

Projet National de recherche et développement

**RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE**

**Apport des appareils d'auscultation de type  
« scanner » pour la détection et la  
caractérisation en 3-D des déformations de  
chaussée routière**

**Auteurs – Organismes :**

Fabien Menant – Université Gustave Eiffel  
Jean-Marc Martin – Université Gustave Eiffel  
Baptiste Radde – Technologies Nouvelles  
Frédéric Sagnier – Technologies Nouvelles  
Yannick Kempf – CEREMA  
Sébastien Wasner – CEREMA  
Hervé Guiraud – CEREMA

**Thème de rattachement :**

Thème 2-2 : Caractérisation de l'état du réseau / Méthodes de  
mesure

Numéro de rapport (à établir par l'IREX)

N° lettre de commande : 103

Date : 03/02/2022

## Sommaire

<b>Sommaire .....</b>	<b>2</b>
<b>Table des figures .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Résumé .....</b>	<b>6</b>
<b>2 Introduction .....</b>	<b>7</b>
<b>3 Capacité de restitution des indicateurs usuels de déformation longitudinale des chaussées .....</b>	<b>8</b>
3.1 But de l'étude .....	8
3.2 Méthodologie suivie .....	8
3.3 Résultats sur des itinéraires-tests .....	12
3.4 Intérêt du travail réalisé .....	14
<b>4 Propositions de méthodes de détection et de caractérisation des déformations adaptées aux capacités de mesures des appareils de type « scanner » .....</b>	<b>14</b>
4.1 Objectifs des travaux .....	14
4.2 Hypothèses de travail .....	16
4.3 Construction et utilisation d'une nappe 3-D virtuelle .....	17
4.4 Méthodes d'analyse des déformations au moyen de descripteurs .....	20
4.4.1 Description de l'approche A .....	20
4.4.1 Description de l'approche B .....	26
4.4.1 Description de l'approche C .....	27
4.5 Méthodes d'analyse des déformations au moyen d'indicateurs .....	28
4.5.1 Indicateurs élémentaires des approches A et B .....	29
4.5.1 Indicateurs élémentaires de l'approche C .....	31
4.6 Application sur une surface virtuelle .....	31
4.6.1 Caractéristiques de la surface virtuelle de test .....	31
4.6.1 Application de l'approche A .....	33
4.6.2 Application de l'approche B .....	40
4.6.3 Application de l'approche C .....	42
<b>5 Ouverture sur une méthode d'analyse des déformations de surface opérationnelle depuis 2018 proposée par le Cerema .....</b>	<b>49</b>
5.1 Une surface de référence construite par agrégation de profils de référence .....	49
5.2 L'adaptation de la méthode de notation par bande d'onde .....	50
5.3 L'analyse spatiale pour caractériser l'état de la chaussée .....	51
5.4 Résultats opérationnels et perspectives .....	52
<b>6 Conclusion .....</b>	<b>53</b>
6.1 Bilan des travaux réalisés .....	53
6.2 Perspectives .....	54

## Table des figures

Figure 1. Aperçu du format des fichiers de mesure LCMS et MLPL .....	9
Figure 2. Correction par filtrage passe-haut du profil LCMS.....	9
Figure 3. Recalage spatial en translation des profils LCMS et MLPL .....	10
Figure 4. Effet du filtrage dans les très petites longueurs d'ondes du profil LCMS comparativement au profil MLPL .....	10
Figure 5. Notes et écarts de note entre LCMS et MLPL dans la bande GO sur un tronçon d'analyse ..	11
Figure 6. Notes et écarts de note entre LCMS et MLPL dans la bande MO sur un tronçon d'analyse .	11
Figure 7. Notes et écarts de note entre LCMS et MLPL dans la bande PO sur un tronçon d'analyse...	12
Figure 8. Distributions des écarts de notes entre le LCMS et le MLPL obtenues sur plusieurs itinéraires-tests .....	13
Figure 9. Caractéristiques principales de l'objet "nappe 3-D" .....	17
Figure 10. Exemple de surface générée depuis un profil longitudinal de base (en rouge).....	18
Figure 11. Exemples de défauts de type gonfle et bourrelet générés numériquement.....	18
Figure 12. Exemple de défauts de type ornières générés numériquement .....	19
Figure 13. Exemple d'un défaut de type affaissement en rive généré numériquement .....	19
Figure 14. Synthétique des approches méthodologiques proposées pour analyser les déformations .	20
Figure 15. Effet de la correction des gonfles par la règle de 50cm .....	22
Figure 16. Effet de la correction des ornières par la règle de 1.5m .....	23
Figure 17. Effet de la correction des affaissements en rive .....	24
Figure 18. Effet de la correction des défauts longitudinaux par la règle de 13m .....	25
Figure 19. Effet de la correction des défauts longitudinaux par la règle de 3m .....	27
Figure 20. Profil longitudinal de la chaussée et profils filtrés associés en PO, MO et GO .....	28
Figure 21. Exemple de maillage appliqué à la surface de chaussée.....	29
Figure 22. Schéma représentant la répartition des valeurs à traiter au sein de chaque maille (par exemple pour un calcul de volume) .....	30
Figure 23. Vue de la surface-test en perspective 3-D .....	32
Figure 24. Vue de la surface-test en mode plan.....	33
Figure 25. Carte du descripteur A1 .....	33
Figure 26. Carte du descripteur A2 .....	34
Figure 27. Carte du descripteur A3 .....	35
Figure 28. Carte du descripteur A4 .....	35
Figure 29. Carte du descripteur A5 .....	36
Figure 30. Carte du descripteur A6 .....	37
Figure 31. Vue de la nappe 3-D correspondant au descripteur A7 (nappe de rechargement).....	38
Figure 32. Carte du descripteur A7 .....	38
Figure 33. Représentation des indicateurs élémentaires pour l'approche A.....	39
Figure 34. Carte du descripteur B6 (règle 13m) .....	40
Figure 35. Carte du descripteur B7 (règle 3m) .....	41
Figure 36. Carte du descripteur B8.....	41
Figure 37. Indicateurs B6, B7 et B8 relatifs aux défauts longitudinaux dans l'approche B.....	42
Figure 38. Vue en 3-D du descripteur C1 .....	43
Figure 39. Carte du descripteur C1.....	43
Figure 40. Effet du filtrage en PO sur les défauts localisés (gonfles et bourrelets) en vue 3-D.....	44
Figure 41. Effet du filtrage en PO sur les défauts localisés (gonfles et bourrelets) en vue linéaire selon Y .....	44
Figure 42. Vue en 3-D du descripteur C2 .....	44
Figure 43. Carte du descripteur C2.....	45
Figure 44. Vue en 3-D du descripteur C3 .....	45
Figure 45. Carte du descripteur C3.....	46

Figure 46. Représentation des indicateurs élémentaires pour l'approche C.....	47
Figure 47. Représentation des notes en petites ondes pour les profils en long de la surface .....	47
Figure 48. Représentation des notes en moyennes ondes pour les profils en long de la surface.....	48
Figure 49. Représentation des notes en grandes ondes pour les profils en long de la surface.....	48
Figure 50. Exemple sur un profil théorique du profil de référence créé en PO .....	50
Figure 51. Impact du filtrage et du lissage sur un signal théorique (de haut en bas : profil théorique, profil après filtrage PO, résultat de l'intégration en énergie au pas de 50 cm, lissage de l'énergie) ...	51
Figure 52. Différentes phases d'analyse de l'uni longitudinal en petites ondes en surfacique (de haut en bas : énergie en PO au pas longitudinal de 50 cm, énergie en PO lissé à 1,5 m au pas longitudinal de 50 cm, analyse spatiale sur les PO, indicateur résultat c'est à dire les zones présentant des défauts significatifs d'uni en PO).....	52

## Liste des acronymes et abréviations

---

2-D, 3-D : 2 dimensions, 3 dimensions

APL : Analyseur de Profil en Long

DVDC : Durée de Vie des Chaussées

GO : Grandes Ondes

IQRN : Images Qualité du Réseau routier National

IRL : Indice de Reprofilage en Long

LCMS : Laser Crack Measurement System

LPC : Laboratoire des Ponts et Chaussées

MEC : Moyen d'Essais des Chaussées

MLPL : Multi-Profilomètre en Long

MO : Moyennes Ondes

NBO : Notation par Bandes d'Ondes NPO : Note Petites Ondes

NMO : Note Moyennes Ondes

NGO : Note Grandes Ondes

PO : Petites Ondes

PPS+ : Pavement Profile Scanner

QSPO : Qualité de Structure selon Petites Ondes

# 1 Résumé

---

## Résumé en français

L'arrivée sur le marché de systèmes de mesure automatisés de type « scanner », c'est-à-dire des systèmes capables de fournir des données très denses sur l'ensemble de la voie de mesure en un seul passage et à grand rendement ouvre de nouvelles perspectives en auscultation de chaussée. La plupart de ces appareils sont de plus en plus utilisés pour effectuer des relevés de dégradations automatisés mais certains d'entre eux sont également capables de délivrer des informations en lien avec le profil longitudinal et transversal de la chaussée. Les variations significatives de profil, que l'on appellera déformations, sont traditionnellement détectées et caractérisées par des relevés effectués sur quelques « traces » ou « lignes ». Comme l'utilisation des appareils de type scanner offre une plus grande densité de points de mesure couvrant l'ensemble de la chaussée, il est logique d'envisager de nouvelles méthodes d'analyse des déformations qui profitent des capacités de mesures surfaciques de ce type d'appareils. Après s'être assuré que les appareils de type scanner étaient capables de restituer des valeurs d'indicateurs « standards » avec un niveau de précision voisin de celui offert par les appareils de référence, cette étude s'est focalisée sur le développement et la mise en application de plusieurs approches méthodologiques pour analyser les déformations de façon surfacique.

## Abstract

Pavement measuring systems based on « scanner » technology opens up new opportunities in pavement monitoring as they are able to provide very dense data over the entire driving lane with a single survey and at high speed. Most of these devices are increasingly used for automated distress survey but some are also able to give information related to the longitudinal and transverse profile of the road. A road deformation that corresponds to significant profile variations is commonly detected and characterized since surveys done on a few 'lines'. As the use of scanner-type equipment offers a greater density of measurement points that covers the entire lane, it is logical to consider new methods for the pavement deformation analysis that take advantage of the ability of such equipment. After having ensured that scanner-type equipment was able to provide values of "standard" indicator with a correct level of accuracy by referring to usual devices, this study focused on the development and the application of several methodological approaches which aims to analyze deformations on the entire road surface.

## 2 Introduction

Depuis environ 5 ans, plusieurs entreprises françaises privées et publiques se sont dotées de matériels d'auscultation de type « scanner » ou « multipoints » ou « multilignes », c'est-à-dire des systèmes capables de réaliser une multitude de mesures de façon continue (très haute fréquence spatiale) sur une voie de circulation et en un seul passage. Ces matériels, dont les plus connus et les plus répandus sont pour le moment le LCMS et le PPS+, se distinguent donc des appareils traditionnels pour la mesure des déformations qui sont davantage des systèmes « monolignes » (voire bi-traces ou tri-traces pour le cas des appareils de mesure d'uni longitudinal). Par ailleurs, là où les appareils de type scanner sont capables d'ausculter en même temps les déformations transversales et les déformations longitudinales (ainsi que les dégradations pour certains), les appareils traditionnels ne sont utilisés que pour l'une ou l'autre de ces applications. Il n'en reste pas moins que ces derniers constituent les matériels de référence sur le marché français et qu'il est donc indispensable d'évaluer l'apport des nouveaux appareils par rapport à ceux-ci. Dans ce cadre, le groupe de travail DVDC s'est attaché à travailler sur deux axes de travail concernant l'usage des appareils scanner pour la mesure des déformations de chaussée routière.

Le premier axe de travail a consisté à comparer les informations délivrées par les appareils multipoints relativement aux appareils traditionnels sur quelques sections-tests du département de l'Eure, partenaire du projet. Bien que ce travail ait probablement été réalisé au sein de chaque entreprise possédant ce type d'appareils, il nous a semblé utile de mener à bien cette action et de présenter les résultats dans ce livrable pour parfaire le niveau de connaissance de l'ensemble de la profession sur ces appareils d'une part et pour identifier des caractéristiques de mesure propres à ces appareils d'autre part (ex : centrage des données sur la voie de circulation, capacité à restituer fidèlement les indicateurs d'analyse usuels, etc.). Il est important de préciser au lecteur que seules les données provenant de l'appareil LCMS ont pu faire l'objet d'une analyse dans cette action, faute de disposer de mesures issues d'autres types de matériels sur les sections considérées.

Le second axe de travail est davantage prospectif puisqu'il s'intéresse à de nouvelles méthodologies d'exploitation des grands ensembles de données délivrés par les appareils de type scanner. Il est en effet naturel d'envisager des méthodes qui tirent parti des capacités de relevés des appareils scanner et en particulier la forte densité de points de mesure répartis sur l'ensemble de la voie de la circulation. Ce travail a donc consisté à proposer de nouvelles approches pour caractériser les déformations de chaussée par exemple à travers de nouveaux descripteurs et/ou de nouveaux indicateurs en se basant sur une représentation surfacique ou représentation en « 2-D » ; ces approches sont donc en rupture par rapport aux méthodologies existantes qui reposent sur des analyses « linéaires » (*i.e.* sur une seule ligne de mesure). Par ce travail, on espère ainsi proposer une nouvelle perception des déformations de chaussée en essayant de se raccorder dans la mesure du possible aux informations communément utilisées par la profession pour déterminer l'état du réseau routier.

Les travaux réalisés par le groupe de travail « déformations » ont été menés en parallèle à ceux du groupe travaillant sur l'analyse des dégradations de chaussée issues des mêmes appareils scanner. La combinaison de ces travaux est susceptible d'alimenter une autre action consistant à proposer de nouveaux indicateurs relatifs à l'état structurel des chaussées.

## 3 Capacité de restitution des indicateurs usuels de déformation longitudinale des chaussées

### 3.1 But de l'étude

Les appareils d'auscultation de type scanner (LCMS ou PPS+) sont des systèmes connus pour offrir des niveaux de performance très intéressants pour les relevés de dégradations automatisés. Ces systèmes sont également capables de fournir des informations en lien avec les déformations des chaussées puisqu'ils peuvent restituer des profils transversaux et longitudinaux ; ces derniers sont extraits de « nuages de points » à très haute densité spatiale (certains systèmes peuvent fournir des ensembles de points espacés d'un ou deux millimètres). Les appareils de type scanner peuvent donc délivrer des profils de chaussée de façon quasi-continue, aussi bien dans le sens transversal que longitudinal, chose que ne peuvent pas faire les appareils d'auscultation traditionnels. Avant de développer de nouvelles méthodes d'analyse des déformations adaptées à l'exploitation de cette forte densité spatiale, il convient de s'assurer que ces systèmes de mesures offrent un niveau de performance similaire aux appareils traditionnels dans le champ de la méthodologie actuelle. Ainsi, dans le cadre de ce projet, on s'assure que les appareils de type scanner considérés dans l'étude sont à même de fournir des valeurs d'indicateurs de déformation qui soient proches de celles provenant des appareils traditionnels. On précise qu'il ne s'agit pas d'un travail dont le but serait de qualifier tel ou tel appareil mais bien d'avoir une connaissance globale des aptitudes de ces appareils dans le champ des indicateurs usuels sur la base d'une analyse comparative sur quelques sections-tests.

### 3.2 Méthodologie suivie

La démarche suivie pour réaliser ce travail repose sur une analyse comparative entre les indicateurs fournis par les appareils de type scanner et ceux provenant d'appareils traditionnels. Il était initialement prévu de travailler à la fois sur les profils transversaux et longitudinaux en considérant l'appareil LRMS comme matériel d'auscultation traditionnel pour la mesure des défauts en sens transversal et l'appareil MLPL pour le sens longitudinal. Malheureusement, faute de disposer de mesures LRMS sur les sections-tests, l'étude s'est resserrée sur une analyse comparative des profils longitudinaux dans le domaine de l'uni sur la base d'une analyse des indicateurs NBO (Notation par Bandes d'Ondes) depuis des mesures issues du MLPL et d'un appareil LCMS. Ces mesures ont été réalisées, avec quelques mois d'intervalle entre les deux types d'appareil, sur quelques sections-tests du réseau géré par le Conseil Départemental de l'Eure (27).

La restitution des indicateurs NBO pour la caractérisation de l'uni longitudinal résulte du processus suivant :

- 1- Détermination du signal profil de chaussée sur la section-test depuis les mesures réalisées par l'appareil d'auscultation (LCMS et MLPL) ;
- 2- Calcul des indicateurs NBO depuis le signal profil.

Pour cette étude, chacun des deux appareils utilise différents outils de calcul des indicateurs NBO : un outil « de référence » appelé APL2015 qui est lié aux mesures MLPL et un autre outil qui est lié aux mesures LCMS. On rappelle que la méthodologie de calcul des NBO peut être connue de tous car elle est mentionnée dans la doctrine technique française et européenne [1,2]. Cela étant, en plus des différences pouvant exister entre les signaux profils délivrés par les deux appareils (l'élaboration de ces signaux est à la charge des fabricants d'appareils), l'implémentation logicielle des calculateurs NBO, si elle n'est pas parfaitement exécutée, peut aussi conduire à des écarts dans les valeurs d'indicateurs.

En conséquence, une vérification des outils de calcul des NBO a été réalisée en premier lieu afin d'isoler les écarts qui seraient uniquement dus aux réponses des appareils d'auscultation<sup>1</sup>.

Par la suite, afin de pouvoir comparer rigoureusement les informations provenant des appareils, une analyse comparative a été réalisée entre les deux types d'appareils dans le champ de la NBO. Pour cela, la méthode de travail a consisté à :

- 1- Isoler les fichiers de mesure de chacun des appareils se rapportant à la même piste (les fichiers de mesure du LCMS sont au format ERD tandis que les fichiers de mesure du MLPL sont au format MEC).

<pre> Mesure du: 27032019 à 70.0km/h Source:Profil MPL Correction température:NON Début:4.500;Fin:18898.528  abscisse;Gauche;Droite 4.5;0.420888858371311;-0.24266628625658; 4.55;0.420888858371311;-0.24266628625658; 4.6;0.225247623352778;0.0881143304563704; 4.65;0.104360576876167;-0.450734692670051; 4.7;0.1648995186286;-0.440412658862967; 4.75;-0.196640620706401;-0.353844148256046; 4.8;-0.447377213366302;-0.212703344149468; 4.85;-0.688869782251024;-0.126819125432817; </pre>	<pre> ERDFILEV2.00 1, 437793, -1, 1, 5, 0.050000, -1, TITLE LCMS Elevation profile SHORTNAM RElev UNITSNAM m XLABEL Distance XUNITS m END 0.000000 -0.000440 -0.000507 -0.000360 -0.000154 0.000044 0.000220 0.000383 </pre>
---	--

Figure 1. Aperçu du format des fichiers de mesure LCMS et MLPL

- 2- Choisir une même trace de mesure pour les deux appareils (gauche ou droite).
- 3- Appliquer un filtrage passe-haut au profil LCMS de sorte à supprimer les longueurs d'ondes supérieures à 100m (cette opération est automatique avec les fichiers MLPL traités dans APL2015).

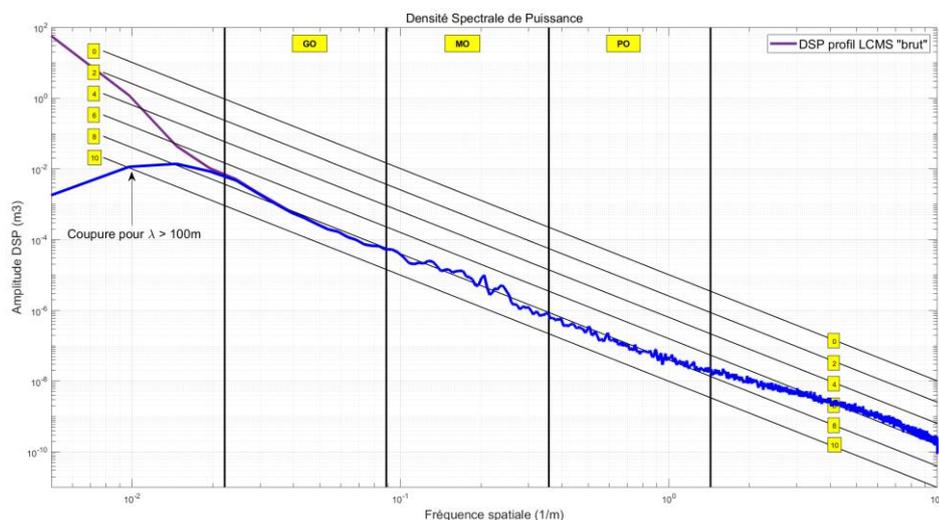


Figure 2. Correction par filtrage passe-haut du profil LCMS

- 4- Recaler spatialement le profil du LCMS sur celui du MLPL par des tronçons de 1000m (cette longueur permettant de se focaliser sur des opérations de correction en translation et de minimiser les effets de distorsion du type « élastique ») ; le recalage en abscisse curviligne est réalisé en maximisant la fonction d'intercorrélation des signaux profils.

<sup>1</sup> Cette vérification a été réalisée en soumettant un même signal profil aux calculateurs NBO et en considérant le logiciel APL2015 comme outil de référence. Les résultats de cette opération ne sont pas reportés dans ce livrable.

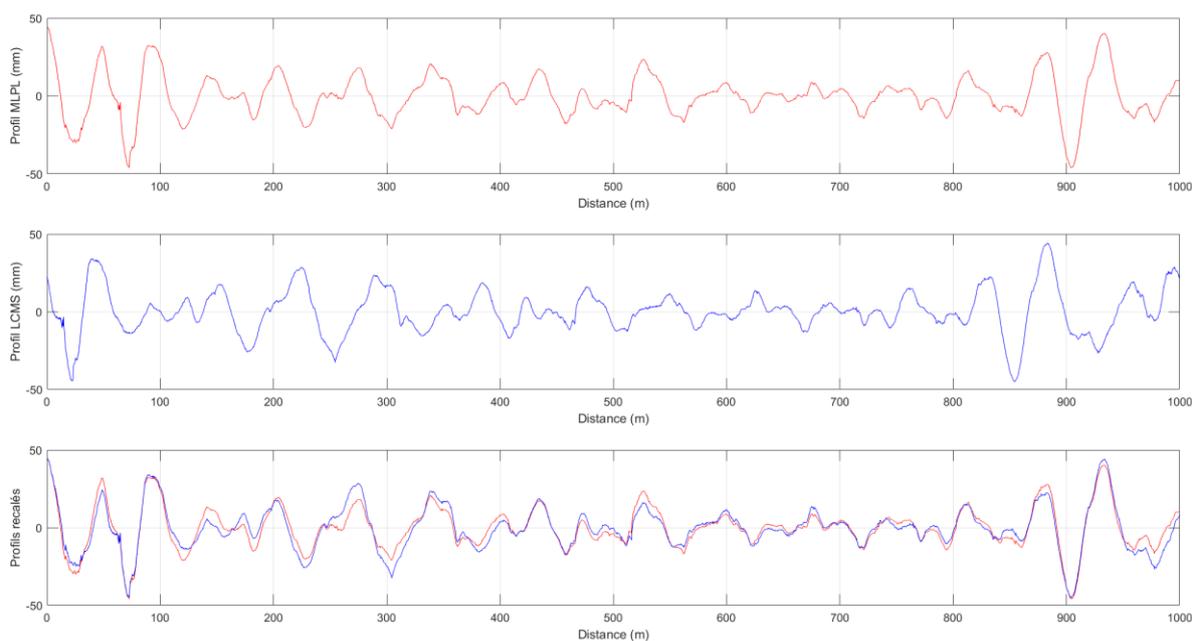


Figure 3. Recalage spatial en translation des profils LCMS et MLPL

- 5- Appliquer un filtrage passe-bas au profil LCMS de sorte à reproduire le filtrage « naturel » de l'APL en supprimant les longueurs d'ondes inférieures à 0.35m ; ce filtrage, appliqué également au profil MLPL de façon automatique permet de tendre vers la réponse de l'appareil APL qui constitue la référence dans le domaine.

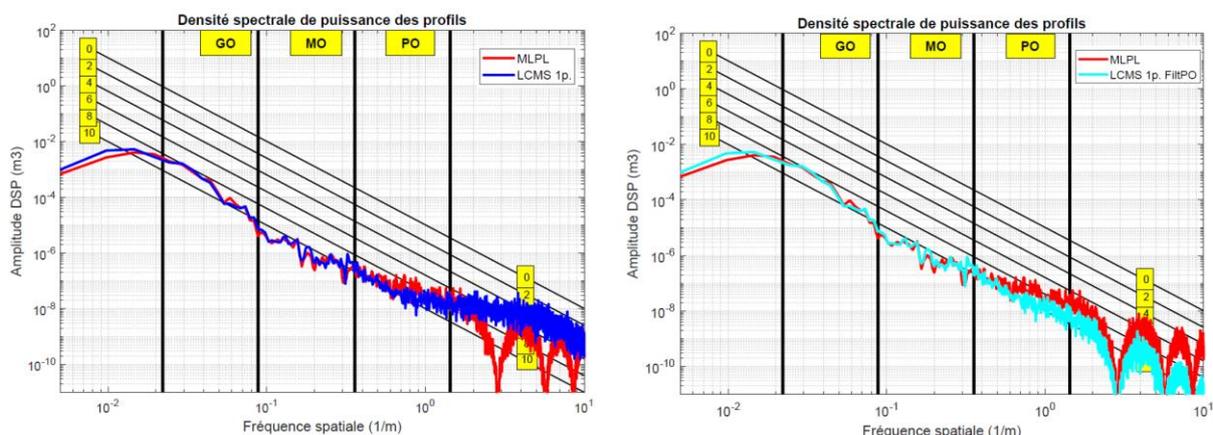


Figure 4. Effet du filtrage dans les très petites longueurs d'ondes du profil LCMS comparativement au profil MLPL

- 6- Calculer les notes GO, MO et PO sur l'ensemble des segments constituant le tronçon de 1000m pour les deux types d'appareils et relever les écarts de notes pour chacun des segments relatifs à la bande d'ondes considérée (200m pour les GO, 100m pour les MO et 20m pour les PO).

