

Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

**Application d'une méthodologie de
traitement de données dans le cadre de
l'étude de la durabilité des couches de surface**

Auteur(s) / Organisme(s) :

Julien DRUET - Cerema

Thème de rattachement :

Thème 3 : Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées

DVDC/R/046

LC/21/DVDC/137

Juillet 2024

Sommaire

Sommaire	2
1 Résumé	5
2 Liste des acronymes	7
3 Introduction	8
4 Rappel de la méthodologie retenue	8
5 Site étudié n°1 : RD996 (CD21)	10
5.1 Présentation du site.....	10
5.2 Utilisation des données Aigle 3D sur la RD996	13
5.2.1 Correspondance entre les zones relevées par l'A3D et la réalité sur site.....	13
5.2.2 Correspondance entre les mesures réalisées par l'A3D et les données fournies par le gestionnaire	14
5.3 Obtention des résultats issus de l'outil Aigle 3D concernant la RD996	15
5.3.1 Visite sur site	15
5.3.2 Développement d'un outil nomade connecté	16
5.3.3 Réalisation de la visite sur la RD996.....	16
5.3.4 Difficultés rencontrées sur le terrain	17
5.3.5 Découpage en tronçons homogène et exclusions de zones spécifiques	17
5.4 Analyse des résultats	17
5.4.1 Analyse de l'orniérage petit rayon d'après les données Aigle 3D	18
5.4.2 Analyse de la PMT d'après les données A3D	19
5.4.3 Analyse des fissurations et des zones sans dégradation d'après les données A3D	21
5.4.4 Etude des données concernant les zones sans dégradations recensées par l'A3D	22
5.5 Comparaison avec les données issues du suivi de chantiers innovants	23
5.6 Conclusions pour le site de la RD996	26
6 Site étudié n°2 : RD949B (CD85)	27
6.1 Présentation du site.....	27
6.2 Utilisation des données Aigle 3D sur la RD996	28
6.2.1 Correspondance entre les zones relevées par l'A3D et la réalité sur site.....	28
6.2.2 Correspondance entre les mesures réalisées par l'A3D et les données fournies par le gestionnaire	28
6.3 Obtention des résultats issus de l'outil Aigle 3D concernant la RD949B	31
6.3.1 Réalisation de la visite sur la RD949B	31
6.3.2 Découpage en tronçons homogène et exclusions de zones spécifiques	31
6.4 Analyse des résultats	31
6.4.1 Analyse de l'orniérage petit rayon d'après les données Aigle 3D	32
6.4.2 Analyse de la PMT d'après les données A3D	33

6.4.3	Méthodologie d'analyse des fissurations et des zones sans dégradation d'après les données A3D.....	35
6.5	Comparaison avec les données issues du suivi de chantiers innovants	37
6.6	Conclusions pour le site de la RD949B	41
7	Site étudié n°3 : RD84 (CD83).....	41
7.1	Présentation du site.....	41
7.2	Utilisation des données Aigle 3D sur la RD84.....	44
7.2.1	Correspondance entre les zones relevées par l'A3D et la réalité sur site.....	44
7.2.2	Correspondance entre les mesures réalisées par l'A3D et les données fournies par le gestionnaire	44
7.3	Obtention des résultats issus de l'outil Aigle 3D concernant la RD84	46
7.3.1	Réalisation de la visite sur la RD84.....	46
7.4	Méthodologie d'analyse des résultats	46
7.4.1	Analyse de l'orniérage petit rayon d'après les données Aigle 3D	46
7.4.2	Analyse de la PMT d'après les données A3D	47
7.4.3	Analyse des fissurations et des zones sans dégradation d'après les données A3D	49
7.5	Comparaison avec les données issues du suivi de chantiers innovants	51
7.6	Conclusions pour le site de la RD84	52
8	Site étudié n°4 : RD730 à Semussac (CD17)	52
8.1	Présentation du site.....	52
8.2	Utilisation des données Aigle 3D sur la RD730	54
8.2.1	Correspondance entre les zones relevées par l'A3D et la réalité sur site.....	55
8.2.2	Correspondance entre les mesures réalisées par l'A3D et les données fournies par le gestionnaire	55
8.3	Obtention des résultats issus de l'outil Aigle 3D concernant la RD730	56
8.3.1	Réalisation de la visite sur la RD730.....	56
8.4	Méthodologie d'analyse des résultats	56
8.4.1	Analyse de l'orniérage petit rayon d'après les données Aigle 3D	57
8.4.2	Analyse de la PMT d'après les données A3D	58
8.4.3	Analyse des fissurations et des zones sans dégradation d'après les données A3D	59
8.5	Comparaison avec les données issues du suivi de chantiers innovants	61
8.6	Conclusions pour le site de la RD730	63
9	Site étudié n°5 : RN4 (DIR Est).....	63
9.1	Présentation du site.....	63
9.2	Utilisation des données Aigle 3D sur la RN4	65
9.2.1	Correspondance entre les zones relevées par l'A3D et la réalité sur site.....	65
9.2.2	Correspondance entre les mesures réalisées par l'A3D et les données fournies par le gestionnaire	65

9.3	Obtention des résultats issus de l'outil Aigle 3D concernant la RN4	69
9.3.1	Réalisation de la visite sur la RN4.....	69
9.3.2	Découpage en tronçons homogène et exclusions de zones spécifiques	69
9.4	Analyse des résultats	71
9.4.1	Analyse de l'orniérage petit rayon d'après les données Aigle 3D	71
9.4.2	Méthodologie d'analyse de la PMT d'après les données A3D	72
9.4.3	Analyse des fissurations et des zones sans dégradation d'après les données A3D	74
9.4.4	Etude des données concernant les zones sans dégradations recensées par l'A3D	75
9.5	Comparaison avec les données issues du suivi de chantiers innovants	76
9.6	Comparaison des résultats obtenus avec l'Aigle 3D sur plusieurs années.	80
9.7	Conclusions pour le site de la RN4	83
10	Essais en laboratoire – Caractérisation des matériaux en place	84
10.1	Consistance et nature des essais	84
10.2	Résultats des essais réalisés	85
10.2.1	Résultats des essais de consistance sur les bitumes	86
10.2.2	Désenrobage séquentiel	87
10.2.3	Interprétations et conclusions.....	92
11	Conclusions générales	92
11.1	Conclusions des relevés in situ A3D	92
11.2	Conclusions des essais en laboratoire.....	95
11.3	Difficultés, limites, perspectives et approfondissements à envisager	95
12	Bibliographie.....	97
	ANNEXE 1 : VARIATION DE SECTIONNEMENT SUITE À LA VISITE DU 12 OCTOBRE 2021	98
	ANNEXE 2 : ATLAS DE DÉGRADATIONS DE LA RD 996.....	99
	ANNEXE 3 : ESSAI DE DESENROBAGE SEQUENCÉ	100
	ANNEXE 4 : PHOTOS DES PLANCHES DE LA RD996 LORS DE LA VISITE DU 12 OCTOBRE 2021 ET RELATION AVEC LES DENSITÉ DE FISSURATION CALCULÉES AVEC L'AIGLE 3D	101

1 Résumé

Résumé en français

Face à la nécessité croissante de répondre aux exigences d'atténuation du changement climatique et d'économie des ressources naturelles, les gestionnaires d'infrastructures routières se sont tournés depuis plus d'une vingtaine d'années déjà vers des techniques d'entretien plus sobres telles que le recyclage des enrobés ou bien les enrobés tièdes.

Toutefois, si le comportement de ces techniques innovantes d'entretien des couches de surface a été observé classiquement de façon empirique à travers des suivis de chantier reposant principalement sur des relevés visuels de dégradations, il pourrait, aujourd'hui, s'avérer intéressant d'utiliser les nouveaux moyens d'auscultation à notre disposition tels que, par exemple, les capteurs laser LCMS (Laser Crack Measurement System) pour mieux évaluer le comportement de ces enrobés après plusieurs années de service.

Pour ce faire, il a été développé une méthodologie spécifique qui a fait l'objet d'un rapport correspondant à la lettre de commande (LC/19/DVDC/71). La mise en œuvre de cette méthodologie sur un panel de sites qui ont pu préalablement être recensés grâce à l'envoi d'un questionnaire aux professionnels de la route, doit permettre de réaliser une comparaison des planches entre elles (enrobés sans et avec recyclés, tièdes et chauds).

Le présent rapport présente donc les résultats obtenus sur les 5 sites qui ont pu être étudiés dans le cadre de ce projet.

Il présente également des premières conclusions, ainsi que certaines limites de l'exercice et d'éventuelles propositions d'amélioration qui pourraient être apportées dans le cadre d'études ultérieures destinées à approfondir cette recherche actuelle.

Par ailleurs, l'observation des planches de travaux a été complétée, pour une section, par des essais en laboratoire destinés à caractériser les propriétés physiques et mécaniques des enrobés mis en œuvre.

Ces essais devraient permettre de mieux connaître le comportement mécanique des matériaux en place après plusieurs années de service et, éventuellement, de faire le lien avec les résultats observés en parallèle grâce aux mesures d'auscultation à l'aide des capteurs LCMS sur ces mêmes couches de surface.

Abstract

Facing the growing need to deal with global warming and saving naturel resources, road infrastructure managers have already been turning, for more than 20 years, to more sober maintenance techniques, such as recycling asphalt or warm asphalt.

However, if the behavior of these innovative surface layer maintenance techniques has usually been observed empirically, through site monitoring relying mainly on visual records of degradation, it could, nowadays, be interesting to make use of the new monitoring means available such as, the LCMS (Laser Crack Measurement System) laser sensors to better assess the behavior of these asphalt mixes after several years of operation.

In order to do this, a specific methodology was developed which was the subject of a report corresponding to the order letter (LC/19/DVDC/71). The implementation of this methodology on a panel of sites, previously identified through a survey addressed to road professionals,

should allow to carry out a comparison of the sample boards between them (coated without and with recycled materials, warm and hot)

This report therefore presents the results obtained on the 5 sites which were identified within the framework of this study.

It also presents initial findings, along with certain limitations of the exercise and several ways of improvement considering subsequent studies intended to deepen this current research.

Moreover, the experimentation on one of the sample boards was supplemented by lab tests intended to characterize the physical and mechanical properties of the mixes used.

This should allow to understand the mechanical behavior of the currently applied mixes better after several years of use and potentially connect with the results obtained thanks to auscultation measurements using LCMS sensors on these same surface layers.

2 Liste des acronymes

A3D : Aigle 3D

AE : Agrégats d'Enrobés

APL : Analyseur de Profil en Long

BBDr : Béton Bitumineux Drainant

BBE : Béton Bitumeux à l'Emulsion

BBM : Béton Bitumeux Mince

BBME : Béton Bitumeux à Module Elevé

BBS : Béton Bitumineux Souple

BBSG : Béton Bitumineux Semi-Grenu

BBTM : Béton Bitumeux Très Mince

BBUM : Béton Bitumeux Ultra-Mince

BDR : Bande De Roulement

BR : Blending Rate

CFL : Coefficient de Frottement Longitudinal

CFT : Coefficient de Frottement Transversal

ICO : Indice Carbonyle

IQRN : Image Qualité du Réseau National

LCMS : Laser Crack Measurement System

MBCF : Matériau Bitumineux Coulé à Froid

MTLH : Matériaux Traités aux Liants Hydrauliques

PL : Poids-Lourd

PMT : Profondeur Moyenne de Texture

PR : Point de Repère routier

SSV : Système de saisie Visuelle

TBA : Température Bille-Anneau

TUS : Transversoprofilomètre à Ultra-Sons

3 Introduction

Le projet DVDC – « Durabilité de vie des couches de surfaces » tend à étudier le comportement sur le long terme de techniques de surfaces innovantes ou de techniques jusqu'à présent peu étudiées sur le long terme afin de tenter, par une approche statistique, d'estimer leur durée de vie, voire d'obtenir des informations concernant des lois de comportement propres à chaque technique.

4 Rappel de la méthodologie retenue

Le projet a été initié par une collecte d'informations concernant des sites pouvant répondre aux besoins de l'étude. Le groupe de travail a cherché à recenser des sites ayant les conditions suivantes :

- Un âge de mise en œuvre avancé : n'étaient visés que les sites ayant des âges de mise en œuvre supérieurs à 5 ans, voire, idéalement, supérieurs à 8 ans ;
- L'usage d'une technique soit de type recyclage, soit de type tiède dans la couche de surface¹ ;
- L'accessibilité à des données d'archives, notamment sur les conditions de mise en œuvre (année, météorologie, matériaux...), et la possibilité de se rendre sur site afin de pouvoir réaliser des visites *in-situ* le cas échéant.

Pour rappel, la méthodologie et les outils développés ont suivi le programme suivant :

- Choix d'un site test sur lequel dérouler la méthodologie retenue ;
- Recensement des données A3D nécessaires et détermination des outils et données supplémentaires nécessaires ;
- Détermination d'indicateurs utiles dans le cadre de l'étude ainsi que leur partition en niveaux permettant une évaluation comparative des tronçons ;
- Concaténation de ces données avec celles fournies par le gestionnaire ;
- Examen des données brutes et vérification de leur pertinence ;
- Préparation à une sortie terrain qui a pour objectif un recueil des spots singuliers et des particularités à photographier ;
- Observations *in-situ* en compagnie du gestionnaire avec prises de clichés et géolocalisation des données recensées ;
- Découpage de la section en tronçons homogènes en techniques, âges et structures (nommés « planches ») ;
- Extraction de zones présentant des spécificités d'usages, de trafic, de contraintes ou d'usure parmi les zones mesurées par l'A3D ;
- Analyse des données du site test et interprétations au regard des observations faites ;
- Observation des résultats obtenus et de leur pertinence devant les objectifs du projet ;
- Elaboration d'une méthodologie d'analyse reproductible à plus grande échelle tenant compte des raccourcis possibles et des économies d'échelle.

¹ Pour le cas du recyclage, un pourcentage minimum de 30% de recyclé était visé.

Après concertation avec les membres du groupe de travail, il a été convenu que, dans un premier temps, on ne retiendrait que les couches de surfaces avec uniquement un taux de recyclage important (Taux d'AE > 30% et pas de mix recyclage + enrobés tièdes).

Par ailleurs, l'étude concernant la méthodologie (sections de la RD681 à Autun) ayant montré apparemment un comportement relativement homogène et similaire par familles de couche de roulement (valeurs de PMT assez similaires pour les MBCF et BBTM d'une part et pour les BBSG et BBM d'autre part), il a été décidé de se concentrer sur les enrobés de type BBSG et éventuellement BBM.

Suite à la réunion du groupe de travail, le 16 mars 2021, il a été décidé de retenir les sections suivantes :

Dpt	Route	Type d'enrobés	Tiède	Commune	Recyclage	% Agrégat	Autre	Année début (N)	Total données disponibles
21	RD996	BBSG3	Non	Entre Saulon-la-Rue et Noiron-sous-Gevrey	x	40	Régéfalt et Régémac	2011	27
85	RD949B-20AE	BBSG	Non	Bournezeau	x	20		2014	18
85	RD949B-40AE	BBSG	Non	Bournezeau	x	40		2014	18
85	RD949B-40AE+Régéfalt	BBSG	Non	Bournezeau	x	40	Régéfalt	2014	18
83	RD33	BBSG3	Non	Le luc	x	30		2014	4
83	RD84	BBSG3	Non	Le Thoronet	x	30		2014	4
83	RD560	BBSG3	Non	Salernes	x	30		2014	4

Figure 1 : Tableau des sections envisagées dans le cadre de l'étude

Il est à noter que les planches REGEMAC et REGEFALT sont des planches pour lesquelles ont été mis en œuvre des taux de recyclage importants de l'ordre de 40%, mais également des additifs spécifiques (REGEFALT et REGEMAC) devant permettre de régénérer les bitumes même extrêmement durcis, de manière à leur redonner des performances de liant neuf.

Il s'agit d'additifs développés et commercialisés par la société FENIXFALT.

Le procédé Fenixfalt RM repose sur l'introduction d'un additif REGEFALT sous forme de granulés lors de la fabrication. Il est donc transposable à tous les types de centrale. Cet additif permet de régénérer des bitumes même extrêmement durcis, de manière à leur redonner des performances de liant neuf. Ce procédé est donc particulièrement adapté au recyclage à chaud à fort taux ou au recyclage de produits déjà recyclés.

Le Procédé REGEMAC repose sur les mêmes principes, tout en proposant l'adjonction de polymère de type SBS afin de modifier l'ensemble du bitume présent dans les enrobés fabriqués.

N'ayant pas réussi à récupérer les localisations exactes des planches de la RD33 et de la RD560 (département du Var), il a été décidé de les ôter et de les remplacer par des planches de BBME situés dans le département de la Charente-Maritime (Montendre et Semussac).

Au final, les sections retenues sont les suivantes :

Dpt	Route	Type d'enrobés	Tiède	Département	Commune	Recyclage	% Agrégat	Autre	Année début (N)	Total données disponibles
21	RD996	BBSG3	Non	CD21	Entre Saulon-la-Rue et Noiron-sous-Gevrey	x	40	Régéfalt et Régémac	2011	27
85	RD949B-20AE	BBSG	Non	CD85	Bournezeau	x	20		2014	18
85	RD949B-40AE	BBSG	Non	CD85	Bournezeau	x	40		2014	18
85	RD949B-40AE+Régéfalt	BBSG	Non	CD85	Bournezeau	x	40	Régéfalt	2014	18
83	RD84	BBSG3	Non	CD83	Le Thoronet	x	30		2014	4
17	RD730 Montendre 1	BBME3	Non	CD17	Montendre	x	30		2014	5
17	RD730 Montendre 2	BBME3	Non	CD17	Montendre	x	30		2014	5
17	RD730 Semussac 1	BBME3	Non	CD17	Semussac	x	30		2014	5
17	RD730 Semussac 2	BBME3	Non	CD17	Semussac	x	30		2014	5

Figure 2 : Tableau des sections finalement retenues dans le cadre de l'étude *

* Par la suite a été ajoutée la section de la RN4 (DIR Est)

Pour rappel, lors de la première partie ce projet, il a été développé une méthodologie et des outils associés à l'A3D pour pouvoir extraire les données utiles, les mettre sous format exploitable pour le projet, définir le besoin minimal de reconnaissances *in-situ* et définir des indicateurs permettant d'aboutir à des résultats pouvant qualifier un état des lieux (sur un tronçon court, à une date précise).

Cette méthodologie est largement détaillée dans le rapport « Elaboration d'une méthodologie de traitement des données dans le cadre de l'étude de la durabilité des couches de surface », auquel on pourra se référer si nécessaire.

5 Site étudié n°1 : RD996 (CD21)

5.1 Présentation du site

A l'issue de la présentation du rapport définissant la méthodologie à retenir, il a été décidé d'appliquer cette méthodologie à plusieurs sites (voir Figure 2, page 10), tout en commençant par un premier site test pour valider la méthodologie.

Le choix du site correspondant à une cible pour le projet DVDC – « Durabilité de vie des couches de surfaces » appliqué aux matériaux recyclés, puisqu'il s'agit de planches d'enrobés à recyclage élevé (40%) ayant plus de 8 ans (date de mise en œuvre 2011).

Par ailleurs, on dispose de nombreuses données sur ce site puisqu'il a fait l'objet de rapports par le Cerema dans le cadre de suivi de chantiers innovants à 1 an, 2 ans et 5 ans.

Le site étudié est une route départementale (RD996) reliant la commune de Noiron-sous-Gevrey à la commune de Saulon-la-Rue dans le département de la Côte d'or (21) sur une longueur d'environ 2 km.

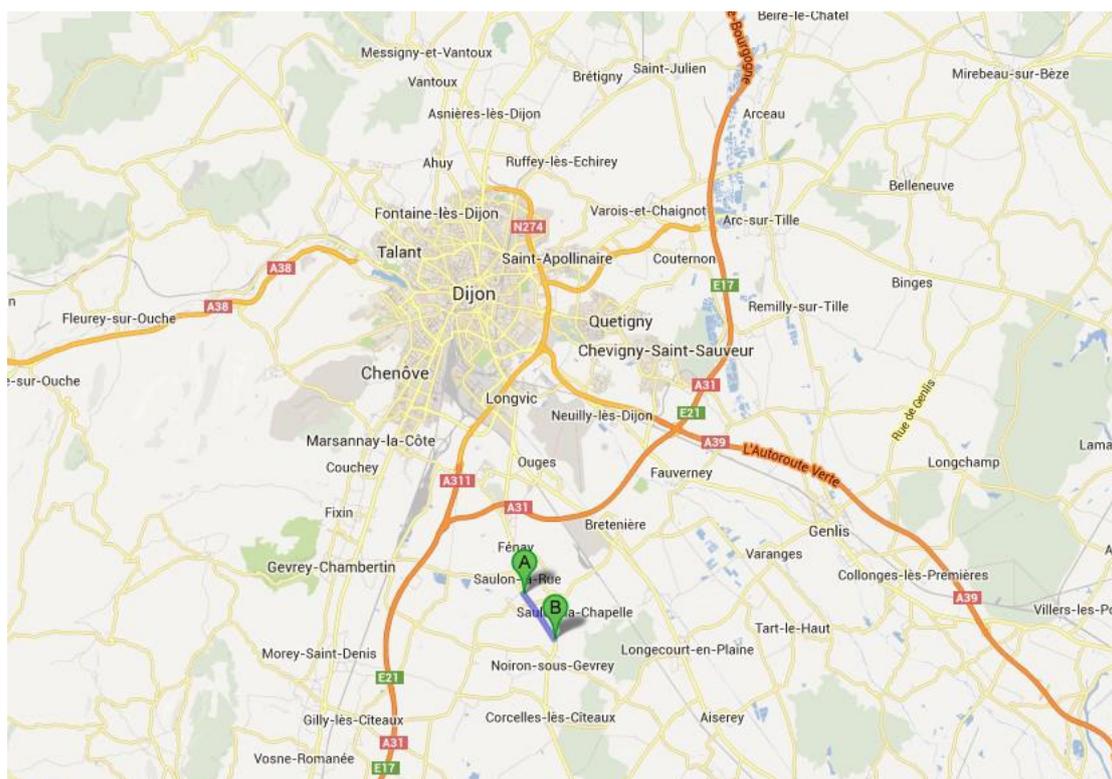


Figure 3 : Plan de situation de la section retenue (RD996)

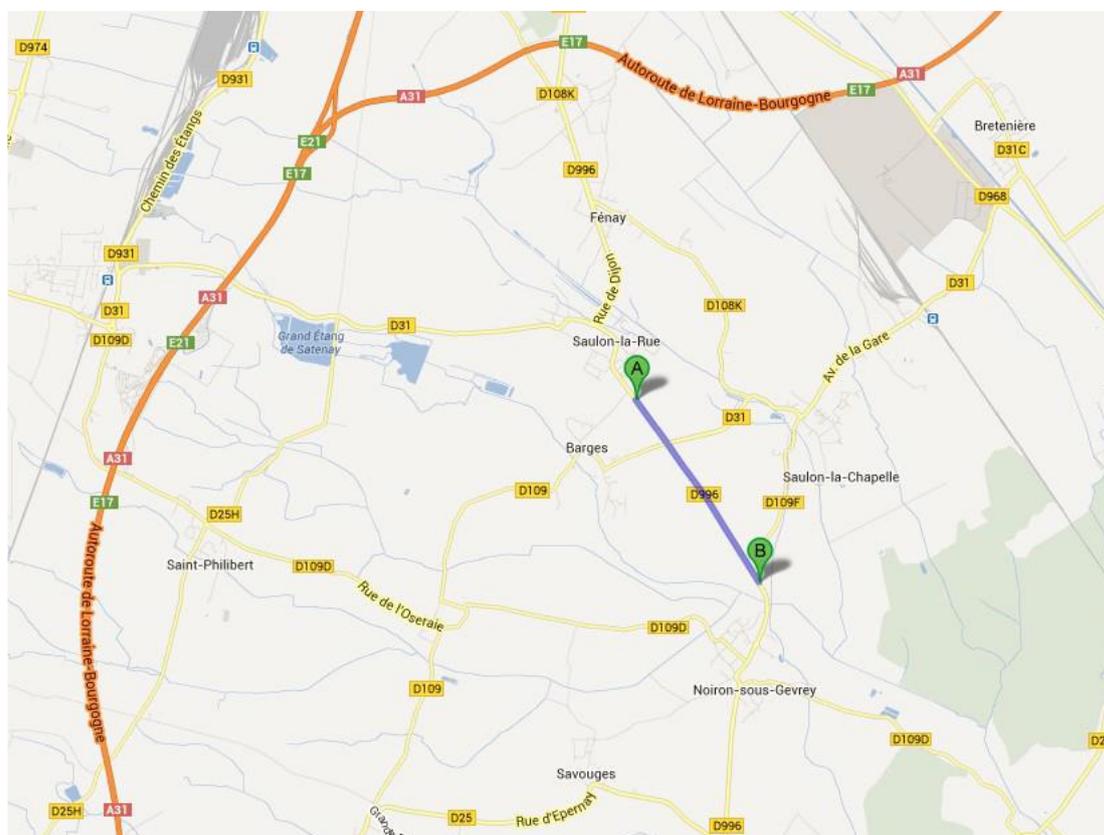


Figure 4 : Plan de localisation de la section retenue (RD996)

La section supporte un trafic de 182 PL/j (T2).

Il s'agit d'un site comportant 2 planches d'enrobés témoins constituées par un BBSG à 10% d'AE, 1 planche de REGEFALT (BBSG à 40% d'AE avec liant spécifique) et 1 planche de REGEMAC (BBSG à 40% d'AE avec liant spécifique).

Le positionnement des planches expérimentales, d'après les données issues du rapport de suivi de 2017 est le suivant :

- Planche témoin : PR 104+600 à 104+825 ;
- Planche REGEFALT : PR 104+825 à 105+100 ;
- Planche REGEMAC : PR 105+100 à 105+325 ;

Pour information, la composition théorique du BBSG de classe 3 témoin est la suivante :

- 0/4 Moissey : 33,6 %
- 4/10 Igé : 51,5 %
- Agrégats d'enrobés : 9,5 %
- Bitume 50/70 : 5,5 % (y compris bitume des agrégats)

La composition théorique des produits REGEFALT ET REGEMAC est la suivante :

- 0/4 Moissey : 18,9 %
- 4/10 Igé : 37,8 %
- Agrégats d'enrobés : 37,8 %
- Bitume 50/70 : 5,5 % (y compris bitume des agrégats)

Les contrôles de fabrication ont été réalisés par le contrôle intérieur de l'entreprise ROGER MARTIN.

Un récapitulatif des résultats est présenté dans le tableau ci-après :

	Granulométrie	Teneur en liant	Écart
Formule Témoin	CONFORME	5,38	-0,12
REGEFALT	CONFORME	5,88	+ 0,38
REGEMAC	CONFORME	5,83	+ 0,35

On observe un léger excès de liant, dans des proportions équivalentes sur les produits REGEFALT et REGEMAC.

Les rapports d'épreuve de formulation présentés ne prennent pas en compte la présence de l'additif réagissant avec le bitume, la teneur en liant obtenue à l'extraction représente donc le bitume ET l'additif ce qui explique un excès de liant récupéré.

D'après les essais de formulation des enrobés disponibles, le dosage en additif est de :

- 2,5 kg/t de mélanges granulaires + AE (granulat + liant) pour le REGEMAC
- 0,720 kg/t de mélanges granulaires + AE (granulat + liant) pour le REGEFALT.

La mise en œuvre des différents produits a été réalisée entre les 11 et 18 juillet 2011.

Le choix de ce site a été motivé par :

- L'existence des données d'auscultation antérieures sur les couches de roulement puisqu'il s'agit d'un chantier innovant régulièrement suivi par le Cerema ;
- Peu de contraintes liées au site (zone hors agglomération, pas de présence d'obstacles (ponts, passages à niveau...), pas de présence de zones à circulation spécifiques (giratoires, carrefours, sorties de véhicules lourds : usines, fermes...) pouvant permettre d'obtenir des résultats *a priori* peu perturbés par ces phénomènes ;
- Une uniformité de contraintes (climatique, géologique, de trafic) et de gestion du patrimoine sur l'ensemble du linéaire, pouvant permettre une comparaison entre les tronçons en ne tenant compte que des paramètres de construction ;
- Une relative proximité géographique avec l'Agence de Nancy facilitant l'intervention sur le terrain
- La disponibilité relativement rapide des mesures Aigle 3D permettant d'avoir rapidement des données d'auscultation à traiter et à interpréter ;
- Une relative uniformité de la structure de la chaussée.

5.2 Utilisation des données Aigle 3D sur la RD996

Le travail d'étude correspondant à ce rapport aura réuni des efforts importants de collaboration et de disponibilité des services du CD21 et du service informatique d'A3D au Cerema DTecITM.

Le recoupement des données A3D sur le site de la RD996 doit être confronté à deux autres bases de données :

- la réalité sur site, et les observations relevées ;
- les données fournies par le gestionnaire.

5.2.1 Correspondance entre les zones relevées par l'A3D et la réalité sur site

Pour rappel, le projet DVDC – « Durabilité de vie des surfaces » ne s'intéresse qu'aux zones présentant des dégradations dues à une mauvaise tenue de la couche de surface. Il est donc nécessaire d'exclure les zones présentant des dégradations structurelles.

Pour cela, il est possible de s'appuyer sur les résultats des mesures de l'A3D afin de recenser les zones susceptibles de présenter des problématiques structurelles. Ces ajustements ne peuvent cependant être considérés viables qu'après validation suite à une observation terrain et à un échange avec le gestionnaire.

5.2.2 Correspondance entre les mesures réalisées par l'A3D et les données fournies par le gestionnaire

Dans un premier temps, les données recueillies sont principalement issues des rapports de suivi de chantiers innovants, en particulier le rapport de suivi à 5 ans rédigé en 2017.

Ces données sont composées sur l'ensemble du linéaire par :

- la connaissance précise du site et des problématiques spécifiques associées (trafic, climat, travaux...) ;
- la structure de la route, à savoir les techniques utilisées sur chacune des couches de surface et de structure composant le linéaire ;
- les dates de mise en œuvre pour chaque couche composant la route ;
- les relevés visuels de dégradation 3 mois après la mise en œuvre, puis à 1 an, 2 ans et 5 ans ;
- les mesures de macrotecture lors de la mise en œuvre, puis à 1 an, 2 ans et 5 ans ;
- les mesures d'adhérence longitudinale à 3 mois, 1 an, 2 ans et 5 ans ;
- mesures de déflexion avant travaux, et 3 mois après les travaux.

Le passage de l'Aigle 3D sur cette section a eu lieu au début du mois de juillet dans de bonnes conditions de mesures (météo favorable, pas de pluie, route propre et sèche, etc...).

Les résultats des mesures ont été obtenus début septembre (temps de transfert des disques durs, sectionnement et calculs des descripteurs).

Dans un premier temps, les données issues de l'Aigle3D ont été projetées sur une carte via le logiciel Arcgis pro. Cette première visualisation a permis de voir l'emprise de la mesure et les principales dégradations via les descripteurs élémentaires (fissures, orniérage, raveling, macrotecture, etc...).

La conclusion de cette première observation est qu'il ne semble pas y avoir de dégradations structurelles. Par ailleurs, le raveling et l'orniérage semblent très faibles. Par contre, les fissures sont nettement visibles et on distingue très nettement les démarcations entre les différentes planches.

Toutefois, ces démarcations ne semblent pas correspondre avec les localisations des planches telles qu'indiquées dans les rapports de suivi.



Figure 5 : Exemple de démarcation entre 2 planches (ici planche en amont des travaux à gauche et planche témoin n°1 à droite)



Figure 6 : Exemple de démarcation entre 2 planches (ici planche REGEMAC à gauche et planche témoin n°2 à droite)

Il est à noter que la localisation des planches fournie par le rapport est en PR + abscisse ce qui est l'usage traditionnel. Or, les informations fournies par l'Aigle 3D sont en coordonnées géographiques (x,y,z).

Il y a donc lieu de recalcr les PR en coordonnées géographiques.

Pour cela, on peut s'appuyer sur les images d'environnement, en particulier la présence d'un panneau indiquant le PR 104+000 qui permet de recalcr les données sur ce point précis.

Au vu de ces premières observations, il n'a pas été possible de poursuivre plus en avant l'analyse des données Aigle 3D. Il convient donc de vérifier rapidement sur le terrain la localisation exacte des différentes planches expérimentales.

5.3 Obtention des résultats issus de l'outil Aigle 3D concernant la RD996

5.3.1 Visite sur site

L'exploitation des données issues de l'A3D a permis de se rendre compte des différentes limites de leur usage et de la nécessité de procéder à des reconnaissances sur le terrain.

Les objectifs de la visite terrain sont :

- Recalcr les données issues du rapport de suivi avec le référentiel utilisé par l'outil A3D et en particulier de localiser précisément les différentes planches expérimentales ;
- Valider la bonne compréhension des données gestionnaire avec le CD21, et les compléter si besoin ;
- Identifier les zones présentant des dégradations structurelles avérées et utiliser la connaissance du terrain du gestionnaire pour conforter les bornages de ces zones ;
- Identifier les zones présentant des spécificités structurelles (pont, passages de canalisations...) qui n'auraient pas été prises en compte par l'outil A3D ;

- Identifier les zones présentant des contraintes spécifiques à exclure de l'étude (carrefours importants, ronds-points, zones d'agglomération, sorties d'usine ou d'exploitation agricole...);
- Vérifier la pertinence des mesures réalisées par l'A3D.

5.3.2 Développement d'un outil nomade connecté

Pour faciliter l'acquisition des données lors de la visite terrain et permettre une correspondance géographique entre les éléments recensés sur site et les données A3D, un outil d'édition a été développé sur le logiciel Arcgis.

L'outil d'édition du logiciel permet la réalisation de surfaces auxquelles l'utilisateur peut associer un titre ainsi qu'un commentaire libre permettant une prise de note pratique.

Le matériel associé est un ordinateur portable sur lequel avait été copié les données de mesures de l'Aigle 3D, et disposant d'une connexion internet (via un point d'accès WIFI fourni par un téléphone) pour matérialiser le fond de carte IGN.

L'accès à l'outil Arcgis Pro sur un ordinateur, qui permet la vision du site sur un fond de carte type satellite, ainsi que les données recensées par l'A3D, assure une maniabilité sur le terrain, ainsi qu'un dispositif de prise d'informations connectées et géographiquement référencées.

Une tablette aurait toutefois été probablement plus pratique.

5.3.3 Réalisation de la visite sur la RD996

La visite sur site s'est déroulée le 12 octobre 2021, en présence du CD21, afin de pouvoir échanger *in-situ* des informations qui pourraient compléter les données déjà répertoriées.

Dans le cadre du site de la RD996, nous avons eu la chance d'avoir un gestionnaire impliqué qui a mis à disposition pour la visite un agent territorial ayant une forte connaissance des données historiques et des contraintes locales.

Ce type de ressource est particulièrement précieux, car il a été constaté lors de la phase de recueil des sites intéressants dans le cadre du projet DVDC – « Durée de vie des chaussées » que de nombreuses archives sont manquantes et que le recueil sur l'historique des sites s'avère bien souvent laborieux, voire sans issue.

La visite du site a consisté à parcourir l'ensemble du linéaire en notant les localisations exactes des différentes planches de travaux grâce à la localisation des PR et de leurs coordonnées géographiques correspondantes grâce à un GPS (téléphone portable). Par souci d'efficacité et nécessité, au vu de la longueur du site, la visite a été réalisée entièrement en voiture. Les différentes planches expérimentales avaient été préalablement matérialisées par le CD21 à l'aide de peinture blanche ce qui a très largement facilité notre travail.

La météo lors de cette visite était clémente, ne compliquant pas la prise de note, ni la visibilité de la route.

A chaque changement de tronçon homogène en structure et âge, sur toute la constitution de la route, un arrêt a été effectué pour prise de notes d'informations sur le tronçon et prise de photos et contextualisées (permettant de rendre compte des spécificités terrains des zones d'interface).

La visite a permis aussi l'échange en direct avec le gestionnaire, qui a fourni des informations concernant l'historique du site, ainsi que les problématiques spécifiques aux terrains parcourus par le linéaire et le type de gestion de patrimoine qui est pratiqué sur la zone étudiée.

Dans un deuxième temps a eu lieu un temps d'échange sous forme de réunion en salle. Cette phase a permis la présentation de l'outil Arcgis, ainsi que la présentation des données recueillies par l'A3D et la correspondance entre ces données et celles fournies par les rapports de suivi de chantiers innovants.

Cela a permis de contextualiser les besoins inhérents à la visite, de présenter des premiers résultats au CD21.

5.3.4 Difficultés rencontrées sur le terrain

Lors de la visite sur le terrain, l'ordinateur n'a en définitive pas été utilisé, car le gestionnaire avait auparavant matérialisé les différentes planches expérimentales.

La présence d'un agent territorial lors de cette visite a été précieuse, car nous pouvions aussi nous appuyer sur sa connaissance du terrain, notamment pour la localisation des interfaces entre deux tronçons admettant des variations structurelles en couches inférieures, mais recouvertes par la couche de surface.

5.3.5 Découpage en tronçons homogène et exclusions de zones spécifiques

A l'issue de la visite, il a été confirmé que la section étudiée ne présentait pas de désordres structurels apparents et significatifs.

Par ailleurs, il est confirmé qu'aucun entretien n'a été réalisé sur cette section depuis la réalisation des couches de roulement en 2011.

Enfin, suite aux échanges avec le gestionnaire et à l'observation visuelles des planches il apparaît que le découpage des différentes planches est en réalité le suivant :

	Rapport de suivi	Suite visite
Planche témoin en amont des travaux	PR 104+600 à 104+825	PR104+120 à 104+820
Planche REGEFALT	PR 104+825 à 105+100	PR104+820 à 105+100
Planche REGEMAC	PR 105+100 à PR 105+325	PR 105+100 à 105+400
Planche témoin en aval des travaux		PR 105+400 à 106+280

Figure 7 : Découpage des planches expérimentales suite à la visite du 12 octobre 2021

L'examen des données issues de l'Aigle3D et en particulier les fissures, permet de vérifier que la localisation de ces planches après visite coïncide parfaitement avec la réalité du terrain.

5.4 Analyse des résultats

Dans le cas de la RD996, l'indicateur de raveling n'a pas été présenté ici, car les mesures réalisées par l'A3D ne présentent soit aucun résultat, ce qui signifie que l'outil n'a pas détecté de zones de raveling, soit des zones de raveling de niveau 0, c'est-à-dire des zones ne présentant pas de dégradations remarquables.

Le présent paragraphe présente les résultats obtenus dans l'objectif de comparer les différentes planches entre elles (avec et sans recyclage d'agrégats d'enrobés).

Les courbes présentées ci-après représentent les résultats obtenus pour le site de la RD996.

Par ailleurs, comme l'on dispose de certaines données issues des rapports de suivi de chantiers innovants, nous pouvons également les comparer aux résultats obtenus avec la mesure Aigle 3D.

Cependant, il convient d'être prudent dans cette comparaison, les méthodes et instruments de relevés n'étant pas identiques et les dates de relevés étant également différents.

Remarque :

Il est à noter qu'il a été fait le choix, pour une meilleure visibilité des graphiques de ne pas prendre une échelle des axes (en ordonnées) fixe, mais une échelle variable pour s'ajuster aux valeurs rencontrées. Il est donc important de garder cela en tête lorsque l'on compare les différents graphiques.

5.4.1 Analyse de l'orniérage petit rayon d'après les données Aigle 3D

Pour chaque tranche de profondeur d'ornière mesurée, l'A3D donne une indication sur une zone de validité. La mesure est faite à un pas de 1 m sur un profil transversal de quelques centimètres de large.

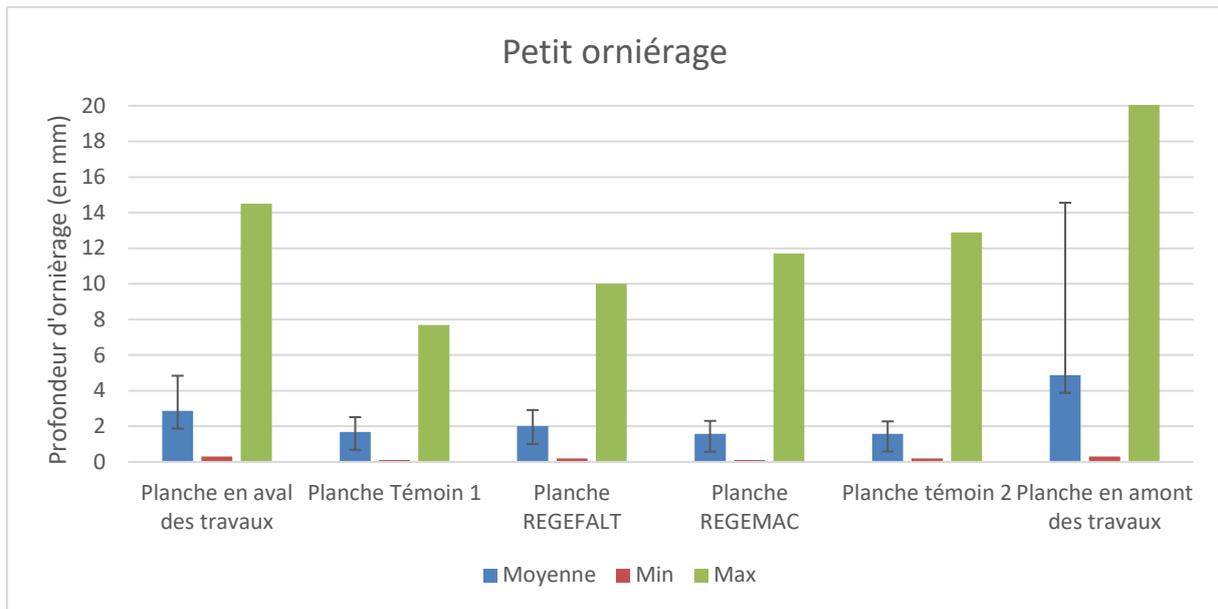
5.4.1.1 Comparaison de l'orniérage petit rayon pour chaque planche étudiée

La méthodologie proposée initialement dans le rapport « Elaboration d'une méthodologie de traitement des données dans le cadre de l'étude de la durabilité des couches de surface », prévoyait que la comparaison entre chaque planche étudiée proposée serait de classer les profondeurs d'ornière en trois catégories :

- Les petits orniérages admettant une profondeur inférieure à 10 mm (niveaux 0 à 2) ;
- Les petits orniérages admettant une profondeur comprise entre 10 mm et 20 mm (niveaux 3 et 4) ;
- Les petits orniérages admettant une profondeur supérieure à 20 mm (niveaux 5 à 7).

Le choix de ces catégories devrait permettre une discrétisation rapide, par visualisation graphique, des niveaux de dégradations des planches selon l'indicateur « petit orniérage ».

Toutefois, il est apparu plus pertinent de travailler sans classe de valeurs, mais avec les valeurs brutes et leurs grandeurs statistiques associées : moyenne, minimum, maximum et écart-type.



Graphique 1 : Profondeur de petit orniérage (en mm) par planche

Dans le cas du site de la RD996, les mesures réalisées par l'A3D donnent des valeurs de profondeurs d'orniérage extrêmement faibles (de l'ordre de 2 mm en moyenne), qui témoignent probablement d'une bonne tenue de la couche de roulement adaptée aux conditions (trafic, météo, etc...) rencontrées sur cette section depuis sa création. En effet, on peut rappeler que cette section de route n'a fait l'objet d'aucun entretien depuis la réalisation de la couche de roulement en 2011.

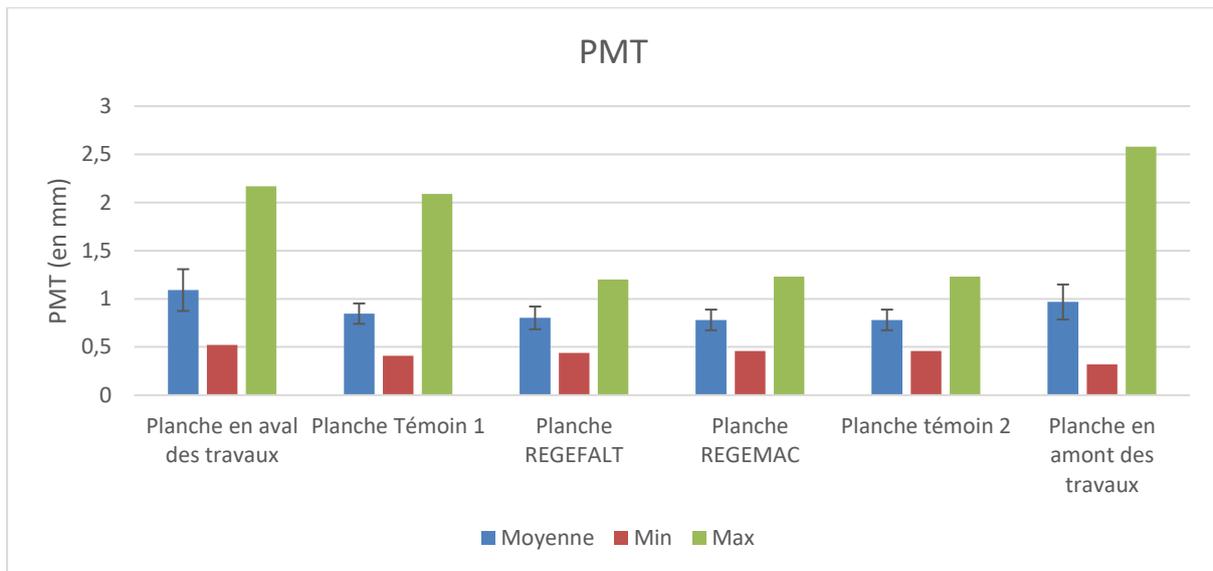
On peut constater que les valeurs moyennes d'orniérage, en plus d'être très faibles, ont des valeurs extrêmement proches pour les 3 planches expérimentales, ce qui tend à dire que cet indicateur ne paraît pas discriminant dans le cadre de notre étude.

5.4.2 Analyse de la PMT d'après les données A3D

Comme pour le descripteur orniérage petit rayon, il est apparu, là aussi, plus pertinent de travailler sans classe de valeurs, mais avec les valeurs brutes et leurs grandeurs statistiques associées : moyenne, minimum, maximum et écart-type.

5.4.2.1 Comparaison de la PMT mesurée pour chaque planche étudiée

Le graphique 2 présente les valeurs de PMT représentées majoritairement, en termes de surfaces mesurées par rapport aux surfaces de chaque planche, pour chaque planche et pour chaque axe de mesure.



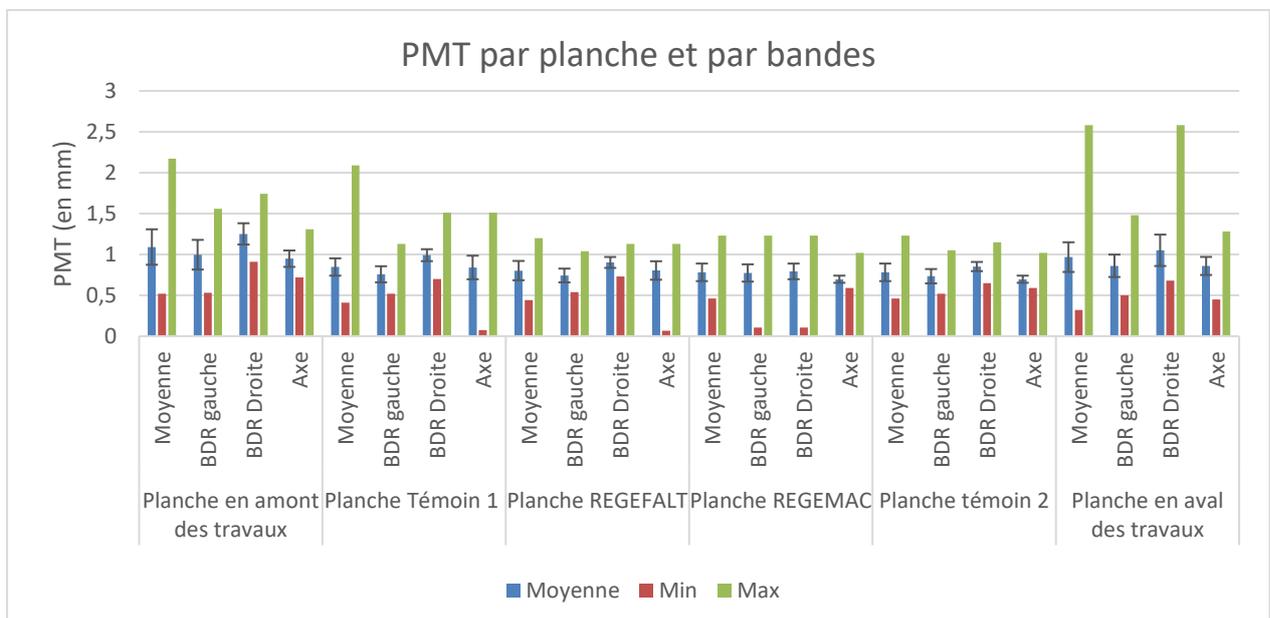
Graphique 2 : Valeurs de PMT pour chaque planche

Comme pour l'ornièrage petit rayon, les valeurs moyennes de PMT sur les 3 planches sont relativement proches et témoignent d'une macrotexture encore plutôt bonne.

Là aussi, on pourrait conclure que cet indicateur ne paraît pas discriminant dans le cadre de notre étude.

Pour des raisons de traitement et de visualisation des résultats, il a été fait le choix dans un premier temps de ne pas faire de différenciation entre PMT en axe et en bande de roulement dans cette partie d'étude, car cela engendrait des calculs plus longs et complexes qui ne semblaient pas nécessaires à ce stade de l'étude. Par ailleurs, dans le cadre du suivi de ce chantier innovant, nous ne disposons pas d'informations sur la localisation des mesures de PMT en axe et en bande de roulement.

Toutefois, dans un deuxième temps, nous avons toutefois réalisés ces calculs pour une visualisation des mesures de PMT en axe et en bande de roulement.



