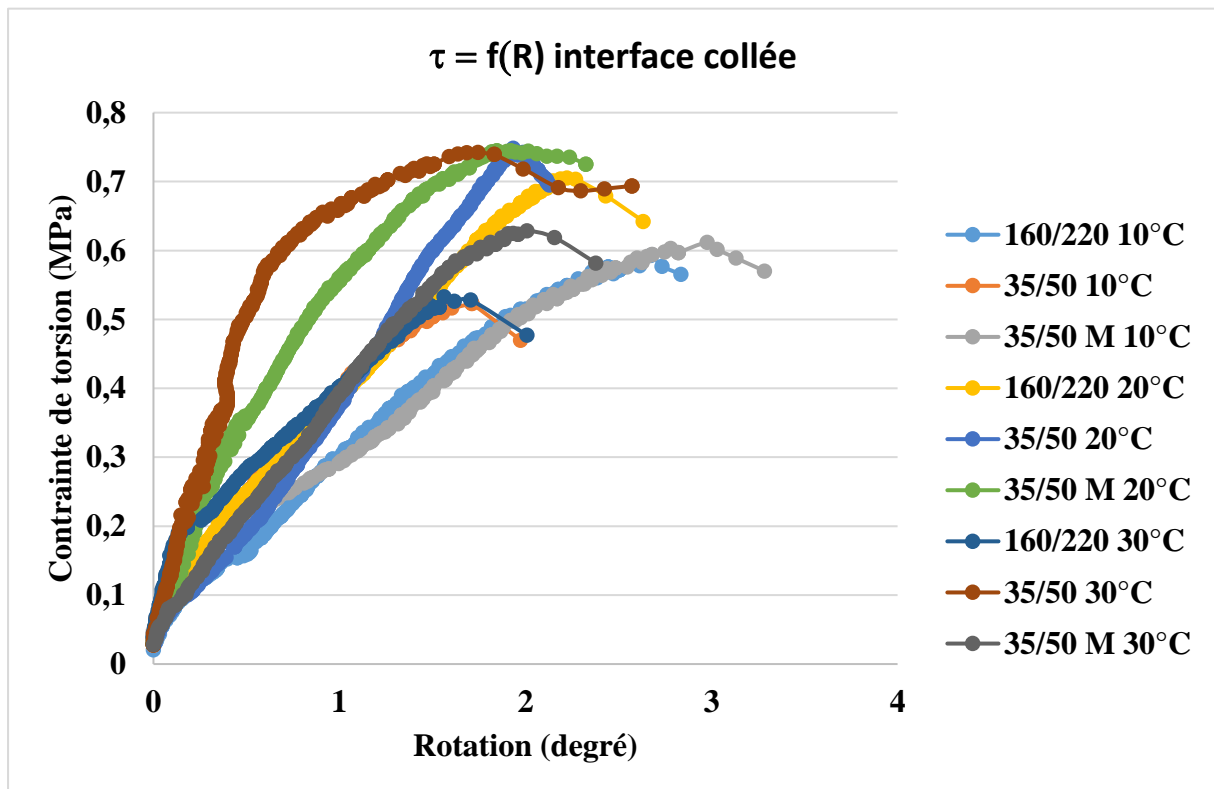
A 20°C et 30°C pour les 3 types d'émulsions, des niveaux de performances apparaissent par gamme de température.

Une analyse plus poussée des résultats sera menée dans la tranche 3 du projet.

Pour mieux appréhender les résultats fournis par l'appareil (couple, temps, angle de rotation), il conviendra peut-être de les exploiter sous différentes formes (contrainte de torsion, distorsion et module de cisaillement).



Graphique 15. Couple en fonction du temps de chargement pour les trois types d'émulsions et à différentes températures



Graphique 16. Contrainte en fonction de la rotation pour les trois types d'émulsions et à différentes températures



## 5 Expérimentation sur chantier

Le chantier s'est déroulé en deux parties :

- ▶ La mise en œuvre, avec la visite de la centrale d'enrobage et l'application des deux couches d'enrobés
- ▶ Les essais effectués avec le prototype de mesure (à J + 1 semaine).

Le chantier est un giratoire composé par une double couche d'OPTIBASE d'une épaisseur de 18 cm (9 cm chacune), collée avec de l'émulsion dosé à 400g/m<sup>2</sup> de bitume résiduel.

