

Projet National de recherche et développement

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

Essais croisés LCMS Exploitation des relevés ASFA (Phase 1)

Auteurs / Organismes :

Yannick KEMPF – Cerema

Arnaud FEESER – Cerema

Damien LESBATS – Cerema

Nicolas GRIGNARD – Cerema

Sébastien WASNER – Cerema

Bruno JOLY – Technologies Nouvelles

Baptiste RADDE - Technologies Nouvelles

Frédéric SAGNIER - Technologies Nouvelles

Julie MAIGNOL – NEXTROAD

Damien PILET – GINGER CEBTP

Romain DEGRANGE - DIAGWAY

Thème de rattachement :

Thème 2

DVDC/R/048A

N° lettre de commande : LC/20/DVDC/122, LC/20/DVDC/123, LC/20/DVDC/124, LC/20/DVDC/125,
LC/20/DVDC/126

Décembre 2023

Site internet : www.dvdc.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/dvdc

Président : Dominique JAUMARD

Directeurs : Christine LEROY et Simon POUGET

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

Sommaire

Sommaire	3
1 Résumé	5
2 Présentation générale	6
2.1 Essais croisés	6
2.2 Méthodologie adoptée pour l'analyse statistique	6
3 Pré-traitement des données	7
3.1 Formatage et intégration des données dans un SIG	7
3.1.1 Réception et vérification des données	7
3.1.2 Recalage de début de planche	8
3.1.3 Formatage des données et intégration dans un SIG	9
3.2 Traitement statistique des données	10
3.2.1 Conception de la méthodologie de construction des descripteurs agrégés	10
3.2.2 Préparation du recalage de fin de planche	11
3.2.3 Calcul	11
4 Analyse statistique	12
4.1 Traitement informatique	12
4.2 Validité du jeu de valeurs	12
4.3 Définition des indicateurs statistiques	13
4.3.1 Limite de répétabilité - r	13
4.3.2 Limite de reproductibilité - R	14
4.3.3 Recherche de relations fonctionnelles	14
4.4 Calcul des indicateurs statistiques	14
4.4.1 Validation du jeu de données	14
4.4.2 Détermination des indicateurs	15
4.4.3 Influence du recalage	15
5 Feuillet de présentation des résultats	16
6 GRILLE DE LECTURE DES FEUILLETS	16
7 Retour d'expérience	18
8 Conclusion générale	19

1 Résumé

L'auscultation d'une chaussée est une étape essentielle pour évaluer son état de santé et programmer d'éventuels travaux d'entretien. Jusqu'à récemment, ce diagnostic était réalisé avec des moyens en partie humains pouvant présenter des vitesses de mesure relativement limitées.

Depuis quelques années et grâce au développement de technologies performantes, cette auscultation s'appuie sur des appareils équipés de caméras et de capteurs qui permettent de réaliser des relevés à grand rendement. Il n'existe actuellement pas de cadre normatif ou réglementaire concernant ce type de mesures.

Or, compte-tenu des enjeux associés à ces auscultations, il est apparu crucial pour les gestionnaires de réseaux routiers de s'assurer de la fiabilité des résultats et de leur caractère reproductible ; différents véhicules et méthodes de traitement mises au point peuvent en effet être utilisés.

Dans le cadre du projet national DVDC (Durée de Vie des Chaussées), une campagne d'essais croisés a été conduite afin d'évaluer la qualité de rendu des capteurs LCMS (Laser Crack Measurement System) principalement utilisés lors de l'évaluation des réseaux routiers des sociétés d'autoroutes concédées.

L'expertise du Cerema a été sollicitée afin de réaliser cette évaluation des capteurs LCMS à travers une exploitation statistique. Cette note « Essais croisés LCMS – Exploitation PN DVDC » présente en trois étapes la démarche proposée pour réaliser cette analyse.

2 Présentation générale

2.1 Essais croisés

Le groupe de travail DVDC a défini les modalités d'auscultation suivantes :

- 5 matériels d'auscultations utilisés en France, équipés de technologies LCMS, font partie du protocole ;
- Ces 5 matériels appartiennent à des établissements (public ou privés) différents ;
- Le choix est porté sur un itinéraire autoroutier proposé par la société APRR, après un recueil de données préalables et un travail sur la représentativité des sections ;
- 7 planches (tableau 1) de 10 km chacune comportant des caractéristiques différentes (type de revêtements, âge, niveau de dégradation, ...) sont choisies. Parmi ces planches, il est distingué :
 - 6 planches parcourues 1 fois par l'ensemble des appareils ;
 - 1 planche parcourue 3 fois par l'ensemble des appareils afin d'apprécier la répétabilité ;
- L'ensemble du protocole est réalisé dans la même journée afin de mieux maîtriser les facteurs d'influence possibles.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des sections mesurées

Planche	Type de revêtement	Nom route	Etat de la section	Longueur	Nombre de passage
1	BBSG	A5	Moyen à mauvais	10 km environ	1
2	BBTM	A5	Moyen à mauvais	10 km environ	1
3	BBTM	A31	Bon	10 km environ	1
4	BBTM	A31	Moyen	10 km environ	3
5	BBDr	A6	Bon	10 km environ	1
6	BBDr	A6	Moyen à mauvais	10 km environ	1
7	BBSG	A36	Bon	10 km environ	1

Tableau récapitulatif des sections mesurées

A l'issue des mesures sur site, chaque participant a réalisé le traitement des données par le logiciel dédié RoadInspect selon les mêmes fichiers de configuration.

Le partage d'un référentiel d'exploitation identique a été adopté afin de limiter les biais dus aux configurations et aux versions particulières de chaque participant.

Les fichiers résultats (fichiers .xml et .erd) ont ensuite été transmis au Cerema pour analyse statistique des données.

2.2 Méthodologie adoptée pour l'analyse statistique

Le Cerema s'est appuyé sur son expérience en exploitations statistiques (basée sur le pilotage d'essais croisés inter-laboratoire à l'échelle régionale ou nationale ou encore sur la qualification de matériels).

L'analyse statistique est menée conformément à la norme NF ISO 5725-2 d'août 2020 relative à l'exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesures. Appliquée à des essais croisés, cette méthode permet de déterminer la répétabilité et la reproductibilité d'une série de résultats ainsi que d'exclure d'éventuelles valeurs aberrantes.