Graphique 3 : Valeurs moyennes de PMT pour chaque planche

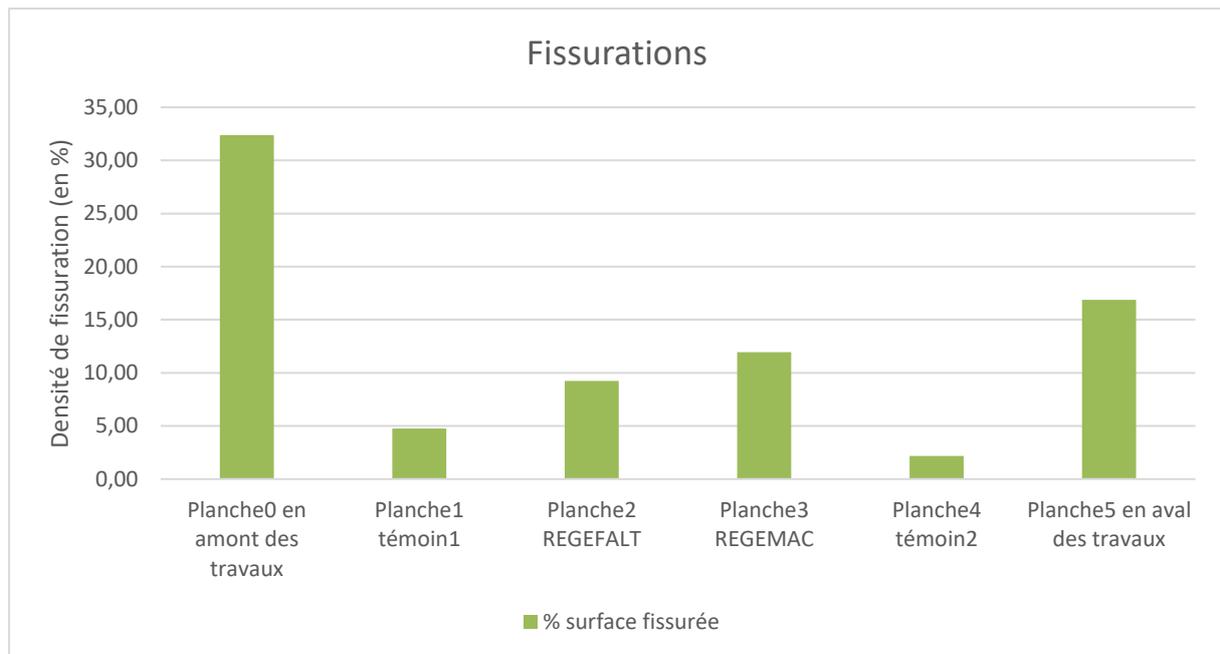
On peut constater que les valeurs de PMT en bandes de roulement droite sont légèrement plus élevées qu'en axe ou qu'en bande de roulement gauche. Cela peut s'expliquer en partie par le fait qu'une petite partie de la mesure correspond aux bords de la chaussée, voire à l'accotement.

5.4.3 Analyse des fissurations et des zones sans dégradation d'après les données A3D

5.4.3.1 Etude des données de fissurations mesurées par l'A3D

Les données concernant la fissuration fournies par l'A3D sont des objets sans surface auxquels sont associés, arbitrairement, des tampons pour leur donner des surfaces. Dans ce cas de figure, il a été choisi un tampon de 10 cm autour de chaque fissure pour donner la surface de celle-ci.

Au final, nous disposons de la surface de chaque zone fissurée que nous pouvons comparer à la surface totale de la planche à laquelle la mesure est associée et obtenir un pourcentage de fissuration par planche.



Graphique 4 : Pourcentage de zones fissurées pour chaque planche pour le cas du site de la RD996

Cette représentation graphique permet de mettre en lumière les premières observations faites à la suite de la visualisation des résultats des données sous forme cartographique. En effet, sur ces cartes les fissures sont nettement visibles et on distingue très nettement les démarcations entre les différentes planches et il apparaît visuellement que la densité de fissure n'est pas la même d'une planche à l'autre.

Ce graphique permet donc de quantifier très précisément cette densité de fissure.

A la vue de celui-ci, il apparaît très nettement que les planches avant et après les sections ayant fait l'objet des travaux sont bien plus fissurées que les planches dont la couche de roulement date de 2011. Cela s'explique aisément par le fait que ces planches sont plus anciennes et donc plus dégradées.

Maintenant, si l'on compare les zones témoins (10% d'AE) avec les zones à fort taux de recyclés (REGEMAC et REGEFALT à 40% d'AE), on constate que le pourcentage de fissuration est plus important pour ces dernières, ce qui semblerait dire que ces enrobés se fissurent plus vite dans le temps.

Si l'on compare la planche REGEMAC à la planche REGEFALT, on constate que le pourcentage de fissuration de la planche REGEMAC est supérieur à celui de la planche REGEFALT, sans que la différence ne soit pour autant très significative.

Remarque importante :

Il est à noter que les planches REGEMAC et REGEFALT sont des planches pour lesquelles ont été mis en œuvre des taux de recyclage importants de l'ordre de 40%, mais également des additifs spécifiques (FENIXFALT et REGEMAC) devant permettre de régénérer les bitumes même extrêmement durcis, de manière à leur redonner des performances de liant neuf.

Aussi, il n'est pas possible, avec ces seules mesures de conclure si la fissuration plus importante constatée sur les planches REGEFALT et REGEMAC est principalement due aux taux d'agrégats d'enrobés élevé ou à l'adjonction de ces additifs.

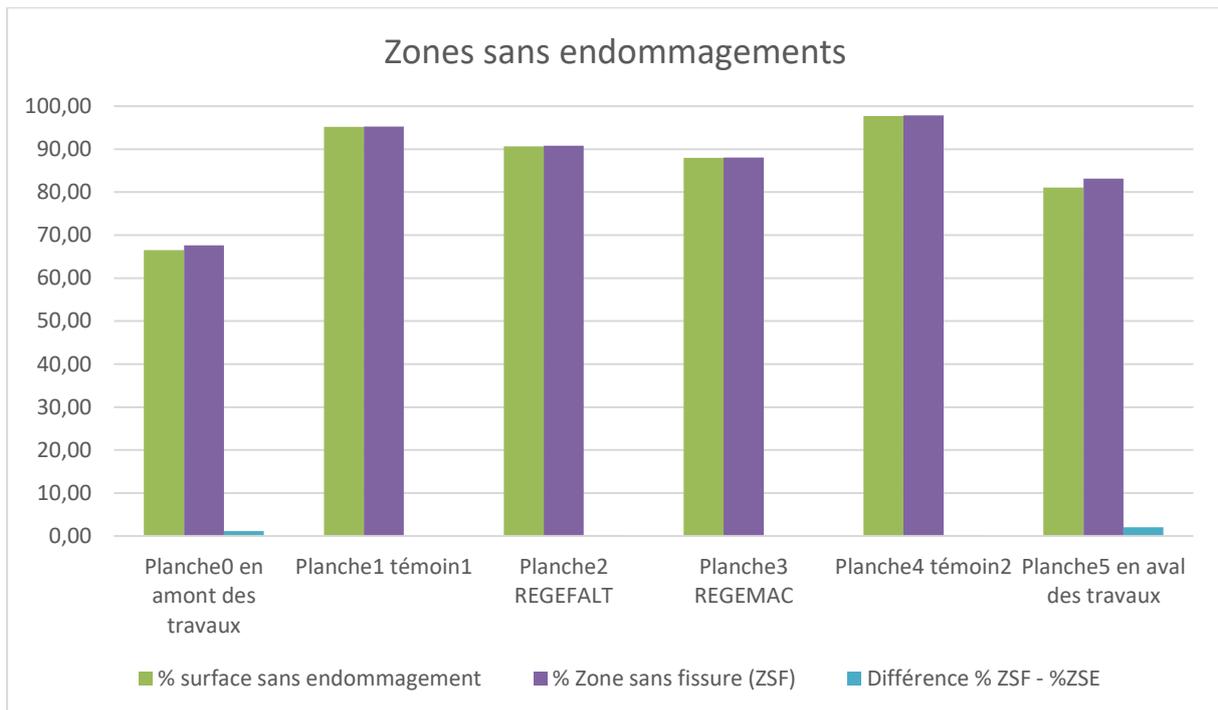
5.4.4 Etude des données concernant les zones sans dégradations recensées par l'A3D

L'A3D fournit, pour chaque planche, une surface correspondant aux zones sans dégradations. Cette information est utile pour présenter la santé de la couche de surface : plus la surface déduite est importante, moins la route est dégradée.

Pour rappel, la zone sans endommagement correspond à la zone où il n'y a ni zone fissurée, ni zone raveling de 01 à 05, ni zone orniérée de niveau 01 à 07.

Pour permettre une comparaison entre chaque planche, il a été choisi de représenter la proportion « surface de zone sans dégradation par rapport à la surface totale de la planche correspondante ».

A également été ajouté le pourcentage de zone sans fissure et enfin la différence entre les zones sans endommagement et les zones sans fissures.



Graphique 5 : Proportion surfacique de route ne présentant aucune dégradation pour chaque planche et en fonction de la technique de couche de roulement utilisée

Comme pour la fissuration, les planches avant et après les sections ayant fait l'objet des travaux sont plus endommagées que les planches dont la couche de roulement date de 2011. Cela s'explique aisément par le fait que ces planches sont plus anciennes et donc plus dégradées.

Dans le cas du site de la RD996, les proportions de zone sans dégradations sont toutes supérieures à 80% de la surface totale pour les planches expérimentales réalisées en 2011.

Ces valeurs élevées permettent de conclure à une bonne tenue des couches de roulement des planches du site qui est due à leurs âges relativement peu élevés, ainsi qu'à une bonne structure de chaussée.

L'on peut également voir sur toutes les planches que la proportion de zone sans endommagement est quasiment égale à la proportion de zone sans fissure. Ceci est assez logique puisqu'on a vu précédemment qu'il n'y avait pas de raveling et très peu d'orniérage.

Par conséquent, les zones sans endommagement correspondent quasiment aux zones sans fissures. On voit bien là encore que la fissuration est l'indicateur déterminant pour la comparaison des différentes planches dans le cadre de cette étude.

5.5 Comparaison avec les données issues du suivi de chantiers innovants

Comme évoqué au début de ce rapport (cf§ 5), nous disposons, en plus des données issues des mesures A3D, des données recueillies lors des suivis de chantiers innovants.

Pour rappel, ces données sont composées sur l'ensemble du linéaire par :

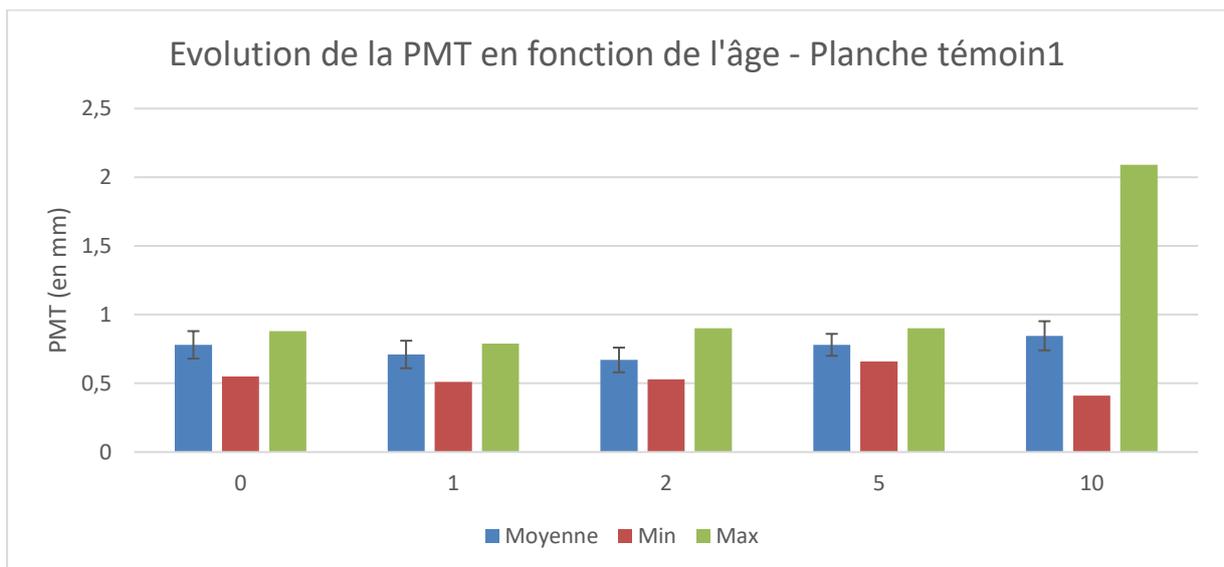
- la connaissance précise du site et des problématiques spécifiques associées (trafic, climat, travaux...);

- la structure de la route, à savoir les techniques utilisées sur chacune des couches de surface et de de structure composant le linéaire ;
- les dates de mise en œuvre pour chaque couche composant la route ;
- les relevés visuels de dégradation 3 mois après la mise en œuvre, puis à 1 an, 2 ans et 5 ans ;
- les mesures de macrotexture lors de la mise en œuvre, puis à 1 an, 2 ans et 5 ans ;
- les mesures d'adhérence longitudinale à 3 mois, 1 an, 2 ans et 5 ans ;
- mesures de déflexion avant travaux, et 3 mois après les travaux.

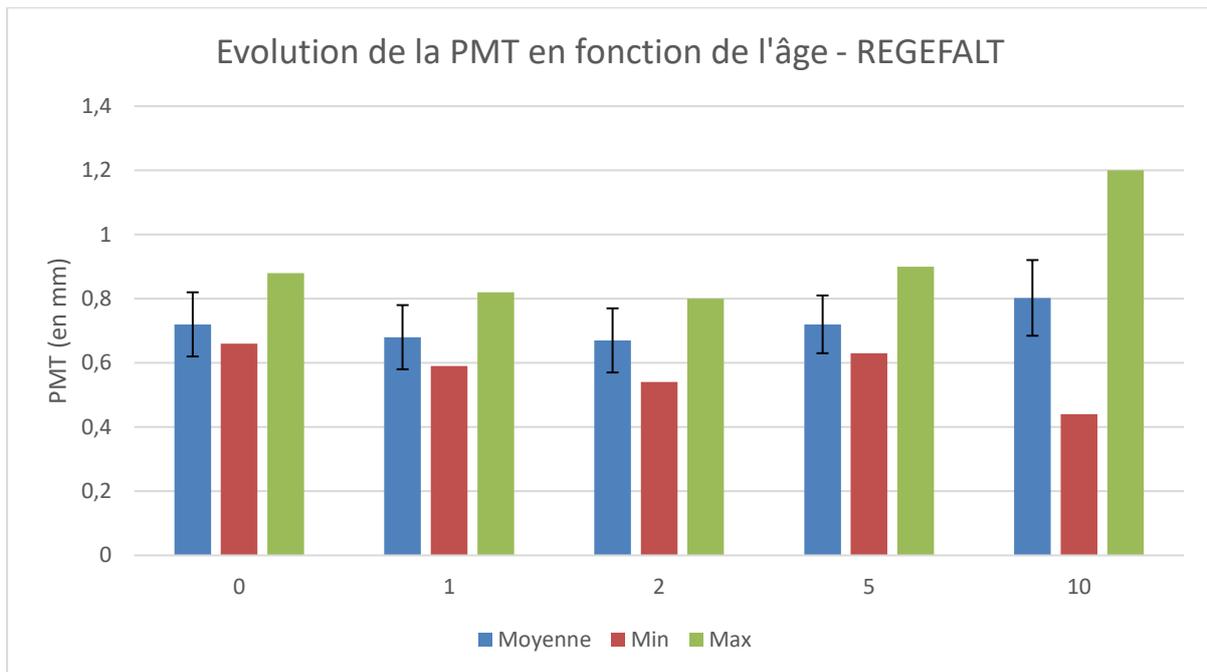
Si l'on retient les données communes aux mesures Aigle 3D et aux rapports de suivi, il ne reste plus que :

- les mesures de macrotexture lors de la mise en œuvre, puis à 1 an, 2 ans et 5 ans ;
- les relevés visuels de dégradation 3 mois après la mise en œuvre, puis à 1 an, 2 ans et 5 ans ;

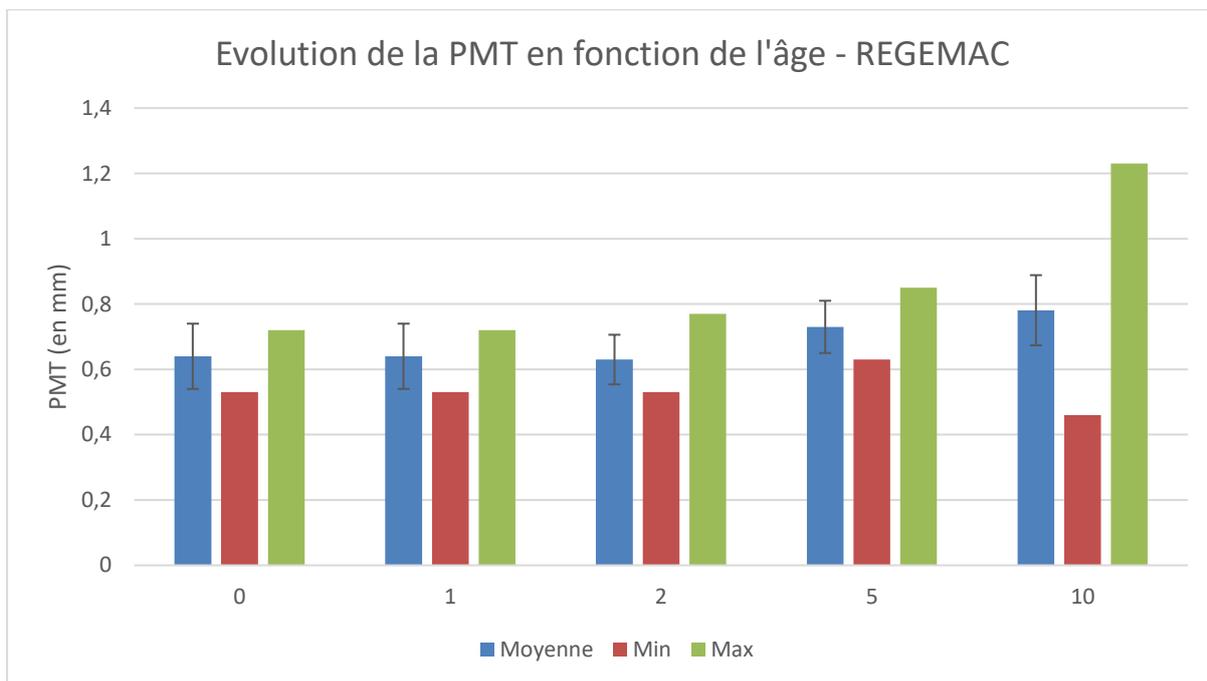
Nous pouvons donc essayer de comparer les mesures de macrotexture au cours des années, pour chacune des planches, bien que les techniques d'acquisition ne soient pas identiques, ce qui rend la comparaison assez incertaine.



Graphique 6 : Evolution de la PMT en fonction de l'âge pour la planche témoin n°1



Graphique 7 : Evolution de la PMT en fonction de l'âge pour la planche témoin REGEFALT



Graphique 8 : Evolution de la PMT en fonction de l'âge pour la planche témoin REGEMAC

L'analyse de ces 3 graphiques permet de conclure que les valeurs moyennes de PMT à 10 ans mesurés par l'Aigle3D sont assez proches des valeurs mesurées à 0, 1, 2 et 5 ans lors des suivis de chantier innovant (essais à la tâche), bien que les outils et les dates de mesure soient très différents.

Si l'on fait abstraction de ce point, l'on constate que les valeurs moyennes de PMT varient finalement assez peu dans le temps, ce qui ne semble pas traduire de dégradation des performances sur ce point au cours du temps.

Toutefois, comme nous l'avons vu précédemment, l'indicateur le plus déterminant pour comparer l'évolution des sections au cours du temps semble être la fissuration.

Malheureusement, si nous disposons bien de données concernant les dégradations et notamment les fissures, il ne s'agit là que de données essentiellement qualitatives.

En effet, le rapport de suivi réalisé en 2017 indique qu'un « relevé visuel a été réalisé avec l'appareil DESY, suivant la méthode d'essai LPC 38-2 relative au « Relevé des dégradations de surface des chaussées » [1][2] avec un mode de relevé M2, le 25 novembre 2011.

Ce relevé indique que la section auscultée ne présente aucune dégradation.

Les relevés visuels réalisés le 13 septembre 2012 (suivi à 1 an) et le 8 octobre 2013 (suivi à 2 ans), selon les mêmes méthodes, indique également que la section auscultée ne présente aucune dégradation.

Le relevé visuel réalisés le 8 avril 2017 (suivi à 5 ans), indique, par contre, que la section auscultée présente de nombreuses fissures transversales et longitudinales. Le rapport ne faisait pas apparaître de distinction entre les différentes planches expérimentales et concluait que les procédés REGEFALT et REGEMAC inclus dans des formules incorporant 40% d'agrégats avaient un comportement similaire à une couche de roulement formulée avec 10% d'agrégats.

Ces observations semblent diverger de celles obtenues avec les mesures Aigle 3D en 2021. Cette divergence peut s'expliquer soit par des outils d'auscultation différents, soit par une évolution des couches de roulement entre 2016 et 2021. En effet, l'Aigle 3D permet une quantification précise et détaillée, alors que le relevé visuel tel qu'effectué en 2016 ne fournit pas ce niveau de détail et fait intervenir, de plus, un biais humain d'interprétation des dégradations qui n'est pas négligeable.

Par ailleurs, le gestionnaire nous a indiqué que pour lui, les fissurations étaient plus importantes ces dernières années, sans qu'il ne soit en mesure de les quantifier précisément.

5.6 Conclusions pour le site de la RD996

Au vu des mesures réalisées en juillet 2021, à l'aide de l'outil Aigle3D, il apparaît que, sur ces sections de la RD996, l'indicateur le plus pertinent pour comparer les différentes planches est l'observation et le recensement des zones fissurées.

A l'analyse de ces résultats, il apparaît que les planches utilisant le procédé REGEFALT et REGEMAC inclus dans des formules incorporant 40% d'agrégats présentaient un taux de fissuration plus important que les planches constituées d'une couche de roulement formulée avec 10% d'agrégats.

Toutefois, il convient de nuancer ce résultat en rappelant que la densité de fissuration observée sur l'ensemble des planches d'enrobés réalisés en 2011 est dans l'absolu relativement faible. Ainsi, sur ce tronçon, les enrobés mis en œuvre assurent encore leur fonction plus de 10 ans après et ils n'ont d'ailleurs fait l'objet d'aucune réfection ni de travaux d'entretien de la part du gestionnaire.

Par ailleurs, il est difficile de conclure sur l'influence du taux de recyclage seul quant au vieillissement de la couche de surface, puisque l'adjonction d'additif spécifiques (REGEFALT et REGEMAC) peuvent également influencer sur ces résultats.

Il sera intéressant de voir les résultats obtenus sur les autres planches contenant des couches de surface à fort taux de recyclage – et éventuellement sans additif – qui doivent également être auscultées dans le cadre de ce projet, pour étayer ces premières conclusions.

6 Site étudié n°2 : RD949B (CD85)

6.1 Présentation du site

Le choix du site correspondant à une cible pour le projet DVDC – « Durabilité de vie des couches de surfaces » appliqué aux matériaux recyclés, puisqu'il s'agit de planches d'enrobés à recyclage élevé (40%) ayant plus de 7 ans (date de mise en œuvre septembre 2014).

Par ailleurs, on dispose de nombreuses données sur ce site puisqu'il a fait l'objet de rapports par le Cerema dans le cadre de suivi de chantiers innovants à 1 an, 2 ans et 5 ans.

Le site étudié est un tronçon de route départementale (RD949B) d'une longueur d'environ 1,2 km situé entre 2 giratoires, à proximité de la commune de Bournezeau dans le département de la Vendée (85).

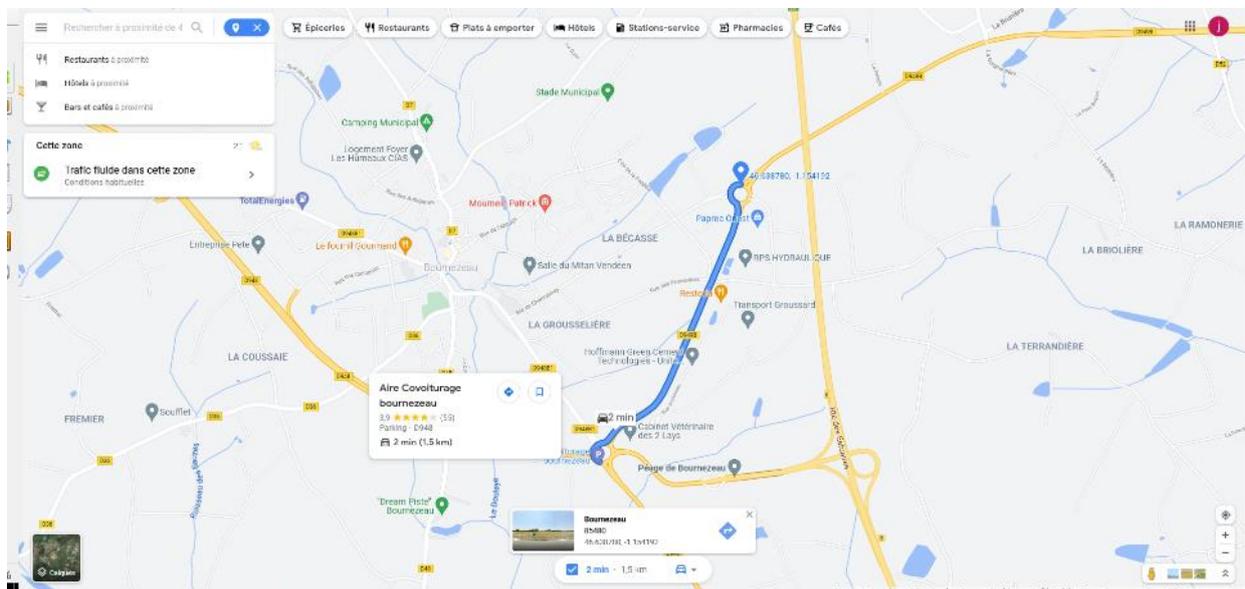


Figure 8 : Plan de situation de la section retenue (RD949B)

La section supporte un trafic de 430 PL/j (T1).

Il s'agit d'un site comportant 1 planche d'enrobés témoin constituée par un BBSG à 20% d'AE, 1 planche de REGEFALT (BBSG à 40% d'AE avec liant spécifique) et 1 planche de BBSG à 40% d'AE sans liant spécifique.

Le positionnement des planches expérimentales, d'après les données issues du rapport de suivi de 2017 est le suivant :

- Planche BBSG 40% AE REGEFALT : PR 42+340 à 42+825 ;
- Planche BBSG 40% AE: PR 42+825 à 43+136 ;
- Planche témoin BBSG 20% AE: PR 43+136 à 43+508 ;

La mise en œuvre des différents produits a été réalisée en septembre 2014.

Le choix de ce site a été motivé par :

- L'existence des données d'auscultation antérieure sur les couches de roulement puisqu'il s'agit d'un chantier innovant régulièrement suivi par le Cerema ;
- Peu de contraintes liées au site (zone hors agglomération, pas de présence d'obstacles (passages à niveau...), pas de présence de zones à circulation spécifiques (giratoires, carrefours, sorties de véhicules lourds : usines, fermes...) pouvant permettre d'obtenir des résultats a priori peu perturbés par ces phénomènes ;
- Une uniformité de contraintes (climatique, géologique, de trafic) et de gestion du patrimoine sur l'ensemble du linéaire, pouvant permettre une comparaison entre les tronçons en ne tenant compte que des paramètres de construction ;
- La disponibilité relativement rapide des mesures Aigle3D permettant d'avoir rapidement des données d'auscultation à traiter et à interpréter ;
- Une relative uniformité de la structure de la chaussée.

6.2 Utilisation des données Aigle 3D sur la RD996

Le recoupement des données A3D sur le site de la RD949B doit être confronté à deux autres bases de données :

- la réalité sur site, et les observations relevées ;
- les données fournies par le gestionnaire.

6.2.1 Correspondance entre les zones relevées par l'A3D et la réalité sur site

Pour rappel, le projet DVDC – « Durabilité de vie des surfaces » ne s'intéresse qu'aux zones présentant des dégradations dues à une mauvaise tenue de la couche de surface. Il est donc nécessaire d'exclure les zones présentant des dégradations structurelles.

Pour cela, il est possible de s'appuyer sur les résultats des mesures de l'A3D afin de recenser les zones susceptibles de présenter des problématiques structurelles. Ces ajustements ne peuvent cependant être considérés viables qu'après validation suite à une observation terrain et à un échange avec le gestionnaire.

6.2.2 Correspondance entre les mesures réalisées par l'A3D et les données fournies par le gestionnaire

Dans un premier temps, les données recueillies sont principalement issues des rapports de suivi de chantiers innovants, en particulier le rapport de suivi à 5 ans rédigé en 2017.

Ces données sont composées sur l'ensemble du linéaire par :

- la connaissance précise du site et des problématiques spécifiques associées (trafic, climat, travaux...) ;
- la structure de la route, à savoir les techniques utilisées sur chacune des couches de surface composant le linéaire ;
- les relevés visuels de dégradation 3 mois après la mise en œuvre, puis à 1 an, 2 ans et 5 ans ;
- les mesures d'adhérence longitudinale à 6 mois, 1 an, 2 ans et 5 ans ;

Le passage de l'Aigle 3D sur cette section a eu lieu le 17 août 2021, dans de bonnes conditions de mesures (météo favorable, pas de pluie, route propre et sèche, etc...).

Les résultats des mesures ont été obtenus début novembre (temps de transfert des disques durs, sectionnement et calculs des descripteurs).

Dans un premier temps, les données issues de l'Aigle3D ont été projetées sur une carte via le logiciel Arcgis pro. Cette première visualisation a permis de voir l'emprise de la mesure et les principales dégradations via les descripteurs élémentaires (fissures, orniérage, raveling, macrotexture, etc...).

La conclusion de cette première observation est qu'il ne semble pas y avoir de dégradations structurelles. Par ailleurs, le raveling et l'orniérage semblent très faibles. Par contre, les fissures sont nettement visibles et on distingue très nettement les démarcations entre les différentes planches.

Toutefois, ces démarcations ne semblent pas correspondre avec les localisations des planches telles qu'indiquées dans les rapports de suivi.



Figure 9 : Exemple de démarcation entre 2 planches (ici planche à 20% d'AE en vert et planche à 40% d'AE en jaune)



Figure 10 : Exemple de démarcation entre 2 planches (ici planche REGEFALT 40% d'AE en bleu et section en aval des travaux en rose)

Il est à noter que la localisation des planches fournie par le rapport est en PR + abscisse ce qui est l'usage traditionnel. Or, les informations fournies par l'Aigle 3D sont en coordonnées géographiques (x,y,z).

Il y a donc lieu de recalcr les PR en coordonnées géographiques.

Pour cela, on peut s'appuyer sur les images d'environnement, en particulier la présence d'un panneau indiquant le PR 43+000 qui permet de recalcr les données sur ce point précis.



Figure 11 : Photo de la borne kilométrique PR 43+000 qui nous a servi de point de repère pour recalcr les planches.

Au vu de ces premières observations, il n'est pas possible de poursuivre plus en avant l'analyse des données Aigle 3D. Il convient donc de vérifier rapidement sur le terrain la localisation exacte des différentes planches expérimentales.

6.3 Obtention des résultats issus de l'outil Aigle 3D concernant la RD949B

6.3.1 Réalisation de la visite sur la RD949B

Etant donné d'une part que le site de la RD949B est très éloigné du laboratoire de Nancy et que les agents du laboratoire du Cerema d'Angers connaissent parfaitement le site puisqu'ils y ont réalisé les mesures d'adhérence au cours des dernières années, il a été décidé de réaliser une « visite » virtuelle par visio-conférence. Cette « visite » virtuelle s'est déroulée le 24 novembre 2021, afin de pouvoir échanger des informations qui pourraient compléter les données déjà répertoriées.

La « visite » virtuelle du site a consisté à parcourir l'ensemble du linéaire en notant les localisations exactes des différentes planches de travaux grâce à la localisation des PR et de leurs coordonnées géographiques correspondantes grâce aux informations fournies par les opérateurs du laboratoire d'Angers.

6.3.2 Découpage en tronçons homogène et exclusions de zones spécifiques

Suite aux échanges avec les agents du laboratoire du Cerema d'Angers et à l'observation visuelles des planches il apparaît que le découpage des différentes planches est en réalité le suivant :

	Rapport de suivi	Suite « visite » virtuelle
Planche REGEFALT BBSG 40% d'AE	PR 42+340 à 42+825	PR 42+460 à 42+825
Planche BBSG 40% d'AE	PR 42+825 à 43+136	PR 42+825 à 43+136
Planche témoin BBSG 20% d'AE	PR 43+136 à 43+508	PR 43+136 à 43+508

Figure 12 : Découpage des planches expérimentales suite à la « visite » virtuelle du 24 novembre 2021

L'examen des données issues de l'Aigle3D et en particulier les fissures, permet de vérifier que la localisation de ces planches après visite coïncide parfaitement avec la réalité du terrain.

6.4 Analyse des résultats

L'indicateur de raveling n'a pas été présenté ici, car les mesures réalisées par l'A3D ne présentent, soit, aucun résultat, ce qui signifie que l'outil n'a pas détecté de zones de raveling, soit des zones de raveling de niveau 0, c'est-à-dire des zones ne présentant pas de dégradations remarquables.

Le présent rapport présente les résultats obtenus dans l'objectif de comparer les différentes planches (avec et sans recyclage d'agrégats d'enrobés).

Les courbes présentées ci-après représentent les résultats obtenus pour le site de la RD949B. Par ailleurs, comme l'on dispose de certaines données issues des rapports de suivi de chantiers innovants, nous pouvons également les comparer aux résultats obtenus avec la mesure Aigle 3D.

Cependant, il convient d'être prudent dans cette comparaison, les méthodes et instruments de relevés n'étant pas identiques.

6.4.1 Analyse de l'orniérage petit rayon d'après les données Aigle 3D

Pour chaque tranche de profondeur d'ornière mesurée, l'A3D donne la surface totale d'ornière mesurée pour chaque planche.

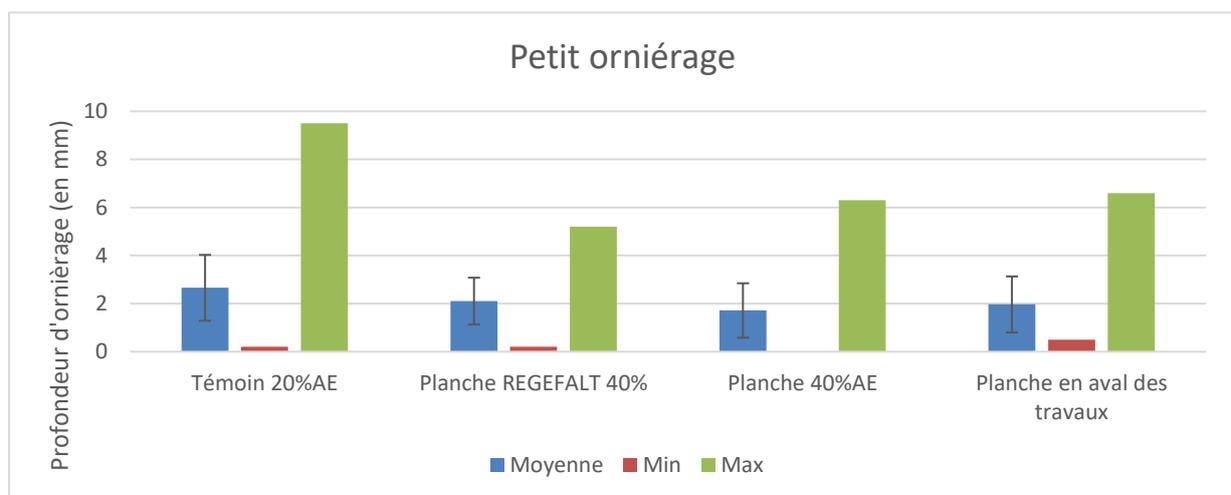
6.4.1.1 Comparaison de l'orniérage petit rayon pour chaque planche étudiée

La méthodologie proposée initialement dans le rapport « Elaboration d'une méthodologie de traitement des données dans le cadre de l'étude de la durabilité des couches de surface », prévoyait que la comparaison entre chaque planche étudiée proposée serait de classer les profondeurs d'ornière en trois catégories :

- Les petits orniérages admettant une profondeur inférieure à 10 mm (niveaux 0 à 2) ;
- Les petits orniérages admettant une profondeur comprise entre 10 mm et 20 mm (niveaux 3 et 4) ;
- Les petits orniérages admettant une profondeur supérieure à 20 mm. (niveaux 5 à 7).

Le choix de ces catégories devrait permettre une discrétisation rapide, par visualisation graphique, des niveaux de dégradations des planches selon l'indicateur « petit orniérage ».

Toutefois, il est apparu plus pertinent de travailler sans classe de valeurs, mais avec les valeurs brutes et leurs grandeurs statistiques associées : moyenne, minimum, maximum et écart-type.



Graphique 9 : Profondeur de petit orniérage (en mm) par planche

Dans le cas du site de la RD949B, les mesures réalisées par l'A3D donnent des valeurs de profondeurs d'orniérage extrêmement faibles, (inférieures à 3 mm en moyenne) qui témoignent probablement d'une bonne assise et d'une couche de roulement adaptée au trafic

rencontré sur cette section depuis sa création. En effet, on peut rappeler que cette section de route n'a fait l'objet d'aucun entretien depuis la réalisation de la couche de roulement en 2014.

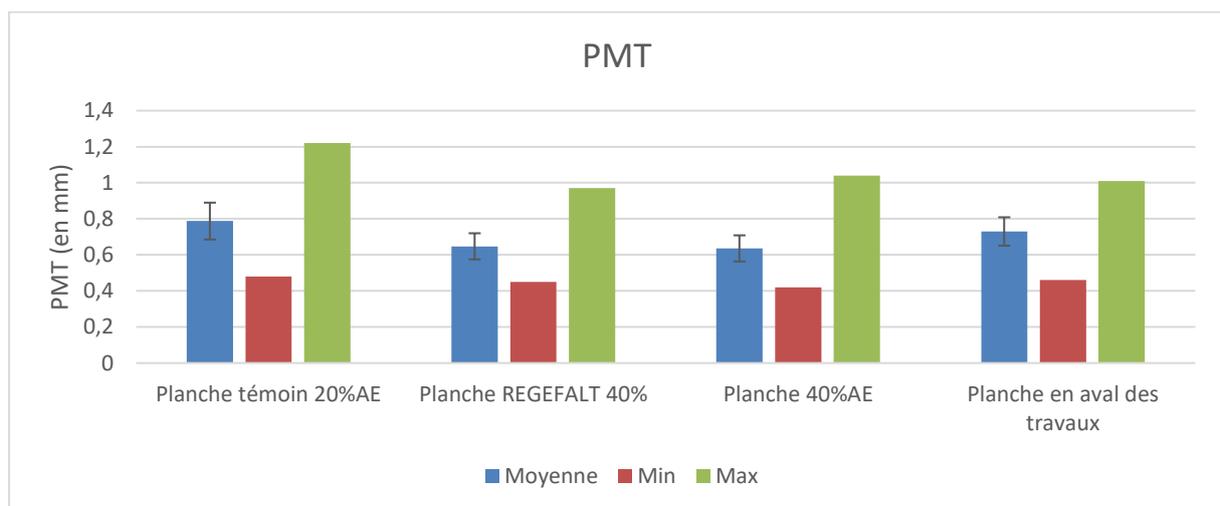
On peut constater que les valeurs moyennes d'orniérage sont plus faibles pour les planches à 40% d'AE que pour la planche à 20% d'AE. Toutefois, ces valeurs sont extrêmement proches et extrêmement faibles pour les 3 planches expérimentales, ce qui tend à dire que nous sommes plus dans l'ordre du bruit de mesure. Aussi, cet indicateur ne paraît pas discriminant dans le cadre de notre étude.

6.4.2 Analyse de la PMT d'après les données A3D

Comme pour l'orniérage petit rayon, il est apparu, là aussi, plus pertinent de travailler sans classe de valeurs, mais avec les valeurs brutes et leurs grandeurs statistiques associées : moyenne, minimum, maximum et écart-type.

6.4.2.1 Comparaison de la PMT mesurée pour chaque planche étudiée

Le graphique 3 présente les valeurs de PMT représentées majoritairement, en termes de surfaces mesurées par rapport aux surfaces de chaque planche, pour chaque planche et pour chaque axe de mesure.



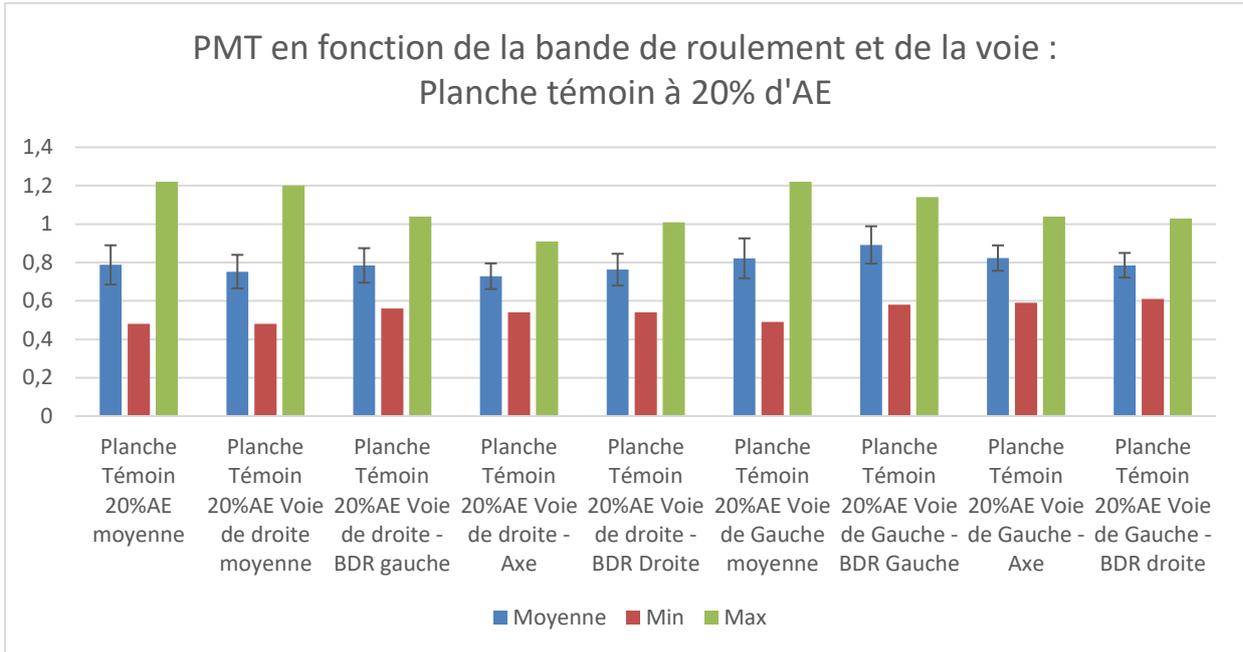
Graphique 10 : Valeurs de PMT pour chaque planche

Comme pour l'orniérage petit rayon, les valeurs moyennes de PMT sur les 3 planches sont relativement élevées et témoignent d'une macrotexture encore plutôt bonne.

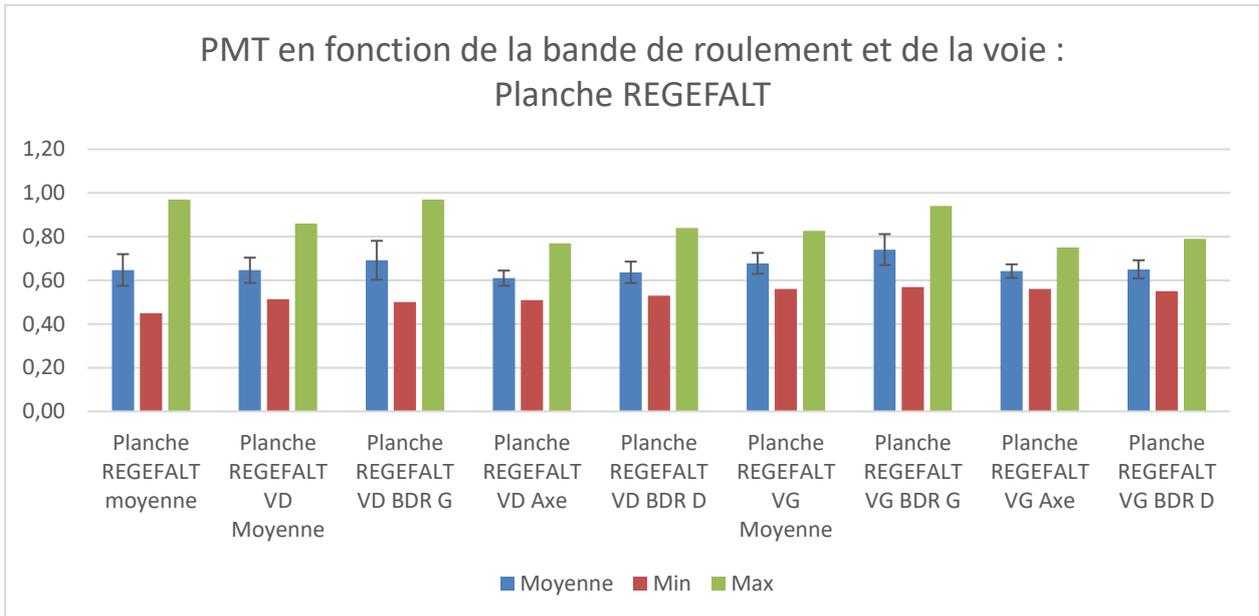
Les valeurs moyennes de PMT sont un peu plus élevées sur la planche à 20% d'AE que sur la planche à 40% d'AE, toutefois, là aussi, les valeurs moyennes de PMT sur les 3 planches sont très proches, donc on peut également conclure que cet indicateur ne paraît pas discriminant dans le cadre de notre étude.

Pour des raisons de traitement et de visualisation des résultats, il a été fait le choix dans un premier temps de ne pas faire de différenciation entre PMT en axe et en bande de roulement dans cette partie d'étude, car cela engendrait des calculs plus longs et complexes qui ne semblaient pas nécessaires à ce stade de l'étude. Par ailleurs, dans le cadre du suivi de ce chantier innovant, nous ne disposons pas d'informations sur la localisation des mesures de PMT en axe et en bande de roulement.

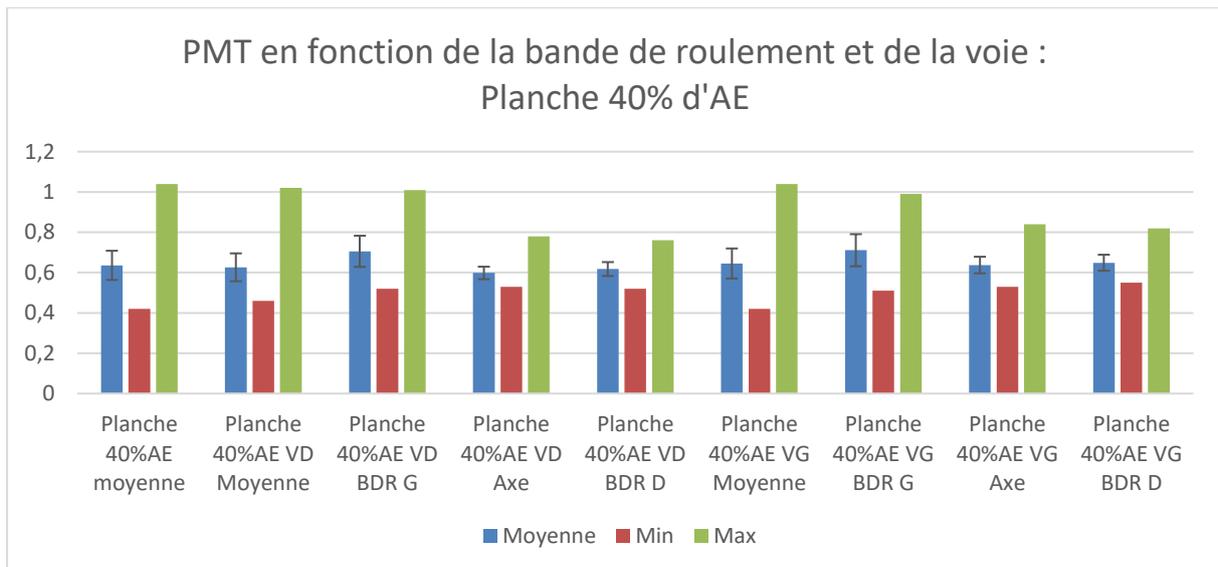
Toutefois, dans un deuxième temps, nous avons toutefois réalisés ces calculs pour une visualisation des mesures de PMT en axe et en bande de roulement.



Graphiques 11 : Valeurs de PMT en BDR et en Axe pour la planche témoin à 20% d'AE



Graphiques 12 : Valeurs de PMT en BDR et en Axe pour la planche REGEFALT



Graphiques 13 : Valeurs de PMT en BDR et en Axe pour la planche à 40% d'AE

Pour information, les valeurs des planches « moyenne » correspondent au calcul de la moyenne de l'ensemble des bandes mesurées. D'une manière générale, on constate que les valeurs de PMT en bandes de roulement (droite et gauche) sont légèrement plus élevées que les valeurs de PMT en axe.

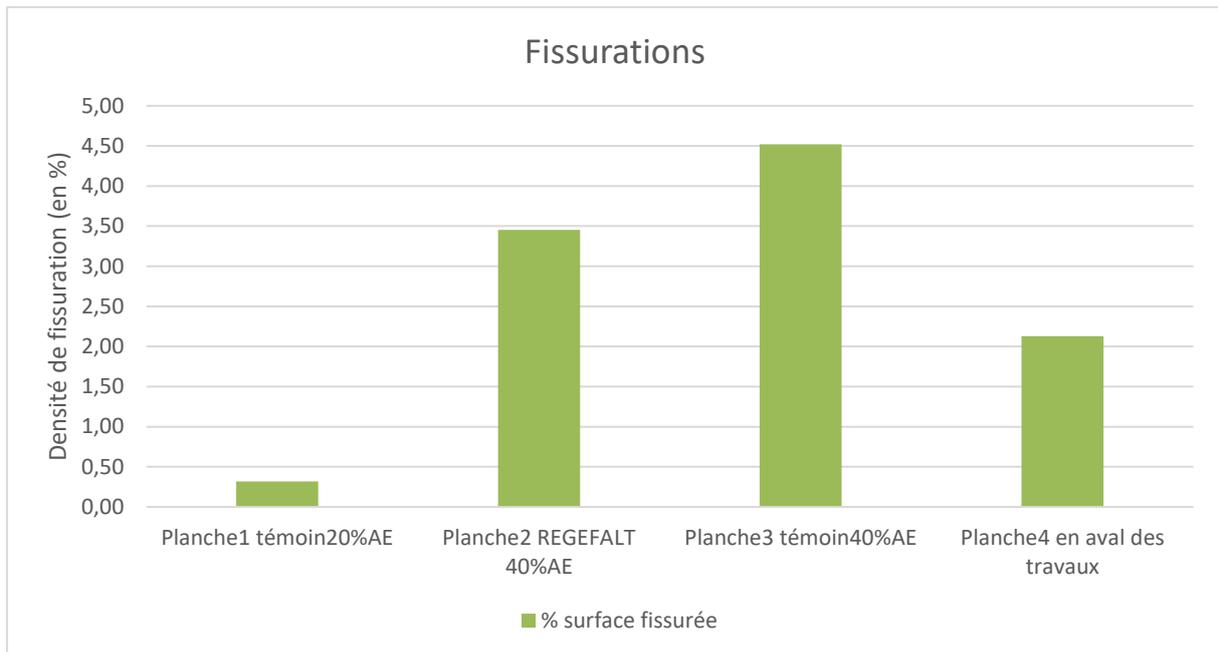
On peut constater également que les valeurs de PMT sur la voie de gauche sont légèrement plus élevées que sur la voie de droite. Cet écart étant faible, il n'est pas forcément significatif. Il serait malgré tout intéressant d'essayer de comprendre les explications de ce phénomène. Peut-être cela vient-il d'une mise en œuvre différente, ou alors de conditions de trafic différentes entre les voies de droite et celles de gauche. Malheureusement, à ce stade de l'étude, il n'est pas possible d'aller plus loin dans les conclusions.