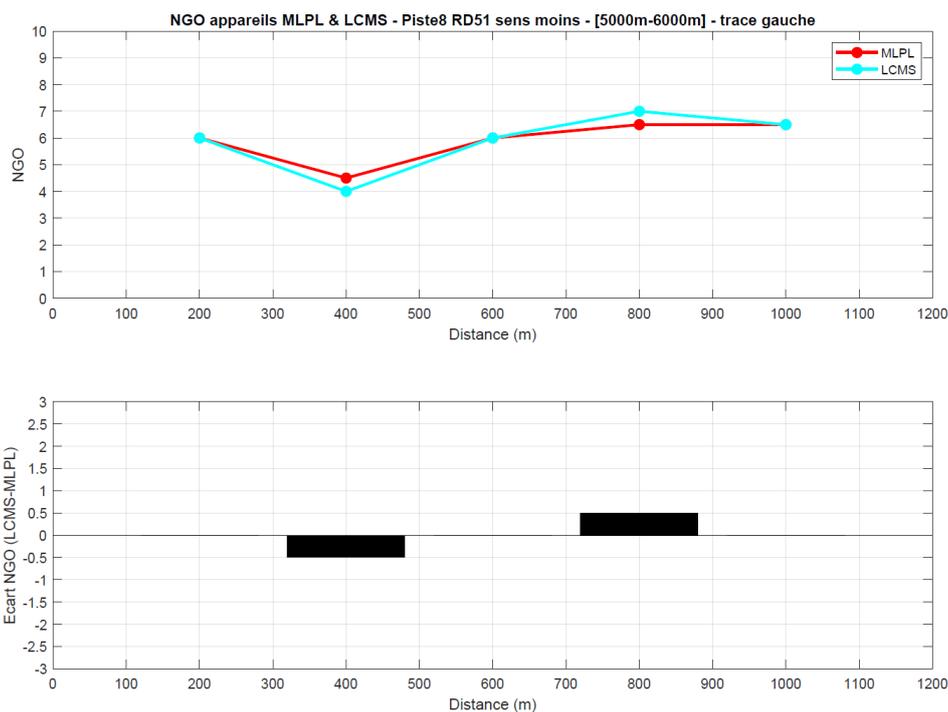


Figure 5. Notes et écarts de note entre LCMS et MLPL dans la bande GO sur un tronçon d'analyse

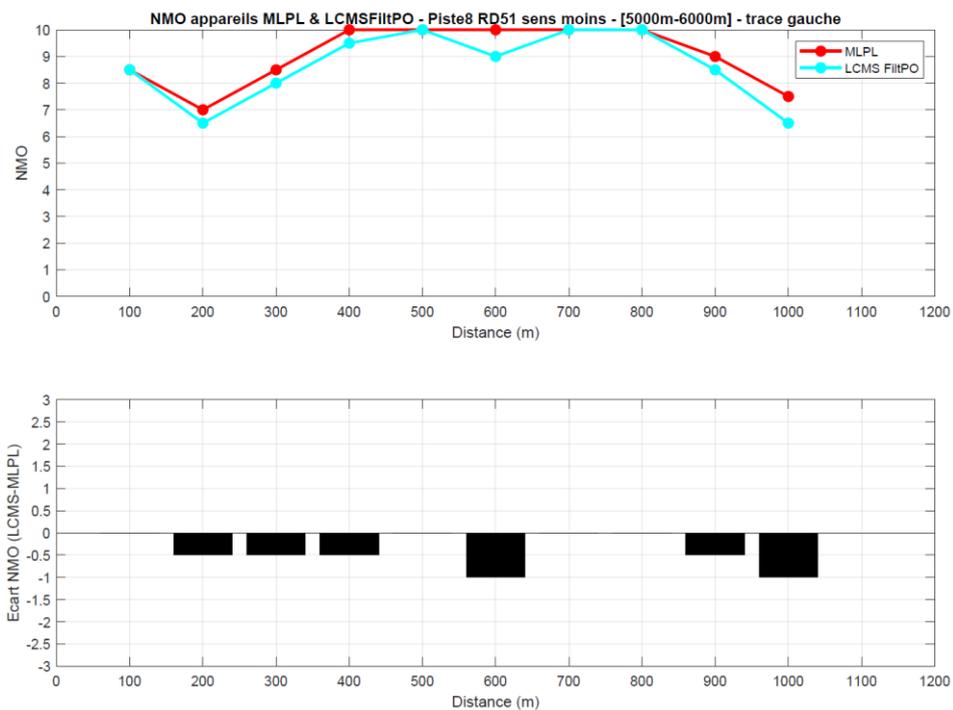


Figure 6. Notes et écarts de note entre LCMS et MLPL dans la bande MO sur un tronçon d'analyse

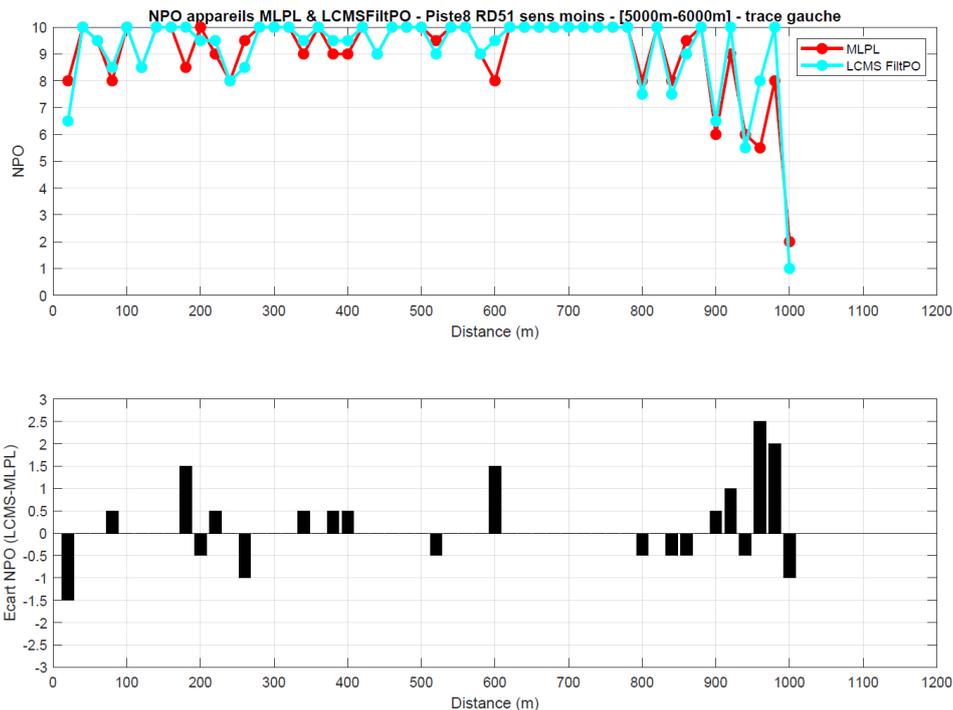


Figure 7. Notes et écarts de note entre LCMS et MLPL dans la bande PO sur un tronçon d'analyse

- 7- Ecartier de l'analyse les segments qui contiennent une singularité (ex : giratoire, agglomération, dépassement d'un véhicule lent, etc.). Ce travail est réalisé depuis l'observation des images d'environnement prises lors des relevés.
- 8- Rassembler, sous forme de distributions, les écarts de notes constatés pour l'ensemble des tronçons en fonction de la bande d'ondes et de la trace de mesure.

Cette démarche, présentée étape par étape, a été construite dans le but de pouvoir se faire un avis statistique sur les réponses des deux types d'appareils dans la NBO et d'identifier d'éventuelles particularités auxquelles il faudrait tenir compte pour la suite des travaux (réflexion sur de nouveaux indicateurs). Elle n'a pas pour ambition de qualifier un appareil par rapport à un autre ce qui nécessiterait probablement une approche méthodologique différente appliquée à des mesures en environnement davantage contrôlé.

### 3.3 Résultats sur des itinéraires-tests

La méthodologie précédente a été appliquée sur plusieurs itinéraires-tests du CD27. Il s'agit de :

- Piste 3 : RD133 sens - (De PR49 + 257 à PR27 + 931) ;
- Piste 4 : RD133 sens + (De PR27 + 931 à PR49 + 257) ;
- Piste 7 : RD 51 sens + (De PR15 + 913 à PR 24 + 214) ;
- Piste 8 : RD 51 sens - (De PR 24 + 214 à PR15 + 913) ;

L'ensemble représente un linéaire d'environ 50km auquel il faut retirer les sections comportant des traversées d'agglomération, des giratoires, etc. Au final, l'étude se base donc sur un peu plus de 30km de mesures utiles.

La distribution des écarts de note en fonction des bandes d'ondes et des traces est donnée ci-après.

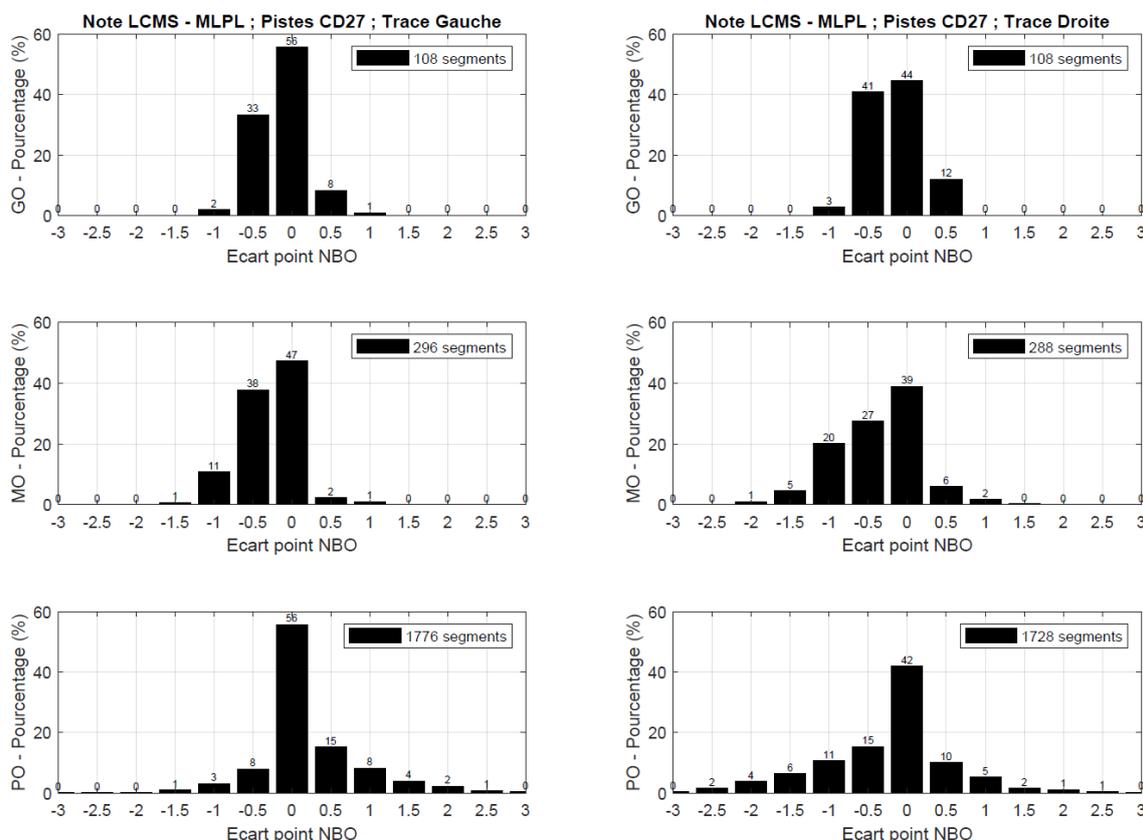


Figure 8. Distributions des écarts de notes entre le LCMS et le MLPL obtenues sur plusieurs itinéraires-tests

Dans l'ensemble, les distributions sont centrées autour des écarts nuls ce qui témoigne de l'absence de biais systématiques dans le champ de l'indicateur NBO. On note également que les distributions s'élargissent au fur et à mesure que la bande de longueurs d'ondes à observer diminue. On peut expliquer ce constat par le fait que plus l'on tend vers des petites longueurs d'ondes, plus les défauts de planéité sont susceptibles d'être localisés. En conséquence, les décalages de trace de mesure entre deux relevés, même s'ils sont légers, désavantagent en premier lieu l'analyse en PO, puis celle en MO.

Par ailleurs, les distributions pour la trace droite sont un peu plus dispersées que pour la trace gauche. En général, la trace droite étant plus dégradée que la trace gauche (donc une analyse fondée sur des notes plus faibles), il est normal d'observer une allure statistique légèrement différente.

Pour la bande GO, la plupart des écarts sont compris dans l'intervalle  $[-0.5 \text{ pt} ; 0.5 \text{ pt}]$ . Il est possible que le LCMS soit davantage sensible à des défauts de type mouvements de terrain par rapport au MLPL. Il sera intéressant de confirmer ou pas ce comportement lors d'essais plus poussés ou dans le cadre d'une étude de qualification.

Pour la bande MO, les écarts sont en général inférieurs à 1pt ; les écarts non nuls tendent davantage vers des valeurs négatives ce qui signifie une note LCMS inférieure à celle du MLPL.

Pour la bande PO, 90% des écarts observés dans la trace gauche et 83% dans la trace droite sont inférieurs ou égal à 1pt. Comme dit précédemment, les erreurs de trace (*i.e.* décalage latéral des points de mesure au sol) rendent plus difficiles les comparaisons entre appareils dans cette bande et contribuent donc à générer des écarts.

### 3.4 Intérêt du travail réalisé

À l'échelle du signal, cette étude a montré la nécessité de filtrer les profils LCMS dans les très grandes ondes (à 100m) et dans les très petites ondes (filtrage type APL) pour s'approcher de ceux issus du MLPL (eux-mêmes étant calés au plus près de ceux de l'APL).

À l'échelle de l'indicateur, les résultats obtenus sur les itinéraires-tests du CD27 montrent une tendance statistique qui permet de s'assurer que les appareils de type LCMS sont capables de restituer les indicateurs usuels de déformation longitudinale (NBO). Même si le travail fourni dans cette partie n'apporte pas en soit de nouveautés par rapport aux méthodes d'analyse des déformations, il permet d'envisager, par exemple, une application de la méthode NBO sur des traces multiples de sorte à étendre l'obtention de ce type d'indicateur sur une surface complète de chaussée (et non plus sur deux ou trois traces comme c'est le cas présentement).

On rappelle à nouveau que cette étude n'a pas pour but de qualifier un appareil en particulier. Il faudrait d'ailleurs pour cela travailler dans un environnement de mesure beaucoup plus contrôlé (de sorte à maîtriser davantage les erreurs de trace) et faire appel à des analyses plus poussées à l'échelle du signal (ex : analyse en fréquences). On rappelle également que ce travail n'a pas pu être réalisé pour le cas des déformations transversales.

## 4 Propositions de méthodes de détection et de caractérisation des déformations adaptées aux capacités de mesures des appareils de type « scanner »

Les appareils scanner sont capables de fournir, en un seul relevé, des mesures très denses sur l'ensemble de la surface d'une chaussée. Cette densité de points de mesure est un atout que n'ont pas les appareils d'auscultation traditionnels puisque ces derniers restituent au mieux trois lignes de mesures dans le sens longitudinal (au centre de la voie ainsi que dans les bandes de roulement gauche droite) et des lignes espacées d'un mètre dans le sens transversal. Les méthodologies actuelles pour détecter les déformations, les caractériser et les localiser ont été élaborées de sorte à tenir compte du niveau de précision des appareils de l'époque ainsi que de plusieurs autres facteurs comme le pas d'échantillonnage, la vitesse d'exécution, la manœuvrabilité sur le terrain, etc. Comme les appareils de type scanner constituent une forme de saut technologique vis-à-vis des appareils d'auscultation traditionnels, il est naturel d'envisager de nouveaux concepts méthodologiques pour analyser les déformations ceux-ci pouvant aussi bien porter sur la surveillance des réseaux routiers que sur des études de plus faible échelle (ex : diagnostic d'une section).

### 4.1 Objectifs des travaux

Les travaux réalisés dans le groupe de travail DVDC avaient pour but de proposer un ou plusieurs concepts méthodologiques qui tiennent compte des avantages offerts par les appareils de type scanner en particulier par rapport à la densité de points de mesures pour analyser les déformations à la surface des chaussées. À notre connaissance, très peu de travaux ont jusqu'alors été menés sur ce sujet aussi bien au niveau national qu'international<sup>1</sup> ; le groupe de travail est alors parti d'une « page blanche ». Dans ce contexte, il a organisé ses travaux de la façon suivante :

---

<sup>1</sup> Le groupe de travail n'a pas mené un état de l'art rigoureux sur ce point mais s'est basé sur les retours d'expériences des possesseurs des appareils LCMS et de leurs connaissances techniques via les informations fournies par le fabricant.

1. Identification des éléments préparatoires à l'application d'une méthode d'analyse des déformations concernant la mise en forme des données recueillies *in situ* ;
2. Proposition d'un ou plusieurs concepts méthodologiques permettant de procéder à une analyse et à une représentation surfacique des déformations ;
3. Application du ou des concepts méthodologiques sur des échantillons de sorte à illustrer le type de résultats obtenus.

Les nouveaux concepts méthodologiques considérés dans ce projet sont susceptibles de répondre à plusieurs attentes dont certaines ne peuvent pas être couvertes par les pratiques actuelles :

■ **Considérer des défauts sur l'intégralité de la surface de chaussée et non plus uniquement sur certaines zones localisées (ex : bandes de roulement)**

→ Gain attendu : nouvelle perception spatiale de l'état de surface de la chaussée ;

■ **Combiner les informations de déformations longitudinales et transversales**

→ Gain attendu : utilisation d'indicateurs plus synthétiques et moins nombreux qui portent à la fois des informations sur l'état transversal et longitudinal de la chaussée

■ **Améliorer la détection et la caractérisation de déformations depuis l'exploitation d'un seul relevé**

→ Gains attendus :

- Des défauts ne peuvent plus être « évités » à cause du nombre limité de traces de mesures (ex : défauts situés près des rives) ;
- Des défauts peuvent être mieux décrits spatialement (ex : flaches) ;
- Des défauts peuvent être décrits et quantifiés en 3D (*i.e.* en volume).

■ **Observer de nouvelles formes de pathologies ou de nouveaux modes d'expression de pathologies**

→ Gains attendus :

- Distinction des phénomènes de fatigue ;
- Propagation spatiale des déformations entre deux relevés périodiques.

■ **Renforcer les informations utiles pour la préparation de certains types de travaux d'entretien**

→ Gain attendu : estimer des volumes de rechargement

Les réflexions et les développements menés dans DVDC ont été construits autour de ces attentes. La capacité de pouvoir retrouver les indicateurs usuels depuis une nouvelle méthodologie de traitement ou du moins la capacité de pouvoir lier ces indicateurs avec de nouveaux peut également être une attente des gestionnaires. En effet, on conçoit aisément le besoin d'assurer une certaine continuité dans le suivi des déformations quel que soit le type d'appareils utilisé du moins pendant une période permettant de se familiariser avec de nouveaux descripteurs/indicateurs. De futures discussions avec des gestionnaires permettront de savoir si cette attente est fondée ou s'ils sont d'ores et déjà prêts à adopter intégralement de nouveaux indicateurs.

Enfin, on rappelle que les travaux menés dans le projet DVDC s'inscrivent dans un cadre de recherche. Ils reposent ainsi sur un certain nombre d'hypothèses et ne constituent pas une quelconque doctrine technique. Ils pourraient être néanmoins repris et développés ultérieurement dans un cadre plus opérationnel.

## 4.2 Hypothèses de travail

Les concepts méthodologiques proposés ci-après ont été développés en vue d'une application première sur les réseaux routiers « structurants », allant des autoroutes aux routes principales départementales. L'usage des appareils de type scanner (ex : LCMS) est en effet pour l'instant réservé à ce type de réseaux ; il concerne le relevé des déformations mais également (et surtout) les relevés de dégradations.

Par ailleurs, les développements présentés dans ce livrable s'inscrivent principalement dans une logique de surveillance des réseaux mais des ouvertures vers des activités de diagnostic sont tout à fait réalisables.

Pour ces travaux, l'objet de départ sur lequel va s'appliquer les méthodes de traitement est un nuage de points espacés à pas fixes ; ce nuage dessine les contours d'une nappe 3-D qui est assimilée à la surface de chaussée. On considère que ce nuage de points peut être formé par l'assemblage des données brutes provenant des appareils scanner. Des échanges avec des possesseurs d'appareils ont montré que la reconstruction de la surface de chaussée n'était pas une fonction de « base » parmi les possibilités de traitement offertes par le logiciel du fabricant et qu'elle n'était pas non plus une opération triviale à réaliser depuis les fichiers de mesure bruts. Pour le cas des LCMS, les données de sortie sont en effet présentées soit longitudinalement soit transversalement ; il n'existe pas de format de fichier qui combine « méthodiquement » l'ensemble de ces données<sup>1</sup>. De façon native, le LCMS fonctionne selon deux demi-plans longitudinaux : les mesures peuvent être automatiquement recalées les unes aux autres dans un demi-plan gauche et dans un demi-plan droit mais la jonction entre ces demi-plans peut être difficile à réaliser *a priori*. On rappelle que l'appareil LCMS est physiquement constitué de deux têtes de mesure placés à gauche et à droite du véhicule-support ce qui peut expliquer l'observation précédente.

La problématique concernant la géolocalisation (dans le sens longitudinal et transversal) des points constituant la nappe 3-D n'a pas été abordée dans ces travaux.

Pour la suite, nous avons considéré que l'objet nappe 3-D représentant la surface de chaussée sera fourni par l'entreprise ayant réalisée les relevés car c'est elle qui maîtrisera les caractéristiques de l'appareil utilisé et des données de sortie. Cette nappe sera débarrassée, par des moyens de filtrage adéquats, des attributs géométriques que l'appareil serait potentiellement capable de relever : la pente de la chaussée (nous avons mentionné dans le chapitre 3 la capacité du LCMS à restituer les très grandes ondes), le dévers et pour des chaussées plus anciennes, le bombement. Les défauts de planéité à analyser doivent en effet correspondre uniquement à des déformations et non pas à des mouvements naturels de terrain ou à des attributs géométriques volontairement appliqué lors de la construction.

Enfin, la surface de chaussée reconstituée doit être correctement positionnée et alignée par rapport à la voie de circulation : alignement sur le marquage central sur le côté gauche et sur le marquage latéral ou en bord de chaussée sur le côté droit (la surface ne doit pas intégrer les accotements). On peut envisager, par la suite, que cette tâche soit du ressort du mesureur.

---

<sup>1</sup> Le format « LAS » est celui qui se rapprocherait le plus du format souhaité mais les données ne sont pas organisées spatialement ce qui rend difficile l'application d'une méthode d'analyse à ce stade.

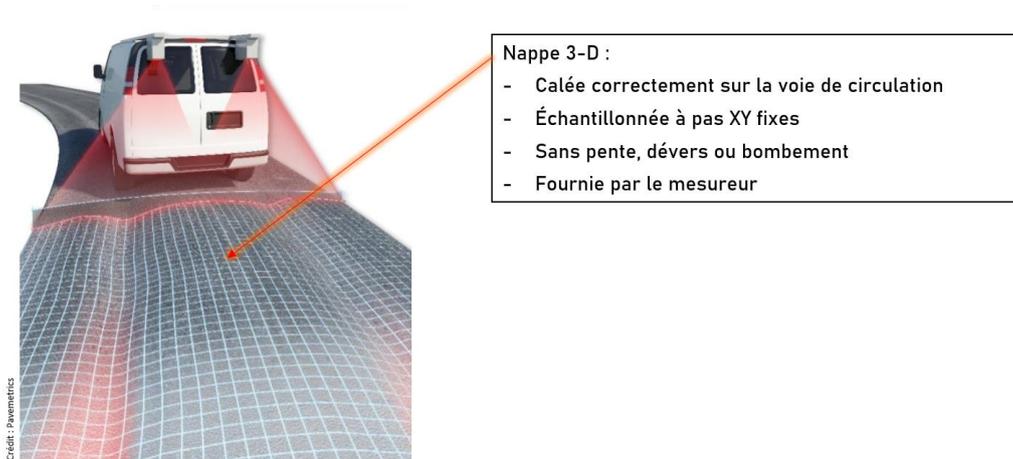


Figure 9. Caractéristiques principales de l'objet "nappe 3-D"

### 4.3 Construction et utilisation d'une nappe 3-D virtuelle

Pour les raisons évoquées dans le chapitre 4.2 concernant la difficulté à construire rapidement des nappes 3-D représentant la surface de la chaussée depuis des mesures LCMS, les développements méthodologiques sur l'analyse des déformations ont été appliqués sur des surfaces simulées par ordinateur (surfaces virtuelles).

Une surface virtuelle représente une section de chaussée en alignement droit de 200m en longueur (direction Y) et 3.5m en largeur (direction X). Elle est constituée d'un ensemble de points qui sont espacés les uns des autres de 5cm en X et Y (pour rappel, le pas de 5cm est celui qui est couramment utilisé pour représenter les profils en long). La longueur de 200m permet de calculer au moins un segment dans la bande GO. Chaque point de la surface est spatialement repéré par des coordonnées (X ; Y), le point (0 ; 0) étant situé à l'abscisse curviligne 0 et sur le côté le plus à gauche de la chaussée. Une troisième dimension (Z) correspond à l'élévation de la surface ce qui fait que chaque point de la surface virtuelle peut-être défini par un triplet (X ; Y ; Z).

Les surfaces virtuelles ont été construites en procédant de la façon suivante :

1/ Elaboration d'un « profil de base » longitudinal de longueur 200m, placé en 0 sur l'axe X (extrémité gauche de la surface). Ce profil de base, échantillonné à 5cm, correspond à un profil réaliste en termes d'uni, c'est-à-dire présentant des défauts qui soient cohérents en amplitude vis-à-vis des 3 bandes d'ondes (GO, MO et PO).

2/ Depuis le profil de base, créer des profils longitudinaux voisins et les positionner tous les 5 cm selon l'axe X jusqu'à atteindre la largeur totale voulue. Chaque profil est légèrement bruité par rapport à son voisin pour obtenir une cohérence spatiale en termes de NBO. À ce stade, une première surface virtuelle est constituée.