La typologie des données générées par ces essais croisés nécessite l'adoption d'une approche particulière :

- Les données brutes, d'une grande densité, doivent faire l'objet d'un traitement préalable pour pouvoir réaliser une analyse statistique significative ;
- Les très nombreux résultats de l'analyse statistique doivent faire l'objet d'une agrégation pour être assimilables ;
- La volumétrie des données nécessite le recours à des traitements informatisés incluant un minimum d'intervention humaine.

La méthode d'évaluation adoptée repose sur deux étapes successives : le prétraitement informatique puis la détermination et l'analyse d'indicateurs statistiques.

Le prétraitement informatique vise à formater et stocker les données de manière organisée dans un Système d'Information Géographique (SIG), à les rendre compatibles avec une analyse statistique, notamment par agrégation, puis à réaliser de manière automatisée les calculs de différentes grandeurs statistiques.

L'automatisation de cette étape est essentielle compte-tenu du volume important de données d'entrées (90 000 fichiers .xml). Plusieurs programmes informatiques ont été créés à cette fin.

Ensuite, les analyses des indicateurs statistiques sont réalisées avec un pas d'agrégation propre à chaque descripteur, puis pour chaque planche de 10 km et enfin pour la totalité du protocole, toutes planches confondues (ensemble de tous les passages réalisés).

La méthodologie d'analyse qui est normalisée conduit à valider la population de données (évaluation visuelle puis calculatoire) et à déterminer les limites de répétabilité et de reproductibilité. Une recherche de relations fonctionnelles est également proposée lorsque cela est possible.

3 Pré-traitement des données

Le prétraitement des données est décliné en deux phases :

- Le formatage et l'intégration des données dans un SIG ;
- Le traitement statistique des données.

3.1 Formatage et intégration des données dans un SIG

Cette phase consiste à récupérer les données, à les valider dans leur format et à les stocker sous une forme structurée, facilement accessible et visualisable. Elle se décline en trois sous-étapes :

- Une réception et vérification des données ;
- Un recalage du début de chaque planche par rapport à une référence fixe connue ;
- Un formatage des données sous forme de descripteurs élémentaires et une intégration dans un SIG.

3.1.1 Réception et vérification des données

Chaque opérateur a réalisé en interne l'exploitation des fichiers bruts (.fis) avec une version spécifiée du logiciel RoadInspect (version de librairie 4.50.7.0) suivant deux configurations. Les fichiers de configuration ont été préparés en amont par l'un des opérateurs et diffusés pour utilisation à l'ensemble des opérateurs.

Il a été demandé la transmission à minima des éléments suivants :

- Le résultat des exploitations des données : fichiers «.xml » et «.erd » ;
- Le premier fichier «. fis » de chaque planche, afin de repérer précisément l’abscisse curviligne de départ.

Les données ont été fournies au Cerema sur une période s’étalant de mi-avril à mi-septembre 2021. Une vérification du format des données a été menée afin de s’assurer du respect du cahier des charges établi. Des erreurs de sessions de mesures et des mauvaises versions du programme RoadInspect ont été détectées lors des premières analyses ; les opérateurs concernés ont dû réaliser de nouveaux calculs et transmettre les fichiers corrigés.

A l’issue de ce processus, il est constaté que l’ensemble des données collectées ne sont pas complètement homogènes entre tous les opérateurs. Cela a nécessité une adaptation de certaines parties du programme de traitement.

Quelques données sont également malgré tout manquantes pour certains opérateurs, notamment :

- Les profils longitudinaux (fichiers «.erd») pour 4 planches d’un opérateur ;
- Toutes les données sur 400 mètres cumulés sur 2 planches pour un opérateur.

Par ailleurs, la lecture des fichiers .xml pour chaque opérateur a permis d’identifier la version du programme d’acquisition utilisée. Chaque opérateur possède une version différente de ce programme, ce qui pourrait générer un biais sur les résultats (non déterminé au cours de cette étude).

Pour information, les versions de programme d’acquisition employés sont les suivants (Tableau 2) :

Tableau 2 : Version de programme d'acquisition des opérateurs

Numéro opérateur	Version programme d'acquisition
2	2.6.0.0
5	2.8.5.0
4	4.1.4.0
3	4.1.5.0
1	4.8.10.0

3.1.2 Recalage de début de planche

Après examen des différents fichiers communiqués, il apparaît que le point de démarrage de l’acquisition n’est pas commun à tous les opérateurs. Afin de comparer les données de façon objective, le recalage de l’abscisse curviligne de chaque opérateur a été réalisé.

Le calage de début de planche a été déterminé manuellement pour chaque passage, sur chaque planche, à partir de la visualisation du premier fichier fis dans l’outil RoadInspect. Le début de planche était matérialisé par une marque de peinture sur la chaussée, visible par un relevé LCMS (Figure 1).