6.4.3 Méthodologie d'analyse des fissurations et des zones sans dégradation d'après les données A3D

6.4.3.1 Etude des données de fissurations mesurées par l'A3D

Les données fournies par l'A3D concernant la fissuration sont des objets sans surface auxquels sont associés, arbitrairement, des tampons pour leur donner des surfaces. Dans ce cas de figure, il a été choisi un tampon de 10 cm autour de chaque fissure pour donner la surface de celle-ci.

Au final, nous disposons de la surface de chaque zone fissurée que nous pouvons comparer à la surface totale de la planche à laquelle la mesure est associée et obtenir un pourcentage de fissuration par planche.



Graphique 14 : Pourcentage de zones fissurées pour chaque planche pour le cas du site de la RD949B

Cette représentation graphique permet de mettre en lumière les premières observations faites à la suite de la visualisation des résultats des données sous forme cartographique. En effet, sur ces cartes les fissures sont nettement visibles et on distingue très nettement les démarcations entre les différentes planches. Il apparaît visuellement que la densité de fissure n'est pas la même d'une planche à l'autre.

Ce graphique permet donc de quantifier très précisément cette densité de fissure.

On peut dans un premier temps constater que le taux de fissuration est globalement faible pour l'ensemble des planches étudiées (<5%).

Néanmoins, si l'on compare la zone témoin à 20% d'AE avec les zones à fort taux de recyclés à 40% d'AE, on constate que le pourcentage de fissuration est bien plus important pour ces dernières, ce qui semblerait dire que ces enrobés se fissurent plus vite dans le temps.

Si l'on compare la planche REGEFALT à 40% d'AE et la planche à 40% d'AE sans liant spécifique, on constate que le pourcentage de fissure de la planche REGEFALT est légèrement inférieur à celui de la planche à 40% d'AE sans liant spécifique, sans que la différence ne soit pour autant très significative.

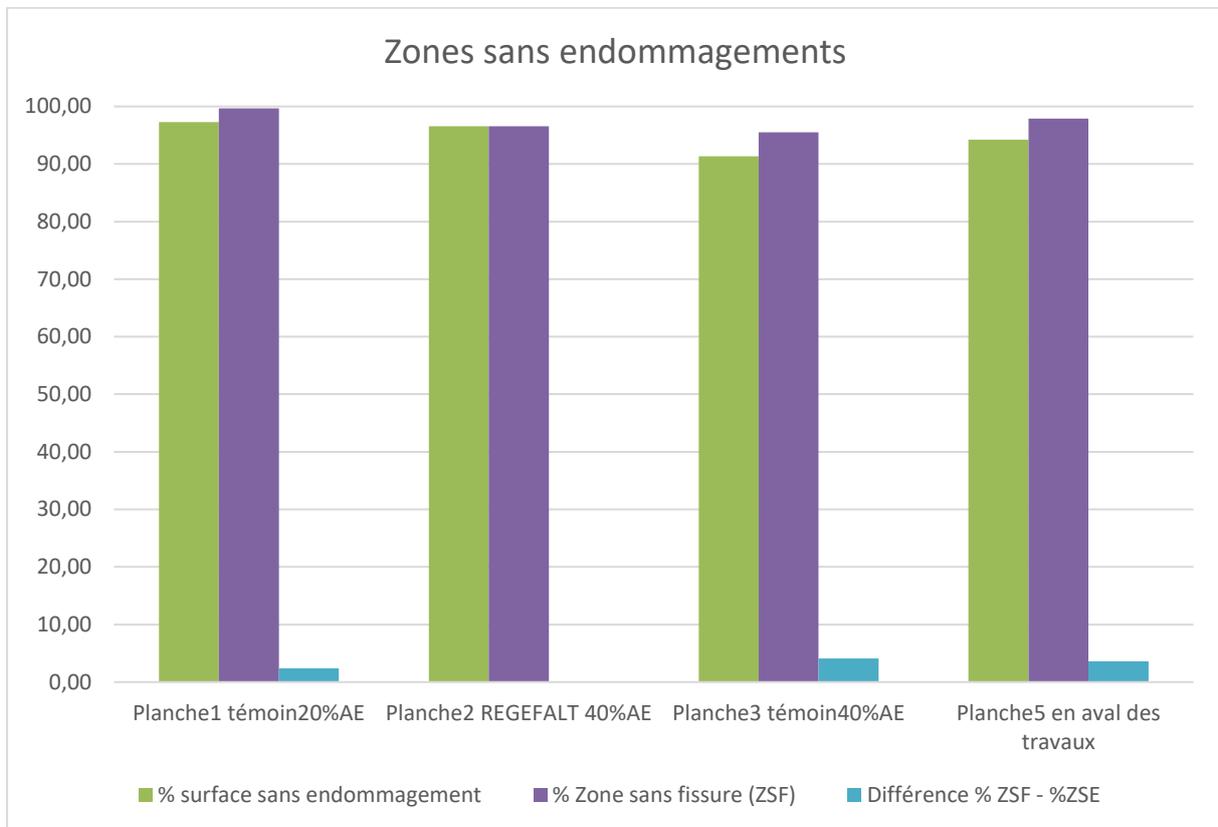
6.4.3.2 Etude des données concernant les zones sans dégradations recensées par l'A3D

L'A3D fournit, pour chaque planche, une surface correspondant aux zones sans dégradations. Cette information est utile pour présenter la santé de la couche de surface : plus la surface déduite est importante, moins la route est dégradée.

Pour rappel, la zone sans endommagement correspond à la zone où il n'y a ni zone fissurée, ni zone raveling de 01 à 05, ni zone orniérée de niveau 01 à 07.

Pour permettre une comparaison entre chaque planche, il a été choisi de représenter la proportion « surface de zone sans dégradation par rapport à la surface totale de la planche correspondante ».

A également été ajouté le pourcentage de zone sans fissure et enfin la différence entre les zones sans endommagement et les zones sans fissures.



Graphique 15 : Proportion surfacique de route ne présentant aucune dégradation pour chaque planche et en fonction de la technique de couche de roulement utilisée

Dans le cas du site de la RD949B, les proportions de zone sans dégradations sont toutes supérieures à 90% de la surface totale pour les planches expérimentales réalisées en 2014.

Ces valeurs élevées permettent de conclure à une bonne tenue des couches de roulement des planches du site qui est due à leurs âges relativement peu élevés, ainsi probablement qu'à une bonne structure de chaussée.

L'on peut également voir sur toutes les planches que la proportion de zone sans endommagement est quasiment égale à la proportion de zone sans fissure. Ceci est assez logique puisqu'on a vu précédemment qu'il n'y avait pas de raveling et très peu d'orniérage.

Par conséquent, les zones sans endommagement correspondent quasiment aux zones sans fissures. On voit bien là encore que la fissuration est l'indicateur déterminant pour la comparaison des différentes planches dans le cadre de cette étude.

6.5 Comparaison avec les données issues du suivi de chantiers innovants

Comme évoqué au début de ce rapport (cf§ 6), nous disposons, en plus des données issues des mesures A3D, des données recueillies lors des suivis de chantiers innovants.

Pour rappel, ces données sont composées sur l'ensemble du linéaire par :

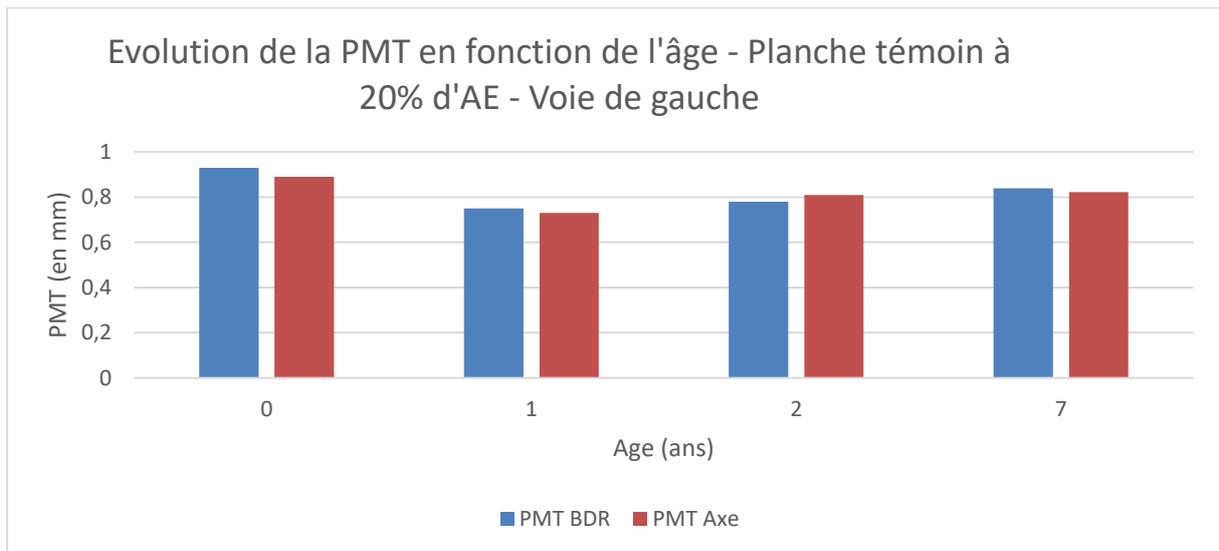
- la connaissance précise du site et des problématiques spécifiques associées (trafic, climat, travaux...);
- les dates de mise en œuvre pour chaque couche composant la route ;

- les mesures de macrotexture lors de la mise en œuvre, puis à 1 an, 2 ans et 5 ans ;
- les mesures d'adhérence longitudinale à 3 mois, 1 an, 2 ans et 5 ans ;

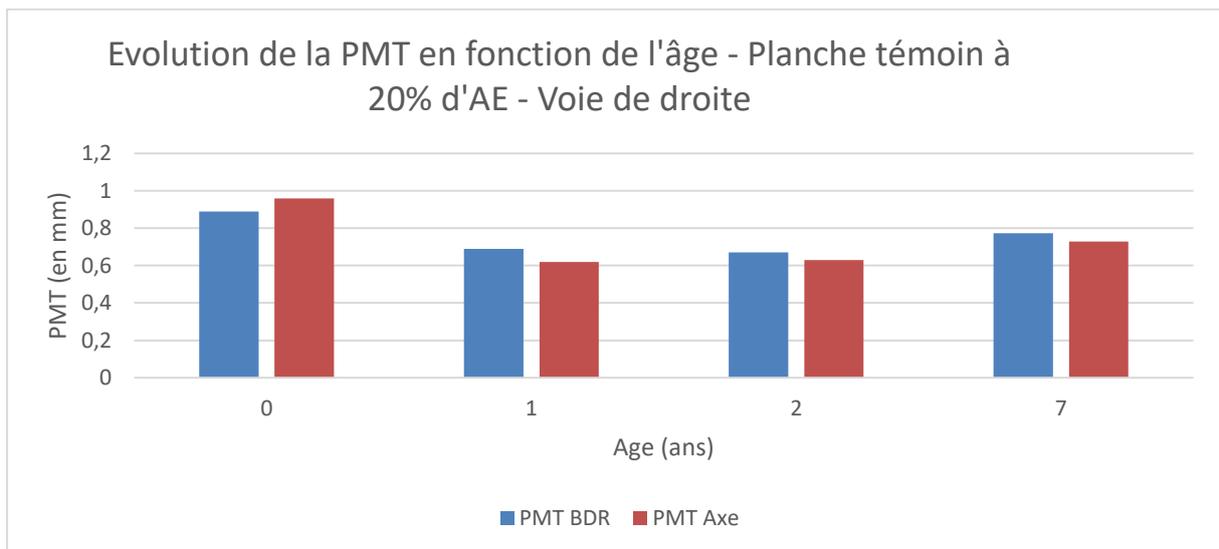
Si l'on retient les données communes aux mesures Aigle 3D et aux rapports de suivi, il ne reste plus que :

- les mesures de macrotexture lors de la mise en œuvre, puis à 1 an, 2 ans et 5 ans ;

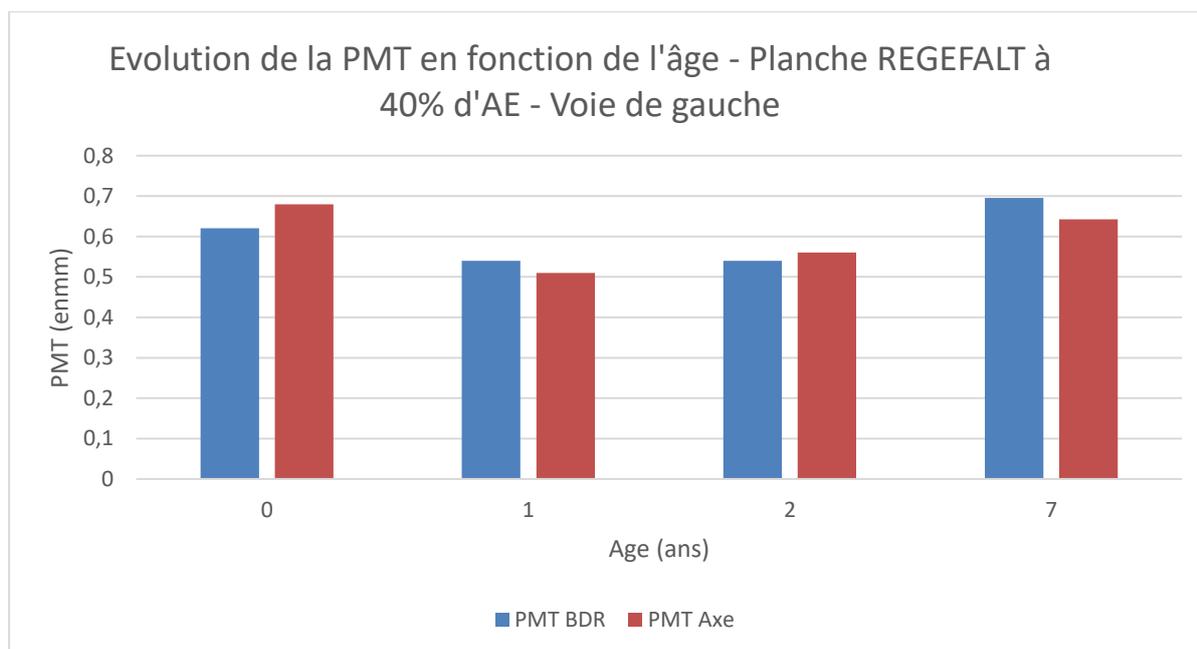
Nous pouvons donc essayer de comparer les mesures de macrotexture au cours des années, pour chacune des planches, bien que les techniques d'acquisition ne soient pas identiques, ce qui rend la comparaison assez incertaine.



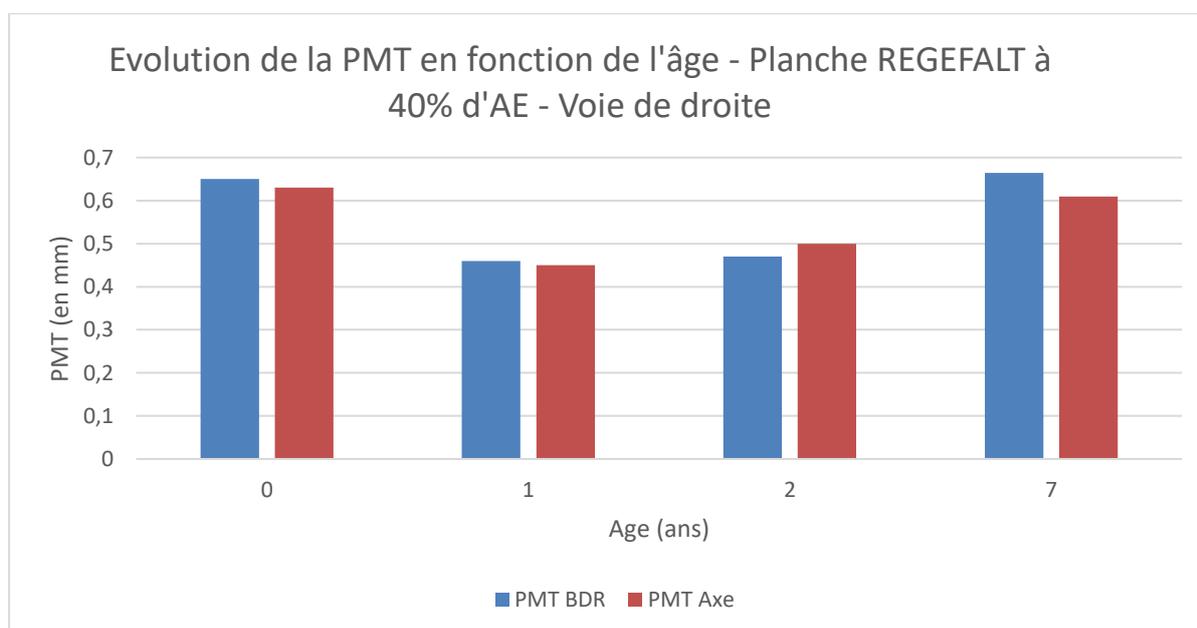
Graphique 16 : Evolution de la PMT en fonction de l'âge pour la planche témoin à 20% d'AE (Voie de gauche)



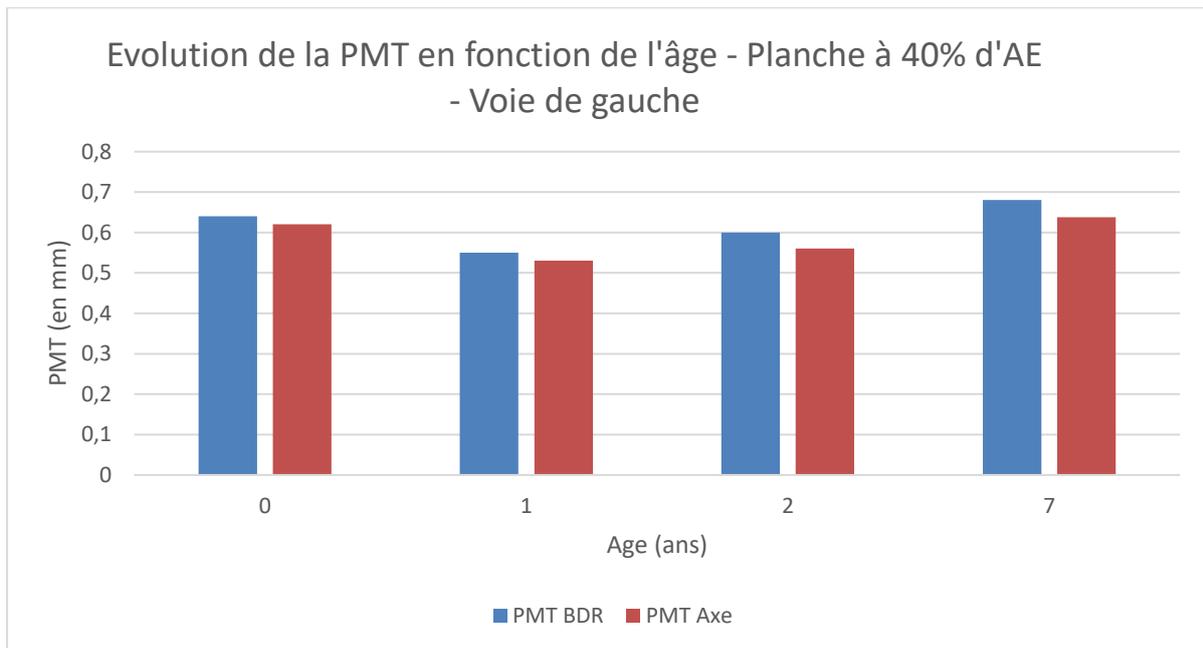
Graphique 17 : Evolution de la PMT en fonction de l'âge pour la planche témoin à 20% d'AE (Voie de droite)



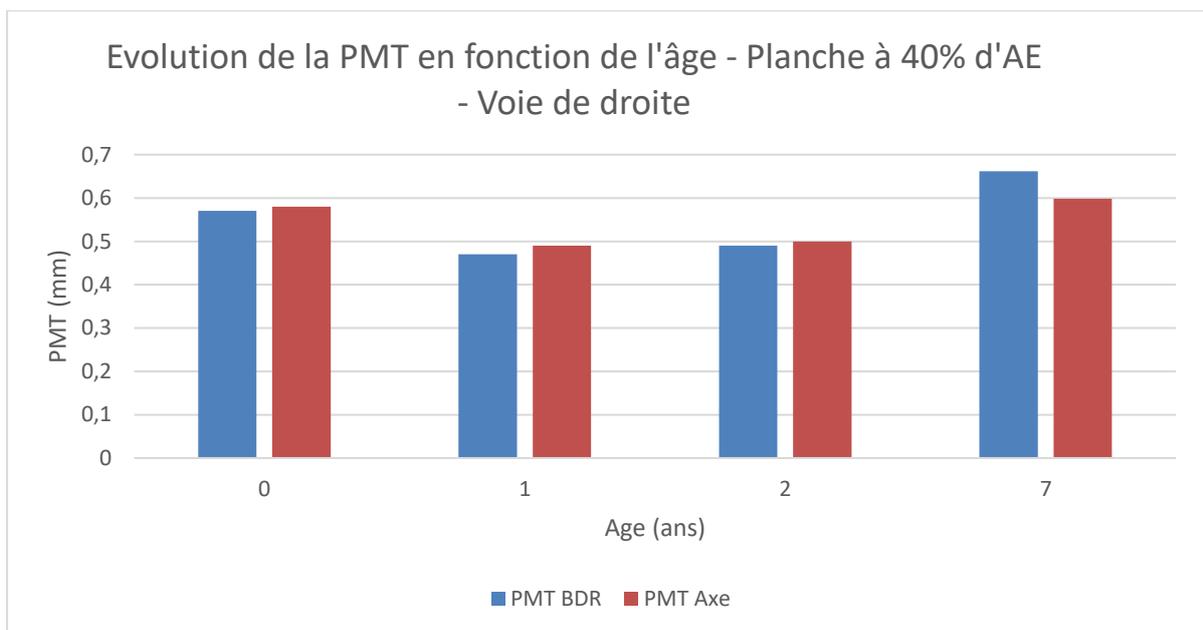
Graphique 18 : Evolution de la PMT en fonction de l'âge pour la planche REGEFALT à 40% d'AE (Voie de gauche)



Graphique 19 : Evolution de la PMT en fonction de l'âge pour la planche REGEFALT à 40% d'AE (Voie de droite)



Graphique 20 : Evolution de la PMT en fonction de l'âge pour la planche à 40% (Voie de gauche)



Graphique 21 : Evolution de la PMT en fonction de l'âge pour la planche à 40% (Voie de droite)

L'analyse de ces 3 graphiques permet de conclure que les valeurs moyennes de PMT à 7 ans mesurés par l'Aigle3D sont assez proches des valeurs mesurées à 0, 1, et 2 ans lors des suivis de chantier innovant (essais à la tache de sable), bien qu'en réalité on ne devrait pas les comparer puisque les outils et les dates de mesure sont très différents.

Si l'on fait abstraction de ce point, l'on constate que les valeurs moyennes de PMT varient finalement assez peu dans le temps, ce qui ne semble pas traduire de dégradation des performances sur ce point au cours du temps.

Les valeurs de PMT à 0, 1 et 2 ans issues du rapport de suivi de 2017, semblent confirmer les observations réalisées suite aux dépouillements des données Aigle 3D, à savoir :

- Valeurs de PMT légèrement plus faibles sur les planches à 40% d'AE que sur la planche à 20% d'AE ;
- Peu de différence de valeurs de PMT entre l'axe et les bandes de roulement, que ce soit sur la voie de droite ou la voie de gauche ;
- Valeurs de PMT un peu plus élevées en voie de gauche qu'en voie de droite.

Toutefois, comme nous l'avons vu précédemment, l'indicateur le plus déterminant pour comparer l'évolution des sections au cours du temps semble être la fissuration.

Malheureusement, le rapport de suivi de 2017 se focalisait principalement sur l'adhérence et donc nous ne disposons pas de données concernant les dégradations et notamment les fissures, car il n'y a pas eu de relevés de dégradation sur cette section.

6.6 Conclusions pour le site de la RD949B

Au vu des mesures réalisées en août 2021, à l'aide de l'outil Aigle 3D, sur ces sections de la RD949B, il apparaît que, comme pour la section RD996 (Côte d'Or), l'indicateur le plus pertinent pour comparer les différentes planches est l'observation et le recensement des zones fissurées.

A l'analyse de ces résultats, il apparaît que les conclusions sont relativement similaires à celles émises suite à l'analyse des résultats de la section de la RD996, à savoir :

- Le taux de fissuration est relativement faible après 8 ans de service ;
- Les planches d'enrobés à 40% d'AE semblent présenter plus de fissuration que la planche à 20% d'AE ;
- La planche d'enrobés à 40% d'AE avec liant spécifique REGEFALT semble avoir un taux de fissuration légèrement moins important que la planche constituée d'une couche de roulement formulée avec 40% d'agrégats d'enrobés sans liant spécifique.

A noter que le taux de fissuration observé sur la RD949B est environ deux fois moins important que celui observé sur la RD996. Il apparaît toutefois très hasardeux de comparer ces planches entre elles, tant les sections sont différentes et de nombreux paramètres peuvent influencer et rendre la comparaison difficile voire quasiment impossible (âge de la couche de roulement, trafic, climat, structure, etc...).

Enfin, s'il est intéressant de constater que les résultats observés sur la RD949B semblent corroborer ceux observés sur la RD996, il sera intéressant de voir les résultats obtenus sur les autres planches contenant des couches de surface à fort taux de recyclage qui doivent également être auscultées dans le cadre de ce projet, pour étayer ces premières conclusions avec un échantillon statistique plus représentatif que celui dont on dispose jusqu'à présent.

7 Site étudié n°3 : RD84 (CD83)

7.1 Présentation du site

Le choix du site correspondant à une cible pour le projet DVDC – « Durabilité de vie des couches de surfaces » appliqué aux matériaux recyclés, puisqu'il s'agit de planches d'enrobés à recyclage élevé (30%) ayant plus de 7 ans (date de mise en œuvre juin 2014).

Sur cette section expérimentale, on ne dispose malheureusement que de peu de données. Nous disposons seulement des formulations d'enrobés (10 planches à 30% d'AE) et de valeurs de PMT mesurées en décembre 2014.

Le site étudié est un tronçon de route départementale (RD84) d'une longueur d'environ 2,35 km situé à proximité de la commune du Thoronet dans le département du Var (CD 83).

Il s'agit d'une route assez sinueuse située dans une zone vallonnée.



Figure 13 : Plan de situation de la section retenue (RD84)

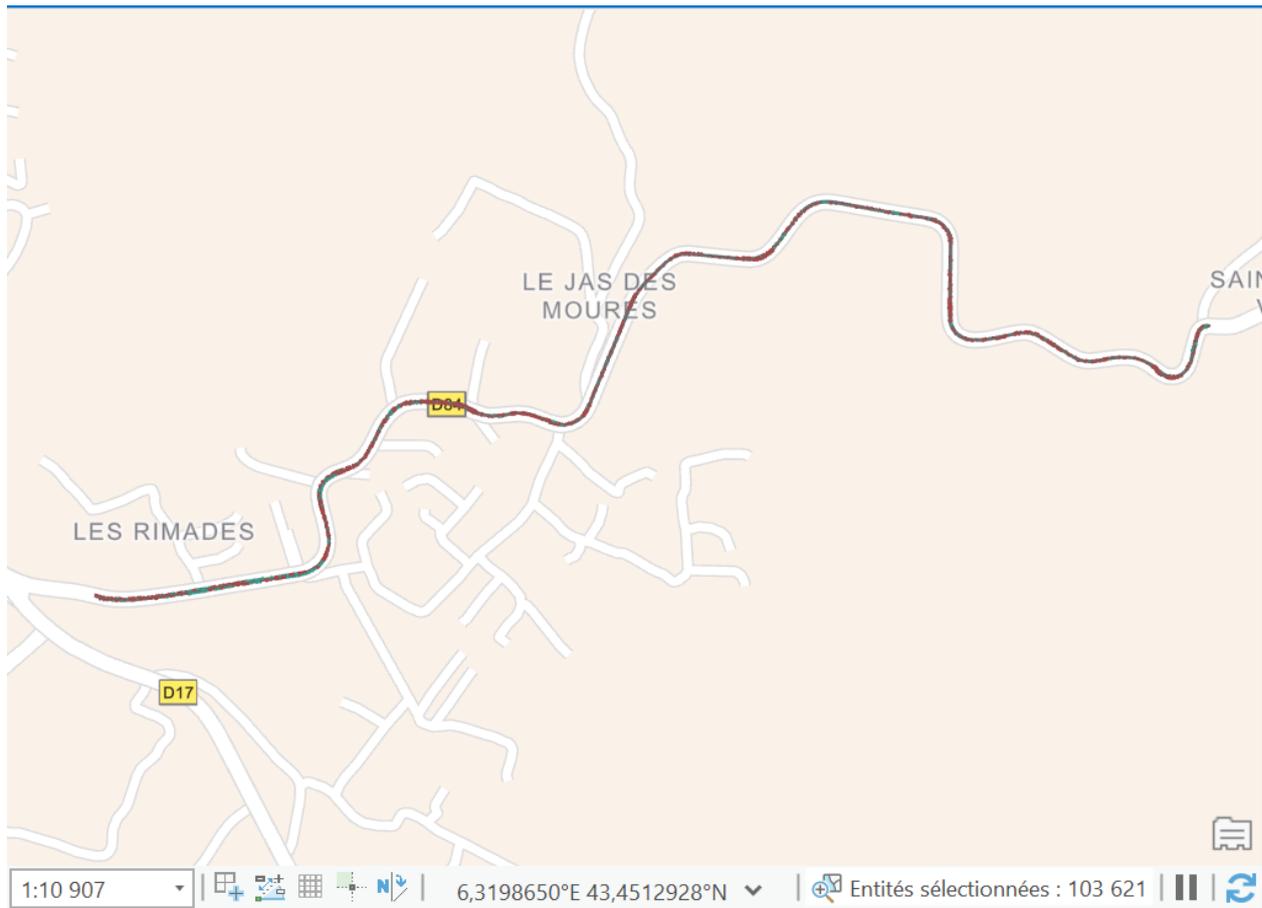


Figure 14 : Plan de localisation de la section retenue (RD84)

Le trafic de la section n'est pas connu. On peut imaginer qu'il est relativement faible car il s'agit plutôt d'un réseau de desserte locale.

Il s'agit d'un site comportant 10 planches d'enrobés constituées d'un BBSG à 30% d'AE. Nous ne connaissons malheureusement pas le positionnement des planches expérimentales. Toutefois, les planches étant identiques cela ne nous apporterait pas plus d'informations.

La mise en œuvre des différents produits a été réalisée en juin 2014.

Le choix de ce site a été motivé par :

- L'existence de quelques données d'auscultation antérieure sur les couches de roulement (mesures de PMT) ;
- Peu de contraintes liées au site (zone hors agglomération, pas de présence d'obstacles (passages à niveau...), pas de présence de zones à circulation spécifiques (giratoires, carrefours, sorties de véhicules lourds : usines, fermes...) pouvant permettre d'obtenir des résultats a priori peu perturbés par ces phénomènes ;
- Une uniformité de contraintes (climatique, géologique, de trafic) et de gestion du patrimoine sur l'ensemble du linéaire, pouvant permettre une comparaison entre les tronçons en ne tenant compte que des paramètres de construction ;

- La disponibilité relativement rapide des mesures Aigle 3D permettant d'avoir rapidement des données d'auscultation à traiter et à interpréter ;
- Des planches d'enrobés en BBSG à plus de 30% d'AE.

7.2 Utilisation des données Aigle 3D sur la RD84

Le recoupement des données A3D sur le site de la RD84 doit être confronté à deux autres bases de données :

- la réalité sur site, et les observations relevées ;
- les données fournies par le gestionnaire.

7.2.1 Correspondance entre les zones relevées par l'A3D et la réalité sur site

Pour rappel, le projet DVDC – « Durabilité de vie des surfaces » ne s'intéresse qu'aux zones présentant des dégradations dues à une mauvaise tenue de la couche de surface. Il est donc nécessaire d'exclure les zones présentant des dégradations structurelles.

Pour cela, il est possible de s'appuyer sur les résultats des mesures de l'A3D afin de recenser les zones susceptibles de présenter des problématiques structurelles. Ces ajustements ne peuvent cependant être considérés viables qu'après validation suite à une observation terrain et à un échange avec le gestionnaire.

7.2.2 Correspondance entre les mesures réalisées par l'A3D et les données fournies par le gestionnaire

Le passage de l'Aigle 3D sur cette section a eu lieu le 26 mai 2021, dans de bonnes conditions de mesures (météo favorable, pas de pluie, route propre et sèche, etc...).

Les résultats des mesures ont été obtenus début novembre (temps de transfert des disques durs, sectionnement et calculs des descripteurs).

Dans un premier temps, les données issues de l'Aigle3D ont été projetées sur une carte via le logiciel Arcgis pro. Cette première visualisation a permis de voir l'emprise de la mesure et les principales dégradations via les descripteurs élémentaires (fissures, orniérage, raveling, macrotexture, etc...).

La conclusion de cette première observation est qu'il semble y avoir quelques dégradations structurelles, avec un particulier des affaissements de rives assez marquées de chaque côté de la chaussée. Par ailleurs, une partie de la section desservant des habitations, on peut aussi observer des dégradations provenant de la présence de réseaux enterrés (assainissement, eau potable, électricité, etc...). Le raveling et l'orniérage sont relativement faibles, mais toutefois plus importants que sur les autres sections étudiées auparavant.

Les fissures sont relativement visibles, mais on ne distingue pas de démarcations entre les différentes planches, puisqu'elles sont de même nature.



Figure 15 : Image de la RD84 montrant des affaissements de rives dans les virages



Figure 16 : Exemple de traversées de réseaux (fissures obliques et parallèles en travers de la chaussée)



Figure 17 : Le même exemple de traversées de réseaux visible à l'aide des images de la route (Google Streets)

7.3 Obtention des résultats issus de l'outil Aigle 3D concernant la RD84

7.3.1 Réalisation de la visite sur la RD84

Etant donné que d'une part, le site est très éloigné du laboratoire de Nancy et que d'autre part, il ne dispose que de planches identiques (BBSG à 30% d'AE), il n'a pas été réalisé de visite de cette section.

7.4 Méthodologie d'analyse des résultats

L'indicateur de raveling n'a pas été présenté ici, car les mesures réalisées par l'A3D ne présentent, soit, aucun résultat, ce qui signifie que l'outil n'a pas détecté de zones de raveling, soit des zones de raveling de niveau 0, c'est-à-dire des zones ne présentant pas de dégradations remarquables.

Le présent rapport présente les résultats obtenus dans l'objectif de comparer les différentes planches (avec et sans recyclage d'agrégats d'enrobés).

Les courbes présentées ci-après représentent les résultats obtenus pour le site de la RD84.

Par ailleurs, comme l'on dispose de certaines données issues des rapports de suivi de chantiers innovants, nous pouvons également les comparer aux résultats obtenus avec la mesure Aigle 3D.

Cependant, il convient d'être prudent dans cette comparaison, les méthodes et instruments de relevés n'étant pas identiques.

7.4.1 Analyse de l'orniérage petit rayon d'après les données Aigle 3D

Pour chaque tranche de profondeur d'ornière mesurée, l'A3D donne la surface totale d'ornière mesurée pour chaque planche.

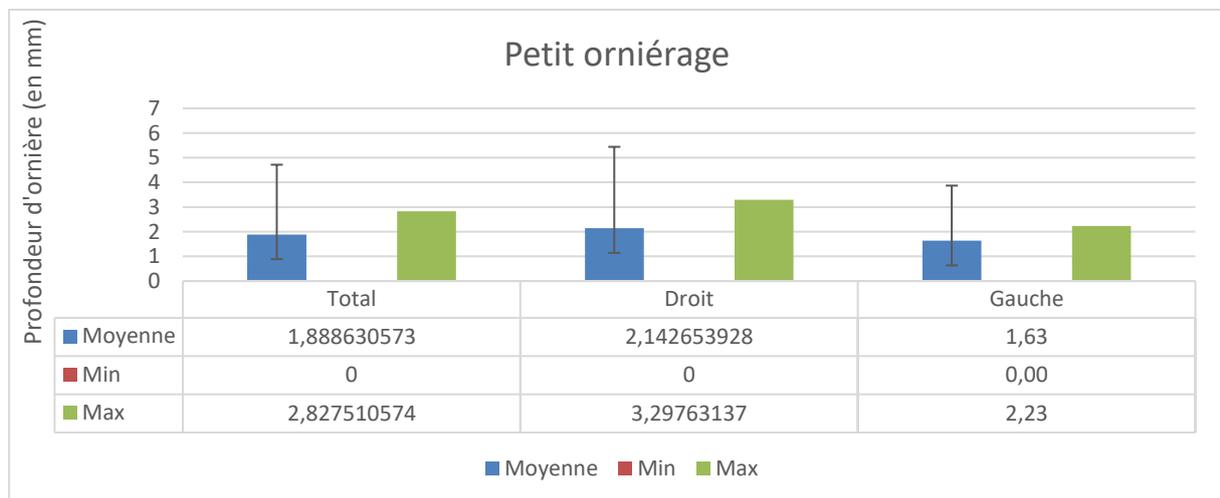
7.4.1.1 Comparaison de l'orniérage petit rayon pour chaque planche étudiée

La méthodologie proposée initialement dans le rapport « Elaboration d'une méthodologie de traitement des données dans le cadre de l'étude de la durabilité des couches de surface », prévoyait que la comparaison entre chaque planche étudiée proposée serait de classer les profondeurs d'ornière en trois catégories :

- Les petits orniérages admettant une profondeur inférieure à 10 mm (niveaux 0 à 2) ;
- Les petits orniérages admettant une profondeur comprise entre 10 mm et 20 mm (niveaux 3 et 4) ;
- Les petits orniérages admettant une profondeur supérieure à 20 mm (niveaux 5 à 7).

Le choix de ces catégories devrait permettre une discrétisation rapide, par visualisation graphique, des niveaux de dégradations des planches selon l'indicateur « petit orniérage ».

Toutefois, il est apparu plus pertinent de travailler sans classe de valeurs, mais avec les valeurs brutes et leurs grandeurs statistiques associées : moyenne, minimum, maximum et écart-type.



Graphique 22 : Profondeur de petit orniérage (en mm) par planche

Dans le cas du site de la RD84, les mesures réalisées par l'A3D donnent des valeurs de profondeurs d'orniérage moyennes extrêmement faibles (inférieures à 2,5 mm en moyenne) qui témoignent probablement d'une bonne assise et d'une couche de roulement adaptée au trafic rencontré sur cette section depuis sa création. *A priori*, cette section de route n'a fait l'objet d'aucun entretien depuis la réalisation de la couche de roulement en 2014.

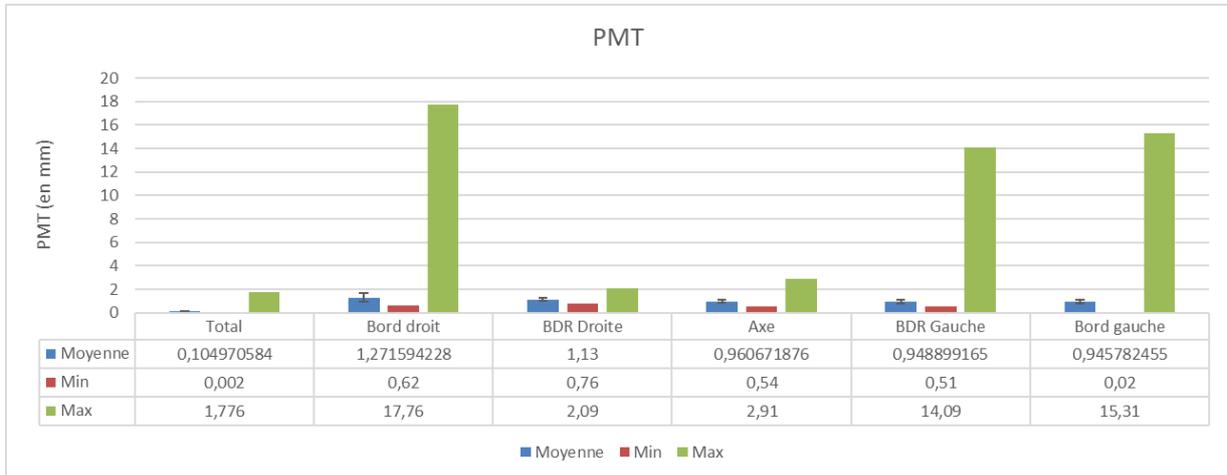
On ne peut pas aller plus loin dans notre analyse dans la mesure où nous n'avons qu'une seule planche sur ce site.

7.4.2 Analyse de la PMT d'après les données A3D

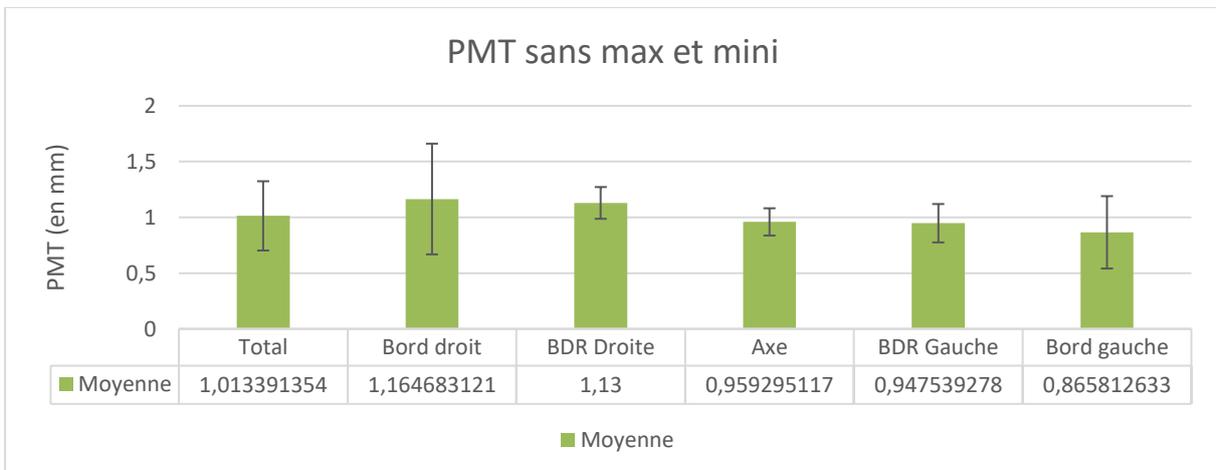
Comme pour l'orniérage petit rayon, il est apparu, là aussi, plus pertinent de travailler sans classe de valeurs, mais avec les valeurs brutes et leurs grandeurs statistiques associées : moyenne, minimum, maximum et écart-type.

7.4.2.1 Comparaison de la PMT mesurée pour chaque planche étudiée

Le graphique 3 présente les valeurs de PMT représentées majoritairement, en termes de surfaces mesurées par rapport aux surfaces de chaque planche, pour chaque planche et pour chaque axe de mesure.



Graphique 23 : Valeurs de PMT en BDR et en Axe



Graphique 24 : Valeurs de PMT en BDR et en Axe (sans les maxi)

Les valeurs moyennes de PMT sont relativement élevées (>0,8mm) et témoignent d'une macrotexture encore plutôt bonne.

Il est à noter que les minimums de valeur de PMT sont parfois très faibles et proches de 0. C'est le cas pour les valeurs obtenues sur le bord gauche de la chaussée. Cela provient très probablement de mesures qui se trouvent hors domaine de validité de l'appareil (probablement dans l'accotement de la chaussée) et qui s'explique par la configuration du site (route étroite sinueuse sans marquage de rive).

D'une manière générale, on constate que les valeurs moyennes de PMT en bord et en bande de roulement droite sont légèrement plus élevées que les valeurs de PMT en bandes de roulement gauche ou en axe.

Cela s'explique probablement par la présence de nombreux affaissements de rives en bord de chaussée.

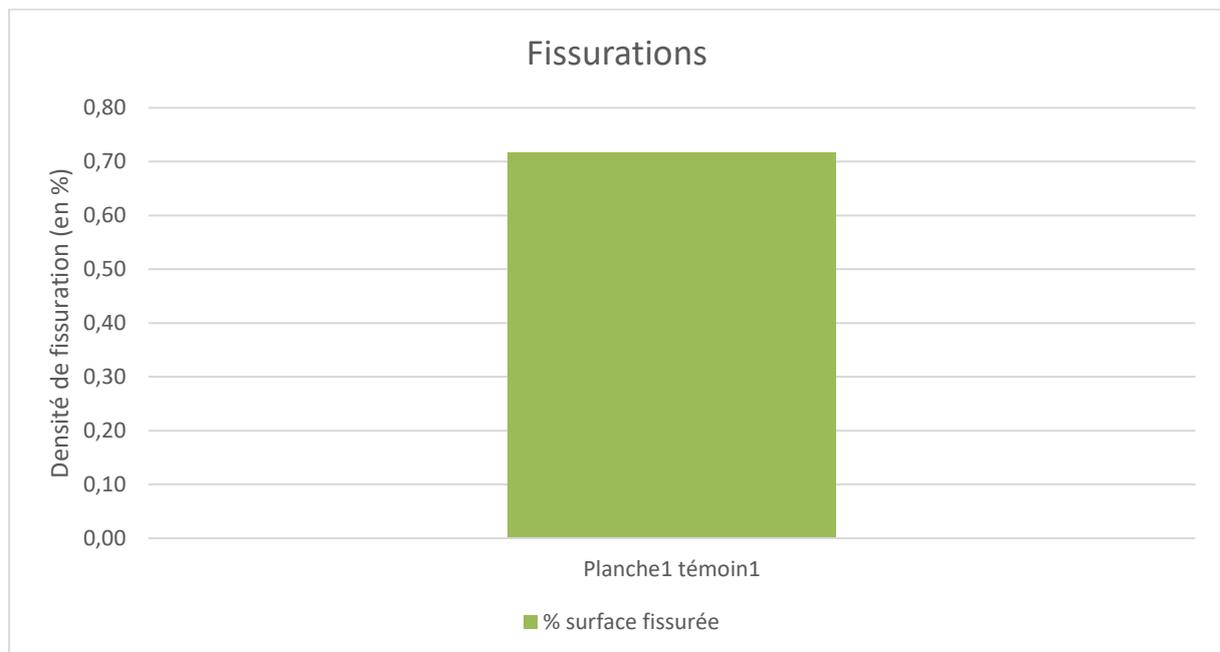
Ceci est encore plus visible quand on regarde les maximums de PMT qui sont très élevés sur les bords (droits et gauches) de la chaussée.

7.4.3 Analyse des fissurations et des zones sans dégradation d'après les données A3D

7.4.3.1 Etude des données de fissurations mesurées par l'A3D

Les données fournies par l'A3D concernant la fissuration sont des objets sans surface auxquels sont associés, arbitrairement, des tampons pour leur donner des surfaces. Dans ce cas de figure, il a été choisi un tampon de 10 cm autour de chaque fissure pour donner la surface de celle-ci.

Au final, nous disposons de la surface de chaque zone fissurée que nous pouvons comparer à la surface totale de la planche à laquelle la mesure est associée et obtenir un pourcentage de fissuration par planche.



Graphique 25 : Pourcentage de zones fissurées pour chaque planche pour le cas du site de la RD84

Cette représentation graphique permet de mettre en lumière les premières observations faites à la suite de la visualisation des résultats des données sous forme cartographique. En effet, sur ces cartes les fissures sont nettement visibles et on distingue très nettement les démarcations entre les différentes planches et il apparaît visuellement que la densité de fissure n'est pas la même d'une planche à l'autre.

Ce graphique permet donc de quantifier très précisément cette densité de fissure.

On peut dans un premier temps constater que le taux de fissuration est globalement faible pour l'ensemble des planches étudiées (<1%).

Contrairement aux autres sites déjà étudiés, il n'est pas possible d'aller plus loin dans notre analyse dans la mesure où nous n'avons qu'une seule planche sur ce site.

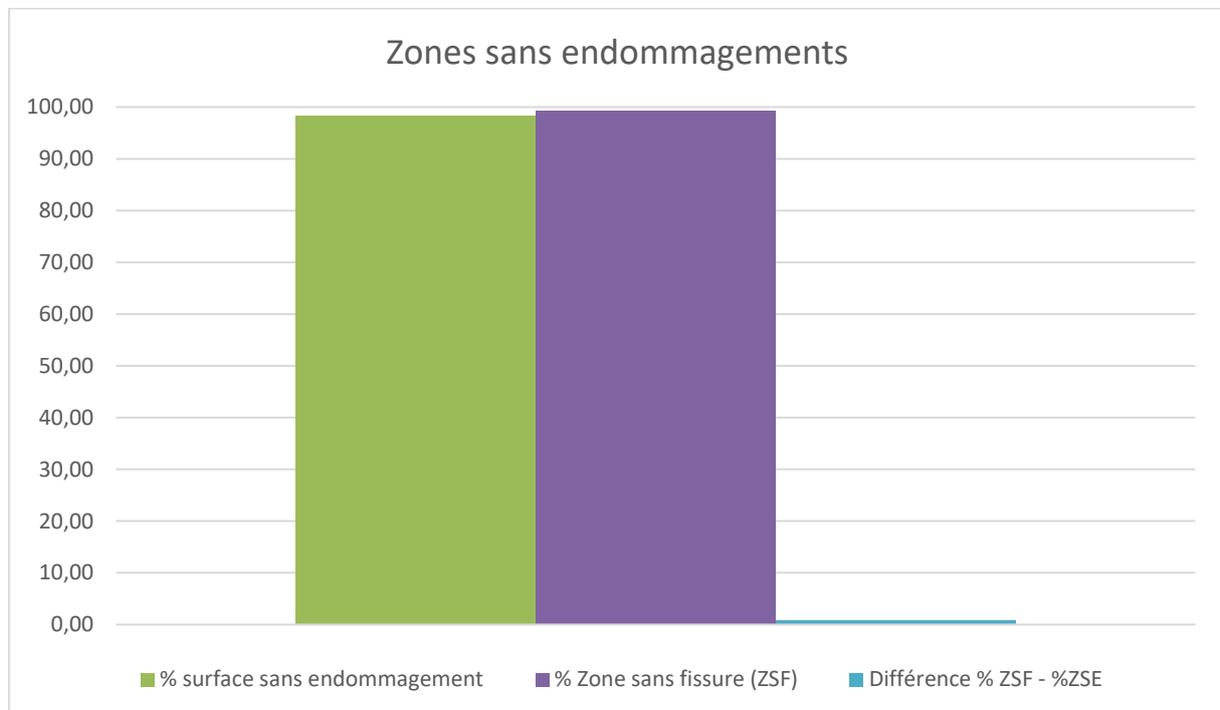
7.4.3.2 Etude des données concernant les zones sans dégradations recensées par l'A3D

L'A3D fournit, pour chaque planche, une surface correspondant aux zones sans dégradations. Cette information est utile pour présenter la santé de la couche de surface : plus la surface déduite est importante, moins la route est dégradée.