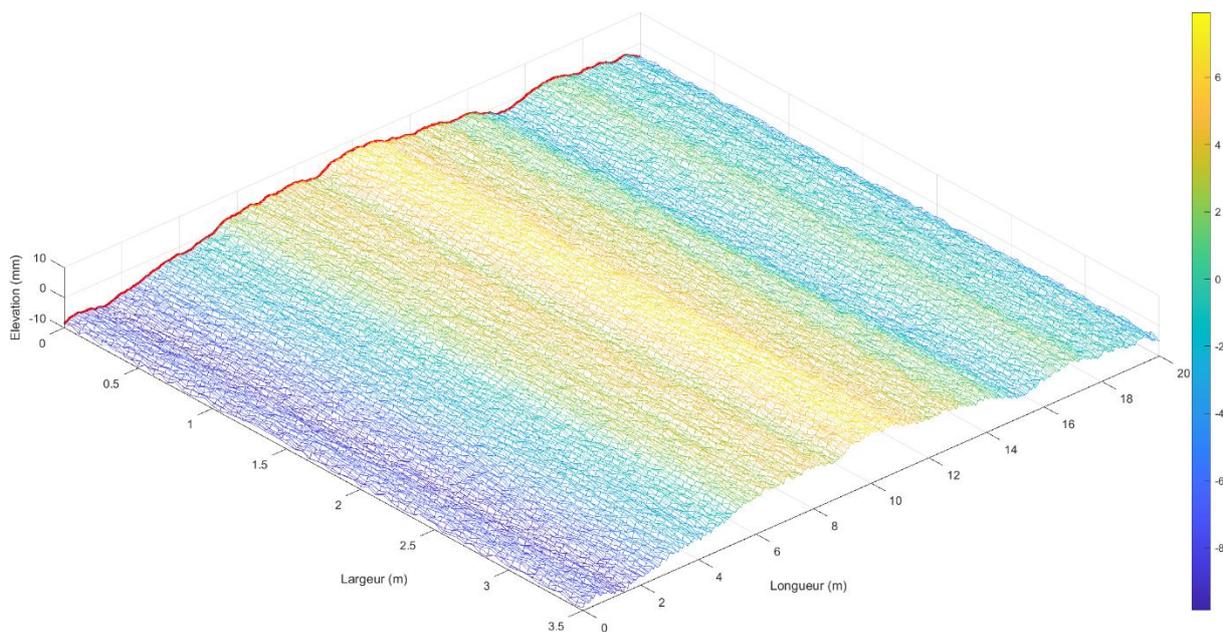


Figure 10. Exemple de surface générée depuis un profil longitudinal de base (en rouge)

3/ Ajouter à la surface précédente des défauts « ponctuels » ou ayant une composante transversale (dans la direction X). Les défauts considérés sont les suivants :

- Gonfles et bourrelets (défauts dits ponctuels dans ce rapport) ;
- Ornières ;
- Affaissements en rive.

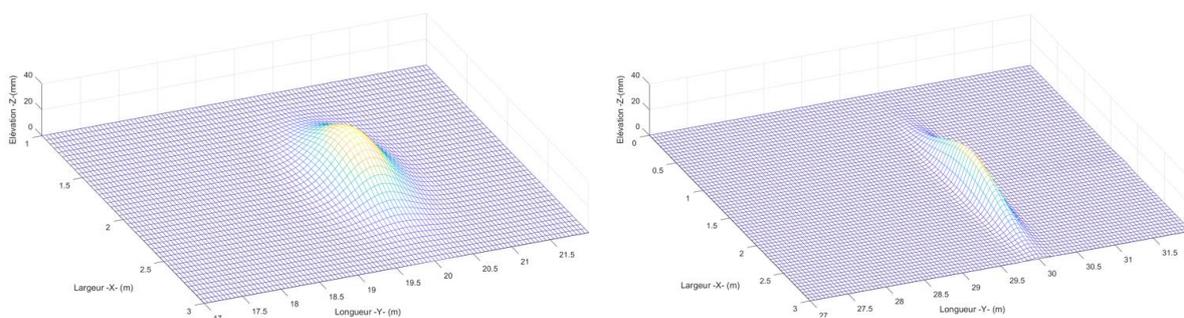


Figure 11. Exemples de défauts de type gonfle et bourrelet générés numériquement

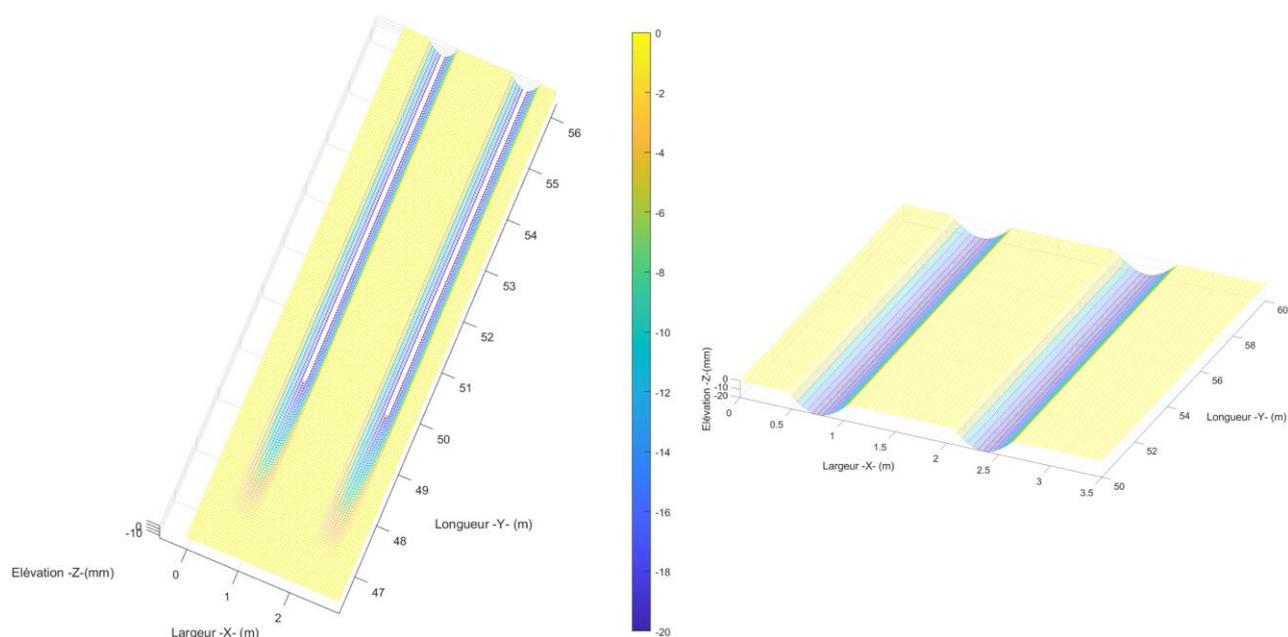


Figure 12. Exemple de défauts de type ornières générés numériquement

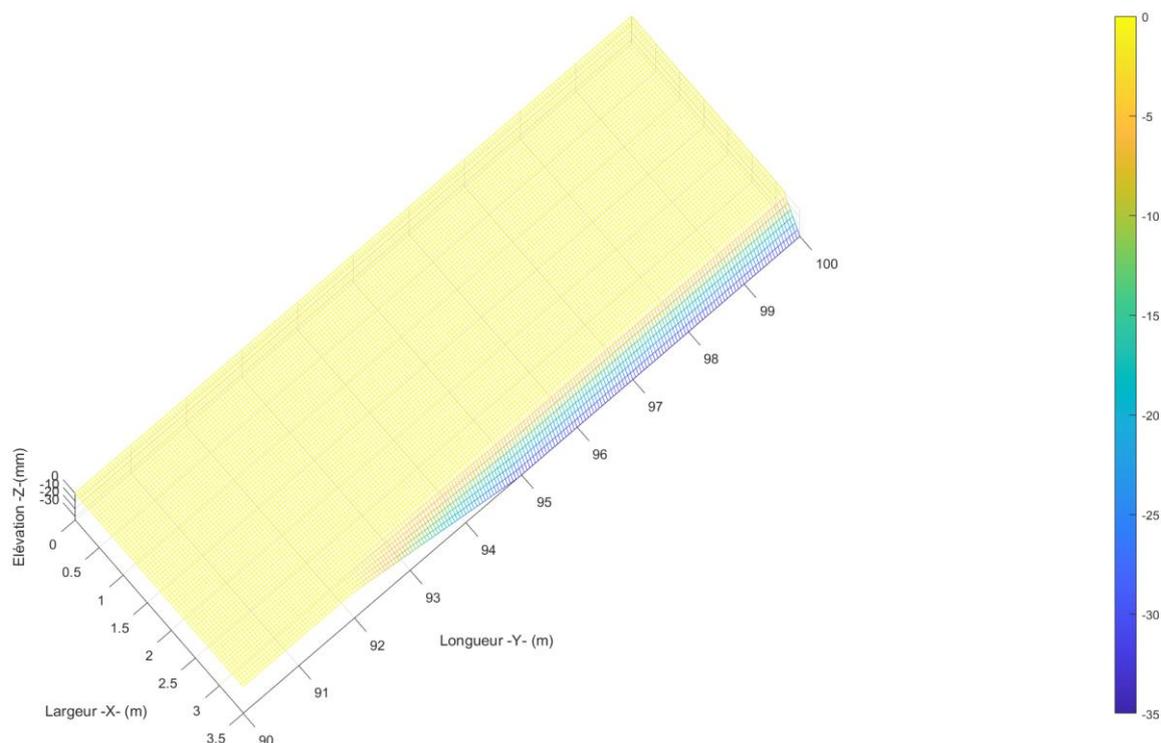


Figure 13. Exemple d'un défaut de type affaissement en rive généré numériquement

Au final, on obtient une surface contenant des défauts longitudinaux et transversaux ne présentant pas d'attributs géométriques (pente et dévers nuls).

Les surfaces virtuelles constituent des outils de test ; elles ne sont évidemment pas aussi réalistes que des surfaces provenant de mesures *in situ* mais, en plus de pouvoir être générées rapidement, elles offrent l'intérêt de faire apparaître des défauts « sur mesure » dont on peut maîtriser les dimensions, l'orientation et la position.

## 4.4 Méthodes d'analyse des déformations au moyen de descripteurs

Le groupe de travail a développé trois approches méthodologiques différentes (appelées A, B et C) pour analyser les déformations depuis une nappe 3-D.

Pour chacune de ces approches, l'analyse commence par dégager des descripteurs permettant une caractérisation « physique » des défauts présents sur la surface. Ces descripteurs sont obtenus par un traitement appliqué « point à point » selon une direction donnée (X ou Y). L'analyse se poursuit par le calcul d'indicateurs qui agrègent les descripteurs au sein d'une zone élémentaire (maille).

L'approche C peut être considérée comme une approche « témoin » car elle est basée sur une exploitation des données selon un découpage par bandes de longueurs d'ondes et aboutit au calcul des indicateurs NBO. Les approches A et B, qui sont assez voisines, sont en revanche basées sur un processus de traitement différent comprenant plusieurs étapes. Chacune de ces étapes a été pensée de sorte à être facilement programmable sur ordinateur et donc être aisément reproductible.

La Figure 14 donne le synoptique des trois approches méthodologiques. Chacune d'entre elles est détaillée par la suite. Dans le chapitre 4.4, les méthodes d'analyse sont développées jusqu'au niveau des descripteurs (*i.e.* analyse « point à point » ou « profil à profil »). L'analyse des déformations à une échelle supérieure (maille ou segment) est commentée dans le chapitre 4.5.

Les résultats issus de l'application des méthodes proposées sur une surface-test « virtuelle » sont exposés dans le chapitre 5.

Echelle	Info.	Approche A	Approche B	Approche C
Point de mesure	Nuage de points	Surface 3D ↓ Détection défauts Transv. par règles glissantes (différentes longueurs) ↓ Détection défauts Longi. par règle glissante 13m	Surface 3D ↙ ↘ Détection défauts Transv. par règles glissantes    Détection défauts Longi. par règles glissantes 3m et 13m	Surface 3D ↓ Détection défauts Longi. par filtrages en BO (bandes PO et MO)
Point de mesure & Front de mesure transversal	Descripteurs	A1 : C gonflés, bourrelets (mm) A2 : C <sub>max</sub> gonflés, bourrelets (mm) A3 : C ornierage (mm) A4 : C <sub>max</sub> ornierage (mm) A5 : C aff. rive (mm) A6 : C TL <sub>13</sub> A7 : C Recharg. (mm) = C orn + C affr + C TL <sub>13</sub>	B1 : gonflés, bourrelets (mm) B2 : C <sub>max</sub> gonflés, bourrelets (mm) B3 : C ornierage (mm) B4 : C <sub>max</sub> ornierage (mm) B5 : C aff. rive (mm) B6 : C L <sub>13</sub> (mm) B7 : C L <sub>3</sub> (mm) B8 : C L <sub>13</sub> - L <sub>3</sub> (mm)	C1 : Profil longitudinal filtré PO C2 : Profil longitudinal filtré MO C3 : Profil longitudinal filtré GO
Maille (ex : 25cmx25cm)	Indicateurs élémentaires	IM-A1 : V gonflés, bourrelets (cm <sup>3</sup> ) IM-A2 : C <sub>max</sub> gonflés, bourrelets (mm) IM-A3 : V ornierage (cm <sup>3</sup> ) IM-A4 : C <sub>max</sub> ornierage (mm) IM-A5 : V aff. rive (cm <sup>3</sup> ) IM-A6 : V TL <sub>13</sub> (cm <sup>3</sup> ) IM-A7 : V Recharg. (cm <sup>3</sup> ) = V orn + V affr + V TL <sub>13</sub>	IM-B1 : V gonflés, bourrelets (cm <sup>3</sup> ) IM-B2 : C <sub>max</sub> gonflés, bourrelets (mm) IM-B3 : V ornierage (cm <sup>3</sup> ) IM-B4 : C <sub>max</sub> ornierage (mm) IM-B5 : V aff. rive (cm <sup>3</sup> ) IM-B6 : V L <sub>3</sub> (cm <sup>3</sup> ) IM-B7 : V L <sub>13</sub> (cm <sup>3</sup> ) IM-B8 : V L <sub>13</sub> - L <sub>3</sub> (cm <sup>3</sup> )	IM-C1 : E <sub>PO</sub> moy. (cm <sup>3</sup> ) IM-C2 : E <sub>MO</sub> moy. (cm <sup>3</sup> ) IM-C3 : E <sub>GO</sub> moy. (cm <sup>3</sup> ) IM-C4 : E <sub>PO</sub> max. (cm <sup>3</sup> ) IM-C5 : E <sub>MO</sub> max. (cm <sup>3</sup> ) IM-C6 : E <sub>GO</sub> max. (cm <sup>3</sup> )

Figure 14. Synoptique des approches méthodologiques proposées pour analyser les déformations

### 4.4.1 Description de l'approche A

La démarche générale associée à l'approche A est la suivante :

1. Détecter les défauts « ponctuels »
2. « Corriger virtuellement » ces défauts sur la surface à analyser
3. Détecter les défauts de type transversal
4. « Corriger virtuellement » ces défauts sur la surface à analyser
5. Détecter les défauts restants de type longitudinal

## 6. « Corriger virtuellement » ces défauts sur la surface à analyser

La finalité de cette approche, basée sur des corrections en série des défauts dans le sens transverse puis longitudinal, est de parvenir à une estimation d'une nappe 3-D d'épaisseur minimale qui soit le « complément » de la surface à analyser. L'addition de cette nappe, que l'on pourrait qualifier de nappe de rechargement, avec la surface de départ déboucherait sur une surface plane.

Les étapes structurant le processus de traitement de l'approche A sont décrites ci-après. Elles sont exprimées méthodologiquement pour en faciliter la compréhension ; les formalismes mathématiques ne sont pas donnés dans ce document.

### ■ Étapes 1 et 2 : détection et correction des défauts localisés (gonfles et bourrelets)

La détection de ces défauts, qui s'apparentent à des dégradations [3], est intéressante à effectuer puisqu'ils sont généralement difficilement perceptibles par les appareils traditionnels (défauts souvent localisés hors des bandes de roulement et de faibles dimensions).

#### Méthode utilisée pour la détection

On simule l'application d'une règle rigide de 50cm de long que l'on fait coulisser « sous » chacun des points des profils transversaux (axe X) composant la nappe 3-D à analyser.

Au début du processus, l'extrémité gauche de la règle repose sous le premier point du profil selon l'axe X ; on incline alors la règle jusqu'à ce qu'elle repose sous un autre point du profil (la règle ne peut pas « traverser » le profil et le point de contact peut être n'importe où sur la règle). À ce stade, on relève la pente formée par la règle :

- Si la pente (en valeur absolue) est supérieure à un seuil (ex : 1%) alors on calcule toutes les distances entre les points du profil et les points de la règle qui sont en vis-à-vis (on désignera cette distance par le mot « cote ») ;
- Sinon, on fixe toutes les cotes à la valeur nulle.

On déplace l'extrémité gauche de la règle sur le point suivant (selon l'axe X) et on répète l'opération précédente. Pour chaque point du profil, on compare la cote obtenue avec celle enregistrée lors de l'application de la règle sur le point précédent. Si elle est supérieure alors on enregistre cette valeur comme étant la cote maximale ; dans le cas contraire la cote maximale reste la valeur obtenue précédemment.

On réitère cette démarche sur l'ensemble du profil transversal jusqu'à atteindre son extrémité droite (ôtée de la longueur de la règle soit 50cm). On peut alors former un vecteur comprenant les valeurs des cotes maximales pour chaque point du profil selon le sens positif des X (du côté gauche de la chaussée vers la droite). On reproduit ensuite le même schéma mais dans le sens opposé (de la droite vers la gauche) de sorte à gérer les deux extrémités du profil transversal ; dans ce cas, on commence à fixer l'extrémité droite de la règle sur le dernier point du profil selon l'axe X. Les cotes maximales finales correspondent alors au maximum des cotes obtenues pour chacun des deux sens.

La méthode de détection est ensuite appliquée à l'ensemble des profils transversaux composant la nappe 3-D

Remarque : La mise en place d'un seuil correspondant à une pente minimale en dessous de laquelle la recherche de gonfles est « désactivée » permet de focaliser l'effet de la règle sur les gonfles et bourrelets et de limiter des erreurs de détection en présence d'ornières (la partie de profil entre les zones orniérées à gauche et à droite peut être perçue comme une gonfle ou un bourrelet dans cette méthode).

### [Méthode utilisée pour la correction](#)

La correction des gonfles et bourrelets sur l'ensemble de la surface consiste à les « araser » par une action sur chacun des profils transversaux. Cette action consiste à soustraire les cotes maximales au profil. On obtient alors un profil corrigé.

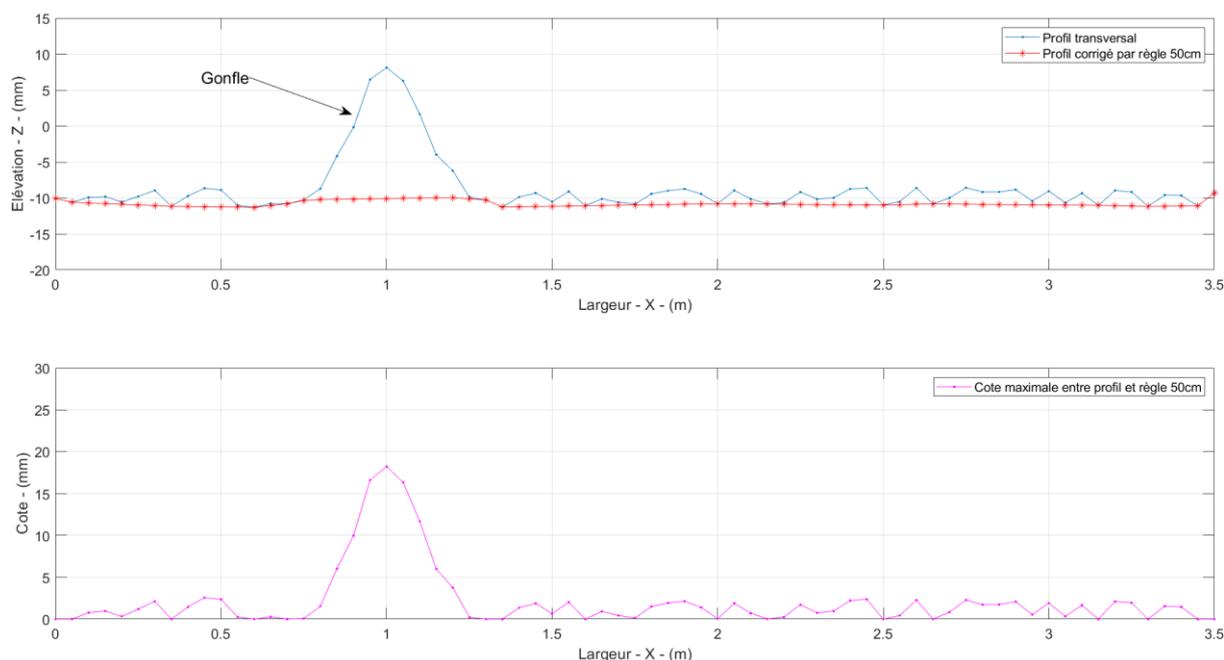


Figure 15. Effet de la correction des gonfles par la règle de 50cm

**Remarque :** Plusieurs longueurs de règle ont été testées mais au regard des résultats obtenus, c'est la règle de 50cm qui a été retenue.

### [Choix des descripteurs](#)

L'application de la règle de 50cm sur la surface à analyser permet de dégager deux descripteurs :

- Le descripteur A1 qui correspond aux cotes maximales calculées pour chaque point de la surface ;
- Le descripteur A2 qui correspond à la valeur maximale du descripteur A1 sur chacun des profils transversaux de la surface (les autres valeurs de cote sur le même profil sont alors mises à 0).

Pour le moment, nous avons considéré ces deux descripteurs, qui sont très proches dans leur construction, pour savoir quel est celui qui offre le meilleur compromis entre mise en évidence du défaut et information synthétique. Par la suite, il est possible qu'un seul de ces descripteurs soit retenu.

### ■ Étapes 3a et 4a : détection et correction de défauts transversaux de type « ornières »

Une fois la surface corrigée d'éventuels gonfles ou bourrelets, l'étape suivante consiste à rechercher des zones ornières.

### [Méthode utilisée pour la détection](#)

De façon analogue à l'étape 1, on va utiliser la méthode de « la règle » sur chaque coupe transversale de la surface. Dans cette étape, la longueur de la règle est fixée à 1.5m et celle-ci est appliquée « sur » le profil, par demi-largeur (gauche et droite). De cette façon, on reprend des éléments présents dans

la méthodologie actuelle pour analyser le profil en travers [4]. Le lecteur est invité à consulter la méthode d'essai pour obtenir le détail de la procédure.

À l'issue des différents balayages transversaux, on fait apparaître des cotes maximales gauche et droite.

#### ☞ Méthode utilisée pour la correction

La correction des défauts de type ornière sur l'ensemble de la surface consiste à les « boucher » par une action sur chacun des profils transversaux. Cette action consiste à ajouter les cotes maximales au profil. Au final, on obtient alors une surface corrigée en gonfles et en ornières. Face à un défaut d'orniérage, il est à noter que l'application préalable de la règle de 50cm pour la suppression des gonfles et bourrelets est susceptible de perturber la détection des débuts et/ou des fins d'ornières. Cet effet, qui peut s'apparenter à un élargissement de l'ornière, peut être constaté sur la figure ci-après en étudiant le profil corrigé après application de la règle de 50cm autour entre  $X=2.6\text{m}$  et  $X=3.1\text{m}$ . Un ajustement du seuil d'inclinaison de cette règle devrait permettre de limiter cette gêne (concrètement, abaisser le seuil à 0.7% ou 0.5% en faisant toujours l'hypothèse d'un dévers nul).

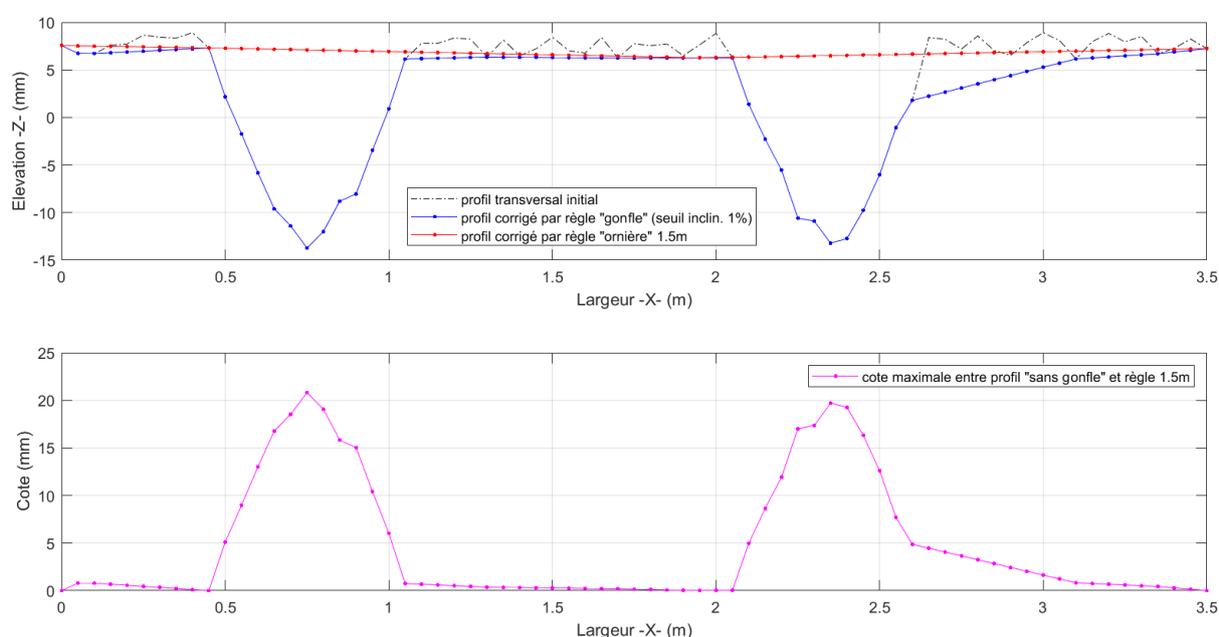


Figure 16. Effet de la correction des ornières par la règle de 1.5m

#### ☞ Choix des descripteurs

L'application de la règle de 1.5m sur la surface à analyser permet de dégager deux descripteurs :

- Le descripteur A3 qui rassemble les cotes maximales gauche et droite calculées pour chaque point de la surface ;
- Le descripteur A4 qui correspond à la valeur maximale du descripteur A3 sur chacun des profils transversaux de la surface (les autres valeurs de cote sur le même profil sont alors mises à 0).