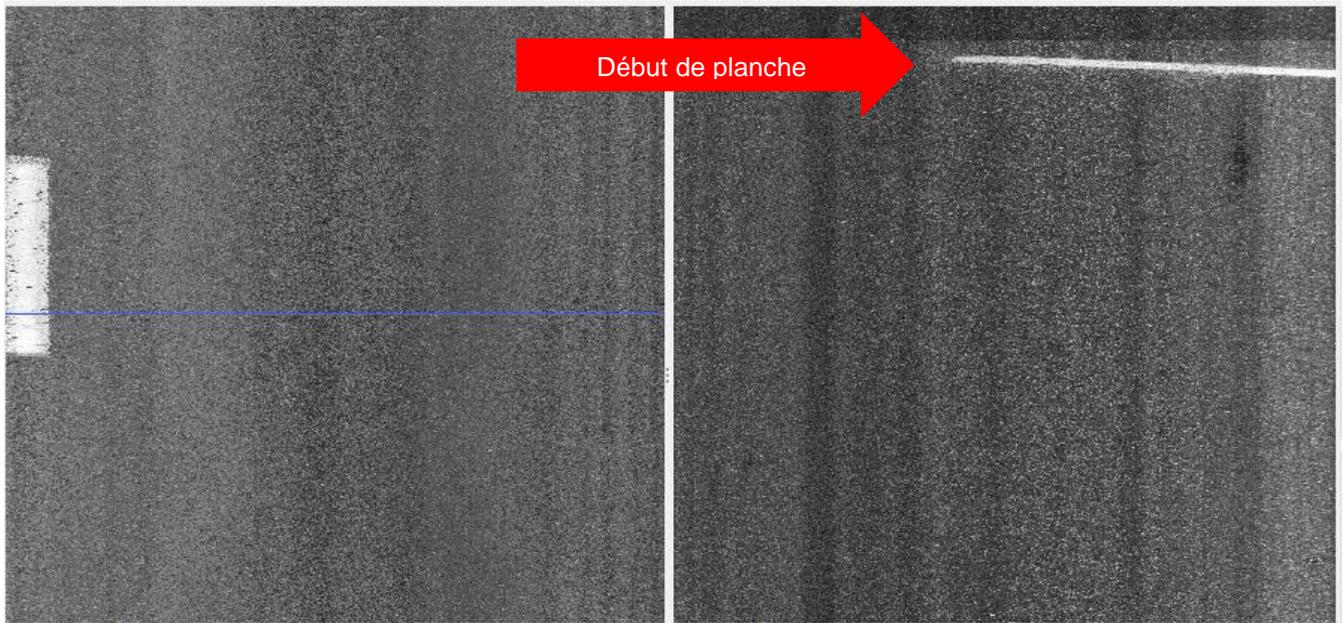


Figure 1: Marque de début de planche

L'abscisse curviligne de mesure correspondant au début de chaque planche a été répertoriée dans un fichier permettant par la suite de faire un glissement longitudinal des résultats des exploitations par la méthode suivante :

$$\text{Abscisse enregistrée} = \text{abscisse mesurée} - \text{abscisse mesurée de début de planche}$$

Ainsi, l'abscisse de début de planche est égale à 0.

D'autres points de recalage n'ont pas été fixés à ce stade afin de pouvoir prendre en compte dans l'analyse les biais liés à la mesure de l'abscisse curviligne par les œdomètres des véhicules (dérive potentielle, effet de lacet lors de la conduite, ...).

3.1.3 Formatage des données et intégration dans un SIG

Les données réceptionnées, résultats bruts d'un traitement par RoadInspect, sont au format .xml.

La lecture et l'utilisation des données n'est ni simple, ni directe. Afin de rendre plus efficace la manipulation et la visualisation de ces résultats, il a été décidé de procéder à leur formatage et intégration dans un SIG (base PostgreSQL et ArcGIS Pro).

Le formatage de la donnée permet d'extraire les données intéressantes des fichiers .xml par type de mesure. Le résultat de ce formatage est l'obtention de descripteurs élémentaires. Ainsi, par exemple, pour le descripteur élémentaire « Orniérage méthode française », chaque objet contient notamment les éléments suivants :

- Numéro de l'opérateur,
- Numéro de la planche,
- Numéro de passage,
- Numéro de fichier fis,
- Abscisse curviligne (mm),
- Côté de la voie mesurée (Left ou Right),
- Profondeur d'ornière,
- Largeur de l'ornière.

Les profils en long, suivant la méthodologie du Cerema, sont exploités à cette étape du processus.

Les données sont ensuite intégrées dans une base de données organisée par opérateur/planche/passage. A ce stade, les données sont anonymisées : à chaque opérateur est attribué un numéro.

De façon concrète, cette étape consiste à passer de 90 000 fichiers résultats sous format .xml et quelques fichiers au format «.erd», à 27 descripteurs élémentaires ordonnés par planche/opérateur/passage. Compte-tenu du volume de données à traiter, un programme informatique dédié a été développé. Le temps de traitement par cet outil est approximativement de 1 h par planche/opérateur/passage.

3.2 Traitement statistique des données

Cette phase consiste à préparer les données avant une analyse statistique qui est réalisée de manière automatisée.

Elle se décline en trois phases successives :

- Conception de la méthodologie de construction des descripteurs agrégés ;
- Préparation du recalage de la fin de chaque planche ;
- Calcul automatisé des descripteurs agrégés et des grandeurs statistiques.

3.2.1 Conception de la méthodologie de construction des descripteurs agrégés

Afin de procéder à l'exploitation statistique, il faut en premier lieu préparer les données, c'est à dire découper le linéaire en pas fixe sur lesquels seront réalisés les comparaisons (ce terme est nommé « niveau » dans la norme NF ISO 5725).

Il est alors calculé par opérateur et sur chaque « niveau » une valeur représentative de l'indicateur évalué (Ce terme est défini comme « cellule »). La cellule est ainsi une valeur agrégeant (moyenne, somme...) pour un passage l'ensemble des valeurs élémentaires au pas d'agrégation défini. Pour la plupart des planches (P1 à P3 et P5 à P7), cette valeur de cellule par opérateur est unique. Concernant la planche P4, ayant fait l'objet de 3 mesures par opérateur, 3 valeurs sont inscrites dans la cellule.

Concrètement, pour un descripteur défini (exemple : arrachements), cela consiste à extraire du descripteur élémentaire les attributs concernés au pas natif (les arrachements obtenus sur une zone de 250 mm x 250 mm) et à les agréger au pas d'agrégation défini (les arrachements exprimés sur un linéaire - « niveau » - de 20 mètres et pour la largeur de la chaussée. La moyenne d'un opérateur sur ces 20 mètres constitue une cellule).

A partir des orientations définies par le groupe DVDC et des éléments disponibles, le Cerema a défini 79 descripteurs agrégés sur lesquels peut être réalisée l'analyse statistique. La liste de ces descripteurs agrégés et leur méthodologie de construction est disponible en annexe.

En fonction des descripteurs élémentaires, la méthodologie d'agrégation peut varier : moyenne, somme, dénombrement, notation NBO...

La longueur sur laquelle faire l'agrégation (niveau) a été définie afin d'avoir une valeur de cellule significative pour chaque descripteur (une cellule est une moyenne constituée d'a minima de 10 valeurs élémentaires).