Pour rappel, la zone sans endommagement correspond à la zone où il n'y a ni zone fissurée, ni zone raveling de 01 à 05, ni zone orniérée de niveau 01 à 07.

Pour permettre une comparaison entre chaque planche, il a été choisi de représenter la proportion « surface de zone sans dégradation par rapport à la surface totale de la planche correspondante ».

A également été ajouté le pourcentage de zone sans fissure et enfin la différence entre les zones sans endommagement et les zones sans fissures.



Graphique 26 : Proportion surfacique de route ne présentant aucune dégradation pour chaque planche

Dans le cas du site de la RD84, les proportions de zone sans dégradations sont toutes supérieures à 95% de la surface totale pour les planches expérimentales réalisées en 2014.

Ces valeurs élevées permettent de conclure à une bonne tenue des couches de roulement des planches du site qui est due à leurs âges relativement peu élevés, ainsi probablement qu'à une bonne structure de chaussée, sans que nous ne disposions de plus d'informations sur celle-ci.

L'on peut également voir que la proportion de zone sans endommagement est quasiment égale à la proportion de zone sans fissure. Ceci est assez logique puisqu'on a vu précédemment qu'il n'y avait pas de raveling et très peu d'orniérage.

Par conséquent, les zones sans endommagement correspondent quasiment aux zones sans fissures. On voit bien là encore que la fissuration est l'indicateur déterminant pour la comparaison des différentes planches dans le cadre de cette étude.

7.5 Comparaison avec les données issues du suivi de chantiers innovants

Comme évoqué au début de ce rapport (cf§ 5), nous disposons, en plus des données issues des mesures A3D, de quelques données recueillies lors des suivis de chantiers innovants.

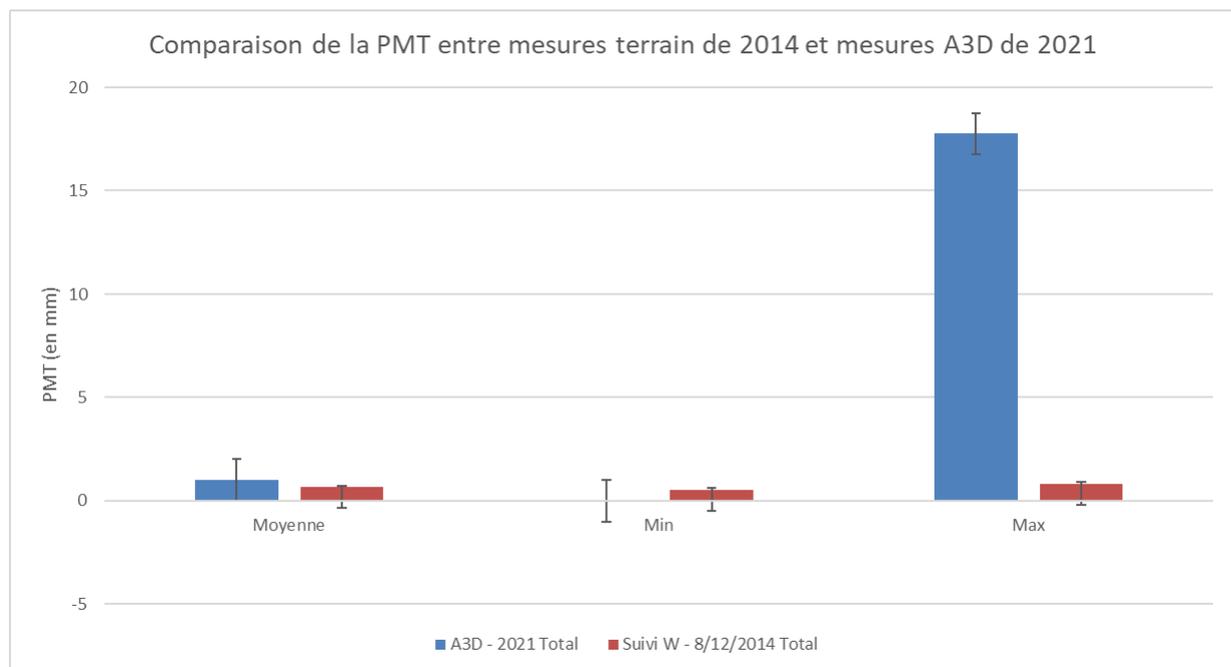
Pour rappel, ces données sont composées sur l'ensemble du linéaire par :

- les dates de mise en œuvre pour chaque couche composant la route ;
- les mesures de macrotexture 6 mois après la mise en œuvre ;

Si l'on retient les données communes aux mesures Aigle 3D et aux rapports de suivi, il ne reste plus que :

- les mesures de macrotexture 6 mois après la mise en œuvre ;

Nous pouvons donc essayer de comparer les mesures de macrotexture au cours des années, pour chacune des planches, bien que les techniques d'acquisition ne soient pas identiques, ce qui rend la comparaison assez incertaine.



Graphique 27 : Comparaison de la PMT en fonction de l'âge et du type de mesures

L'analyse de ce graphique permet de conclure que les valeurs moyennes de PMT à 7 ans mesurés par l'Aigle 3D sont assez différentes des valeurs mesurées à 6 mois lors du suivi de chantier innovant (essais à la tache de sable). Cela peut s'expliquer soit par le fait que les outils de mesures sont différents, soit par l'évolution de la chaussée au cours du temps.

Les différences très importantes de valeurs maximales de PMT mesurées peuvent probablement s'expliquer par le fait que certaines valeurs mesurées par l'Aigle 3D se situent en bord de chaussée où celle-ci présente de nombreux affaissement de rives.

D'ailleurs, cela est vérifié par le fait que les valeurs maximales de PMT mesurées en axe et bande de roulement droite sont inférieures à 2 mm contre plus de 15 mm pour les autres bandes de mesures.

En effet, du fait de la configuration du site (route étroite sinueuse sans marquage de rive), il est très probable que certaines mesures soient hors domaine de validité de l'appareil (probablement localisées dans l'accotement de la chaussée).

Là encore, contrairement aux autres sites déjà étudiés, il n'est pas possible d'aller plus loin dans notre analyse dans la mesure où nous n'avons qu'une seule planche sur ce site.

Toutefois, comme nous l'avons vu précédemment, l'indicateur le plus déterminant pour comparer l'évolution des sections au cours du temps semble être la fissuration.

Malheureusement, nous ne disposons pas de données concernant les dégradations et notamment les fissures, car nous n'avons pas retrouvé d'informations sur le suivi de cette section.

7.6 Conclusions pour le site de la RD84

Au vu des mesures réalisées en mai 2021, à l'aide de l'outil Aigle3D, sur ces sections de la RD84, il apparaît que le taux de fissuration observé sur la RD84 est relativement faible (inférieur à 1%) et moins important que ceux observés sur la RD996 et la RD949B. Il apparaît toutefois très hasardeux de comparer ces planches entre elles, tant les sections sont différentes et de nombreux paramètres peuvent influencer et rendre la comparaison difficile voire quasiment impossible (âge de la couche de roulement, trafic, climat, structure, etc...).

Enfin, le site ne disposant que de planches identiques (BBSG à 30% d'AE), il n'a pas pu être fait de comparaisons avec des planches témoins ce qui finalement rend l'exploitation des données de ce site beaucoup moins intéressante dans le cadre de ce projet.

8 Site étudié n°4 : RD730 à Semussac (CD17)

8.1 Présentation du site

Le choix du site correspondant à une cible pour le projet DVDC – « Durabilité de vie des couches de surfaces » appliqué aux matériaux recyclés, puisqu'il s'agit de planches d'enrobés à recyclage élevé (30%) ayant plus de 6 ans (date de mise en œuvre juin 2015).

Sur cette section expérimentale, on ne dispose malheureusement que de peu de données. Nous disposons seulement des formulations d'enrobés (1 planche de BBME à 30% d'AE) et de valeurs de PMT mesurées lors de la mise en œuvre en mai 2015.

Cette section, située à proximité de la commune de Semussac dans le département de la Charente-Maritime (CD 17) au niveau de la RD730 qui relie la commune de Royan à celle de Cozes.

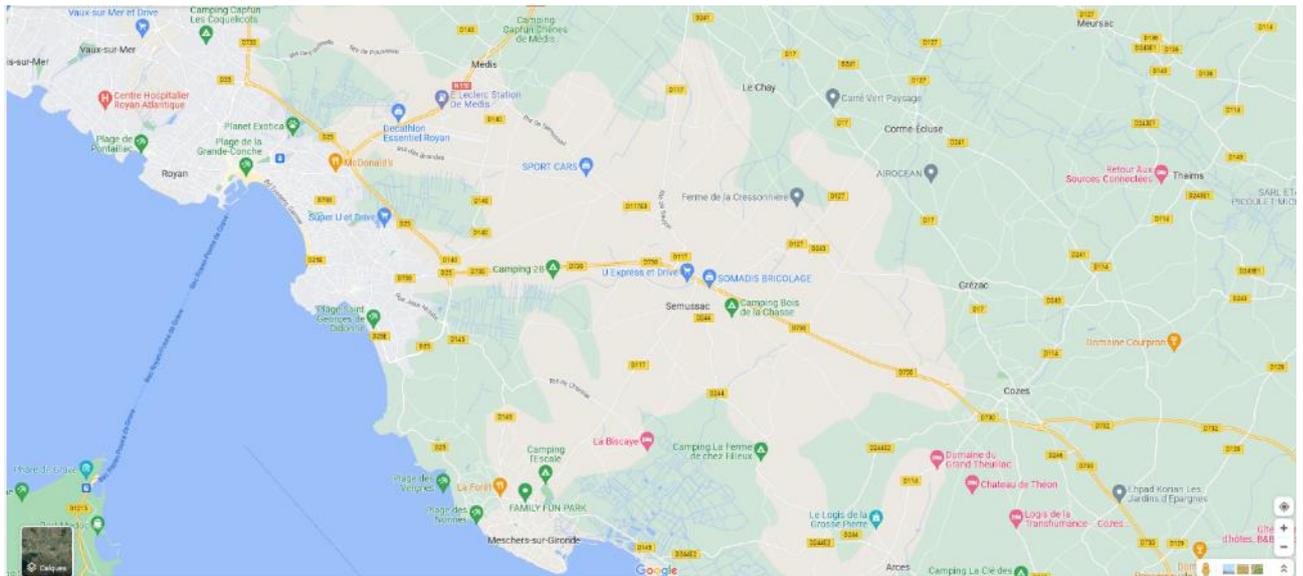


Figure 18 : Plan de situation de la section retenue (RD730)

Le site étudié n'est pas proprement à parler sur la route départementale (RD730), mais à la sortie d'un rond-point situé sur la RD730.

Il s'agit d'un tronçon de faible longueur (environ 100 m) constitué par une route assez sinueuse qui se prolonge ensuite par un chemin (Chemin de la Champagne). Malgré tout, par la suite, par commodité, nous continuerons à parler de la RD730 pour cette section.

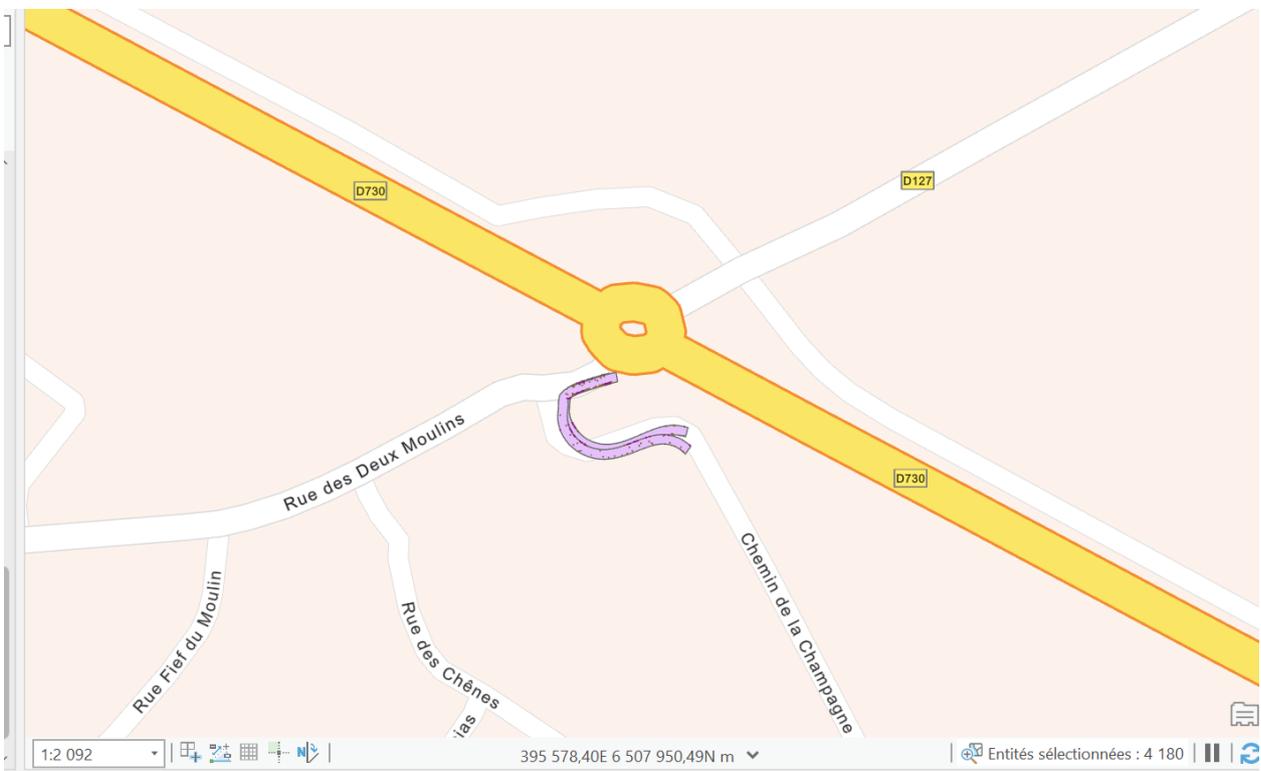


Figure 19 : Plan de localisation de la section retenue (RD)

Le trafic de la section n'est pas connu. On peut imaginer qu'il est relativement faible car il s'agit plutôt d'un réseau de desserte très locale.



Figure 20 : Photo de la fin de la section en enrobés (Chemin de la Champagne)

Il s'agit d'un site comportant plusieurs planches d'enrobés constituées par un BBME à 30% d'AE.

Nous connaissons approximativement le positionnement des planches expérimentales.

Toutefois, les planches étant identiques, cela ne nous apporte, en l'état, pas plus d'informations.

La mise en œuvre des différents produits a été réalisée en mai 2015.

Le choix de ce site a été motivé par :

- L'existence de quelques données d'auscultation antérieure sur les couches de roulement (mesures de PMT) ;
- Une uniformité de contraintes (climatique, géologique, de trafic) et de gestion du patrimoine sur l'ensemble du linéaire, pouvant permettre une comparaison entre les tronçons en ne tenant compte que des paramètres de construction ;
- La disponibilité relativement rapide des mesures Aigle 3D permettant d'avoir rapidement des données d'auscultation à traiter et à interpréter ;
- Des planches d'enrobés en BBME à plus de 30% d'AE.

8.2 Utilisation des données Aigle 3D sur la RD730

Le recoupement des données A3D sur le site de la RD730 doit être confronté à deux autres bases de données :

- la réalité sur site, et les observations relevées ;
- les données fournies par le gestionnaire.

8.2.1 Correspondance entre les zones relevées par l'A3D et la réalité sur site

Pour rappel, le projet DVDC – « Durabilité de vie des surfaces » ne s'intéresse qu'aux zones présentant des dégradations dues à une mauvaise tenue de la couche de surface. Il est donc nécessaire d'exclure les zones présentant des dégradations structurelles.

Pour cela, il est possible de s'appuyer sur les résultats des mesures de l'A3D afin de recenser les zones susceptibles de présenter des problématiques structurelles. Ces ajustements ne peuvent cependant être considérés viables qu'après validation suite à une observation terrain et à un échange avec le gestionnaire.

8.2.2 Correspondance entre les mesures réalisées par l'A3D et les données fournies par le gestionnaire

Le passage de l'Aigle 3D sur cette section a eu lieu le 9 novembre 2021, dans de bonnes conditions de mesures (météo favorable, pas de pluie, route propre et sèche, etc...).

Les résultats des mesures ont été obtenus début décembre (temps de transfert des disques durs, sectionnement et calculs des descripteurs).

Dans un premier temps, les données issues de l'Aigle 3D ont été projetées sur une carte via le logiciel Arcgis pro. Cette première visualisation a permis de voir l'emprise de la mesure et les principales dégradations via les descripteurs élémentaires (fissures, orniérage, raveling, macrotexture, etc...).

La conclusion de cette première observation est qu'il semble y avoir très peu de dégradations sur cette section dont le trafic est probablement très faible.



Figure 21 : Trace des mesures A3D et fissures détectées par l'outil A3D

Les données issues de l'Aigle 3D montrent que le raveling et l'orniérage sont quasi nuls. Les fissures, quant à elles, ne sont pas visibles sur les photos de la route.



Figure 22 : Image du Chemin de la Champagne montrant un enrobé encore en très bon état

8.3 Obtention des résultats issus de l'outil Aigle 3D concernant la RD730

8.3.1 Réalisation de la visite sur la RD730

Etant donné que d'une part, le site est très éloigné du laboratoire de Nancy et que d'autre part, le site ne dispose que de planches identiques (BBME à 30% d'AE), il n'a pas été réalisé de visite de cette section.

8.4 Méthodologie d'analyse des résultats

L'indicateur de raveling n'a pas été présenté ici, car les mesures réalisées par l'A3D ne présentent, soit, aucun résultat, ce qui signifie que l'outil n'a pas détecté de zones de raveling, soit des zones de raveling de niveau 0, c'est-à-dire des zones ne présentant pas de dégradations remarquables.

Le présent rapport présente les résultats obtenus dans l'objectif de comparer les différentes planches (avec et sans recyclage d'agrégats d'enrobés).

Les courbes présentées ci-après représentent les résultats obtenus pour le site de la RD730.

Par ailleurs, comme l'on dispose de certaines données issues des rapports de suivi de chantiers innovants, nous pouvons également les comparer aux résultats obtenus avec la mesure Aigle 3D.

Cependant, il convient d'être prudent dans cette comparaison, les méthodes et instruments de relevés n'étant pas identiques.

8.4.1 Analyse de l'orniérage petit rayon d'après les données Aigle 3D

Pour chaque tranche de profondeur d'ornière mesurée, l'A3D donne la surface totale d'ornière mesurée pour chaque planche.

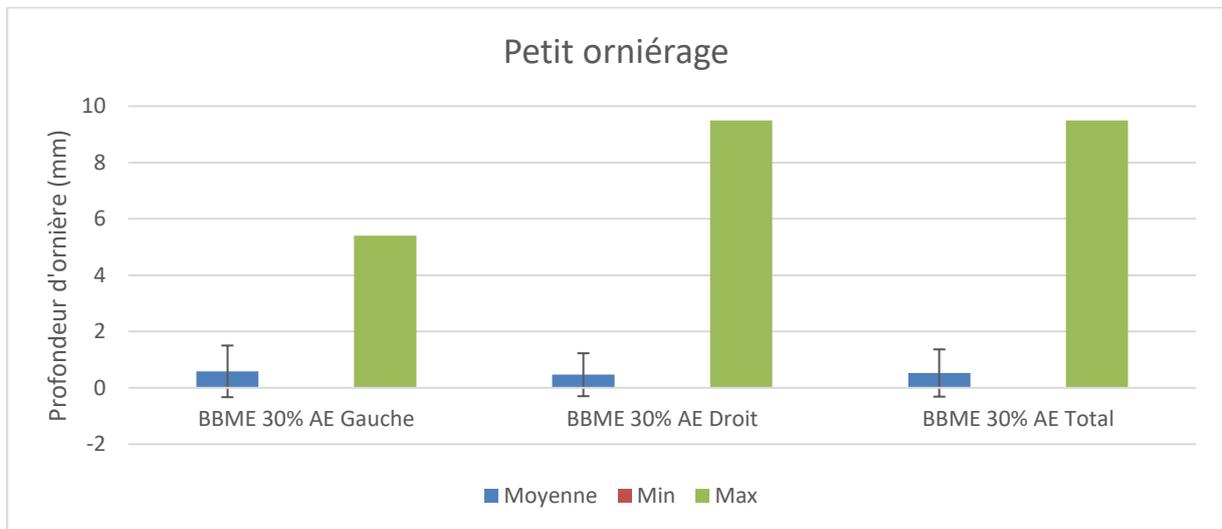
8.4.1.1 Comparaison de l'orniérage petit rayon pour chaque planche étudiée

La méthodologie proposée initialement dans le rapport « Elaboration d'une méthodologie de traitement des données dans le cadre de l'étude de la durabilité des couches de surface », prévoyait que la comparaison entre chaque planche étudiée proposée serait de classer les profondeurs d'ornière en trois catégories :

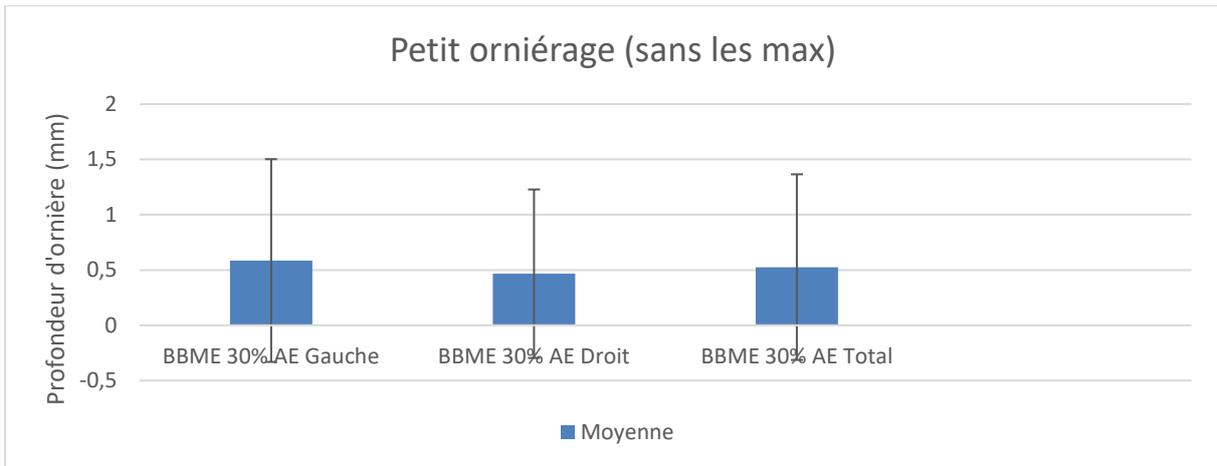
- Les petits orniérages admettant une profondeur inférieure à 10 mm (niveaux 0 à 2) ;
- Les petits orniérages admettant une profondeur comprise entre 10 mm et 20 mm (niveaux 3 et 4) ;
- Les petits orniérages admettant une profondeur supérieure à 20 mm (niveaux 5 à 7).

Le choix de ces catégories devrait permettre une discrétisation rapide, par visualisation graphique, des niveaux de dégradations des planches selon l'indicateur « petit orniérage ».

Toutefois, il est apparu plus pertinent de travailler sans classe de valeurs, mais avec les valeurs brutes et leurs grandeurs statistiques associées : moyenne, minimum, maximum et écart-type.



Graphique 28 : Profondeur de petit orniérage (en mm) par planche



Graphique 29 : Profondeur de petit orniérage (en mm) par planche (sans les maxi)

Dans le cas du site de la RD730, les mesures réalisées par l'A3D donnent des valeurs de profondeurs d'orniérage extrêmement faibles, (inférieures à 0,6 mm en moyenne) qui témoignent probablement d'une bonne assise et d'une couche de roulement adaptée au trafic rencontré sur cette section depuis sa création. A priori, cette section de route n'a fait l'objet d'aucun entretien depuis la réalisation de la couche de roulement en 2015.

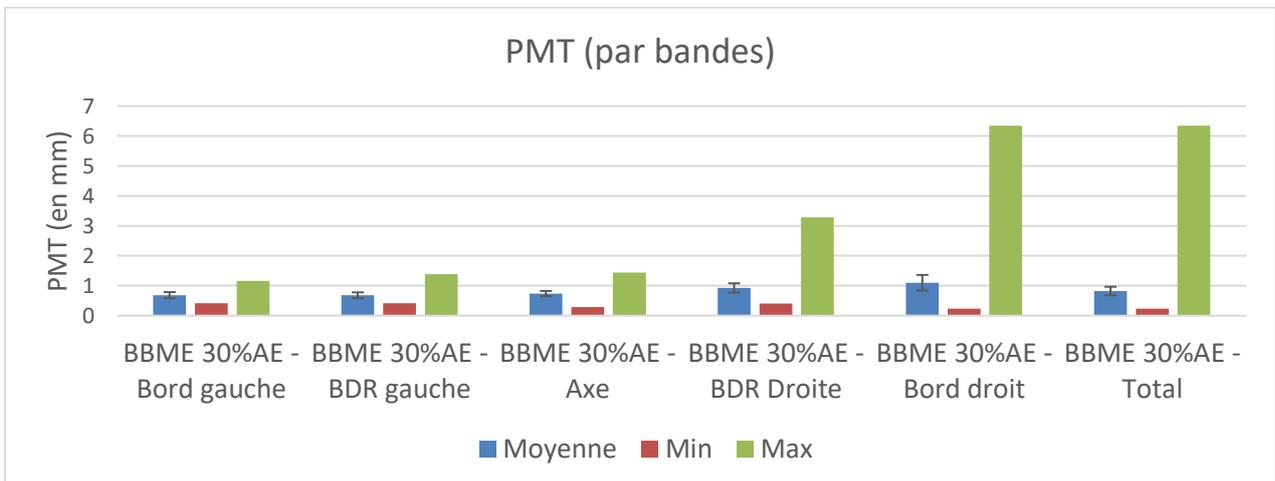
On ne peut pas aller plus loin dans notre analyse dans la mesure où nous n'avons qu'une seule planche sur ce site.

8.4.2 Analyse de la PMT d'après les données A3D

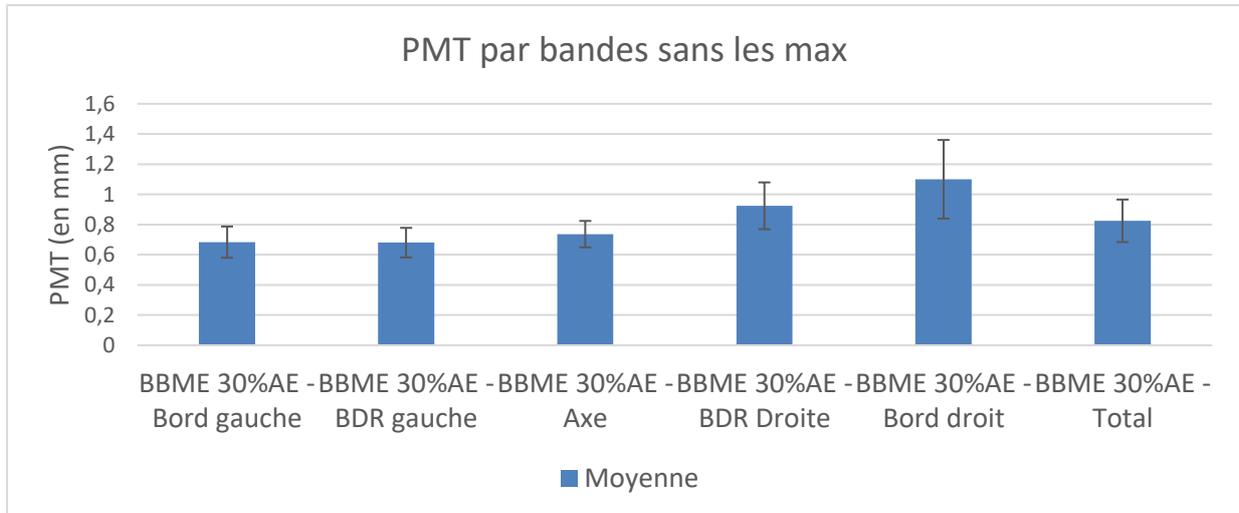
Comme pour l'orniérage petit rayon, il est apparu, là aussi, plus pertinent de travailler sans classe de valeurs, mais avec les valeurs brutes et leurs grandeurs statistiques associées : moyenne, minimum, maximum et écart-type.

8.4.2.1 Comparaison de la PMT mesurée pour chaque planche étudiée

Le graphique 3 présente les valeurs de PMT représentées majoritairement, en termes de surfaces mesurées par rapport aux surfaces de chaque planche, pour chaque planche et pour chaque axe de mesure.



Graphique 30 : Valeurs de PMT en BDR et en Axe



Graphique 31 : Valeurs de PMT en BDR et en Axe (sans les maxi)

Les valeurs moyennes de PMT sont relativement élevées (>0,68 mm) et témoignent d'une macrotexture encore plutôt bonne.

Dans le cas de cette section, il est difficile de déterminer avec précision les différentes bandes de roulement. En effet, il y a un passage de l'Aigle 3D dans les 2 sens de cette section relativement étroite et donc une partie des mesures se chevauchent.

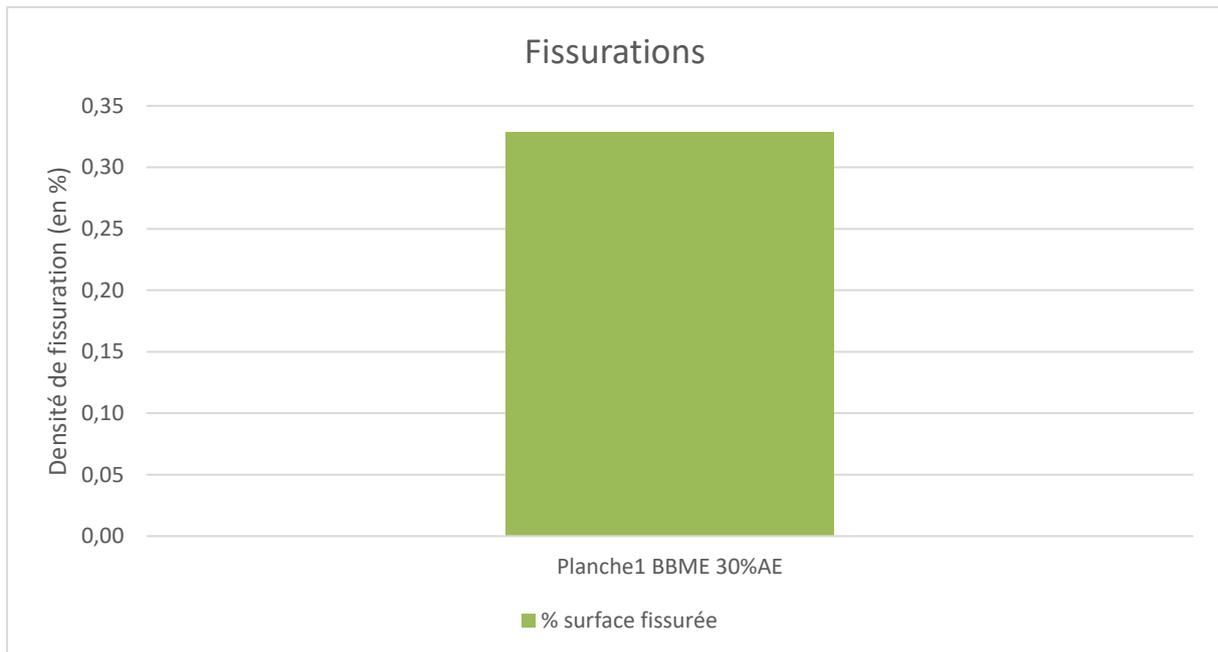
Ceci explique probablement les valeurs très élevées mesurées sur les bords droits de la chaussée. Il n'est pas exclu que certaines mesures aient en partie lieu dans l'accotement de la chaussée.

8.4.3 Analyse des fissurations et des zones sans dégradation d'après les données A3D

8.4.3.1 Etude des données de fissurations mesurées par l'A3D

Les données fournies par l'A3D concernant la fissuration sont des objets sans surface auxquels sont associés, arbitrairement, des tampons pour leur donner des surfaces. Dans ce cas de figure, il a été choisi un tampon de 10 cm autour de chaque fissure pour donner la surface de celle-ci.

Finalement, nous disposons de la surface de chaque zone fissurée que nous pouvons comparer à la surface totale de la planche à laquelle la mesure est associée et obtenir un pourcentage de fissuration par planche.



Graphique 32 : Pourcentage de zones fissurées pour chaque planche pour le cas du site de la RD84

Cette représentation graphique permet de mettre en lumière les premières observations faites à la suite de la visualisation des résultats des données sous forme cartographique.

Ce graphique permet donc de quantifier très précisément cette densité de fissure.

On peut dans un premier temps constater que le taux de fissuration est très faible pour cette planche ($< 0,35\%$).

Comme pour le cas de la RD84, il n'est pas possible d'aller plus loin dans notre analyse dans la mesure où nous n'avons qu'une seule planche sur ce site.

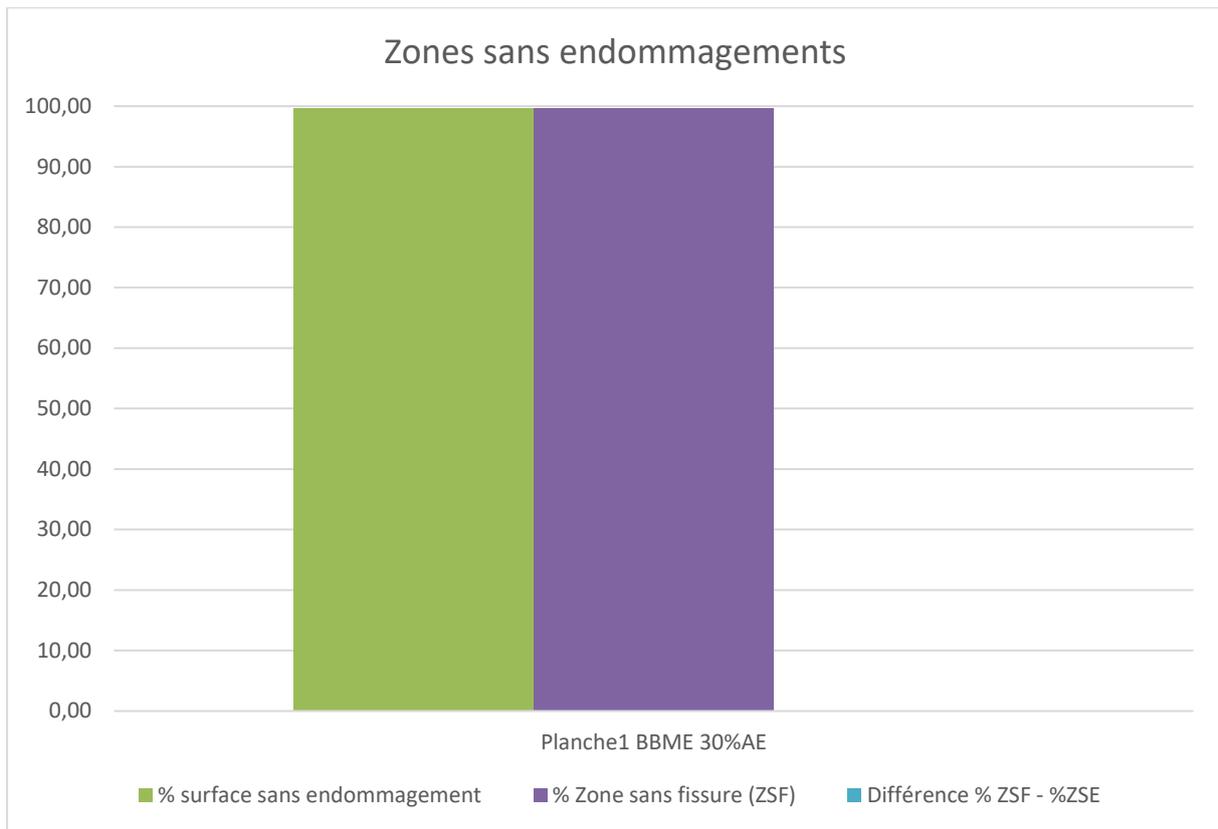
8.4.3.2 Etude des données concernant les zones sans dégradations recensées par l'A3D

L'A3D fournit, pour chaque planche, une surface correspondant aux zones sans dégradations. Cette information est utile pour présenter la santé de la couche de surface : plus la surface déduite est importante, moins la route est dégradée.

Pour rappel, la zone sans endommagement correspond à la zone où il n'y a ni zone fissurée, ni zone raveling de 01 à 05, ni zone orniérée de niveau 01 à 07.

Pour permettre une comparaison entre chaque planche, il a été choisi de représenter la proportion « surface de zone sans dégradation par rapport à la surface totale de la planche correspondante ».

A également été ajouté le pourcentage de zone sans fissure et enfin la différence entre les zones sans endommagement et les zones sans fissures.



Graphique 33 : Proportion surfacique de route ne présentant aucune dégradation pour chaque planche

Dans le cas du site de la RD730, les proportions de zone sans dégradations sont toutes supérieures à 99% de la surface totale pour les planches expérimentales réalisées en 2015.

Ces valeurs élevées permettent de conclure à une bonne tenue des couches de roulement des planches du site qui est due à leurs âges relativement peu élevés, ainsi probablement qu'à une bonne structure de chaussée, sans que nous ne disposions de plus d'informations sur celle-ci.

L'on peut également voir que la proportion de zone sans endommagement est quasiment égale à la proportion de zone sans fissure. Ceci est assez logique puisqu'on a vu précédemment qu'il n'y avait pas de raveling et très peu d'orniérage.

Par conséquent, les zones sans endommagement correspondent quasiment aux zones sans fissures. On voit bien là encore que la fissuration est l'indicateur déterminant pour la comparaison des différentes planches dans le cadre de cette étude.

8.5 Comparaison avec les données issues du suivi de chantiers innovants

Comme évoqué au début de ce rapport (cf§ 5), nous disposons, en plus des données issues des mesures A3D, de quelques données recueillies lors des suivis de chantiers innovants.

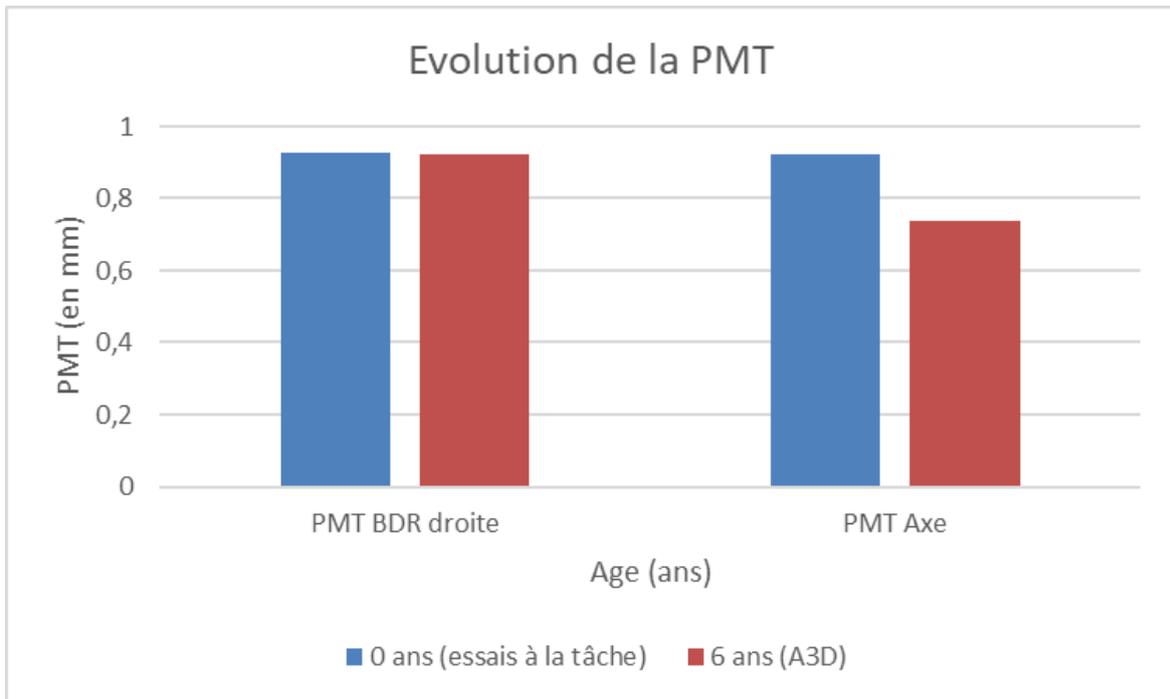
Pour rappel, ces données sont composées sur l'ensemble du linéaire par :

- les dates de mise en œuvre pour chaque couche composant la route ;
- les mesures de macrotecture lors de la mise en œuvre ;

Si l'on retient les données communes aux mesures Aigle 3D et aux rapports de suivi, il ne reste plus que :

- les mesures de macrotexture lors de la mise en œuvre ;

Nous pouvons donc essayer de comparer les mesures de macrotexture au cours des années, pour chacune des planches, bien que les techniques d'acquisition ne soient pas identiques, ce qui rend la comparaison assez incertaine.



Graphique 34 : Comparaison de la PMT en fonction de l'âge et du type de mesures

L'analyse de ce graphique permet de conclure que les valeurs moyennes de PMT à 6 ans mesurés par l'Aigle 3D en bandes de roulement droite sont très proches de celles mesurées lors du suivi de chantier innovant (essais à la tache de sable). Par contre, les valeurs moyennes de PMT à 6 ans mesurés par l'Aigle 3D en axe sont un peu inférieures à celles mesurées lors du suivi de chantier innovant. Cette différence peut s'expliquer, soit par le fait que les outils de mesures sont différents, soit par l'évolution de la chaussée au cours du temps.

Toutefois, l'ordre de grandeur des valeurs mesurées est cohérent entre les deux types de mesures.

Là encore, contrairement aux autres sites déjà étudiés, il n'est pas possible d'aller plus loin dans notre analyse dans la mesure où nous n'avons qu'une seule planche sur ce site.

Toutefois, comme nous l'avons vu précédemment, l'indicateur le plus déterminant pour comparer l'évolution des sections au cours du temps semble être la fissuration.

Malheureusement, nous ne disposons pas de données concernant les dégradations et notamment les fissures, car nous n'avons pas retrouvé d'informations sur le suivi de cette section.

8.6 Conclusions pour le site de la RD730

Au vu des mesures réalisées en novembre 2021, à l'aide de l'outil Aigle3D, sur ces sections de la RD730 (Chemin de la Champagne), il apparaît que le taux de fissuration observé sur la RD730 est extrêmement faible (inférieur à 0,35%) et moins important que ceux observés sur la RD996 et la RD949B. Il apparaît toutefois très hasardeux de comparer ces planches entre elles, tant les sections sont différentes et de nombreux paramètres peuvent influencer et rendre la comparaison difficile voire quasiment impossible (âge de la couche de roulement, trafic, climat, structure, etc...).

Enfin, le site ne disposant que de planches identiques (BBME à 30% d'AE), il n'a pas pu être fait de comparaisons avec des planches témoins ce qui au final rend l'exploitation des données de ce site beaucoup moins intéressante dans le cadre de ce projet.

9 Site étudié n°5 : RN4 (DIR Est)

9.1 Présentation du site

Ce site n'avait pas été référencé initialement, ce qui explique qu'il ne figure pas au tableau des sections finalement retenues dans le cadre de l'étude (Figure 23, §4).

Toutefois, lors d'une réunion de travail, ce site a été évoqué et s'est avéré finalement pertinent.

En effet, le choix du site correspond à une cible pour le projet DVDC – « Durabilité de vie des couches de surfaces » appliqué aux matériaux recyclés, puisqu'il s'agit de planches d'enrobés à recyclage élevé (40%) ayant plus de 7 ans (date de mise en œuvre juin 2008).

Par ailleurs, on dispose de nombreuses données sur ce site puisqu'il a fait l'objet de rapports par le Cerema dans le cadre de suivi de chantiers innovants à 1 an, 2 ans, 3 ans, 5 ans, 6 ans et 8 ans.

Le site étudié est un tronçon de route nationale RN4 (anciennement N333) d'une longueur d'environ 1,8 km situé entre les villes de Dombasle-sur-Meurthe et de Lunéville dans le département de la Meurthe-et-Moselle (54).

La section étudiée se trouve est une 2 x 2 voies, dans le sens des PR décroissants (de Lunéville vers Nancy).



Figure 24 : Plan de situation de la section retenue (RN4)

La section supporte un trafic très important puisqu'il représente 25882 véhicules/jour avec 34% de Poids-Lourds, soit 4 400 PL/j/sens (TS).

Il s'agit d'un site comportant une planche d'enrobés témoin constituée par un BBM à chaud (160°C), une planche de BBM tiède (125°C - procédé 3E), une planche de BBM chaud à 30% d'AE (procédé R), une planche de BBM tiède à 30% d'AE (procédé 3E+R).

Le positionnement des planches expérimentales, d'après les données issues du rapport de suivi de 2016 est le suivant :

- Planche BBM Tiède + 30% AE (3E+R) : PR 31+000 à 30+720 ;
- Planche BBM Tiède (3E) : PR 30+720 à 30+390 ;
- Planche BBM chaud 30% AE (R) : PR 30+390 à 30+100 ;
- Planche BBM chaud « témoin » : PR 30+100 à 29+800 ;

La mise en œuvre des différents produits a été réalisée en juin 2008.

La structure de chaussée au niveau de cette section semble relativement homogène. Elle est essentiellement constituée de grave laitier sur environ 42 cm d'épaisseur :

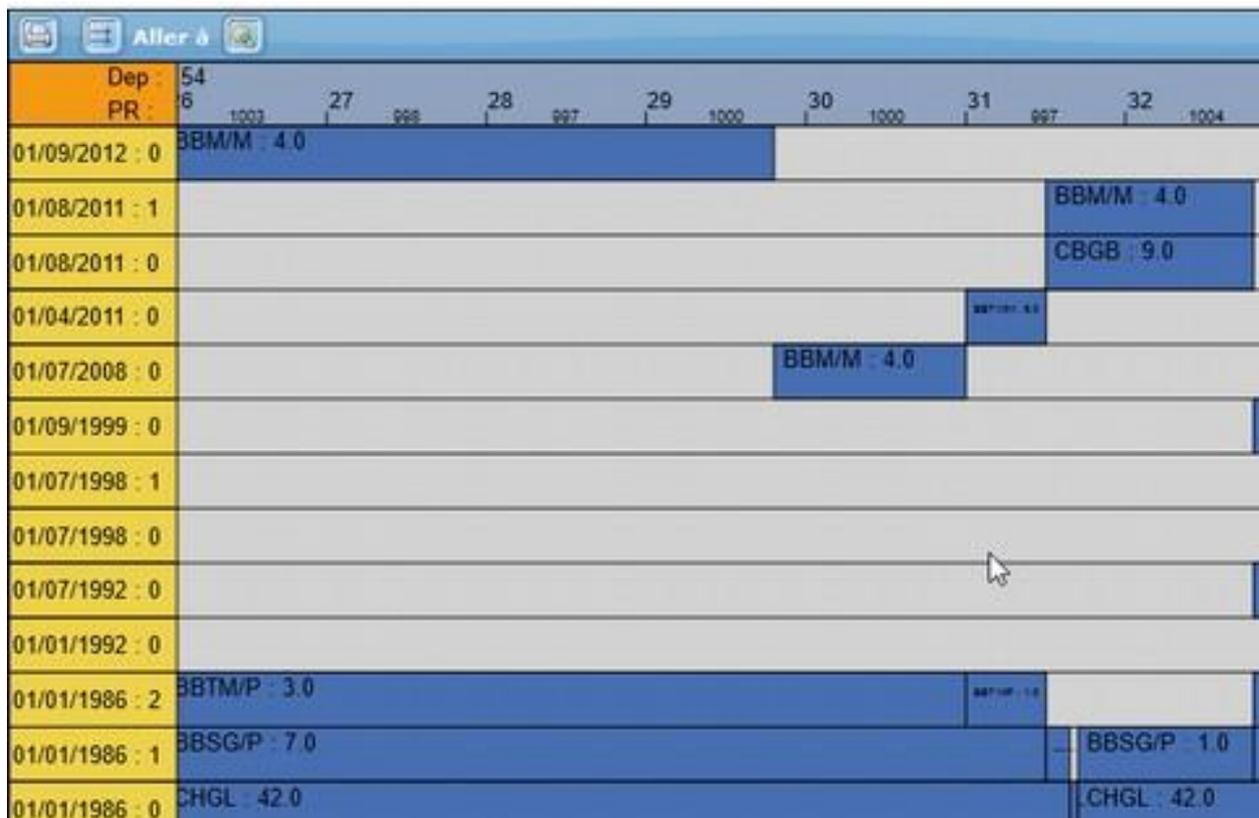


Figure 25 : Structure de la chaussée (données ISIDOR)

Le choix de ce site a été motivé par :

- L'existence des données d'auscultation antérieure sur les couches de roulement puisqu'il s'agit d'un chantier innovant régulièrement suivi par le Cerema ;
- Peu de contraintes liées au site (zone hors agglomération, pas de présence d'obstacles (passages à niveau...), pas de présence de zones à circulation spécifiques (giratoires,

- carrefours, sorties de véhicules lourds : usines, fermes...) pouvant permettre d'obtenir des résultats a priori peu perturbés par ces phénomènes ;
- Une uniformité de contraintes (climatique, géologique, de trafic) et de gestion du patrimoine sur l'ensemble du linéaire, pouvant permettre une comparaison entre les tronçons en ne tenant compte que des paramètres de construction ;
 - La disponibilité relativement rapide des mesures Aigle 3D permettant d'avoir rapidement des données d'auscultation à traiter et à interpréter ;
 - Une relative uniformité de la structure de la chaussée.