Pour les mêmes raisons que pour les descripteurs A1 et A2, nous considérons deux descripteurs pour caractériser les défauts de type ornière. Par la suite, il est possible qu'un seul de ces descripteurs soit retenu.

### ■ Étapes 3b et 4b : détection et correction des défauts transversaux de type « affaissements de rive »

Après avoir traité les gonfles et les ornières, le dernier type de défaut transversal à rechercher est l'affaissement en rive.

#### 🔗 [Méthode utilisée pour la détection](#)

Dans ce cas également, on procède profil transversal par profil transversal. Pour détecter ce type de défaut, on détermine d'abord, pour le profil à analyser, l'équation de la droite de régression linéaire passant par les points inclus entre  $X=0$  et  $X=(2/3) \times \text{largeur\_voie}$ . Puis, on calcule les cotes entre cette droite et le profil sur le tiers de largeur de la chaussée sur son côté droit (on fixera à 0 les valeurs des cotes pour les points non concernés).

#### 🔗 [Méthode utilisée pour la correction](#)

La correction des défauts de type affaissement de rive sur l'ensemble de la surface consiste à les « boucher » par une action sur chacun des profils transversaux. Cette action consiste à ajouter les cotes maximales au profil sur la partie concernée. Au final, on obtient alors une surface corrigée en gonfles, en ornières et en affaissement de rive.

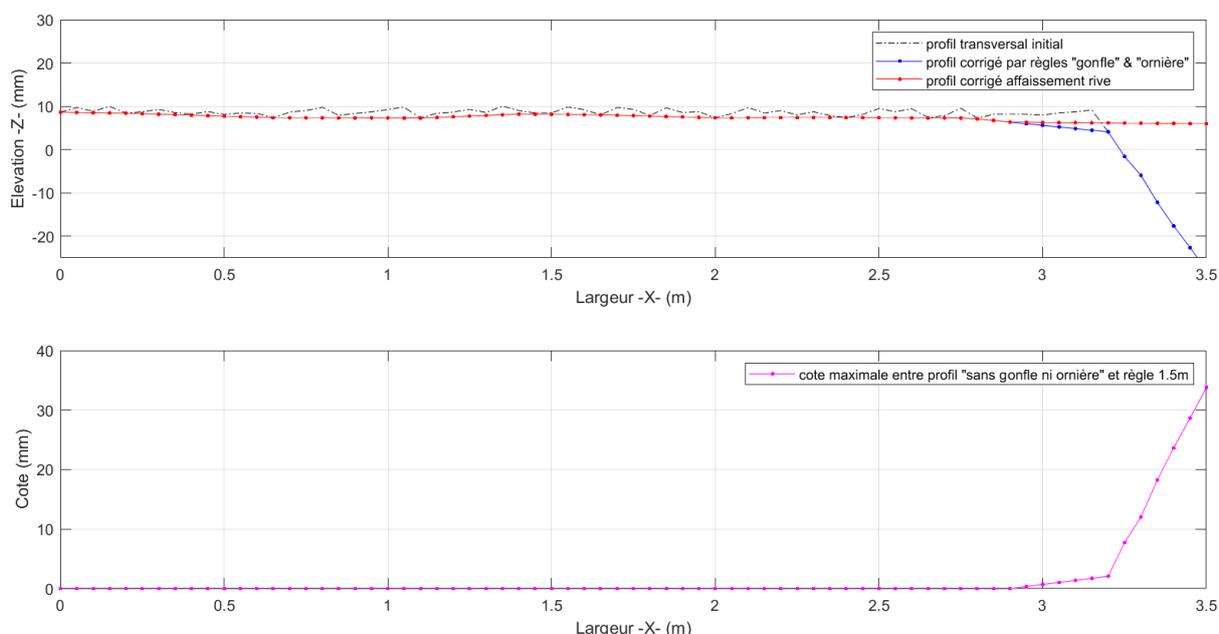


Figure 17. Effet de la correction des affaissements en rive

#### 🔗 [Choix du descripteur](#)

L'application de cette méthode de détection des affaissements fait apparaître le descripteur A5 qui correspond aux cotes entre la droite de régression et le profil transversal.

### ■ Étape 5 : détection et correction des défauts de profil longitudinaux

Les étapes 1 à 3 ont permis de détecter et de corriger un certain nombre de défauts dits « localisés » ou transversaux. On dispose donc à ce stade d'une surface qui présente potentiellement des défauts longitudinaux.

#### 🔗 [Méthode utilisée pour la détection](#)

On utilise une règle de longueur 13m que l'on va venir appliquer et glisser sur chacun des profils longitudinaux constituant la surface à analyser. Le principe est le même que pour la règle de 1.5m utilisée pour la détection des ornières : la règle repose sur deux points de contact avec le profil et on calcule les cotes entre cette règle et le profil. Au fur et à mesure que la règle progresse, on calcule les cotes pour plusieurs points du profil et on conserve celle qui est la plus élevée. Une fois l'opération réalisée dans un sens, on fait de même dans le sens opposé (pour gérer les extrémités du profil). L'application de la règle de 13m permet de détecter et de traiter des défauts dont les longueurs d'onde sont comprises entre 0 et 13m (donc les défauts de type PO et MO) ; les défauts de plus grandes longueurs d'ondes ne sont pas pris en charge dans cette technique.

Remarque : le choix de la règle de 13m est inspiré d'une technique proposée dans le cadre de la méthode d'essais LPC n°46-2 portant sur l'indicateur IRL (indicateur de reprofilage). Ce dernier était lui-même construit par rapport à la réponse d'un indicateur plus ancien (CAPL25).

#### [Méthode utilisée pour la correction](#)

La correction des défauts longitudinaux sur l'ensemble de la surface consiste à les « boucher » par une action sur chacun des profils en long. Cette action consiste à ajouter les cotes maximales au profil. Au final, on obtient alors une surface corrigée transversalement et longitudinalement.

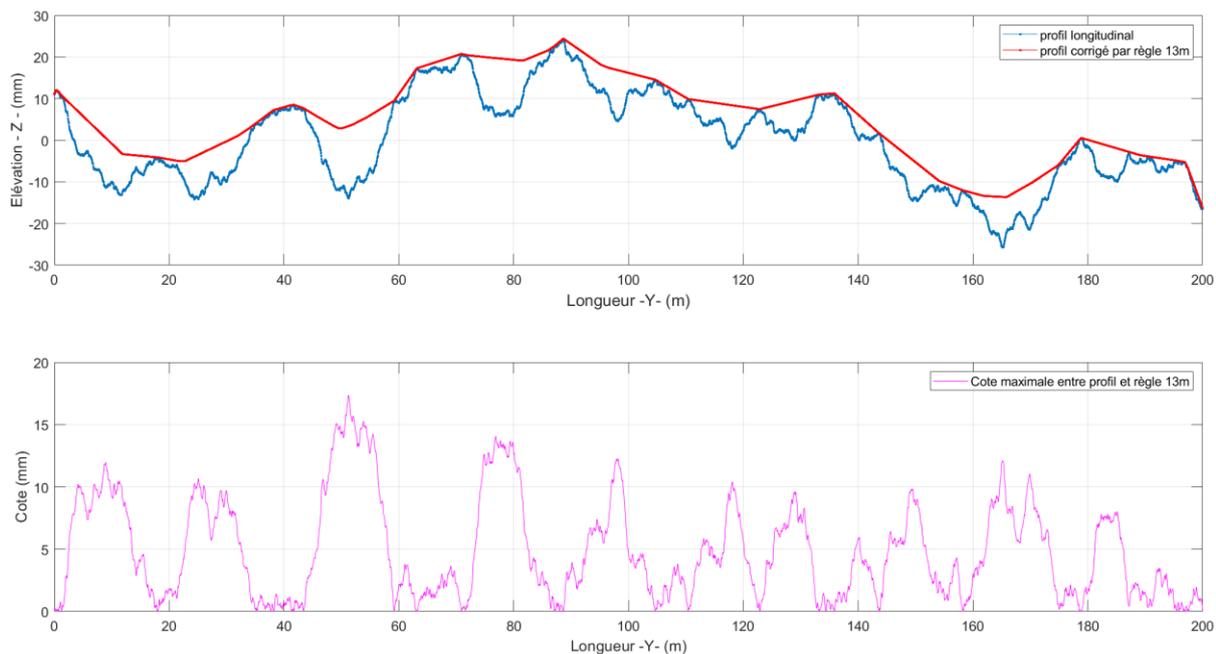


Figure 18. Effet de la correction des défauts longitudinaux par la règle de 13m

#### [Choix des descripteurs](#)

L'application de la règle de 13m sur la surface à analyser permet de dégager le descripteur A6 qui est en lien avec la présence d'un défaut longitudinal. Ce descripteur correspond aux cotes maximales calculées sous cette règle pour chaque point de la surface.

L'application de la règle de 13m vient également finaliser un processus qui aboutit à la correction totale (transversale et longitudinale) de la surface à analyser. De ce fait, la somme des cotes maximales dégagées lors des étapes de correction des ornières, des affaissements en rive et des défauts de profil en long (<13m) pour l'ensemble des points de la surface est assimilable à une nappe de « rechargement ». On considèrera cette nappe comme un descripteur car elle est susceptible d'apporter des informations intéressantes pour la programmation des travaux (ex : contribution à l'estimation des volumes de matériaux).

#### 4.4.1 Description de l'approche B

L'approche B reprend la plupart des étapes de détection et de correction mentionnées dans l'approche A. Contrairement à l'approche précédente, l'approche B procède à un traitement parallèle des défauts dits transversaux et longitudinaux. Les défauts longitudinaux seront plus finement analysés mais, en contrepartie, elle ne permettra pas d'estimer *in fine* une nappe de rechargement.

La démarche générale associée à l'approche B est la suivante :

1. Détecter les défauts de type « ponctuel »
2. « Corriger virtuellement » ces défauts sur la surface à analyser (qu'on appellera surface 1)
3. Détecter les défauts de type transversal sur la surface 1
4. « Corriger virtuellement » ces défauts sur la surface à analyser
5. Détecter les défauts de type longitudinal sur la surface 1
6. « Corriger virtuellement » ces défauts sur la surface à analyser

Les étapes structurant le processus de traitement de l'approche B sont décrites ci-après. Comme la plupart d'entre elles sont identiques à l'approche A, on ne les rappellera pas dans le détail.

##### ■ Étapes 1 et 2 : détection et correction des défauts localisés (gonfles et bourrelets)

###### [Méthodes utilisées pour la détection et la correction de ces défauts](#)

Les méthodes de détection et de correction des défauts localisés pour cette approche sont identiques à l'approche A (règle de 50cm).

###### [Choix des descripteurs](#)

Les descripteurs sont également identiques à l'approche A. Ils sont appelés B1 et B2 (respectivement par rapport à A1 et A2).

##### ■ Étapes 3 et 4 : détection et correction des défauts transversaux (ornières et affaissements de rive)

###### [Méthodes utilisées pour la détection et la correction de ces défauts](#)

Les méthodes de détection et de correction des défauts transversaux pour cette approche sont identiques à l'approche A (règle de 1.5m par demi-largeur gauche/droite pour les ornières et utilisation d'une droite de régression linéaire pour les affaissements de rive).

###### [Choix des descripteurs](#)

Les descripteurs sont également identiques à l'approche A. Ils sont appelés B3, B4 et B5 (respectivement par rapport à A3, A4 et A5).

##### ■ Étapes 5 et 6 : détection et correction des défauts longitudinaux

Cette étape peut être réalisée avant l'étape 2 étant donné que le traitement des défauts transversaux et longitudinaux se fait en parallèle depuis une même surface de départ (surface débarrassée des éventuels gonfles et bourrelets).

###### [Méthodes utilisées pour la détection et la correction de ces défauts](#)

Comme pour l'approche A, on utilise le principe de la règle glissante sur chacun des profils longitudinaux composant la surface à analyser. Cependant, on considère 2 longueurs de règles distinctes : une règle de 13m et une règle de 3m, cette dernière permettant d'isoler les défauts de

faibles longueurs d'ondes ( $< 3\text{m}$ ). Pour les deux types de règle, la correction consiste à ajouter les cotes maximales trouvées sous la règle à la surface.

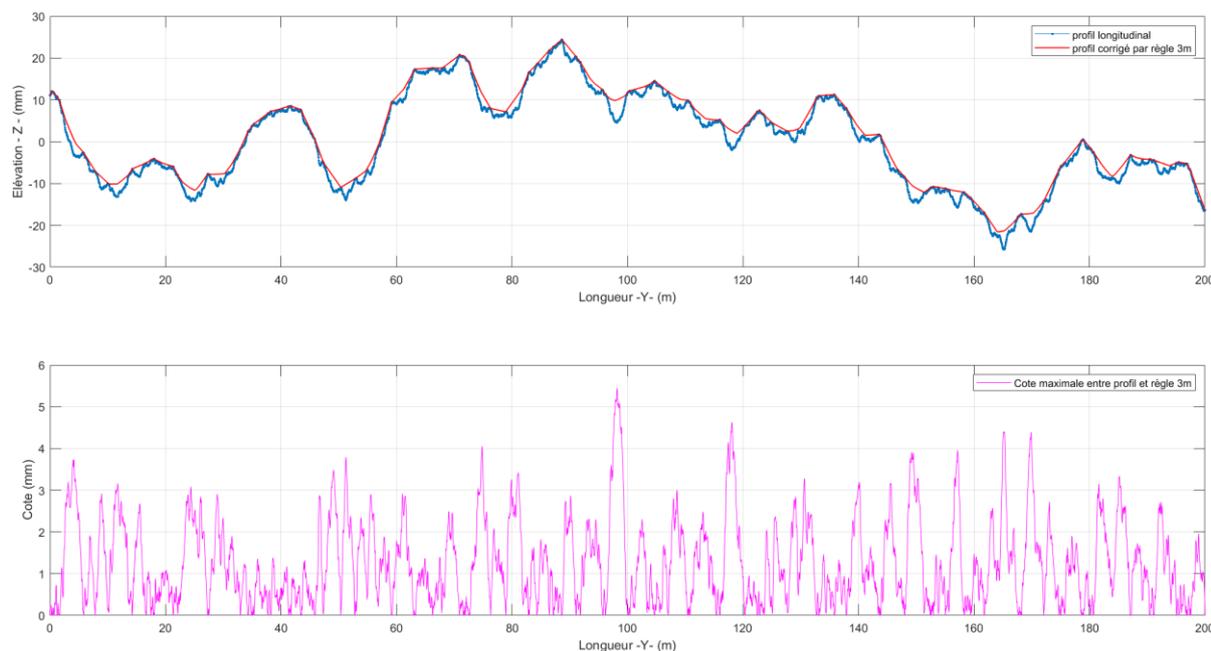


Figure 19. Effet de la correction des défauts longitudinaux par la règle de 3m

#### [Choix des descripteurs](#)

Le descripteur issu de l'application de la règle de 13m est identique à celui de l'approche A ; on l'appellera B6. Le descripteur appelé B7 correspond quant à lui à l'application de la règle de 3m (méthodologie identique à la règle de 13m). On génère par la suite un troisième descripteur, appelé B8, qui résulte de la différence B6-B7 (l'idée étant d'isoler et de faire apparaître des défauts proches des défauts en MO).

#### 4.4.1 Description de l'approche C

L'approche C est inspirée de la méthode actuelle d'analyse de l'uni longitudinal des chaussées. Elle consiste à appliquer la notation par bandes d'ondes (NBO) sur chacun des profils longitudinaux composant la surface. Les travaux menés en début de projet sur la capacité des appareils de type scanner à restituer correctement les NBO permettent d'envisager une telle approche. Cette dernière est composée des actions suivantes :

- Filtrage du profil de sorte à dégager un signal contenant uniquement les petites ondes ( $0.7\text{m} < \lambda < 2.8\text{m}$ ) ;
- Filtrage du profil de sorte à dégager un signal contenant uniquement les moyennes ondes ( $2.8\text{m} < \lambda < 11.3\text{m}$ ) ;
- Filtrage du profil de sorte à dégager un signal contenant uniquement les grandes ondes ( $11.3\text{m} < \lambda < 45.2\text{m}$ ) ;

Dans cette approche, l'analyse des déformations de la surface de chaussée repose donc uniquement sur la détection et la caractérisation de la composante longitudinale des défauts. On fait donc l'hypothèse que des défauts dits « transversaux » sont également susceptibles d'être identifiés par cette méthode.

### [Méthode utilisée pour la détection des défauts](#)

La méthode utilisée pour cette détection est basée sur le calcul des signaux filtrés par bandes d'ondes PO, MO et GO [2].

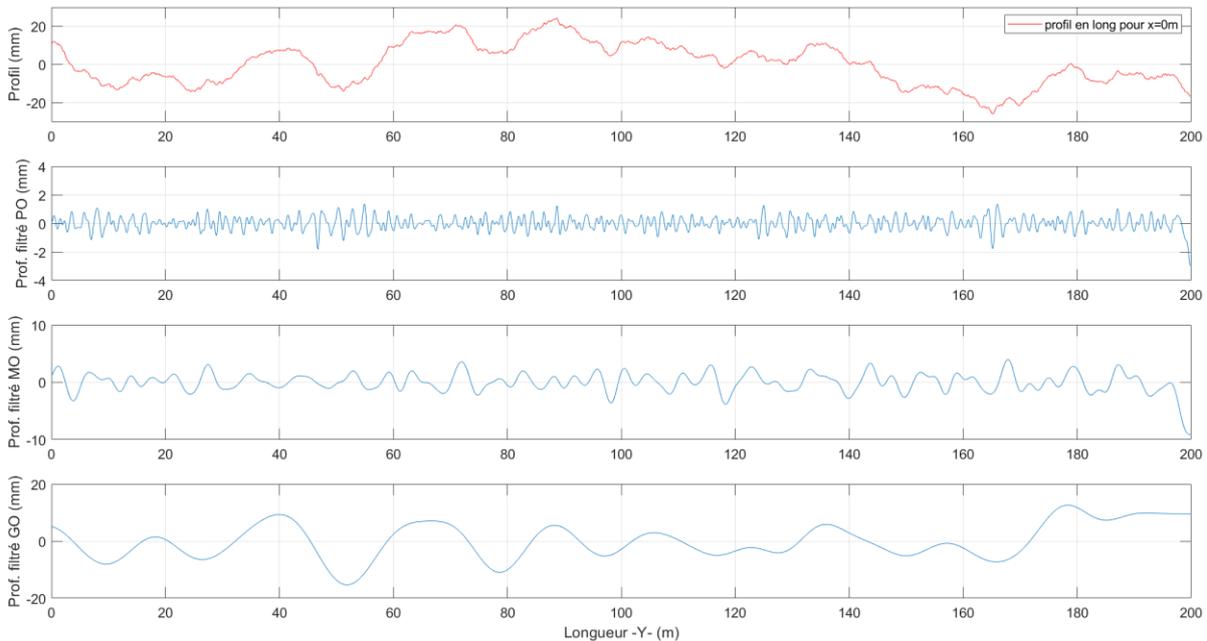


Figure 20. Profil longitudinal de la chaussée et profils filtrés associés en PO, MO et GO

### [Choix des descripteurs](#)

Pour cette approche, les descripteurs retenus sont les amplitudes des profils filtrés en PO, MO et GO. Ils sont respectivement nommés C1, C2 et C3.

## 4.5 Méthodes d'analyse des déformations au moyen d'indicateurs

Les traitements décrits dans le chapitre 4.4 débouchent sur des descripteurs dont le but est de restituer la présence de défauts par une représentation « point à point ». Le passage en indicateurs a pour objectif d'agréger les informations fournies par les descripteurs pour les rendre plus synthétiques au niveau spatial. Le premier niveau d'agrégation choisi pour cette étude est la maille. L'information portée dans cette maille sera appelée indicateur élémentaire.

De façon arbitraire, le groupe de travail a défini la maille comme étant une surface carrée de 25cm de côté. Cette démarche implique alors un découpage de la voie de circulation en plusieurs carrés de sorte à former un maillage. Le groupe de travail est conscient que l'application d'un maillage s'accompagne de plusieurs problématiques (gestion des variations de largeur de la voie, des courbes, stockage des données, etc.) mais ce procédé offre deux intérêts :

- Une résolution intéressante pour restituer spatialement les défauts ;
- Une cohérence avec la démarche proposée par le groupe de travail DVDC portant sur l'analyse des dégradations par les appareils scanner (ce dernier ayant également adopté la maille de 25cm).

Le groupe de travail a également volontairement écarté la notion de bandes de roulement à ce stade du projet de recherche. Celles-ci ne sont donc pas positionnées de façon automatique sur la surface à analyser (ou sur le maillage) et n'interviennent pas dans le raisonnement. Plusieurs raisons motivent ce choix : la difficulté de positionner précisément ces bandes (notamment en virage) et une volonté de traiter équitablement toutes les parties composant la surface de chaussée. Cependant, il sera toujours possible de considérer ces bandes dans le futur si le besoin s'en faisait ressentir. Par ailleurs, la taille et la forme de la maille sont également susceptibles d'évoluer si la résolution est trop élevée par exemple (on pourra alors envisager de prendre des mailles de plus grande taille ou bien de forme rectangulaire).

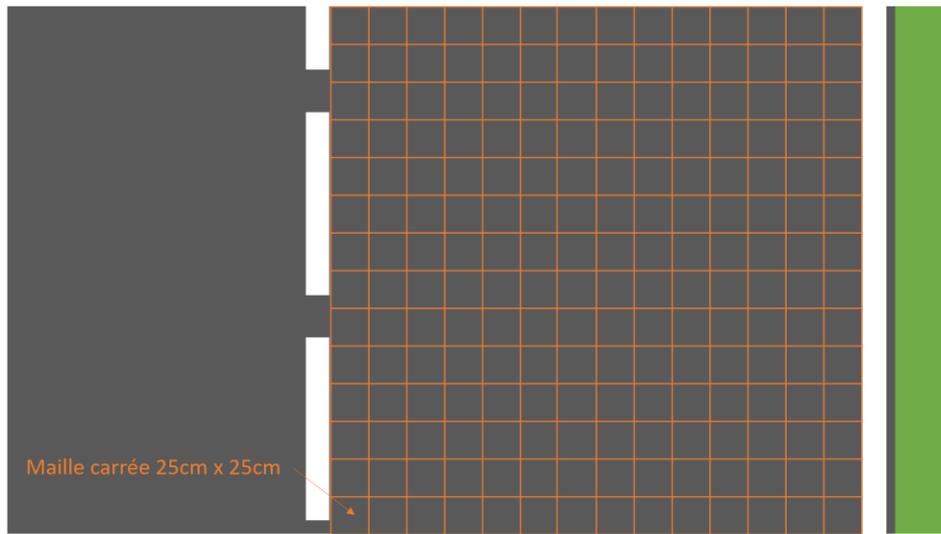


Figure 21. Exemple de maillage appliqué à la surface de chaussée

#### 4.5.1 Indicateurs élémentaires des approches A et B

Pour ces deux approches, on reporte le résultat d'opérations mathématiques appliquées à la population des points du descripteur qui sont inclus dans la maille. Ces opérations sont, dans ce cas précis, des calculs de volume ou des valeurs maximales parmi un ensemble de points. On rappelle que nous avons considéré une résolution spatiale de 5cm en X et Y pour construire la nappe 3-D virtuelle et que la grandeur en Z correspond à des élévations (en mm) ; les surfaces obtenues par la représentation des descripteurs reprennent également ces caractéristiques.

Remarque : les valeurs en Z des descripteurs pour les approches A et B sont toutes positives.

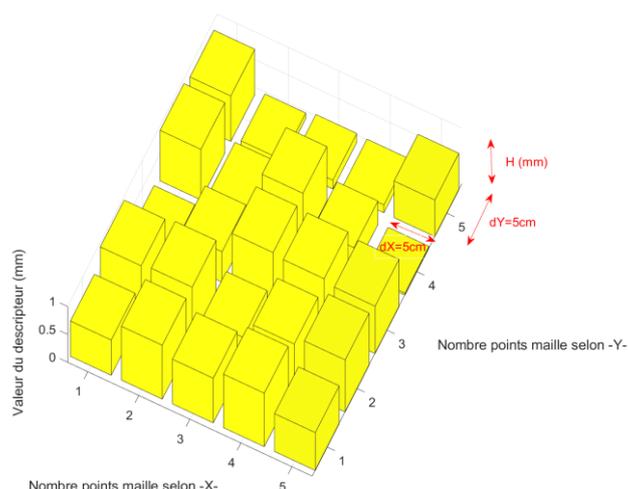


Figure 22. Schéma représentant la répartition des valeurs à traiter au sein de chaque maille (par exemple pour un calcul de volume)

Un indicateur est calculé pour chacun des descripteurs des approches A et B. Le type d'indicateur et sa désignation sont reportés dans le tableau ci-après.

Tableau 1. Indicateurs élémentaires (par maille) pour les approches A et B

Approche A			Approche B		
Descripteur considéré	Nom de l'indicateur associé	Définition	Descripteur considéré	Nom de l'indicateur associé	Définition
A1 : Cote gonfle et bourrelets (mm)	IM-A1	Volume des points de A1 dans la maille (cm3)	B1 = A1	IM-B1 (= IM-A1)	Volume des points de B1 dans la maille (cm3)
A2 : Cote max gonfles et bourrelets par profil transversal	IM-A2	Cote max gonfles et bourrelets par maille (mm)	B2 = A2	IM-B2 (=IM-A2)	Cote max gonfles et bourrelets par maille (mm)
A3 : Cote orniéage (mm)	IM-A3	Volume des points de A3 dans la maille (cm3)	B3 = A3	IM-B3 (= IM-A3)	Volume des points de B3 dans la maille (cm3)
A4 : Cote max orniéage par profil transversal (mm)	IM-A4	Cote max orniéage par maille (mm)	B4 = A4	IM-B4 (= IM-A4)	Cote max orniéage par maille (mm)
A5 : Cote affaissement de rive (mm)	IM-A5	Volume des points de A5 dans la maille (cm3)	B5 = A5	IM-B5 (= IM-A5)	Volume des points de B5 dans la maille (cm3)
A6 : Cote défauts longitudinaux (mm) par règle 13m après correction défauts transversaux	IM-A6	Volume des points de A6 dans la maille (cm3)	B6 : Cote défauts longitudinaux (mm) par règle 13m sur surface initiale	IM-B6	Volume des points de B6 dans la maille (cm3)
A7 : Cote de rechargement	IM-A7	Volume des points de A7 dans la maille (somme des	B7 : Cote défauts longitudinaux (mm)	IM-B7	Volume des points de B7

correspondant à la somme des cotes portées par A3, A5 et A6		volumes portés par IM-3, IM-5 et IM-6).	par règle 3m sur surface initiale		dans la maille (cm3)
			B8 = B7-B6	IM-B7	Volume des points de B8 dans la maille (cm3)

#### 4.5.1 Indicateurs élémentaires de l'approche C

On rappelle que l'approche C correspond à une analyse NBO appliquée à l'ensemble des profils en long constituant la nappe 3-D. Il s'agit donc d'une sorte de NBO « étendue » ou « surfacique ».

Les indicateurs de l'approche C sont basés sur le calcul des « énergies par bandes d'ondes » [1].

Tableau 2. Indicateurs élémentaires (par maille) pour l'approche C

Approche C		
Descripteur considéré	Nom de l'indicateur associé	Définition
C1 : Profils filtrés en PO	IM-C1	Moyenne des énergies calculées pour C1 dans la maille (cm3)
C2 : Profils filtrés en MO	IM-C2	Moyenne des énergies calculées pour C2 dans la maille (cm3)
C3 : Profils filtrés en GO	IM-C3	Moyenne des énergies calculées pour C3 dans la maille (cm3)
C1 : Profils filtrés en PO	IM-C4	Valeur maximale des énergies calculées pour C1 dans la maille (cm3)
C2 : Profils filtrés en MO	IM-C5	Valeur maximale des énergies calculées pour C2 dans la maille (cm3)
C3 : Profils filtrés en GO	IM-C6	Valeur maximale des énergies calculées pour C3 dans la maille (cm3)

## 4.6 Application sur une surface virtuelle

Au moyen de la méthode développée dans le chapitre 4.3, une nappe 3-D virtuelle contenant des ensembles de défauts transversaux et longitudinaux a été élaborée pour tester les trois approches d'analyse surfacique des déformations.

### 4.6.1 Caractéristiques de la surface virtuelle de test

La surface-test correspond à une voie de circulation de 3.5m en largeur et 200m en longueur. La résolution spatiale utilisée est 5cm en X et Y (distance entre deux points de mesure selon chacun des axes).

En plus des défauts longitudinaux qui sont présents partout sur cette surface, des défauts ponctuels et transversaux ont été ajoutés (Tableau 3).

Tableau 3. Caractéristiques des défauts localisés et transversaux ajoutés à la surface-test

Type de défaut	Amplitude ou Profondeur max.	Autres dimensions	Position en Y	Position en X
Gonfle	20 mm env.	Diamètre : env. 25cm	10m	1m
Gonfle	40mm env.	Diamètre : env. 25cm	20m	2m

Bourrelet transversal	30mm env.	Largeur : env. 80cm Longueur : env. 20cm	30m	1.75m
Bourrelet longitudinal	30mm env.	Largeur : env. 20cm Longueur : env. 3m	40m	1.75m
Ornières gauche et droite	20mm env.	Largeur : env. 60cm	Entre 50m et 80m env.	X=0.6m (gauche) X=2.4m (droite)
Affaissement en rive	50mm env.	Largeur : env. 30cm Pente en X : 10% env.	Entre 90m et 140m env.	X=3.2m
Ornières gauche et droite + affaissement en rive	Orn. : 20mm env. Aff. : 50mm env.	Largeur orn. : env. 60cm Largeur aff. : env. 30cm Pente aff. en X : 10% env.	Entre 140m et 170m env.	Xorn=0.6m (gauche) Xorn=2.4m (droite) Xaff=3.2m

**Remarque** : les zones d’ornières et d’affaissements en rive sont introduites progressivement depuis la surface de chaussée.

La surface-test est représentée sur la Figure 23. Afin d’avoir une vue d’ensemble de la surface, les échelles en X et en Y ne sont pas identiques.

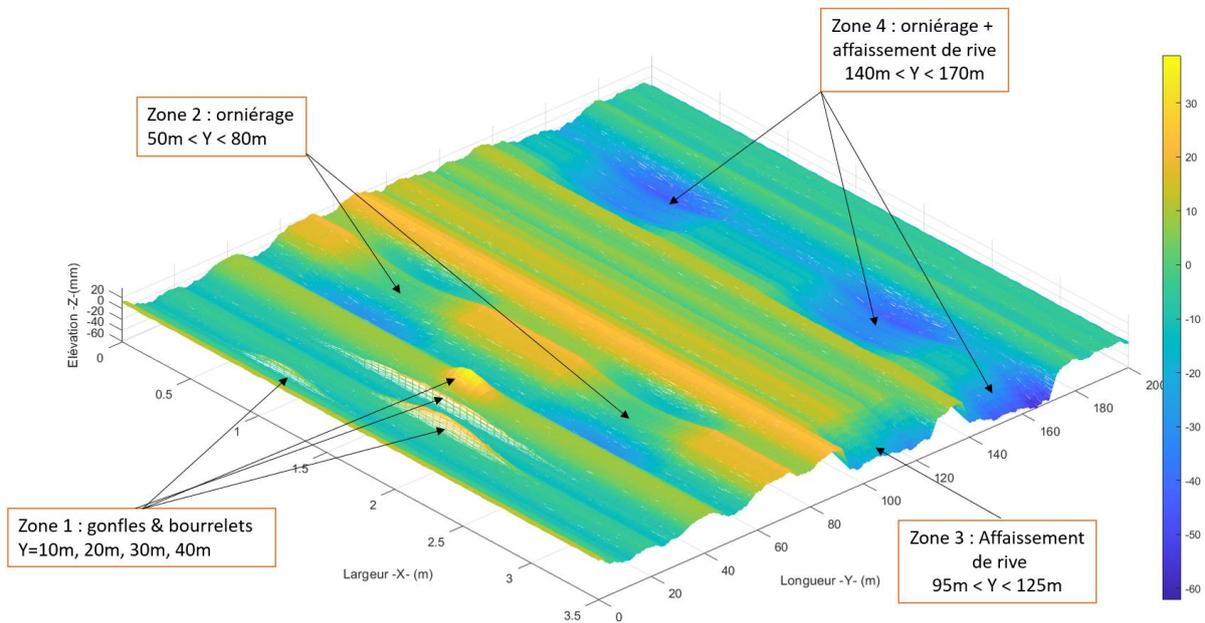


Figure 23. Vue de la surface-test en perspective 3-D

Cette même surface peut être également représentée en mode « plan » par une vue de dessus (toujours avec des échelles différentes).

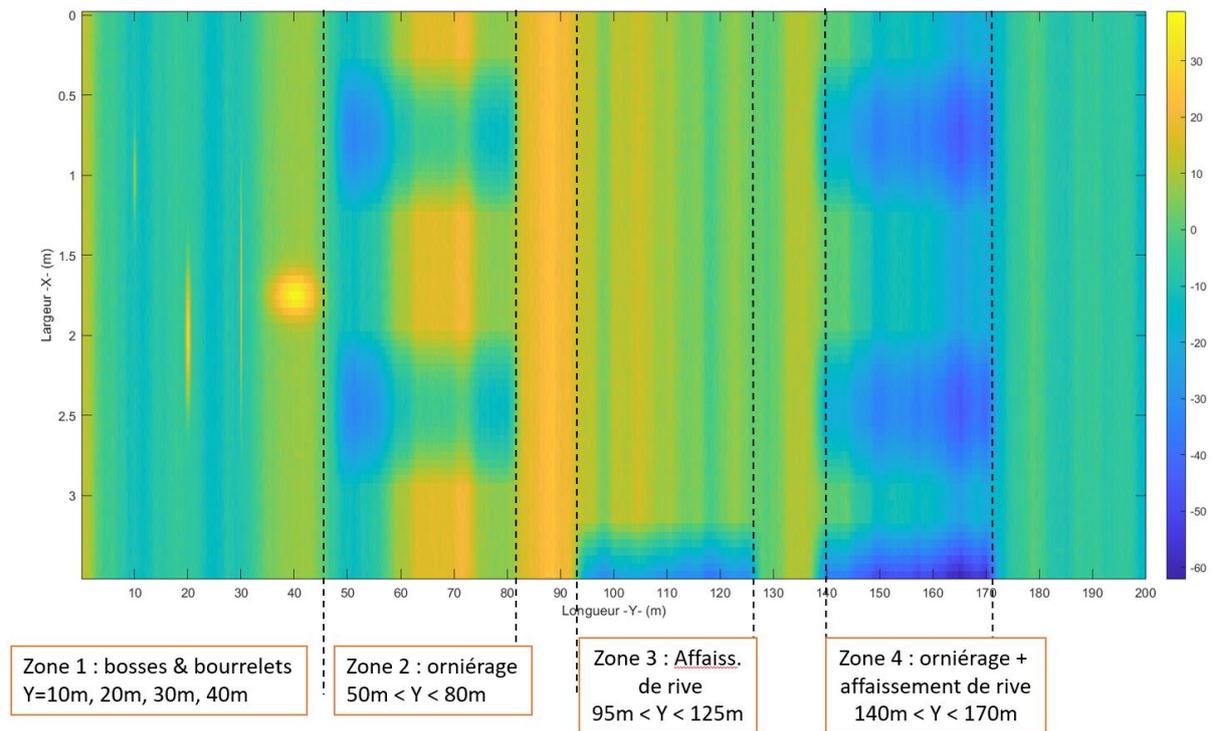


Figure 24. Vue de la surface-test en mode plan

### 4.6.1 Application de l'approche A

► Représentation des descripteurs

👉 [Descripteur A1 \(gonfle et bourrelet\)](#)

Le descripteur A1 s'intéresse à la détection et à la caractérisation des gonfles et bourrelets. Le résultat de son application sur la surface-test est donné en mode « plan » ; la jauge de couleur indiquant les élévations (en mm).

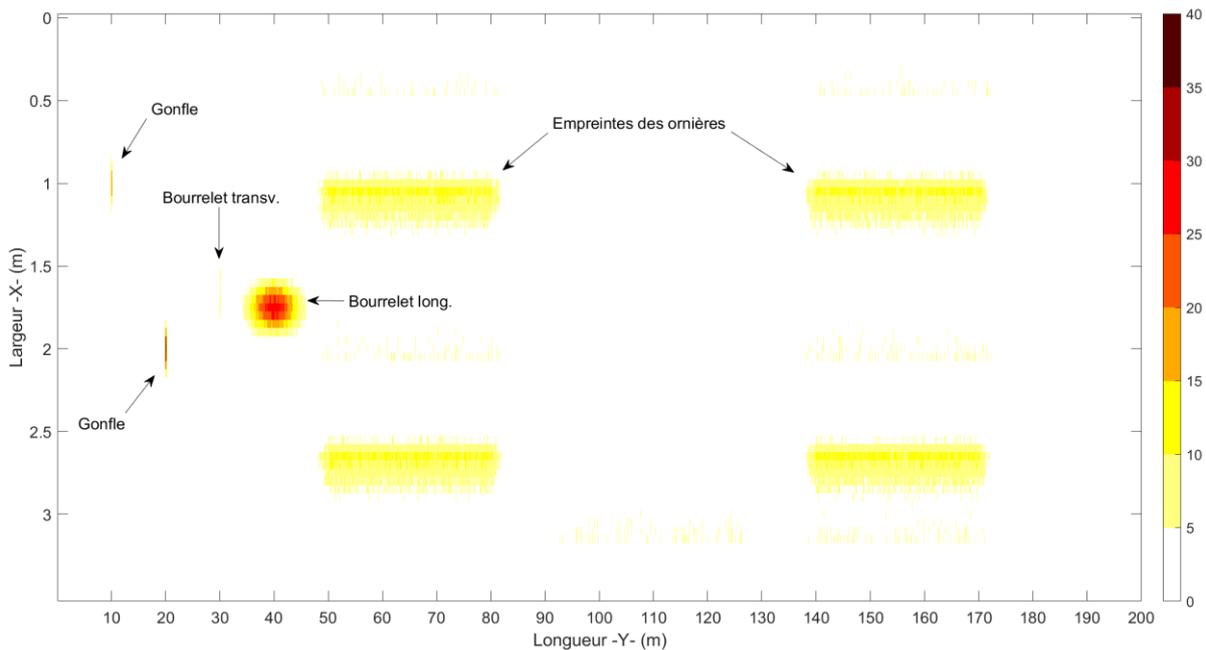


Figure 25. Carte du descripteur A1

Le descripteur A1 permet de faire ressortir distinctement les gonfles et le bourrelet longitudinal avec des amplitudes et des dimensions conformes aux valeurs théoriques. La présence du bourrelet transversal n'est pas efficacement restituée : la règle de 50cm « épouse » la forme de ce défaut et ne dégage pas de cotes suffisamment élevées.

Le descripteur A1 dégage également des cotes d'amplitudes faibles en présence d'ornières. L'introduction d'un paramètre de type seuil, basé sur la pente de la règle, permet de limiter ce problème mais il pourrait probablement être optimisé (Cf. 4.4.1).

#### ☞ [Descripteur A2 \(gonfle et bourrelet\)](#)

Le descripteur A2 donne des résultats similaires mais réduit naturellement l'étendu du défaut. En contrepartie, la représentation de ce descripteur donne plus de contraste entre les zones avec et sans défauts.

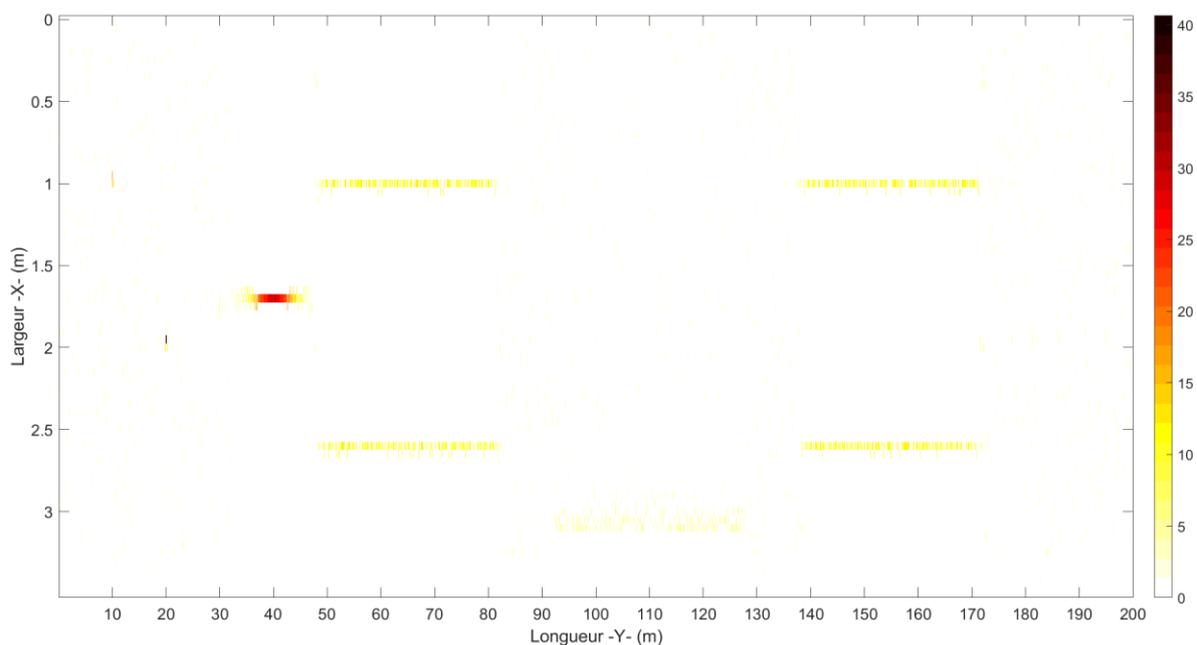


Figure 26. Carte du descripteur A2

Une fois les gonfles et les bourrelets détectés, on rappelle que l'on cherche à les supprimer en modifiant la surface en conséquence (retrait des cotes).

#### ☞ [Descripteur A3 \(orniérage\)](#)

Le descripteur A3 s'intéresse à la détection et à la caractérisation des ornières. Le résultat de son application sur la surface-test est donné en mode « plan » ; la jauge de couleur indiquant les cotes sous la règle d'1.5m (en mm).

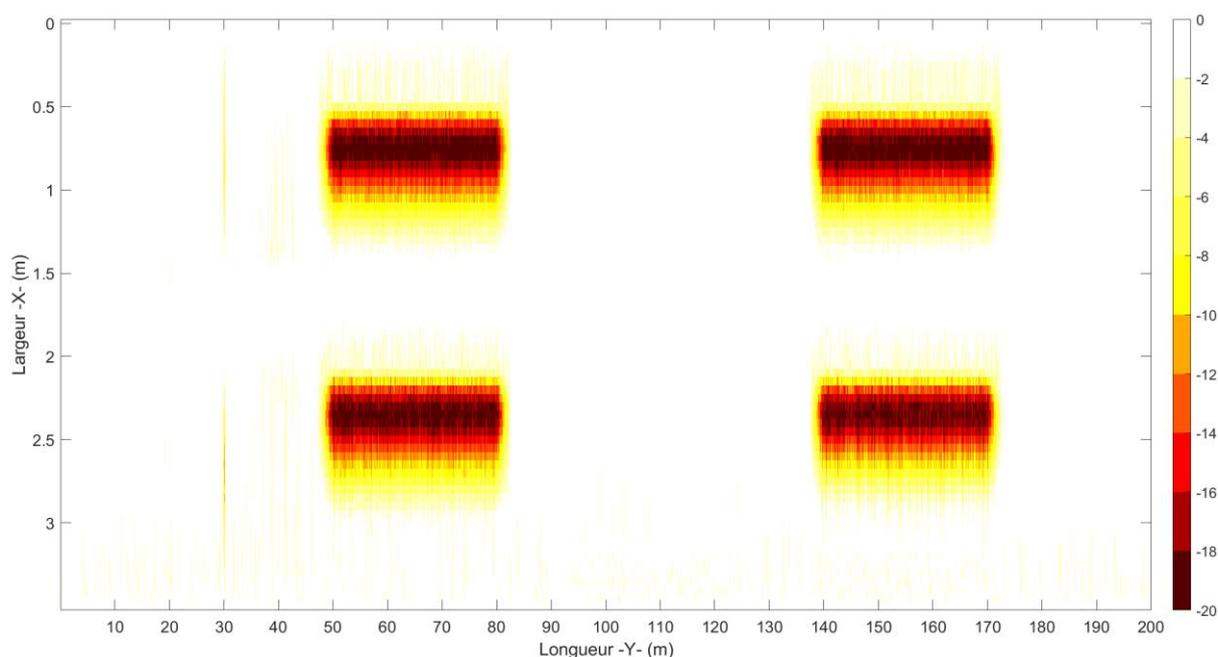


Figure 27. Carte du descripteur A3

Les zones orniérées sont distinctement détectées. On retrouve également des largeurs et des profondeurs d’ornières cohérentes par rapport aux valeurs théoriques.

[👉 Descripteur A4 \(orniérage\)](#)

Comme pour le descripteur A1 vs. A2, le descripteur A4 se focalise sur les points les plus déformés. On obtient alors une représentation plus contrastée en présence de défauts.

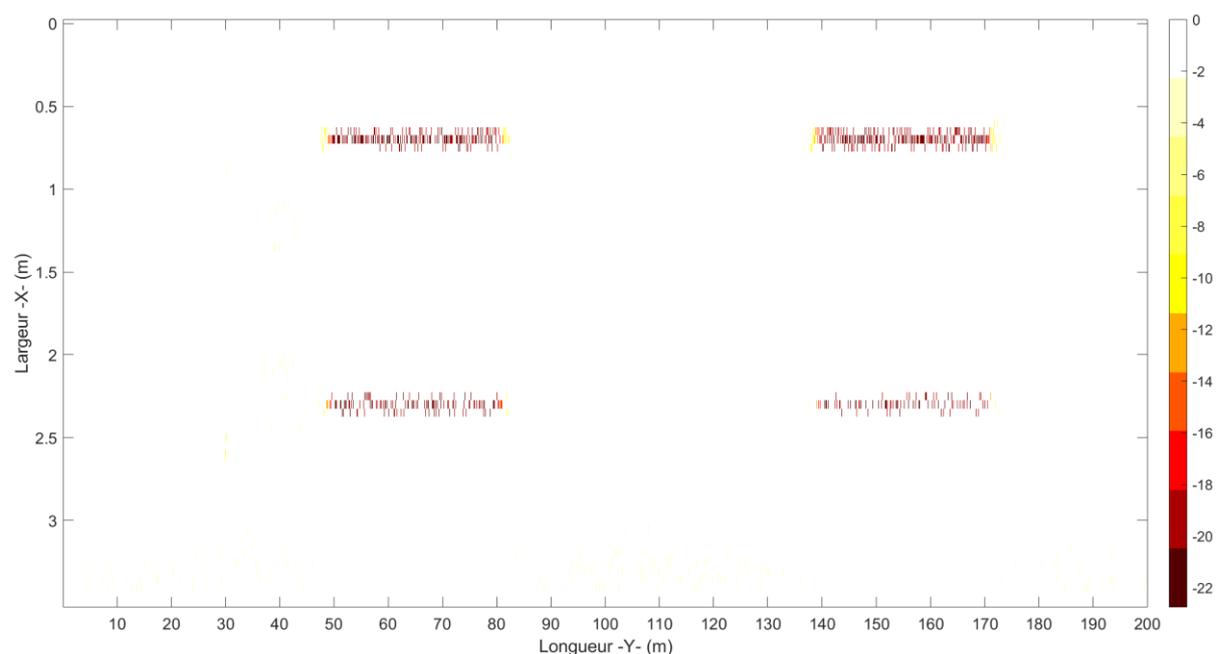


Figure 28. Carte du descripteur A4

### [👉 Descripteur A5 \(affaissement en rive\)](#)

Le descripteur A5 s'intéresse à la détection et à la caractérisation des affaissements en rive. Le résultat de son application sur la surface-test est donné en mode « plan » ; la jauge de couleur indiquant les profondeurs (en mm).

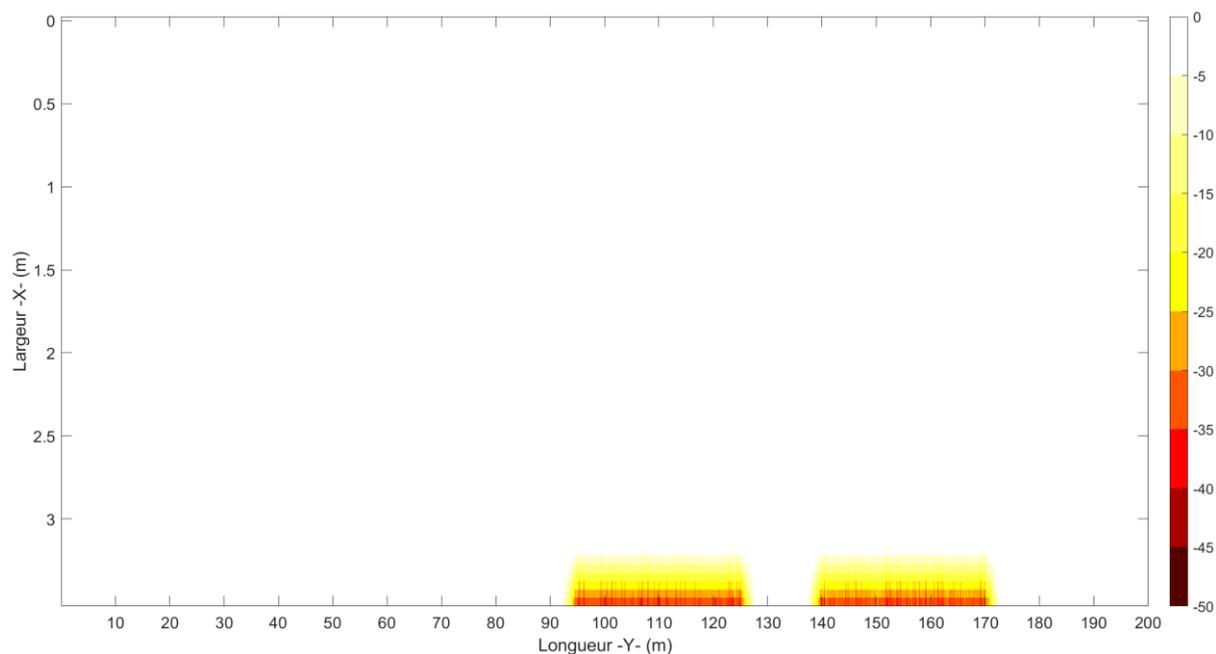


Figure 29. Carte du descripteur A5

Les zones affaissées sont distinctement détectées. On retrouve également des largeurs et des profondeurs d'affaissement cohérentes par rapport aux valeurs théoriques.

### [👉 Descripteur A6 \(défauts longitudinaux par règle de 13m\)](#)

Le descripteur A6 s'intéresse à la détection et à la caractérisation des défauts longitudinaux dont les longueurs d'ondes sont inférieures à 13m. Le résultat de son application sur la surface-test (après correction des défauts localisés et transversaux) est donné en mode « plan » ; la jauge de couleur indiquant les cotes sous la règle (en mm).

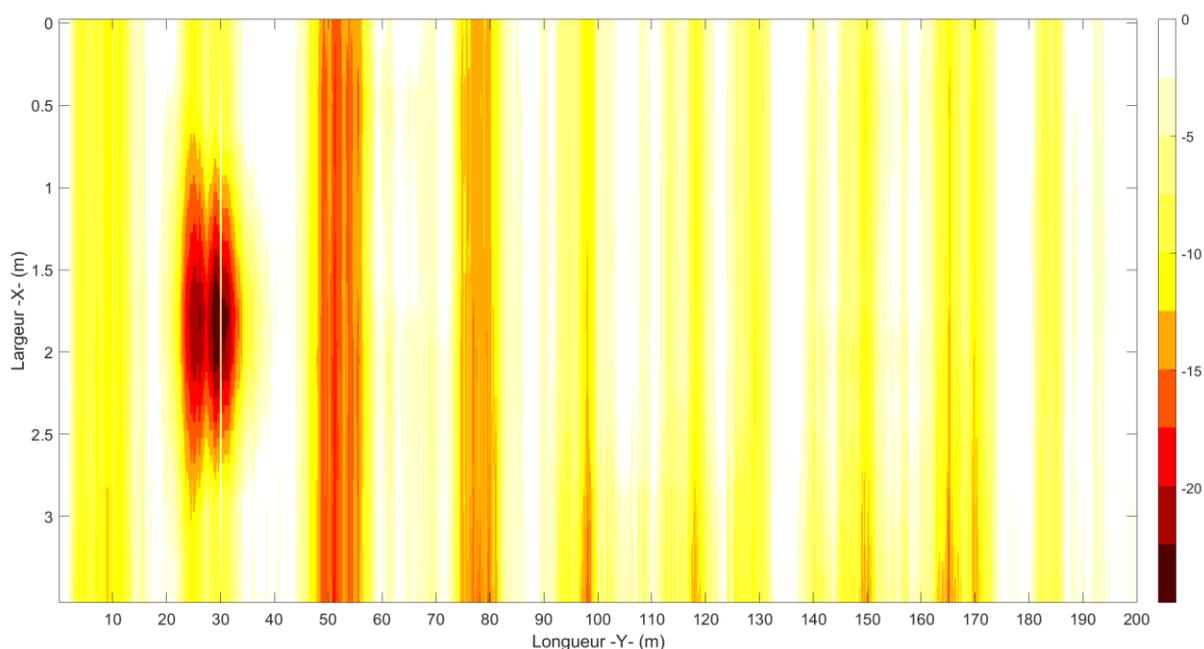


Figure 30. Carte du descripteur A6

La concentration de cotes élevées autour des longueurs 20 et 30m est due la présence du bourrelet transversal. Nous avons en effet mentionné précédemment que l'application de la règle de 50cm n'était pas efficace pour détecter et corriger ce type de défaut si sa largeur excédait la longueur de la règle (dans le cas présent le bourrelet mesure 80cm en largeur). En conséquence, la règle de 13m repose par endroit sur ce bourrelet et induit des cotes élevées. Cette problématique n'intervient pas pour des bourrelets transversaux de taille inférieure à 50cm.

#### [👉 Descripteur A7 \(défauts longitudinaux par règle de 13m\)](#)

Le descripteur A7 correspond au cumul des cotes sous les différentes règles utilisées pour corriger les ornières, les affaissements et les défauts longitudinaux. Le résultat de son application sur la surface-test (après correction des défauts localisés et transversaux) est donné en mode « plan » ; la jauge de couleur indiquant les cotes sous la règle (en mm). La nappe obtenue est assimilable à une nappe de rechargement.

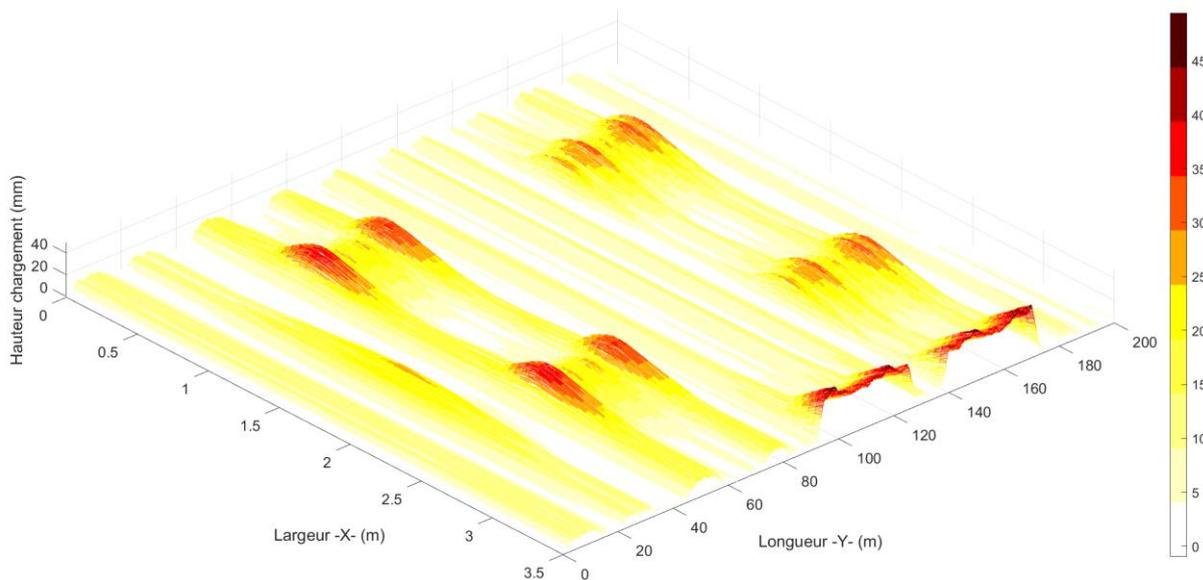


Figure 31. Vue de la nappe 3-D correspondant au descripteur A7 (nappe de rechargement)

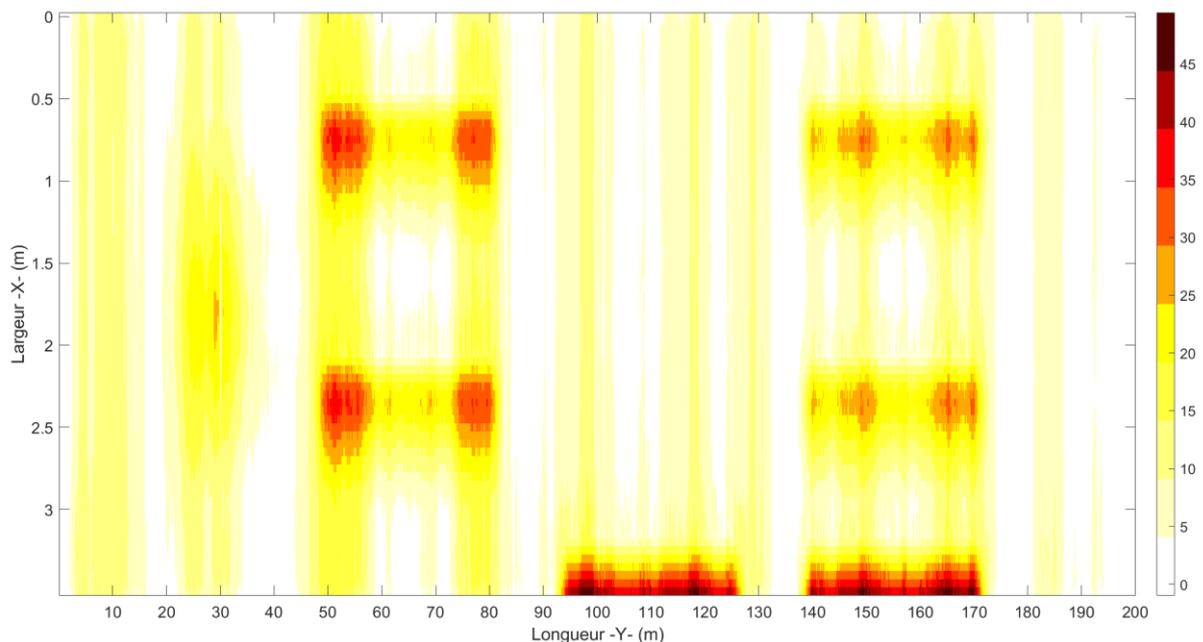


Figure 32. Carte du descripteur A7

Les zones présentant *a priori* un besoin majeur en rechargement sont détectées (zones orniérées et affaissées). Les cotes de rechargement pour les zones orniérées sont cependant moins homogènes que celles vue pour le descripteur A3. On explique cela par l'effet de la correction longitudinale qui « module » une partie de ces défauts.

### ► Représentation des indicateurs

Le passage d'une représentation en descripteur (ensemble de points) vers une représentation en indicateurs élémentaires (ensemble de mailles) débouche globalement vers une vision davantage « pixelisée » de la surface et contribue à dilater ou réduire certaines zones présentant des défauts. Les représentations de l'ensemble des indicateurs élémentaires de l'approche A sont données

ci-après. Comme pour la représentation des descripteurs, les échelles en X et en Y ne sont pas les mêmes afin de visualiser l'ensemble des indicateurs élémentaires se rapportant à la nappe 3-D.

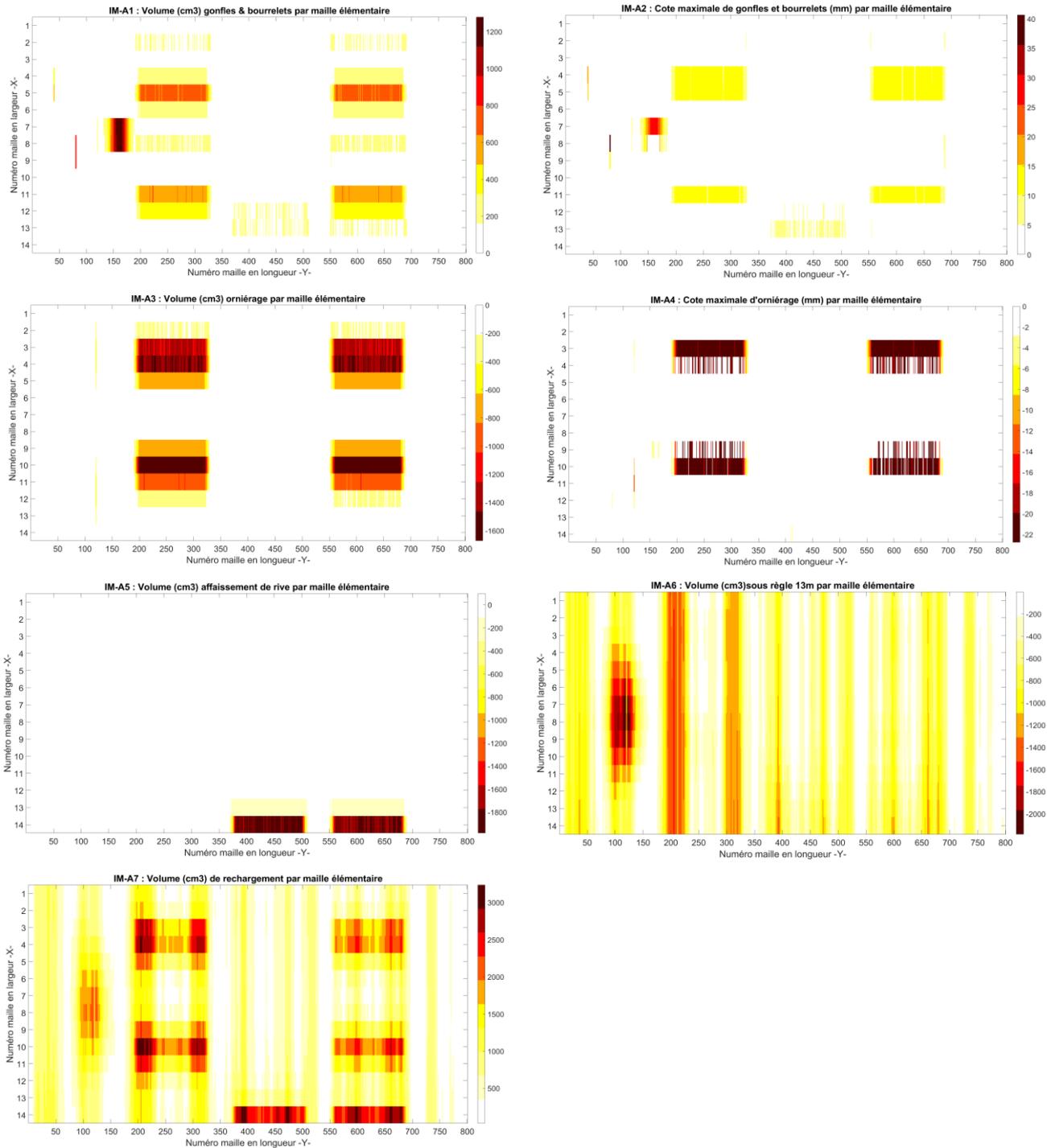


Figure 33. Représentation des indicateurs élémentaires pour l'approche A

## 4.6.2 Application de l'approche B

### ► Représentation des descripteurs

Les descripteurs B1 à B5 étant identiques à ceux de l'approche A (A1 à A5), on représente par la suite les descripteurs B6 à B8 uniquement.

#### 👉 Descripteur B6 (défauts longitudinaux par règle de 13m)

Le descripteur B6 s'intéresse à la détection et à la caractérisation des défauts longitudinaux dont les longueurs d'ondes sont inférieures à 13m. Le résultat de son application sur la surface-test (après correction des défauts localisés) est donné en mode « plan » ; la jauge de couleur indiquant les cotes sous la règle (en mm). À la différence du descripteur A6, celui-ci est directement appliqué à la surface-test après correction des gonfles et bourrelets.

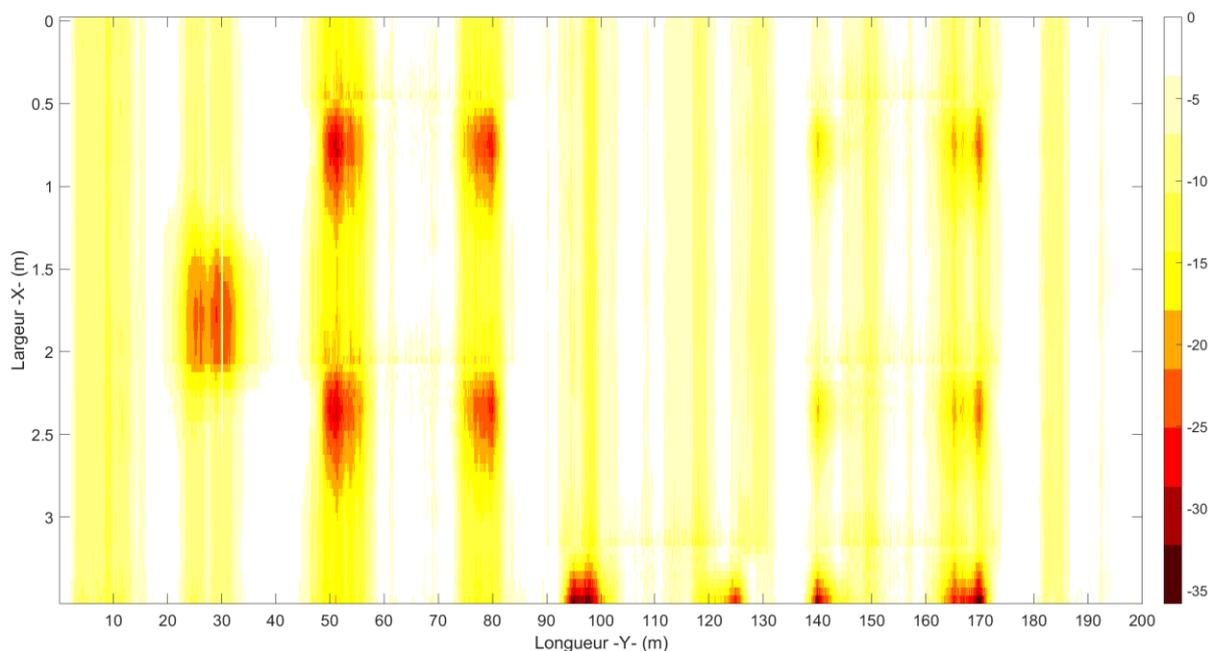


Figure 34. Carte du descripteur B6 (règle 13m)

Comme évoqué pour le descripteur A6, la règle de 13m génère une fausse détection due à la présence du bourrelet transversal. Comme les débuts et fin d'ornières dans la zone [50m ; 80m] s'accompagnent d'une variation de profils longitudinaux, ils ressortent également à travers ce descripteur. Il en va de même pour les débuts et fin d'affaissements en rive (pour les abscisses 95m, 125m, 140m et 170m).

#### 👉 Descripteur B7 (défauts longitudinaux par règle de 3m)

Le descripteur B7 s'intéresse à la détection et à la caractérisation des défauts longitudinaux dont les longueurs d'ondes sont inférieures à 3m. On vise ainsi à isoler les défauts pouvant s'apparenter à des défauts en PO.

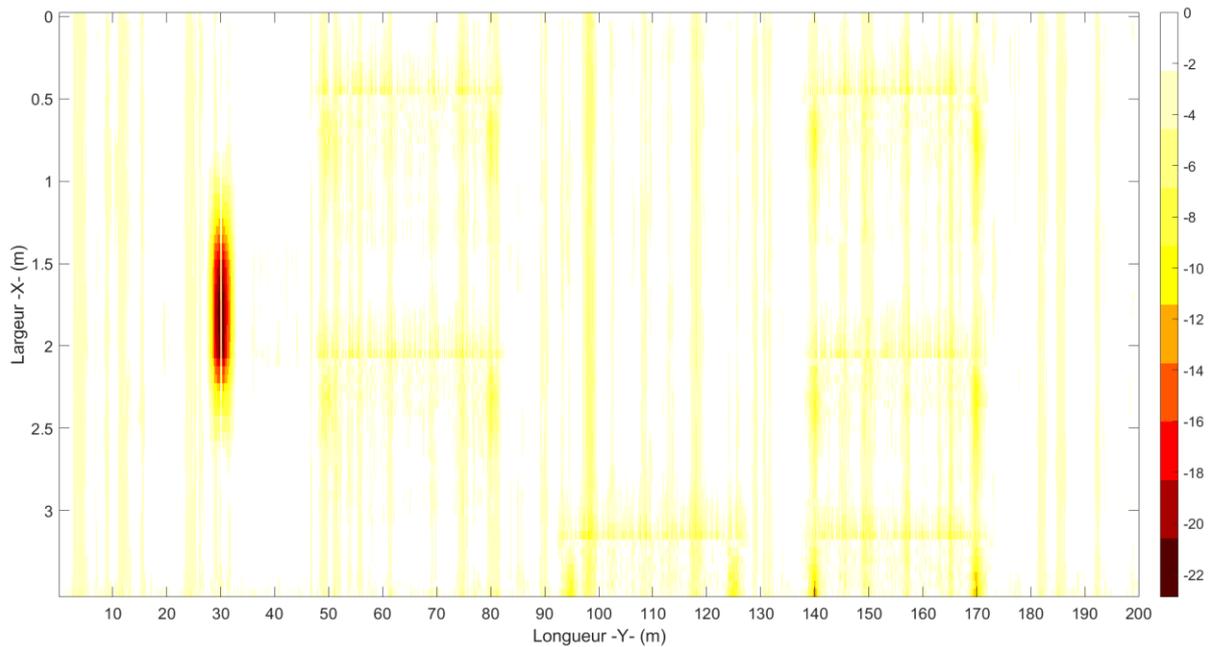


Figure 35. Carte du descripteur B7 (règle 3m)

La règle de 3m est également sensible à la présence du bourrelet transversal comme le montre la concentration de cotes élevées vers l'abscisse 30m.

#### Descripteur B8 (différence des règles de 13m et de 3m)

Le descripteur B8 cherche à isoler les défauts de longueurs d'ondes comprises entre 3 et 13m par la différence des descripteurs B6 et B7 (donc proches des défauts de type MO).

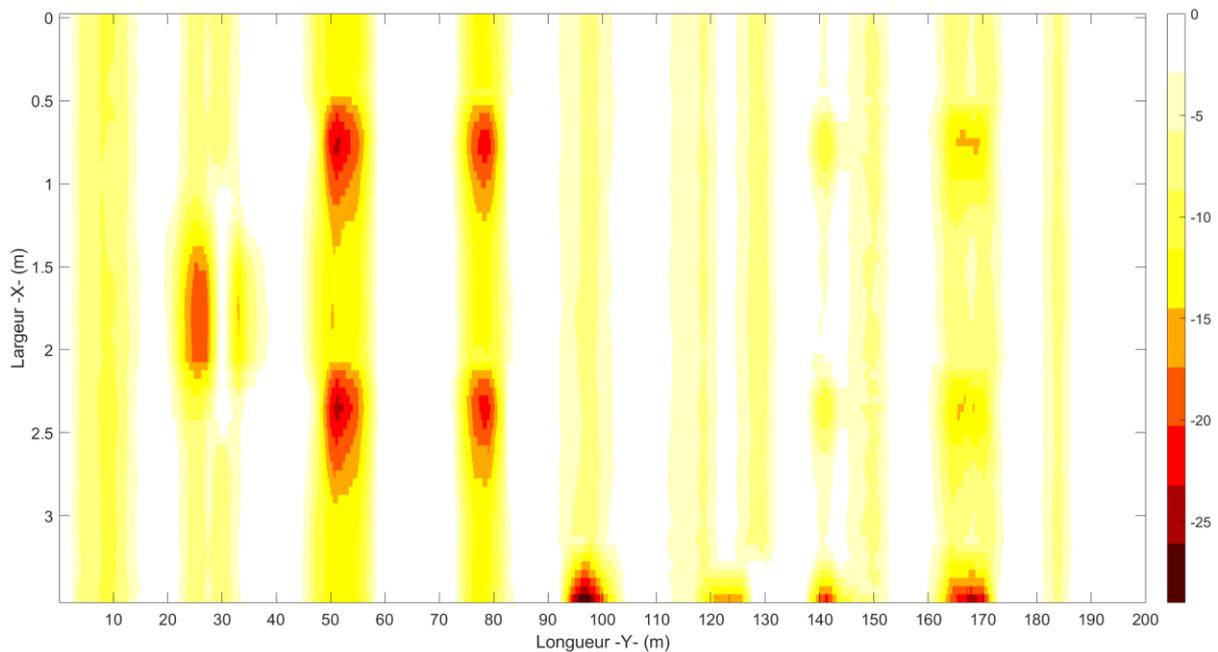


Figure 36. Carte du descripteur B8

### ► Représentation des indicateurs

Les indicateurs élémentaires IM-B6 à IM-B8 correspondant à l'exploitation des descripteurs B6 à B8 sont illustrés ci-après. Les indicateurs IM-B1 à IM-B5 sont identiques à ceux de l'approche A (IM-A1 à IM-A5).

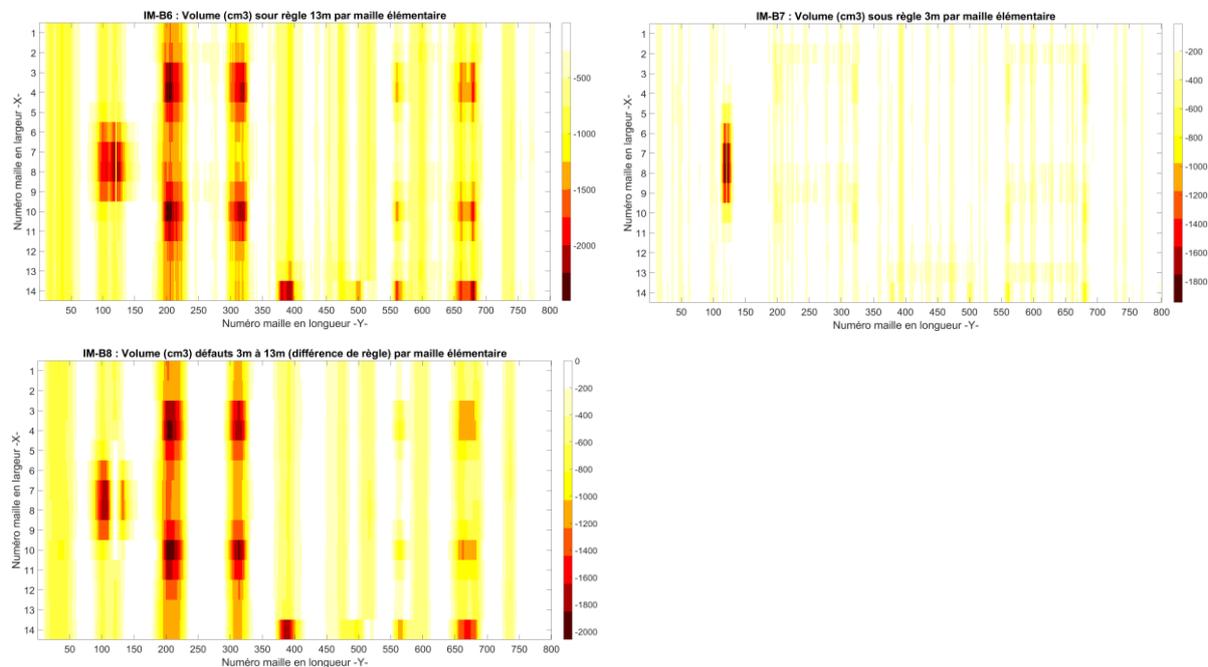


Figure 37. Indicateurs B6, B7 et B8 relatifs aux défauts longitudinaux dans l'approche B

## 4.6.3 Application de l'approche C

### ► Représentation des descripteurs

L'approche C s'appuie sur 3 descripteurs qui correspondent aux outils d'analyse actuels des défauts longitudinaux (méthode NBO).

#### [👉 Descripteur C1 \(défauts de petites ondes\)](#)

Le descripteur C1 correspond aux amplitudes des profils filtrés en PO. Il est représenté en vue 3-D et en représentation cartographique sur les figures suivantes (Figure 38 et Figure 39).

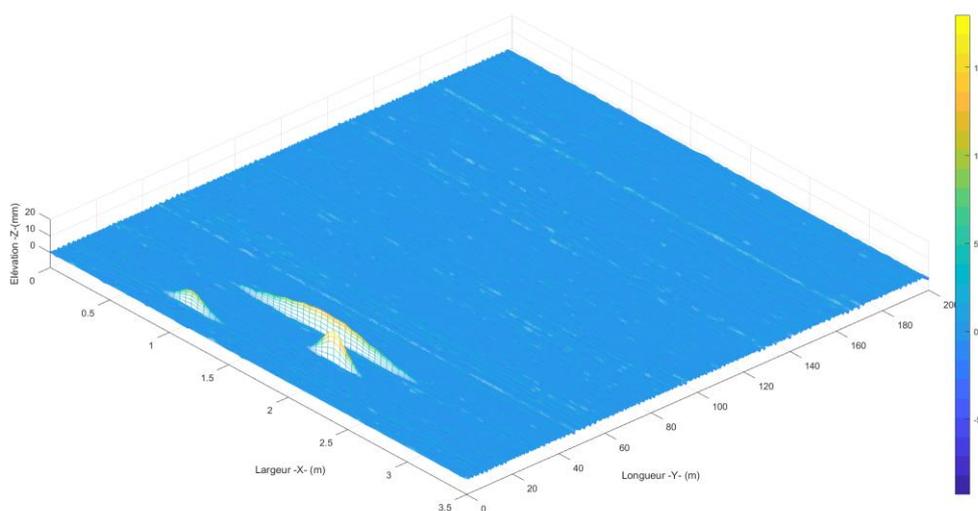


Figure 38. Vue en 3-D du descripteur C1

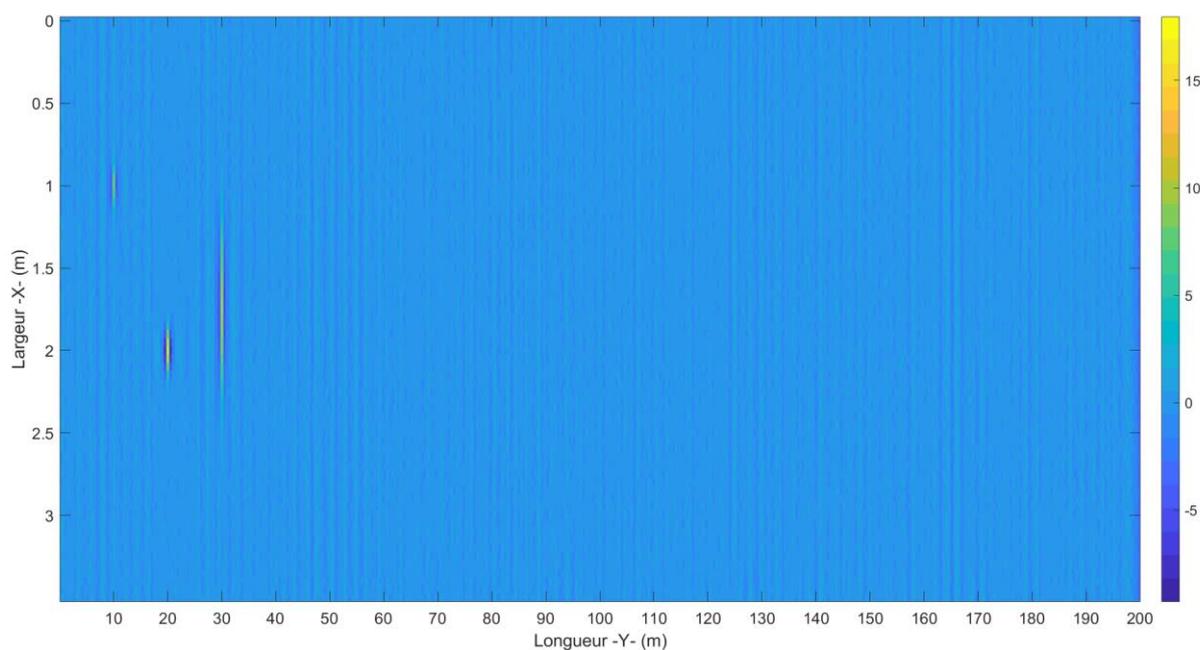
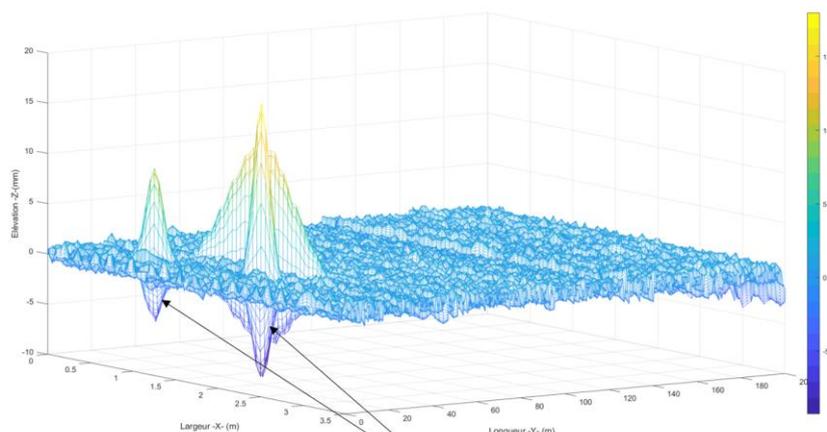


Figure 39. Carte du descripteur C1

La carte du descripteur C1 fait apparaître distinctement les zones où sont situées les gonfles et bourrelets. Une vue différente de ce descripteur relativise néanmoins les capacités de caractérisation de ce type de défauts au moyen des signaux filtrés en PO. En effet, si le filtrage fait bien apparaître la localisation du défaut, il semble générer en revanche des oscillations brèves aux abords du défaut ponctuel qui ne proviennent pas de la surface de départ (Figure 40 et Figure 41). Il conviendra d'être donc vigilant sur ce point et d'étudier plus en détail la réponse du filtre sur d'autres cas. (Figure 40 et Figure 41).



« Fausse déformations » dues au filtrage numérique

Figure 40. Effet du filtrage en PO sur les défauts localisés (gonfles et bourrelets) en vue 3-D

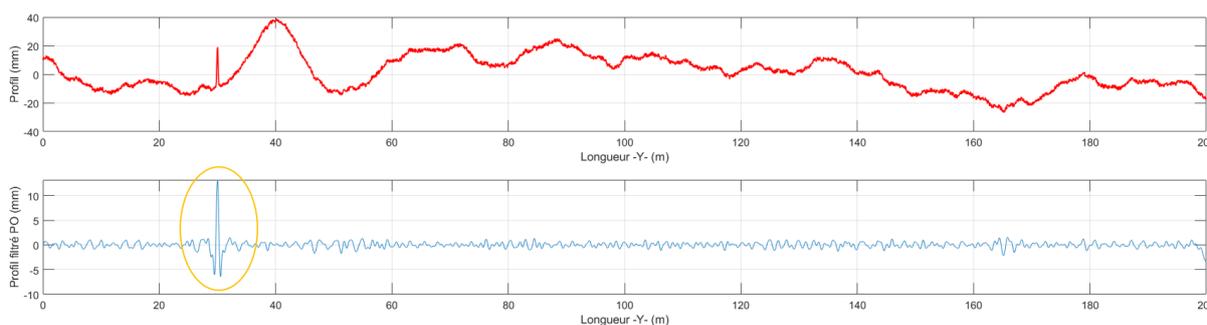


Figure 41. Effet du filtrage en PO sur les défauts localisés (gonfles et bourrelets) en vue linéaire selon Y

👉 Descripteur C2 (défauts de moyennes ondes)

Le descripteur C2 correspond aux amplitudes des profils filtrés en MO. Il est représenté en vue 3-D et en représentation cartographique sur les figures suivantes (Figure 42 et Figure 43).

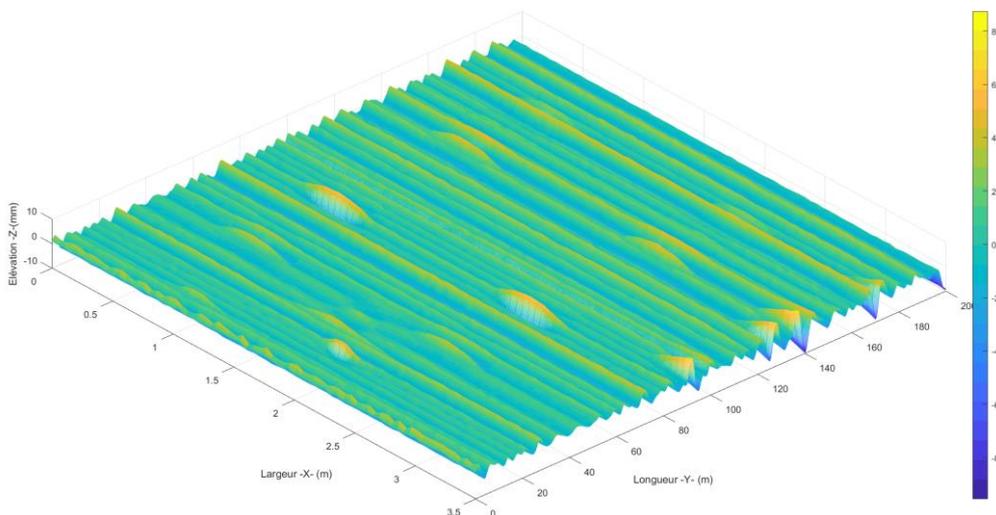


Figure 42. Vue en 3-D du descripteur C2

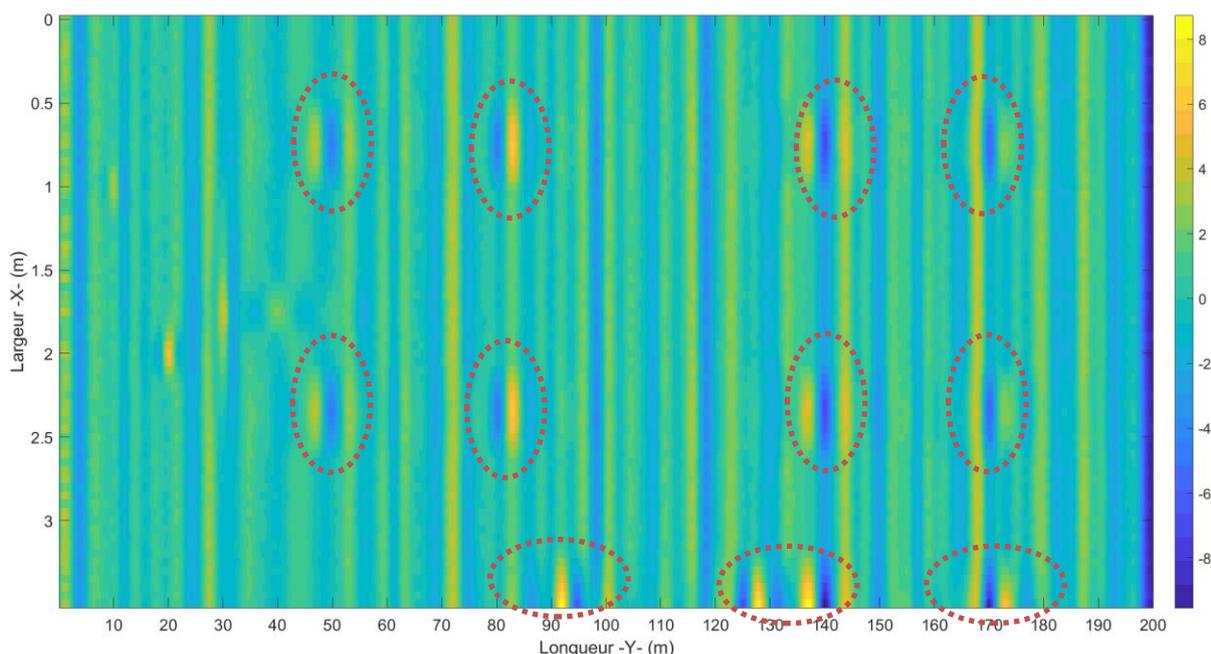


Figure 43. Carte du descripteur C2

Le descripteur C2, en plus de restituer les défauts en MO semble être également sensible aux débuts/fins d’ornières et d’affaissements en rive (« ruptures » des profils en long).

[🔗 Descripteur C3 \(défauts de grandes ondes\)](#)

Le descripteur C3 correspond aux amplitudes des profils filtrés en GO. Il est représenté en vue 3-D et en représentation cartographique sur les figures suivantes ( Figure 44 et Figure 45)

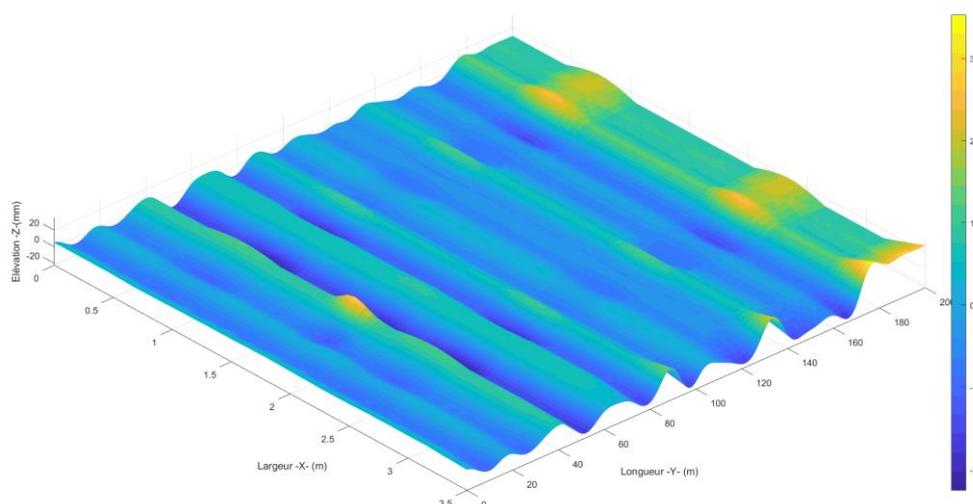


Figure 44. Vue en 3-D du descripteur C3

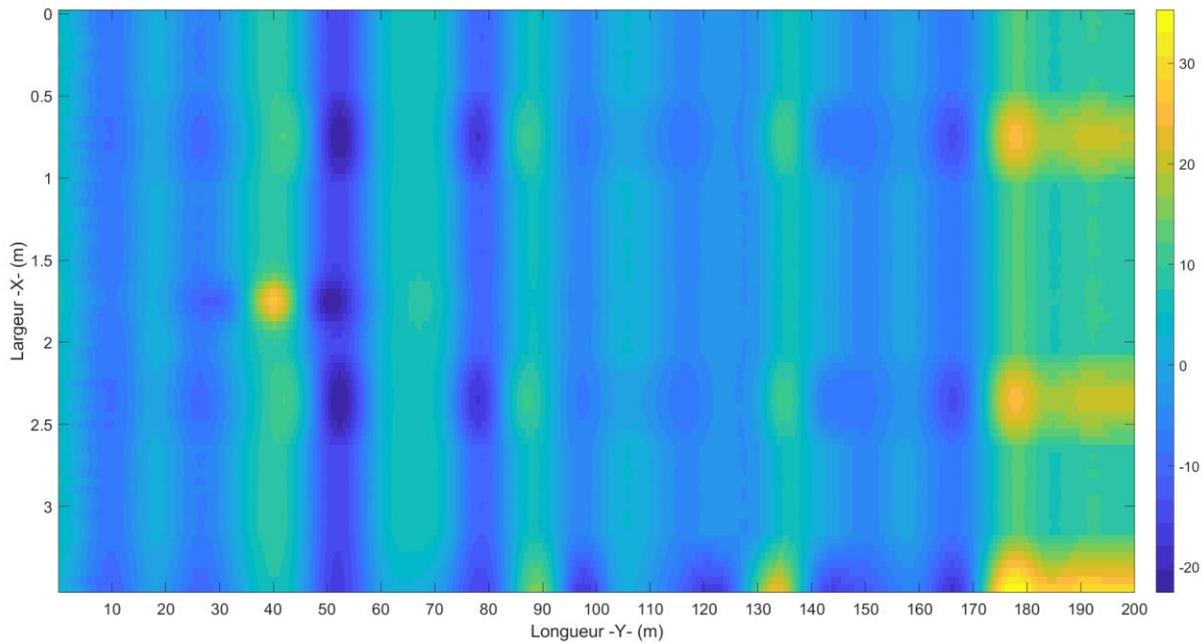
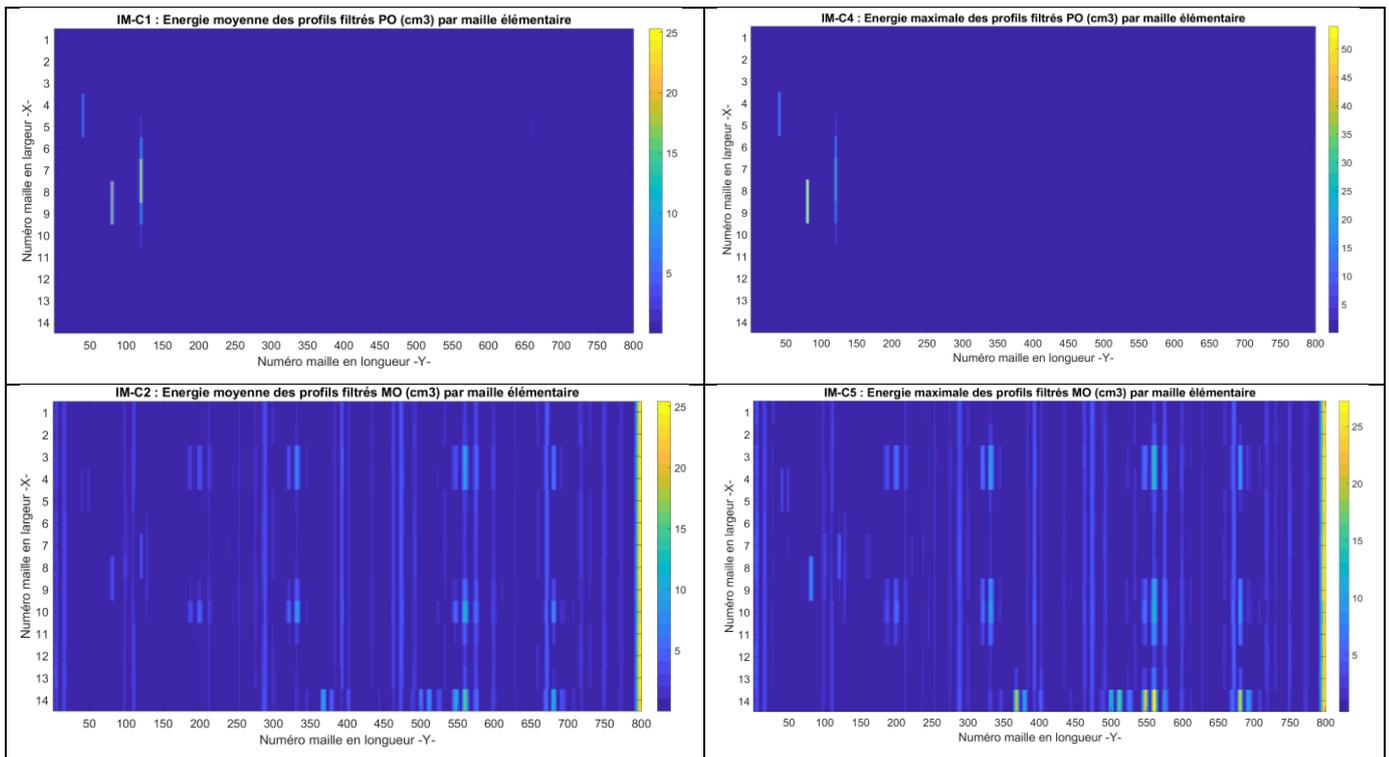


Figure 45. Carte du descripteur C3

Remarque : les illustrations relatives aux descripteurs C1, C2 et C3 peuvent contenir des effets de bord (en début et en fin de la surface) du fait de la courte longueur des profils selon l’axe Y.

► Représentation des indicateurs

Les indicateurs élémentaires IM-C1 à IM-C6 sont illustrés ci-après.



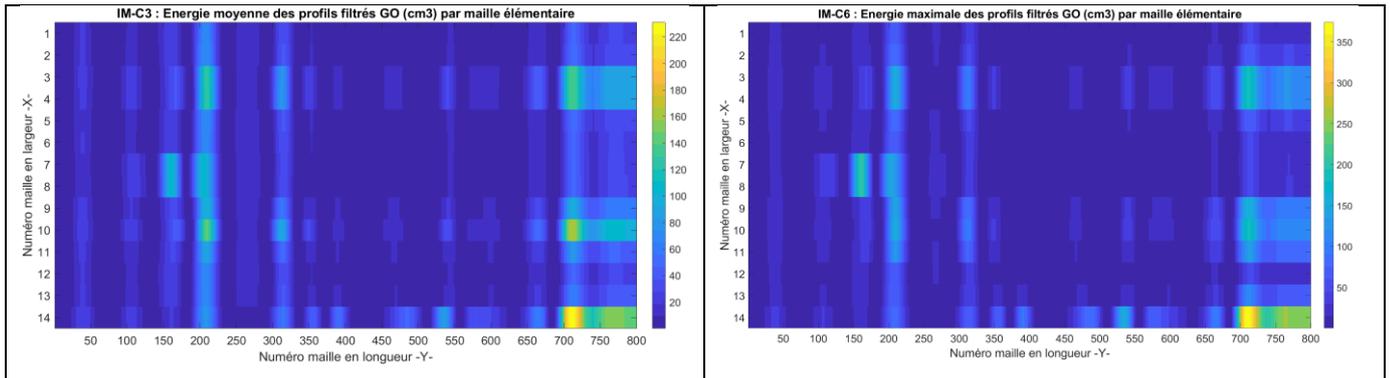


Figure 46. Représentation des indicateurs élémentaires pour l'approche C

► Représentation de la NBO sur la surface-test

En complément des descripteurs et indicateurs de l’approche C, la méthode par NBO a été appliquée sur chacun des 70 profils en long constituant la surface sur les longueurs de segment appropriés (20m pour les NPO, 100m pour les NMO et 200m pour les NGO). On rappelle que cette méthode a été initialement conçue pour localiser et caractériser les défauts d’uni longitudinal mais on peut légitimement se demander si une NBO étendue à l’ensemble d’une surface de chaussée avec un échantillonnage transversal assez fin est sensible à d’autres types de défauts. Sur l’exemple correspondant à la surface-test, on remarque en particulier une sensibilité des NPO envers les défauts localisés (gonfles et bourrelets). Les autres types de défaut semblent plus difficilement perceptibles à travers l’examen des NBO, notamment à travers les MO et GO même si on observe des variations de notes par endroits. Une application sur des surfaces plus longues pourraient peut-être confirmer ou infirmer les choses.

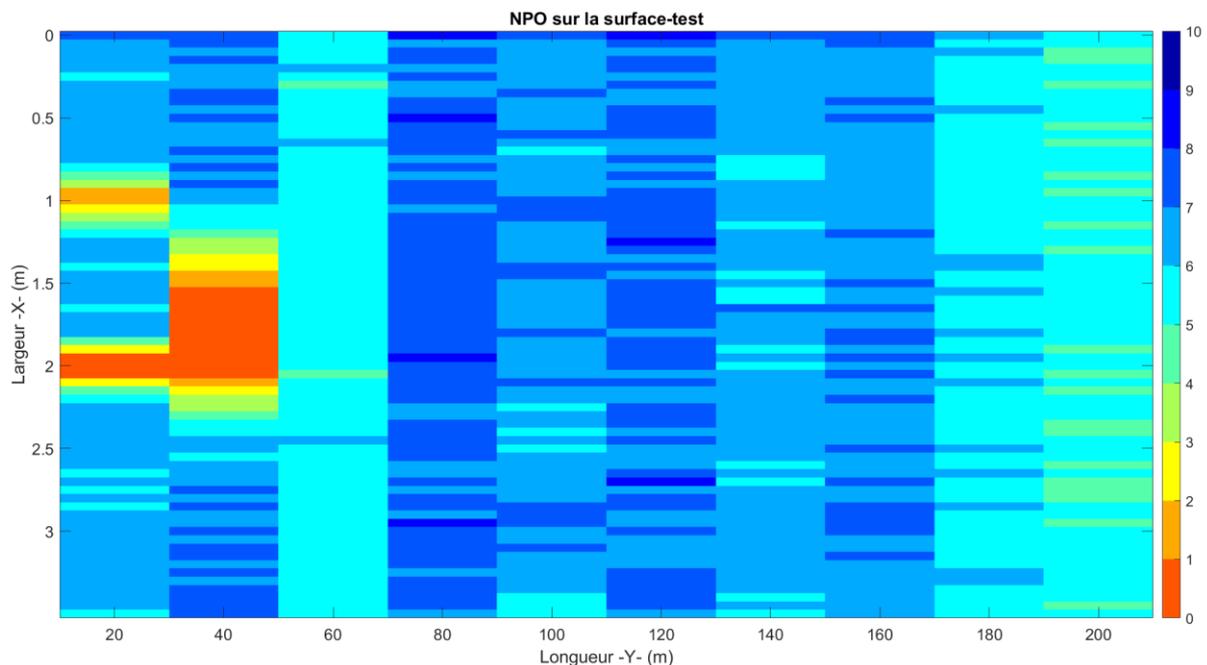


Figure 47. Représentation des notes en petites ondes pour les profils en long de la surface

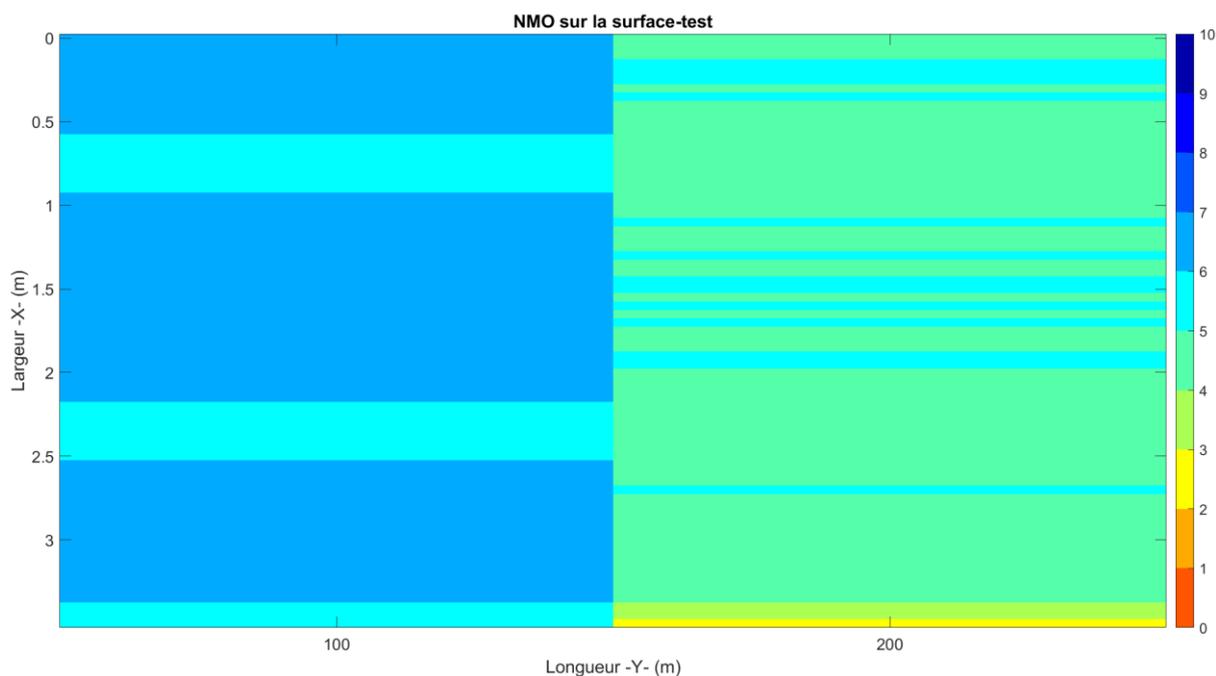


Figure 48. Représentation des notes en moyennes ondes pour les profils en long de la surface

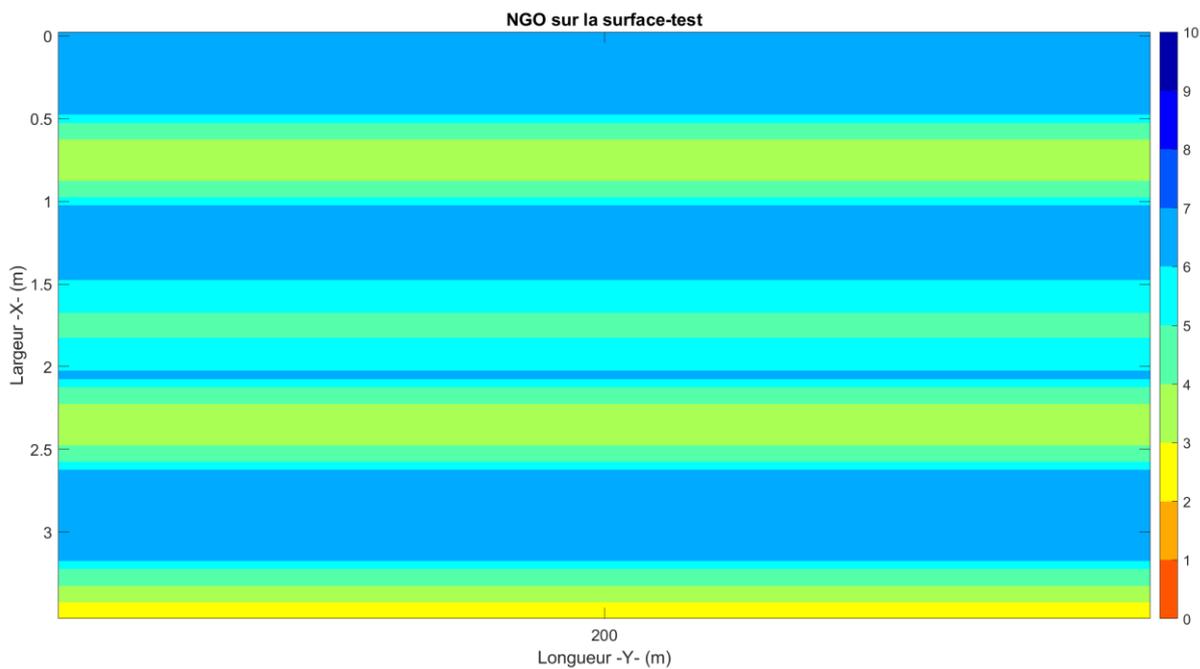


Figure 49. Représentation des notes en grandes ondes pour les profils en long de la surface

## 5 Ouverture sur une méthode d'analyse des déformations de surface opérationnelle depuis 2018 proposée par le Cerema

Le Cerema dispose depuis 2017 de deux appareils équipés de capteurs LCMS, nommés Aigle3D. Sur la période propice aux mesures, à savoir de mi printemps à mi automne, ces appareils sont sollicités en permanence pour réaliser en moyenne 400 km/jour de mesure chacun. Ils interviennent notamment pour le calcul de l'IQRN, ce qui représente 24 000 km de voie à ausculter chaque année pour cette seule prestation.

Lors de la mise au point de la chaîne de traitement, il a notamment fallu conjuguer deux enjeux forts :

- Tirer parti de la densité d'informations relevés par les Aigles3D en caractérisant de manière exhaustive et fine les déformations de surface, chose que les appareils traditionnels ne permettent pas
- Avoir une chaîne de traitement opérationnelle, à même de tenir le rythme d'alimentation en informations brutes imposé par la vitesse d'auscultation des appareils.

Ainsi, il a été fait le choix d'utiliser deux types de descripteurs pour caractériser les déformations de surface :

- L'analyse de l'orniérage par méthode traditionnelle au pas de 1 m qui ne sera pas détaillée ici
- L'analyse de déformations longitudinales basée sur une adaptation de la méthode de notation par bande d'onde

C'est la méthode de calcul de ce deuxième descripteur (dont la méthode C s'inspire) qui est détaillée dans ce chapitre.

### 5.1 Une surface de référence construite par agrégation de profils de référence

La construction de la surface de référence permettant de définir une déformation a été le point central des réflexions. Le questionnement a été : sur quelles parties de la surface de la chaussée se rattacher pour construire une surface de référence ?

Les approches par règle considèrent les points les plus élevés (règle posée sur la chaussée) ou les points les plus bas (règle sous la chaussée) comme référence. Si cette méthode a semblé la plus pertinente pour caractériser les phénomènes d'orniérage compte tenu des enjeux, notamment opérationnels, elle n'a pas été retenue pour l'analyse plus fine des déformations de surface. En effet, les points sur lesquels est posée la règle peuvent être la résultante de déformations. Ces points seraient ainsi considérés, à tort, comme référence, ce qui est à éviter.

Il a été privilégié une approche pouvant être définie comme « médiane », à savoir une approche basée sur la méthode de notation par bande d'onde. Le filtrage du profil longitudinal par bande d'onde permet de calculer un écart à un profil de référence. Les déformations présentant des longueurs d'onde hors bande d'onde analysée ne sont pas prises en compte dans la construction de la référence. Il n'y a pas de choix de points particuliers pour sa construction. Le filtrage a pour conséquence de trouver dans la bande d'onde analysée, un profil de référence minimisant les écarts (Figure 50).

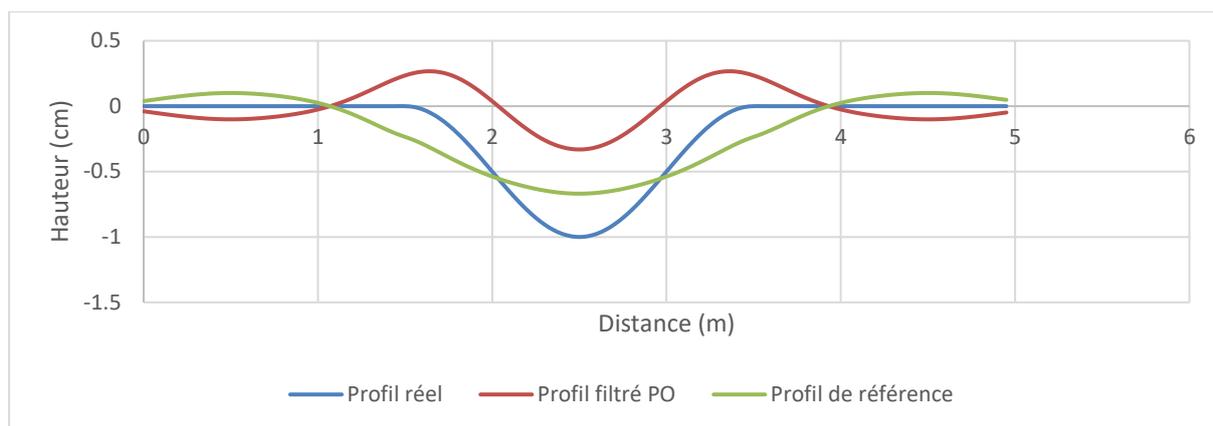


Figure 50. Exemple sur un profil théorique du profil de référence créé en PO

Une certaine surface de référence peut ainsi être considérée par agrégation des profils de référence. Mais il est important de souligner que les déformations transversales peuvent se retrouver dans cette surface de référence de par son principe de construction, si elles se présentent sur un grand linéaire. Il est essentiel de conserver par ailleurs une analyse de l'orniérage par analyse traditionnelle.

## 5.2 L'adaptation de la méthode de notation par bande d'onde

La méthode traditionnelle d'analyse par bande d'onde a été adaptée pour tirer parti de l'évolution matérielle offerte par la technologie LCMS. L'objectif n'a pas été de construire un descripteur similaire, mais de construire un nouveau descripteur basé sur le même principe de filtrage par bande d'onde.

Le principe calculatoire est le suivant :

1. Génération des profils en long standard par les logiciels d'exploitation des LCMS : échantillonnage transversal par médiane sur 50 mm, un profil tous les 10 cm transversalement.
2. Echantillonnage longitudinal par médiane sur 25 mm pour les petites ondes, 75 mm pour les moyennes ondes et 125 mm pour les grandes ondes.
3. Filtrage passe bas de type butterworth effectué dans les deux sens sur les deux longueurs d'onde limites, puis différence entre les deux profils résultats.
4. Répétition du filtrage à l'identique (nécessaire en raison du non filtrage des basses fréquences sur le signal d'entrée)
5. Calcul de l'énergie au pas de 50 cm (intégration des amplitudes au carré)
6. Restitution des niveaux d'énergie sous forme cartographique par maillage de 50 cm de long et 10 cm transversalement
7. Lissage par moyenne glissante des résultats sur un nombre de maille représentant environ une demi longueur d'onde maximale (1.5 m pour les petites ondes et 5.5 m pour les moyennes ondes) afin de gommer le phénomène d'oscillation des résultats (Figure 51).

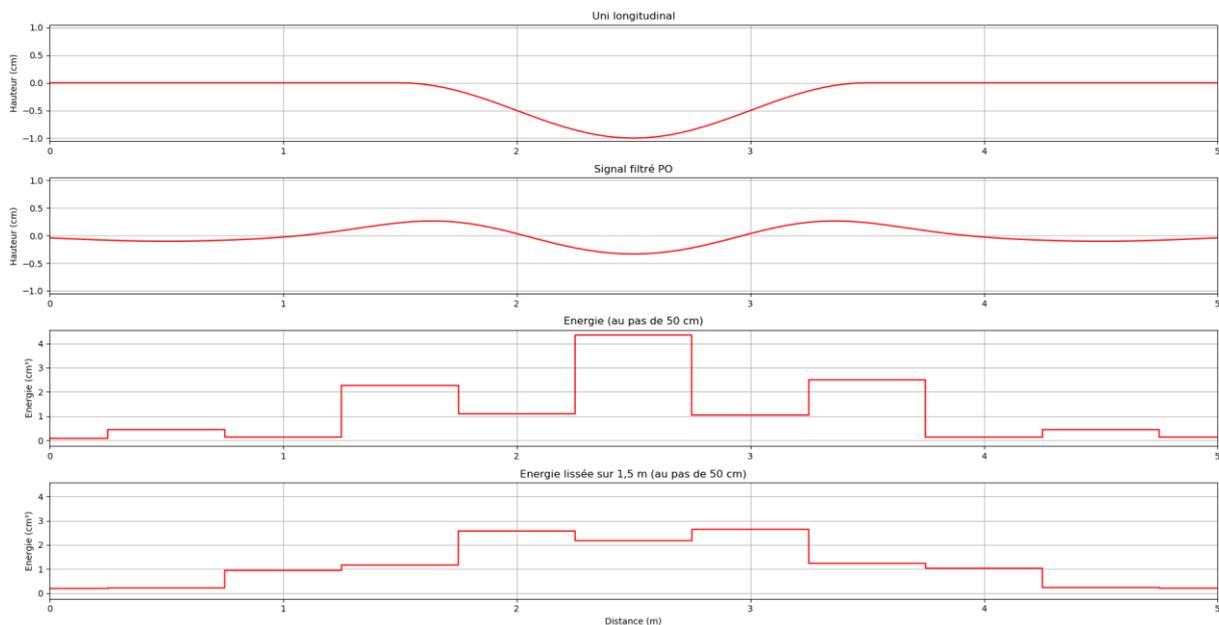


Figure 51. Impact du filtrage et du lissage sur un signal théorique (de haut en bas : profil théorique, profil après filtrage PO, résultat de l'intégration en énergie au pas de 50 cm, lissage de l'énergie)

L'analyse d'un profil permet de caractériser l'intensité, la dimension longitudinale et le positionnement d'une déformation. L'analyse de l'ensemble des profils permet en outre d'ajouter une composante spatiale à l'analyse, la dimension transversale. Par contre, cette méthode ne permet pas de connaître le sens de la déformation (affaissement ou gonfle) ou le profil exact.

### 5.3 L'analyse spatiale pour caractériser l'état de la chaussée

A partir des descripteurs élémentaires maillant l'intégralité de la zone mesurée, il a été construit différents indicateurs permettant de caractériser l'état de la chaussée.

Les descripteurs finaux sont construits à partir d'une analyse spatiale par bande d'onde et reposant sur les principes suivants :

- Recherche des objets élémentaires dépassant un certain seuil d'intensité d'énergie (seuil d'alerte)
- Agrégation des objets concomitants et sommation des niveaux d'intensités
- Sélection des objets agrégés dépassant un second seuil d'intensité d'énergie.

Cette analyse a pour objectif d'analyser à la fois la composante d'intensité ponctuelle de la déformation mais également son intensité globale. Les petites déformations localisées ne seront pas prises en compte, alors que les grosses déformations localisées ou les petites déformations étendues le seront.

Le résultat de l'analyse est un ensemble d'objets construits dynamiquement depuis les objets élémentaires, avec, suivant les cas, des attributs indiquant un niveau d'intensité ou une caractérisation (Figure 52). Il y a donc deux composantes dans le résultat final : l'étendue géographique du défaut caractérisé et une intensité/caractérisation. Il n'y a pas usage d'un pas fixe d'agrégation ou d'analyse.

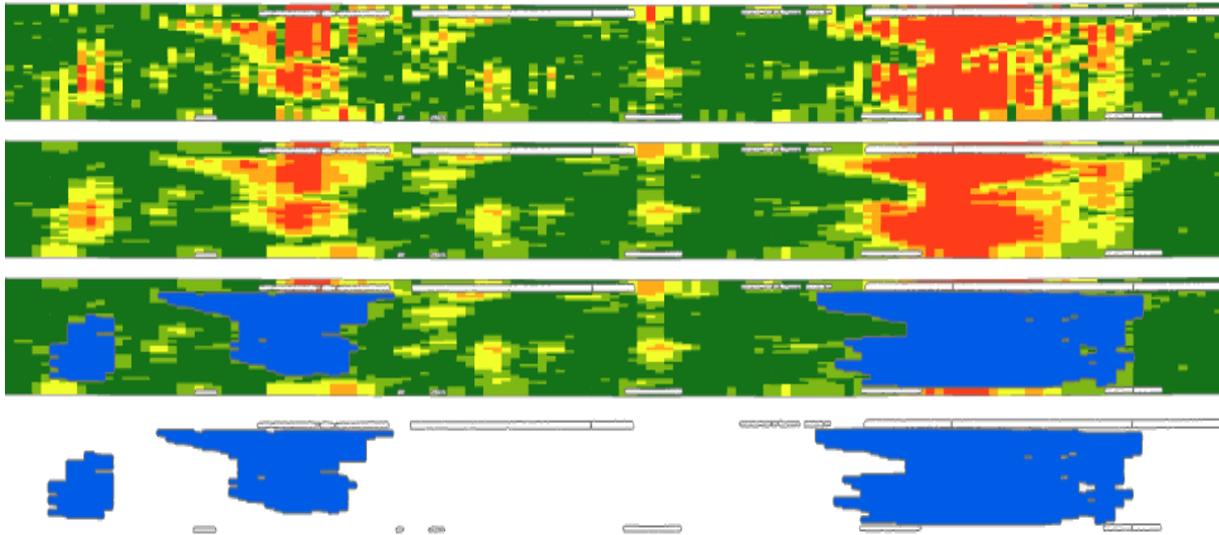


Figure 52. Différentes phases d'analyse de l'uni longitudinal en petites ondes en surfacique (de haut en bas : énergie en PO au pas longitudinal de 50 cm, énergie en PO lissé à 1,5 m au pas longitudinal de 50 cm, analyse spatiale sur les PO, indicateur résultat c'est à dire les zones présentant des défauts significatifs d'uni en PO)

Enfin, le croisement géographique des différents descripteurs finaux permet de construire des indicateurs d'état, indiquant dynamiquement l'état de la chaussée.

## 5.4 Résultats opérationnels et perspectives

Les choix techniques faits ont permis de passer rapidement à un usage opérationnel. Les vitesses de traitement et la structure informatique permettent de suivre le rythme imposé par l'exploitation des Aigles3D. Fin 2021, plus de 80 000 km ont été exploités suivant cette méthodologie

Dans la chaîne de traitement des appareils Aigles3D, cette analyse des déformations de surface est aujourd'hui clairement le facteur limitant : la vitesse de calcul de ce seul descripteur est approximativement 4 fois plus lent que la vitesse de calcul du reste des descripteurs. Ceci est toutefois contrebalancé par l'importance des informations obtenues par cette analyse pour évaluer l'état de la chaussée.

Les développements sur cette méthodologie continuent afin d'améliorer cette méthode, notamment sur un point particulier, la génération des profils en long. En effet, les traces sur lesquelles les profils sont localisées dans le référentiel curviligne du véhicule. C'est à dire :

- que les profils sont générés parallèlement à la trace du véhicule : si le véhicule louvoie, les profils ne seront pas de vrais profils en long (prise en compte d'une composante transversale)
- que l'abscisse curviligne du profil est celle de la roue où se trouve l'œdomètre : en cas de virage, il y a un effet de compression/dilatation qui se produit, ce qui modifie les longueurs d'ondes relevées.

Un prototype de traitement à partir de nuages de points géographiques issus de l'Aigle3D, permettant de s'astreindre du référentiel du véhicule pour générer les profils en long, est en cours d'élaboration au Cerema.

## 6 Conclusion

### 6.1 Bilan des travaux réalisés

Les travaux réalisés dans ce projet se sont concentrés sur les possibilités d'analyse des déformations de chaussée depuis des mesures fournies par des appareils de type scanner. Un focus particulier a été mis sur l'appareil LCMS car il est le principal type d'appareil mis en œuvre dans le projet DVDC. Toutefois, le groupe de travail a essayé d'élargir au maximum ses réflexions en faisant en sorte que les méthodes proposées soient applicables pour des appareils de même catégorie.

La première phase des travaux avait pour objectif de vérifier que la réponse d'un appareil de type LCMS dans le champ des indicateurs d'état usuels était proche de celle des matériels de référence tant pour la caractérisation des défauts transversaux que longitudinaux. Suite à la disponibilité des jeux de données, seule une étude portant sur les défauts de profil en long a pu être menée. Elle a permis de confronter la réponse d'un LCMS face à celle d'un MLPL sur un large ensemble de segments de sorte à obtenir une vision statistique des résultats. On rappelle une fois de plus que cette action ne consistait pas à qualifier un appareil en particulier mais à estimer sa réponse globale par rapport aux indicateurs routiers traditionnellement utilisés. Une qualification mériterait en effet de travailler dans un environnement parfaitement maîtrisé pour la prise de mesures d'une part et de pousser l'analyse à l'échelle du signal d'autre part. Les résultats de ces travaux montrent une corrélation statistique relativement forte entre les valeurs des indicateurs d'uni longitudinal fournies par le LCMS comparativement à celles du MLPL à condition de prendre quelques précautions dans le traitement (en particulier pour le filtrage des PO).

Dans la deuxième phase des travaux, le groupe de travail a proposé plusieurs lignes méthodologiques pour aboutir à une analyse surfacique des déformations. Devant la difficulté de disposer d'une surface de chaussée 3-D « réelle » provenant de la combinaison des mesures longitudinales et transversales *in situ* (cette opération n'est effectivement pas triviale), l'application des méthodes proposées a été réalisée sur des surfaces « virtuelles » ou « artificielles » qui ont été générées par ordinateur. L'avantage de cette démarche est de pouvoir appliquer les méthodes d'analyse sur des surfaces que l'on connaît parfaitement et que l'on peut modifier si besoin ; l'inconvénient est bien évidemment relatif aux limites de réalisme par rapport à une vraie surface de chaussée.

Les méthodes d'analyse développées dans ce projet se basent sur un ensemble de descripteurs qui sont sensés permettre une détection et une caractérisation de certains défauts de chaussée sans faire de distinction par rapport au type de réseau ausculté à ce stade. L'étude s'est ainsi focalisée sur un ensemble de défauts localisés ou présents sur de plus grandes longueurs : gonfles, bourrelets, ornières, affaissements en rive ainsi que défauts de planéité longitudinale correspondant approximativement à l'uni. Les descripteurs, qui correspondent dans la plupart des cas à des élévations (ou cotes) sont appliqués à chaque point de mesure constituant la surface de chaussée. La proposition d'indicateurs élémentaires permet d'assurer un changement d'échelle en passant d'une information portée par un point de mesure à une information portée par une maille c'est-à-dire sur une surface de quelques décimètres carrés. L'utilisation d'un indicateur élémentaire permet d'agréger ainsi la masse d'informations dégagée par les méthodes d'analyse et de faciliter ainsi l'exploitation des mesures par rapport à une approche « surveillance de réseau » (une analyse basée uniquement sur les descripteurs pourrait convenir à des approches de type diagnostic). L'application d'un maillage à la surface de la chaussée pour synthétiser les informations s'accompagne d'un certain nombre de problèmes qui n'ont pas été traités ici (ex : calage précis et géolocalisé du maillage sur la surface de chaussée, évolution du maillage face à un rétrécissement/élargissement de chaussée, disposition des mailles en virage, etc.). De même, des indicateurs calculés sur des segments plus longs (ex : à l'échelle d'une section de plusieurs dizaines de mètres de long) permettant une analyse de type « macro-échelle » n'ont pas été proposés à ce stade du projet ; l'idée d'une différenciation par demi-largeur gauche/droite sur une section de 10m a cependant été évoquée par le groupe.

Initialement, le groupe de travail avait songé à utiliser une « nappe 3-D de référence » (parfaitement plane ou quasi-plane) pour bâtir les méthodes d'analyse des déformations. Cette nappe de référence, ou nappe idéale, aurait été « plaquée » sur la surface à analyser de sorte à dégager les déformations dues à un excès ou à un manque d'élévation. Néanmoins, devant la difficulté à définir et positionner une telle nappe, le groupe de travail s'est orienté vers des méthodes d'analyse « pas à pas », basées la plupart du temps sur l'utilisation de règles de longueurs différentes que l'on fait glisser dans les sens longitudinaux et transversaux. De cette manière, on opère un balayage sur l'intégralité de la surface de chaussée et on contourne la problématique de la nappe de référence.

Les résultats obtenus sur les surfaces virtuelles sont intéressants car ils semblent couvrir les objectifs fixés par rapport à la détection et la caractérisation des défauts ciblés. Ces résultats doivent être confirmés par des applications sur quelques surfaces réelles qui sont en cours de construction. Par ailleurs, des tests réalisés sur un grand panel de surfaces permettront de dégager des seuils vis-à-vis des descripteurs et des indicateurs élémentaires. Ces seuils permettront d'automatiser la détection des défauts et de définir des niveaux de gravité.

Par ailleurs, dans le cadre de la refonte de la méthodologie d'évaluation des chaussées du réseau routier national, le Cerema a développé une méthode d'analyse des déformations de surface, opérationnelle depuis 2018. Cette méthode présentée dans le chapitre 5 s'appuie sur la construction d'une surface dite de référence (construite par agrégation de profils de référence), une adaptation de la méthode traditionnelle de notation par bande d'onde et une analyse spatiale visant à caractériser l'état de la chaussée. Cette méthode mise en œuvre sur plus de 80 000 km, couplée aux évolutions technologiques à venir permet d'envisager à court terme une analyse encore plus pertinente des déformations surfaciques.

## 6.2 Perspectives

Plusieurs prolongements sont envisagés par rapport au niveau d'avancement des méthodes d'analyse. Certains de ces prolongements, dont la liste est donnée ci-après, pourront éventuellement être traités dans une quatrième tranche du projet DVDC.

- ▶ Proposition d'une méthode pour reconstruire une surface de chaussée 3-D depuis des lignes de mesures longitudinales et transversales fournies par le LCMS ; cette méthode s'intéresserait également à la façon de retirer les attributs géométriques contenus dans le nuage de points initial.
- ▶ Application des méthodes d'analyse des déformations sur des surfaces réelles ; la société Technologies Nouvelles et le CEREMA ont effet proposé en fin de projet des surfaces de chaussées réelles obtenues depuis des mesures LCMS qu'il serait intéressant de traiter. Ces surfaces permettront de confronter les différentes approches et leur niveau « d'opérationnalité ».
- ▶ Renforcement des méthodes proposées par la détermination de seuils appliqués aux descripteurs et indicateurs élémentaires. Ce travail permettra de tendre vers une détection automatisée des défauts.
- ▶ Exploration de nouvelles méthodologies d'analyse fondées non plus sur un maillage de la surface de chaussée mais sur des « objets » ;
- ▶ Une analyse plus poussée de la réponse d'un LCMS vis-à-vis de la mégatexture, de l'analyse dans la bande PO, du QSPO, etc.

## REFERENCES

- [1] Méthode d'essai des lpc n°46-2, Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques.
- [2] Norme EN 13036-5, Road and airfield surface characteristics (Part5).
- [3] Méthode d'essai des lpc n°52, Catalogue des dégradations de surface de chaussée.
- [4] Méthode d'essai des lpc n°49, Mesure et interprétation du profil en travers