Chaque descripteur agrégé est présenté ainsi en annexe :

Indice	Descripteur	Définition	Unité	Agrégation	Nb val élémentaires
Repérage pour l'exploitation fine	Identification. Pour faciliter la compréhension, les descripteurs de même nature ont été rassemblés (ex	Définition du(es) descripteur(s)	Unité de restitution	Modalité d'agrégation des mesures élémentaires	Nombre de valeurs élémentaires utilisées pour une agrégation

	<i>IRI Droit, Centre gauche)</i>				
--	----------------------------------	--	--	--	--

3.2.2 Préparation du recalage de fin de planche

Afin d'apprécier le biais lié à la mesure de l'abscisse curviligne, il a été décidé de réaliser quelques analyses statistiques sans et avec correction de l'abscisse curviligne. Pour ce faire, un coefficient de recalage homothétique de l'abscisse longitudinal a été calculé par opérateur/planche/passage.

Ce recalage est basé sur la détection de la fin de planche, à partir d'une recherche visuelle appuyée sur la détection du marquage. Cette recherche a été menée à partir du SIG sur lesquels les données ont été versées.

Afin de ne privilégier aucun opérateur, il a été défini une planche de référence d'une longueur de 10 000 m. Tous les relevés sont ainsi corrigés pour obtenir une longueur de planche de 10 000 m, bien qu'en réalité celle-ci puisse être légèrement différente.

Le coefficient de recalage est déterminé de la manière suivante :

$$r = S_{\text{Objet_ref}} / S_{\text{Objet}}$$

avec :

$S_{\text{Objet_ref}}$: abscisse curviligne sur la planche de référence (10 000 m) de l'objet physique comparé

S_{Objet} : abscisse curviligne sur le passage observé de l'objet physique comparé

Le tableau ci-dessous contient les valeurs du coefficient de recalage calculé par planche et par opérateur.

	Planche 1	Planche 2	Planche 3	Planche 4	Planche 5	Planche 6	Planche 7	Total par Opérateur
Opérateur 1	0.9964	1.0023	0.9998	1.0004	0.9992	0.9664	0.9996	0.9961
Opérateur 2	0.9975	1.0036	1.0012	1.0014	1.0003	0.9674	0.9999	0.9971
Opérateur 3	0.9962	1.0023	0.9999	1.0003	0.9991	0.9662	1.0001	0.9961
Opérateur 4	0.9986	1.0053	1.0029	1.0033	1.0021	0.9692	1.0029	0.9990
Opérateur 5	0.9959	1.0024	0.9998	1.0004	0.9992	0.9648	0.9999	0.9959
Opérateur 6	0.9986	1.0053	1.0029	1.0033	1.0021	0.9692	1.0029	0.9990
Total par planche	0.9972	1.0035	1.0011	1.0015	1.0003	0.9672	1.0009	0.9972

3.2.3 Calcul

Le calcul des descripteurs agrégés puis celui d'indicateurs statistiques sont réalisés par un même programme spécifique développé pour ces essais croisés.

Le traitement a été réalisé pour tous les descripteurs agrégés définis, avec et sans recalage de fin de planche, soit à 158 reprises. Les descripteurs agrégés ne sont pas restitués ou stockés. Seuls les résultats du traitement statistique sont livrés sous la forme de 5 fichiers texte, importable dans un tableur :

- Résultats par cellule (détail par opérateur et par pas d'agrégation) ;
- Résultats par niveau (ensemble des opérateurs au pas d'agrégation) ;
- Résultats globaux (ensemble des opérateurs sur la totalité de la section).

Au total, 790 fichiers résultats ont ainsi été produits.

Le temps de traitement par cet outil est approximativement de 2 minutes par descripteur agrégé, avec un poids pour l'ensemble des 5 fichiers résultats restitués de 10 Mo.

Les calculs définis par la norme NF ISO 5725-2 d'août 2020 ont été implémentés dans le programme informatique. Cette partie du programme a été validée à partir de jeux de données tests compris dans la norme elle-même, et à partir d'exploitations de même type réalisées sur d'autres essais croisés de clubs de laboratoires régionaux.

L'analyse des données est ensuite réalisée sur la base des résultats du prétraitement informatique. Elle se décline en trois phases :

- Analyse visuelle des valeurs aberrantes : cette phase repose sur l'analyse graphique des résultats aux tests de Mandel et des moyennes par opérateur ;
- Analyse des écarts aux tests calculatoires de valeurs aberrantes : cette phase consiste à quantifier et analyser le nombre de valeurs aberrantes aux tests de Cochran et de Grubbs par opérateur et par planche ;
- Détermination des indicateurs statistiques globaux : cette phase consiste à analyser les résultats de répétabilité et reproductibilité par niveau ainsi que par planche.

Le livrable est la synthèse, par indicateur, sur l'ensemble des sections auscultées, incluant l'ensemble des participants, selon le recalage (ou non) du référentiel.

4 Analyse statistique

La méthodologie d'exploitation retenue a nécessité le développement d'un programme informatique (cf. §2) ainsi que d'un outil d'analyse statistique.

4.1 Traitement informatique

La finalité du programme informatique est de prétraiter les données mises à disposition par les participants, toute analyse manuelle étant à exclure compte-tenu du volume de données à traiter.

Les analyses statistiques réalisées sont basées sur les valeurs agrégées selon les modalités décrites pour chaque descripteur agrégé.

Le recalage des abscisses curvilignes est une composante complémentaire (cf. §2) mais dont le fonctionnement est identique à celui des données non-recalées.

4.2 Validité du jeu de valeurs

Les paramètres statistiques exploités sont issus de la norme NF ISO 5725-2 d'août 2020.

« L'estimation des écarts-types de répétabilité et de reproductibilité s'effectue à partir des données collectées sur un nombre de niveaux spécifiques. La présence de laboratoires ou de valeurs individuelles qui semblent incohérents avec tous les autres laboratoires ou valeurs peut modifier les estimations, ce qui nécessite de prendre des décisions relatives à ces valeurs. »

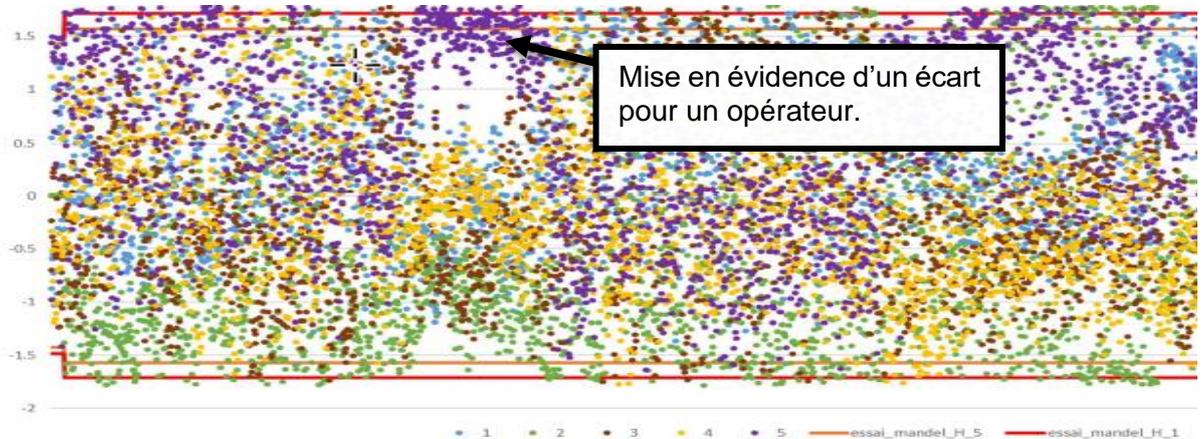
La première étape consiste à valider le jeu de données. Les valeurs singulières sont à éliminer, pour ne conserver qu'une population représentative.

La méthodologie repose sur 3 tests successifs.

- Technique graphique de cohérence (test de Mandel) :
L'ensemble des données est représenté en deux graphes : variances (statistique k – ou Mandel k) et moyennes (statistique h – ou Mandel h).

Cette représentation visuelle ne permet pas d'éliminer de valeurs. à ce stade de l'exploitation mais il est possible d'identifier une erreur systématique (décalage de l'ensembles des mesures

pour un opérateur) ou un évènement singulier (dispersion ponctuelle de valeurs ; par exemple, détection d'une zone sans marquage au sol).



- Technique numérique pour les valeurs aberrantes :
 - Test de Cochran

Le test de Cochran détecte les valeurs aberrantes en matière de dispersion des écart-types des séries de valeurs (problème de fidélité).

Au pas de mesure considéré, la dispersion des valeurs de chaque opérateur est évaluée au regard de critères de sélection définis. Le test est réalisé tant que le critère de validité n'est pas satisfait. Les valeurs invalidant le test sont identifiées et exclues de l'analyse statistique.
 - Test de Grubbs

Le test de Grubbs détecte les valeurs aberrantes en matière de dispersion des écart-type des moyennes des séries de valeurs. Pour cette analyse, un test simple (pouvant conduire à écarter une valeur aberrante haute ou basse) et un test double (les 2 valeurs les plus éloignées de la valeur centrale sont testées) ont été pratiqués.

Au pas de mesure considéré, la dispersion des moyennes entre chaque opérateur est évaluée au regard de critères de sélection définis. Le test est réalisé tant que le critère de validité n'est pas satisfait. Les valeurs invalidant le test sont identifiées et exclues de l'analyse statistique (problème de justesse).

4.3 Définition des indicateurs statistiques

Les indicateurs statistiques suivants sont déterminés pour à chaque descripteur agrégé :

- Variance ;
- Ecart-type ;
- Limite de répétabilité (r) ;
- Limite de reproductibilité (R) ;
- Incertitude.

4.3.1 Limite de répétabilité - r

La limite de répétabilité r représente l'écart maximum, avec un niveau de confiance de 95%, entre deux résultats, obtenus sur un même échantillon pour une même méthode, un même opérateur, un même appareil et sous un court espace de temps. Le calcul de cette valeur suppose que plusieurs résultats soient réalisés.

Parmi les planches auscultées, seule la planche 4 a été parcourue à plusieurs reprises par l'ensemble des opérateurs. Les conditions de répétabilité sont satisfaites pour cette planche. Les valeurs de limite de répétabilité sont robustes.

Il n'est en revanche pas possible de calculer cette valeur pour les autres planches.

4.3.2 Limite de reproductibilité - R

Une valeur de limite de reproductibilité R est proposée pour chaque planche auscultée.

Elle est déterminée à partir de la répétabilité et de la variance inter-opérateurs, elle-même exprimée à partir de la valeur de répétabilité.

Or, la valeur de répétabilité ne peut être déterminée mathématiquement que pour la planche 4, seule planche ayant fait l'objet de tests de répétition.

Pour les autres planches, la répétabilité est retenue comme étant égale à zéro, ce qui a une incidence sur la valeur de reproductibilité affichée ; cela peut notamment conduire à donner une valeur de limites de reproductibilité non représentative.

De ce fait, seule la valeur de limite de reproductibilité de la planche 4 peut être considérée comme robuste. La reproductibilité des autres planches est déterminée à partir de la variation entre les opérateurs sans tenir compte d'éventuelles irrégularités de l'appareil.

4.3.3 Recherche de relations fonctionnelles

La méthode statistique appliquée propose de rechercher l'existence d'une relation entre la justesse (limite de répétabilité et de reproductibilité) et le niveau moyen. Plusieurs modèles existent :

- Linéaire ;
- Affine ;
- Exponentielle ;
- Logarithmique inversée d'ordre 2.

La représentation affine, usuellement utilisée, a été retenue.

4.4 Calcul des indicateurs statistiques

L'outil développé (tableur Excel) combine affichage graphique et calculs mathématiques. L'exploitation est réalisée descripteur agrégé par descripteur agrégé. Les données issues du traitement informatique précédent sont introduites manuellement dans des onglets de « copie » et sont traitées dans d'autres onglets dédiés et ce, afin d'éviter des manipulations manuelles ou le traitement mathématique est réalisé.

4.4.1 Validation du jeu de données

Le fichier résultat par Cellule est traité pour définir :

- Les coefficients de Mandel : variance (k) et moyenne (h) avec des critères de 1% et 5 % ;
- Le test de Cochran : critères de validité à 1 % et 5 %, jusqu'à satisfaction des critères de validation du test ;
- Le test double de Grubbs : critère de validité à 1 % et 5 %, jusqu'à satisfaction des critères de validation du test.

Les données aberrantes sont ainsi successivement identifiées par les tests de Cochran et de Grubbs puis éliminées.