9.2 Utilisation des données Aigle 3D sur la RN4

Le recouplement des données A3D sur le site de la RN4 doit être confronté à deux autres bases de données :

- la réalité sur site, et les observations relevées ;
- les données fournies par le gestionnaire.

9.2.1 Correspondance entre les zones relevées par l'A3D et la réalité sur site

Pour rappel, le projet DVDC – « Durabilité de vie des surfaces » ne s'intéresse qu'aux zones présentant des dégradations dues à une mauvaise tenue de la couche de surface. Il est donc nécessaire d'exclure les zones présentant des dégradations structurelles.

Pour cela, il est possible de s'appuyer sur les résultats des mesures de l'A3D afin de recenser les zones susceptibles de présenter des problématiques structurelles. Ces ajustements ne peuvent cependant être considérés viables qu'après validation suite à une observation terrain et à un échange avec le gestionnaire.

9.2.2 Correspondance entre les mesures réalisées par l'A3D et les données fournies par le gestionnaire

Dans un premier temps, les données recueillies sont principalement issues des rapports de suivi de chantiers innovants, en particulier le dernier rapport de suivi à 8 ans rédigé en 2016.

Ces données sont composées sur l'ensemble du linéaire par :

- la connaissance précise du site et des problématiques spécifiques associées (trafic, climat, travaux...) ;
- la structure de la route, à savoir les techniques utilisées sur chacune des couches de surface composant le linéaire ;
- les relevés visuels de dégradation à 1 an, 2 ans, 3 ans, 5 ans, 6 ans et 8 ans ;
- les mesures d'adhérence longitudinale à 1 an, 2 ans, 3 ans, 5 ans, 6 ans et 8 ans ;
- les mesures de macrotexture à 1 an, 2 ans, 3 ans et 5 ans (Rugolaser), puis à 6 ans et 8 ans (PMT par essais à la tache de sable) ;
- les mesures d'uni longitudinal (APL) à 1 an et 2 ans ;
- les mesures de profil en travers à 1 an, 2 ans, 3 ans et 5 ans (TUS), puis à 6 ans et 8 ans (Règle) ;

Le passage de l'Aigle 3D sur cette section a eu lieu en 2018, 2019 et 2020, dans le cadre des campagnes annuelles IQRN.

Les résultats des mesures ont été obtenus le 24 mars 2022 (temps de transfert et calculs des descripteurs).

Dans un premier temps, les données issues de l'Aigle 3D ont été projetés sur une carte via le logiciel Arcgis pro. Cette première visualisation a permis de voir l'emprise de la mesure et les principales dégradations via les descripteurs élémentaires (fissures, orniérage, raveling, macrotexture, etc...).

La conclusion de cette première observation est qu'il semble y avoir beaucoup de fissures transversales, symptomatiques de dégradations structurelles.

En effet, en échangeant avec le gestionnaire du réseau (DIR Est), il apparaît qu'il y ait eu de nombreux phénomènes de gonfles sur cette section,

Il s'agit de bourrelets transversaux à la chaussée et qui traverse la totalité de la chaussée (voir photo ci-dessous).



Figure 26 : Photo de gonfle (RN4)

Sur cette section, les gonfles sont apparues environ 5 ans après les travaux d'enrobés.

Ce phénomène de gonfle s'expliquerait par la mise en compression des dalles de MTLH lors de forte chaleur, provoquant la rupture du MTLH, et le soulèvement conséquent de la couverture bitumineuse.

Ce phénomène serait accentué par la présence d'eau, ce qui expliquerait que ces désordres soient apparus alors que la période était chaude, mais pas caniculaire.

En effet, la variation de teneur en eau d'un MTLH suscite une dilatation du matériau, analogue à l'effet de la température. Sur la zone concernée par les bourrelets, la présence d'eau est attestée tant par la nature des plantes présentes dans les fossés que par les agents d'exploitation. L'hypothèse de MTLH à teneur en eau élevée est donc possible, qui justifierait d'une position « au repos » (i.e. à température normale) des dalles « au contact » (c'est-à-dire avec les fissures de retrait hydraulique fermées). L'augmentation de la température même

modérée accroît alors la mise sous pression des dalles, qui passe d'un état de repos « au contact » à un état « sous pression ».

Par ailleurs, le raveling et l'orniérage semblent très faibles. Par contre, les fissures sont nettement visibles. Il n'est pas possible de distinguer facilement les démarcations entre les différentes planches, car il y a de nombreuses fissures transversales.

Aussi, une visite sur le terrain, avec le gestionnaire du réseau s'avère indispensable pour s'assurer de la bonne localisation des différentes planches telles qu'indiquées dans les rapports de suivi.

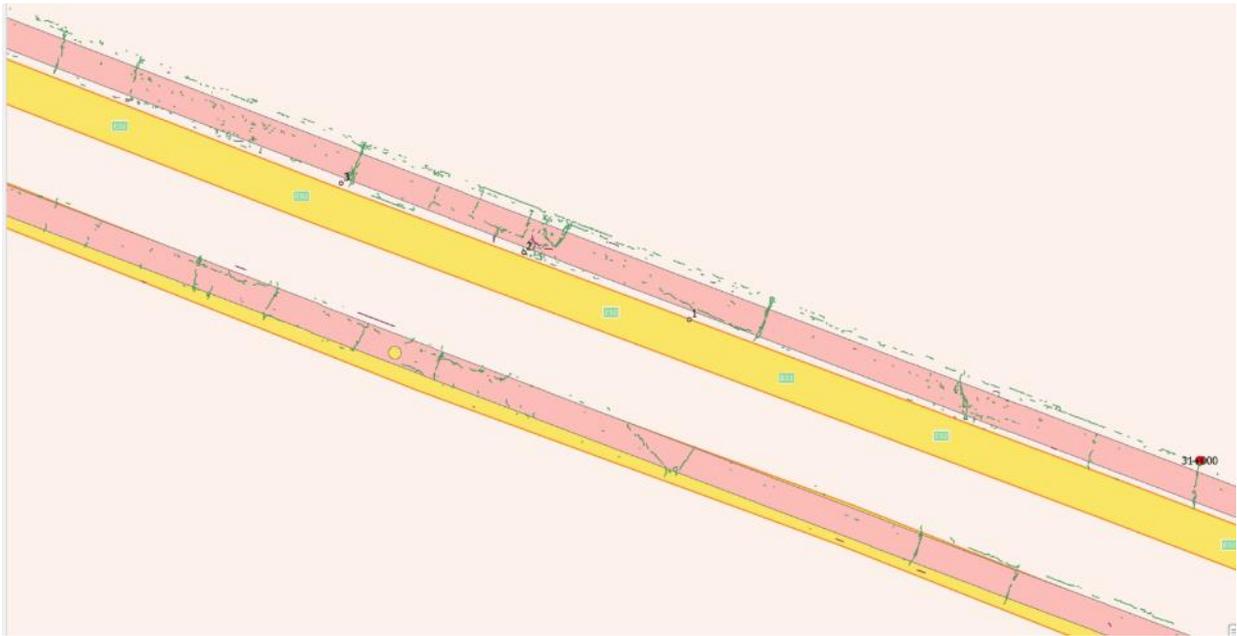


Figure 27 : Exemple de visualisation des résultats A3D (en vert, les fissures)

Il est à noter que la localisation des planches fournie par le rapport est en PR + abscisse ce qui est l'usage traditionnel. Or, les informations fournies par l'Aigle 3D sont en coordonnées géographiques (x,y,z).

Il y a donc lieu de recalcr les PR en coordonnées géographiques.

Pour cela, on peut s'appuyer sur les images d'environnement, en particulier la présence des panneaux indiquant les PR qui sont nombreux sur cette section de route nationale.

Ainsi, dans un premier temps, nous avons recalcr les données par rapport au PR 31+000.



Figure 28 : Exemple de démarcation visuelle entre 2 planches (ici planche de début de travaux 3E+R) et en arrière-plan le panneau PR 31+000 qui a servi à recalibrer les données.

Toutefois, au vu de ces premières observations, il n'est pas possible de poursuivre plus en avant l'analyse des données Aigle 3D. Il convient donc de vérifier rapidement sur le terrain la localisation exacte des différentes planches expérimentales.

9.3 Obtention des résultats issus de l'outil Aigle 3D concernant la RN4

9.3.1 Réalisation de la visite sur la RN4

La visite sur site s'est déroulée le 28 avril 2022, en présence de la DIR Est, afin de pouvoir échanger *in-situ* des informations qui pourraient compléter les données déjà répertoriées.

Dans le cadre du site de la RN4, nous avons eu la chance d'avoir un gestionnaire impliqué qui a mis à disposition pour la visite un agent territorial ayant une forte connaissance des données historiques et des contraintes locales.

Ce type de ressource est particulièrement précieux, car il a été constaté lors de la phase de recueil des sites intéressants dans le cadre du projet DVDC – « Durabilité de vie des chaussées » que de nombreuses archives sont manquantes et que le recueil sur l'historique des sites s'avère bien souvent laborieux, voire sans issue.

La visite du site a consisté à parcourir l'ensemble du linéaire en notant les localisations exactes des différentes planches de travaux grâce à la localisation des PR et de leurs coordonnées géographiques correspondantes grâce à un GPS. La visite a été réalisée en partie en voiture et en partie à pied.

La météo lors de cette visite était clémente, ne compliquant pas la prise de note, ni la visibilité de la route.

A chaque changement de tronçon homogène en structure et en âge, sur toute la constitution de la route, un arrêt a été effectué pour prise de notes d'informations sur le tronçon et prise de photos et contextualisées (permettant de rendre compte des spécificités terrains des zones d'interface), ainsi qu'à chaque zone présentant des phénomènes de gonfles.

La visite a permis aussi l'échange en direct avec le gestionnaire, qui a fourni des informations concernant l'historique du site, ainsi que les problématiques spécifiques aux terrains parcourus par le linéaire et le type de gestion de patrimoine qui est pratiqué sur la zone étudiée.

Dans un deuxième temps a eu lieu un temps d'échange sous forme de réunion en salle. Cette phase a permis la présentation de l'outil Arcgis, ainsi que la présentation des données recueillies par l'A3D et la correspondance entre ces données et celles fournies par les rapports de suivi de chantiers innovants.

Cela a permis de contextualiser les besoins inhérents à la visite, de présenter des premiers résultats à la DIR Est.

9.3.2 Découpage en tronçons homogène et exclusions de zones spécifiques

Suite à la visite du 28 avril 2022, il a été possible de déterminer avec précision la localisation des planches de travaux, ainsi que les désordres structurels rencontrés (phénomènes de « gonfles ») :



Figure 29 : Découpage des planches expérimentales suite à la « visite » virtuelle du 28 avril 2022

L'examen des données issues de l'Aigle 3D et en particulier les fissures, permet de vérifier que la localisation de ces planches après visite coïncide parfaitement avec la réalité du terrain.

Par ailleurs, les phénomènes de « gonfles » observés, principalement sur les 2 planches situées sur la partie basse du tracé (BBM Tiède + 30% AE et BBM Tiède), étant des dégradations d'origines structurelles, il a été réalisé des masques pour ôter ces zones de l'emprise de l'étude.

La figure ci-dessous montre un exemple de ces masques :



Figure 30 : Exemples de masques réalisés pour ôter les zones de gonfles

9.4 Analyse des résultats

L'indicateur de raveling n'a pas été présenté ici, car les mesures réalisées par l'A3D ne présentent, soit, aucun résultat, ce qui signifie que l'outil n'a pas détecté de zones de raveling, soit des zones de raveling de niveau 0, c'est-à-dire des zones ne présentant pas de dégradations remarquables.

Le présent rapport présente les résultats obtenus dans l'objectif de comparer les différentes planches (avec et sans recyclage d'agrégats d'enrobés).

Les courbes présentées ci-après représentent les résultats obtenus pour le site de la RN4.

Par ailleurs, comme l'on dispose de certaines données issues des rapports de suivi de chantiers innovants, nous pouvons également les comparer aux résultats obtenus avec la mesure Aigle 3D.

Cependant, il convient d'être prudent dans cette comparaison, les méthodes et instruments de relevés n'étant pas identiques.

9.4.1 Analyse de l'orniérage petit rayon d'après les données Aigle 3D

Pour chaque tranche de profondeur d'ornière mesurée, l'A3D donne la surface totale d'ornière mesurée pour chaque planche.

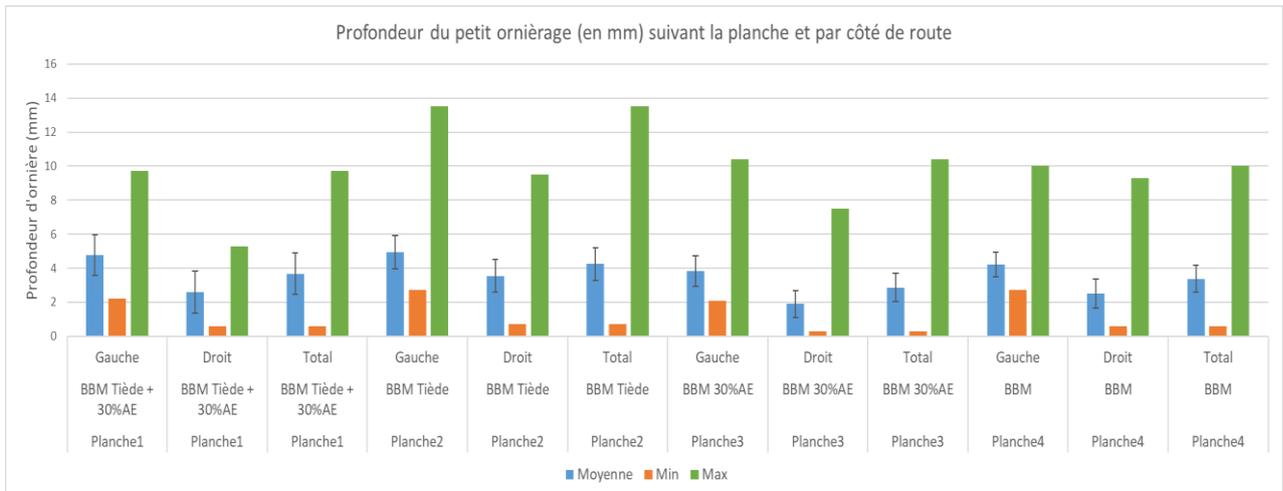
9.4.1.1 Comparaison de l'orniérage petit rayon pour chaque planche étudiée

La méthodologie proposée initialement dans le rapport « Elaboration d'une méthodologie de traitement des données dans le cadre de l'étude de la durabilité des couches de surface », prévoyait que la comparaison entre chaque planche étudiée proposée serait de classer les profondeurs d'ornière en trois catégories :

- Les petits orniérages admettant une profondeur inférieure à 10 mm (niveaux 0 à 2) ;
- Les petits orniérages admettant une profondeur comprise entre 10 mm et 20 mm (niveaux 3 et 4) ;
- Les petits orniérages admettant une profondeur supérieure à 20 mm (niveaux 5 à 7).

Le choix de ces catégories devrait permettre une discrétisation rapide, par visualisation graphique, des niveaux de dégradations des planches selon l'indicateur « petit orniérage ».

Toutefois, il est apparu plus pertinent de travailler sans classe de valeurs, mais avec les valeurs brutes et leurs grandeurs statistiques associées : moyenne, minimum, maximum et écart-type.



Graphique 35 : Profondeur de petit ornièrage (en mm) par planche

Dans le cas du site de la RN4, les mesures réalisées par l'A3D donnent des valeurs de profondeurs d'ornièrage extrêmement faibles (inférieures à 5 mm en moyenne) qui témoignent probablement d'une bonne assise et d'une couche de roulement adaptée au trafic rencontré sur cette section depuis sa création. En effet, on peut rappeler que cette section de route n'a fait l'objet d'aucun entretien depuis la réalisation de la couche de roulement en 2008.

Pour rappel, on considère généralement qu'une valeur d'ornièrage inférieure à 7 mm est assez faible (cf. BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSÉES - 217 - SEPTEMBRE-OCTOBRE 1998 - RÉF. 4214 - PP. 13-30 - [blpc_217_13-30.pdf \(ifsttar.fr\)](#) – p27).

On peut constater que les valeurs moyennes d'ornièrage sont plus élevées pour les planches en enrobés tièdes que pour les planches en enrobés à chaud. Toutefois, d'une part, ces valeurs sont extrêmement proches pour les 4 planches expérimentales, ce qui tend à dire que cet indicateur ne paraît pas discriminant dans le cadre de notre étude et d'autre part, nous avons constaté que les planches 1 et 2, situées sur la partie basse du tracé présentaient un nombre de « gonfles » plus important que les planches 3 et 4 situées sur la partie haute du tracé.

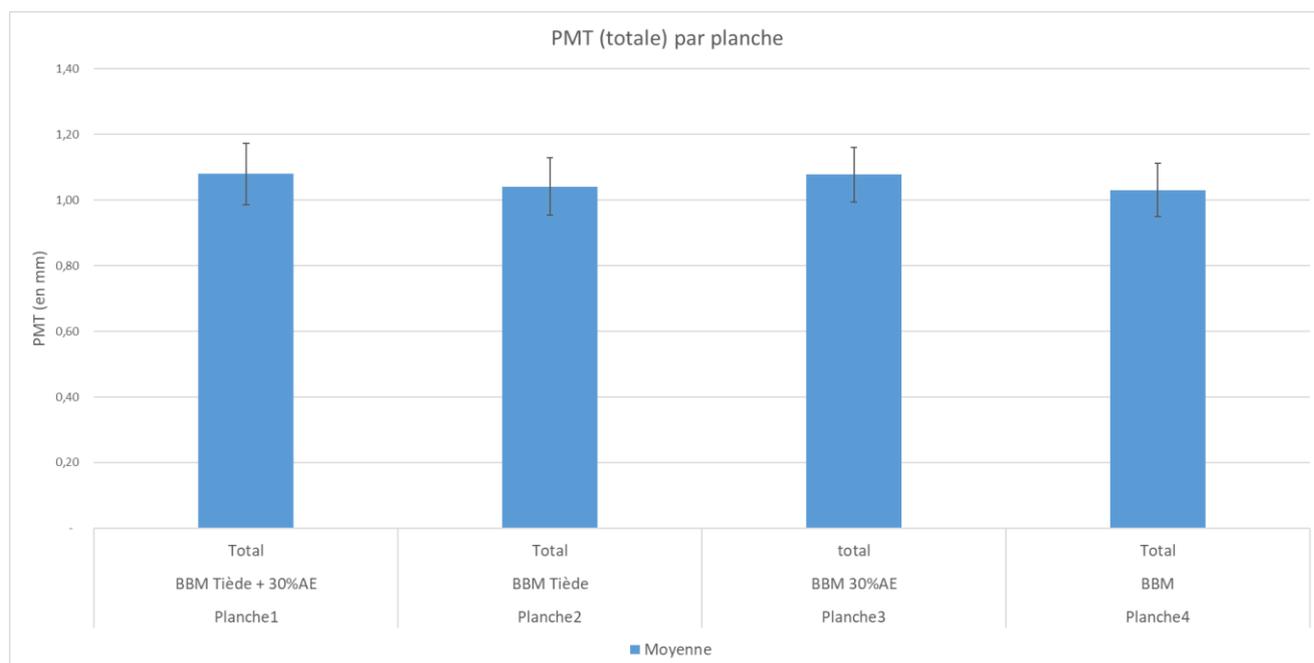
Par conséquent, il n'est pas exclu que les profondeurs d'ornièrage plus importantes rencontrées sur les planches 1 et 2 proviennent de désordres structurels plutôt que de la nature des couches de roulement.

9.4.2 Méthodologie d'analyse de la PMT d'après les données A3D

Comme pour l'ornièrage petit rayon, il est apparu, là aussi, plus pertinent de travailler sans classe de valeurs, mais avec les valeurs brutes et leurs grandeurs statistiques associées : moyenne, minimum, maximum et écart-type.

9.4.2.1 Comparaison de la PMT mesurée pour chaque planche étudiée

Le graphique 2 présente les valeurs de PMT représentées majoritairement, en termes de surfaces mesurées par rapport aux surfaces de chaque planche, pour chaque planche.



Graphique 36 : Valeurs de PMT pour chaque planche

Comme pour l'orniérage petit rayon, les valeurs moyennes de PMT sur les 4 planches sont relativement élevées (> 1 mm) et témoignent d'une macrotexture encore plutôt bonne.

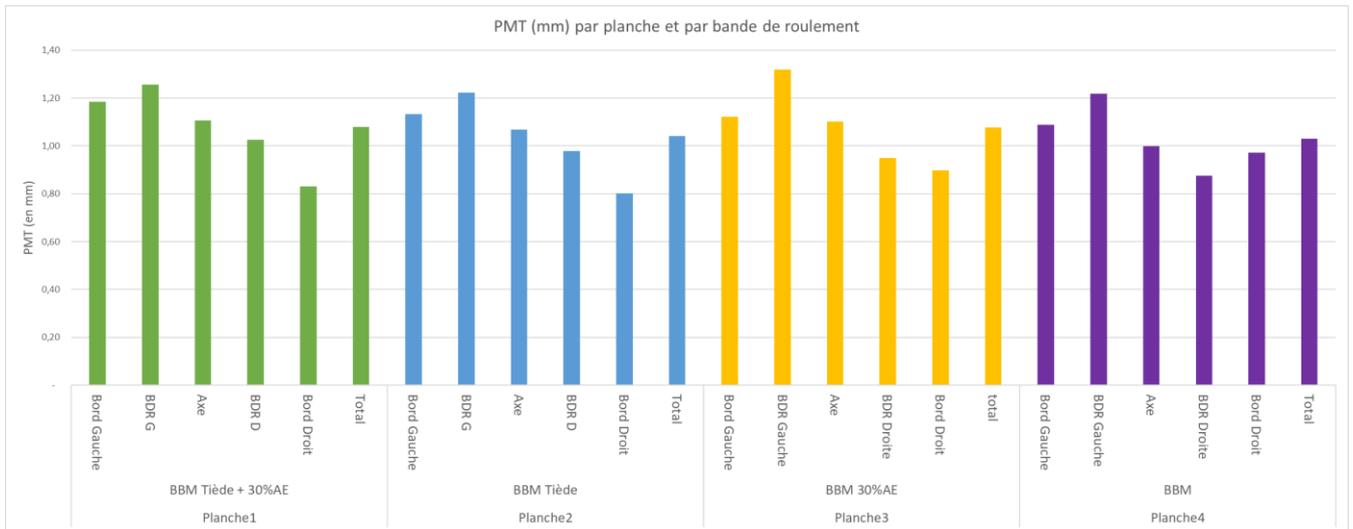
Toutefois, là aussi, les valeurs moyennes de PMT sur les 4 planches sont très proches, donc on peut également conclure que cet indicateur ne paraît pas discriminant dans le cadre de notre étude.

On constate, par ailleurs, que les valeurs moyennes de PMT sont un peu plus élevées sur les planches 1 et 3 avec des agrégats d'enrobés que sur les planches 2 et 4 (sans recyclés).

Toutefois, là aussi, les valeurs moyennes de PMT sur les 4 planches sont très proches, donc on peut également conclure que cet indicateur ne paraît pas discriminant dans le cadre de notre étude.

Pour des raisons de traitement et de visualisation des résultats, il a été fait le choix dans un premier temps de ne pas faire de différenciation entre PMT en axe et en bande de roulement dans cette partie d'étude, car cela engendrait des calculs plus longs et complexes qui ne semblaient pas nécessaires à ce stade de l'étude. Par ailleurs, dans le cadre du suivi de ce chantier innovant, nous ne disposons pas d'informations sur la localisation des mesures de PMT en axe et en bande de roulement.

Toutefois, dans un deuxième temps, nous avons toutefois réalisés ces calculs pour une visualisation des mesures de PMT en axe et en bandes de roulement.



Graphique 37 : Valeurs de PMT pour chaque planche et pour chaque bande de roulement

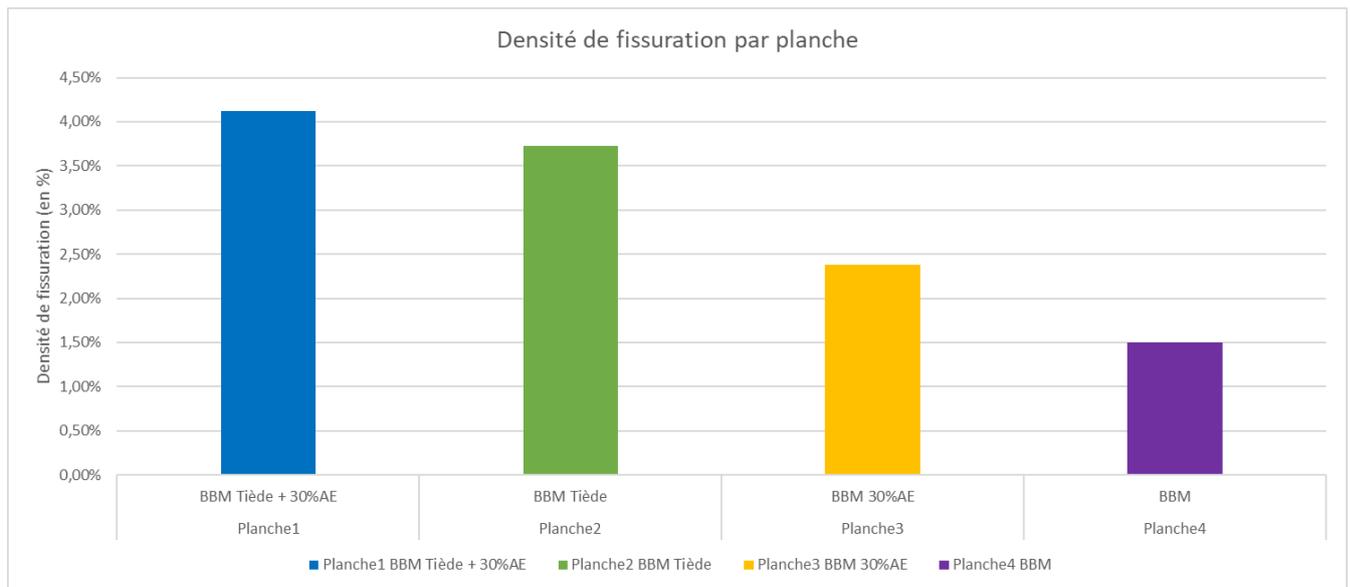
D'une manière générale, on constate que les valeurs moyennes de PMT sont un peu plus élevées en BDR gauche qu'en bord droit.

9.4.3 Analyse des fissurations et des zones sans dégradation d'après les données A3D

9.4.3.1 Etude des données de fissurations mesurées par l'A3D

Les données fournies par l'A3D concernant la fissuration sont des objets sans surface auxquels sont associés, arbitrairement, des tampons pour leur donner des surfaces. Dans ce cas de figure, il a été choisi un tampon de 10 cm autour de chaque fissure pour donner la surface de celle-ci.

Au final, nous disposons de la surface de chaque zone fissurée que nous pouvons comparer à la surface totale de la planche à laquelle la mesure est associée et obtenir un pourcentage de fissuration par planche.



Graphique 38 : Pourcentage de zones fissurées pour chaque planche pour le cas du site de la RN4

Cette représentation graphique permet de mettre en lumière les premières observations faites à la suite de la visualisation des résultats des données sous forme cartographique. En effet, sur ces cartes les fissures sont nettement visibles et on distingue très nettement les démarcations entre les différentes planches et il apparaît visuellement que la densité de fissure n'est pas la même d'une planche à l'autre.

Ce graphique permet donc de quantifier très précisément cette densité de fissure.

On peut dans un premier temps constater que le taux de fissuration est globalement faible pour l'ensemble des planches étudiées (< 5%).

On constate que les planches 1 et 2 (enrobés tièdes) présentent plus de fissures que les planches 3 et 4 (enrobés à chaud).

Toutefois, comme déjà mentionné dans les paragraphes précédents, nous avons constaté que les planches 1 et 2, situées sur la partie basse du tracé présentaient un nombre de « gonfles » plus important que les planches 3 et 4 situées sur la partie haute du tracé.

Par conséquent, il n'est pas exclu que les densités de fissures plus importantes rencontrées sur les planches 1 et 2 proviennent de désordres structurels plutôt que de la nature des couches de roulement.

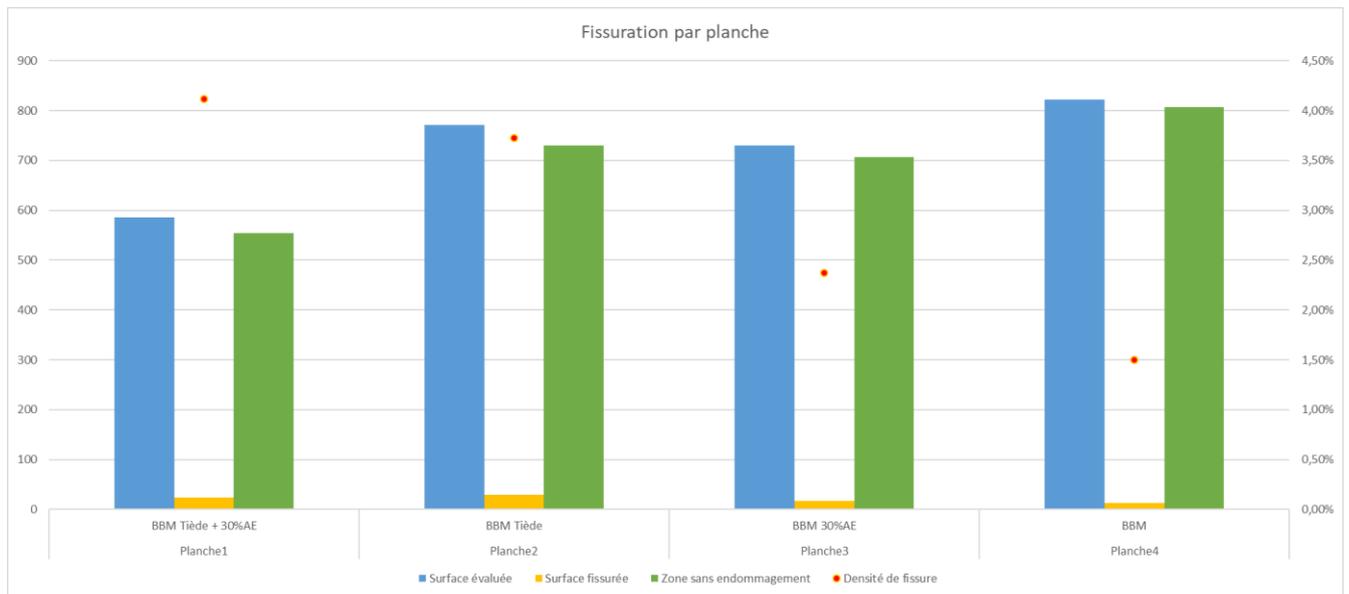
9.4.4 Etude des données concernant les zones sans dégradations recensées par l'A3D

L'A3D fournit, pour chaque planche, une surface correspondant aux zones sans dégradations. Cette information est utile pour présenter la santé de la couche de surface : plus la surface déduite est importante, moins la route est dégradée.

Pour rappel, la zone sans endommagement correspond à la zone où il n'y a ni zone fissurée, ni zone raveling de 01 à 05, ni zone orniérée de niveau 01 à 07.

Pour permettre une comparaison entre chaque planche, il a été choisi de représenter la proportion « surface de zone sans dégradation par rapport à la surface totale de la planche correspondante ».

A également été ajouté le pourcentage de zone sans fissure et enfin la différence entre les zones sans endommagement et les zones sans fissures.



Graphique 39 : Proportion surfacique de route ne présentant aucune dégradation pour chaque planche et en fonction de la technique de couche de roulement utilisée

Dans le cas du site de la RN4, les proportions de zone sans dégradations sont toutes supérieures à 90% de la surface totale pour les planches expérimentales réalisées en 2008.

Ces valeurs élevées permettent de conclure à une bonne tenue des couches de roulement des planches du site qui est due à leurs âges relativement peu élevés, ainsi qu'à une bonne structure de chaussée.

L'on peut également voir sur toutes les planches que la proportion de zone sans endommagement est quasiment égale à la proportion de zone sans fissure. Ceci est assez logique puisqu'on a vu précédemment qu'il n'y avait pas de raveling et très peu d'ornièrage.

Par conséquent, les zones sans endommagement correspondent quasiment aux zones sans fissures. On voit bien là encore que la fissuration est l'indicateur déterminant pour la comparaison des différentes planches dans le cadre de cette étude.

9.5 Comparaison avec les données issues du suivi de chantiers innovants

Comme évoqué au début de ce rapport (cf. § 9.1), nous disposons, en plus des données issues des mesures A3D, des données recueillies lors des suivis de chantiers innovants.

Pour rappel, ces données sont composées sur l'ensemble du linéaire par :

- la connaissance précise du site et des problématiques spécifiques associées (trafic, climat, travaux...);
- la structure de la route, à savoir les techniques utilisées sur chacune des couches de surface composant le linéaire ;
- les relevés visuels de dégradation à 1 an, 2 ans, 3 ans, 5 ans, 6 ans et 8 ans ;
- les mesures d'adhérence longitudinale à 1 an, 2 ans, 3 ans, 5 ans, 6 ans et 8 ans ;
- les mesures de macrotexture à 1 an, 2 ans, 3 ans et 5 ans (Rugolaser), puis à 6 ans et 8 ans (PMT par essais à la tache de sable) ;

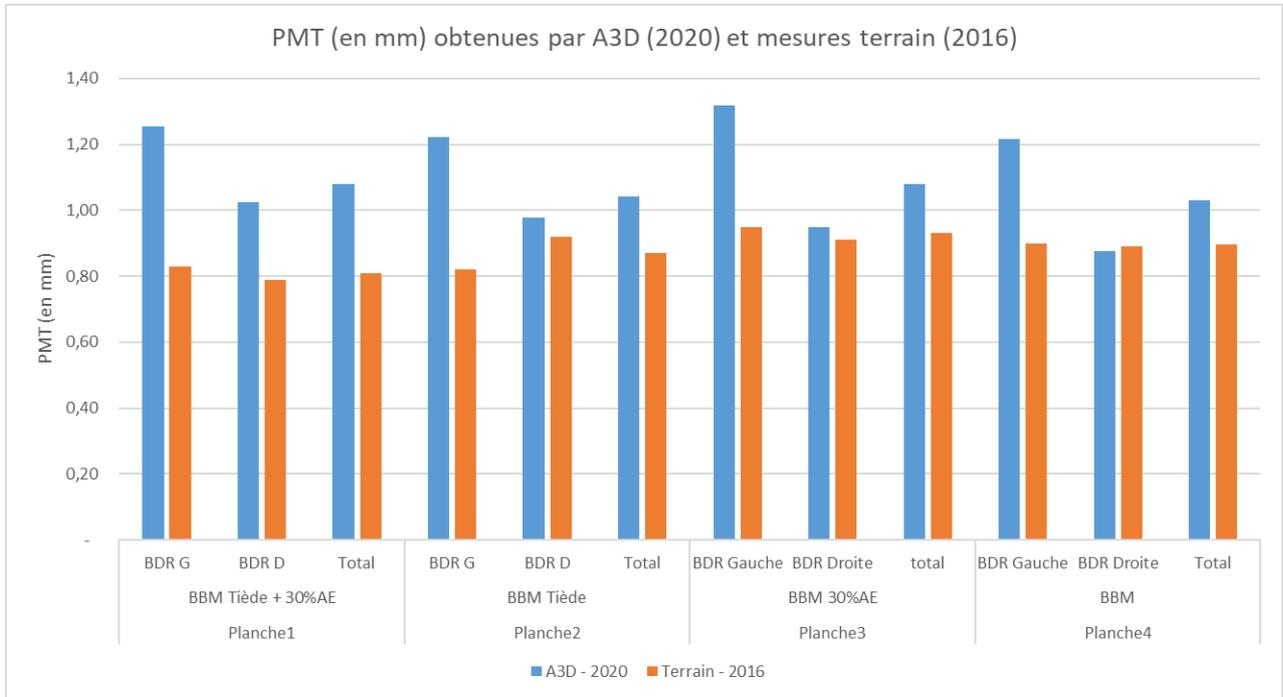
- les mesures d'uni longitudinal (APL) à 1 an et 2 ans ;
- les mesures de profil en travers à 1 an, 2 ans, 3 ans et 5 ans (TUS), puis 6 ans et 8 ans (Règle) ;

A noter également que des relevés à l'aide de l'Aigle RN ont été réalisées en 2016.

Si l'on retient les données communes aux mesures Aigle 3D et aux rapports de suivi, il ne reste plus que :

- les mesures de macrotexture à 1 an, 2 ans, 3 ans et 5 ans (Rugolaser), puis à 6 ans et 8 ans (PMT par essais à la tache de sable) ;
- les mesures d'uni longitudinal (APL) à 1 an et 2 ans ;
- les relevés visuels de dégradation à 1 an, 2 ans, 3 ans, 5 ans, 6 ans et 8 ans ;

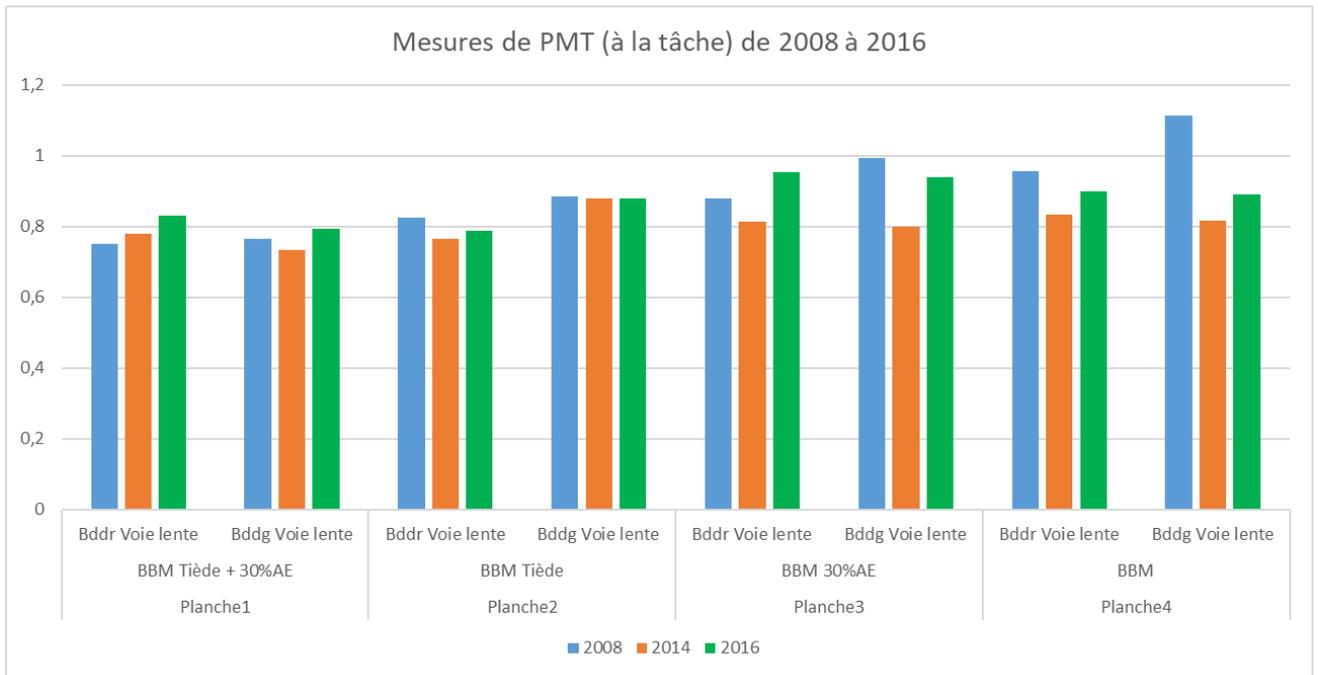
Nous pouvons donc essayer de comparer les mesures de macrotexture au cours des années, pour chacune des planches, bien que les techniques d'acquisition ne soient pas identiques, ce qui rend la comparaison assez incertaine.



Graphique 40 : Evolution de la PMT en fonction de l'âge et de la technique de mesure pour chaque planche

L'analyse de ce graphique permet de conclure que les valeurs moyennes de PMT mesurées par l'Aigle 3D en 2020 sont assez proches des valeurs mesurées en 2016 lors des suivis de chantier innovant (essais à la tache de sable), bien que les outils et les dates de mesure soient très différents.

Comme le montre le graphique ci-dessous, les valeurs obtenues au cours des différents suivis de 2008 à 2016 ne semblent pas montrer d'évolutions significatives de la macrotexture au cours du temps :

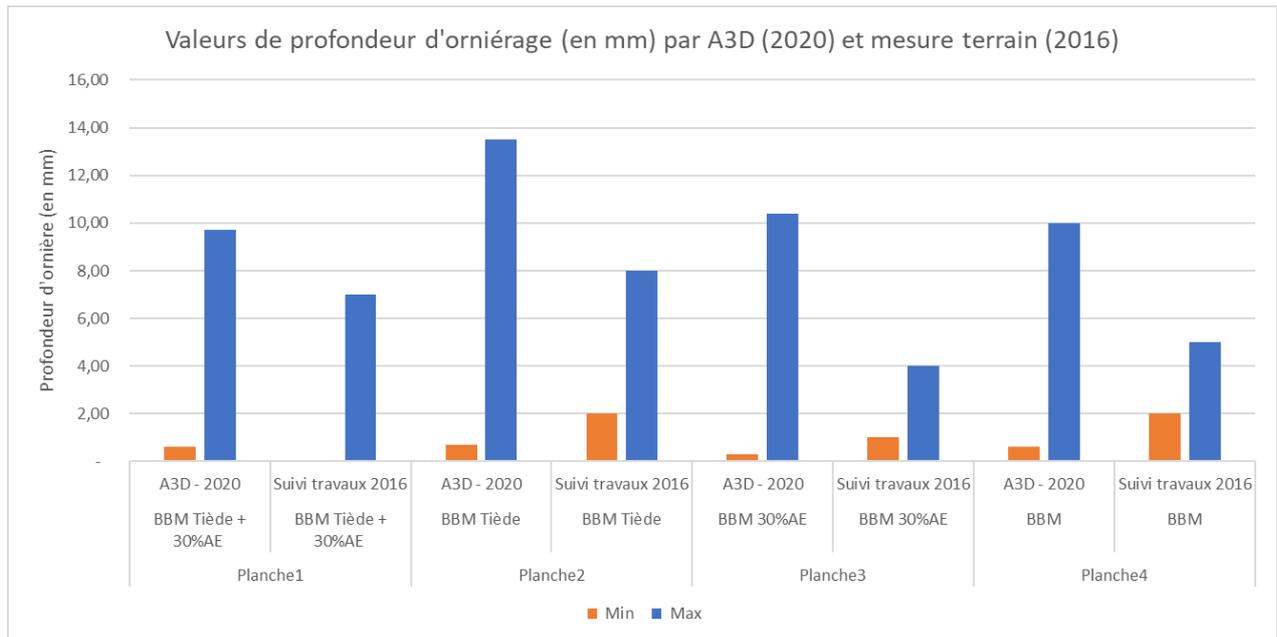


Graphique 41 : Evolution de la PMT en fonction de l'âge pour chaque planche (suivi des travaux)

A noter que concernant l'adhérence de cette section, les différents rapports de suivi de 2008 à 2016 montrent que le CFL tend à se stabiliser au fil du temps après une baisse les premières années.

Concernant l'orniérage petit rayon, il est difficile de comparer les mesures à la règle et les mesures Aigle 3D. En effet, lors des mesures à la règle, il n'a été relevé que les profondeurs minimales et maximales et non les profondeurs moyennes. Toutefois, si l'on s'intéresse aux profondeurs minimales, on constate que les valeurs obtenues avec l'Aigle 3D sont très proches de celles obtenues avec la règle. Quelques soient les appareils utilisés, les profondeurs minimales sont très faibles, voire nulles ce qui rend les comparaisons difficiles.

A l'inverse, les profondeurs maximales étant parfois élevées, il y a de plus grandes disparités entre les profondeurs d'orniérage obtenues avec l'Aigle 3D et la règle. On constate que les profondeurs maximales d'orniérage obtenues avec l'Aigle 3D sont légèrement supérieures à celles obtenues avec la règle, mais tout en étant du même ordre de grandeur.



Graphique 42 : Profondeur d'orniérage en fonction de l'âge et de la technique de mesure pour chaque planche

Pour l'orniérage petit rayon, on constate que les mesures Aigle 3D confirment les relevés terrain, à savoir la section ne présente que très peu d'orniérage. Comme nous l'avons vu précédemment, l'indicateur le plus déterminant pour comparer l'évolution des sections au cours du temps semble être la fissuration.

Malheureusement, si nous disposons bien de données concernant les dégradations et notamment les fissures, il ne s'agit là que de données essentiellement qualitatives.

En effet, les différents rapports de suivi réalisés depuis 2008 sont des relevés visuels de type SSV réalisés suivant la méthode d'essai LPC 38-2 relative au « Relevé des dégradations de surface des chaussées » avec un mode de relevé M2.

Si le premier relevé visuel de dégradations, réalisés en 2009, c'est-à-dire un an après les travaux, n'indiquent pas de dégradation, le relevé réalisé en 2010 indique l'apparition de 3 fissures transversales sur la planche n°1 (BBM Tiède avec 30% d'AE).

Le relevé de 2011 mentionne de nouvelles fissures sur les planches 1 et 2.

Le relevé de 2012 montre que les fissures sont de plus en plus présentes sur l'ensemble des planches avec une fréquence plus importante sur la planche n°1.

Le relevé de 2014 indique, lui, qu'il y a une évolution des fissures transversales, notamment en voie lente.

Enfin, le dernier rapport de suivi, réalisé en 2016 (Suivi à 8 ans) indique que les fissures transversales sont en évolution.

En conclusion, si les relevés de dégradations visuelles sont difficilement comparables avec les relevés Aigle 3D qui sont beaucoup plus précis et quantitatifs, ils permettent de mettre en évidence l'évolution des dégradations qui sont apparues au cours du temps sur cette section.

Ainsi, les premières fissures transversales semblent être apparues en 2010, soit 2 ans après les travaux, puis le nombre de fissures transversales a continué d'augmenter au cours des ans.

Comme cela a d'ailleurs été constaté lors de la visite sur le terrain du 28 avril 2022, les fissures transversales sont beaucoup plus nombreuses sur la planche n°1 (BBM tiède avec 30% d'AE

que sur les autres planches). Comme déjà évoqué précédemment, les causes de l'apparition de ces fissures transversales semblent plus certainement provenir de la configuration du site (zone en contrebas avec de la végétation importante et possiblement des problèmes d'assainissement) que de la nature de la couche de roulement.

Par ailleurs, nous disposons sur cette section des auscultations réalisées à l'aide de l'Aigle RN au cours de l'année 2016

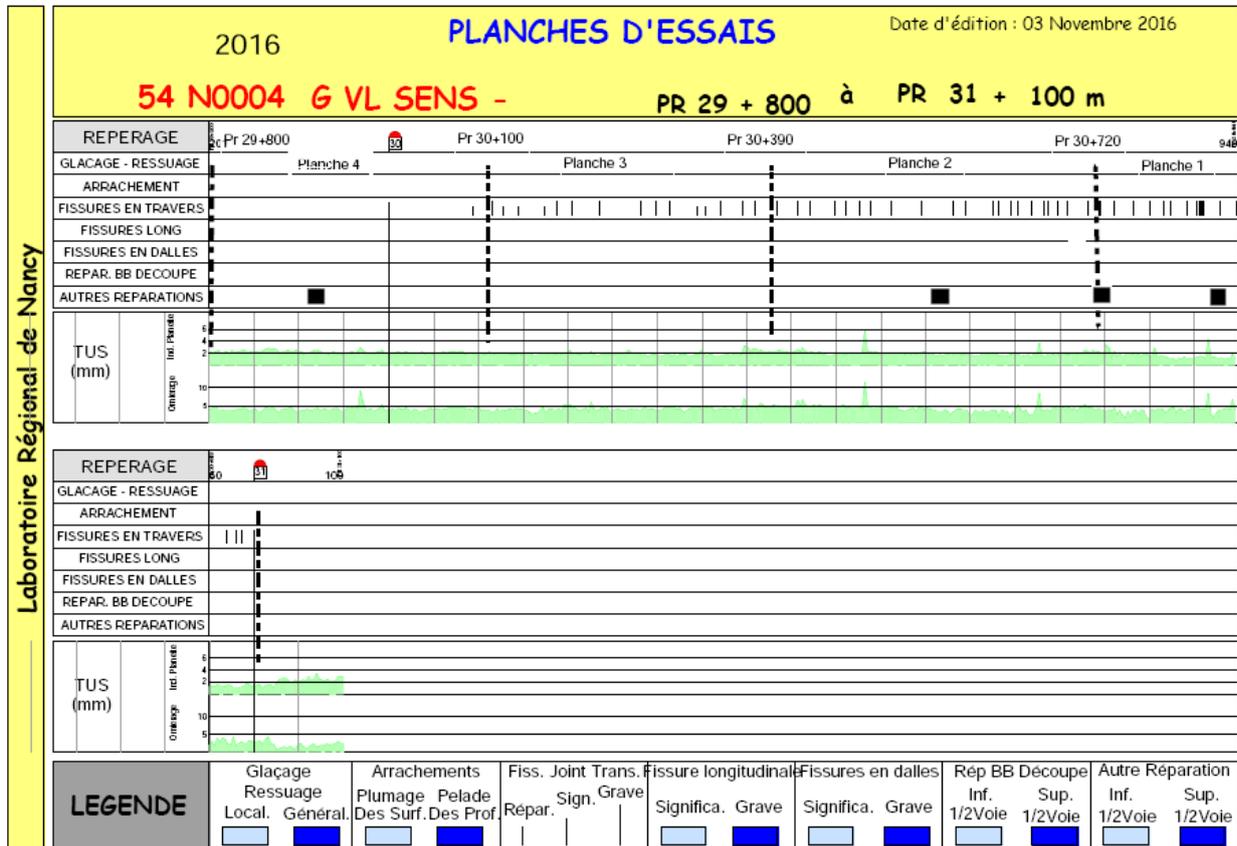


Figure 31 : Schéma itinéraire établi à partir des données Aigle RN en 2016

Ce schéma itinéraire montre la présence d'un nombre important de fissures transversales, notamment sur les planches 1, 2 et 3.

Il ne semble pas y avoir de fissures longitudinales.

Des réparations sont mentionnées, probablement des gonfles sur les planches 1, 2 et 4.

L'orniérage semble faible puisqu'il ne dépasse quasiment pas de la valeur seuil de 5 mm, à l'exception de quelques pics très ponctuels qui restent inférieurs à 10 mm.