Les photos prises à la fabrication, à la mise en œuvre et au cours des essais effectués sont présentées en [annexe 4](#)

### 5.1 Résultats chantier

Un carottier de chantier a été utilisé pour faire les empreintes de carottage **figure 19**. Les essais ont été effectués aux conditions de température ambiante de 26°C et une température au niveau de l'interface de ~30°C. Les mêmes conditions de chargement que pour les essais en laboratoire ont été appliquées, un couple de 500 N.m avec un temps de montée en charge de 30s et une pré-charge de 25 N.m. cinq éprouvettes ont été testées.

Les carottages en extérieur ont été réalisés avec le même outil que pour le laboratoire (couronne standard Ø151mm). Cette fois l'appareil est une carotteuse mobile hydraulique :



Figure 17. Carottier de chantier

La difficulté réside en la détermination de la profondeur du carottage pour se situer autour de l'interface dans les mêmes conditions qu'en laboratoire (-2 cm sous l'interface). Un carottage pour sonder les épaisseurs peut être nécessaire en amont ou alors le premier essai doit aller jusqu'à la rupture pour vérifier les hauteurs.



Figure 20. Casque de préhension



Figure 21 et 22. Positionnement casque

La préhension est réalisée par l'intermédiaire d'une mâchoire (appelée casque, cf. figure 20) qui permet un serrage sur l'intérieur de l'empreinte de carottage. Le système s'insère dans l'empreinte laissée par le carottier. Il est positionné à la hauteur voulue par l'intermédiaire de cales d'épaisseur.

La zone où est appliqué le serrage est constituée du même acier. Pour une meilleure prise, la zone en contact avec l'enrobé a été rendu plus grenu par des rainures, griffures et points de

soudures. Le serrage est appliqué par des écrous sur tiges filetées au couple de 10 Nm à la clé dynamométrique.

Malgré cela, des phénomènes de glissements sont observés pendant les phases de tests, et même en augmentant la pression de serrage au maximum « de la force humaine », les glissements persistent.

Pour y remédier, du papier de verre type papier à poncer a été collé sur la zone de contact du casque. Cette technique a permis de limiter fortement les glissements, plus par la surépaisseur amenée par le papier que par son grain. En effet, le casque semble ne pas avoir assez de débattement pour avoir un serrage suffisamment efficace. Cette méthode s'est avérée concluante faute de mieux. En laboratoire, sur éprouvettes sèches, cela ne pose aucun problème et les tests peuvent être nombreux avant de penser au remplacement du papier. Par contre sur chantier, avec l'eau lié au carottage, le papier se délite après seulement 1 ou 2 utilisations. Cette solution n'est donc pas viable pour les essais sur site.

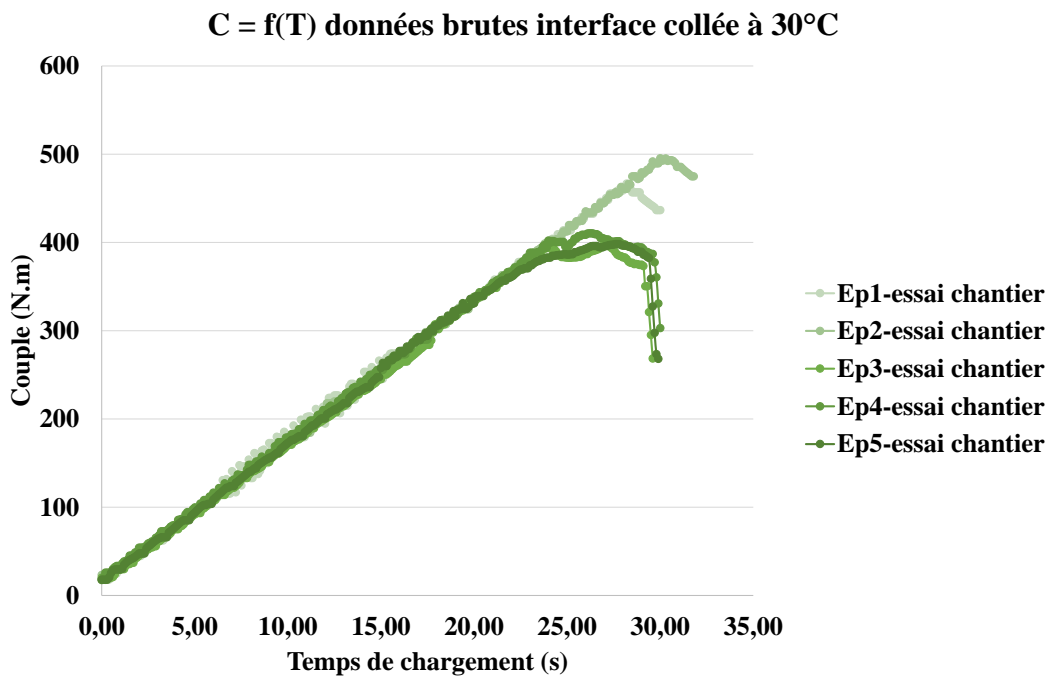


Figure 23 & 24. Casque après essai et empreinte après carottage

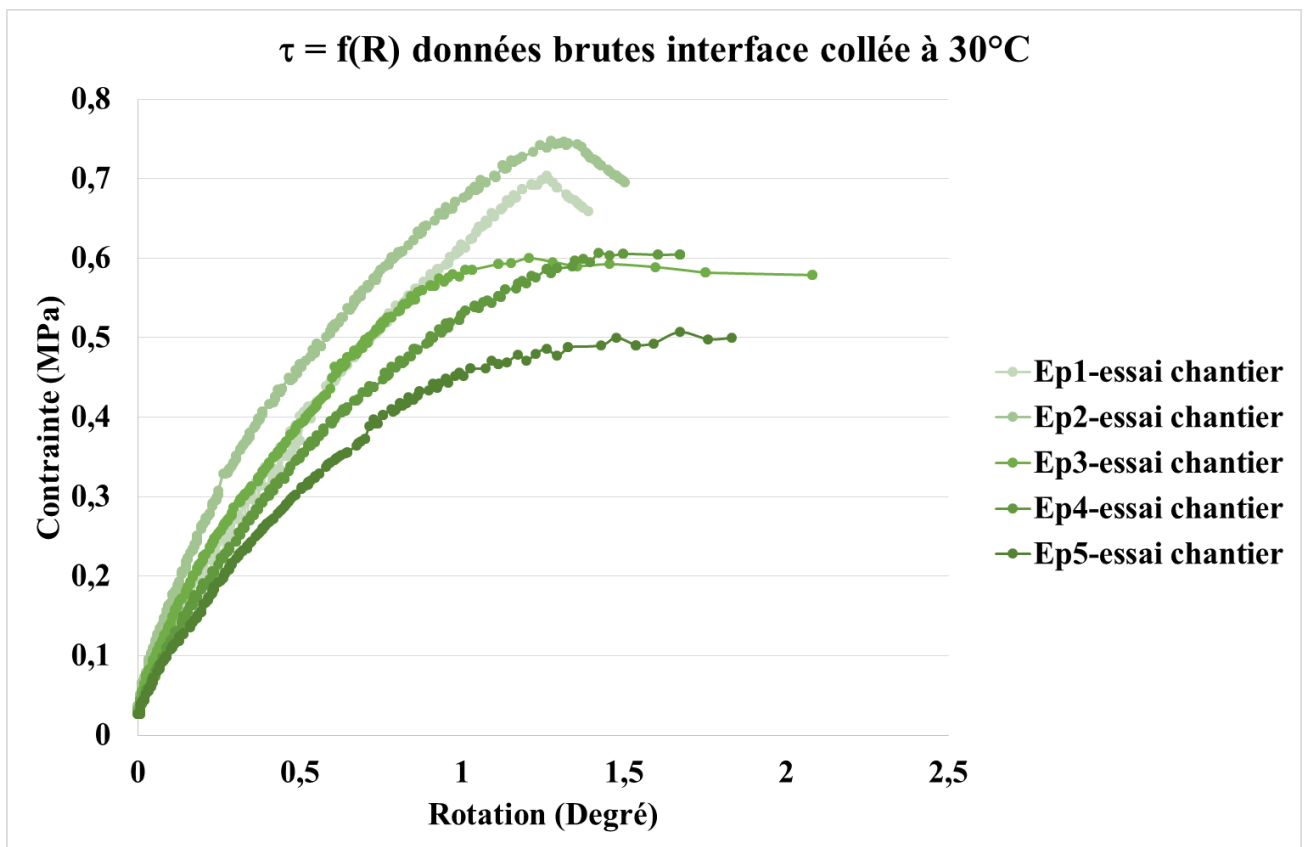
Dans ces conditions d'essais et avec une moyenne de température à l'interface de 30 °C, il n'y a pas eu de rupture des éprouvettes sauf pour une seule qui a rompu avec une valeur de couple maximal de 398 N.m et un angle de rotation à la rupture de 9,2°.

Emulsion	Temp (°C)	Ep	Temps de chargement (s)	Couple (Nm)	Dist max (mm)	Angle de Rotation (Degré)	$\tau_{TBT}$ (MPa)	Moyenne Couple (N.m)	Ecartype Couple (N.m)	Moyenne angle de rotation (degré)	Ecartype angle de rotation (s)
Chantier	30	1	23,300	466,7	1,870	1,26	0,70	418,240	64,462	1,448	0,282
		2	30,000	495,3	1,890	1,27	0,75				
		3	24,000	397,5	1,790	1,21	0,60				
		4	24,800	400,6	2,480	1,67	0,60				
		5	20,000	331,1	2,720	1,83	0,50				

Tableau 8. Valeurs à rupture mesures in-situ (chantier de Brétigny sur Orge)



Graphique 16. Couple en fonction du temps de chargement à une température de 30°C (essais sur chantier)



Graphique 17. Contrainte en fonction de la rotation à une température de 30°C (essais sur chantier)

## 5.2 Bilan

Les essais sur chantier ont été satisfaisants du fait que le prototype est facile à manipulé et à mettre en place mais on note toutefois quelques améliorations à faire notamment sur :

- ▶ La préhension des éprouvettes. Lors du carottage l'empreinte est remplie d'eau, cela ramollit le papier adhésif du casque (**figure 24**) provoquant ainsi des glissements casque/enrobé.
- ▶ La visibilité de l'écran de l'ordinateur, réduite en extérieur.



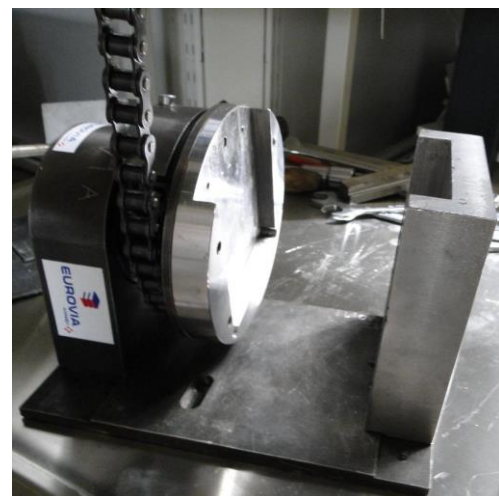
## 6 Comparaison des résultats d'essais à la littérature

Prototype DVDC



- ▶ Diamètre éprouvette 150 mm
- ▶ Valeur de couple N.m

Prototype Eurovia



- ▶ Diamètre éprouvette 100 mm
- ▶ Effort de traction kN

- ▶ Vitesse de rampe 500 N.m en 30s
- ▶ Valeur moyenne de la contrainte de torsion égale à 0.70 MPa à 20°C
- ▶ Vitesse 90°/min
- ▶ Valeur moyenne de la contrainte de torsion égale à 3,39 MPa à 20°C

Une comparaison est faite avec les résultats obtenus lors des études précédentes (Stage ESTP/ENSAM/USIRF) sur le même complexe enrobé avec le dispositif développé par Eurovia en laboratoire.

Une différence au niveau de la contrainte de torsion est constatée ; cette différence s'explique notamment par la différence de vitesse de sollicitation, plus élevée avec le dispositif Eurovia en laboratoire (90° en 60s, conforme au projet de norme en vigueur [3]). Ceci confirme l'importance de bien définir les conditions d'essais avant toute proposition de seuil.

## 7 Conclusion générale

Au terme de ce projet, l'objectif fixé en début de rapport a été atteint, à savoir l'évaluation du dispositif de mesure de collage des couches d'enrobé en laboratoire et sur site.

Le choix d'une approche s'appuyant sur un essai destructif a été sélectionné dans un premier temps pour pouvoir situer des valeurs de seuil de résistance des interfaces et être par la suite non destructif.

Le prototype n'avait jamais été utilisé auparavant et cette version est une première version, qui est déjà très aboutie. Un travail important a pu être mené correctement en laboratoire et sur chantier.

Des conditions d'essais sont proposées (tel que par exemple le temps de montée en charge ...).

Le dispositif par son approche et son fonctionnement particulier est un essai à part entière, de par son pilotage en couple (moment de torsion en N.m), sa vitesse qui correspond à des N.m/seconde, différente de celle donnée par la norme (180°/min) et enfin de par le diamètre des éprouvettes de  $\varnothing 150$  mm.

Après utilisation du prototype et dans diverses situations, il apparaît que le principe du dispositif proposée est tout à fait intéressant et est validé mais que par ailleurs certains points sont à améliorer dans une prochaine version :

Différentes actions ont été identifiées et sont présentées dans le projet de cahier des charges version V2 ci-dessous:

	FONCTIONS	CRITERES	NIVEAUX
FC 1	Etre autonome en énergie	Temps de charge	8 heures max
		Autonomie en travail	4 heures mini
		Energie de charge	220 V
		Travail sur secteur et recharge	En même temps
FC 2	Résiste à la pluie au soleil	Norme étanchéité	Protection pluie
		Ecran lisible pas grande luminosité	Protection solaire
FC 3	Visibilité sur site	Prototype	Bandes réfléchissantes
		Casque sur chaussée	Peinture voyante
		Ensemble en travail	Gyrophare
FC 4	Force appliquée	Mesurer une rupture dans les températures < 10°C	1000 N.m
FC 5	Informatique	Fourni avec le prototype	Prêt à l'emploi
		Récupération des données	USB
FC 6	Essai	Acquisitions/enregistrements données	Au démarrage de l'essai
		Température	Associé au démarrage de l'essai
FC 7	Préhension des éprouvettes	Amplitude de serrage	± 5 mm
		Adhérence	tient à 1000 N.m
		Hauteur de serrage	Réglable facilement

Enfin, l'avenir de l'appareil et de l'essai dépendra de la volonté de la profession, à se donner les moyens de contrôler et quantifier par des valeurs le collage des couches d'accrochages. Il faudra pour ce faire avoir recours à une compagnie de mesures sur différents supports et à différents âges, ce qui permettra par la suite d'avoir suffisamment de données et de pouvoir déterminer des seuils d'acceptabilités.

## 8 Perspectives

Le travail effectué durant cette tranche a permis la validation du dispositif et la détermination de certaines pistes d'amélioration du prototype.

Toutefois, il reste encore quelques pistes à explorer et développer pour comprendre parfaitement tous les facteurs influents :

- ▶ Développer les méthodes de semi-collage en laboratoire
- ▶ Calcul théorique de la répartition des contraintes au niveau de l'interface voire la modélisation de l'interface
- ▶ Modification du prototype avec une phase expérimentale sur chantiers
- ▶ Maîtrise de la prise de température d'essais

Les priorités seront définies dans la prochaine phase de travail.

## 9 Références bibliographiques

---

- [1] Dony Anne / KOUTIRI Imade (ESTP/ENSAM) ; Godard Eric (Colas pour l'USIRF) ; Pouteau Bertrand (Eurovia) ; Millien Anne (GEMH-GCD) ; Ollier Stéphane (Pérennise Chaussées), Vers une caractérisation performantielle in situ des interfaces des couches de surface- Etat de l'art, livrable DVDC R/014 ; Juillet 2018
- [2] Diakhate M. (2007). Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée. *Thèse Univ. de Limoges.*
- [3] prEN 12697-48, Bituminous mixtures — Test methods — Part 48: Interlayer Bonding, version de 2015
- [4] Destree Alexandra, Field study to evaluate different pre-normative interlayer adhesion tests, Eurobitume&Eurasphalt Prague, 2016
- [5] DLC - Direction du laboratoire des chaussées, 2005. Mesure de la force de liaison entre deux couches d'enrobé, Bulletin d'information technique (No. 7)



## 10 Annexes

### 10.1 Annexe 1 : fabrication des plaques d'enrobé

On fabrique des plaques de 40x60x6 cm. Les plaques sont composées de trois couches différentes. Tout en bas, on a la couche support en grave bitume (GB). Ensuite, on met la couche d'accrochage d'émulsion bitumineuse et finalement vient la couche de roulement de Béton Bitumineux Semi-Grenu (BBSG).

Les plaques sont fabriquées en suivant plusieurs étapes qui respectent les normes françaises en vigueur. La première étape (**figure 25**) consiste à sécher les granulats à 110°C. Une fois les granulats sécher, les pesées puis les remettre à chauffer à 160°C pendant 8h. Il faut également faire chauffer le bitume à 160°C pendant 4h ou plus selon la taille du pot. La deuxième étape est le malaxage des granulats, une fois les bonnes proportions des granulats mises dans le malaxeur qui est chauffé à 160°C, on réalise un malaxage à sec des granulats pendant 30 secondes, puis la bonne quantité du bitume est ajoutée au mélange. Le deuxième malaxage est lancé pendant 150 secondes (**figure 26**). La dernière étape de la fabrication est le compactage sur 6 cm de l'enrobé (**figure 27**). Le compactage est réalisé avec un compacteur LCPC.



Figure 5 : enceinte climatique  
des corps d'épreuve



Figure 26 : malaxeur



Figure 27 : compacteur de plaque  
LCPC

- 1) D'abord la couche inférieure d'enrobé est fabriquée : couche support en grave bitume de 6 cm d'épaisseur. La couche est compactée ensuite à l'aide du compacteur LCPC.
- 2) Lorsque la plaque support est fabriquée, il y a un temps d'attente de 2 heures avant d'appliquer dessus la quantité définie d'émulsion. On laisse ensuite reposer pendant 30 minutes le temps de fabriquer la deuxième couche.
- 3) Puis la plaque supérieure est fabriquée : couche de roulement de 6 cm d'épaisseur et compacter de la même manière que la couche inférieure avec le compacteur LCPC. On laisse reposer une nuit.
- 4) Le lendemain, on vient faire un carottage à l'aide du carottier de laboratoire (3 empreinte de carottage par plaque).
- 5) Enfin, les plaques sont conditionnées dans une enceinte climatique à la température choisie (10, 20 et 30°C) pour pouvoir faire les essais par la suite.

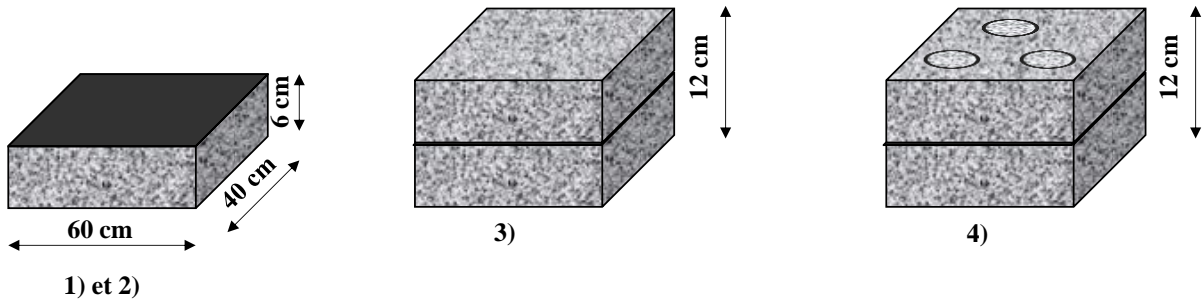
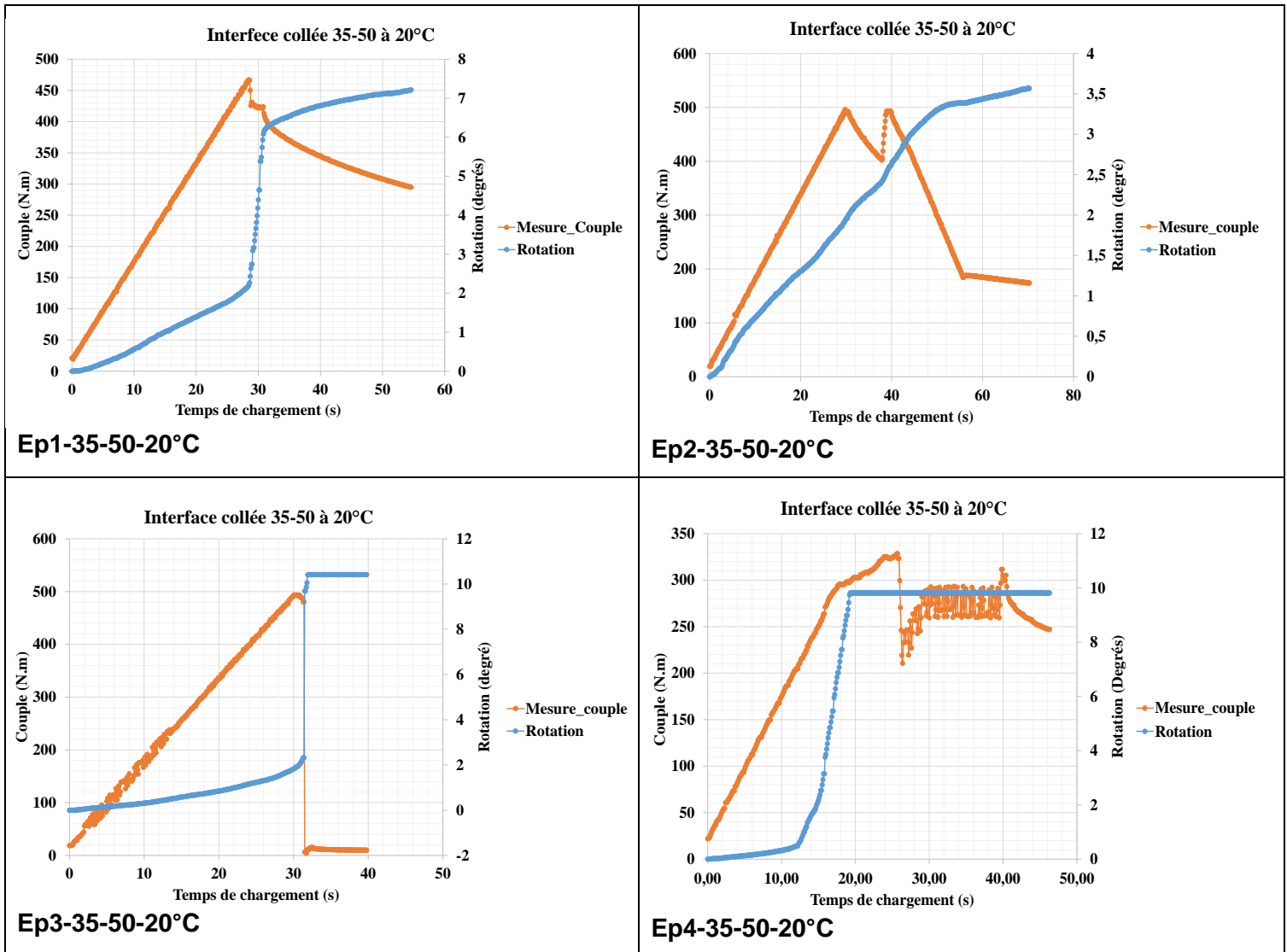
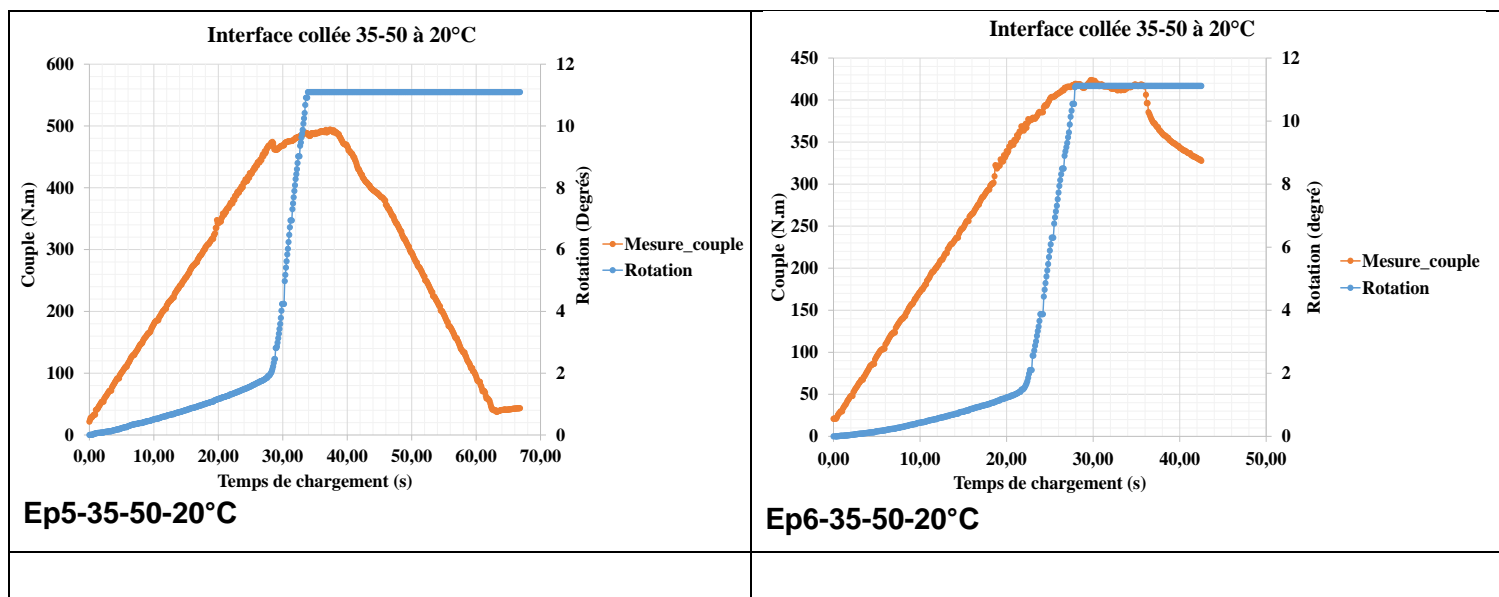


Figure 188 : fabrication des corps d'épreuve

### 10.3 Annexe 3 : graphes essais laboratoire

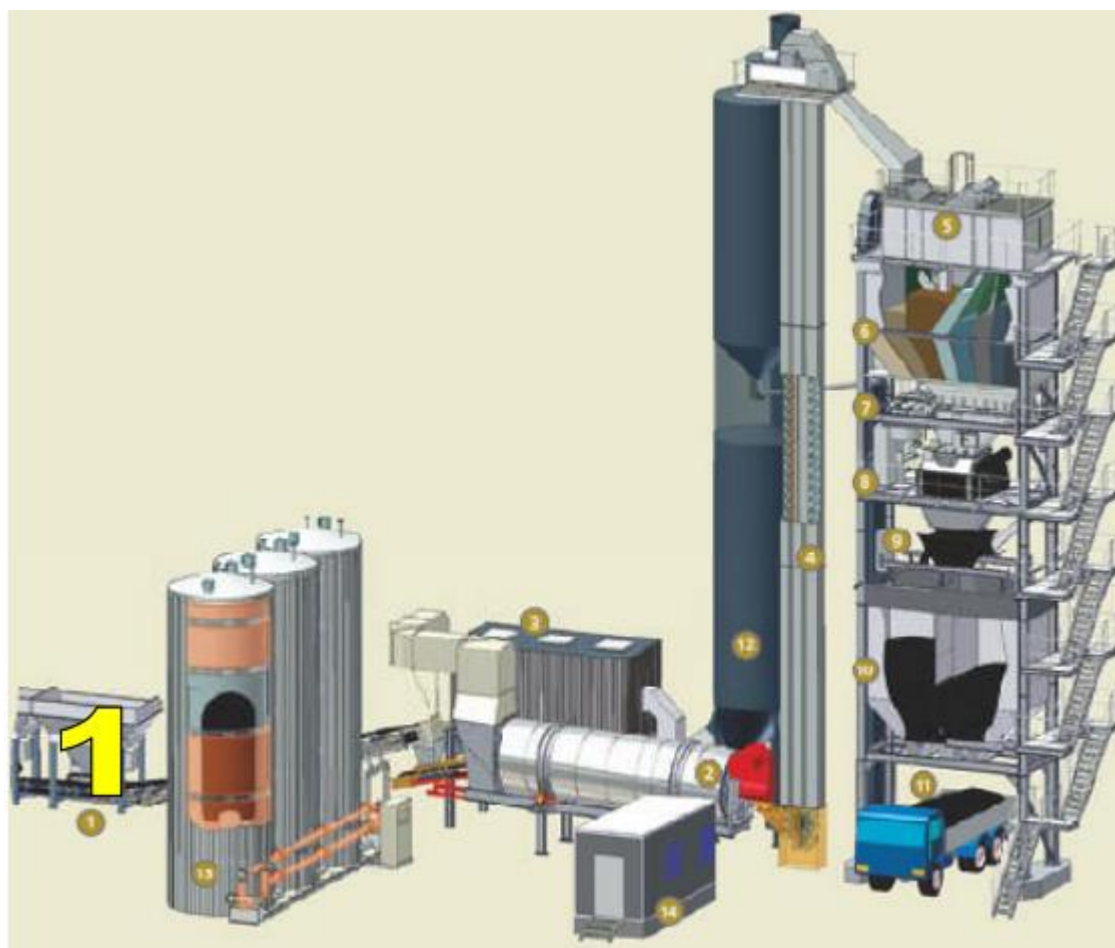
Pour une émulsion ECR60 au 35-50 :





### 10.4 Annexe 4 : photos chantier

Fabrication et mise en œuvre d'enrobé



1-pré-doseur

2-tambour sécheur

3-filtre dépoussiéreur

- 4-élévateur à chaud
- 7-plate-forme de passage
- 10-silos de stockage d'enrobé
- 13-parc à liants
- 5-crible
- 8-plate-forme de malaxage
- 11-pont bascule
- 14-poste de commande
- 6-silos d'agrégats chauds
- 9-trémis mobile
- 12-silos à filer



**Figure 19 : poste de commande**





Essais sur chantier