Concrètement, il a été évoqué précédemment qu'une cellule était composée d'une valeur par passage, issue de l'agrégation de plusieurs valeurs élémentaires. Pour le test de Cochran et si l'une de ces valeurs agrégées est aberrante lorsqu'un test de répétition a été réalisé sur site (planche 4), cela conduit à éliminer cette valeur aberrante plutôt que l'ensemble des valeurs agrégées de la cellule.

Un test de Grubbs simple ou double qui ne serait pas satisfait conduit, quant à lui, à une élimination de la cellule de l'opérateur (des opérateurs) pour un niveau concerné.

L'algorithme créé répète ces étapes jusqu'à élimination complète des valeurs aberrantes au sens statistique.

Au sortir de cette étape, le jeu de données est supposé valide au sens de la norme NF ISO 54725-2.

4.4.2 Détermination des indicateurs

Les fichiers « résultat par niveau » et « résultats globaux » sont traités pour définir :

- Par niveau,
 - La moyenne ;
 - La variance ;
 - L'écart-type ;
 - La limite de répétabilité ;
 - La limite de reproductibilité ;
 - L'incertitude ;
 - Les premiers éléments pour la définition de relation fonctionnelle.
- Ces mêmes caractéristiques sont déterminées pour une planche (composée de plusieurs dizaines de niveaux) et pour la totalité du protocole.

En fin d'exploitation, une synthèse fournit les principales caractéristiques de l'analyse :

- Le nombre d'opérateurs (matériels) ;
- Le nombre de valeurs disponibles (après agrégation par niveaux) ;
- Le nombre de valeurs de cellules retenues (après avoir écarté les éventuelles valeur aberrantes) ;
- Le nombre de valeurs isolées (qui sont un indicateur des valeurs qui, même si elles ne sont pas écartées statistiquement, mettent en évidence une certaine dérive par rapport aux autres valeurs disponibles).
- La moyenne ;
- L'Ecart-type ;
- La Reproductibilité ;
- La Répétabilité¹ lorsque celle-ci est disponible ;
- La Représentation graphique de la liaison {(Répétabilité-Reproductibilité) et moyenne}.

4.4.3 Influence du recalage

L'impact du recalage des données selon la méthode définie au §2 a été éprouvé sur 3 descripteurs : MPD (découpé en niveaux de 10 mètres), arrachements (niveau de 20 m) et Lanemark (niveau de 100 m). Les descripteurs agrégés ont été choisis pour leurs pas d'agrégation différents.

Les indicateurs statistiques ont été calculés sur les données recalées et non recalées, après élimination des valeurs aberrantes.

Pour ces trois descripteurs, il ressort de la comparaison sans/avec recalage que :

- Les valeurs moyennes sont proches ;
- Les limites de répétabilité / reproductibilité sont soit proches, soit légèrement améliorées dans le cas d'un recalage.

Comme il est démontré pour ces trois descripteurs représentatifs que la méthode de recalage n'impacte pas négativement les résultats, il a été choisi de ne traiter l'ensemble des descripteurs agrégés qu'après recalage.

¹ Les conditions de répétabilité ne sont réunies que sur la planche n°4.

Il est rappelé que cette méthode de recalage est une intervention post-mesure (ce n'est plus un examen d'essai croisé au sens strict) qui conduit à faire superposer l'ensemble des niveaux. Sans cette intervention, cela pourrait amener à comparer entre-elles des valeurs qui ne concernent pas les mêmes zones de mesures.

5 Feuilles de présentation des résultats

La restitution de l'analyse est proposée en annexe, descripteur agrégé par descripteur agrégé.

La structuration est identique pour l'ensemble des descripteurs agrégés traités.

Elle est composée des parties suivantes :

Partie A : Validation des données

- Une présentation succincte du descripteur agrégé est proposée (définition, pas d'acquisition, unité) ;
- Une représentation visuelle de l'ensemble des résultats des opérateurs par les tests Mandel h (justesse) et Mandel k (fidélité) ;

Partie B : exploitation statistique globale

- Une visualisation globale est proposée pour l'ensemble des planches traitées (P1 à P7) incluant la valeur moyenne par niveau et la reproductibilité ;

Partie C : exploitation statistique par planche

- Une évaluation est réalisée pour chacune des planches P1 à P7 incluant :
 - Une représentation graphique de la moyenne par niveau +/- reproductibilité pour chacun des opérateurs ;
 - Un tableau de synthèse présentant les principales valeurs obtenues sur la planche considérée (moyenne, écart-type, reproductibilité, ...) ;
 - Une représentation d'une éventuelle relation fonctionnelle entre la reproductibilité (et répétabilité pour la planche 4) et la moyenne.

6 GRILLE DE LECTURE DES FEUILLETS

Les feuillets fournis dans cette version provisoire du rapport présentent les résultats obtenus à l'issue de la première analyse réalisée. Ce ne sont pas des fichiers définitifs. A ce stade de l'étude, ils ne comprennent pas de commentaires, d'éléments descriptifs ou d'interprétation.

Cependant et afin de faciliter l'analyse ou la recherche de cause par les différents opérateurs, il est proposé les éléments suivants :

- L'opérateur 1 est en bleu ;
- L'opérateur 2 est en vert ;
- L'opérateur 3 est en marron ;
- L'opérateur 4 est en jaune ;
- L'opérateur 5 est en violet.

Les éléments qui présentent une caractéristique intéressante ou à investiguer sont marqués par une étoile.

Selon les cas, ce marqueur peut indiquer (liste non exhaustive) :



- Une hétérogénéité de section dont la cause est à observer :
Exemple :

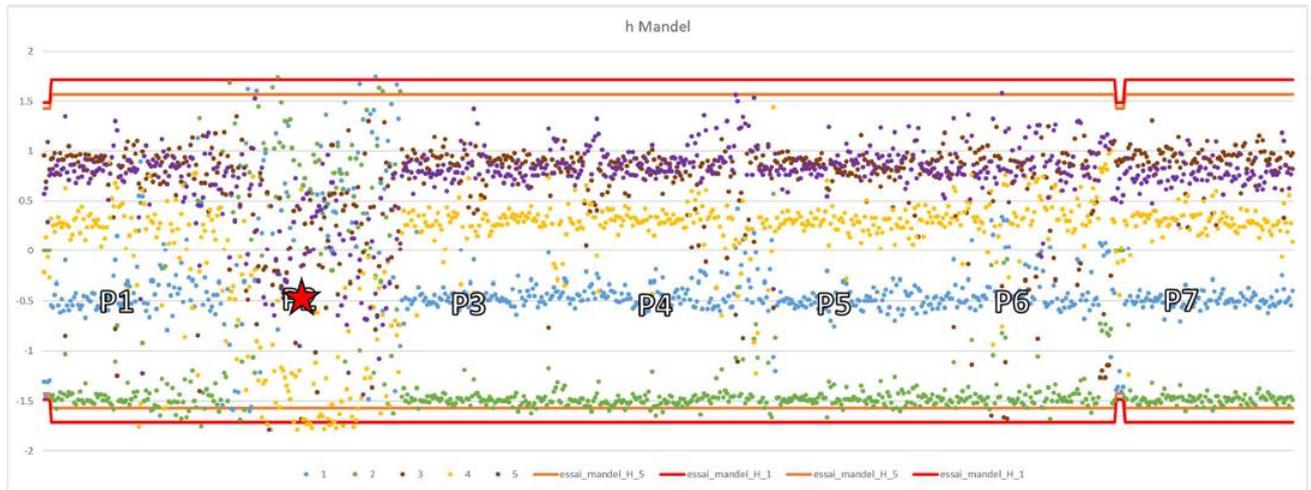


Figure 2 : Décalage systématique sauf sur une zone

- La dérive numérique d’un ou plusieurs opérateurs (sur la moyenne, l’écart-type, le nombre de valeurs isolées ou écartées, ...)

Exemple :

	moyenne	écart-type	nb val	nb val manquantes		nb valeurs écartées*		nb valeurs isolées		Moyenne totale	répétabilité moy. r
Opérateur 1	3535.5 mm	67.9 mm	96	4	4 %	2	2.1 %	3	3.1 %	3511 mm	0 mm
Opérateur 2	3532.4 mm	71.8 mm	97	3	3 %	0	0 %	5	5.2 %		
Opérateur 3	3515 mm	49 mm	97	3	3 %	3	3.1 %	2	2.1 %	Nombre de valeurs théoriques	Reproductibilité moyenne R
Opérateur 4	3452.5 mm	58.6 mm	91	9	9 %	13	14.3 %	12	13.2 %		100
Opérateur 5	3510.3 mm	50.7 mm	96	4	4 %	4	4.2 %	4	4.2 %		3.9 %
* plusieurs invalidités statistiques possibles pour une même cellule											

Figure 3 : Analyse de cause pour l'opérateur 4 dans cet exemple

- Des zones ponctuelles à examiner

Exemple :

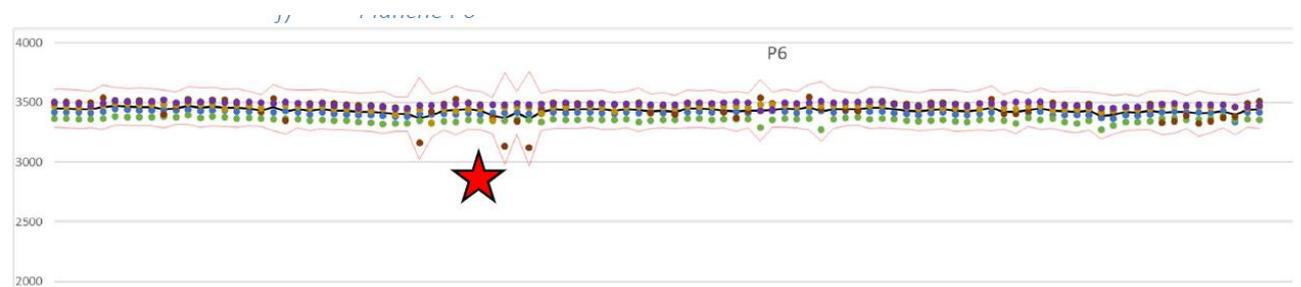


Figure 4 : Sur certaines zones particulières, un opérateur distingue des valeurs plus faibles

- Des dérives statistiques manifestes

Exemple :

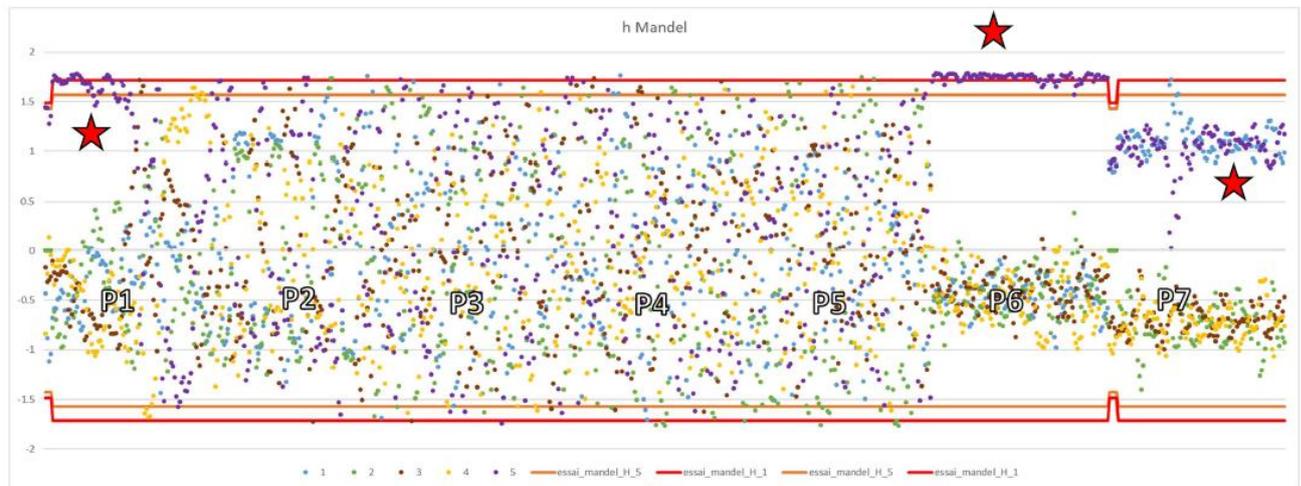


Figure 5 : Des dérives détectables au test de Mandel

7 Retour d'expérience

L'exploitation des résultats a été communiquée aux différents opérateurs le 01 février 2022 et ces derniers ont ensuite transmis au Cerema des éléments d'analyse voire des demandes de précision. Dans cette section, ces éléments d'analyse sont partagés.

La synthèse de ces essais croisés s'articule autour des points ci-dessous.

- Domaine de validité

Les conclusions présentées s'appliquent et se limitent aux résultats des essais croisés ASFA réalisés le 24 mars 2021 et donc aux caractéristiques des routes mesurées.

Les niveaux de détection (valeur mesurée) par indicateur retenu ainsi que les résultats de l'exploitation statistique (répétabilité, reproductibilité) ne sont valables que dans le cadre de ces essais. L'extrapolation des résultats présentés dans ce rapport à d'autres domaines d'application (typologie de réseau, configurations matérielles différentes) nécessitera au préalable une étude d'impact.

- Configuration matérielle

Le positionnement des capteurs LCMS sur le véhicule de mesure influe directement le calcul des indicateurs a posteriori.

La technologie de capteurs LCMS utilisée nécessite deux capteurs mesurant transversalement la chaussée avec la partie centrale de la chaussée mesurée par les deux capteurs simultanément. De ce fait, les indicateurs nécessitant le calcul du profil transversal sont dépendant du calibrage relatif des deux capteurs. Pour les autres indicateurs, les 2 capteurs peuvent présenter des différences susceptibles d'entraîner des performances dépendantes du capteur et donc de la trace considérée.

Certains problèmes soulevés sur des aspects matériels ont fait l'objet d'échange entre les opérateurs et PAVEMETRICS et sont pour certains pris en compte dans le développement du capteur LCMS-2.

- Configuration logicielle

Tous les opérateurs ont réalisé l'exploitation des données brutes (fichiers « fis ») à partir d'une même version de RoadInspect (v4.50.7.0) afin de limiter l'impact de la version de ce programme. Or, ce programme est en constante évolution afin de corriger certains problèmes ou écarts constatés par les utilisateurs. L'utilisation d'une version plus récente permet de corriger certains écarts mis en évidence par l'exploitation statistique réalisée.

Une analyse complémentaire a été menée sur le jeu de données d'un opérateur afin de quantifier l'impact global d'un changement de version. L'évolution du logiciel peut en effet impacter l'ensemble des résultats. La version complémentaire RoadInspect évaluée est la version 4.83.1.0, la dernière version stabilisée et diffusée au moment de l'analyse.

Le même traitement statistique a été mené en considérant deux opérateurs fictifs, c'est à dire le même opérateur physique (fichiers fis identiques) avec des versions de RoadInspect différentes. Seuls les résultats recalés ont fait l'objet d'une analyse.

Les résultats de cette analyse sont disponibles dans le feuillet « Impact version RoadInspect ».

Ce changement de version RoadInspect pour cet opérateur a un impact sur les résultats, plus ou moins prononcé selon les descripteurs analysés. Si sur certains descripteurs, l'impact de ce changement de version est négligeable (largeur inter-Lanemark, Fissuration...), il peut être très significatif sur d'autres descripteurs (texture). Pour bon nombre de descripteurs, le niveau de dégradation très faible ne permet pas de quantifier l'impact du changement de version.

Cependant l'écart de reproductibilité obtenu est bien inférieur à l'écart de reproductibilité obtenu dans le cadre des essais croisés.

Cette analyse ne garantit pas une amélioration ou dégradation de l'écart de reproductibilité entre opérateurs dans le cas où l'analyse était menée avec la version 4.83.1.0 pour tous.

- Détermination des indicateurs

Dans le cadre de ces essais croisés, ont été évalués : uni longitudinal, uni transversal, macrotecture, détection du marquage, fissuration, arrachement.

Plusieurs constatations peuvent être formulées :

- Des défauts d'alignement des profils droit et gauche ont ponctuellement impacté le calcul d'un indicateur (ex. calcul de l'orniérage au centre de la voie au lieu de la bande droite). La mise à jour du logiciel RoadInspect a permis de corriger ce point.
- L'activation des filtres informatiques afin d'améliorer les images (par exemple : filtre AutomaticGainControl) pourrait influencer sur les valeurs mesurées.
- Le réseau retenu (autoroutier) est dans l'ensemble de bonne qualité, même s'il est qualifié de « dégradé » (cf. doc préparatoire). L'évaluation de certains indicateurs apparaît faible compte tenu de l'état des chaussées mesurées.

8 Conclusion générale

Dans le cadre du projet national DVDC (Durée de Vie des Chaussées), une campagne d'essais croisés a été conduite afin d'évaluer la qualité de mesure des capteurs LCMS (Laser Crack Measurement System) utilisés notamment lors de l'évaluation des réseaux routiers des sociétés d'autoroutes concédées.

Sur la base du plan d'expérimentation défini, des essais croisés ASFA ont été conduits le 24 mars 2021. Ce rapport propose une méthode d'analyse statistique selon la norme ISO 5725. Ce travail a nécessité le développement de programmes informatiques dédiés.

Le conditionnement des données mises à disposition par les opérateurs a été réalisé selon une procédure commune, développée dans le cadre de ces essais croisés.

Sur 79 descripteurs agrégés définis par le Cerema (liste en annexe), 39 analyses individuelles ont été réalisées, et regroupées dans 19 annexes.

Une analyse du changement de version de RoadInspect a également été menée afin de quantifier l'impact pour un opérateur.

La méthodologie développée pour ambition d'être appliquée à un plan d'expérimentation, impliquant notamment des phases de mesure de la répétabilité et de la reproductibilité. Dans le cadre de ces essais croisés, les conditions de répétabilité et de reproductibilité ne sont pas présentes pour l'ensemble des planches. La répétabilité et la reproductibilité sont minorées, voire nulle dans le cas de la répétabilité.

De plus, le domaine de validité se limite aux sections auscultées lors de ces essais croisés et représentatives d'un certain niveau de dégradation et de déformation d'état de surface. La transposition des analyses présentées à d'autres réseaux routiers n'a pas été évaluée.