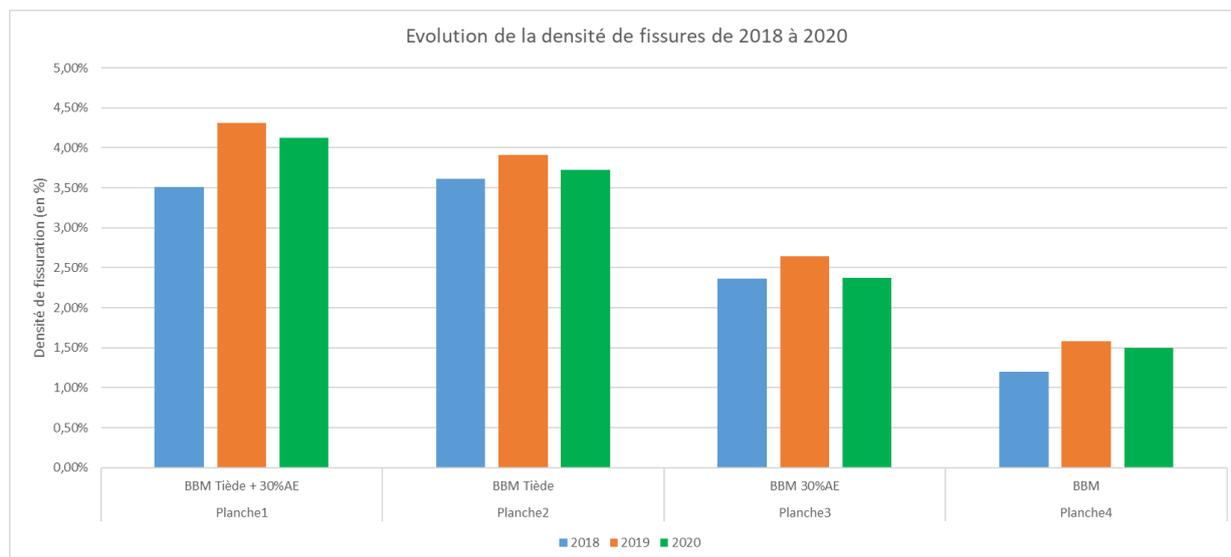
En conclusion, les résultats obtenus à l'aide de l'outil Aigle 3D en 2016 confirment les observations faites lors du suivi de travaux réalisé en 2016, à savoir : orniérage très faible, de nombreuses fissures transversales et des gonfles principalement sur les planches 1 et 2.

9.6 Comparaison des résultats obtenus avec l'Aigle 3D sur plusieurs années.

Comme la section objet du présent rapport fait partie du réseau routier national non concédé, nous avons la chance d'avoir accès aux données des mesures réalisées par l'Aigle 3D sur plusieurs années.

En l'occurrence, nous disposons des données pour les années 2018, 2019 et 2020 que nous avons analysées.

Comme nous avons vu que le principal indicateur discriminant entre les différentes planches était la fissuration, nous avons regardé l'évolution de la densité de fissuration entre 2018 et 2020 pour chacune des planches.



Graphique 43 : Evolution de la densité de fissures mesurée par l'Aigle 3D de 2018 à 2020 pour chaque planche

On constate que la densité de fissuration est légèrement plus élevée en 2019 qu'en 2018, ce qui traduit une légère détérioration de la chaussée qui correspond à son vieillissement normal.

Par contre, entre 2019 et 2020, nous avons une très légère diminution de la densité de fissures, ce qui, en l'absence de travaux sur la chaussée, n'est pas l'évolution attendue. Toutefois, l'écart est de l'ordre de 0,1 % de la surface ce qui est faible.

Par contre, on observe la même évolution de la densité de fissures quelles que soient les planches.

Cette diminution de fissures entre 2019 et 2020 s'explique probablement par des biais de mesures ou par les limites de répétabilité des mesures effectuées à l'aide de l'Aigle 3D.

Dans un premier temps, nous avons vérifié, s'il n'y avait tout simplement pas eu inversion des années de mesures. Après vérification, il s'avère que les dates indiquées de mesures sont bien les bonnes.

Ensuite, nous avons superposé les couches des 3 années (2018, 2019 et 2020) sur une même carte pour voir où se situaient les éventuelles différences entre les résultats des 3 années.

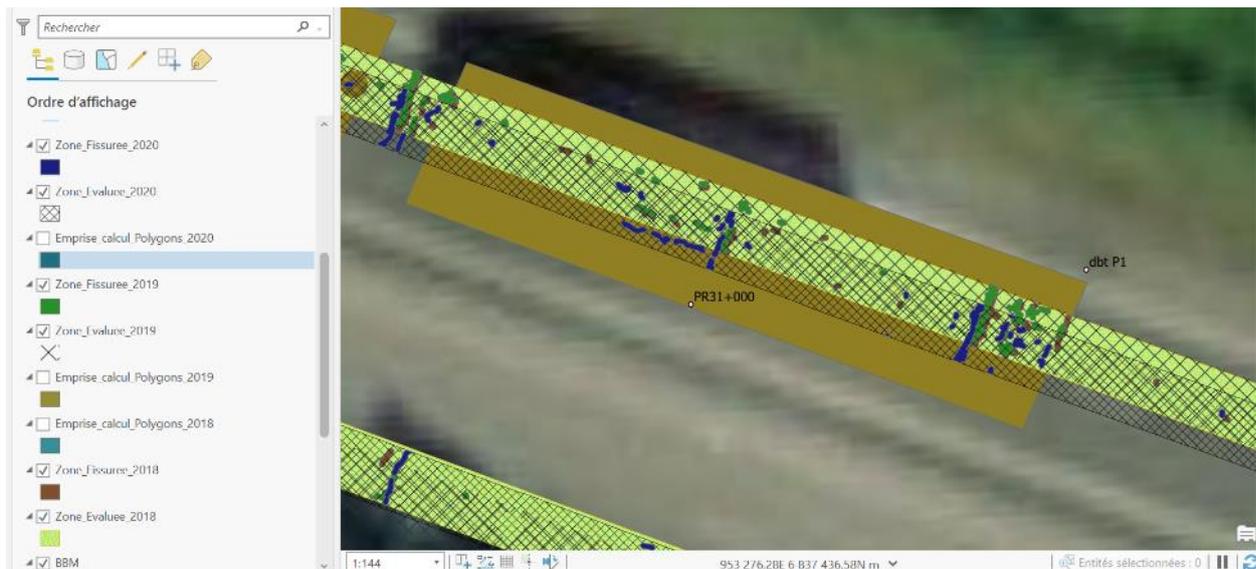


Figure 32 : Superposition des données Aigle 3D des années 2018 à 2020

On constate sur cette carte que la trace (zone évaluée) de l'Aigle 3D est quasiment la même en 2018 qu'en 2019 et que ces 2 couches se superposent exactement. A l'inverse, la trace de l'Aigle 3D en 2020 ne se superpose pas avec les traces de 2018 et 2019. On constate un décalage d'environ 80 cm entre les 2 traces.

Ceci aurait pu expliquer le résultat incohérent au niveau des densités de fissures calculées entre 2020 et 2019, mais en réalité, comme nous avons une approche calculatoire indépendante de la localisation des tracés, cela ne change rien au résultat final.

L'explication du biais de mesure est donc à trouver ailleurs.

En observant les zones fissurées relevées par l'Aigle en 2019 et en les comparant avec celles de 2020, on constate qu'effectivement, si l'Aigle 3D a relevé beaucoup de fissures en 2020 qui apparaissent déjà en 2019, il s'avère également que certaines fissures qui apparaissent en 2019 n'apparaissent pas en 2020, ni en 2018.

L'inverse est également vrai à certains endroits.

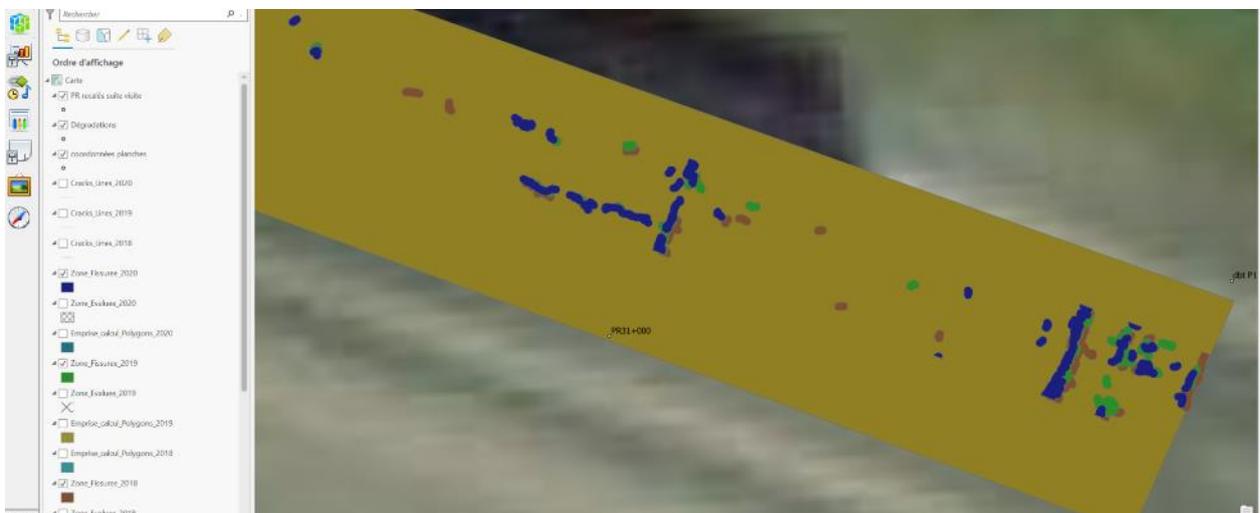


Figure 33 : Superposition des zones fissurées relevées par l'Aigle 3D des années 2018 à 2020

Il resterait maintenant à comprendre pourquoi certaines fissures sont détectées certaines années et pas d'autres.

Comme nous nous sommes posés la question de savoir si l'apparition ou surtout la disparition de fissures entre 2 relevés ne pouvaient pas venir des périodes de l'année où l'Aigle 3D est passé (fissures qui s'ouvrent ou se ferment plus ou moins en fonction de la saison), nous avons regardé les conditions météorologiques le jour des mesures.

Or, il s'avère que les 3 années, les mesures ont été réalisées à la même période de l'année.

Le tableau ci-dessous récapitule les conditions météorologiques lors des mesures :

Année de mesure	Date de mesure	Météo	Pluviométrie	Température
2018	5 juin	Averses faibles	4,2 mm	18/25 °C
2018	7 juin	Averses faibles	8,2 mm	18/25 °C
2019	24 juillet	Sec et ensoleillé	0 mm	24/36 °C
2019	25 juillet	Sec et ensoleillé	0,2 mm	26/37 °C
2020	24 juin	Sec et ensoleillé	0 mm	15/25 °C

Figure 34 : Dates et conditions météorologiques des relevées par l'Aigle 3D des années 2018 à 2020

On constate qu'en 2019, les températures étaient plus élevées qu'en 2018 et 2020 et que les fissures relevées par l'Aigle 3D étaient plus nombreuses cette année-là.

Pour autant, il est difficile de faire un lien entre ces 2 observations, dans la mesure où l'on pourrait plutôt penser que les fissures auraient plutôt tendance à diminuer avec l'augmentation de température du fait de la dilatation des matériaux qui aurait plutôt tendance à combler les fissures qu'à les ouvrir.

Pour approfondir ce point, il conviendrait de réaliser un travail sur les densités de fissuration du réseau national sur plusieurs années de relevés (2018 à 2022), mais cela nécessiterait de connaître parfaitement l'entretien courant réalisé par le gestionnaire, ce qui est extrêmement délicat.

9.7 Conclusions pour le site de la RN4

Au vu des mesures réalisées de 2018 à 2020, à l'aide de l'outil Aigle 3D, sur ces sections de la RN4 (ex-N333), il apparaît que, comme pour les sections déjà étudiées auparavant (RD996 et RD949B), l'indicateur le plus pertinent pour comparer les différentes planches est l'observation et le recensement des zones fissurées.

A l'analyse de ces résultats, il apparaît que les conclusions sont relativement similaires à celles déjà émises suite à l'analyse de ces sections, à savoir :

- Le taux de fissuration est relativement faible après 10 à 12 ans de service ;
- Les planches d'enrobés tièdes semblent présenter plus de fissuration que les planches d'enrobés chauds, mais cela vient peut-être de la configuration du site et des

- nombreuses gonfles (désordres structurels) observées sur les planches en enrobés tièdes situées en bas de la colline ;
- Les planches d'enrobés à 30% d'AE semblent avoir une macrotecture très légèrement meilleure que les planches sans recyclage d'agrégats d'enrobés ;
 - Les densités de fissuration des différentes planches, relevées par l'Aigle 3D de 2018 à 2020, évoluent sensiblement de la même manière au cours des années ;
 - En l'état actuel, il n'est malheureusement pas possible de déterminer une évolution cohérente de l'évolution de la densité de fissuration au cours du temps, à l'aide de l'Aigle 3D ;

Enfin, s'il est intéressant de constater que les résultats observés sur la RN4 semblent corroborer ceux observés sur la RD996 et la RD949B, il sera intéressant de voir les résultats obtenus sur les autres planches contenant des couches de surface à fort taux de recyclage qui doivent également être auscultées dans le cadre de ce projet, pour étayer ces premières conclusions avec un échantillon statistique plus représentatif que celui dont on dispose jusqu'à présent.

10 Essais en laboratoire – Caractérisation des matériaux en place

Au cours du projet, il a été évoqué l'intérêt qu'il y aurait à réaliser des essais de caractérisation des matériaux en place sur les planches auscultées dans le cadre du présent rapport.

En effet, l'idée est de faire le lien entre les caractéristiques mécaniques et physico-chimiques des matériaux mis en place après plusieurs années de service et les constats faits suite aux auscultations réalisées sur ces mêmes couches de surface à l'aide des capteur LCMS.

Idéalement, il aurait été également intéressant de connaître les caractéristiques des matériaux au moment de leur mise en œuvre pour avoir un « point zéro ». Malheureusement, il n'a pas été possible de retrouver les résultats d'essais ayant été réalisés avant la mise en œuvre des couches de surface, ni même de savoir si ces types d'essais avait été effectués à l'époque.

10.1 Consistance et nature des essais

Dans le cadre du présent projet, il a été jugé opportun, dans un premier temps, de réaliser les essais suivants :

- ▶ Récupération de bitumes pour pouvoir ensuite réaliser des essais « classiques » sur les bitumes récupérés ;
- ▶ Essai de pénétrabilité à l'aiguille sur bitume récupéré (norme NF EN 1426). L'essai consiste à mesurer la pénétration d'une aiguille de référence dans un échantillon dans des conditions d'essai définies ;
- ▶ Essai température bille-anneau (TBA) sur bitume récupéré (norme NF EN 1427). Dans des conditions d'essais définies, l'essai TBA consiste à mesurer la température moyenne à laquelle des disques de bitume soutenant chacun une bille d'acier se ramollissent suffisamment pour permettre à la bille en acier de descendre d'une hauteur définie.

Par ailleurs, afin de pouvoir réaliser ces essais, il est nécessaire de procéder à des carottages de la chaussée pour récupérer les matériaux de surface.

Dans un premier temps, nous nous sommes concentrés sur les sections précédemment étudiées qui nous semblaient les plus pertinentes.

Aussi, au vu du coût des différents essais et des résultats déjà obtenus lors de l'auscultation par les capteurs LCMS des 5 sections du présent projet, il a été décidé de retenir en priorité les sites 1 (RD996 – CD21) et 2 (RD949B – CD85) qui nous paraissent les plus pertinents.

En effet, les sites 3 (RD84 – CD83) et 4 (RD730 à Semussac – CD17) ne comprennent pas de planches témoins (sans recyclés) et n'apparaissent donc pas comme pertinents.

Le site 5 (RN4 – DIR Est), quant à lui, s'il est intéressant, car il présente plusieurs planches (avec et sans recyclés, tièdes et chauds) présente néanmoins l'inconvénient d'avoir un certain nombre de désordres structurels (problèmes de gonfles) qui peuvent remettre en cause ou rendre difficile l'exploitation des résultats que l'on pourrait obtenir.

De plus, au vu du fort trafic sur cette section, cela imposerait des contraintes supplémentaires pour la réalisation des carottages (travaux de nuit, probables délais plus longs pour l'autorisation par le gestionnaire, etc...) qu'il est pour l'instant préférable d'éviter.

Finalement, pour des raisons de budget et de délais (temps restant assez court avant l'échéance du projet DVDC), dans le cadre de ce projet, il a été décidé de réaliser des essais de caractérisation des matériaux uniquement sur le site 2 (RD949B – CD85).

Toutefois, l'ensemble de l'équipe projet pense qu'il serait très intéressant de réaliser ces essais sur d'autres sections du projet et notamment sur le site 1 (RD996 – CD21).

Il conviendrait d'approfondir le sujet pour trouver comment cela pourrait se faire dans le cadre d'un autre projet de recherche à venir (comme par exemple dans le cadre du Groupe National Recyclage 2 de l'Idrim).

10.2 Résultats des essais réalisés

Les essais ont donc été effectués sur les 3 planches de la couche de roulement de la RD 949B (Commune de Bournezeau - Département de la Vendée).

Pour rappel, les principales caractéristiques du site de la RD949B sont les suivants :

- Une planche témoin avec BBSG à 20 % d'AE ;
- Une planche REGEFALT avec BBSG à 40 % d'AE ;
- Une planche avec BBSG à 40 % d'AE sans additif spécifique dans le liant ;

Les travaux de mise en œuvre de cette couche de surface datent de 2014.

Dans un premier temps, il était prévu une extraction simple des bitumes et des essais standards de consistance pour caractériser le bitume (pénétrabilité et TBA). Toutefois, suite à

la suggestion de l'Université Gustave Eiffel, il a été décidé de procéder également à des essais de désenrobage séquencé.

N° échantillon	Nature matériau
22 069	BBSG 40% AE + Regefalt
22 070	BBSG 40% AE
22 071	BBSG 20% AE

Figure 35 : identification des échantillons du site de Bournezeau

10.2.1 Résultats des essais de consistance sur les bitumes

Les PV des essais figurent en annexe 3.

Les bitumes ont été récupérés pour chaque carotte d'enrobé et des essais de consistance ont été réalisés pour chaque bitume récupéré. Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau ci-après :

N° échantillon	Nature matériau	Pénétrabilité à 25°C (1/10mm)	TBA moyenne (°C)
22 069	BBSG 40% AE + Regefalt	16	65,0
22 070	BBSG 40% AE	15	65,8
22 071	BBSG 20% AE	19	61,8

Figure 36 : Tableau de synthèse des résultats d'essais Pénétrabilité et TBA des échantillons du site de Bournezeau

D'après la norme NF EN 13 924-1 « Bitumes et liants bitumineux – Cadre de spécifications pour les bitumes routiers spéciaux – Partie 1 : Bitumes routiers de grade dur » (mars 2016), les caractéristiques de ces liants correspondent à un bitume de grade 10/20 (Pénétrabilité à 25°C comprise entre 10 et 20 ^{1/10} mm et TBA moyenne comprise entre 60 et 76°C). Ce qui est assez normal puisque les bitumes analysés ont subi un passage en centrale (cycle de chauffe), ainsi qu'un vieillissement à l'air libre pendant plusieurs années (plus de 8 années).

On peut constater que parmi ces 3 bitumes, le bitume avec 20% AE est le bitume le moins dur, mais il y a très peu d'écart entre les 3 bitumes analysés, puisqu'ils sont tous dans la même classe (10/20 pour la pénétrabilité et 60-76°C pour le point de ramollissement).

A ce stade, on peut dire que sur ces 2 essais (pénétrabilité et point de ramollissement), il n'y a pas de différences significatives de comportement entre les 3 bitumes analysés.

Toutefois, on peut faire le lien entre le fait que le bitume avec 20% AE est le bitume le moins dur et que la planches avec 20% AE est également celle qui présente le moins de fissures.

Aussi, il serait intéressant, par la suite, de pouvoir faire ce type d'essais sur les enrobés des autres sections pour voir si l'on peut raisonnablement établir un lien entre dureté des bitumes et fissurations observées.

10.2.2 Désenrobage séquencé

10.2.2.1 Objet de l'essai

L'essai de désenrobage séquencé a été développé par Eurovia en 2011 dans le cadre de la thèse de Julien Navaro « Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques » [3]. Cet essai, qui consiste à solvater de manière séquencée le bitume d'un enrobé, permet de qualifier le degré de mélange du bitume vieilli issu de matériaux recyclés (Agréats d'Enrobés) et du bitume neuf (bitume d'apport).

Dans le cadre du projet DVDC, les essais ont été réalisés par l'UGE en s'appuyant sur la méthode mise au point par Eurovia. Les résultats obtenus ont été comparés entre eux ainsi qu'avec des matériaux ayant aussi été testés par l'UGE (Loiseleur et al. ; 2021) [4] dans le cadre d'autres affaires. L'objectif est de voir quel est le degré d'homogénéité des mélanges prélevés.

10.2.2.2 Description de l'essai de désenrobage séquencé

L'essai consiste à dissoudre de manière séquencée le bitume d'un enrobé et à déterminer le degré d'oxydation de chaque solution récupérée en utilisant un essai d'infrarouge. Il s'agit d'une méthode appelée « la lixiviation ». Pendant cette lixiviation, l'essai se déroule selon les étapes suivantes :

- Pulvérisation d'une faible quantité de perchloroéthylène² dans l'enrobé par séquence afin d'enlever couche par couche le bitume de l'enrobé. La pulvérisation est répétée n³ fois jusqu'à la dissolution complète du film de liant ;
- Récupération des solutions de bitume dans le perchloroéthylène après chaque séquence de pulvérisation. Les premières solutions récupérées correspondent au bitume dissout au début de l'extraction dans le perchloroéthylène et les dernières solutions correspondent au bitume dissout à la fin de l'extraction dans le perchloroéthylène. Les solutions obtenues s'appellent les lixiviats
- Analyse de chaque lixiviat au spectromètre IR (InfraRouge) et détermination des Indices Carbonyle (ICO) ;

A la fin de la lixiviation (après avoir analysé une dizaine de lixiviats), les indices carbonyle (ICO) de chaque lixiviat sont représentés graphiquement en fonction de la fraction massique de bitume lixivié.

A la fin de l'essai, on obtient une courbe de l'ICO au cours du désenrobage séquencé. L'ICO permet de déterminer le degré de vieillissement du liant. L'essai de désenrobage séquencé permet de voir si les bitumes neufs et ceux contenus dans les agrégats d'enrobés recyclés se mélangent bien.

La figure de la Figure 37 illustre le principe de l'essai.

² solvant avec une très bonne affinité avec le bitume

³ n généralement proche de 10

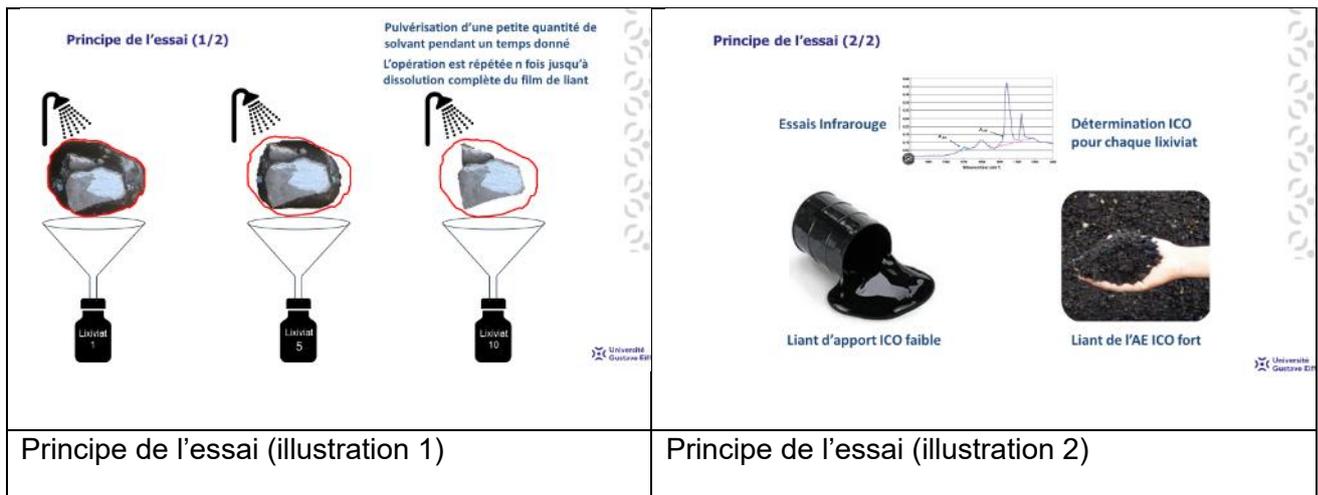


Figure 37: Illustration de l'essai de désenrobage séquencé

10.2.2.3 Interprétation des résultats

Comme l'essai de désenrobage séquencé est un essai relativement récent ne faisant pas l'objet d'une norme d'essai, il n'existe pas d'indicateurs uniques partagés par toute la profession. Aussi, plusieurs indicateurs existent pour interpréter les résultats. Ces indicateurs seront certainement amenés à évoluer dans les années à venir. Il y a actuellement un groupe de travail, nommé DESSEQ, pour définir ces indicateurs.

En attendant, dans le cadre de la présente étude, il a été utilisé des indicateurs issus des travaux de thèse de Julien Navaro ; d'Eurovia (Delfosse et al. ; 2017) et du projet MURE⁴ (Boulangé et al., 2018) [5].

Les indicateurs utilisés sont donc les suivants :

- Un indicateur basé sur le coefficient de la droite de régression (représentant l'évolution des ICO en fonction de la fraction massique de bitume lixivié). Si la pente de cette droite est nulle, le mélange est considéré comme homogène. Une droite avec une pente positive traduit l'évolution d'un liant peu oxydé vers un liant plus oxydé. Plus cette pente est forte, plus le mélange est hétérogène. Enfin, il existe un dernier cas avec une pente négative. Nous avons donc une évolution d'un liant oxydé vers un liant moins oxydé. Cette pente négative est le constat d'une suroxydation du film de liant de surface dû au procédé industriel de fabrication.
- Un indicateur BR pour mesurer et comparer le degré de remobilisation des liants. L'indicateur de mélange appelé « Blending Rate » (BR) est calculé à partir de deux indices de référence. Cet indicateur est égal au rapport entre le niveau d'oxydation des derniers lavages « N_{final} » et le niveau moyen d'oxydation des premiers lavages « N_i ». Un rapport BR supérieur à 1,3 est synonyme d'une mauvaise remobilisation.

Les résultats obtenus sur les matériaux de l'étude sont comparés entre eux.

⁴ MURE : Multi-recyclage des enrobés.

La représentation graphique de l'évolution des ICO en fonction de la fraction massique de bitume lixivié figurent ci-après pour tous les matériaux :

Figure 38: Résultats pour BBSG avec 20% AE

1. .
2. Figure 39: comparaison BBSG 20% AE et BBSG 40% AE
3. Figure 40: comparaison BBSG 40% AE avec enrobé à chaud référence
4. Figure 41 : comparaison BBSG 40%AE avec régénérant (points jaune) et sans régénérant (points orange)

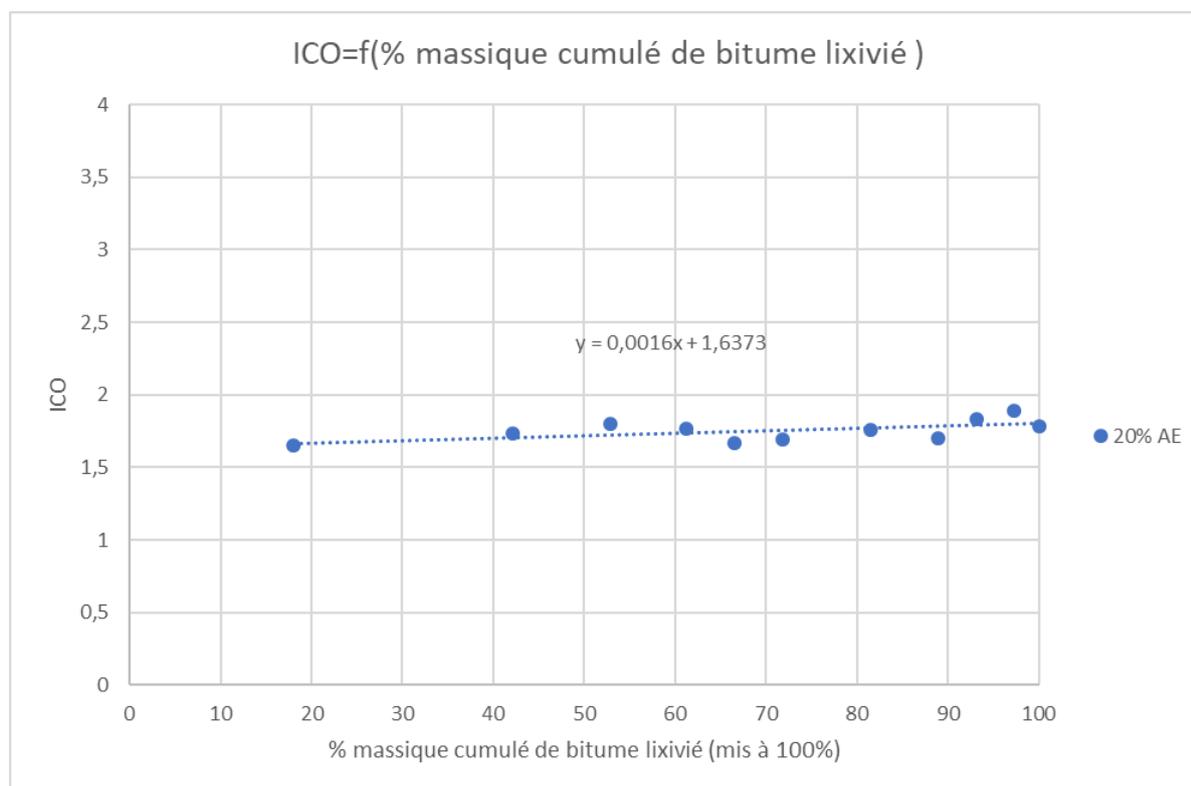


Figure 38: Résultats pour BBSG avec 20% AE

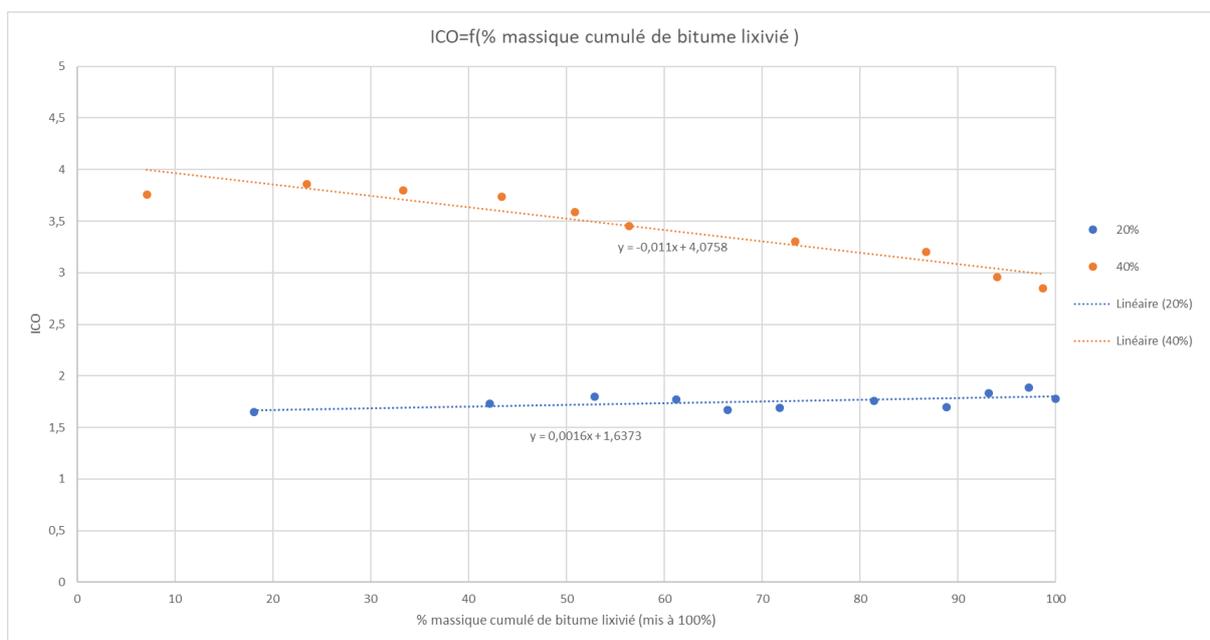


Figure 39: comparaison BBSG 20% AE et BBSG 40% AE

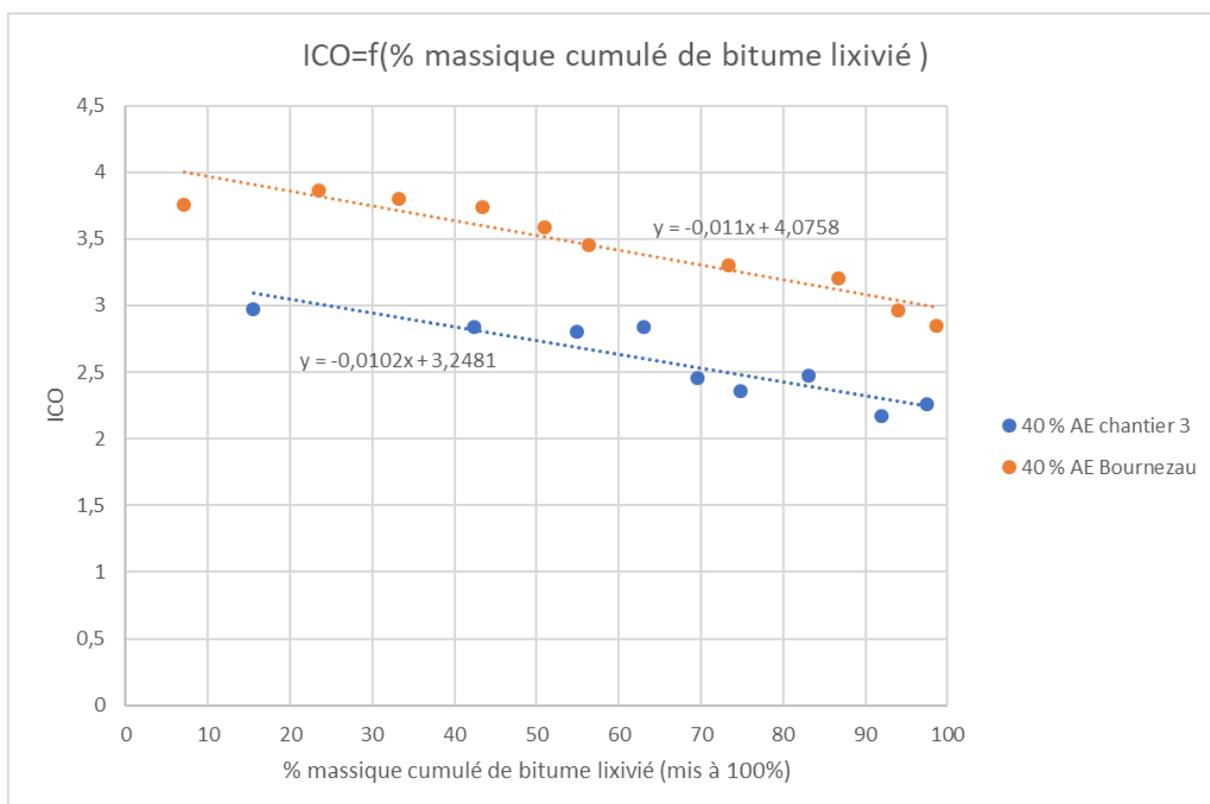


Figure 40: comparaison BBSG 40% AE avec enrobé à chaud référence

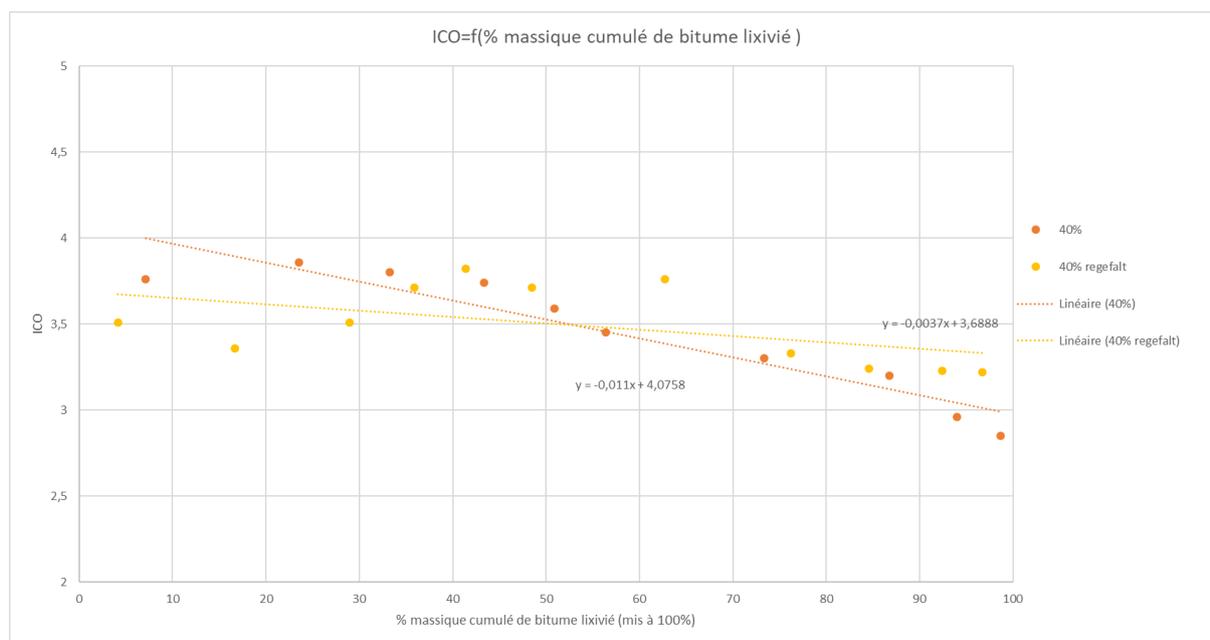


Figure 41 : comparaison BBSG 40%AE avec régénérant (points jaune) et sans régénérant (points orange)

Le tableau ci-après indique les valeurs des indicateurs pour chaque matériau :

Matériau projet DVDC étudié	Pente	Différence entre ICO max et ICO min	BR
BBSG avec 20% AE (enrobé chaud)	0,0016	0,24	1,09
BBSG avec 40% AE (enrobé chaud)	-0,011	1,01	0,80
BBSG avec 40% AE et régénérant (enrobé chaud)	-0,0037	0,6	0,94

Figure 42 : résultats de l'essai de désenrobage séquentiel pour les 3 matériaux étudiés

Le mélange à 20% d'AE présente les meilleurs indicateurs, pente positive proche de 0, écart entre les ICO max et ICO min faibles et un BR proche de 1.

Les mélanges avec 40% d'AE présentent des caractéristiques avec des pentes négatives sûrement dues à des augmentations de température des granulats d'apport par rapport au mélange à 20% qui conduit à une suroxydation du liant dans les premiers lixiviats donc assimilé au liant de surface.

10.2.3 Interprétations et conclusions

Les principaux résultats de ces essais montrent que :

- Dans les 3 cas la remobilisation du liant est correcte.
- Le mélange à 20% est le plus homogène, suivi du mélange à 40% avec régénérant et enfin le mélange à 40% sans régénérant.

Concernant l'homogénéité des mélanges testés, les conclusions sont les suivantes :

- Pas de cas de double enrobage ;
- Effet positif du régénérant sur l'homogénéité des valeurs d'oxydation du bitume.

On pourrait être tenté de faire le lien entre ces résultats et la densité de fissuration plus importante relevée par l'Aigle 3D sur les planches à 40% que sur les planches à 20%.

Toutefois, il faut faire attention à ne pas tirer de conclusions hâtives. En effet, les indicateurs donnent juste des informations sur l'homogénéité du mélange et pas sur les caractéristiques mécaniques des enrobés qui pourraient avoir une incidence éventuelle sur le vieillissement de ce dernier. Par ailleurs, les valeurs d'ICO sont plutôt basses, comprises entre 3 et 4, ce qui ne traduit pas un vieillissement exagéré du liant (rappel : ICO liant neuf < 1 ; ICO liant d'AE > 7), ce qui est en phase avec les relevés Aigle 3D qui indique que les fissures, même si elles sont plus importantes sur les sections à 40% d'AE qu'à 20% d'AE restent finalement peu élevées dans l'absolu (couche de surface toujours en place après 9 ans de mise en œuvre).

Ces conclusions rejoignent, en grande partie, celles du projet national MURE (Multi-Recyclage des Enrobés) qui a pu démontrer que, pour les taux de recyclage inférieurs ou égaux à 40%, « les usines d'enrobage utilisées dans le cadre du projet sont capables de mélanger le liant d'apport et celui de l'AE. Il n'y a pas de crainte à avoir quant à un niveau d'hétérogénéité qui serait introduit par la présence d'AE et serait néfaste aux propriétés d'usages de l'enrobé. Les résultats ne montrent pas d'influence de la méthode de production (à chaud, à tiède) sur les propriétés des enrobés. Pour le maître d'ouvrage, la méthode de production ne doit donc pas être une préoccupation pour autant qu'elle soit maîtrisée par l'entreprise qui la met en œuvre. »

11 Conclusions générales

11.1 Conclusions des relevés in situ A3D

L'analyse des relevés A3D sur les différents sites auscultés dans le cadre de ce projet a montré que pour les descripteurs calculés, seul le descripteur « fissures » paraissait vraiment discriminant.

En effet, concernant le descripteur raveling, il s'avère que :

- Ce descripteur est quasi nul sur tous les sites étudiés ;
- L'exploitation de cet indicateur ne permet pas de discriminer les différents sites auscultés entre eux ;
- L'utilisation d'agrégats d'enrobés n'a pas d'incidence sur l'indicateur et globalement toutes les sections auscultées présentent un bon comportement vis-à-vis du descripteur « raveling ».

Il en est de même, pour le descripteur orniérage petit rayon.

Enfin, le descripteur PMT s'il met en évidence quelques disparités entre les différentes planches, ne permet pas de tirer des conclusions fiables sur la durée de vie des couches de surface mises en œuvre.

En effet, au cours du temps, la macrotexture de la couche de surface peut dans un premier temps diminuer (phénomène de fermeture de l'enrobé par colmatage), puis s'ouvrir s'il y a ensuite désagrégation plus ou moins prononcée de la couche de surface (sans qu'il y ait pour autant d'arrachement).

Toutefois, le fait que ces descripteurs ne soient pas discriminants peut aussi être interprété comme le fait que l'utilisation d'agrégats d'enrobés n'a pas d'incidence sur ceux-ci. Par exemple, le fait qu'il n'y ait pas d'orniérage petit rayon significatif sur les différentes planches avec et sans agrégats d'enrobés indique aussi probablement que ces enrobés n'ont pas tendance à orniérer. On pourrait également en tirer les mêmes conclusions avec l'adhérence au vu des valeurs de PMT observées.

L'analyse du descripteur « fissuration » liée à la densité de fissures semble discriminant pour comparer différentes techniques et apparaît comme le descripteur pertinent pour accompagner le développement des nouvelles technologies routières. Concernant l'emploi d'agrégat d'enrobés dans les couches de roulement, on observe une différence entre les populations avec et sans « recyclés », à relativiser compte tenu de la taille restreinte de l'échantillon représentatif retenu pour cette étude. Qui plus est, les densités de fissures, dans l'absolu, restent assez faibles, ce qui traduit le fait que la couche de surface comportant des agrégats d'enrobés recyclés continue d'assurer un niveau de service satisfaisant, même après une durée d'exploitation significative (> 8 ans).

Afin d'essayer d'avoir une vision synthétique des différentes densités de fissuration observées sur les différentes planches et les différentes sections, il a été jugé opportun de faire un tableau de synthèse des résultats, assorti de son graphique correspondant (voir Figure 43).

Par ailleurs, pour essayer de mieux se représenter les densités de fissures calculées à l'aide de l'Aigle 3D et l'état réel de la couche de surface, il a été établi, en annexe 4, un document permettant de faire le lien entre les photographies de la chaussée lors de la visite du 12 octobre 2021 de la section de la RD996 et les densités de fissuration calculées.

Cela peut permettre de mieux appréhender l'état réel de la couche de surface, mais il faut aussi avoir en tête que c'est une représentation très approximative dans la mesure où la densité de fissuration est calculée sur la surface totale de la planche (plusieurs centaines de m²), alors que la photo ne montre qu'un état ponctuel sur quelques m².

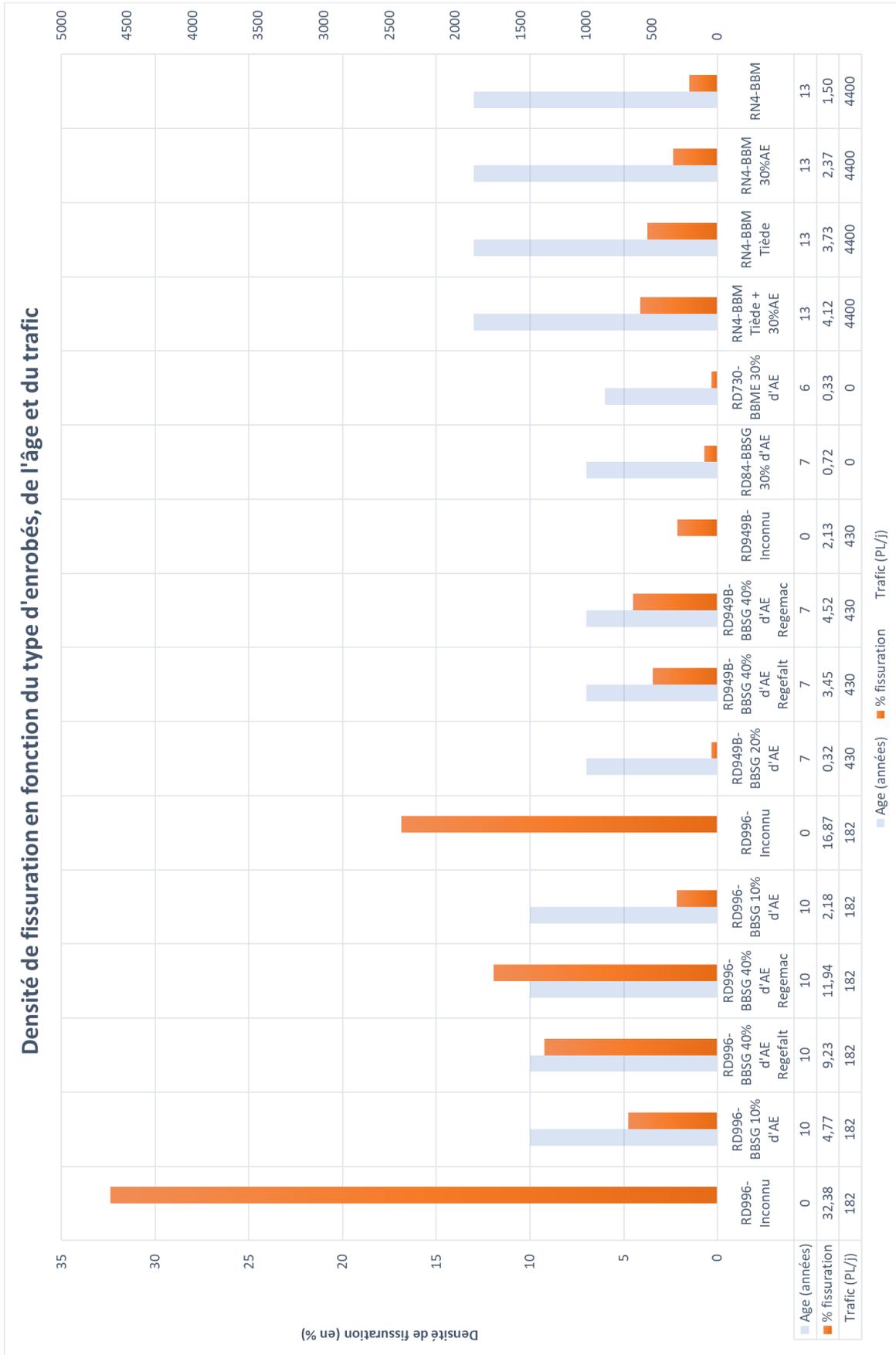


Figure 43 : Graphique synthétique des densités de fissuration observées sur les sections du projet

Les observations effectuées sur le descripteur fissures ne mettent pas en évidence de différences flagrantes de densité de fissures entre les planches comportant des additifs régénérant (Régémac, Régéfalt) et celles n'en comportant pas.

11.2 Conclusions des essais en laboratoire

En préambule, il convient de rappeler que seuls des essais ont eu lieu sur des échantillons d'enrobés d'une seule section (Bournezeau – CD85).

Les essais de désenrobage séquencé ont montré globalement une bonne remobilisation du liant et des mélanges plutôt homogènes, même pour les enrobés contenant 40% d'AE.

Les essais de pénétrabilité et de point de ramollissement (TBA), n'ont pas mis en évidence de différences significatives de comportement entre les 3 bitumes analysés (20% d'AE, 40 % d'AE et 40 % d'AE avec additif régénérant), les 3 échantillons analysés figurant finalement dans la même classe de bitumes (10-20 pour la pénétrabilité à 25°C et 30-76 pour le point de ramollissement).

Toutefois, pour consolider ces premières conclusions, il conviendrait de réaliser ces essais sur d'autres sections pour augmenter l'échantillon statistique de résultats obtenus.

11.3 Difficultés, limites, perspectives et approfondissements à envisager

Si l'approche innovante d'observation des couches de roulement par capteurs LCMS (outil A3D) paraît vraiment prometteuse et mériterait d'être déclinée sur d'autres sections test, elle présente malgré tout un certain nombre de limites et de difficultés dont il conviendrait de pouvoir s'affranchir par la suite.

Pour cela, il importe d'approfondir la méthodologie déclinée lors de ce projet, en particulier sur les points suivants :

- **Choix du tampon** : l'influence du tampon appliqué à la fissure pour lui donner une surface a une incidence directe sur la densité de fissures obtenue. Dans ce projet, il a été fait le choix (arbitraire) d'appliquer un tampon de 10 cm (contre un tampon plus large de 40 cm pour l'IQRN). En effet, un tampon trop large aurait pour effet, de prendre en compte des surfaces très importantes dès que la densité de fissuration commence à être un peu élevée, ce qui au final n'aurait pas permis une bonne comparaison des planches entre elles. Pour autant, il pourrait être intéressant de faire varier la taille du tampon, pour essayer de voir quelle taille de tampon pourrait apparaître comme la plus judicieuse.
- **Distinction entre fissures longitudinales et transversales** : en l'état actuel, les résultats obtenus avec l'outil Aigle 3D ne permettent pas de faire la distinction entre les fissures longitudinales et transversales. Or, cette distinction est importante, dans la mesure où les fissures longitudinales traduisent généralement des problèmes de surface, alors que les fissures transversales traduisent plutôt des désordres structurels. A noter, qu'une méthodologie est en cours de développement sur l'outil Aigle 3D, pour permettre une distinction entre ces 2 types de fissures.
- **Gravité des fissures** : Actuellement, l'outil Aigle 3D ne prend pas en compte la gravité des fissures. Or, on a pu voir que sur certaines planches les fissures pouvaient être moins nombreuses, mais plus ouvertes. Afin, d'affiner le travail déjà réalisé, il serait

probablement intéressant de prendre en compte la gravité des fissures recensées lors de l'auscultation par l'Aigle 3D.

En croisant les réflexions sur le choix du tampon et la prise en compte de la gravité des fissures, il s'avère qu'une solution serait peut-être de raisonner plutôt sur la longueur et la largeur de fissures (ouverture) et d'essayer de calculer une surface équivalente de fissure prenant en compte ces 2 paramètres, plutôt que d'appliquer une surface de tampon à un objet linéaire.

Par ailleurs, si l'outil Aigle 3D permet une mesure extrêmement rapide dans le flot du trafic (théoriquement 110 km/h), le processus d'acquisition, de transfert des données et de calculs des différents descripteurs reste relativement long. De même, le traitement des données, tel qu'il est réalisé dans le cadre du présent projet, demeure assez long et demande beaucoup d'heures de travail. Ce processus pourrait probablement être amélioré en automatisant certaines tâches récurrentes. Toutefois, certaines opérations manuelles demeureront incontournables, telles que la vérification des données obtenues et leur confrontation avec la réalité du terrain.

Enfin, concernant les premières conclusions obtenues, il convient de faire preuve d'une certaine prudence, car il ne faut pas perdre de vue qu'un certain nombre de paramètres peuvent influencer sur les observations constatées. Ainsi, on peut voir, avec l'exemple de la RN4 (site n°5) que la configuration du site (pente, assainissement, teneur en eau dans le sol, ombre, végétation, etc...) peut engendrer des désordres structurels localisés, plus ou moins visibles, qui peuvent avoir des conséquences sur la qualité de la couche de la surface, sans lien direct avec la couche de roulement elle-même.

Pour finir, il convient également d'être prudent sur les conclusions données du fait que le présent projet n'a concerné que 5 sites et ne constitue donc pas un échantillon statistique représentatif de la population globale des chaussées présentes en France.

Par ailleurs, il faut également faire attention au biais du survivant possible, dans la mesure où seules les couches de roulement non recouvertes après plusieurs années peuvent être étudiées. De ce fait on occulte les couches de roulement qui ont eu une durée de vie restreintes et qui ne font donc plus partie de l'échantillon de population ce qui au final peut fortement fausser les conclusions émises.

12 Bibliographie

[1] Méthode d'essai LPC n°38-2 (relevé des dégradations de surface des chaussées)

-
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiMq7yY_rX9AhW3SaQEHRJ6C08QFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ifsstar.fr%2Ffileadmin%2Fuser_upload%2Feditons%2Flcpc%2FMethodeDEessai%2FMethodeDEessai-LCPC-ME38_2.pdf&usq=AOvVaw3m7v0J8sVLbmnsxf0BLVVJ

[2] méthode d'essai n° 52 (catalogue des dégradations de surface des chaussées) -

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiMq7yY_rX9AhW3SaQEHRJ6C08QFnoECBgQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ifsstar.fr%2Ffileadmin%2Fuser_upload%2Feditons%2Flcpc%2FMethodeDEessai%2FMethodeDEessai-LCPC-ME52.pdf&usq=AOvVaw1ig2UyckPLEUQ5JmckK0T7

[3] NAVARO, J Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques. 2011 Thèse de doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers - [Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques \(archives-ouvertes.fr\)](#)

[4] LOISELEUR, V. Rapport de stage « recyclage à fort taux des chaussées routières : développement méthodologique pour évaluer l'état du mélange entre liants vieilli et neuf ». 2021

[5] BOULANGE, L. Analyse comparative du vieillissement des liants en fonction des procédés de fabrication 2018. Livrable 13 PN MURE – ANR IMPOVMURE sous tache 4.2. - pnmure.fr/wp-content/uploads/pnmure/PN-MURE-ANR-IMPROVMURE-Une-compilation-des-principaux-livrables.pdf

[6] DELFOSSE F., Decamps J.A., Largeaud S. 2017. "Enrobés à base d'agrégats d'enrobés : qualification de l'homogénéité," RGRA N°949, 52–56 - [Description du produit | Editions RGRA \(aboshop.fr\)](#)

ANNEXE 1 : VARIATION DE SECTIONNEMENT SUITE À LA VISITE DU 12 OCTOBRE 2021

	Rapport de suivi (A)	Suite visite (B)
Planche témoin avant	PR 104+600 à 104+825	PR104+120 à 104+820
Planche REGEFALT	PR 104+825 à 105+100	PR104+820 à 105+100
Planche REGEMAC	PR 105+100 à PR 105+325	PR 105+100 à 105+400
Planche témoin après		PR 105+400 à 106+280

A : Sectionnement du linéaire de la RD996 d'après les données du rapport de suivi

B : Sectionnement du linéaire de la RD996 d'après les données fournies par le CD21 durant la visite sur le terrain

ANNEXE 2 : ATLAS DE DÉGRADATIONS DE LA RD 996

ANNEXE 3 : ESSAI DE DESENROBAGE SEQUENCÉ

ANNEXE 4 : PHOTOS DES PLANCHES DE LA RD996 LORS DE LA VISITE DU 12 OCTOBRE 2021 ET RELATION AVEC LES DENSITÉ DE FISSURATION CALCULÉES AVEC L'AIGLE 3D

A gauche du joint, planche amont des travaux présentant une densité de fissuration globale d'environ 32 %.

A droite du joint, planche témoin BBSG à 10% d'AE avec une densité de fissuration globale d'environ 5 %.



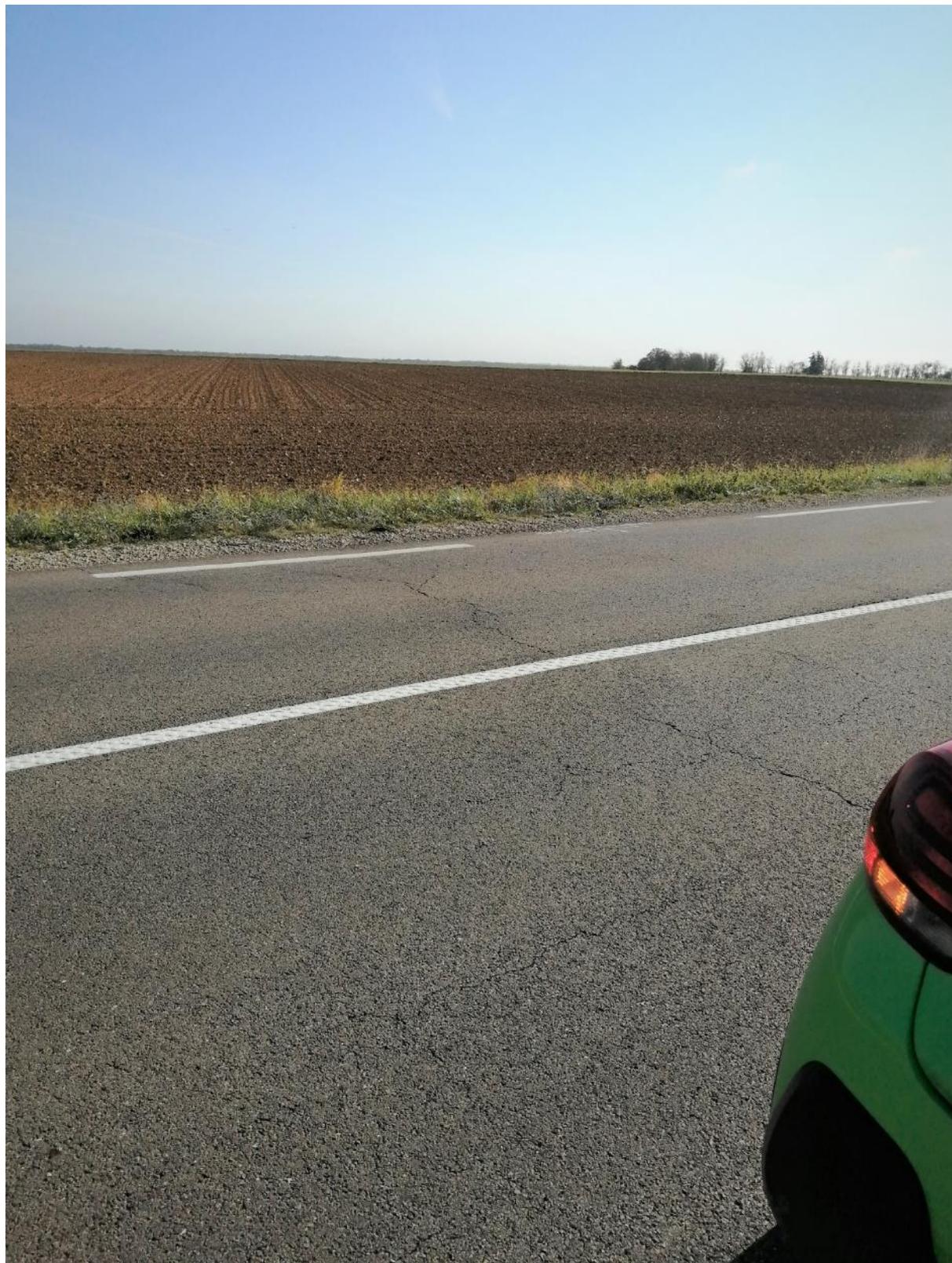
A gauche du joint, planche témoin BBSG à 10% d'AE avec une densité de fissuration globale d'environ 5 %.

A droite du joint, planche BBSG Régéfalt à 40% d'AE présentant une densité de fissuration globale d'environ 9 %.



A gauche de la fissure transversale, planche BBSG Regefalt à 40% d'AE présentant une densité de fissuration globale d'environ 9 %.

A droite de la fissure transversale, planche BBSG Regemac à 40% d'AE présentant une densité de fissuration globale d'environ 12 %.



A gauche de la fissure transversale, planche BBSG Regefalt à 40% d'AE présentant une densité de fissuration globale d'environ 9 %.

A droite du joint, planche témoin BBSG à 10% d'AE avec une densité de fissuration globale d'environ 2 %.



Echelle:
1:600

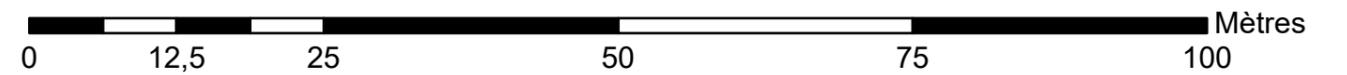
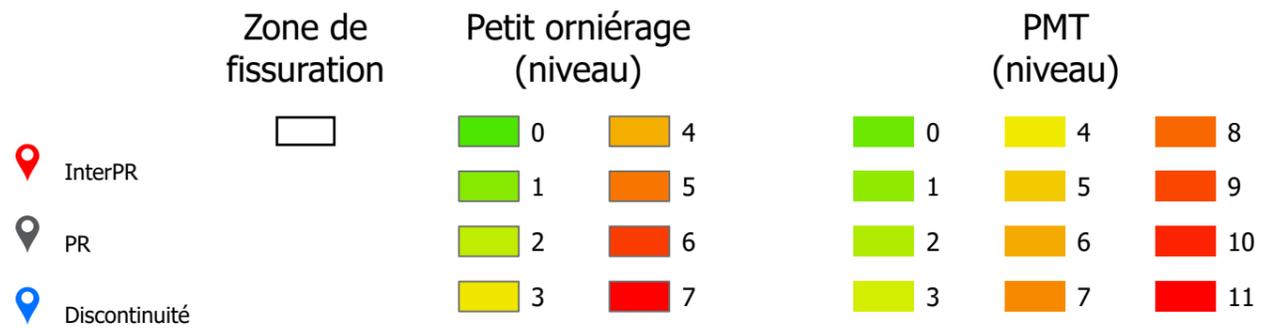
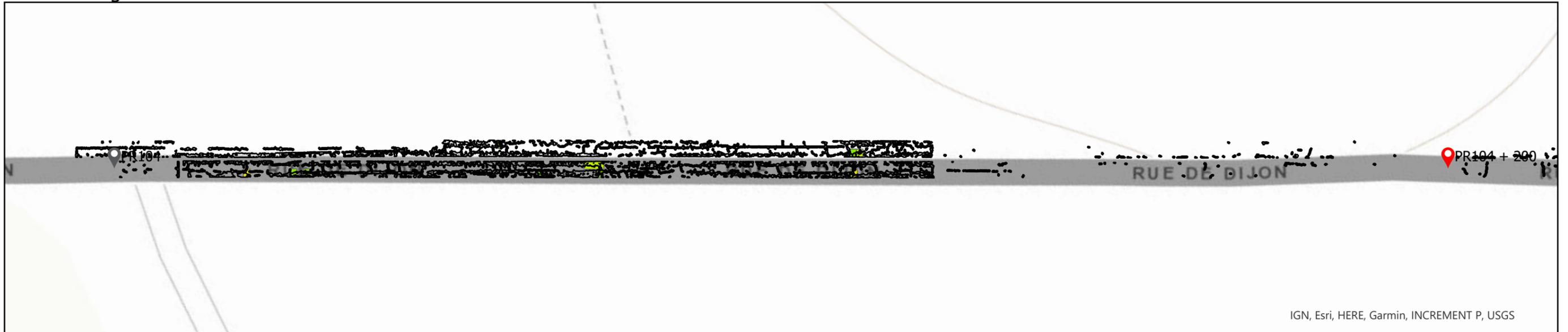
PR104 au PR104 + 200

Centre: 5°3'59"E 47°13'2"N

PMT



Petit orniéage

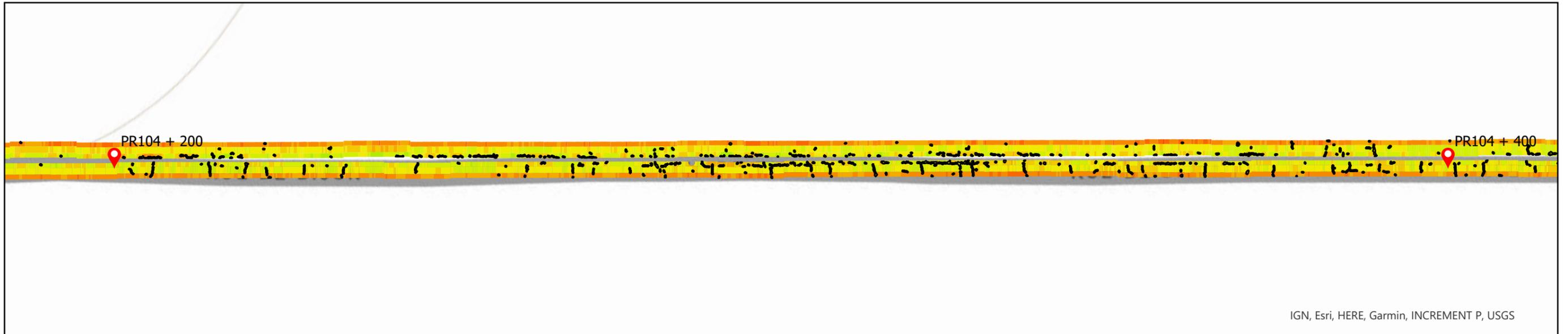


Echelle:
1:600

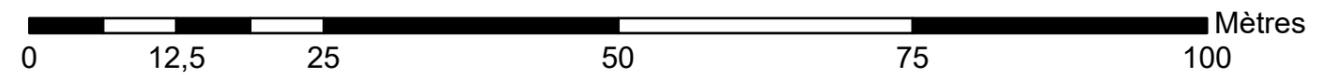
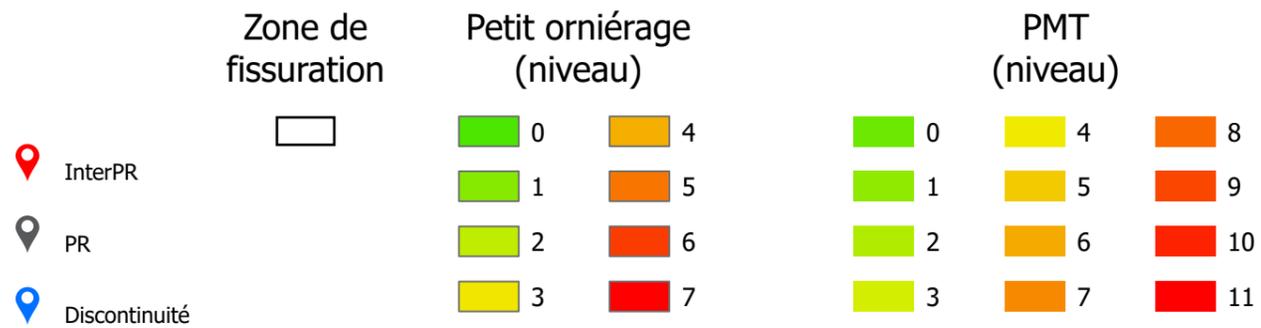
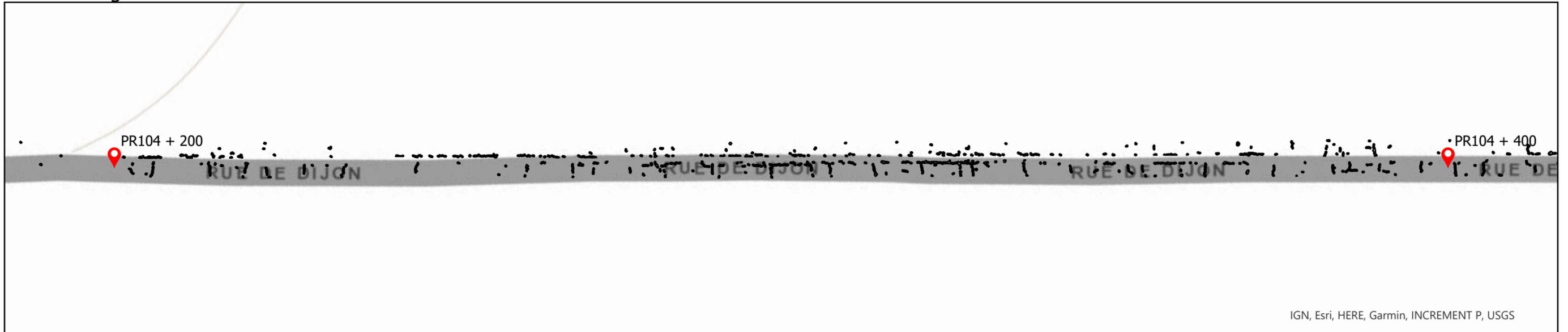
PR104 + 200 au PR104 + 400

Centre: 5°4'5"E 47°12'57"N

PMT



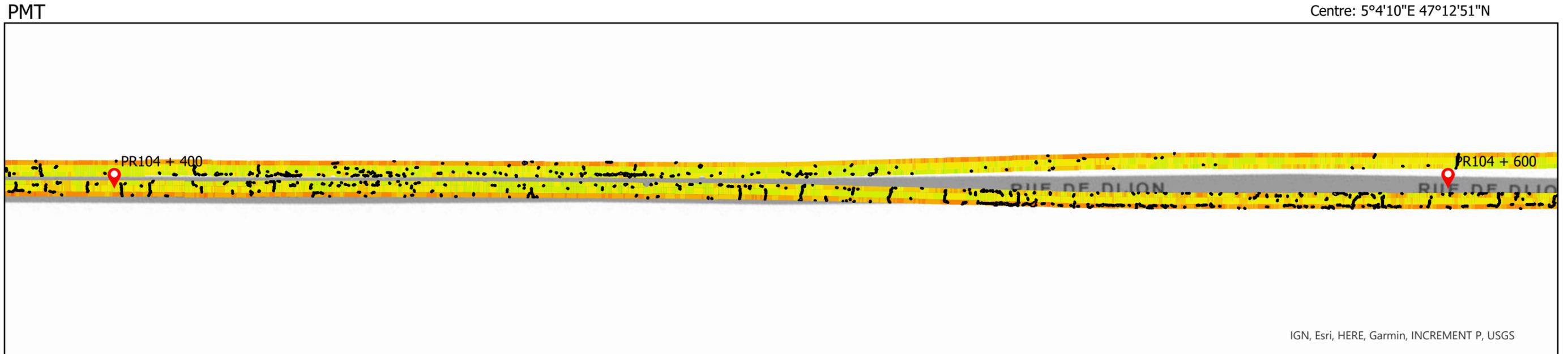
Petit orniérage



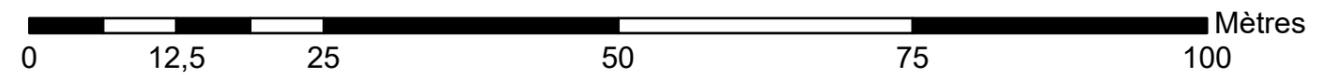
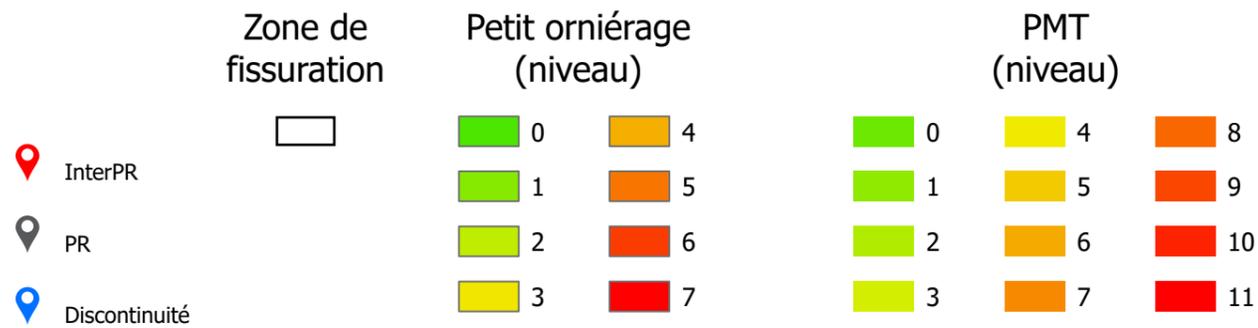
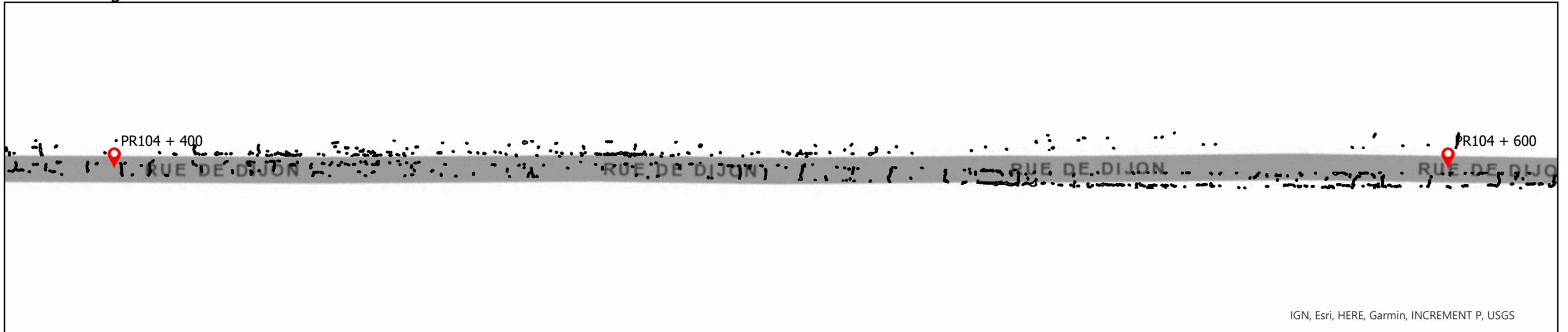
Echelle:
1:600

PR104 + 400 au PR104 + 600

Centre: 5°4'10"E 47°12'51"N



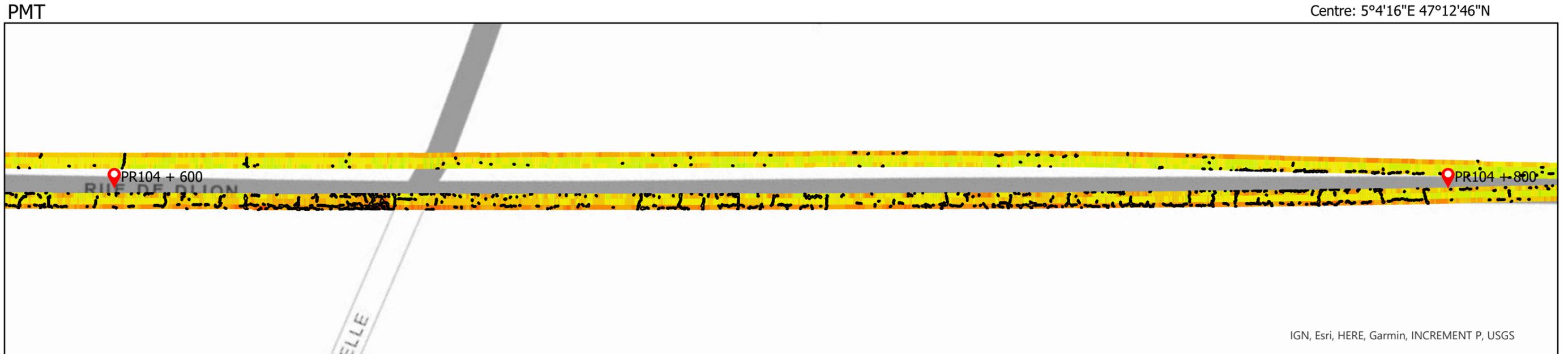
Petit orniérage



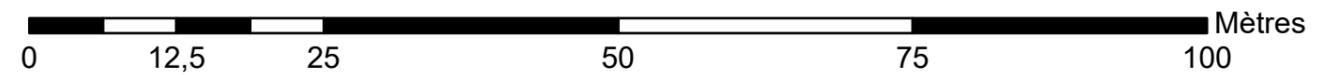
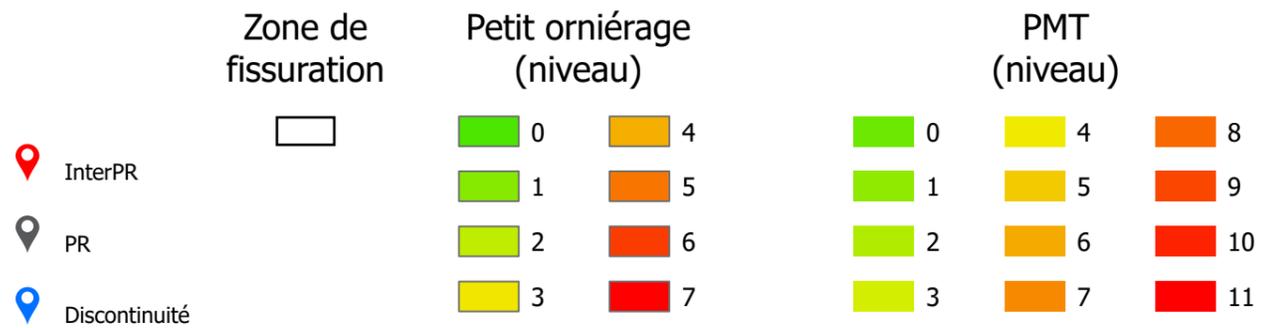
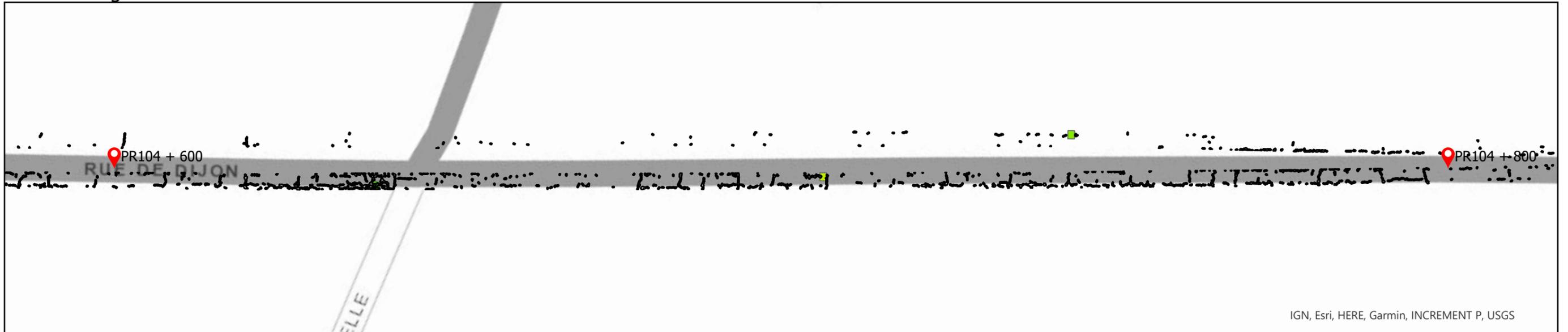
Echelle:
1:600

PR104 + 600 au PR104 + 800

Centre: 5°4'16"E 47°12'46"N



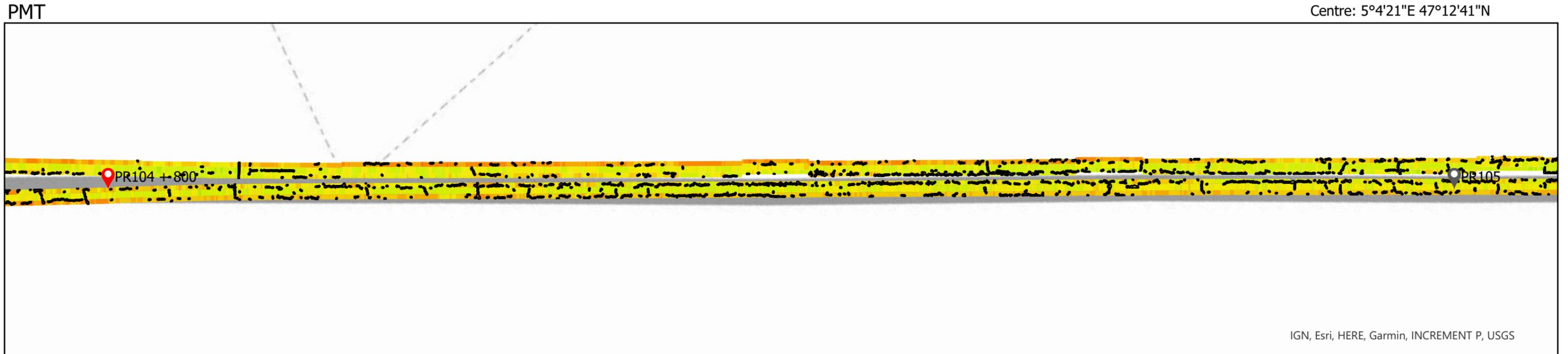
Petit orniérage



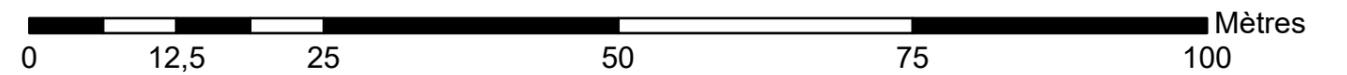
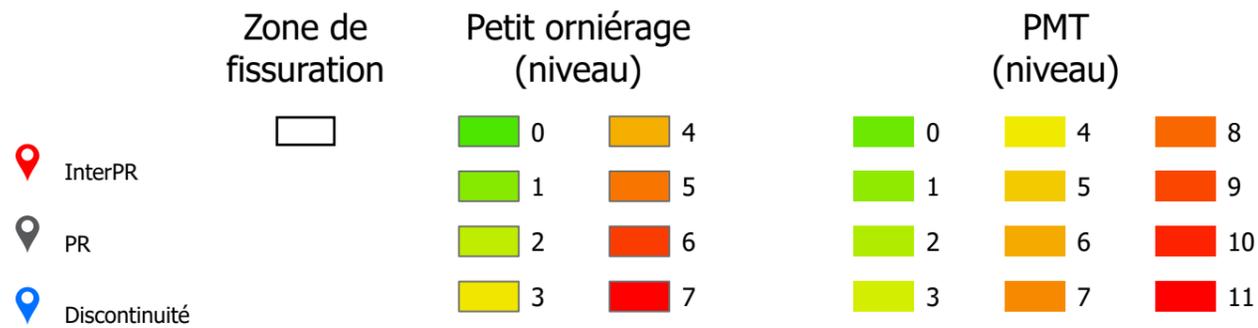
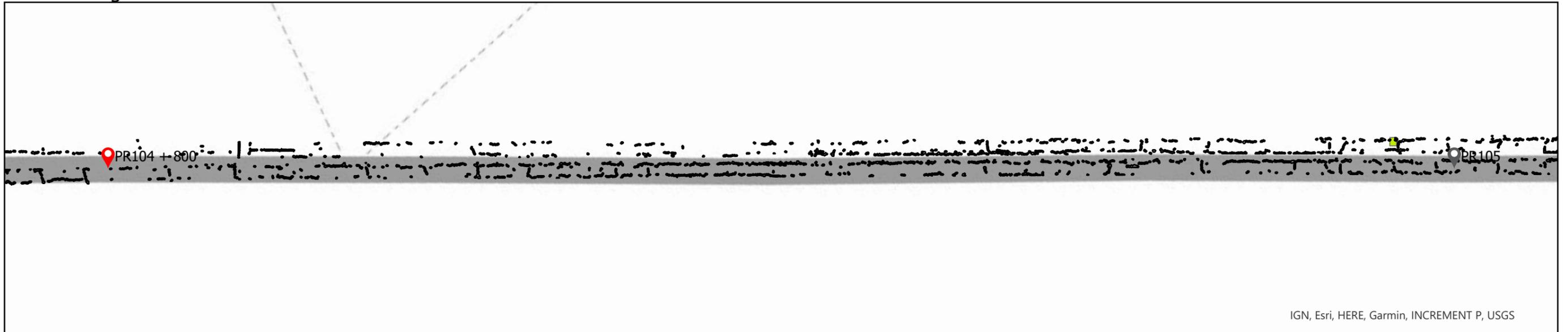
Echelle:
1:600

PR104 + 800 au PR105

Centre: 5°4'21"E 47°12'41"N



Petit orniérage

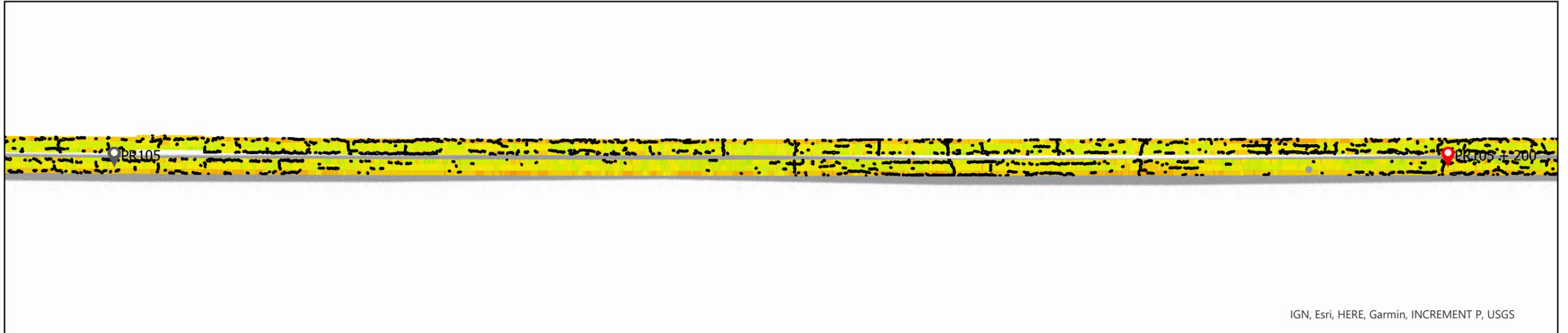


Echelle:
1:600

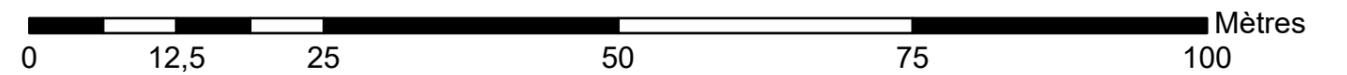
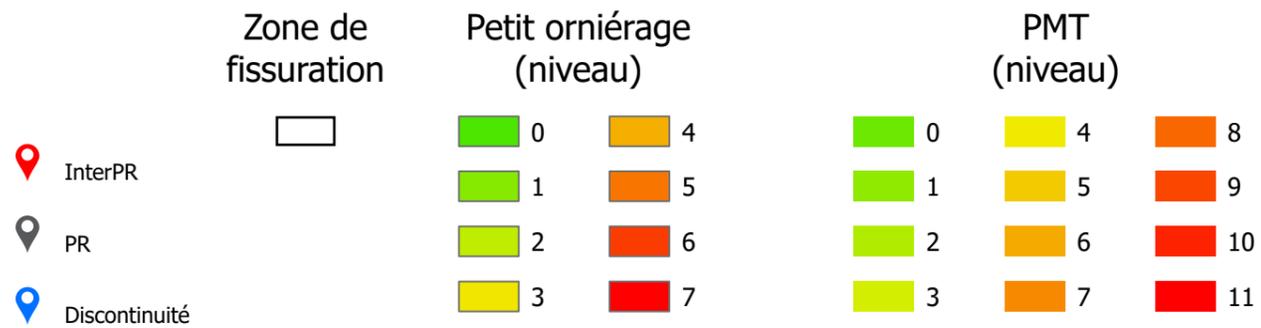
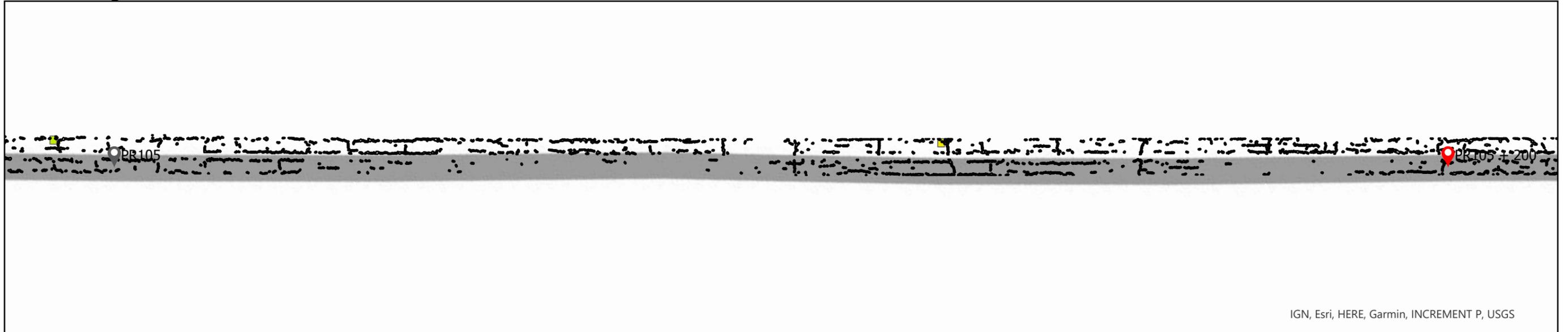
PR105 au PR105 + 200

Centre: 5°4'27"E 47°12'35"N

PMT



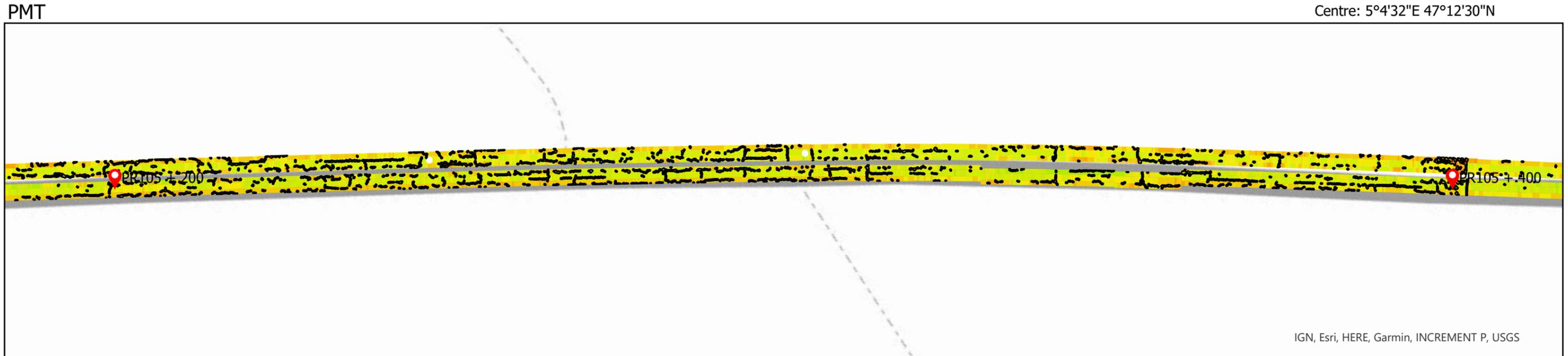
Petit orniéage



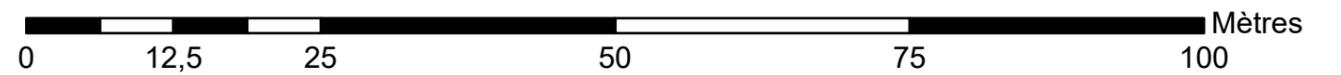
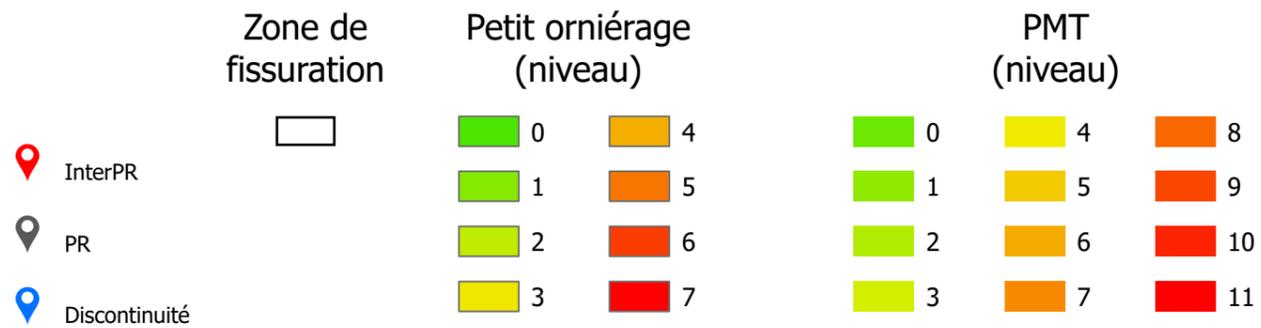
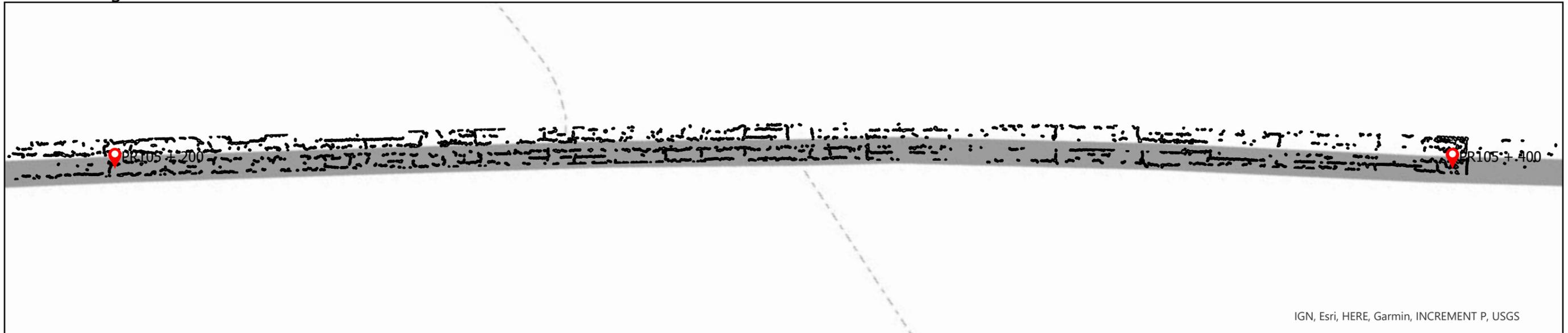
Echelle:
1:600

PR105 + 200 au PR105 + 400

Centre: 5°4'32"E 47°12'30"N



Petit orniéage

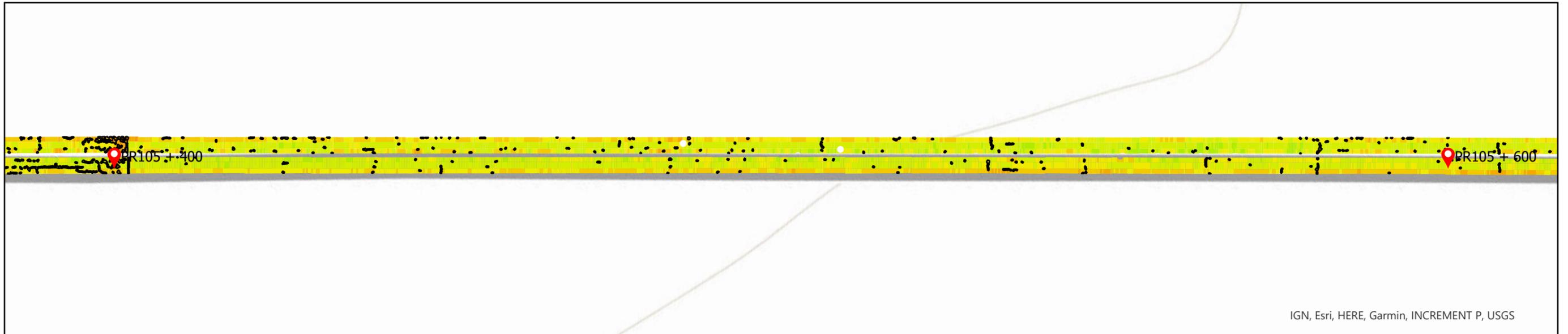


Echelle:
1:600

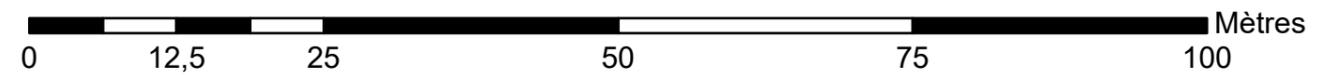
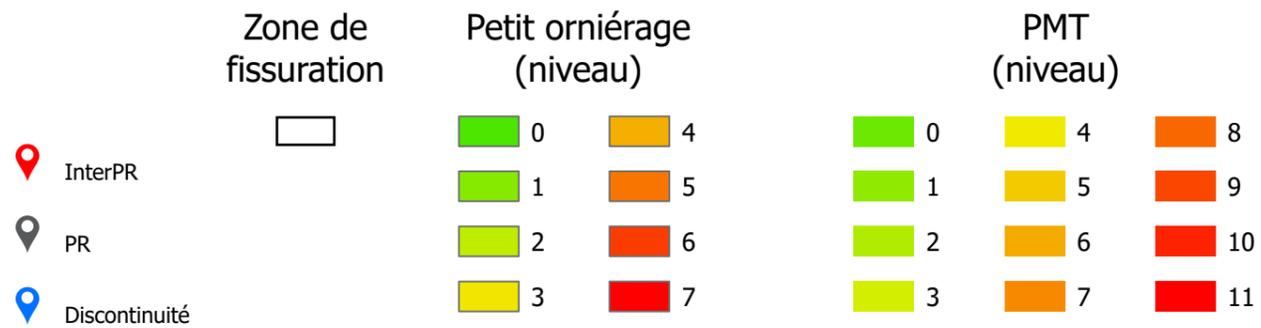
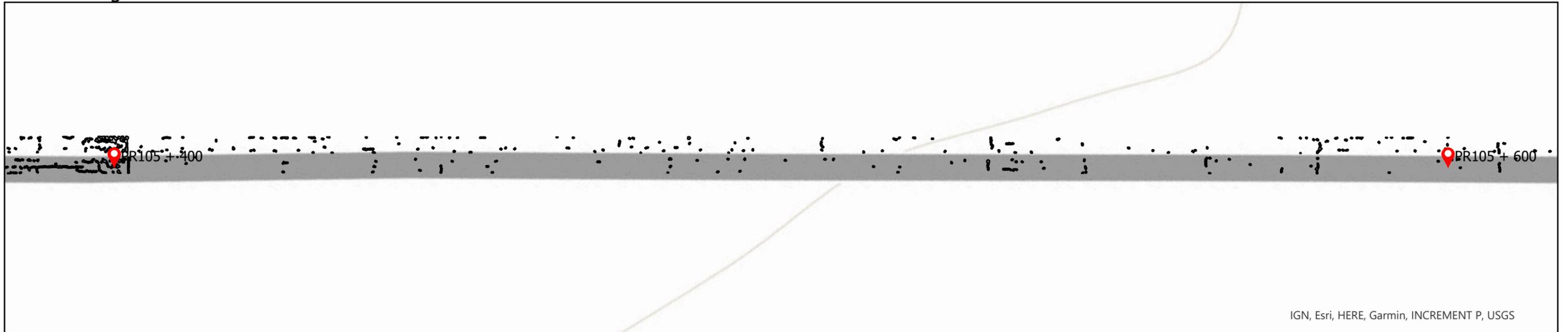
PR105 + 400 au PR105 + 600

PMT

Centre: 5°4'38"E 47°12'25"N



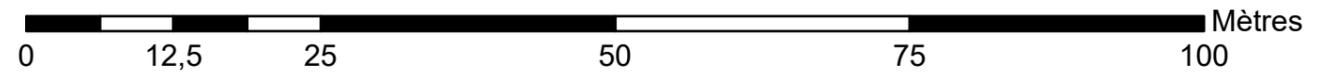
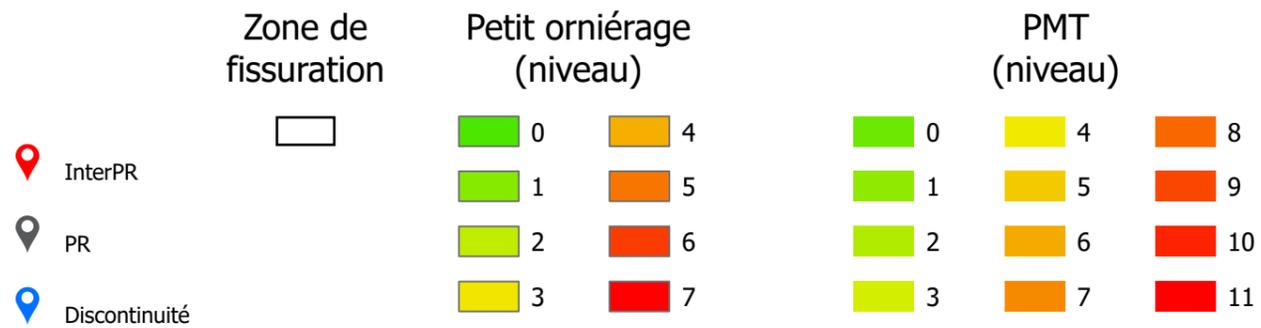
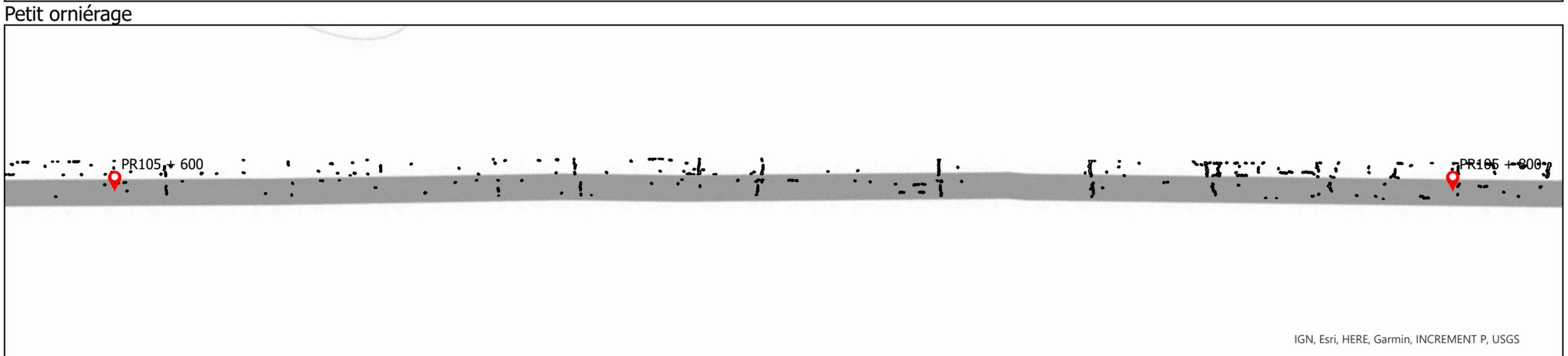
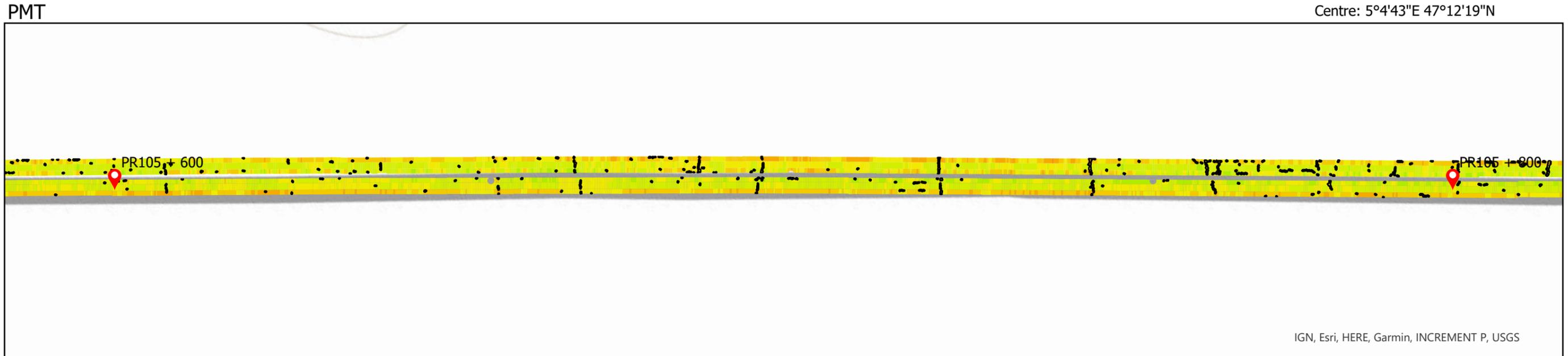
Petit orniérage



Echelle:
1:600

PR105 + 600 au PR105 + 800

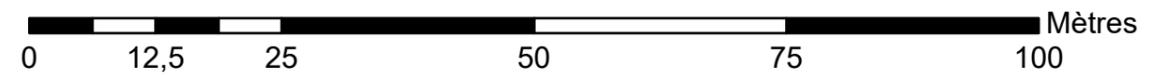
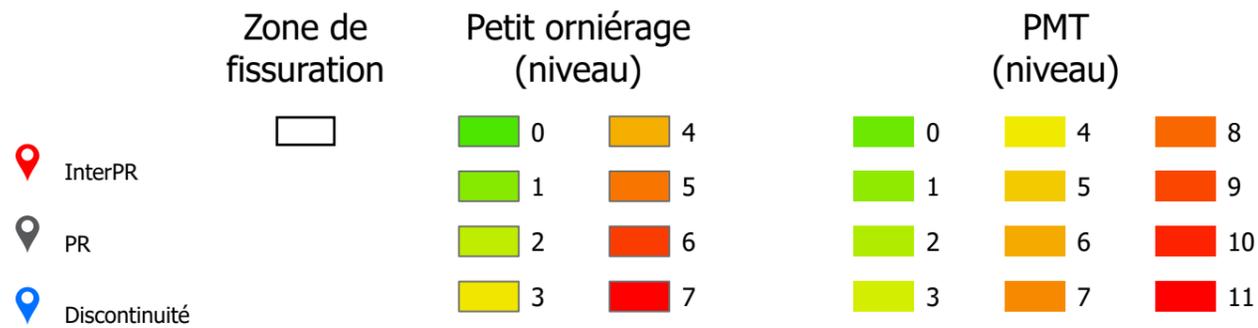
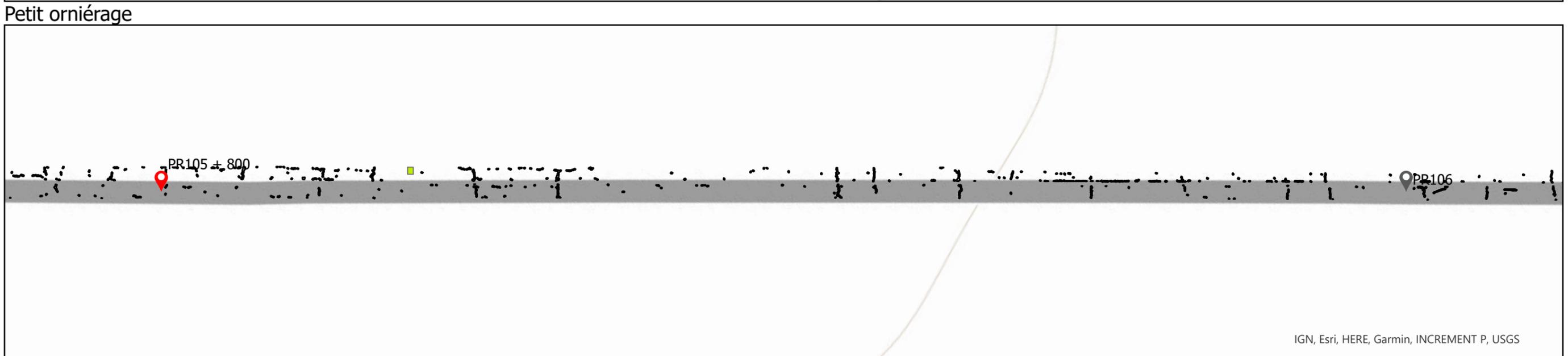
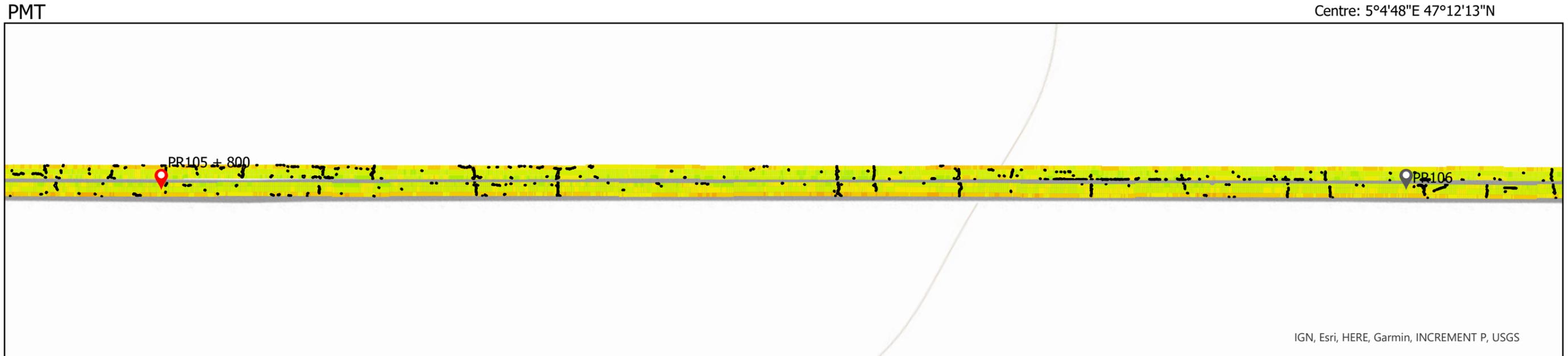
Centre: 5°4'43"E 47°12'19"N



Echelle:
1:700

PR105 + 800 au PR106

Centre: 5°4'48"E 47°12'13"N

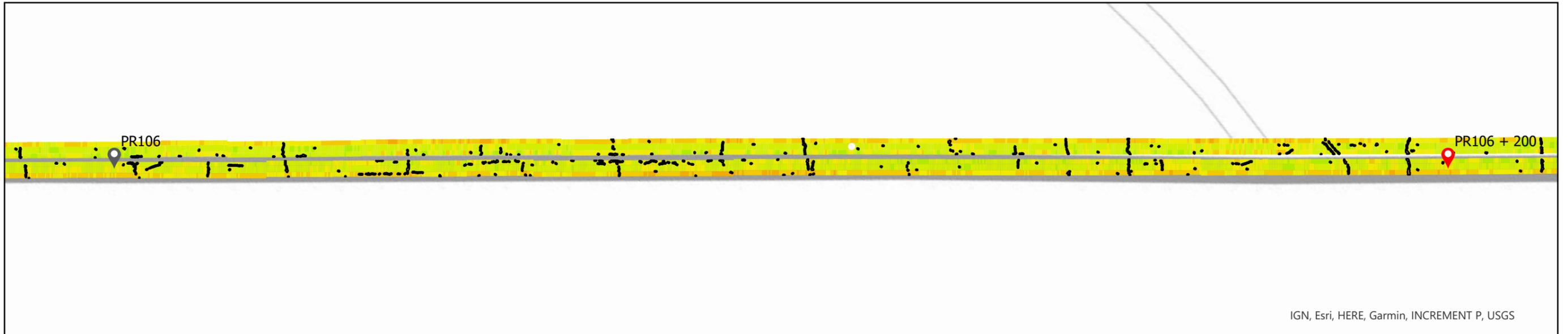


Echelle:
1:600

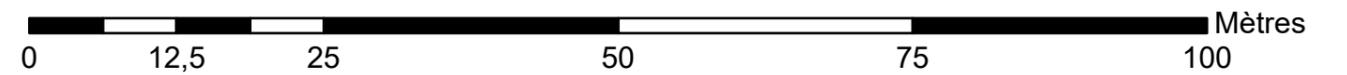
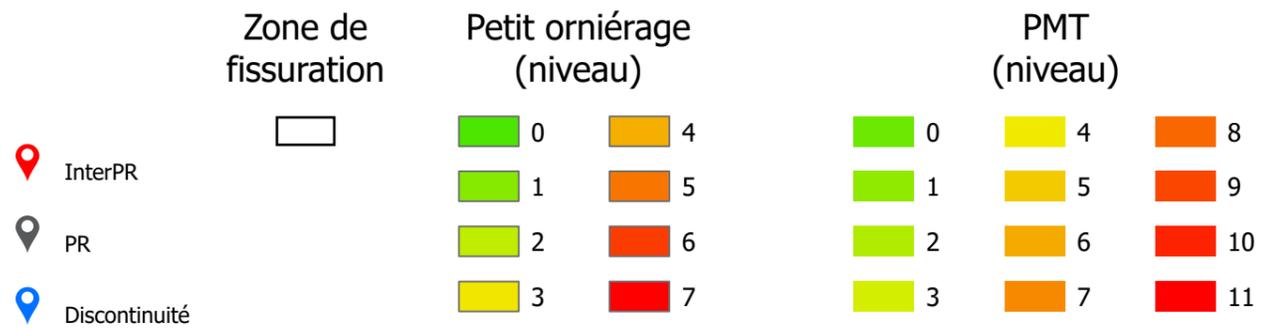
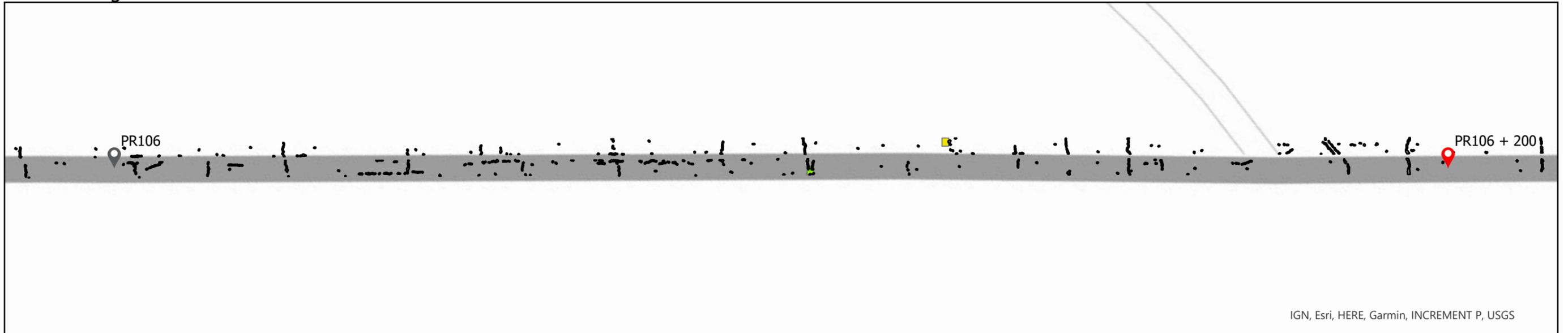
PR106 au PR106 + 200

Centre: 5°4'53"E 47°12'8"N

PMT



Petit orniéage



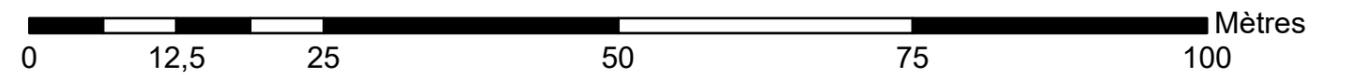
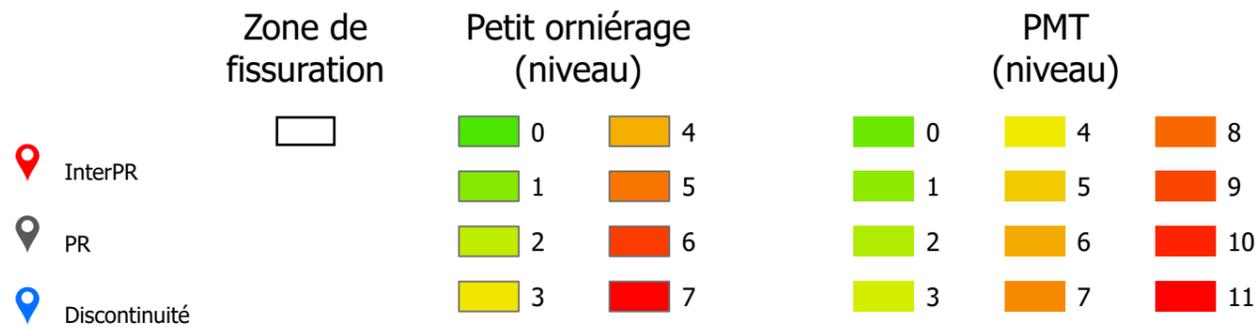
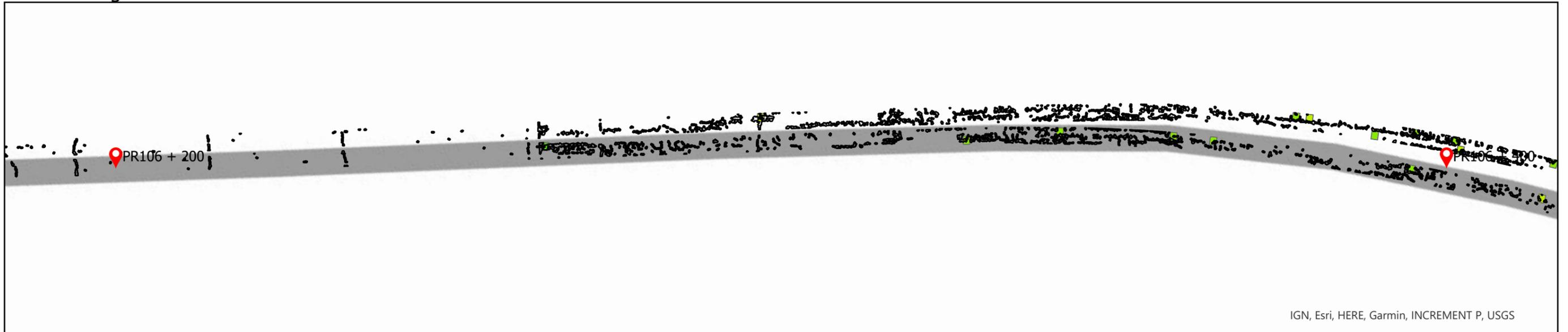
Echelle:
1:600

PR106 + 200 au PR106 + 400

Centre: 5°4'58"E 47°12'2"N



Petit orniéage

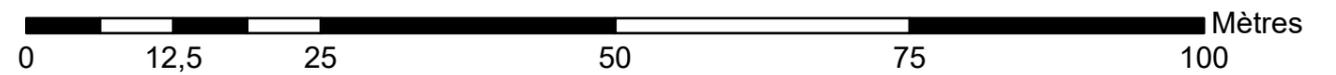
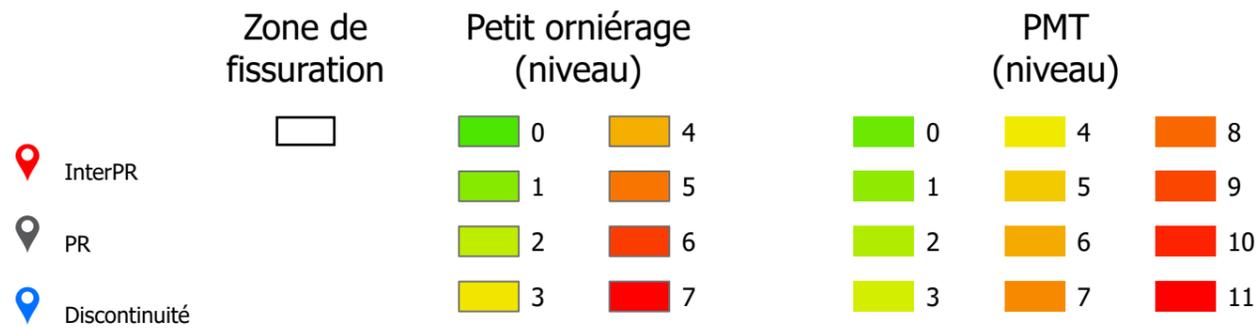
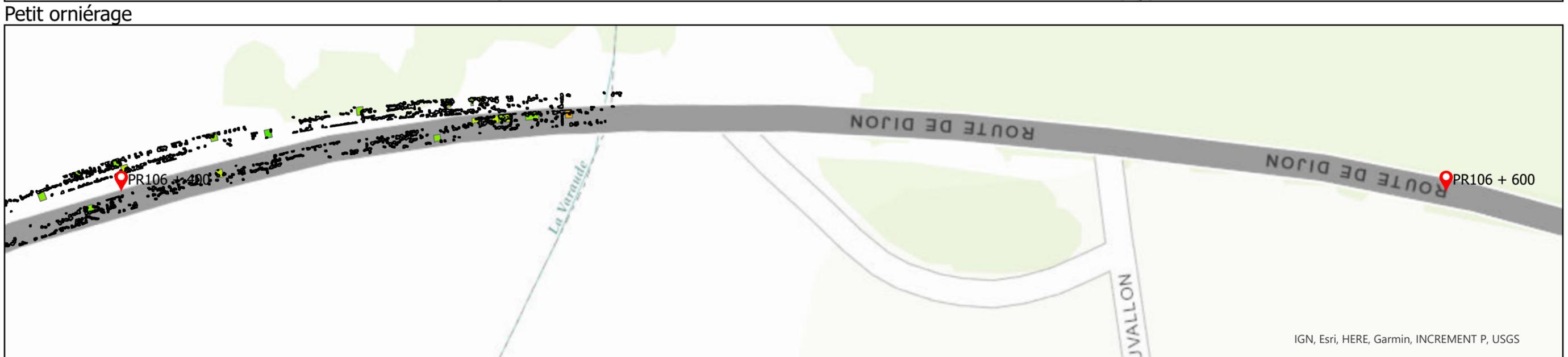
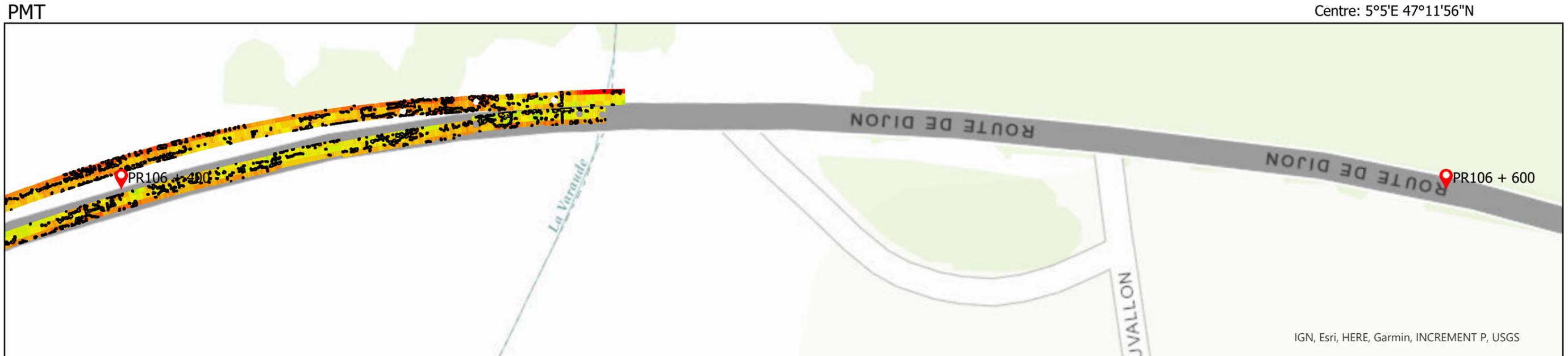




Echelle:
1:600

PR106 + 400 au PR106 + 600

Centre: 5°5'E 47°11'56"N



1 Essais en laboratoire – Caractérisation des matériaux en place

Au cours du projet, il a été évoqué l'intérêt qu'il y aurait à réaliser des essais de caractérisation des matériaux en place sur les planches auscultées dans le cadre du présent rapport.

En effet, l'idée est de faire le lien entre les caractéristiques mécaniques et physico-chimiques des matériaux mis en place après plusieurs années de service et les constats faits suite aux auscultations réalisés sur ces mêmes couches de surface à l'aide des capteur LCMS.

Idéalement, il aurait été également intéressant de connaître les caractéristiques des matériaux au moment de leur mise en œuvre pour avoir une sorte de « point zéro ». Malheureusement, il n'a pas été possible de retrouver des résultats d'essais ayant été réalisés avant la mise en œuvre des couches de surface, ni même de savoir si ce type d'essais avait été effectués à l'époque.

1.1 Consistance et nature des essais

Dans le cadre du présent projet, il a été jugé opportun, dans un premier temps, de réaliser les essais suivants :

- Récupération de bitumes pour pouvoir ensuite réaliser des essais « classiques » sur les bitumes récupérés ;
- Essai de pénétrabilité à l'aiguille sur bitume récupéré (norme NF EN 1426). L'essai consiste à mesurer la pénétration d'une aiguille de référence dans un échantillon dans des conditions d'essai définies ;
- Essai température bille-anneau (TBA) sur bitume récupéré (norme NF EN 1427). Dans des conditions d'essais définies, l'essai TBA consiste à mesurer la température moyenne à laquelle des disques de bitume soutenant chacun une bille d'acier se ramollissent suffisamment pour permettre à la bille en acier de descendre d'une hauteur définie.

Par ailleurs, afin de pouvoir réaliser ces essais, il est nécessaire de procéder à des carottages de la chaussée pour récupérer les matériaux de surface.

Dans un premier temps, nous nous sommes concentrés sur les sections précédemment étudiés qui nous semblaient les plus pertinentes.

Aussi, au vu du coût des différents essais et des résultats déjà obtenus lors de l'auscultation par les capteurs LCMS des 5 sections du présent projet, il a été décidé de retenir en priorité les sites 1 (RD996 – CD21) et 2 (RD949B – CD85) qui nous paraissent les plus pertinents.

En effet, les sites 3 (RD84 – CD83) et 4 (RD730 à Semussac – CD17) ne comprennent pas de planches témoins (sans recyclés) et n'apparaissent donc pas comme pertinents.

Le site 5 (RN4 – DIR Est), quant à lui, s'il est intéressant, car il présente plusieurs planches (avec et sans recyclés, tièdes et chauds) présente néanmoins l'inconvénient d'avoir un certains nombres de désordres structurels (problèmes de gonfles) qui peuvent remettre en cause ou rendre difficile l'exploitation des résultats que l'on pourrait obtenir.

De plus, au vu du fort trafic sur cette section, cela imposerait des contraintes supplémentaires pour la réalisation des carottages (travaux de nuit, probables délais plus longs pour l'autorisation par le gestionnaire, etc...) qu'il est pour l'instant préférable d'éviter.

Finalement, pour des raisons de budget et de délais (temps restant assez court avant l'échéance du projet DVDC), dans le cadre de ce projet, il a été décidé de réaliser des essais de caractérisation des matériaux uniquement sur le site 2 (RD949B – CD85).

Toutefois, l'ensemble de l'équipe projet pense qu'il serait très intéressant de réaliser ces essais sur d'autres sections du projet et notamment sur le site 1 (RD996 – CD21).

Il conviendrait d'approfondir le sujet pour trouver comment cela pourrait se faire dans le cadre d'un autre projet de recherche à venir (comme par exemple dans le cadre du Groupe National Recyclage 2 de l'IDRRIM).

1.2 Résultats des essais réalisés

Les essais ont donc été effectués sur les 3 planches de la couche de roulement de la RD 949B (Commune de Bournezeau - Département de la Vendée).

Pour rappel, les principales caractéristiques du site de la RD949B sont les suivants :

- 1 planche témoin avec BBSG à 20 % d'AE ;
- 1 planche REGEFALT avec BBSG à 40 % d'AE ;
- 1 planche avec BBSG à 40 % d'AE sans liant spécifique ;

Les travaux de mise en œuvre de cette couche de surface datent de 2014.

Dans un premier temps, il était prévu une extraction simple des bitumes et des essais standards de consistance pour caractériser le bitume (péné-TBA). Toutefois, suite à la suggestion de l'UGE, il a été décidé de procéder également à des essais de désenrobage séquencé.

N° échantillon	Nature matériau
22 069	BBSG 40%AE+Regefalt
22 070	BBSG 40%AE
22 071	BBSG 20%AE

Tableau 1 : identification des échantillons du site de Bournezeau

1.2.1.1 Résultats des essais de consistance sur les bitumes

Les PV des essais figurent en annexe.

Les bitumes ont été récupérés pour chaque carotte d'enrobé et des essais de consistance ont été réalisés pour chaque bitume récupéré. Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau ci-après :

N° échantillon	Nature matériau	Pénétrabilité à 25°C (1/10mm)	TBA moyenne (°C)
22 069	BBSG 40%AE+Regefalt	16	65,0
22 070	BBSG 40%AE	15	65,8
22 071	BBSG 20%AE	19	61,8

D'après la norme NF EN 13 924-1 « Bitumes et liants bitumineux – Cadre de spécifications pour les bitumes routiers spéciaux – Partie 1 : Bitumes routiers de grade dur » (mars 2016), les caractéristiques de ces liants correspondent à un bitume de grade 10/20 (Pénétrabilité à 25°C (1/10mm) : 10-20 et TBA moyenne (°C) : 60-76).

On peut constater que parmi ces 3 bitumes, le bitume avec 20%AE est le bitume le moins dur.

1.2.2 Désenrobage séquentiel

1.2.2.1 Objet de l'essai

L'essai de désenrobage séquentiel a été développé par Eurovia en 2011 dans le cadre de la thèse de Julien Navaro « Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques ». Cet essai, qui consiste à dissoudre de manière séquentielle le bitume d'un enrobé, permet de qualifier le degré de mélange du bitume vieilli issu de matériaux recyclés (Agrégats d'Enrobés) et du bitume neuf (bitume d'apport).

Dans le cadre du projet DVDC, les essais ont été réalisés par l'UGE en s'appuyant sur la méthode mise au point par Eurovia. Les résultats obtenus ont été comparés entre eux ainsi qu'avec des matériaux ayant aussi été testés par l'UGE (Loiseleur et al. ; 2021) dans le cadre d'autres affaires. L'objectif est de voir quel est le degré d'homogénéité des mélanges prélevés.

1.2.2.2 Description de l'essai de désenrobage séquentiel

L'essai consiste à dissoudre de manière séquentielle le bitume d'un enrobé et à déterminer le degré d'oxydation de chaque solution récupérée en utilisant un essai d'infrarouge. Il s'agit d'une méthode appelée « la lixiviation ». Pendant cette lixiviation, l'essai se déroule selon les étapes suivantes :

- Pulvérisation d'une faible quantité de perchloroéthylène¹ dans l'enrobé par séquence afin d'enlever couche par couche le bitume de l'enrobé. La pulvérisation est répétée n² fois jusqu'à la dissolution complète du film de liant ;
- Récupération des solutions de bitume dans le perchloroéthylène après chaque séquence de pulvérisation. Les premières solutions récupérées correspondent au bitume dissout au début de l'extraction dans le perchloroéthylène et les dernières solutions correspondent au bitume dissout à la fin de l'extraction dans le perchloroéthylène. Les solutions obtenues s'appellent les lixiviats
- Analyse de chaque lixiviat au spectromètre IR (InfraRouge) et détermination des Indices Carbonyle (ICO) ;

A la fin de la lixiviation (après avoir analysé une dizaine de lixiviats), les indices carbonyle (ICO) de chaque lixiviat sont représentés graphiquement en fonction de la fraction massique de bitume lixivié.

A la fin de l'essai, on obtient une courbe de l'ICO au cours du désenrobage séquencé. L'ICO permet de déterminer le degré de vieillissement du liant. L'essai de désenrobage séquencé permet de voir si les bitumes neufs et ceux contenus dans les agrégats d'enrobés recyclés se mélangent bien.

La figure suivante illustre le principe de l'essai.

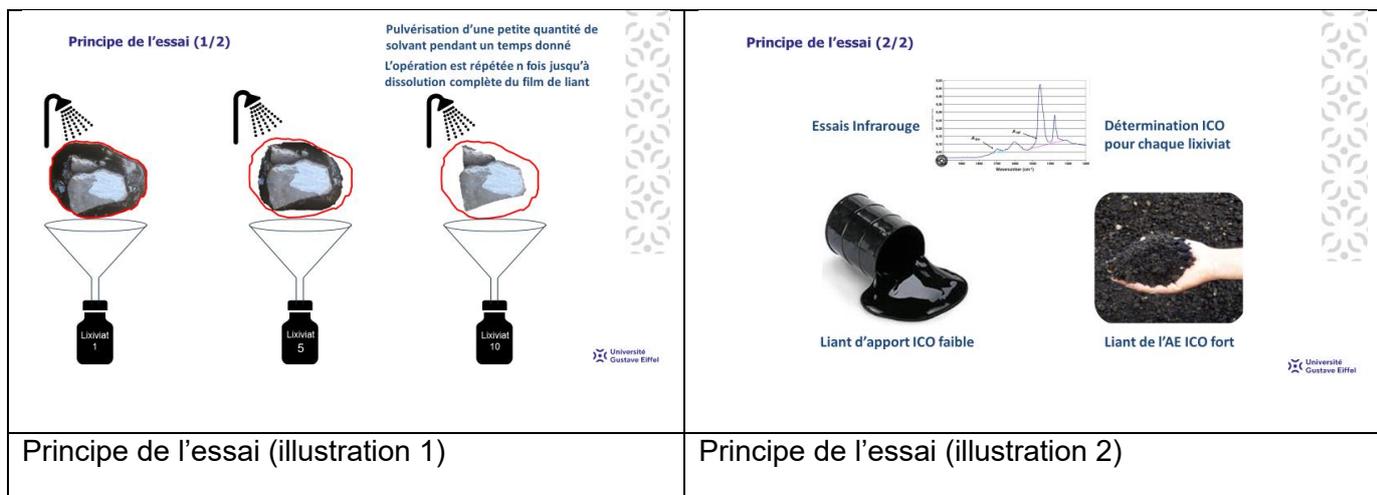


Figure 1 : illustration de l'essai de désenrobage séquencé

1.2.2.3 Interprétation des résultats

Comme l'essai de désenrobage séquencé est un essai relativement récent ne faisant pas l'objet d'une norme d'essai, il n'existe pas d'indicateurs uniques partagés par toute la profession. Aussi, plusieurs indicateurs existent pour interpréter les résultats. Ces indicateurs seront certainement amenés à évoluer dans les années à venir. Dans le cadre de l'étude, il a été utilisé des indicateurs issus des travaux de thèse de Julien Navaro ; d'Eurovia (Delfosse et al. ; 2017) et du projet MURE³ (Boulangé et al., 2018).

¹ solvant avec une très bonne affinité avec le bitume

² n généralement proche de 10

³ MURE : Multi-recyclage des enrobés.

Les indicateurs utilisés sont les suivants :

- Un indicateur basé sur le coefficient de la droite de régression (représentant l'évolution des ICO en fonction de la fraction massique de bitume lixivié). Si la pente de cette droite est nulle, le mélange est considéré comme homogène. Une droite avec une pente positive traduit l'évolution d'un liant peu oxydé vers un liant plus oxydé. Plus cette pente est forte plus le mélange est hétérogène. Enfin il existe un dernier cas avec une pente négative. Nous avons donc une évolution d'un liant oxydé vers un liant moins oxydé. Cette pente négative est le constat d'une suroxydation du film de liant de surface du au procédé industriel de fabrication.
- Un indicateur BR pour mesurer et comparer le degré de remobilisation des liants. L'indicateur de mélange appelé « Blending Rate » (BR) est calculé à partir de deux indices de référence. Cet indicateur est égal au rapport entre le niveau d'oxydation des derniers lavages N_{final} et le niveau moyen d'oxydation des premiers lavages N_i . Un rapport de BR supérieur à 1,3 est synonyme d'une mauvaise remobilisation.

Les résultats obtenus sur les matériaux de l'étude sont comparés entre eux.

La représentation graphique de l'évolution des ICO en fonction de la fraction massique de bitume lixivié figurent ci-après pour tous les matériaux :

- Figure 2 : Résultats pour BBSG avec 20%AE.
- Figure 3 : comparaison BBSG 20%AE et BBSG 40%AE
- Figure 4 : comparaison BBSG 40%AE avec enrobé à chaud référence
- Figure 5 : comparaison BBSG 40%AE avec régénérant (points jaune) et sans régénérant (points orange)

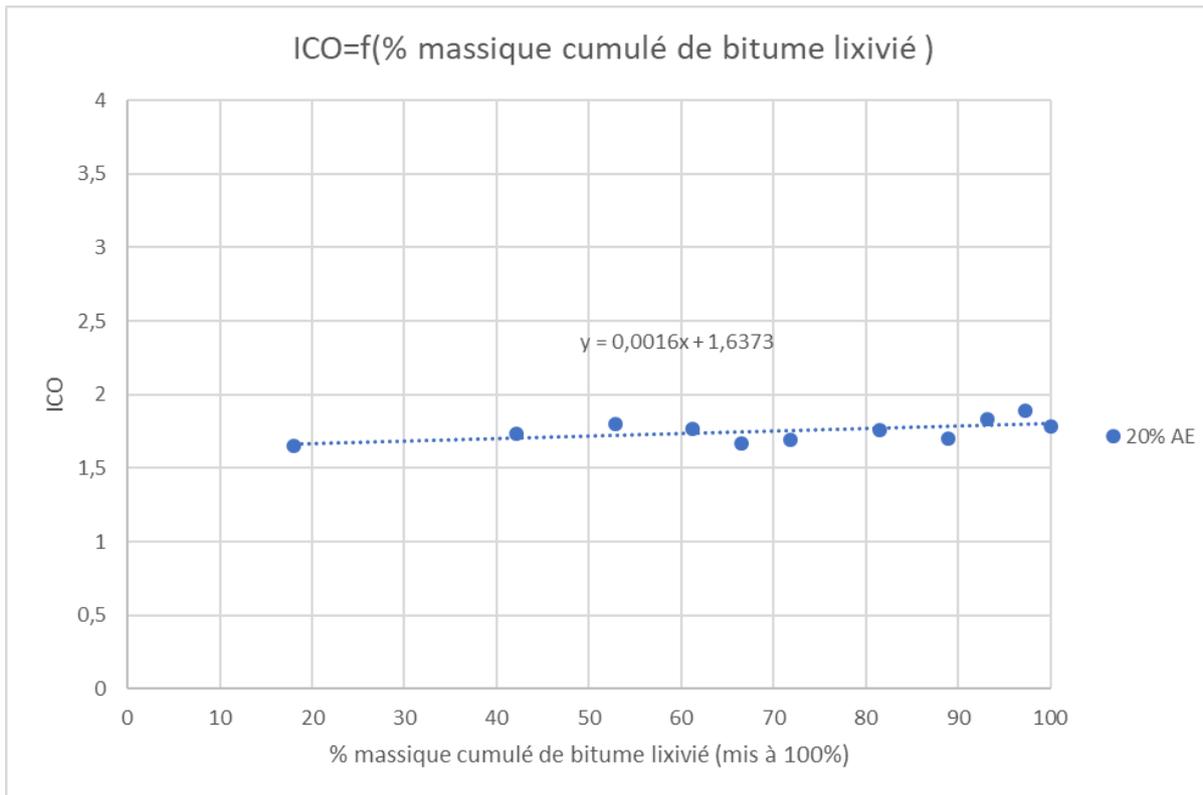


Figure 2 : Résultats pour BBSG avec 20%AE

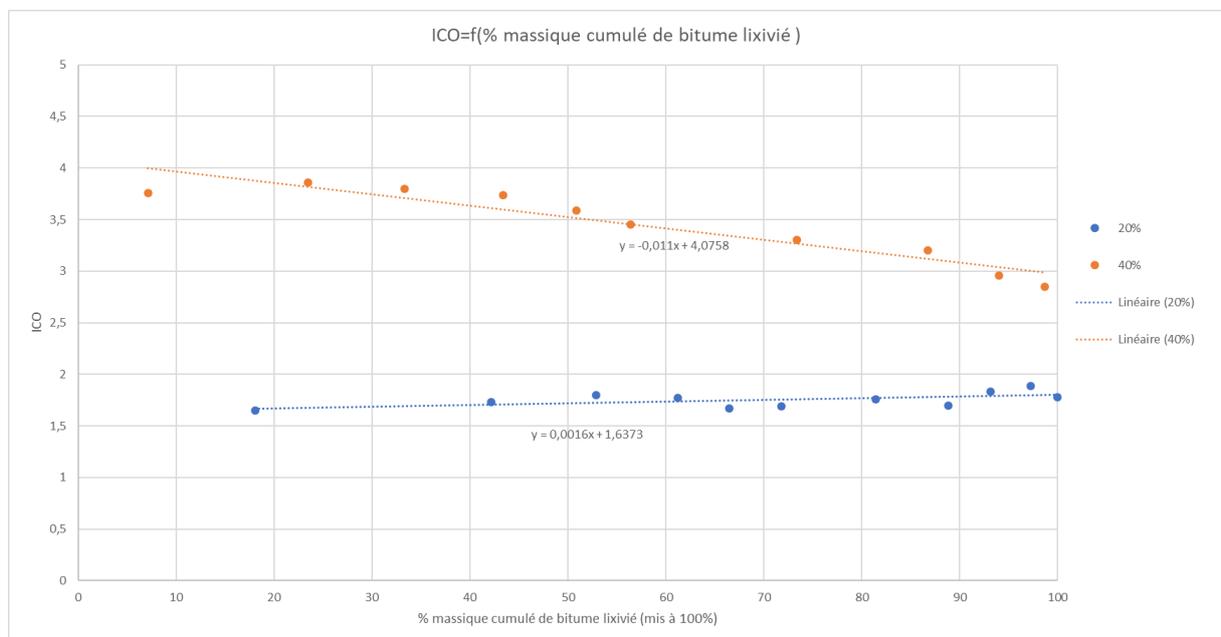


Figure 3 : comparaison BBSG 20%AE et BBSG 40%AE

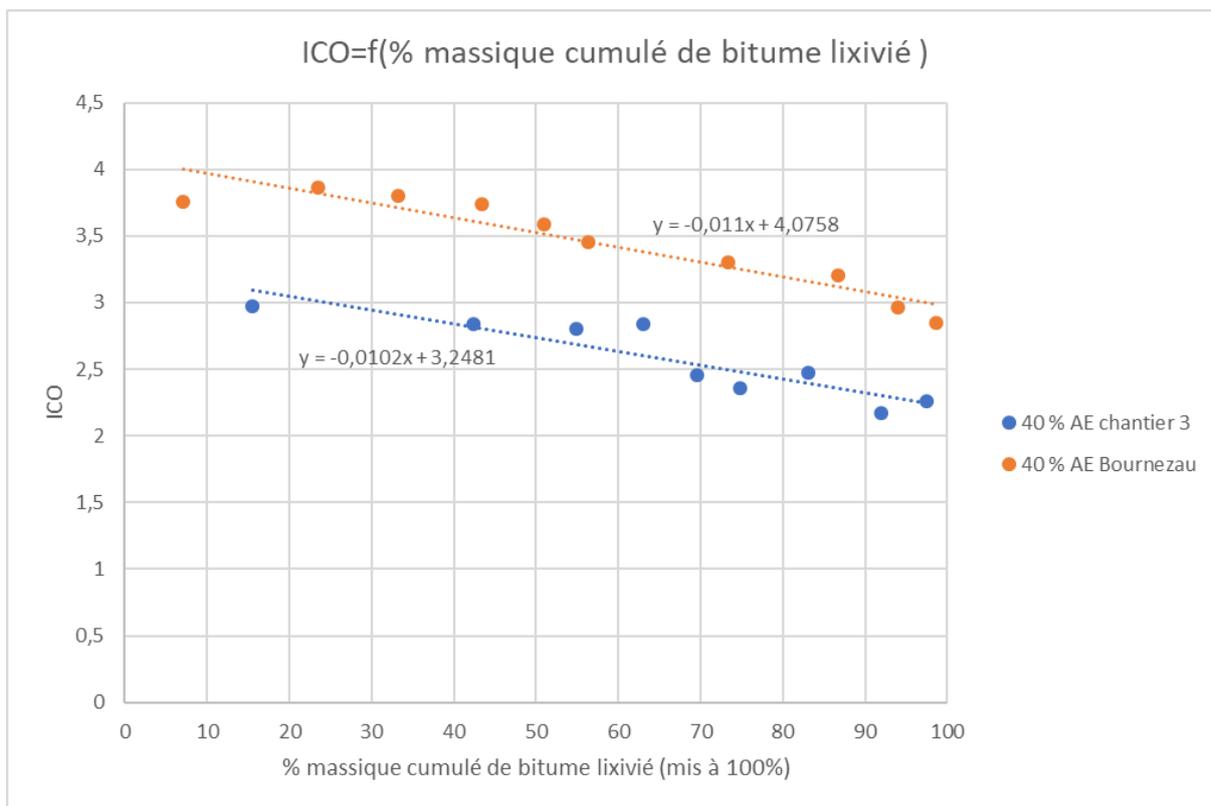


Figure 4 : comparaison BBSG 40%AE avec enrobé à chaud référence

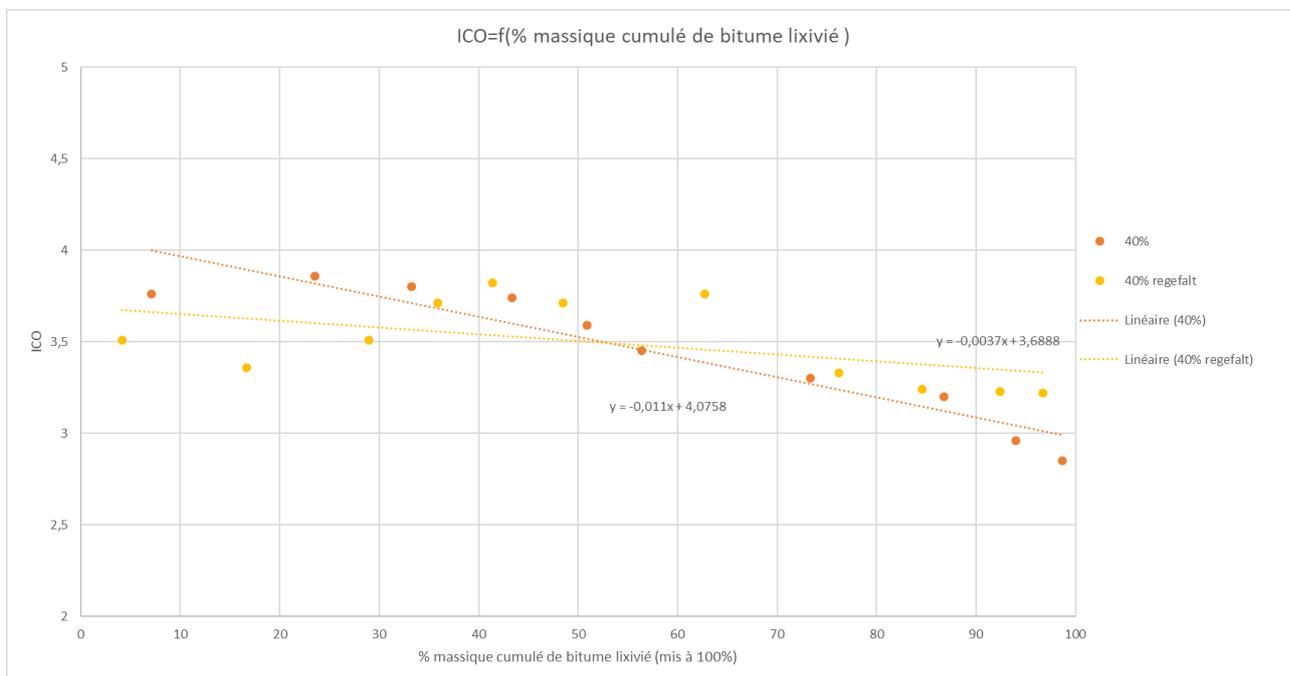


Figure 5 : comparaison BBSG 40%AE avec régénérant (points jaune) et sans régénérant (points orange)

Le tableau ci-après indique les valeurs des indicateurs pour chaque matériau :

Matériau projet DVDC étudié	penne	Différence entre ICO max et ICO min	BR
BBSG avec 20% AE (enrobé chaud)	0.0016	0.24	1.09
BBSG avec 40% AE (enrobé chaud)	-0.011	1.01	0.80
BBSG avec 40% AE et régénérant (enrobé chaud)	-0.0037	0.6	0.94

Tableau 2 : résultats de l'essai de désenrobage séquencé pour les 3 matériaux étudiés

Le mélange à 20% d'AE présente les meilleurs indicateurs, pente positive proche de 0, écart entre les ICO max et ICO min faibles et un BR proche de 1.

Les mélanges avec 40% d'AE présentent des caractéristiques avec des pentes négatives surement du des augmentations de température des granulats d'apport par rapport au mélange à 20% qui conduit à une suroxydation du liant dans les premiers lixiviats donc assimilé au liant de surface. Le mélange incorporant un régénérant présente de meilleurs indicateurs avec un écart ICOfmax/ICOfmin plus resserré et un BR proche de 1.

1.2.3 Interprétations et conclusions

Les principaux résultats de ces essais montrent que :

- Dans les 3 cas la remobilisation du liant est correcte.
- Le mélange à 20% est le plus homogène, suivi du mélange à 40% avec régénérant et enfin le mélange à 40% sans régénérant.

Concernant l'homogénéité des mélanges testés, les conclusions sont les suivantes :

- Pas de cas de double enrobage ;
- Effet positif du régénérant sur l'homogénéité des valeurs d'oxydation du bitume.

On pourrait être tenté de faire le lien entre ces résultats et la densité de fissuration plus importante relevée par l'Aigle 3D sur les planches à 40% que sur les planches à 20%.

Toutefois, il faut faire attention à ne pas tirer de conclusions hâtives. En effet, les indicateurs donnent juste des informations sur l'homogénéité du mélange et pas sur les caractéristiques mécaniques des enrobés qui pourraient avoir une incidence éventuelle sur le vieillissement de ce dernier. Par ailleurs, les valeurs d'ICO sont plutôt basses, comprises entre 3 et 4, ce qui ne traduit pas un vieillissement exagéré du liant (rappel : : ICO liant neuf < 1 ; ICO liant d'AE > 7),

ce qui est en phase avec les relevés Aigle 3D qui indique que les fissures, même si elles sont plus importantes sur les sections à 40% d'AE qu'à 20%AE restent finalement peu élevées dans l'absolu (couche de surface toujours en place après 9 ans de mise en œuvre).

Aussi, comme déjà évoqué au §10.1, il serait intéressant de réaliser des essais sur le comportement et les caractéristiques mécaniques des bitumes (pénétrabilité, température bille-anneau, etc...).

1.2.3.1 Bibliographie :

BOULANGE, L. Analyse comparative du vieillissement des liants en fonction des procédés de fabrication 2018. Livrable 13 PN MURE – ANR IMPOVMURE sous tache 4.2.

DELFOSSÉ F., Decamps J.A., Largeaud S. 2017. "Enrobés à base d'agrégats d'enrobés: qualification de l'homogénéité," RGRA N°949, 52–56

LOISELEUR, V. Rapport de stage « recyclage à fort taux des chaussées routières : développement méthodologique pour évaluer l'état du mélange entre liants vieilli et neuf ». 2021

NAVARO, J Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques. 2011 Thèse de doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers