



# **Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées**

**Grundlagen zur Revision der Normen über die  
Messung und Beurteilung der Fahrbahnebenheit**

**Base works for the updating of the standards for  
measurement and appreciation of the evenness**

**SACR SA, Zürich**  
**Bureau d'ingénieurs et laboratoire routier**  
**Alain Jacot, Ing. dipl. EPFL**

**Infralab SA, Romanel sur Lausanne**  
**Ingénieurs conseils et laboratoire routier**  
**Robert Braber, Ing. dipl. HTS**  
**Wolf-Henrik v. Loeben, Dr.-Ing.**

**Mandat de recherche VSS 2004/703 sur demande de l'Association  
suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)**

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 "Clôture du projet", qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade. Ciò non vale per il modulo 3 «conclusione del progetto» che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e pertanto impegna soltanto questa.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) commissioned by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



# **Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées**

**Grundlagen zur Revision der Normen über die  
Messung und Beurteilung der Fahrbahnebenheit**

**Base works for the updating of the standards for  
measurement and appreciation of the evenness**

**SACR SA, Zürich**  
**Bureau d'ingénieurs et laboratoire routier**  
**Alain Jacot, Ing. dipl. EPFL**

**Infralab SA, Romanel sur Lausanne**  
**Ingénieurs conseils et laboratoire routier**  
**Robert Braber, Ing. dipl. HTS**  
**Wolf-Henrik v. Loeben, Dr.-Ing.**

**Mandat de recherche VSS 2004/703 sur demande de l'Association  
suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)**

# Impressum

## Service de recherche et équipe de projet

### Direction du projet

Alain Jacot

### Membres

Robert Braber

Wolf-Henrik v. Loeben

## Commission technique responsable

Commission technique 7: Gestion de l'entretien

## Commission de suivi

### Président

Markus Grieder

### Membres

Martin Horat

Luzia Seiler

Eric Simond

Yvan Ramel

## Auteur de la demande

Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

## Source

Le présent document est téléchargeable gratuitement sur <http://www.mobilityplatform.ch>

# Table des matières

	<b>Impressum</b>	<b>4</b>
	<b>Résumé</b>	<b>7</b>
	<b>Zusammenfassung</b>	<b>8</b>
	<b>Summary</b>	<b>9</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b>	<b>10</b>
1.1	Situation actuelle	10
1.2	Mandat et objectifs	11
<b>2</b>	<b>METHODES DE MESURE</b>	<b>12</b>
2.1	Relevés profilométriques	12
2.1.1	Relevé profilométrique laser	12
2.1.2	Relevé profilométrique avec pendule inertiel	14
2.1.3	Relevé profilométrique avec accéléromètre et laser	15
2.2	Relevés d'un indicateur de planéité	17
2.2.1	Mesure de variations angulaires	17
2.2.2	Mesure géométrique dynamique	18
2.2.3	Mesure de profil approché	18
<b>3</b>	<b>APPAREILS DE MESURE</b>	<b>19</b>
3.1	Appareils de relevé profilométrique	19
3.1.1	Relevé profilométrique laser	19
3.1.2	Relevé profilométrique avec pendule inertiel	20
3.1.3	Relevé profilométrique avec accéléromètre et laser	21
3.2	Appareils de relevé d'un indicateur de planéité	22
3.2.1	Mesure de variations angulaires	22
3.2.2	Mesure géométrique dynamique	23
3.2.3	Mesure de profil approché	23
<b>4</b>	<b>METHODES D'EXPLOITATION</b>	<b>24</b>
4.1	Introduction	24
4.2	Représentation du profil des défauts d'uni	24
4.3	Exploitation du profil en bandes d'ondes	26
4.3.1	Notes d'uni APL	26
4.3.2	Exploitation en bandes d'octaves	30
4.4	Densité spectrale de puissance	30
4.5	International Roughness Index (IRI)	34
4.6	AUN – Valeur globale des défauts d'uni	36
4.7	LWI - Indice des effets induits / Filtre complexe	37
4.8	Le profil longitudinal pondéré (Bewertetes Längsprofil)	39
<b>5</b>	<b>EHELLES D'APPRECIATION</b>	<b>41</b>
5.1	Introduction	41
5.2	Exploitation du profil en bandes d'ondes	41
5.2.1	Appréciation en notes d'uni APL	41
5.3	Appréciation des valeurs de densité spectrale	44
5.4	Appréciation des valeurs d'IRI	45
5.5	Appréciation des valeurs AUN	47
5.6	Appréciation des valeurs LWI	47
5.7	Appréciation des valeurs du profil pondéré	49

<b>6</b>	<b>RECOMMANDATIONS POUR LA NORMALISATION</b>	<b>50</b>
<b>6.1</b>	<b>Méthodes de mesure</b>	<b>51</b>
<b>6.2</b>	<b>Méthodes d'exploitation</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>PLANEITE TRANSVERSALE</b>	<b>53</b>
<b>7.1</b>	<b>Méthodes de mesure statiques</b>	<b>53</b>
<b>7.1.1</b>	<b>Profilographe manuel</b>	<b>53</b>
<b>7.1.2</b>	<b>Latte de 4 mètres</b>	<b>53</b>
<b>7.2</b>	<b>Méthodes de mesures dynamiques</b>	<b>53</b>
<b>7.2.1</b>	<b>Transducteurs ultrasoniques</b>	<b>53</b>
<b>7.2.2</b>	<b>Mesures par lasers ponctuels</b>	<b>54</b>
<b>7.2.3</b>	<b>Relevé d'une trace laser</b>	<b>55</b>
<b>7.3</b>	<b>Détermination de la profondeur d'ornière</b>	<b>56</b>
<b>7.3.1</b>	<b>Méthode « WIRE » selon SN 640'520a</b>	<b>56</b>
<b>7.3.2</b>	<b>Méthode « WIRE » adaptée</b>	<b>56</b>
<b>7.3.3</b>	<b>Méthode « Straightedge »</b>	<b>58</b>
<b>7.3.4</b>	<b>Influence des méthodes selon le type du profil</b>	<b>58</b>
<b>7.4</b>	<b>Détermination de la profondeur d'eau théorique</b>	<b>59</b>
	<b>Abréviations</b>	<b>60</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>61</b>
	<b>Clôture du projet</b>	<b>63</b>
	<b>Index des rapports de recherche en matière de route</b>	<b>66</b>

## Résumé

Les développements réalisés ces 30 dernières années dans le domaine du relevé et de l'évaluation de la planéité des couches de roulement routières et aéroportuaires sont conséquents et les normes nationales y relatives basées sur une méthodologie de l'année 1977 ne sont plus adaptées pour les besoins actuels du contrôle de la qualité des couches en place. Le but de ce travail de recherche est de fournir les bases conceptuelles à la révision des normes suisses en ce qui concerne la méthodologie des relevés d'uni et les approches possibles pour leur évaluation.

En ce qui concerne les différents systèmes de relevé de l'uni longitudinal, et au vu des impératifs dictés par la norme EN 13036-5 sur le domaine des longueurs d'ondes à exploiter et la flexibilité des méthodes d'évaluation pouvant être employées, seuls les appareils permettant de réaliser un enregistrement profilométrique des défauts d'uni par rapport à un profil idéal peuvent être valablement considérés.

L'indice d'uni actuellement le plus utilisé au monde est l'IRI. Il s'agit d'un indice global qui ne permet pas la distinction entre les différentes familles d'ondes. Néanmoins il s'est avéré que l'IRI est facile à calculer et à interpréter et qu'il qualifie bien la planéité longitudinale quant au confort de roulement d'une chaussée.

Dès qu'il a été techniquement possible de disposer d'un enregistrement complet du pseudo-profil de la route dans toute la gamme des longueurs d'ondes nécessaire à son appréciation (0.5 à 50 m selon la norme EN 13036-5), on a pu caractériser ce dernier par « l'énergie par bandes d'ondes » du signal représentatif du profil des défauts d'uni. Les études réalisées en France durant les années quatre-vingts permettent le traitement et le filtrage du signal suivant trois gammes d'ondes (OC : 0.8 – 3.2 m / OM : 3.2 – 13 m / OL : 13 – 45 m). La qualité de la surface de la chaussée, du point de vue du confort et de la sécurité, est exprimée avec une notation allant de 0 à 10 pour chacune de ces bandes. Cette caractérisation de l'uni par une « notation par bandes d'ondes (NBO) » tend à se généraliser en Europe. Ce type d'indicateur, outre sa relation claire avec le confort et la sécurité d'utilisation de la route, permet aussi d'orienter les procédures de construction pour obtenir un meilleur uni de la surface de la chaussée. Cet indice, comme l'IRI, peut être calculé sur la base de tout relevé profilométrique selon EN 13036-5.

La nouvelle méthode du profil longitudinal pondéré est actuellement dans une phase intense de tests au niveau européen. De part la pondération différentielle du signal sur 9 bandes de longueurs d'ondes, ce qui de facto rend la fonction de transfert volontairement non linéaire, elle semble avoir l'aptitude de très bien décrire tous les différents types de défauts de planéité longitudinale : ondulations de longueurs d'ondes et d'amplitudes variables, défauts aléatoires, défauts isolés. Certains pays comme l'Allemagne et l'Autriche ont déjà annoncé vouloir en faire à court terme leur méthode officielle.

## Zusammenfassung

Im Bereich der Ebenheit von Fahrbahnen und Flugflächen haben sich in den letzten 30 Jahren die Zustandserhebungstechniken und die entsprechenden Bewertungsmethoden merklich weiterentwickelt. Die in der Schweiz geltenden Ebenheitsnormen basieren auf eine Methodik des Jahres 1977 und können die aktuellen Bedürfnisse im Bereich der Qualitätskontrolle der eingebauten Schichten nicht mehr fachgerecht abdecken. Das Ziel dieser Forschung ist die Erarbeitung der nötigen konzeptuellen Grundlagen zur Revision der Schweizernormen in Bezug auf Erhebungstechniken und Evaluationsmethoden.

Bei der Wahl und Beurteilung der verschiedenen Erhebungsverfahren der Längsebenheit müssen zwingend die Anforderungen der europäischen Norm EN 13036-5 berücksichtigt werden. Aufgrund des vorgeschriebenen Wellenlängenbereichs und der gewünschten Flexibilität bei der Wahl der Auswertemethodik können ausschliesslich Erhebungssysteme berücksichtigt werden, welche im entsprechenden Wellenlängenbereich eine Aufnahme des Unebenheitsprofils gegenüber einem Idealprofil ermöglichen.

Zur Beurteilung der Längsebenheit wird weltweit der IRI am meistens angewendet. Dieser globale Index lässt keine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Wellenlängen zu. Er hat sich aber dank seiner einfachen Berechnung und seiner guten Kennzeichnung des globalen Fahrkomforts sehr verbreitet.

Seit es technisch möglich ist das Unebenheitsprofil in der gewünschten Bandbreite zu erfassen (0.5 bis 50 m gemäss EN 13036-5), hat sich die Beurteilung der „Unebenheitsenergie in verschiedenen Wellenbändern“ als nützliche Auswertetechnik erwiesen. Entwicklungen in Frankreich in den 80er Jahren haben die Unterteilung in drei Wellenbändern (KW: 0.8 – 3.2 m / MW: 3.2 – 13 m / LW: 13 – 45 m) etabliert. Die dabei ermittelten Qualitätsniveaus des Fahrkomforts und der Fahrsicherheit werden einfachheitshalber in Form einer Ebenheitsnote (NBO) zwischen 0 und 10 ausgedrückt. Diese Benotungsart für eine gewisse Anzahl von Wellenbändern gewinnt immer mehr an Bedeutung in Europa. Somit können gezielt Komfort, Sicherheit sowie die Optimierung der Ebenheitsqualität der eingebauten Schichten vorangetrieben werden. Wellenbandanalysen, wie die IRI-Beurteilung, können anhand eines beliebigen Unebenheitsprofils gemäss EN 13036-5 bestimmt werden.

Die neu entwickelte Methode des bewerteten Profils ist momentan in Europa in einer intensiven Testphase. Der gewählte Ansatz einer gewichteten Beurteilung in neun Wellenlängenbereichen (die Transferfunktion ist somit nicht linear) scheint in der Lage zu sein, die verschiedenen Unebenheitsmerkmale wie Einzelunebenheit, stochastische oder wiederkehrende Unebenheiten, mit der nötigen Empfindlichkeit und Genauigkeit zu beschreiben. Diese Methode wird wahrscheinlich bald in Deutschland und Österreich als offizielle Referenz gelten.

## Summary

The developments carried out these 30 last years in the field of the measurement and the evaluation of the evenness of roads and airfields are very consequent. The standards actually valid in Switzerland are based on a methodology developed in 1977 and cannot cover professionally the current needs for quality control of the bituminous layers any longer. The goal of this research is to provide the necessary conceptual bases to the revision of the Swiss standards regarding surveying techniques and evaluation methods.

By the evaluation of the various measurement systems for longitudinal unevenness, the requirements of the European standard EN 13036-5 must be considered. Due to the prescribed wavelength coverage and the desired flexibility in the choice of evaluation methodology, only profilometer devices with appropriate wavelength coverage can be considered.

The IRI is currently the mostly used index for unevenness evaluation worldwide. This global index does not permit any distinction between the different wavelengths. However its simple computation and its good characterisation of the global travelling comfort make it easy for use.

As soon as it was technically possible to get a complete recording of the unevenness profile of the road in the necessary range of wavelengths (0.5 to 50 m in accordance with the EN 13036-5 standard), the evaluation of the "unevenness energy" in different waves bands proved its ability to be a powerful evaluation technique. The studies carried out in France in the 80's have established the partitioning in three waves bands (SW: 0.8 - 3.2 m / MW: 3.2 - 13 m / LW: 13 - 45 m). The quality levels of the travelling comfort and of the driving safety are thereby expressed with a notation (NBO) going from 0 (very poor) to 10 (very good) for each one of these bands. This characterization of linked by a "notation by bands of waves" tends to spread in Europe. This kind of characterization for a certain number of wave bands gains ever more significance in Europe. This type of indicator, in addition to its clear relationship to the comfort and the road safety, also makes possible to aim the construction procedures for obtaining better evenness quality of the road layers. This kind of waves bands index, like the IRI, can be calculated on the basis of any unevenness profile recording in accordance with the EN 13036-5 standard.

The new method of the "weighted longitudinal profile" is currently in an intense phase of tests in Europe. The selected method of a differential weighting of the recorded profile in 9 bands of wavelengths makes de facto the transfer function voluntarily non-linear. However, this method seems to have the aptitude to describe very well all the various types of lacks of the longitudinal evenness: undulations of variable amplitude and wavelengths, random and isolated defects. Certain countries like Germany and Austria already have announced to probably make it as their official method in a short run.

# 1 INTRODUCTION

## 1.1 Situation actuelle

Les développements réalisés ces 30 dernières années dans le domaine du relevé et de l'évaluation de la planéité des couches de roulement routières et aéroportuaires sont importants et les normes nationales y relatives (Edition 1977) ne sont plus adaptées pour les besoins actuels.

### Planéité transversale

Le relevé à la poutre (manuel ou simulé sur profil en travers) reste d'actualité. La norme européenne EN 13036-7 prend en compte cependant une largeur de poutre de 3 mètres.

Le relevé à grand rendement n'est pas mentionné dans les normes suisses actuelles et fait néanmoins partie de la réalité pour des raisons de sécurité et d'efficacité (rendement).

### Planéité longitudinale

Le profil longitudinal des défauts d'uni d'une route peut être considéré comme une combinaison d'ondes de longueurs différentes, allant de 0,5 à 50 mètres. Les ondes plus courtes (décimétriques à métriques) et leurs hautes fréquences sont responsables de l'excitation des roues des voitures et des vibrations transmises à la colonne de direction et, par conséquent, au conducteur. Les ondes moyennes (métriques à décamétriques) et leurs fréquences moyennes déterminent la dynamique du corps de l'usager par rapport au siège ou les vibrations transmises à la colonne de direction des camions. Les ondes longues (décamétriques) et leurs basses fréquences sont en rapport avec les mouvements d'oscillation globale de la caisse du véhicule.

L'indice d'uni le plus utilisé au monde est l'IRI. Il s'agit d'un indice global qui ne permet pas la distinction entre les différentes familles d'ondes. Néanmoins il s'est avéré que l'IRI est facile à calculer et à interpréter et qu'il qualifie bien la planéité longitudinale quant au confort de roulement d'une chaussée. Un autre indice d'uni, développé en France au début des années quatre-vingts, le coefficient CAPL, est aussi un indice global qui traduit essentiellement l'influence des défauts de courtes et moyennes longueurs d'ondes.

À partir du moment où il a été possible de disposer d'un enregistrement complet du pseudo-profil de la route, on a pu caractériser ce dernier par « l'énergie par bandes d'ondes » du signal représentatif du profil des défauts d'uni. Les études réalisées en France durant les années quatre-vingts permettent le traitement et le filtrage du signal suivant trois gammes d'ondes (OC : 0.5 – 2.8 m / OM : 2.8 – 13 m / OL : 13 – 45 m). La qualité de la surface de la chaussée, du point de vue du confort et de la sécurité, est exprimée avec une notation allant de 0 à 10 pour chacune de ces bandes. Cette caractérisation de l'uni par une « notation par bandes d'ondes (NBO) » tend à se généraliser en Europe. Ce type d'indicateur, outre sa relation claire avec le confort et la sécurité d'utilisation de la route, permet aussi d'orienter les procédures de construction pour obtenir un meilleur uni de la surface de la chaussée. Cet indice, comme l'IRI, a le mérite d'être indépendant de l'appareil de mesure.

La caractérisation du profil longitudinal de la route par la « densité spectrale de puissance (PSD) » a aussi été largement utilisée, mais surtout dans le domaine de l'étude des vibrations induites par la circulation. Cette analyse permet de définir l'importance des différentes longueurs d'ondes sur le confort de roulement. La norme ISO 8608 considère cet indicateur pour caractériser également l'uni des chaussées.

Aucun de ces indicateurs n'est capable de détecter et de caractériser les défauts localisés bien que ceux-ci agissent sur les indicateurs d'uni. Pour essayer de détecter ce type de défauts, il a été proposé en France une méthodologie basée sur la « théorie des ondelettes », qui permet d'évaluer l'effet d'un défaut localisé sur l'indicateur d'uni (spécialement si celui-ci est répétitif). La toute nouvelle méthode du « profil longitudinal pondéré », développée à

l'université d'Aachen, est également prometteuse en ce qui concerne l'identification des défauts isolés.

Il y a aujourd'hui également un grand nombre d'appareils de mesure à grand rendement dont il n'est pas fait mention dans les normes suisse actuelles et qui sont régulièrement utilisés dans notre pays comme par exemple l'APL et l'ARAN.

## 1.2 Mandat et objectifs

Suite au mandat de l'Office Fédéral des Routes du 5.01.2005, l'équipe de recherche c'est mis au travail. Le déroulement de ce projet a été freiné volontairement afin de pouvoir prendre en compte les développements en cours de la normalisation européenne (WG5 du CEN TC 273). La publication définitive de la norme EN 13036-5 « Caractéristiques de surface des routes et aéroports – Méthodes d'essai, Partie 5: Détermination des indices longitudinaux » en juin 2008 fournit des bases déterminantes en ce qui concerne la mesure et l'exploitation des paramètres de l'uni longitudinal. Ces bases sont prises en considération dans ce rapport, spécialement au niveau des conclusions et recommandations.

La présente recherche a les objectifs principaux suivants:

- Etablir les bases pour une nouvelle norme suisse sur la mesure et l'appréciation de la planéité des chaussées remplaçant la norme SN 640 520a, «Planéité, Contrôle de la géométrie» (Edition 1977)
- Déterminer les bases pour fixer les échelles d'appréciation des nouvelles méthodes d'exploitation recommandées, en remplacement de la norme SN 640 521c, «Planéité, Exigences de qualité». Les choix définitifs devront se faire dans le cadre de la commission d'experts VSS 7.11 dans une deuxième phase de travail.

Les utilisateurs de la norme actuelle ont également mentionné certaines attentes:

- Avoir des exigences de planéité (réception) modulées pour chaque type de couche posée (base, liaison, roulement) ou en fonction du nombre de couche posée
- Disposer d'exigences pour différentes longueurs d'ondes (Cf. norme française) pour les défauts d'uni de courtes, moyennes et grandes longueurs d'ondes avec seuil d'alerte et seuil de refus correspondants
- L'agrégation actuelle sur 250 m n'est pas adaptée dans certain cas de figure
- Il s'est avéré que les exigences actuelles des normes suisses (W, sW) ne sont ni adaptées à toutes les routes ni à tous les cas de figure (certains défauts d'uni ne sont pas quantifiables par la méthode actuelle).

## 2 METHODES DE MESURE

### 2.1 Relevés profilométriques

Sur un plan méthodologique, il est clair que la condition idéale pour l'analyse de la qualité de l'uni longitudinal est remplie, si la mesure permet une modélisation la plus exacte possible des conditions réelles rencontrées sur la route. Pour se faire, différentes méthodes de relevé profilométrique ont été développées. Elles sont toutes basées sur l'utilisation de mesures inertielles, de mesures de distance laser, ou sur la combinaison des deux types.

#### 2.1.1 Relevé profilométrique laser

##### Description

Le principe de mesure est basé sur la mesure de 2 couples de 3 lasers. La condition nécessaire pour la réalisation de ce type de mesures est une poutre rigide à laquelle les lasers sont fixés. En raison de la géométrie, seulement 4 capteurs laser sont nécessaires au total (voir illustration 1). La longueur du système original (HRM du TRRL) était de 4 m, mais a pu être réduite à 2 m grâce à des lasers de meilleure qualité.

La distance entre le système de mesure et la chaussée est relevée tous les 10 cm par les 4 lasers. La distance parcourue est mesurée par un odomètre.

Une référence absolue n'est pas nécessaire pour effectuer la mesure. Le profil longitudinal est filtré à une longueur d'onde maximale de 100 m sur la différence de la moyenne mobile.

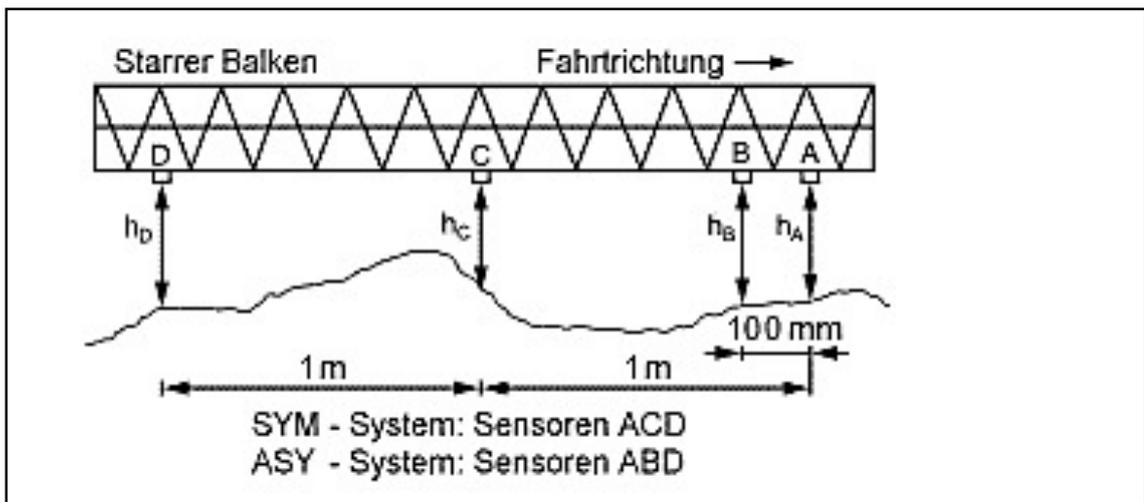


Fig. 1: Disposition traditionnelle des 4 lasers

En Allemagne, l'appareil de mesure est prescrit conformément à la réglementation technique pour des méthodes de mesure sans contact (TP-Eben, partie méthodes de mesure sans contact).

Suite à une réglementation interne, l'appareil de mesure de l'Office fédéral allemand des routes (BASt) doit posséder une capacité de mesure jusqu'à des longueurs d'ondes de 300 m. En rajoutant un cinquième laser, on obtient une troisième géométrie de mesure, avec cette fois-ci 2 m de distance entre le troisième et le quatrième laser. Dans l'illustration 2, l'emplacement des lasers est représenté.

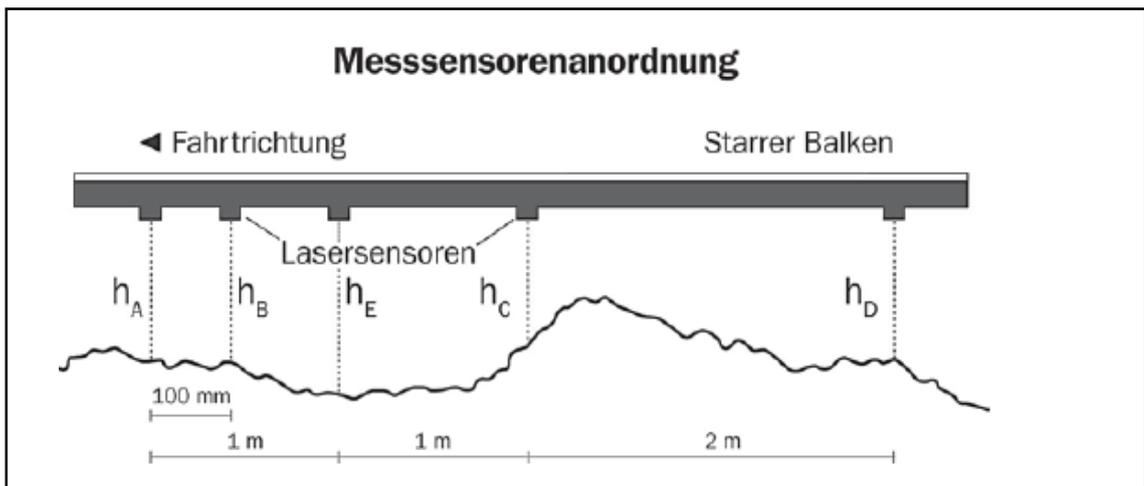


Fig. 2: Disposition des lasers du nouveau système de mesure BAST 2005

### Profil longitudinal

Le profil longitudinal mesuré est filtré pour une bande de longueurs d'ondes entre 0.3 et 100 m au moyen du calcul de la différence sur la moyenne mobile sur 100 m. La vitesse de mesure se situe dans les systèmes actuels entre 0 et 100 km/h, c'est à dire que s'arrêter pendant la mesure n'a pas d'influence sur le résultat. La fonction de transfert correspondante est représentée dans l'illustration 3. Elle montre une évolution stable et linéaire pour toute la bande de longueurs d'ondes mesurable.

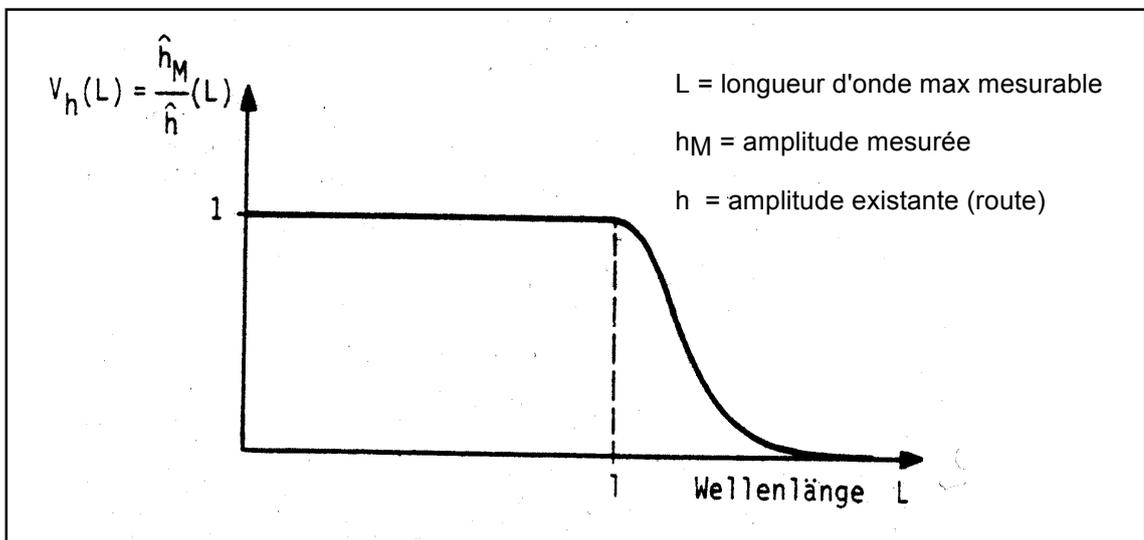


Fig. 3 : Fonction de transfert d'un profilomètre laser

### Paramètres d'exploitation

Sur la base du profil mesuré, toutes les valeurs d'état possibles peuvent être calculées. Le système est donc aussi bien adapté pour des relevés au niveau d'un réseau que pour des mesures de réception au niveau du projet.

## 2.1.2 Relevé profilométrique avec pendule inertiel

### Principe de fonctionnement

Le capteur est constitué principalement par un pendule inertiel et son système de suspension logé dans une remorque mono roue reliée à un véhicule tracteur par l'intermédiaire d'une articulation à cardans. Les défauts d'uni du profil sont traduits en signaux électriques par une double transformation :

- La remorque représente un ensemble « quart de véhicule » dont l'axe de la roue suit en permanence le profil de la chaussée grâce à son châssis lesté et à une suspension adaptée. Les mouvements verticaux de l'axe de la roue se traduisent par des débattements angulaires  $\alpha$  du bras porte roue,
- Un pendule basse fréquence constitue la base de référence inertielle par rapport à laquelle les débattements du bras porte-roue sont mesurés puis traduits en valeurs d'élévation du profil.

La fonction de découplage du pendule permet de minimiser l'effet des excitations verticales du véhicule tracteur.

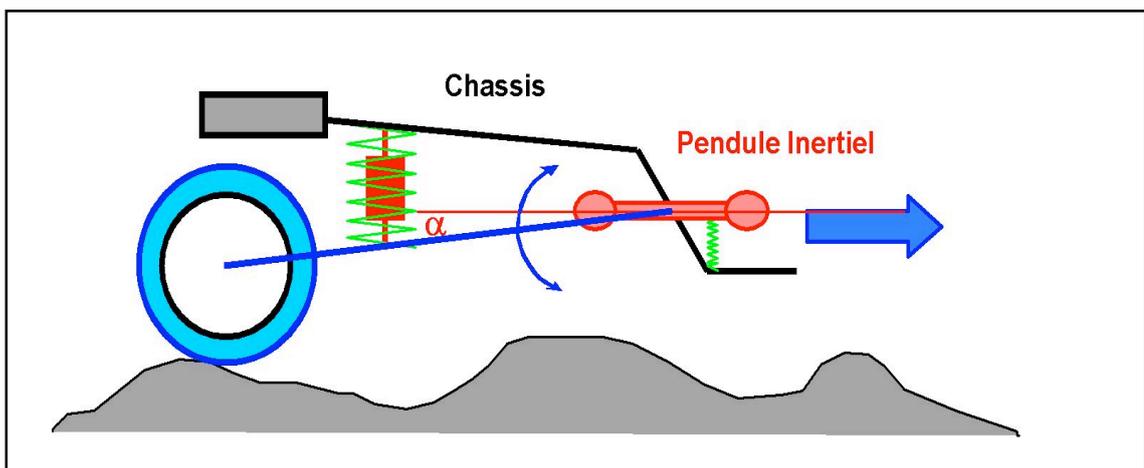


Fig. 4 : Schéma de principe d'un appareil à pendule inertiel (APL)

Le résultat de la mesure conduit au relevé du profil en long de la chaussée, dans une ou deux traces situées généralement dans les bandes de roulement des voies de circulation du trafic. Le système est piloté et géré par une électronique d'acquisition spécialisée embarquée à bord du véhicule tracteur. Elle produit les fichiers des valeurs numériques des amplitudes des dénivellations des profils relevés avec un pas longitudinal de 0.05 m.

Les longueurs d'ondes contenues dans le profil relevé par l'APL dépendent de la vitesse de mesure. A la vitesse nominale de 36 km/h, l'APL relève sans distorsion ni atténuation les ondes de longueurs comprises entre 0.33 m et 25 m.

### Conditions d'utilisation

L'APL peut être utilisé seul ou associé à d'autres fonctions de mesure (appareils multifonctions).

L'APL peut être installé facilement sur tout type de véhicule automobile qui doit par ailleurs être équipé des dispositifs de signalisation conformes à la législation en vigueur.

Le fonctionnement de l'APL est indépendant des conditions climatiques et des conditions d'état de mouillage de la surface de la chaussée.

Généralement, l'équipe de mesure se compose de deux agents : le conducteur du véhicule et un opérateur.

La vitesse de mesure est choisie en fonction des longueurs d'ondes à analyser et de la nature des essais à effectuer (réception de travaux, auscultation de réseaux, expertise de zones particulières) le calcul de certains indicateurs d'uni peuvent nécessiter de maintenir cette vitesse constante.

### Fonction de transfert

Après le réglage par le constructeur, la fonction de transfert en amplitude de la remorque APL, en excitation harmonique (sinus d'amplitude égale à 3 mm) est quasi linéaire dans le domaine de fréquences 0.4 Hz – 30 Hz.

Au domaine de fréquence  $F$  (en Hz) correspond une gamme de longueur d'onde  $\lambda$  (en m) telle que  $\lambda = V/F$  où  $V$  est la vitesse de mesure en m/s.

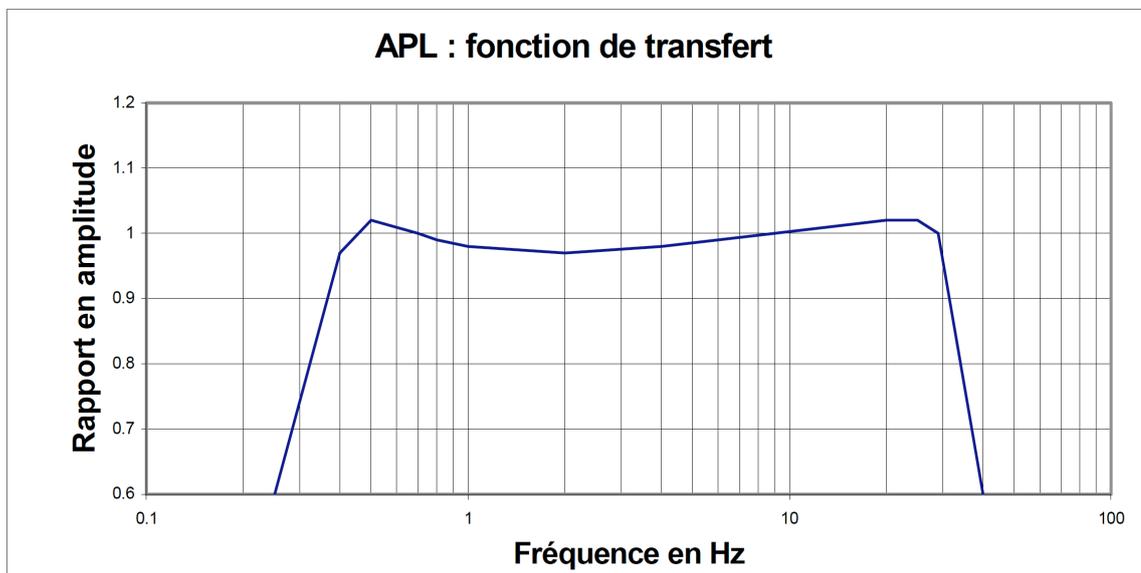


Fig. 5 : Fonction de transfert en fréquence de l'APL (Analyseur de Profil en Long)

Les vitesses de mesure utilisées le plus fréquemment sont :

- 30..40 km/h pour le relevé de longueurs d'ondes non atténuées allant de 0.25 m à 25 m
- 70..80 km/h pour le relevé de longueurs d'ondes non atténuées allant de 0.50 m à 50 m

### 2.1.3 Relevé profilométrique avec accéléromètre et laser

Dans les années 80, le Département de Transport (DOT) de l'état de Dakota du Sud conçoit le "South Dakota Profilometer (SDP)" qui est basé sur un véhicule développé par le laboratoire de General Motors Research (GMR). Le SDP permettait à l'aide de deux accéléromètres de relever le profil longitudinal d'une chaussée.

Le système est actuellement équipé d'un laser et d'un accéléromètre, situés dans chaque trace de roue, qui mesurent les déplacements verticaux tous les 12.5 mm. Par une double intégration des données de l'accéléromètre, on obtient le profil "brut". Le laser sert de réfère-

rence de hauteur et enregistre les mouvements verticaux du véhicule ce qui permet d'ajuster les données de l'accéléromètre afin d'obtenir un profil longitudinal "net" optimisé.

Le système permet de relever le profil longitudinal de la chaussée pour des longueurs d'ondes entre 0.3 et 91m, indépendamment du système de suspension et de la vitesse (22.5 à 110 km/h) du véhicule. Ce profil permet de calculer les valeurs d'état tel qu'IRI, NBO, RN, W et sW (avec lequel est calculé l'indice I2 selon SN 640925b).

Le graphique ci-dessous présente la réponse du système par longueurs d'ondes. De ce graphique il ressort que la réponse est d'environ 1 pour des longueurs d'ondes entre 0.5 et 91 m (0.011 à 3.3 Hz).

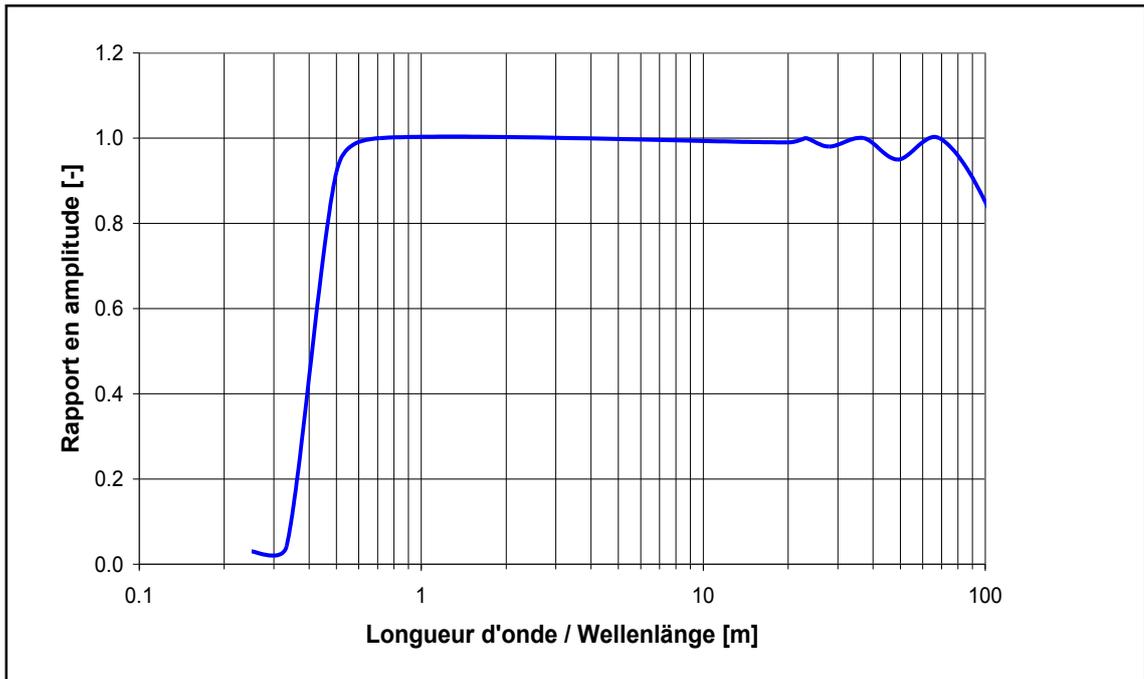


Fig. 6 : Réponse du système SDP dans le domaine des longueurs d'ondes

Le model "South Dakota Profilometer" est décrit dans le "Transportation Research Record" N° 1000 "South Dakota Profilometer".

Le système de mesure SDP est très répandu et utilisé dans de nombreux pays tels que les Etats-Unis, le Canada, la Chine, Taiwan, l'Italie, l'Espagne, les Pays-Bas, la Belgique, l'Afrique du Sud, l'Inde, l'Arabie Saoudite et la Suisse.

## 2.2 Relevé d'un indicateur de planéité

Une autre façon de quantifier la qualité de la planéité longitudinale est de réaliser une mesure directe d'une valeur en relation avec la planéité longitudinale. Cette approche est plus ancienne et plus simpliste et se base sur les moyens techniques à disposition à l'époque.

Dans cette catégorie du relevé direct d'un indicateur de planéité on trouve la mesure de l'angle engendré par les défauts d'uni du profil entre deux cordes adjacentes d'un mètre de longueur (méthode actuellement encore en vigueur dans la normalisation suisse - valeur  $W$ , SN 640'520a), la mesure des accélérations différentielles produites par les défauts d'uni sur une masse avec amortisseur et sans amortisseur (base de calcul de l'IRI), ainsi que la mesure d'un profil approché par sommation de moyennes géométriques sur des bâtis montés en cascade (Viagraph).

Comparé à un relevé exact du profil des défauts d'uni dans une grande gamme de longueurs d'ondes, toutes ces méthodes ont le grand désavantage, en plus des limites et du taux de pertinence de l'indicateur relevé, de livrer une image filtrée du profil ne permettant aucune autre appréciation de celui-ci. Ceci est particulièrement pénalisant en cas de détection de mauvaises valeurs, car ces méthodes ne permettent alors aucune analyse complémentaire pour mieux en comprendre les causes.

### 2.2.1 Mesure de variation angulaire

La mesure de la variation angulaire de 2 segments adjacents de 1 mètre de longueur est la base actuelle de la méthode retenue dans la norme suisse SN 640'520a. Les appareils développés spécialement pour ce type de mesure sont principalement le Winkelmessgerät de l'EPFZ (plus utilisé actuellement) et le Goniographe.

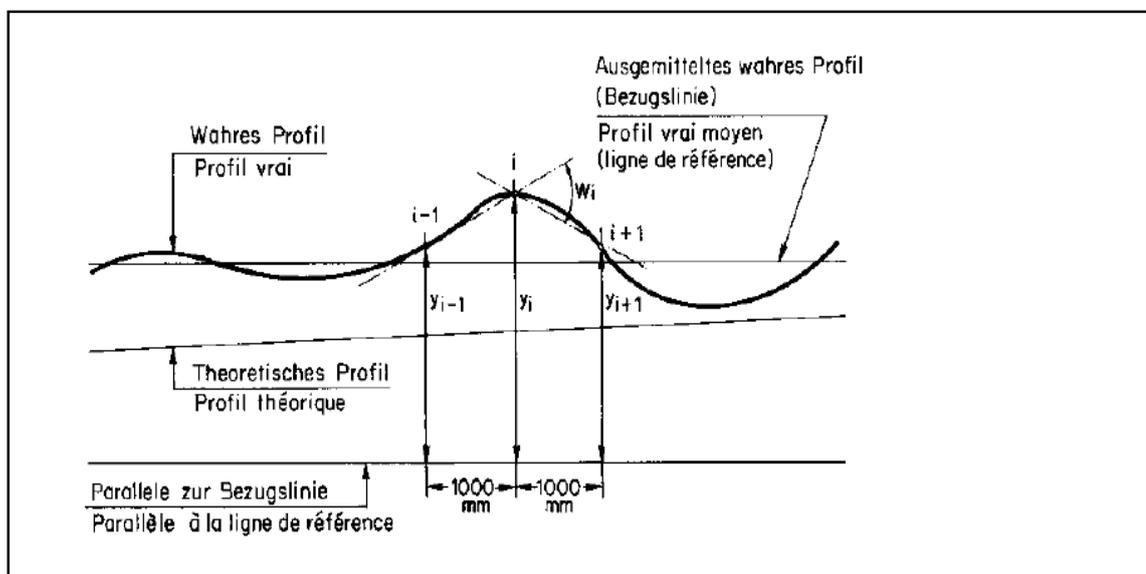


Fig. 7 : Principe d'exploitation des valeurs angulaires  $W$  selon SN 640'520a

## 2.2.2 Mesure géométrique dynamique

Le Bump Integrator est l'exemple typique d'un système de mesure géométrique dynamique. Dans ce cas, l'appareil enregistre les différences de mouvement entre une masse sans suspension et avec suspension.

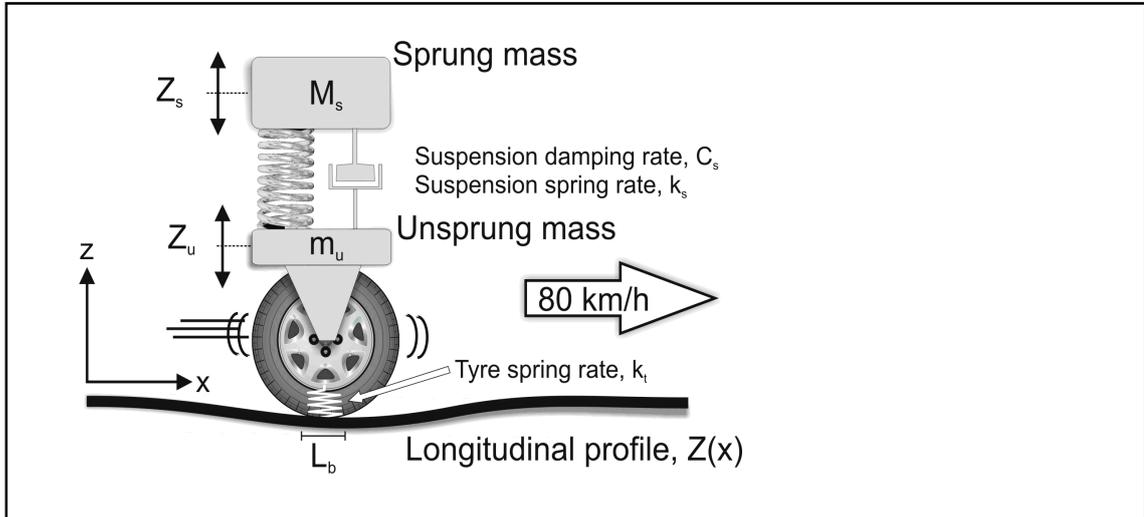


Fig. 8 : Principe de mesure du Bump Integrator

## 2.2.3 Mesure de profil approché

Le développement du Viagraphe dans les années septante était basé sur la volonté d'améliorer la mauvaise fonction de transfert des anciens systèmes de mesures (différences notables entre les indicateurs d'uni enregistrés et le profil réel des défauts d'uni). Le Viagraphe, par un système de moyenne géométrique imbriquée de la hauteur de 8 roues d'appui, crée une référence relativement fiable pour la roue de mesure indépendante. Revers de la médaille, l'appareil avait une longueur d'environ 10 m !

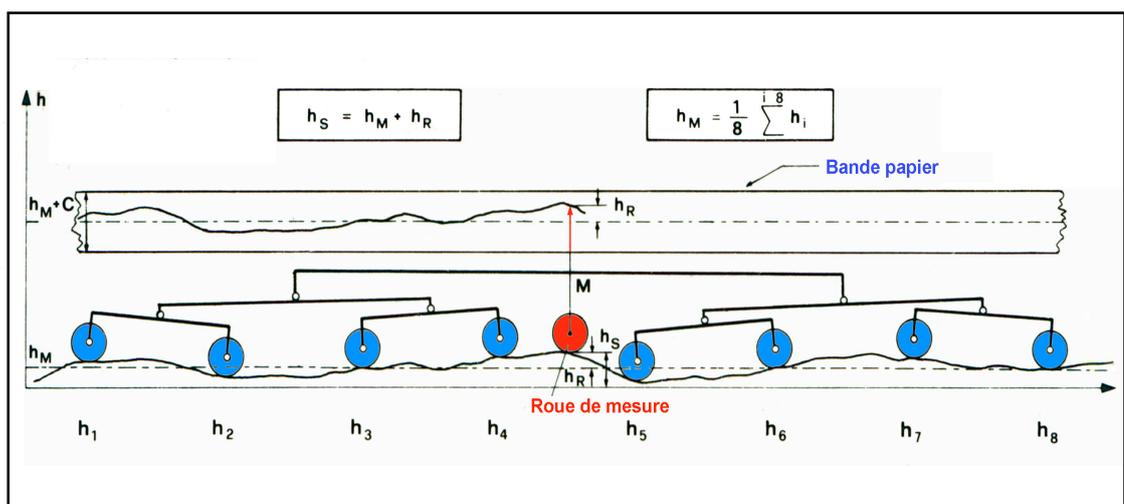


Fig. 9 : Principe de mesure du Viagraphe

## 3 APPAREILS DE MESURE

### 3.1 Appareils de relevé profilométrique

Les exploitants d'appareil de mesure et les utilisateurs des méthodes d'exploitation ont avec le temps émis le souhait de pouvoir disposer d'un système de relevé permettant de se libérer des contraintes d'un appareil mesurant directement un indicateur de planéité et offrant la souplesse d'une évaluation multiple avec des méthodes d'exploitation adaptées au cas considéré.

La solution a été rapidement trouvée au niveau conceptuel, car la seule méthode valable ne pouvait constituer qu'en un relevé profilométrique le plus précis possible des défauts d'uni. Le développement des appareils permettant d'assumer pleinement cette fonction a par contre pris un certain temps, et ce n'est qu'avec le développement des capteurs lasers et des plateformes inertielles que la problématique a été résolue de façon optimale.

#### 3.1.1 Relevé profilométrique laser

##### Highspeed-Road-Monitor (HRM)

Le Highspeed-Road-Monitor (HRM) a été développé en 1984 par le Transport Research Road Laboratory (TRRL) en Angleterre. En Allemagne, la méthode de mesure sera consignée dans la directive pour des mesures de profils longitudinaux sans contact.

Le principe de mesure profilométrique laser est appliqué par différents fabricants et utilisateurs d'un tel appareil. Le premier appareil de ce type (Highspeed Road Monitor développé par le TRRL) était composé d'un véhicule avec l'électronique de dépouillement et d'une remorque de mesure. Le TRRL en Angleterre et l'office fédéral des routes (BASt) ainsi que l'institut pour les voies ferroviaires et routières de l'université Karlsruhe en Allemagne étaient des utilisateurs de l'appareil.



Fig. 10 : Highspeed-Road-Monitor

Aujourd'hui, il existe en Allemagne d'autres utilisateurs, qui pour la plupart ont construit eux-mêmes un appareil de ce type. Le BAST dispose depuis 2004 d'un nouveau système de mesure qui est basé sur le principe de mesure du HRM.

Le système ARGUS a été conçu par le bureau d'ingénieurs Schniering afin d'être utilisé à des fins propres. D'autres appareils multifonctions (RoadStar, etc.) sont également équipés de ce type de système de relevé de l'uni longitudinal.

L'appareil permet de mesurer un profil longitudinal avec des longueurs d'ondes entre 0.3 et 100 m à une vitesse de 0 à 90 km/h. L'appareil de mesure est placé latéralement au véhicule, ce qui permet la mesure du profil longitudinal dans la trace de roue droite. Cette disposition est par exemple conforme au ZTV-ZEB (conditions supplémentaires aux contrats techniques, saisie d'état et évaluation) en Allemagne.

### 3.1.2 Relevé profilométrique avec pendule inertiel

Dans la classe des appareils de relevé profilométrique basé sur un pendule inertiel, c'est l'APL (Analyseur de Profil en Long), appareil développé par le LCPC, qui est de loin le plus répandu.

#### APL - Analyseur de Profil en Long

Le système de relevé du profil longitudinal monotrace ou bi trace est un dispositif de type remorque légère monocycle constitué des éléments principaux suivants :

- Bras porte-roue non suspendu en alliage léger, dans lequel sont implantés le système pendulaire de mesure des amplitudes des variations de profil et le capteur de localisation de leurs positionnements
- Roue de type cycle léger dont la circularité et l'équilibrage sont minutieusement vérifiés
- Châssis tubulaire lesté, suspendu par l'intermédiaire d'un dispositif ressort-amortisseur dimensionné pour garantir une réponse constante de l'ensemble sur la bande passante de l'appareil.



Fig. 11 : Système APL monotrace de la société SACR

### APL - Caractéristiques métrologiques

Amplitude verticale	: $\pm 80$ mm	Résolution :	$\leq 0.1$ mm
Pas d'acquisition	: 0.05 m	Précision :	$\leq 0.1$ %
Bande passante et fréquence	: 0.4 Hz – 30 Hz		
Vitesse de mesure	: 20 – 140 km/h		
Volume des fichiers de mesure	: 150 kb/km		

### APL - Caractéristiques fonctionnelles

- Grand rendement et vitesse de mesure maximale élevée
- Indépendance du type de véhicule tracteur ou porteur
- Multi-indices : pratiquement tous les indicateurs d'uni peuvent être calculés
- Nécessité d'une vitesse de mesure plus ou moins constante.

### 3.1.3 Relevé profilométrique avec accéléromètre et laser

Les appareils de mesure équipés d'un accéléromètre et d'un laser (South Dakota Profiler, Cf 2.1.3) les plus utilisées sont l'ARAN (Automatic Road Analyzer) et le RSP (Road Surface Profilometer). Les véhicules multifonctions ARAN sont conçus et fabriqués par l'entreprise canadienne Roadware, tandis que le RSP est produit par l'entreprise danoise Dynatest.



Fig. 12 : Système SDP bi trace sur l'ARAN de la société Infralab

Le système ARAN relève simultanément le profil longitudinal et transversal et remplit les exigences les plus sévères tels que les normes internationales ASTM E905 (Class I) et FHWA (Classe II).

## 3.2 Appareils de relevé d'un indicateur de planéité

A la différence des relevés profilométriques ouvrant la voie à toute les sortes d'exploitation et d'analyse du signal, certains appareils (de conception ancienne) relèvent directement un indicateur de planéité sous forme d'une grandeur physique. Les chapitres suivants décrivent certains de ces appareils.

### 3.2.1 Mesure de variation angulaire



Fig. 13 : Winkelmessgerät de l'EPFZ et Goniographe de la SACR (même principe)

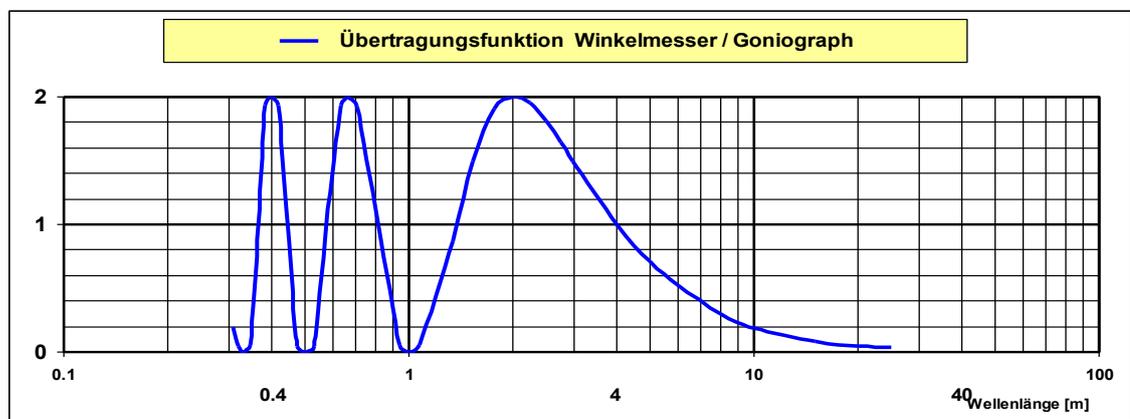


Fig. 14 : Fonction de transfert (relation entre valeur mesurée et valeur réelle : 0 = pas mesuré, 1 = correspond parfaitement, 2 = double de la réalité) du Winkelmesser et du Goniographe en fonction des longueurs d'ondes

### 3.2.2 Mesure géométrique dynamique

Le Bump Integrator est l'exemple typique d'un appareil de mesure utilisant l'approche « Quater car ».



Fig. 15 : Exemple d'un appareil de type Bump Integrator

### 3.2.3 Mesure de profil approché

L'appareil Viagraphe a été utilisé principalement en France, en Belgique et au Pays-Bas, ainsi qu'en Suisse par la société SACR SA entre 1970 et 1985. Malgré l'amélioration qualitative du relevé engendré par le système de lissage géométrique de l'appareil (voir schéma au chapitre 2.2.3), son énorme encombrement et les difficultés de transport ont rapidement amené à son remplacement par des outils de mesure plus pratiques.



Fig. 16 : Exemple d'un appareil de type Viagraphe

## 4 METHODE D'EXPLOITATION

### 4.1 Introduction

Les méthodes d'exploitation développées au cours du temps sont fort nombreuses et ont souvent été conçues autour des bases techniques d'un appareil de mesure existant. Ce n'est qu'avec l'avènement des systèmes de relevé profilométrique, que les méthodologies d'exploitation ont vraiment pu se concentrer sur le « vrai problème », qui est l'appréciation au niveau d'un réseau ou d'un projet des caractéristiques de planéité d'un profil longitudinal de chaussée.

### 4.2 Représentation du profil des défauts d'uni

Les amplitudes des dénivellations verticales du profil en long de la couche de chaussée à ausculter sont relevées par l'appareil de type profilomètre et sont enregistrées sous forme numérique dans un fichier informatique. Le relevé est réalisé selon un pas d'échantillonnage spatial constant. Cet enregistrement permet de reconstituer une image du profil en long de la chaussée, ou plus exactement du profil des défauts d'uni par rapport à un profil idéal théorique (sans prendre en compte l'altimétrie absolue du terrain). La fidélité de cette image dépend des caractéristiques instrumentales de l'appareil (fonction de transfert). Le profil des défauts d'uni est aussi appelé « pseudo-profil », car certains appareils de relevé provoquent une distorsion de phase sur le signal, qui n'a cependant aucune influence sur l'exploitation en elle-même.

Le pseudo-profil ainsi décrit est l'information de base à laquelle s'appliquent les méthodes de traitement pour caractériser, par l'intermédiaire d'un indicateur, l'uni longitudinal de la chaussée.

L'analyse directe de la forme du pseudo-profil est en outre indispensable pour la localisation des défauts d'uni particuliers.

En complément, on saisit, au cours de la mesure et de manière synchrone à l'acquisition de l'abscisse curviligne, toute information ou événement servant au repérage et à la localisation des points singuliers : changements de revêtement, joint d'ouvrage, traversée de voie ferroviaire, etc. Les caractéristiques minimales des relevés réalisés par le système de mesure doivent répondre à certaines normes.

Les normes européennes correspondantes ont été élaborées par le WG5 du CEN TC 227 et viennent d'être publiées en juin 2008 :

- EN 13036-5 : Caractéristiques de surface des routes et aéroports – Méthodes d'essai – Partie 5: Détermination des indices longitudinaux
- EN 13036-8 : Caractéristiques de surface des routes et aéroports – Méthodes d'essai – Partie 8: Mesure de profils transversaux et longitudinaux dans le domaine de longueurs d'ondes correspondant à l'uni et à la mégatexture.

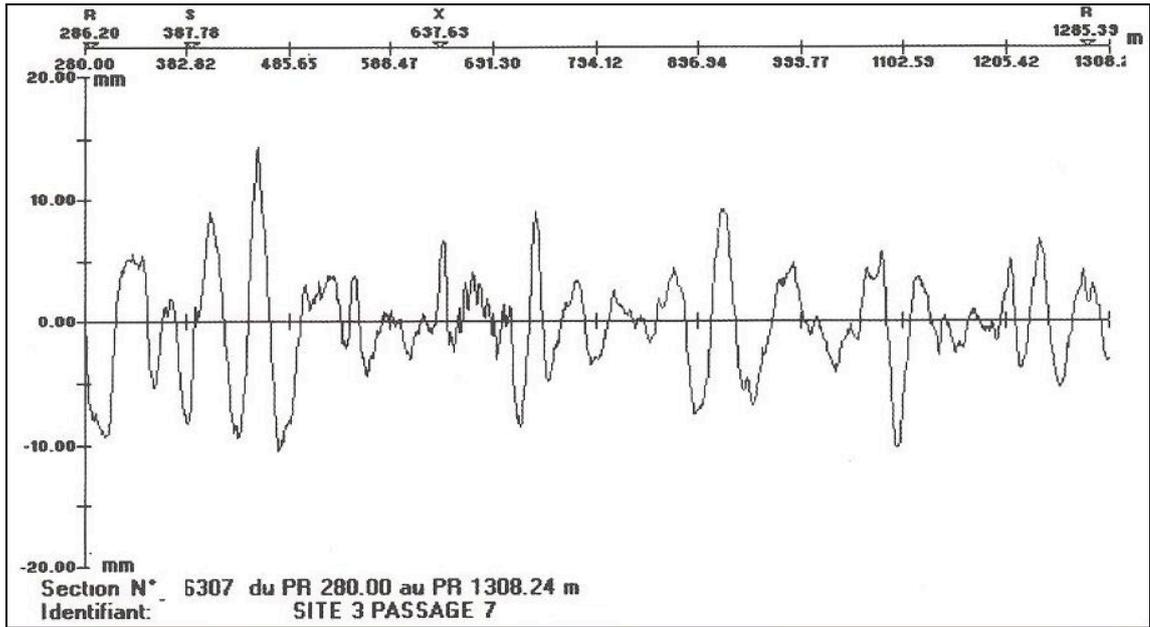


Fig. 17 : Exemple d'un profil des défauts d'uni (APL)

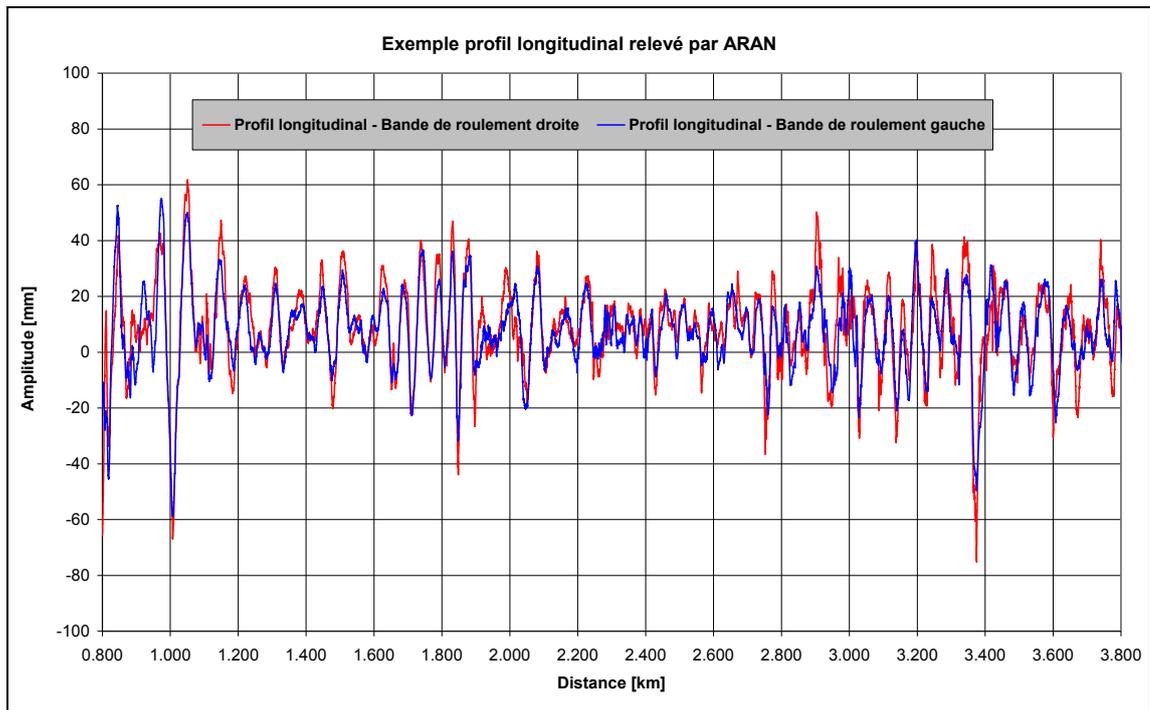


Fig. 18 : Exemple de profil longitudinal relevé par ARAN

## 4.3 Exploitation du profil en bandes d'ondes

La toute nouvelle norme européenne EN 13036-5 :2008 « Caractéristiques de surface des routes et aéroports – Méthodes d'essai – Partie 5: Détermination des indices longitudinaux » décrit trois procédés d'évaluation de profil des défauts d'uni. Une des méthodes préconisées est l'exploitation du profil en bandes d'ondes. Pour se faire, le profil mesuré est filtré selon une procédure normalisée en différentes bandes de longueur d'ondes. Elles s'élevaient au minimum à trois et peuvent atteindre un maximum de 12 lors d'une analyse en bandes d'octave.

### 4.3.1 Notes d'uni APL

#### Calcul du quantificateur d'uni NBO

L'analyse de chaque profil relevé passe par le calcul des indices d'uni NBO (notes par bandes d'ondes). Ce calcul requiert une décomposition numérique préalable du profil relevé, en signaux filtrés selon trois bandes de longueurs d'ondes définies dans le tableau suivant (en référence à la norme française NF P 98-218-3 et européen EN 13036 - 5) :

Dans chaque bande d'ondes, et pour la longueur de segmentation choisie, on calcule l'énergie du signal filtré, pour donner les indices suivants d'énergie par bande d'ondes EBO :

Tab. 1 : Paramètres du calcul des indices d'uni NBO

Désignation	Terme abrégé	Longueurs d'ondes en m (EN 13036-5)	Longueurs d'ondes en m (NF P 98-218-3)	Segments de calcul	Indice EBO (Energie par bande d'ondes)
<b>Petites ondes</b>	<b>PO</b>	$0.78 < \lambda < 3.12$	$0.70 < \lambda < 2.83$	20 m	EPO20
<b>Moyennes ondes</b>	<b>MO</b>	$3.12 < \lambda < 12.50$	$2.83 < \lambda < 11.31$	100 m	EMO100
<b>Grandes ondes</b>	<b>GO</b>	$12.5 < \lambda < 50.0$	$11.3 < \lambda < 45.2$	200 m	EGO200

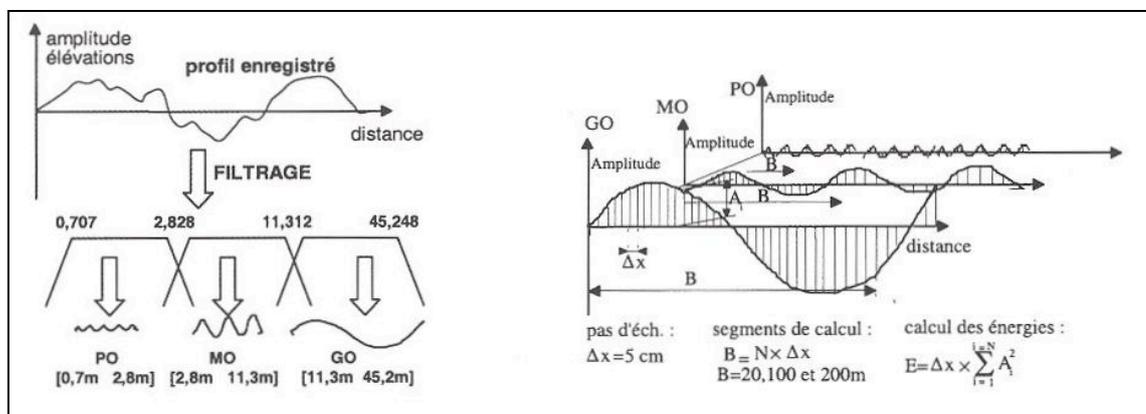


Fig. 19 : Découpage du signal APL en 3 bandes d'ondes

Le calcul des énergies par bandes d'ondes (indices EBO) se fait selon la formule:

$$\text{Energie sur une longueur L (EBO): } 10^{-3} \times 50 \sum_{k=i}^{i+L/0.05} z_k^2$$

L'amplitude du signal  $z$  est donnée en millimètres et les énergies sont exprimées en centimètres cube,  $L$  est exprimé en mètres. Les notes par bandes d'ondes sont obtenues à partir de ces énergies par une transformation logarithmique :  $\text{NBO} = a \ln \text{EBO} + b$

Les segments de calcul sont localisés par rapport au repère d'origine de la section à ausculter. En fin de session de mesure, lorsqu'un segment est inférieur à 20 m, 100 m et 200 m, il n'est pas procédé au calcul de l'énergie s'y rapportant.

Les valeurs des énergies EBO ainsi obtenues sont transformées en notes par bandes d'ondes (NBO), qui donnent une appréciation de la qualité chiffrée dans une échelle à 20 niveaux graduée de 0 (très mauvais uni) à 10 (excellent uni). La correspondance entre les valeurs des notes NBO et les étendues des valeurs des énergies EBO est donnée dans le tableau suivant.

Tab.2 : Exemple des intervalles d'énergies EBO pour les trois gammes NBO

Notes NBO	Intervalle des énergies EBO en $\text{cm}^3$		
	Petites ondes	Moyennes ondes	Grandes ondes
10.0	0 à 1.1	0 à 39	0 à 1267
9.5	1.1 à 1.4	39 à 49	1267 à 1585
9.0	1.4 à 1.7	49 à 62	1585 à 1983
8.5	1.7 à 2.2	62 à 77	1983 à 2481
8.0	2.2 à 2.7	77 à 97	2481 à 3103
etc.	etc.	etc.	etc.
0.5	61.9 à 77.4	2220 à 2778	71372 à 89288
0.0	> 77.4	> 2778	> 89288

Une représentation graphique des énergies EBO en fonction des notes NBO permet d'observer la relation logarithmique, pour les petites, moyennes et grandes ondes.

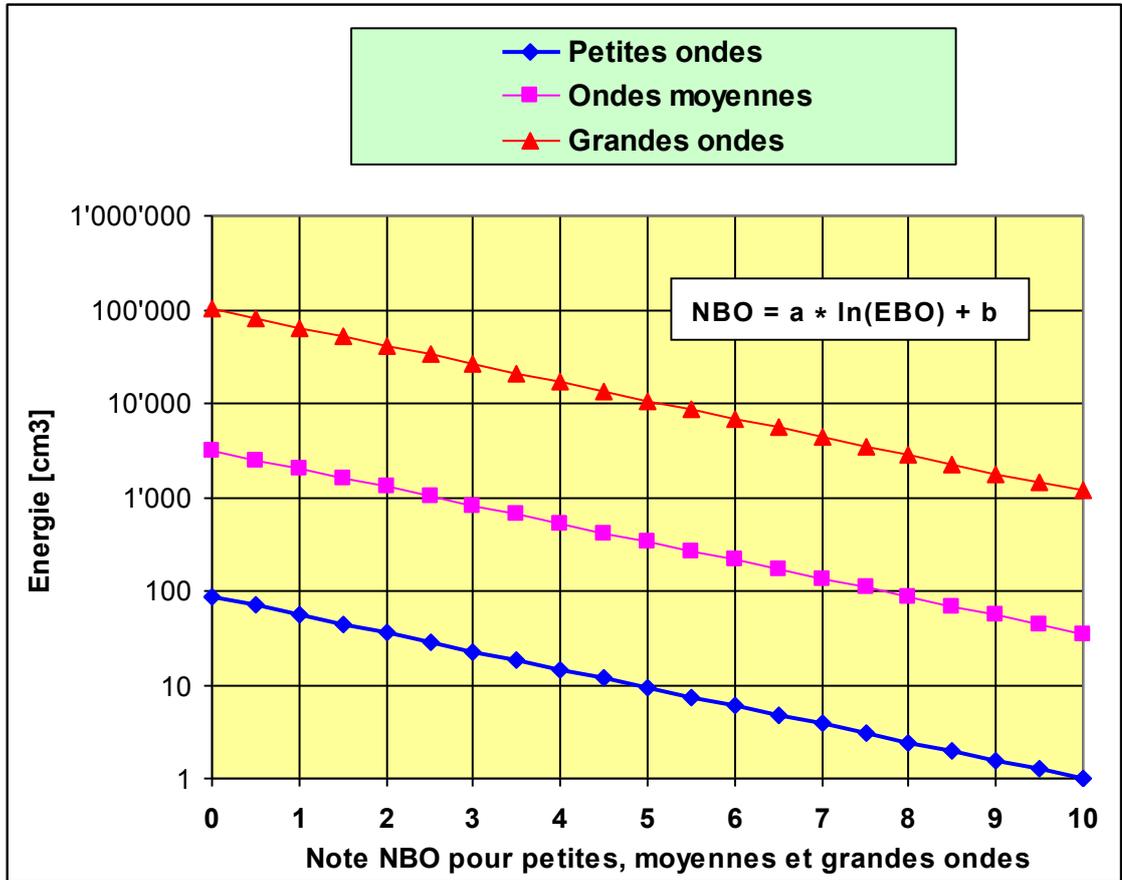


Fig. 20 : Conversion des valeurs d'énergie EBO en NBO pour les 3 bandes d'ondes

## Résultats

Plusieurs formes de présentation des résultats existent dont voici 2 exemples :

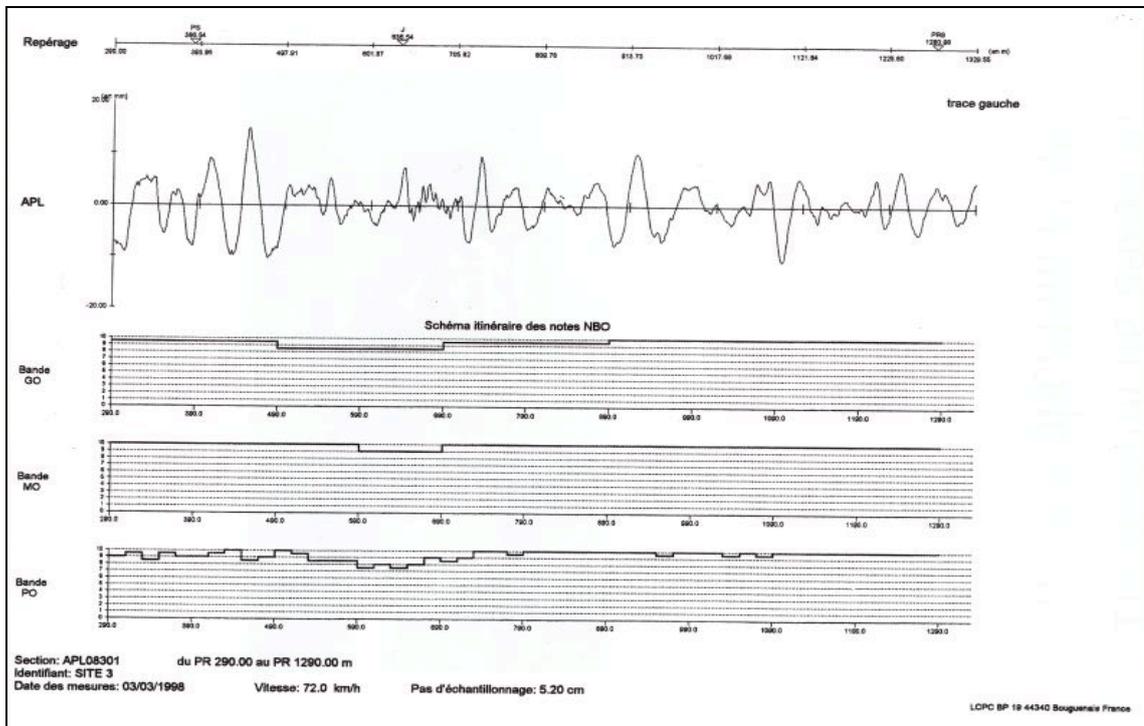


Fig. 21 : Graphique, sous forme de schéma itinéraire, des notes pour les trois bandes d'ondes ainsi que le positionnement des événements relevés

### Histogramme : trace droite

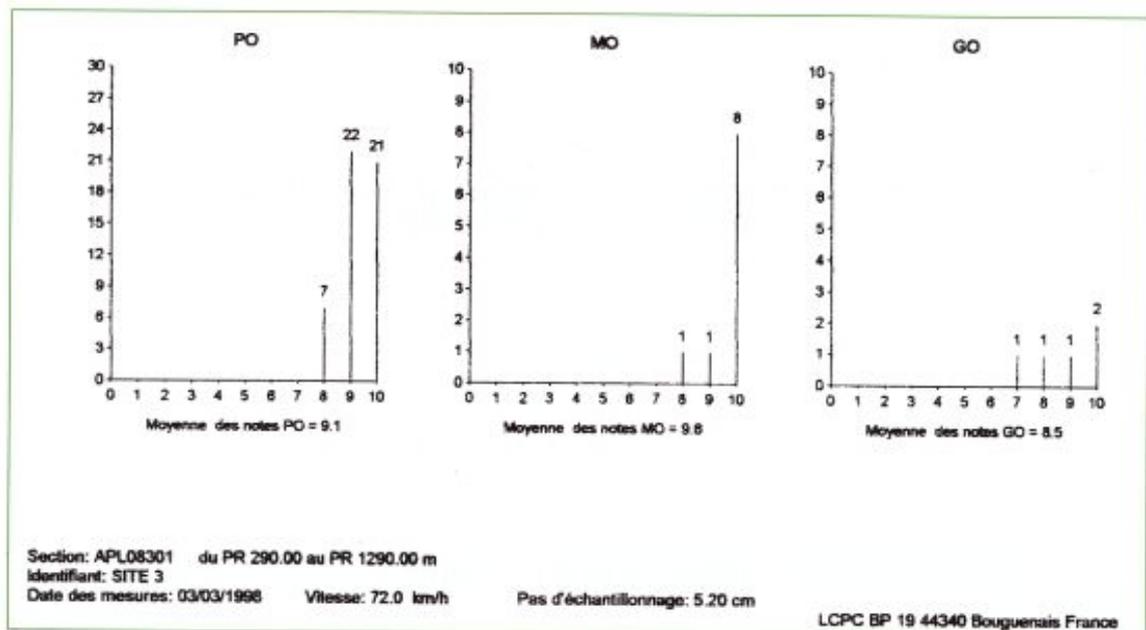


Fig. 22 : Graphes de distribution des notes pour les 3 bandes d'ondes

### 4.3.2 Exploitation en bandes d'octaves

L'exploitation en bandes d'octave réalisée sur la base du signal APL en France est à quelques valeurs de filtres près, identique à la méthode de filtrage par octave décrite dans l'annexe B de la EN 13036-5 :2008 « Caractéristiques de surface des routes et aéroports – Méthodes d'essai – Partie 5: Détermination des indices longitudinaux ». Le profil relevé est divisé en 12 bandes de longueurs d'ondes et analysé en suite avec les mêmes types d'indices que les filtrages en ondes courtes, moyennes et longues. Cette analyse fine permet d'identifier de façon beaucoup plus exacte les « contributions » des différentes gammes de longueur d'ondes à un mauvais uni, et donc de pouvoir plus facilement en identifier la raison.

## 4.4 Densité spectrale de puissance

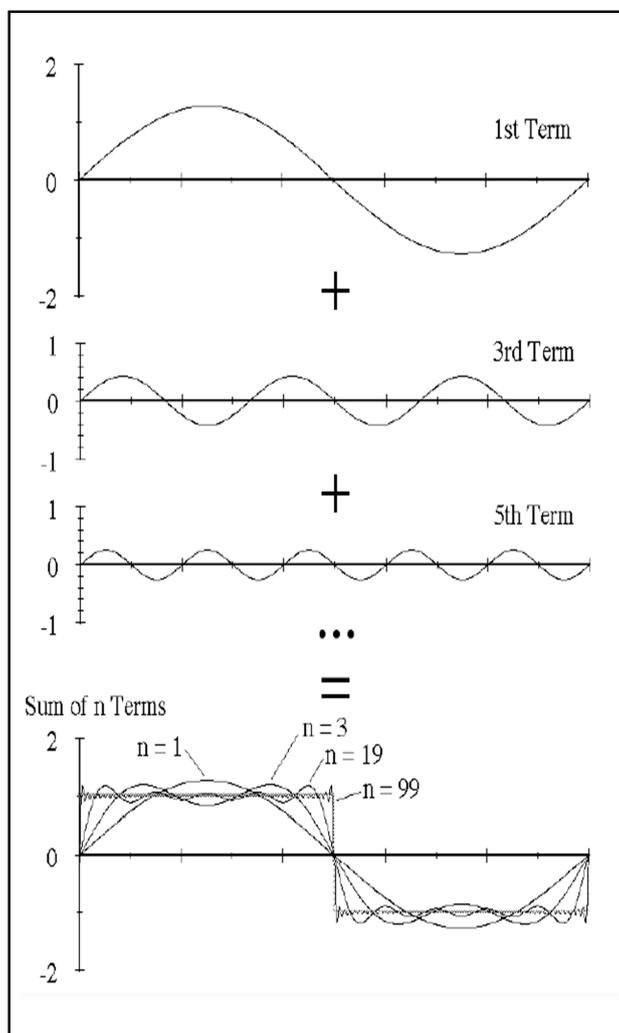


Fig. 23 : Exemple de recomposition de profil avec des sinusoïdes

### Introduction

Pour pouvoir donner une appréciation en termes de "confort", la comparaison directe des vrais profils relevés n'est pas une chose aisée. Pour cette raison on fait appel à la possibilité de recomposer un segment de vrai profil longitudinal mesuré avec des séries (série de Fourier) de sinusoïdes de longueur d'onde et d'amplitude définies. Cette façon de procéder est dénommée "Power Spectral Density" ou PSD

### Définition

L'exemple ci-contre d'une marche d'escalier recomposée avec des sinusoïdes est une bonne illustration des possibilités près que infinies de recomposition d'un profil:

Une simple sinusoïde, avec une longueur d'onde égale à celle de l'escalier ( $N=1$ ), présente la première approximation brute de l'escalier. L'addition de sinusoïdes avec une longueur d'onde qui ont un diviseur impair ( $1/3$ ,  $1/5$ ,  $1/7$ , etc.) donne avec un  $N=99$  une approximation raisonnable de la marche d'escalier.

### Interprétation

Les profils longitudinaux de deux sites (4 et 7) sont représentés ci-dessous. Site 4 est une route avec un revêtement bitumineux avec des ondulations longues et larges. Le site 7 est un revêtement en béton et présente une plus grande variation au niveau des ondulations.

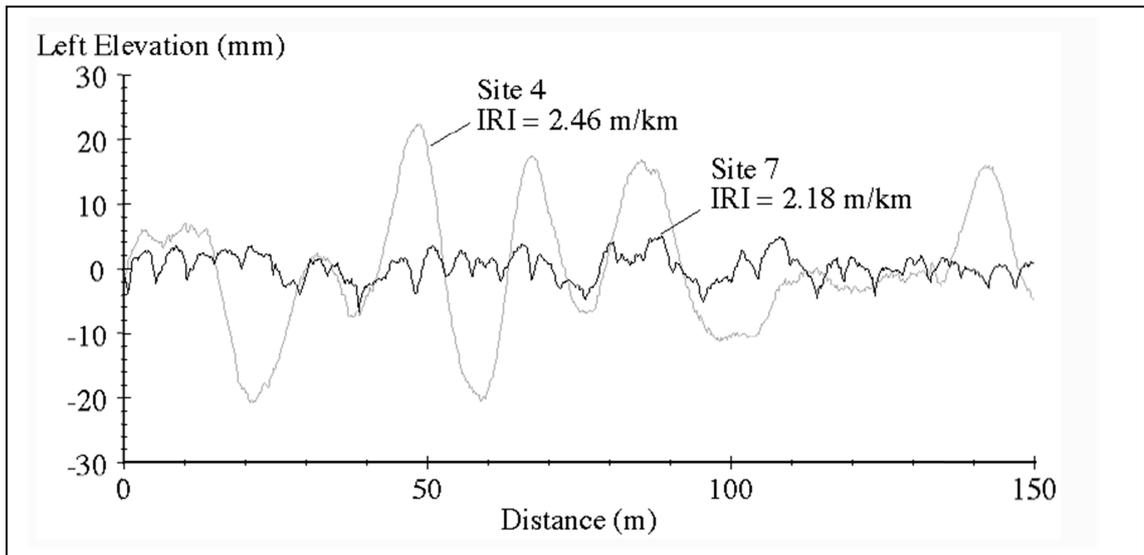


Fig. 24 : Exemple de profils longitudinaux pour 2 sites

Le graphique PSD sur l'élévation (amplitude) pour les deux sites est représenté ci-dessous :

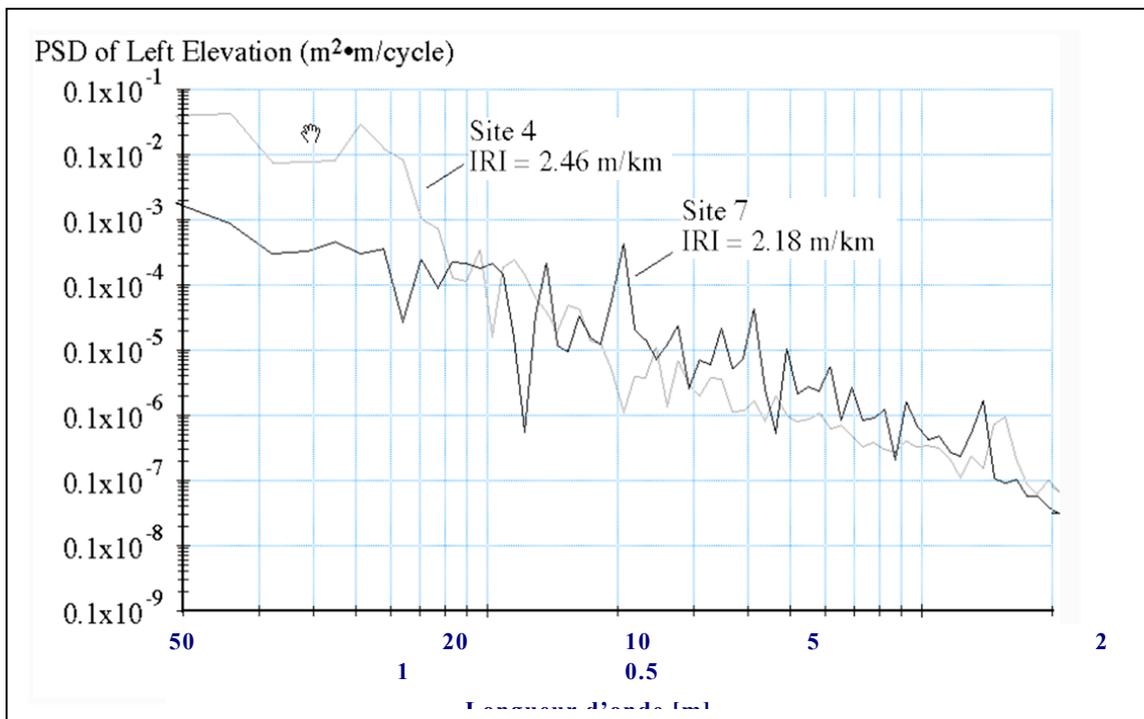


Fig. 25 : Graphique de l'analyse PSD des profils des 2 sites de la figure 24

$$\text{PSD} = \text{Densité Spectrale de Puissance} = \frac{\text{Amplitude}^2 [m^2]}{\text{Fréquence} \left[ \frac{\text{cycle}}{m} \right]} \Rightarrow \frac{m^2 \cdot m}{\text{cycle}}$$

On constate sur la figure 26 que :

- en général l'amplitude est plus élevée pour des grandes longueurs d'ondes
- néanmoins le site 4 présente une amplitude plus élevée pour des grandes longueurs d'ondes (12.5 – 50 m) que le site 2
- le site 2 présente une amplitude plus élevée pour des petites longueurs d'ondes (0.5 - 12.5 m) que le site 4.

Même si la relation entre l'amplitude et la longueur d'onde peut varier entre les profils, la première constatation que l'amplitude est plus élevée pour des grandes longueurs d'ondes, est valable pour tous les profils longitudinaux.

Afin de mieux présenter la différence en confort de roulement entre plusieurs profils, on peut établir un graphique PSD sur la pente (de l'élévation).

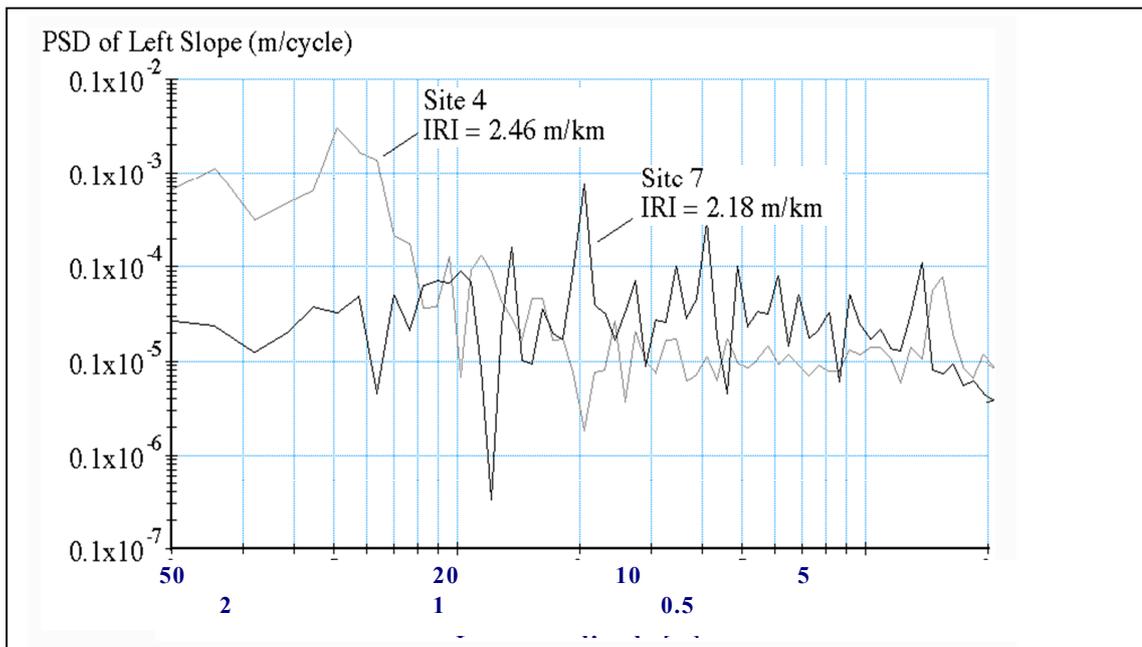


Fig. 26 : Graphique de l'analyse PSD de la pente de l'élévation des 2 sites de la figure 25

Le graphique de la figure 27 permet de constater plus facilement la différence en confort de roulement entre les deux sites. Par exemple, le site 4 a par rapport au site 7 une amplitude, ou une valeur PSD, plus élevée (moins de confort) pour les grandes longueurs d'ondes (>10m) et moins élevée (plus de confort) pour les petites longueurs d'ondes (1 - 5 m).

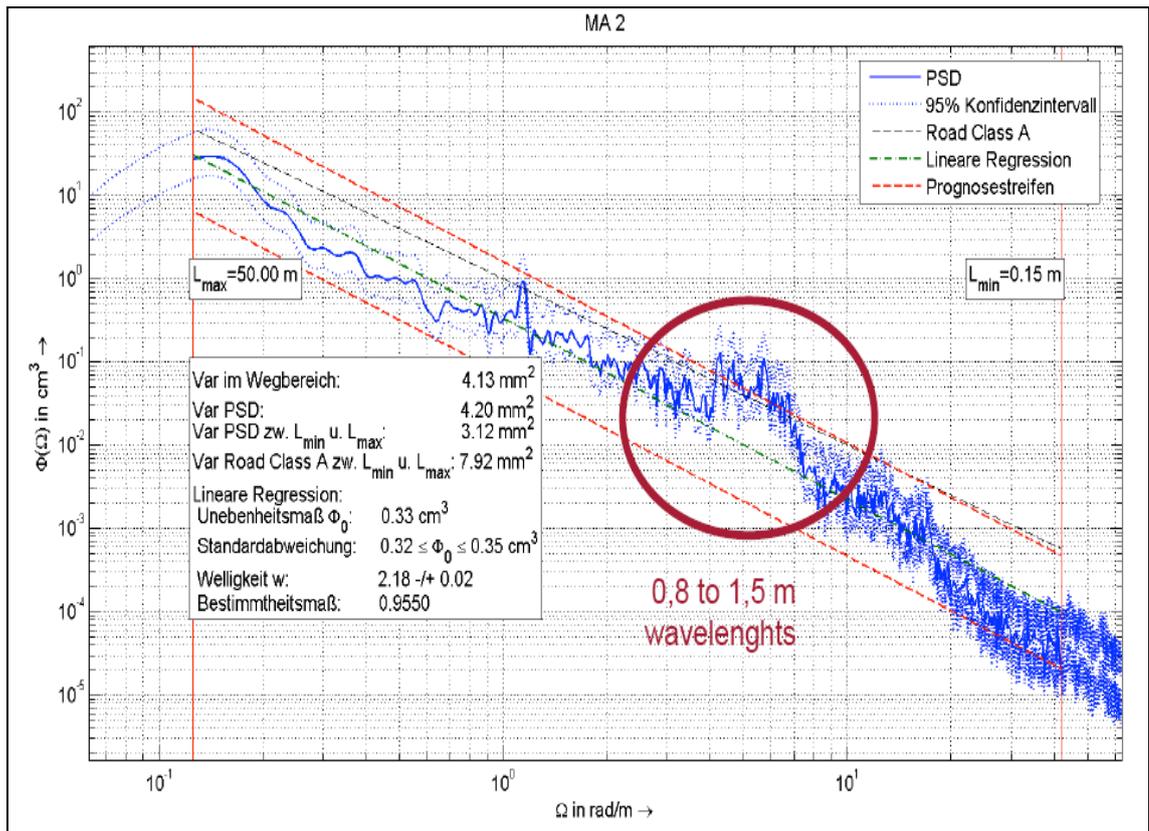


Fig. 27 : Exemple de résultats d'analyse PSD sur l'amplitude avec une forte concentration de défauts d'uni dans la plage de longueurs d'ondes comprise entre 0.8 et 1.5 m (l'abscisse du graphique est dans ce cas exprimé en fréquence).

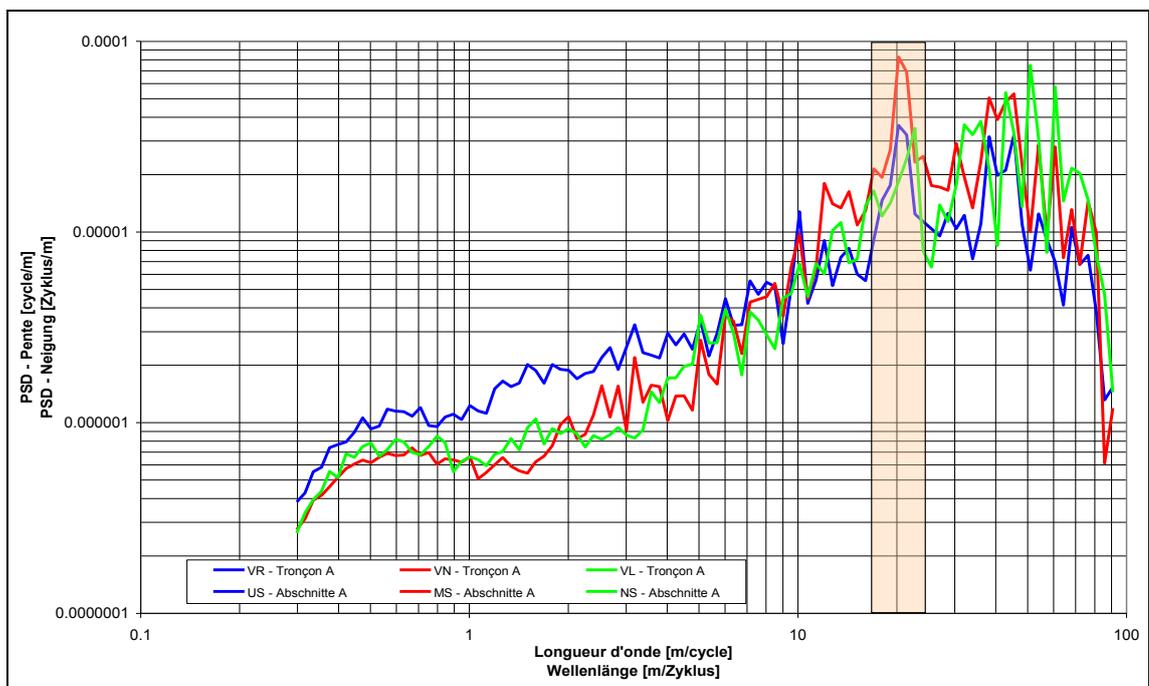


Fig. 28 : Exemple de résultats d'analyse PSD sur la pente

## 4.5 International Roughness Index (IRI)

### Introduction

A partir des années 40, des appareils de type "réponse" ont été conçus pour mesurer les déplacements verticaux par unité de distance parcourue (m/km). Malheureusement, il était impossible, à l'époque, d'obtenir les mêmes valeurs de différents appareils ou du même appareil dans le temps.

Suite à une étude dans le cadre du "National Cooperative Highway Research Program (NCHRP)", à la fin des années 70, un système idéal pour l'ordinateur a été développé afin de mieux comparer les différents systèmes "type réponse". Des modèles mathématiques du véhicule ont été développés et examinés pour fournir le même type d'index "m/km" comme une fonction mathématique du profil longitudinal. L'algorithme "Golden Car" était né. Les résultats de cette étude ont été publiés dans le "NCHRP Report 228".

Un grand effort a été entrepris dans les années 70 et 80, surtout par la Banque Mondiale, afin d'affiner l'algorithme avec pour résultat des directives pour le calcul d'indice de référence IRI (International Roughness Index) en 1986.

### Définition

L'indice IRI est calculé à l'aide d'un algorithme appelé "Quarter-Car".

Le filtre "Quarter Car" calcule la déflexion de suspension d'un système mécanique simulé avec une réponse comparable à une voiture de tourisme. "Quarter Car" puisque c'est un filtre sur un quart d'une voiture (une roue et la masse correspondante).

Le modèle représenté ci-dessous, est composé d'une roue (ressort), la masse de l'essieu soutenu par la roue, le ressort de suspension et un amortisseur, et la masse du châssis soutenu par la suspension pour cette roue. Le mouvement simulé est accumulé et divisé par la distance parcourue sur le profil longitudinal qui donne l'unité m/km de l'indice.

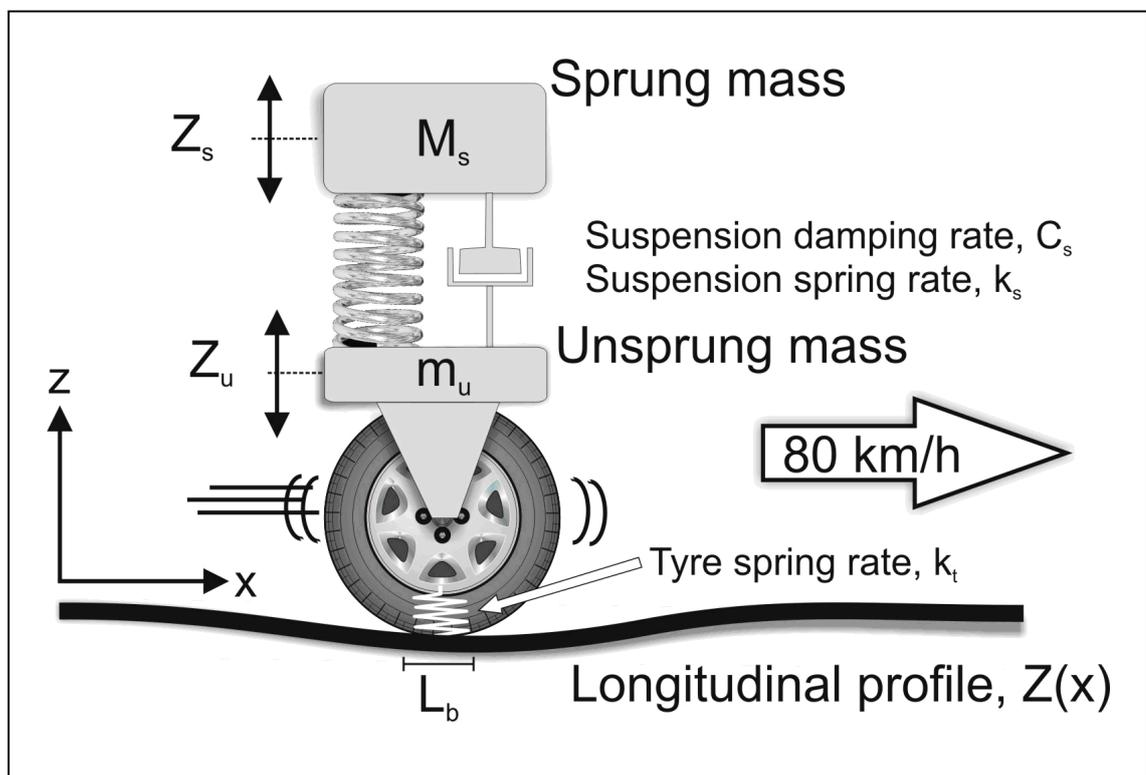


Fig. 29 : Schéma des éléments du filtre « Quarter-car » utilisé pour calculer l'IRI

Le calcul de l'IRI est décrit dans les "World Bank Technical Papers" 45 et 46.

L'IRI a la plus grande sensibilité pour les longueurs d'ondes situées entre 2.4 et 15 m, comme le démontre le graphique de la figure 30 (gain = 1.5..1.6).

La réponse varie entre 0.5 et 1.5 pour des longueurs d'ondes comprises entre 1.25 et 30 m. Les variations de la fonction de transfert de l'IRI sont donc un désavantage au niveau de l'interprétation des résultats et de leur mise en relation avec le profil réel des défauts d'uni.

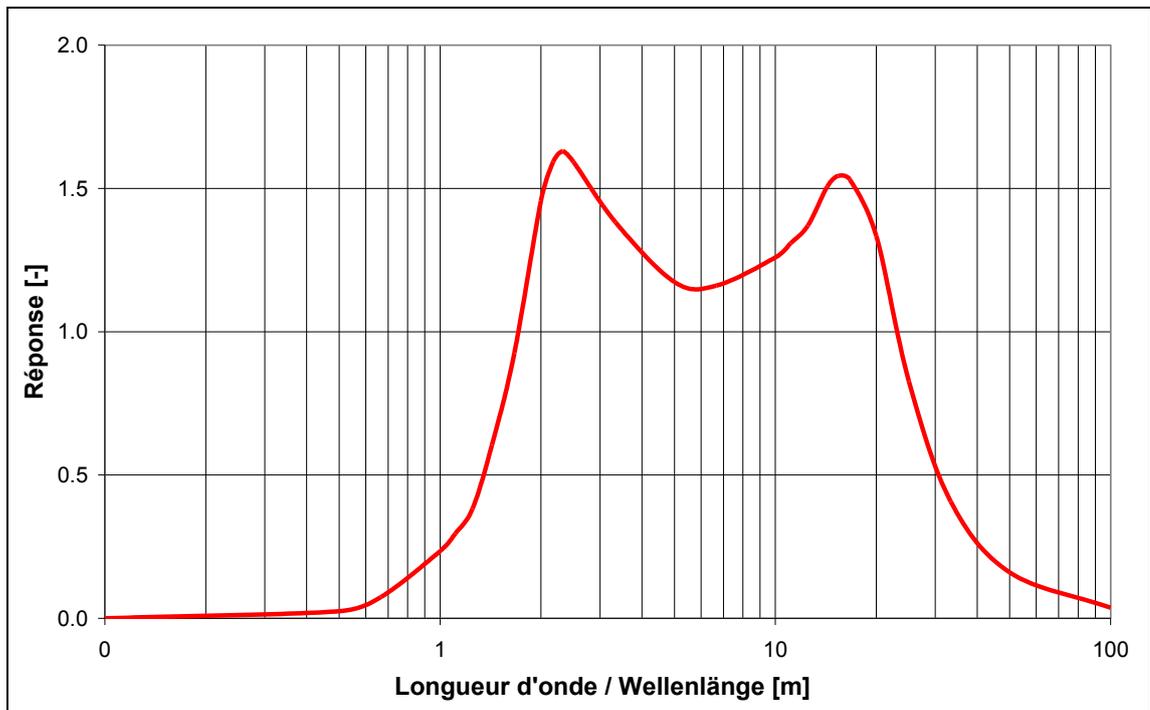


Fig. 30 : Fonction de transfert du filtre IRI en fonction de la longueur d'onde

## 4.6 AUN - Valeur globale des défauts d'uni

La méthode allemande appelée AUN « Allgemeine Unebenheit Nummer » (valeur globale des défauts d'uni AUN) est un paramètre visant une évaluation globale de la planéité longitudinale au moyen de la mesure d'un profil longitudinal vrai. Un profil longitudinal mesuré dans une plage de longueurs d'ondes entre 0.3 et 50 à 100 mètres sert de base pour une exploitation en sections de 100 m. Le calcul de la AUN nécessite la détermination de la densité spectrale de puissance. Sur cette base on détermine les deux paramètres d'état que sont la AUN (fréquence circulaire) et l'ondulation. La AUN dépend du niveau total des inégalités d'uni, tandis que l'ondulation  $w$ , représentant la pente de la droite de densité spectrale, indique la relation entre les inégalités de longues et courtes longueurs d'ondes. Plus la valeur AUN est grande, plus l'uni de la route est mauvais; et plus la pente  $w$  de la droite est grande, plus les défauts de grandes longueurs d'ondes dominent.

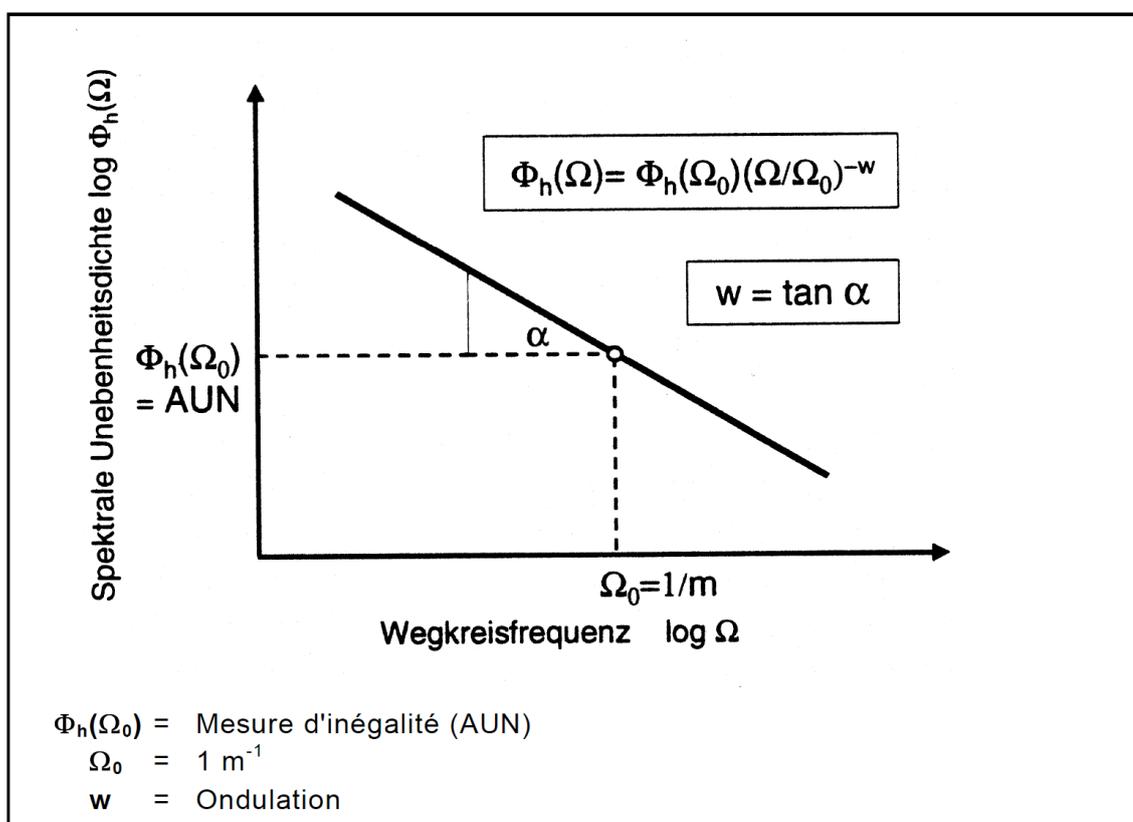


Fig. 31: Détermination de la valeur AUN sur la base de la densité spectrale de puissance sur l'amplitude. La valeur AUN correspond à la valeur de la DSP (densité spectrale) pour une fréquence de 1.

## 4.7 LWI - Indice des effets induits / Filtre complexe

Le LWI (Längsebenheit-Wirk-Index) a été développé sur les bases des expériences faites en Allemagne avec l'indice AUN (Allgemeine Unebenheit Nummer). Un désavantage essentiel de l'indice AUN est la mauvaise prise en considération des effets induits par les défauts d'uni répétitifs, en particulier sur les sections d'autoroutes avec dalles en béton systématiquement décalées, qui sont ressenties par la majorité des usagers comme très mauvaises. L'AUN évalue la planéité comme bonne à très bonne dans ces cas !

Le LWI comprend trois critères d'évaluation structurés selon les effets induits :

- Sollicitations de la route (limitation des surcharges dynamiques)
- Sollicitations des marchandises embarquées (stabilité, pérennité)
- Sollicitations du conducteur (confort)

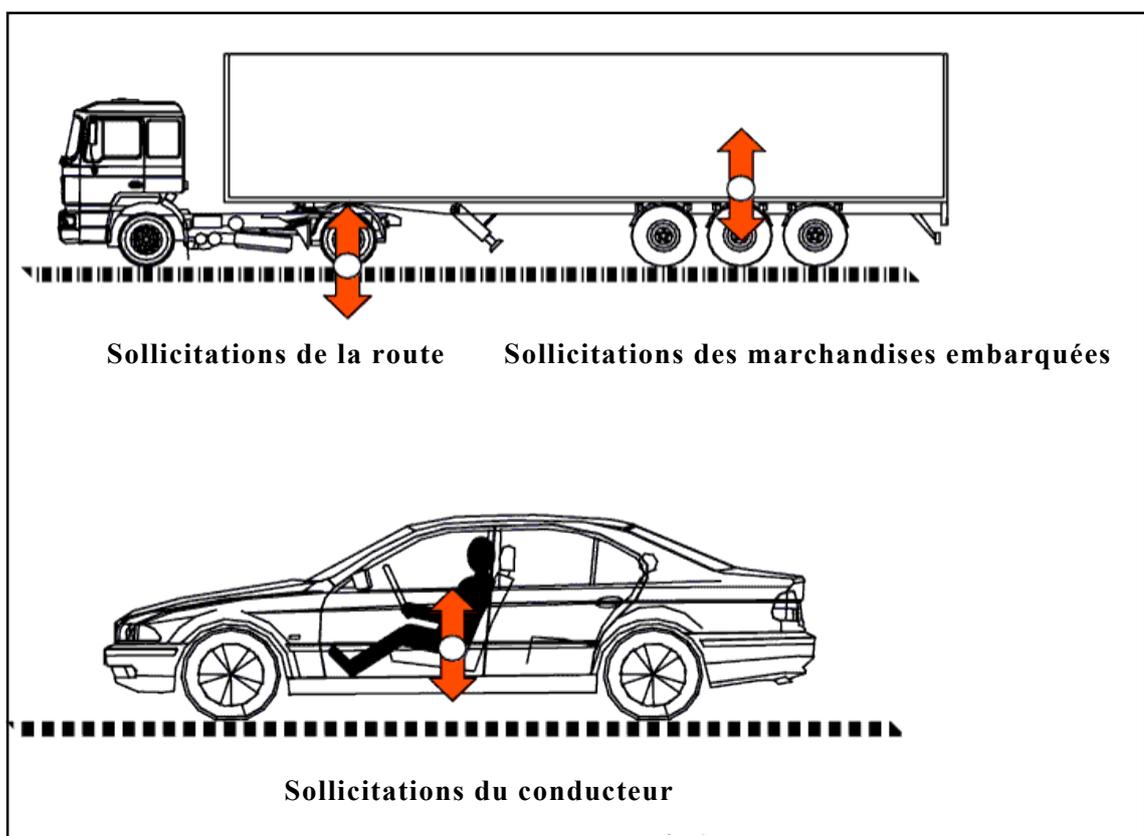


Fig. 32 : Composantes des 3 filtres du LWI (BASt - Steinauer 2001)

### Détermination du LWI

Lors du calcul du LWI, les inégalités du profil longitudinal sont évaluées par trois filtres complexes agissant sur la totalité du spectre des fréquences d'après leurs conséquences sur les critères mentionnés ci-dessus. Le filtre "conducteur" réagit selon la gamme de fréquences ressentie par un conducteur circulant sur la section de mesure à 100 km/h, le filtre "marchandises embarquées" calcule les accélérations verticales qui apparaissent directement sur la surface de chargement au droit de l'axe moyen d'une semi-remorque à 3 axes roulant à 80 km/h sur la route à évaluer.

Le filtre de "charge de roue" indique les fluctuations de charge dynamique entre les pneus et la route qui résultent d'un axe moteur de 11,5 t à 80 km/h.

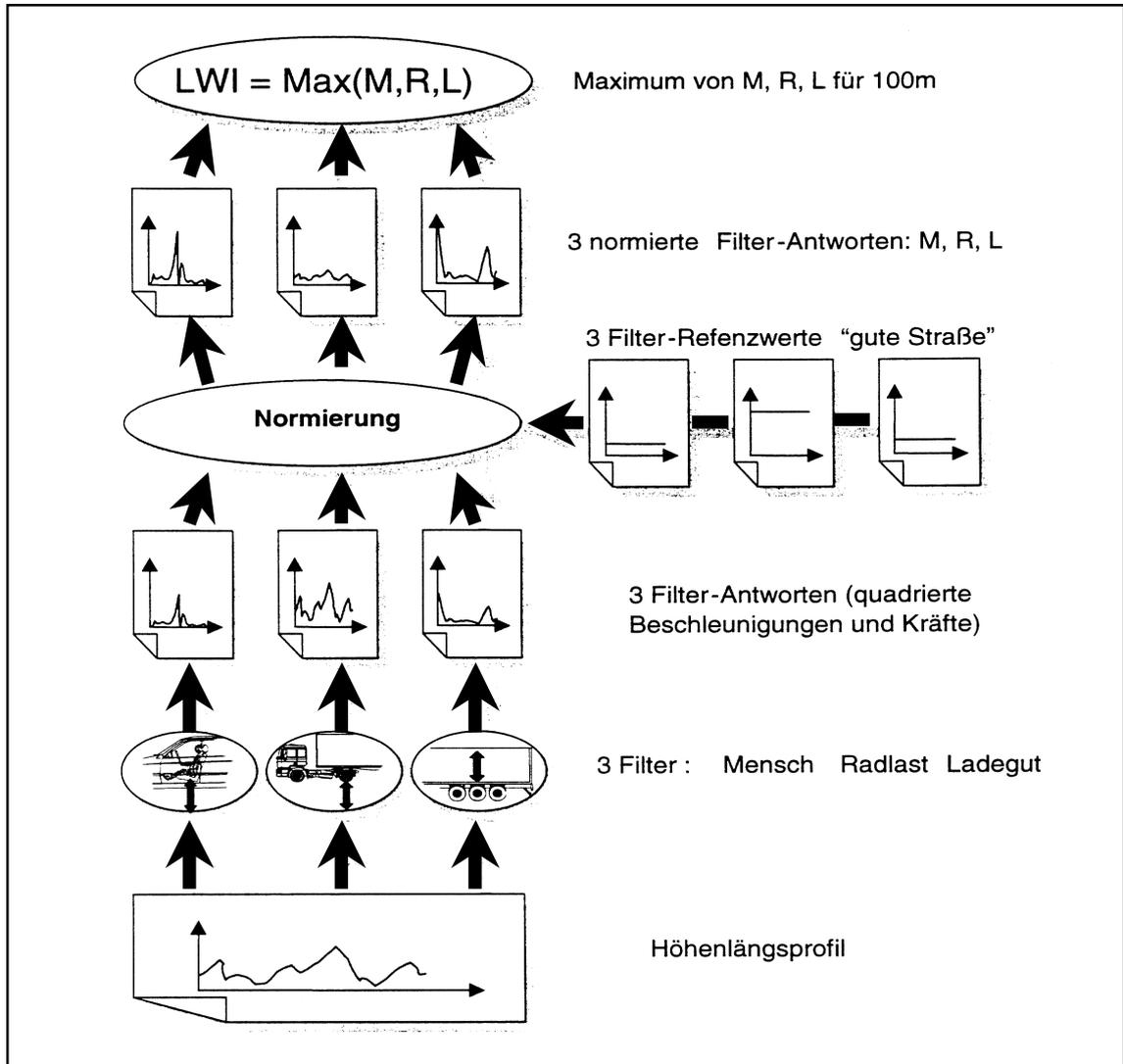


Fig. 33: Schéma de calcul pour l'indice LWI (Steinauer 2001)

Les résultats intermédiaires de cette phase de calcul sont :

- fréquences des accélérations verticales agissant sur les passagers
- forces dynamiques verticales entre les pneus et la chaussée
- accélérations verticales sur surface de chargement d'un camion.

Les valeurs ajustées des filtres sont comparées aux valeurs normalisées définies dans le modèle d'évaluation pour une "bonne" route. Est considéré comme "bonne" route une surface avec un spectre de densité de puissance AUN = 1cm<sup>3</sup> et une ondulation w = 2 (Welligkeit). Les résultats des trois filtres fonctionnels sont calculés pour des sections de 100 m et peuvent être appréciés de façon individuelle. La valeur LWI par section de 100 m représente la valeur maximale des trois filtres.

## 4.8 Profil longitudinal pondéré (Bewertetes Längsprofil)

Le profil longitudinal pondéré (Bewertetes Längsprofil) a été développé récemment sur les bases du LWI. Le modèle d'exploitation fait le lien entre d'une part un procédé de simulation d'oscillations (filtre complexe) et d'autre part un procédé d'analyse géométrique. Cela permet de s'affranchir des dépendances des paramètres vitesse et type d'oscillation.

### Détermination du profil pondéré

Au vu de la complexité de la méthode d'exploitation utilisée dans ce procédé, nous ne voulons pas la décrire ici en détail. Ceux-ci sont disponibles dans le travail de doctorat d'Andreas Ueckermann [ ]. La méthodologie peut être résumée de la façon suivante :

Dans une première phase, le profil des défauts d'uni est filtré par une moyenne glissante, afin d'en éliminer les longueurs d'ondes supérieures à 100 m. Ce procédé implique cependant de disposer de 50 m supplémentaires de relevé en début et fin de section d'

Le profil ainsi filtré est alors divisé en sections de 100 m comportant 1000 valeurs (une valeur de profil tous les 10 cm), auxquelles on ajoute les 12 valeurs adjacentes de la section précédente et suivante, soit au total 1024 valeurs. Ceci est nécessaire pour réaliser une transformation de Fourier rapide (FFT), dont le résultat représente un spectre du profil longitudinal. Le spectre obtenu est alors multiplié par la fonction d'appréciation, qui est comparable aux trois filtres complexes du LWI. Après cette opération, le spectre est retransformé à l'aide de la transformation inverse de Fourier (IFT) en une fonction de distance de relevé, soit le profil longitudinal pondéré.

Le grand avantage de cette méthodologie réside dans l'indépendance des résultats par rapport à la vitesse d'excitation et au type du véhicule. De plus la méthode n'induit pas de déphasage, comme c'est le cas avec le LWI, entre défaut d'uni et résultat d'exploitation. Ainsi, il est aussi possible d'évaluer de façon correcte les défauts d'uni isolés.

### Appréciation du profil pondéré

Le profil longitudinal pondéré est finalement apprécié avec deux indicateurs que sont l'écart type et l'écart d'amplitude maximal. Pour ce faire, on ne considère que les 1000 valeurs appartenant effectivement à la section considérée :

$$\text{Ecart type} \quad : \quad \sigma_{\text{bew}} = \sqrt{\frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{1000} h_{\text{bew}}^2(i)}$$

$$\text{Amplitude max} \quad : \quad \Delta_{\text{bew}} = h_{\text{bew,max}} - h_{\text{bew,min}}$$

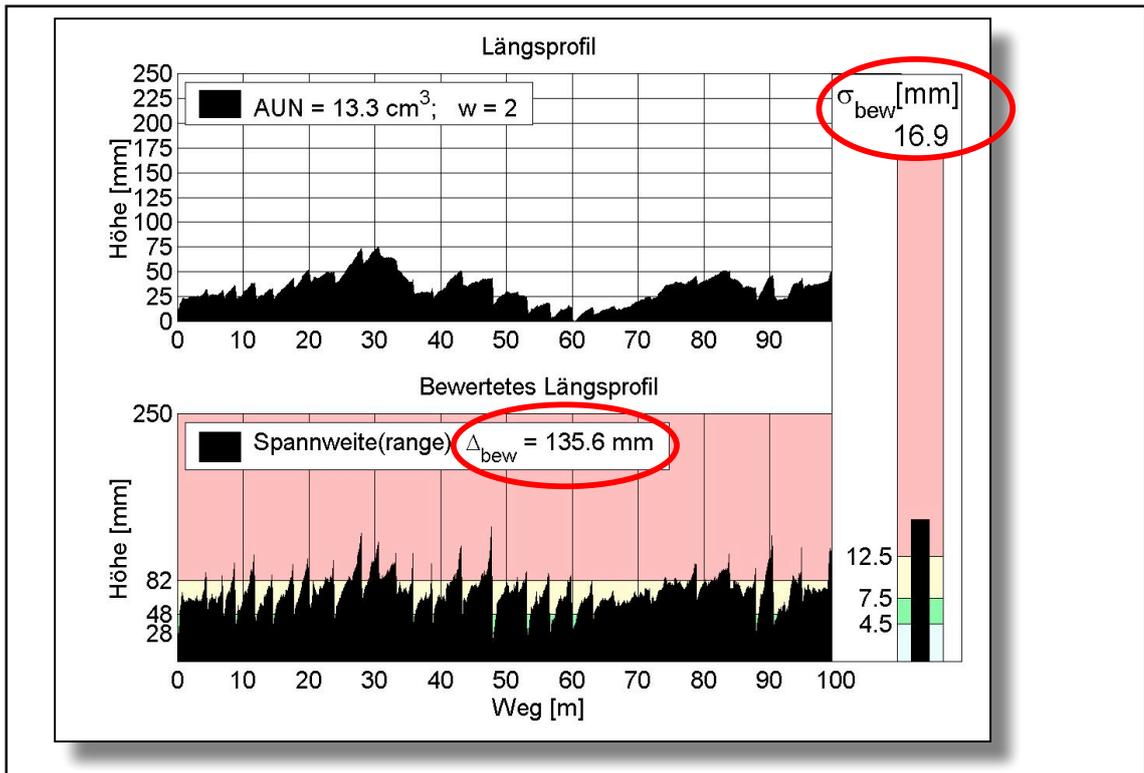


Fig. 34 : Exemple de résultats selon la méthode du profil pondéré: profil mesuré sur 100 m (en haut), profil pondéré correspondant (en bas), écart type de la section de 100 m (à droite)

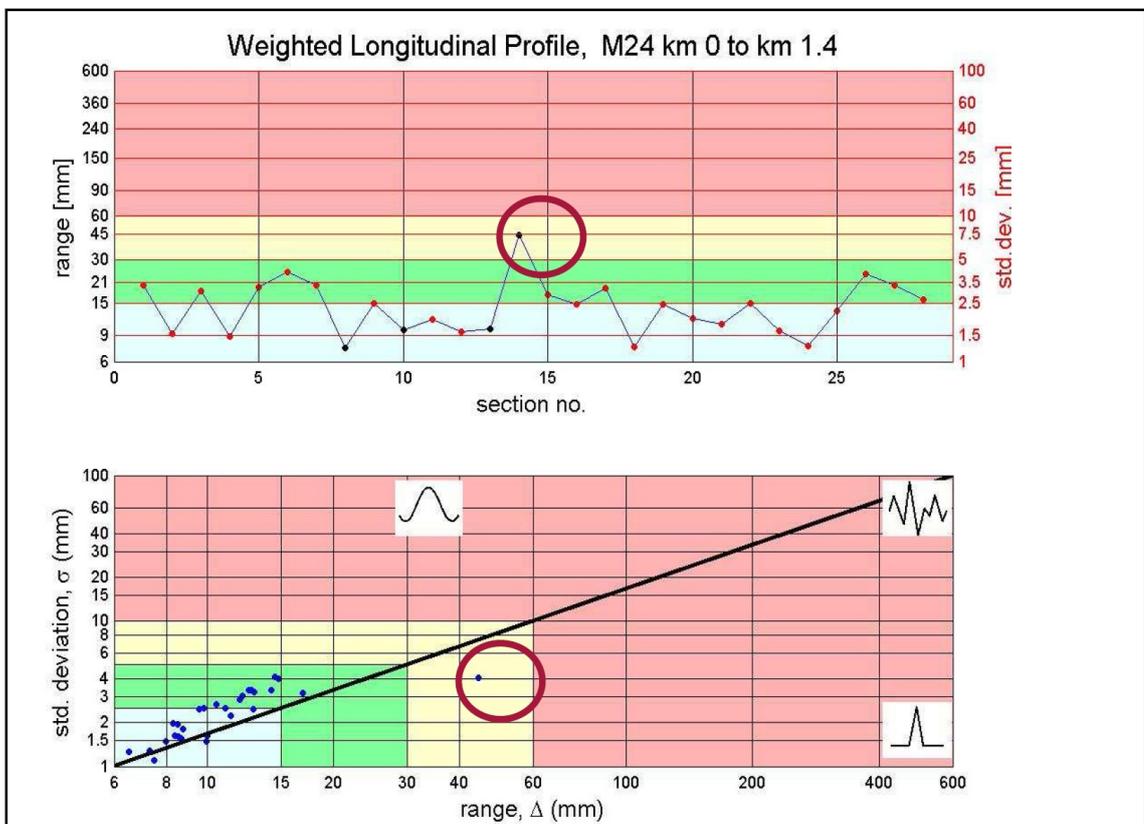


Fig. 35 : Exemple de résultats selon la méthode du profil pondéré : valeurs de l'amplitude par sections de 100 m (en haut), représentation des couples de valeurs  $\Delta$  &  $\sigma$  sur un nomogramme indiquant le type des défauts d'uni (ondulation, répartition aléatoire, défaut isolé)

## 5 ECHELLE D'APPRECIATION

### 5.1 Introduction

Des échelles d'appréciation ont été développées au cours du temps en fonction des types et des caractéristiques des indicateurs de planéité à disposition. Les valeurs choisies ont aussi souvent été modulées en fonction des types d'évaluation à réaliser, soit :

- appréciation au niveau d'un réseau
- appréciation au niveau d'un projet
- mesures de réception d'un chantier après la pose
- mesures systématiques d'état dans le cadre de la gestion proactive d'un réseau

### 5.2 Exploitation du profil en bandes d'ondes

#### 5.2.1 Appréciation en notes d'uni APL

##### Spécifications minimales

Suite à une étude sur l'effet de l'uni sur les qualités d'usage des routes, menée par le LCPC en 1991, des valeurs minimales des notes NBO ont été proposées, tenant compte de la vitesse de projet, pour des chaussées neuves.

Tab. 3 : Valeurs NBO minimales pour différentes catégories de chaussées neuves

Bandes d'ondes	130 km/h	110 km/h	90 km/h
	Limite inférieure des notes	Limite inférieure des notes	Limite inférieure des notes
PO	6	6	6
MO	7	7	6
GO	8	7	5

Pour rendre la perception des défauts d'uni d'une chaussée moins abstraite, on peut comparer l'énergie induite à l'effet d'une tôle ondulée. On définit donc une amplitude équivalente en relation avec les notes NBO, pour chaque type d'onde. L'amplitude équivalente est l'amplitude d'un profil d'inégalité théorique, régulier et sinusoïdal qui produit la même énergie globale que le profil mesuré réellement. Le tableau 4 contient les amplitudes équivalentes pour les valeurs de seuil de l'échelle des notes NBO dans les 3 domaines de longueurs d'ondes (petites ondes PO, moyennes ondes MO et grandes ondes GO).

Tab. 4 : Amplitudes équivalentes d'un profil sinusoïdal générant la même énergie que celle prise en compte pour la note NBO de chaque gamme

Note NBO	Amplitude équivalente sur tôle ondulée [mm]		
	PO 0.7 - 2.8 m	MO 2.8 - 11.3 m	GO 11.3 - 45 m
9.5	0.8 mm	2.4 mm	8 mm
8.5	1.0 mm	3.0 mm	10 mm
7.5	1.2 mm	3.8 mm	12 mm
6.5	1.6 mm	4.7 mm	16 mm
5.5	2.0 mm	5.9 mm	20 mm
4.5	2.4 mm	7.4 mm	24 mm
3.5	3.0 mm	9.2 mm	30 mm
2.5	3.8 mm	11.6 mm	38 mm
1.5	4.8 mm	14.4 mm	48 mm

#### Interprétation selon la circulaire DR 2000-36 (France)

Cette circulaire a été conçue en essayant de lier le niveau d'uni qu'il est possible d'atteindre au type de chantier et aux conditions de réalisation. Les exigences d'uni sont définies selon les cas considérés. Les 3 tableaux suivants résument les dispositions pour les travaux de construction, travaux de réhabilitation et travaux d'entretien et renvoient aux tableaux détaillés de la circulaire. La circulaire différencie donc les spécifications suivant la nature du chantier, le type de route, prend en compte la particularité des chantiers autoroutiers de grande longueur, dans le cas des travaux de réhabilitation et d'entretien, considère le nombre et l'épaisseur des couches mises en œuvre. Les spécifications sont exprimées en valeurs de notes NBO qui traduisent les niveaux des énergies du profil par bandes d'ondes et qui sont définies dans la méthode d'essai.

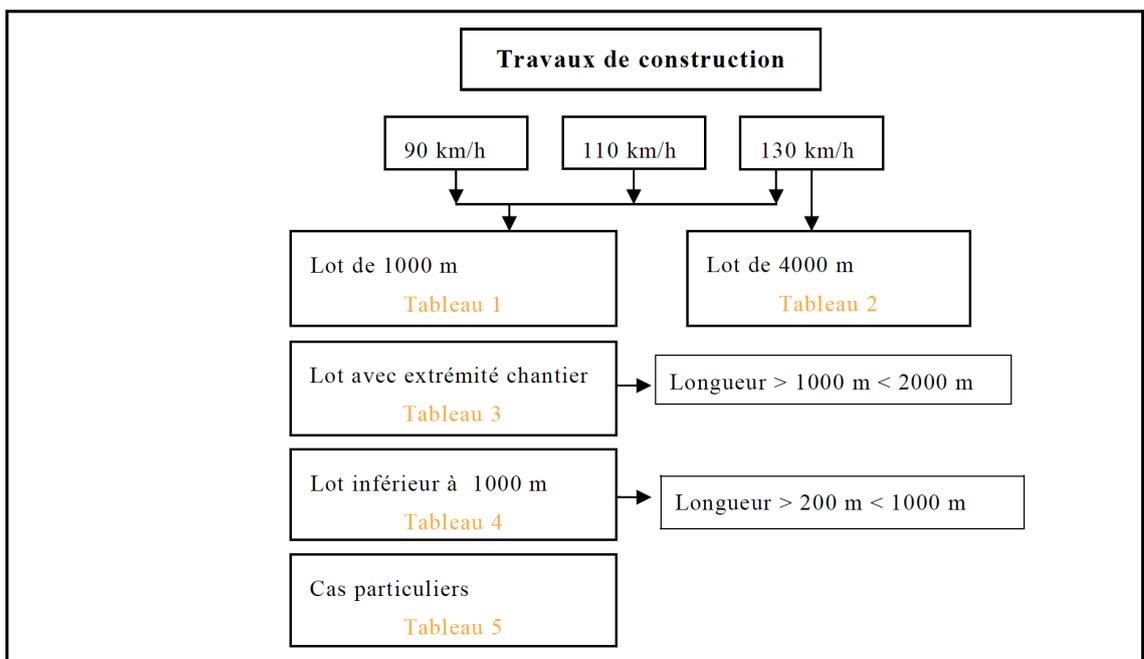


Fig. 36 : Structure du schéma d'interprétation NBO pour les nouvelles chaussées

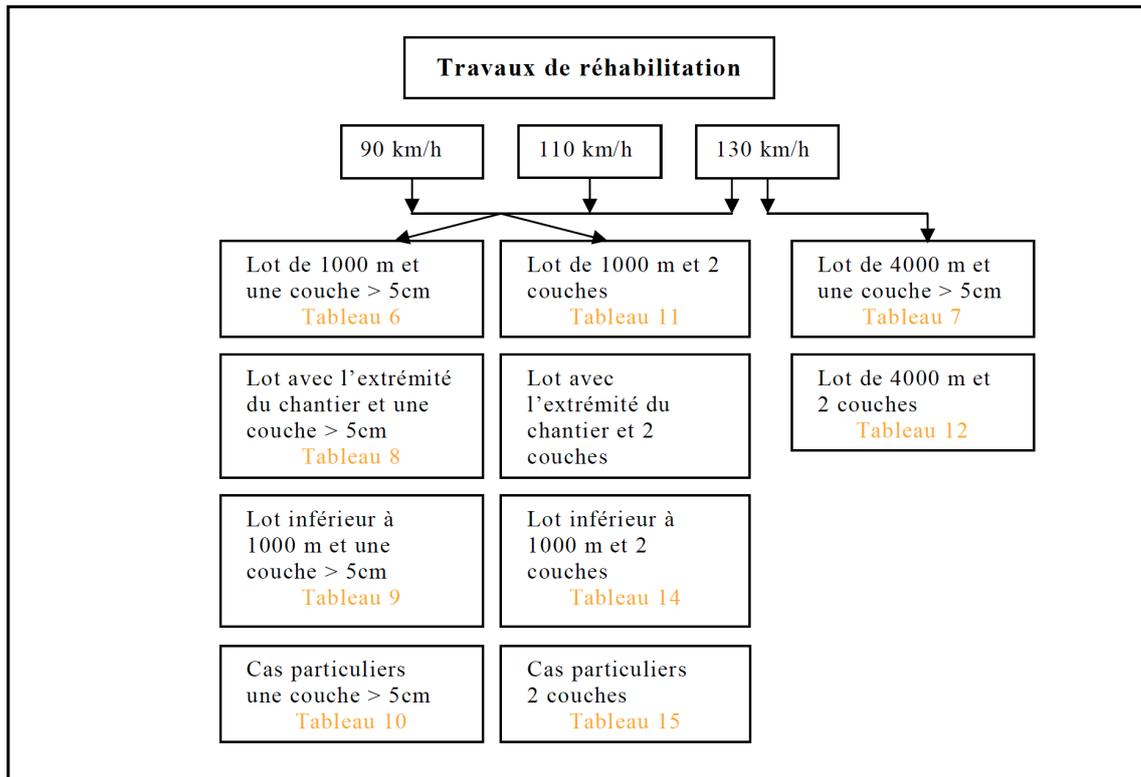


Fig. 37 : Structure du schéma d'interprétation NBO pour les travaux de réhabilitation

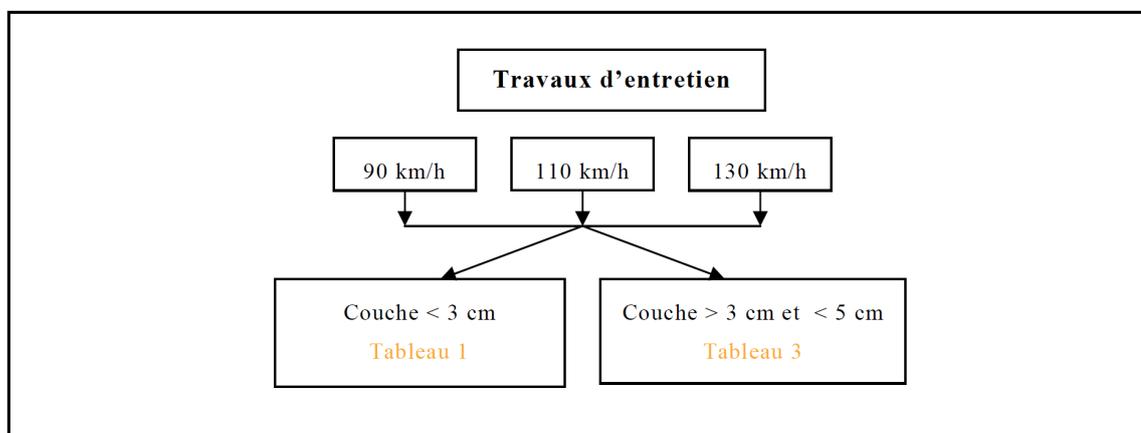


Fig. 38 : Structure du schéma d'interprétation NBO pour les travaux d'entretien

Un document annexe (clauses contractuelles pour l'application de la circulaire) définit les modalités pour le traitement des imperfections techniques. Les clauses contractuelles comprennent des seuils d'application de pénalités et de réfection. Les pénalités peuvent s'appliquer pour des imperfections dans les trois domaines d'ondes, la réfection n'est prévue que lorsque les défauts d'uni dans le domaine des petites ondes de la couche finale sont importants (note NPO égales ou inférieures à 5).

Pour réduire le risque de non-conformité au niveau de la couche de roulement, des niveaux minimum d'uni à atteindre sur les couches inférieures sont proposés à titre indicatif dans un guide technique associé à la circulaire.

### 5.3 Appréciation des valeurs de densité spectrale

Les valeurs de densité spectrale s'appliquent toujours à une section (souvent de 1000 m de longueur) prise dans son ensemble. Il a été défini au niveau international (selon ISO 8608) des classes de qualité définies par des lettres. Elles sont parfois reportées sous forme de bandes parallèles sur le graphique de la PSD (voir exemple ci-après). Vu que les résultats sont souvent répartis dans plusieurs bandes de qualité en fonction des gammes de fréquences ou de longueurs d'ondes, cette appréciation est souvent difficile à uniformiser pour qualifier de façon univoque et reproductible les caractéristiques de planéité de la section considérée et de sections plus ou moins semblables.

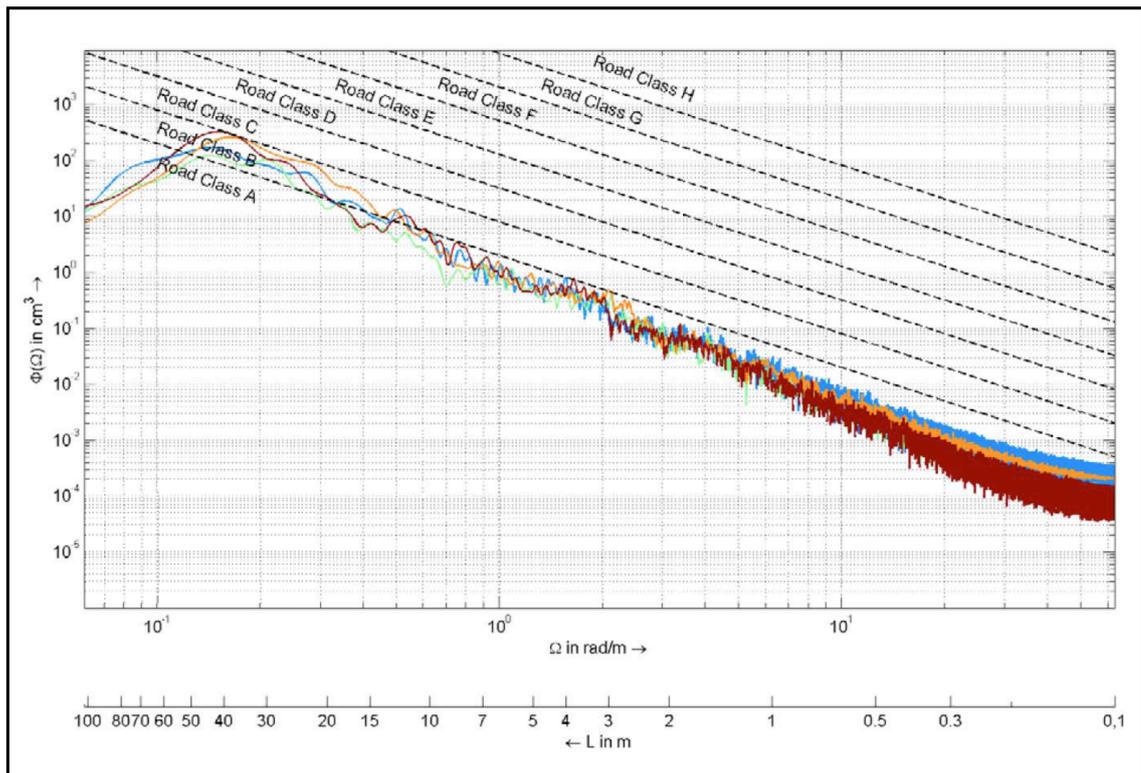


Fig. 39 : Exemple de représentation d'analyse PSD avec indication des classes ISO

## 5.4 Appréciation des valeurs d'IRI

Le diagramme ci-dessous présente des gammes de valeurs IRI pour différents type de route ainsi que pour différents états de la route. Un IRI de 0 correspond à une route parfaitement plate. Il n'y a pas de limite supérieure.

A ce jour, il n'existe pas de valeur de réception IRI uniforme dans les différents pays utilisant cet indicateur. Le diagramme ci-dessous, publié dans le "The Little Book of Profiling" présente un classement IRI selon l'état de la route. Une nouvelle structure routière devrait avoir une valeur IRI inférieure à au moins 3.25 [m/km]

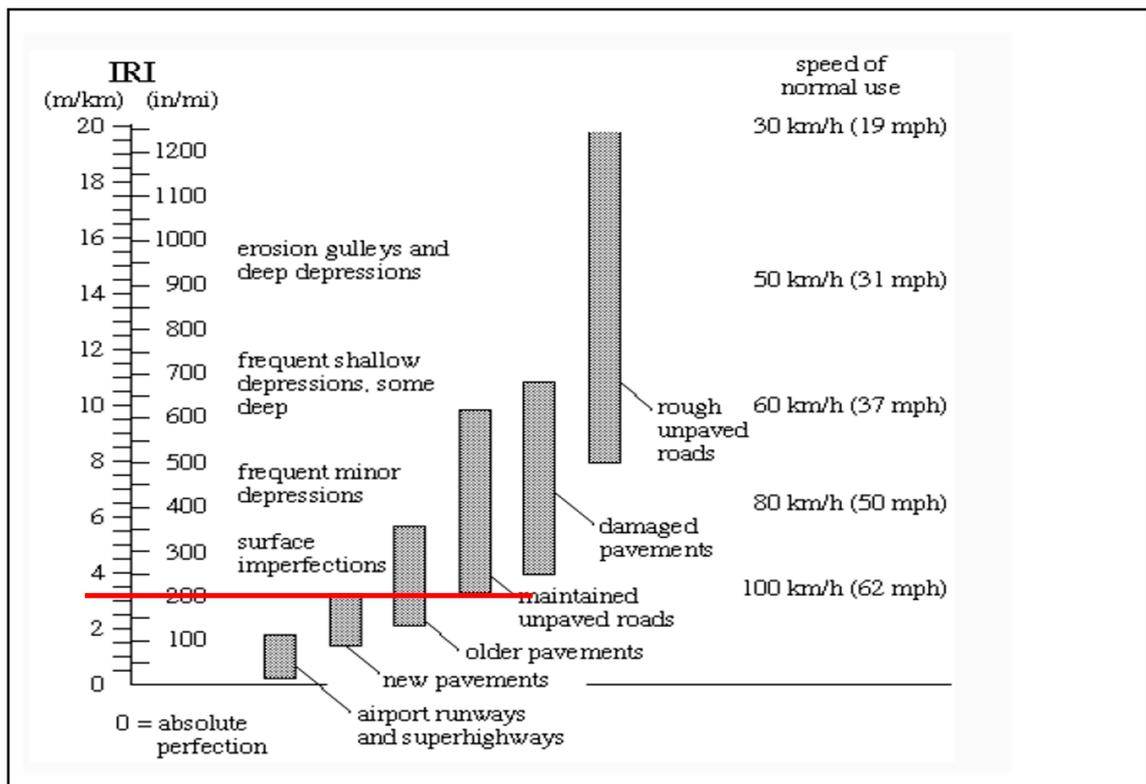


Fig. 40 : Exemple d'une échelle de classification de l'IRI en fonction du type de la chaussée

La spécification minimale actuelle varie passablement d'un pays à l'autre :

- Belgique (APL) : IRI  $\leq$  2,2 m/km;
- Espagne (Laser RST) : IRI  $\leq$  2,0 m/km;
- Suède (Laser RST) : IRI  $\leq$  1,4 m/km.
- France (APL) : IRI  $\leq$  1,3 m/km;

Au Québec, l'IRI a été spécifié dès 1994 dans certains contrats. Les valeurs 1998 sont :

- IRI  $\leq$  1,2 pour 7 sous-lots de 100 m sur 10;
- IRI  $\leq$  1,4 pour 10 sous-lots de 100 m sur 10;
- Les sous-lots dont l'IRI dépasse 1,7 m/km doivent être corrigés

### Valeurs retenues en Espagne

Valeurs IRI [m/km] pour la réception de nouvelles constructions

Pourcentage des valeurs sur 100 m	Couches de roulement et liaison		Autres couches
	Autoroutes	Autres routes	Toutes les routes
> 50 %	< 1.5	< 1.5	< 2.0
> 80 %	< 1.8	< 2.0	< 2.5
100 %	< 2.0	< 2.5	< 3.0

Valeurs IRI [m/km] pour la réception des travaux de réhabilitation (fonction de l'épaisseur)

Pourcentage des valeurs sur 100 m	Autoroutes		Autres routes	
	> 10cm	≤ 10 cm	> 10cm	≤ 10 cm
> 50 %	< 1.5	< 1.5	< 1.5	< 2.0
> 80 %	< 1.8	< 2.0	< 2.0	< 2.5
100 %	< 2.0	< 2.5	< 2.5	< 3.0

Valeurs IRI [m/km] pour l'auscultation des réseaux en service

➤ > 4.0 m/km	>>	très mauvais
➤ 3.0 – 4.0 m/km	>>	mauvais
➤ 2.0 – 3.0 m/km	>>	moyen
➤ 1.5 – 2.0 m/km	>>	bon
➤ 1.0 – 1.5 m/km	>>	très bon
➤ < 1.0 m/km	>>	excellent

## 5.5 Appréciation des valeurs AUN

Les valeurs AUN sont évaluées en Allemagne conformément au tableau 5.

Tab. 5 : Appréciation des valeurs AUN avec indices d'état correspondants

Paramètres AUN	Valeur de réception *	Valeur d'objectif	Valeur d'alerte	Valeur critique
Valeur d'état [cm <sup>3</sup> ]	0.8	1	3	9
Indice d'état [-]	-	1.5	3.5	4.5

\* La valeur de réception est une dimension statistique qui représente le 80% de la valeur d'objectif.

Les définitions des valeurs d'indice considérées dans le tableau sont les suivantes :

### Valeur d'objectif

Valeur de 1.5 qui doit être atteinte après reconstruction ou réalisation d'une mesure de renouvellement ou d'assainissement.

### Valeur d'avertissement

La valeur d'indice de 3,5 caractérise un état, où il est nécessaire d'analyser les causes responsables des dégradations et de planifier des éventuelles mesures d'assainissement

### Valeur critique

Une valeur d'état de 4,5 doit normalement être suivie d'une mesure d'entretien provisoire ou d'un assainissement définitif.

L'ondulation  $w$  n'est pas décisive lors de l'évaluation, mais sert lors de l'évaluation ultérieure de la caractérisation des valeurs AUN, c.-à-d. qu'une grande valeur  $w$  signifie que les grandes ondes (faibles fréquences) marquent la surface de la route - une petite valeur d'ondulation  $w$  en revanche que des petites longueurs d'ondes (fréquences élevées) marquent la surface de la chaussée.

## 5.6 Appréciation des valeurs LWI

Sur la base de la normalisation des valeurs de filtre déterminant le calcul du LWI, il existe aussi un lien mathématique entre le LWI et la AUN qui est décrit plus précisément dans une publication de 2001 (Steinauer). Dans l'illustration suivante (Fig. 41), cette relation entre AUN et LWI est représentée pour des valeurs d'ondulation  $w$  différentes.

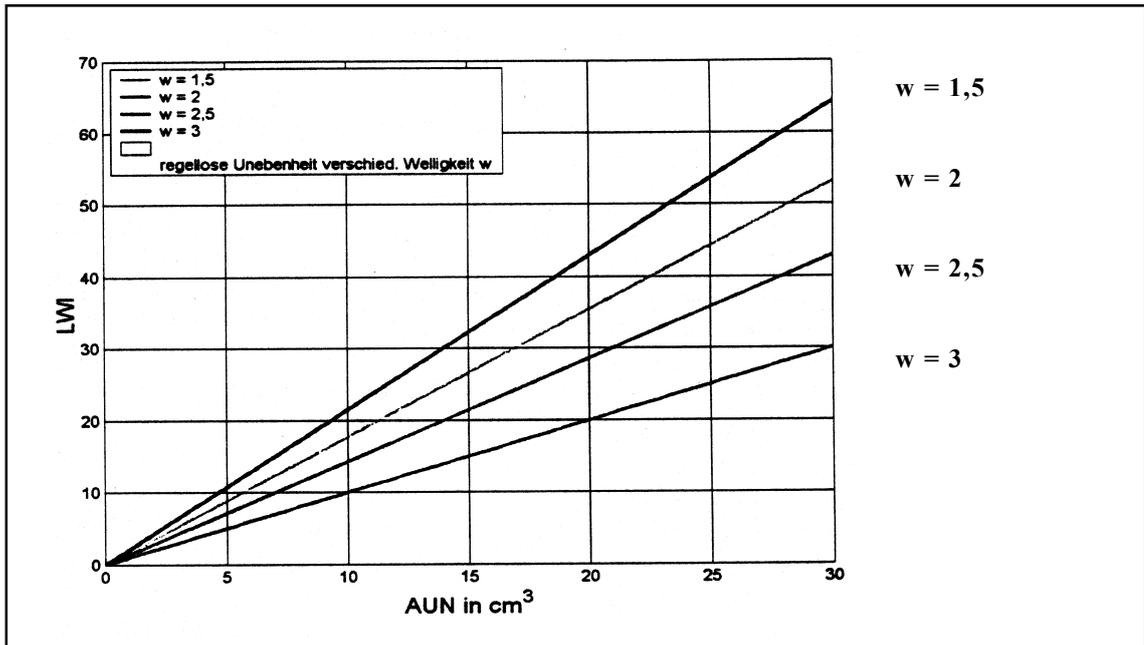


Fig. 41 : Relation LWI - AUN sur des irrégularités irrégulières (Steinauer 2001)

Selon la figure ci-avant, la valeur LWI est, pour des défauts d'uni répartis de façon irrégulière, légèrement supérieure à la valeur AUN. Le lien direct permet une évaluation du LWI.

Tab. 6 : Propositions de valeurs seuil pour le LWI (Steinauer 2001)

	AUN [cm3]	LWI [ - ]
<b>Valeur d'objectif</b>	1	1
<b>Valeur d'avertissement</b>	3	3
<b>Valeur limite</b>	9	9

La valeur d'objectif répond aux exigences pour une nouvelle route. Si la valeur d'avertissement est atteinte, l'état doit être observé intensivement. Aussitôt que la valeur limite est atteinte, des mesures d'assainissement doivent être prises. Les valeurs LWI s'appliquent aux niveaux de vitesse sur routes fédérales et autoroutes ( $v = 80$  et  $100$  km/h). D'autres valeurs limites sont nécessaires pour d'autres régimes de vitesse.

Sur la base des valeurs seuil du tableau précédent (Tab. 6), les différentes valeurs de filtre peuvent être recalculées (voir tableau 7).

### 1er cas – la charge de roue est déterminante

D'une part, une réduction de la charge de roue porte atteinte à la sécurité à cause de la réduction des possibilités de transmission des forces longitudinales et transversales, d'autre part, une augmentation de la charge de roue signifie une claire augmentation de la sollicitation de la superstructure.

### 2ème cas – les sollicitations des marchandises sont déterminantes

Selon la norme DIN 30786, 90% des sollicitations maximales dans le transport sur des semi-remorques devraient être au-dessous de  $3 \text{ m/s}^2$ . Cette valeur est également donnée comme valeur indicative de garantie dans les dispositions du tarif marchandises des chemins de fer allemands.

### 3ème cas - les sollicitations des passagers sont déterminantes

D'après ISO 2631-1 et VDI 2057 les sollicitations par oscillations (défauts répétitifs) sont perçues de façon « très tangible » par les passagers de voitures.

Tab. 7 Propositions de valeurs limites pour le LWI avec les valeurs correspondantes des exigences pour les sollicitations de la chaussée, des marchandises transportées et de des passagers des voitures (Steinauer 2001)

	Sollicitation de la route Sécurité de conduite	Sollicitations des marchandises	Sollicitations des passagers
<b>LWI</b>	<b>Variation maximale de la charge de roue.</b> (par rapport à la valeur statique) [%]	<b>Accélération verticale maximum sur la surface de chargement des marchandises</b> [ $\text{m/s}^2$ ]	<b>Valeur effective des accélérations verticales indexées en fréquence</b> [ $\text{m/s}^2$ ]
<b>1</b>	17.5	1.0	0.3
<b>3</b>	30.0	1.7	0.5
<b>9</b>	52.5	3.0	0.9

## 5.7 Appréciation des valeurs du profil pondéré

Les propositions pour l'appréciation des valeurs du profil pondéré (Bewertetes Längsprofil selon Uekermann) sont les suivantes en Allemagne:

Tab. 8 : Appréciation des valeurs du profil pondéré avec indices d'état correspondants

Profil pondéré	Valeur de réception *	Valeur d'objectif	Valeur d'alerte	Valeur critique
$\sigma_{bew}$ [mm]	4.0	4.5	7.5	12.5
$\Delta_{bew}$ [mm]	25	28	48	82
Valeur AUN [ $\text{cm}^3$ ]	0.8	1	3	9
Indice d'état [-]	-	1.5	3.5	4.5

\* La valeur de réception est une dimension statistique qui représente le 80% de la valeur d'objectif.

## 6 RECOMMANDATIONS POUR NORMALISATION

Avant de formuler les recommandations pour la normalisation, rappelons que par rapport à l'uni longitudinal, un véhicule en circulation est soumis à différentes excitations dynamiques liées à la surface sur laquelle il roule. Les mouvements résultant sont de quatre types et se manifestent dans les gammes de fréquences suivantes (pour une voiture):

Tab. 9 : Types de mouvement résultant des défauts d'uni et leurs gammes de fréquences

Type de mouvement	Partie du véhicule	Gamme de fréquences
Tangage	Châssis & caisse	env. 1 Hz
Roulis	Châssis & caisse	1 à 2 Hz
Pompage	Châssis & caisse	1 à 1.5 Hz
Battement de roue	Chacune des roues	10 à 13 Hz

Les trois premiers mouvements sont attachés à la notion de la dynamique de caisse du véhicule et le dernier à la dynamique des roues et du système de suspension. Ces fréquences d'excitation déterminent les longueurs d'ondes qui vont se manifester au niveau des véhicules (Fréquence = Vitesse du véhicule / Longueur d'onde des ondulations).

Le tableau suivant traduit en gammes de longueurs d'ondes les fréquences précédentes avec les vitesses pratiquées couramment en Suisse sur différentes parties du réseau:

Tab. 10 : Gammes de longueurs d'ondes excitant la caisse et les roues des véhicules

Gammes de longueurs d'ondes excitant la dynamique :		
Vitesse en km/h et (m/s)	de la caisse (1 à 2 Hz)	des roues (10 à 13 Hz)
120 km/h (33.3 m/s)	17 m à 34 m	2.6 m à 3.3 m
80 km/h (22.2 m/s)	11 m à 22 m	1.7 m à 2.2 m
50 km/h (13.9 m/s)	7 m à 14 m	1.1 m à 1.4 m
30 km/h (8.3 m/s)	4 m à 8 m	0.6 m à 0.9 m

Nous voyons au travers de ce tableau que les longueurs d'ondes s'étendent dans une plage allant environ de 0.5 m à 35 m. C'est donc cette étendue qu'il va falloir au minimum mesurer. La norme européenne EN 13036-5 [1] prend en compte des vitesses maximales sur autoroutes plus élevées que 120 km/h et fixe l'étendue des longueurs d'ondes à prendre en compte entre 0.7 m et 50 m.

En ce qui concerne l'exploitation de ces relevés d'uni, l'analyse statistique montre que la longueur des sections d'exploitation doit être au minimum de 4 fois la longueur de la plus grande longueur d'ondes de la gamme concernée (par exemple, sections de 200 m pour les grandes longueurs d'ondes jusqu'à 50 m).

## 6.1 Méthodes de mesure

Suite aux divers éléments développés dans ce rapport et aux rappels en introduction de ce chapitre, la méthode de mesure utilisée pour le relevé des caractéristiques de l'uni longitudinal doit permettre de décrire la surface de la chaussée dans un domaine de longueurs d'ondes allant jusqu'à 50 mètres (au minimum 25 m si on ne fait pas de mesures sur autoroutes).

Toutes les méthodes actuellement dans le focus de la normalisation européenne se basent sur l'exploitation du relevé d'un « **profil des défauts d'uni** ». Ce profil des défauts d'uni est indépendant de l'altimétrie absolue de la chaussée et se définit comme le profil des différences altimétriques (positives et négatives) par rapport à un profil idéal correspondant au projet théorique (y compris les rayons de raccord horizontaux, qui ont des longueurs d'ondes nettement plus grandes que celles mesurées).

Les méthodes de mesure à mettre en œuvre pour satisfaire aux conditions mentionnées sont donc du type « **relevé profilométrique** », telles que décrites au chapitre 3.1. Les systèmes de mesure potentiels se rangent dans 3 catégories :

- **Profilomètre à plusieurs lasers** (4 à 5 lasers en ligne par trace)
- **Profilomètre à 1 laser par trace et 1 plateforme inertielle**
- **Profilomètre à pendule inertielle** (1 pendule par trace).

## 6.2 Méthodes d'exploitation

Sur la base des considérations faites au chapitre 4 en ce qui concerne les avantages et désavantages des différentes méthodes d'exploitation existantes, et en tenant compte des développements actuels au niveau de la normalisation européenne (un des auteurs, Alain Jacot, est délégué suisse au CEN TC 227 - WG5 « Surface characteristics »), les méthodes d'exploitation suivantes du relevé profilométrique peuvent être potentiellement prises en considération lors de la prochaine révision des normes suisses sur la planéité longitudinale :

- **Appréciation en valeurs d'IRI (une des 3 méthodes de la norme EN 13036-5)**
- **Appréciation en bandes d'ondes (une des 3 méthodes de la norme EN 13036-5)**
- **Appréciation selon le profil pondéré (nouvelle méthode en cours d'évaluation).**

Ces trois différentes méthodes offrent les avantages et les inconvénients suivants :

### Appréciation en valeurs d'IRI

Cette méthode (décrite au chapitre 4.5) est une méthode développée dans les années 80 et qui a l'avantage d'un taux d'utilisation énorme au niveau européen et mondial. Elle permet donc de recourir à un grand nombre d'expériences pour l'appréciation de ses résultats car c'est un indice qui est facile à calculer et à interpréter et qui qualifie bien la planéité longitudinale quant au confort de roulement d'une chaussée.

Ces résultats peuvent cependant être entachés d'une distorsion involontaire liée à la fonction de transfert non linéaire du filtre mis en action par la méthode (figure 30). Ceci peut relativiser la qualité des résultats pour certaines gammes de longueurs d'ondes et amenuiser la sensibilité de la méthode.

### **Analyse en bandes de longueurs d'ondes**

Cette méthode (décrite au chapitre 4.3), également développée dans les années 80, découpe la gamme totale des longueurs d'ondes par l'application de filtres digitaux en un certain nombre de domaines, au minimum trois selon la norme EN 13036-5 [1] en préparation (ondes courtes de 0.78 à 3.12 m, ondes moyennes de 3.12 à 12.5 m et ondes longues de 12.5 à 50 m). Le filtrage en trois gammes est utilisé depuis longtemps déjà par la méthode française des NBO (Notes par Bandes d'Ondes). La méthode dite des Bi-octaves filtre sur 6 domaines, alors que le filtrage en bandes d'octave permet l'analyse de 12 gammes de longueurs d'ondes différentes. Après filtrage, les profils obtenus pour chaque gamme sont caractérisés par un indice pouvant prendre différentes formes (moyenne quadratique, énergie du signal, etc.). Cette méthode donne déjà de très bons résultats avec 3 gammes NBO au niveau d'une approche réseau, et peut être affinée au niveau du projet par une analyse plus fine. Les valeurs et échelles d'appréciation développées et utilisées en France et en Belgique depuis de longues années offrent un « kit » d'appréciation prêt à l'emploi, qui pourrait être légèrement adapté pour la Suisse, si besoin est. Le seul désavantage de la méthode est lié au nombre potentiellement élevé des valeurs à apprécier pour une analyse fine et à une légèrement moins bonne sensibilité que le profil longitudinal pondéré pour détecter certains types de défauts d'uni isolés.

### **Méthode du profil longitudinal pondéré**

Cette méthode (décrite au chapitre 4.8) est actuellement dans une phase intense de tests au niveau européen. De part la pondération différentielle du signal sur 9 bandes de longueurs d'ondes, ce qui de facto rend la fonction de transfert volontairement non linéaire, elle semble avoir l'aptitude de très bien décrire tous les différents types de défauts de planéité longitudinale (ondulations de longueurs d'ondes et d'amplitudes variables, défauts aléatoires, défauts isolés). Certains pays comme l'Allemagne et l'Autriche ont déjà annoncé vouloir en faire à court terme leur méthode officielle. D'autres pays comme l'Espagne et les Pays-Bas, utilisant actuellement l'IRI, sont en train de la tester pour éventuellement passer à moyen terme à la méthode du profil longitudinal pondéré.

La méthode du profil longitudinal pondéré, si elle continue de faire ses preuves, sera probablement intégrée à la future norme EN 13036-5 [1] lors d'une prochaine révision. Le seul désavantage connu de cette méthode est lié à son jeune âge et au manque actuel de recul et d'expériences pour pouvoir fixer en fonction des différents types de route et de réseau, des valeurs d'appréciation suffisamment pertinentes. Au vu de ces développements, nous recommandons de suivre avec attention les expériences faites avec cette méthode et de prendre une décision quant à son introduction lors de la phase finale de normalisation du domaine en Suisse.

## 7 PLANEITE TRANSVERSALE

Les défauts de planéité transversale se manifestent souvent sous la forme d'ornières, soit une déformation en creux dans le sens longitudinal située dans la zone des bandes de roulement. La profondeur d'ornière doit être déterminée par bande de roulement. Dans la situation courante de deux bandes de roulement par voie de circulation. La profondeur d'ornière est définie dans la norme européen EN 13036-8 [2] comme étant le plus grand écart du profil transversal d'un revêtement de surface de chaussée par rapport à une droite de référence virtuelle de longueur  $\langle L \rangle$  glissant sur la surface du profil dans les limites de la largeur analysée, d'un bord de l'ornière à l'autre.

### 7.1 Méthodes de mesure statiques

Le relevé manuel ou statique du profil transversal est un relevé très précis au niveau de la localisation et du calcul de la profondeur d'ornière et d'eau. Par contre, ce type de relevé est laborieux (min. 2 personnes pour son exécution) et un dispositif de sécurité est nécessaire. Dans ce cas, le dévers de la chaussée est mesuré en utilisant une référence horizontale, en l'occurrence un appareil de mesure muni d'un niveau à bulle. Ainsi le dévers de la chaussée est défini comme la pente d'une ligne de régression passant à travers les points du profil en travers.

#### 7.1.1 Profilographe manuel

Il existe divers appareils, tel le "Planum" pour relever graphiquement le vrai profil de la surface du revêtement. Sa manipulation simple et son faible coût font du "Planum" un appareil particulièrement adapté pour le contrôle de la planéité transversale sur des profils isolés et sur de courtes sections.

#### 7.1.2 Latte de 4 mètres

La latte à mesurer de 4 m (SN 640'520a) permet également de mesurer manuellement les caractéristiques principales (profondeur d'ornière, déformation maximale) de la planéité dans le sens transversal. Pour déterminer la profondeur d'eau il est préférable d'utiliser une latte plus courte, de longueur appropriée et munie d'un niveau à bulle.

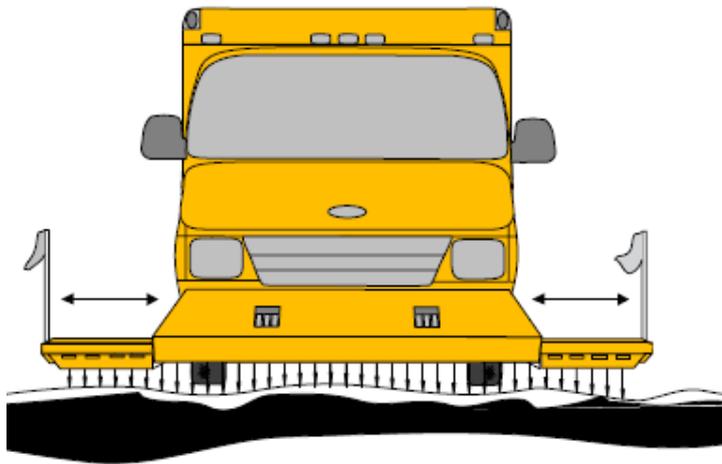
### 7.2 Méthodes de mesure dynamiques

Les véhicules à grand rendement permettent de relever à grande vitesse (jusqu'à 110 km/h) la profondeur d'ornière ainsi que la profondeur d'eau, en combinant la profondeur d'ornière et le dévers de la chaussée. Le dévers est mesuré à l'aide de gyroscopes ou d'une plateforme inertielle tel que le système POS LV (Position and Orientation System for Land Vehicles).

#### 7.2.1 Transducteurs ultrasoniques

Les transducteurs ultrasoniques sont embarqués sur une poutre à l'avant du véhicule et espacés de façon régulière (p.ex. 100mm) ou de façon variable (50 à 150 mm). Les transducteurs de type ultrasoniques mesurent la distance entre la poutre et la surface de la chaussée en calculant le temps entre l'émission et la réception d'un ultrason. Le temps est converti en distance en utilisant la vitesse de son.

L'ultrason est inaudible pour l'oreille humaine (fréquence supérieure à 20kHz). Ce type de relevé permet d'obtenir un profil transversal constitué d'au maximum 48 points de mesure pour une largeur total de 3.80 m.



La largeur est, lors des relevés, adaptée à la largeur de la voie à ausculter. Chaque transducteur a une précision de mesure de 1mm. La précision de mesure de la profondeur d'ornièrè est de 1.5mm.

Le relevé du profil transversal avec les transducteurs ultrasoniques est de plus en plus remplacé par un relevé avec des lasers ponctuels (limitation du nombre par le prix) ou à balayage avec imagerie du profil.

Fig. 42 : Profil transversal relevé par un véhicule équipé de transducteurs ultrasoniques

Radspur :		links	rechts	
Spurrinnentiefe	[mm]	16	19	Maximale Profiltiefe unter der 4m - Latte <b>T* = 20 mm</b>
Rinnenbreite	[cm]	95	116	
Aufschüttungsmenge	[kg/m]	8	8	
Wassertiefe t*	[mm]	1	1	Mittlere Querneigung des Profils (lineare Regression) <b>d = 4.4 % rechts</b>
Wasserspiegelbreite	[cm]	7	28	
Bezogene Wassermenge	[l/m]	0	0	

\* (SN 640'520 / SN 640'521)

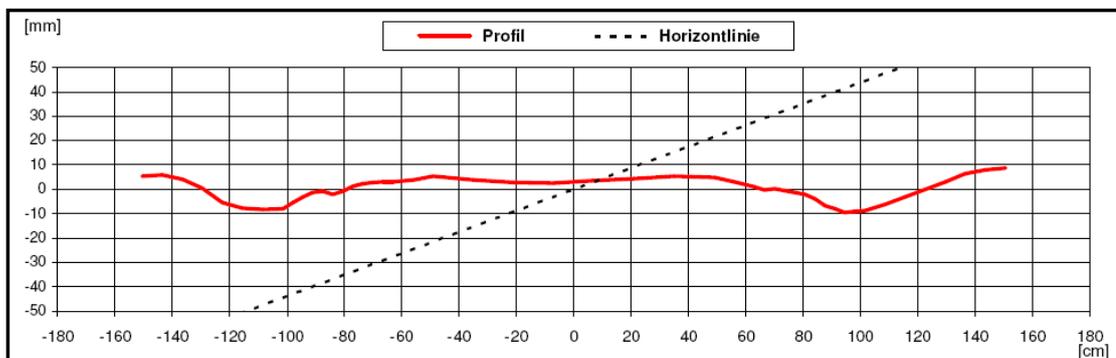


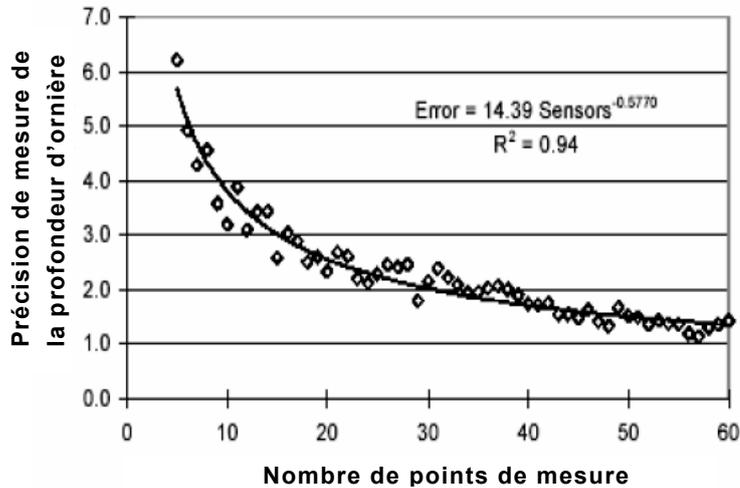
Fig. 43 : Exemple de représentation d'un relevé de profil en travers (QPM)

## 7.2.2 Mesures par lasers ponctuels

Dans le relevé avec des lasers ponctuels, les transducteurs hypersoniques sont remplacés par des lasers qui permettent d'obtenir une meilleure précision de mesure. Leur coût élevé a cependant un effet limitatif sur le nombre total de lasers utilisés.

### 7.2.3 Relevé d'une trace laser

Deux lasers illuminent la chaussée en même temps qu'une image numérique est prise par deux caméras tous les 5m. Il en résulte une image de par exemple 1280 pixels sur 4m de large. Chaque pixel correspond à un point de mesure sur le profil transversal. Lors de



l'exploitation, la largeur de calcul peut être adaptée à la largeur de la voie. Le grand nombre de points de mesure sur le profil transversal a une influence favorable sur la précision de calcul de la profondeur d'ornièrre (voir figure adjacente). Avec un tel système, la précision de calcul de la profondeur d'ornièrre est de 1mm.

Fig. 44 : Précision de la profondeur d'ornièrre selon le nombre de points de mesure [27]

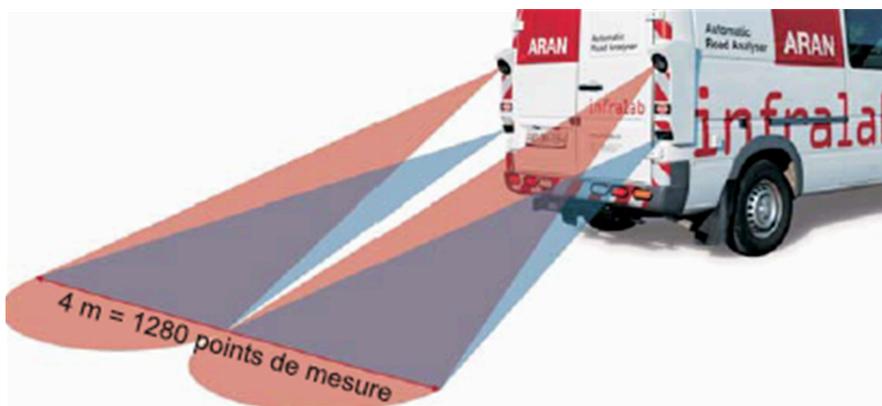


Fig. 45 : Principe de mesure par relevé photographique d'une trace laser sur la chaussée

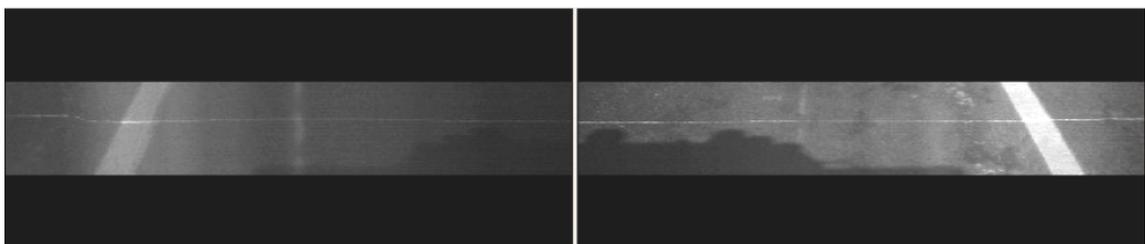


Fig. 46 : Exemples des deux images du profil transversal montrant la lumière laser

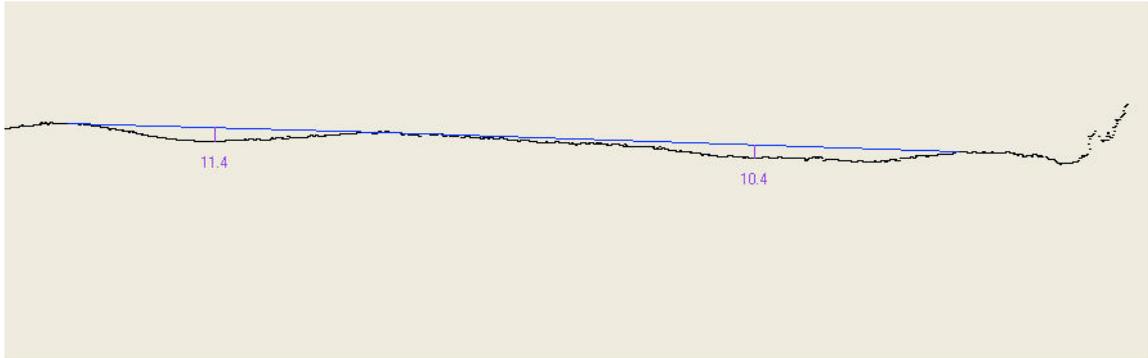


Fig. 47 : Exemple d'un profil transversal (y.c. calcul de la profondeur d'ornière) reconstitué à partir de deux images

## 7.3 Détermination de la profondeur d'ornière

Pour le calcul de la profondeur d'ornière, il existe plusieurs méthodes de calcul. Particulièrement la méthode appelée « WIRE » et la méthode appelée « Straighedge ».

### 7.3.1 Méthode « WIRE » selon SN 640'520a

Dans la norme actuelle suisse (SN 640'520a), le calcul de profondeur d'ornière  $T$  se fait au moyen d'une latte de 4m qui relie les points les plus élevés du profil transversal (voir figure ci-dessous). Cette méthodologie est issue de l'approche dite « WIRE ».

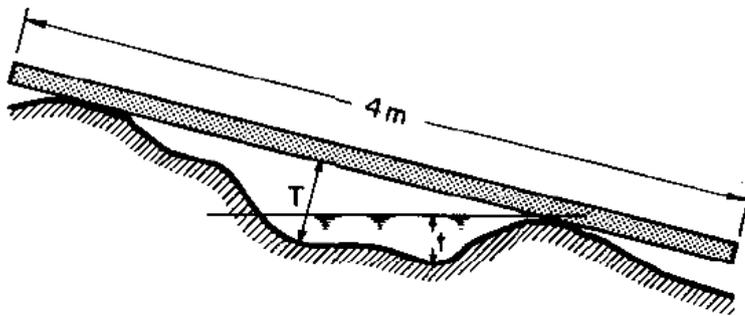


Fig. 48 : Illustration de la méthode selon SN 640'520a

### 7.3.2 Méthode « WIRE » adaptée

La plupart des appareils à grand rendement comme l'ARAN ou le QPM utilise la méthode de calcul dite « WIRE » par algorithme itératif mais, contrairement à la norme suisse, adapte la largeur de calcul à la largeur de la voie.

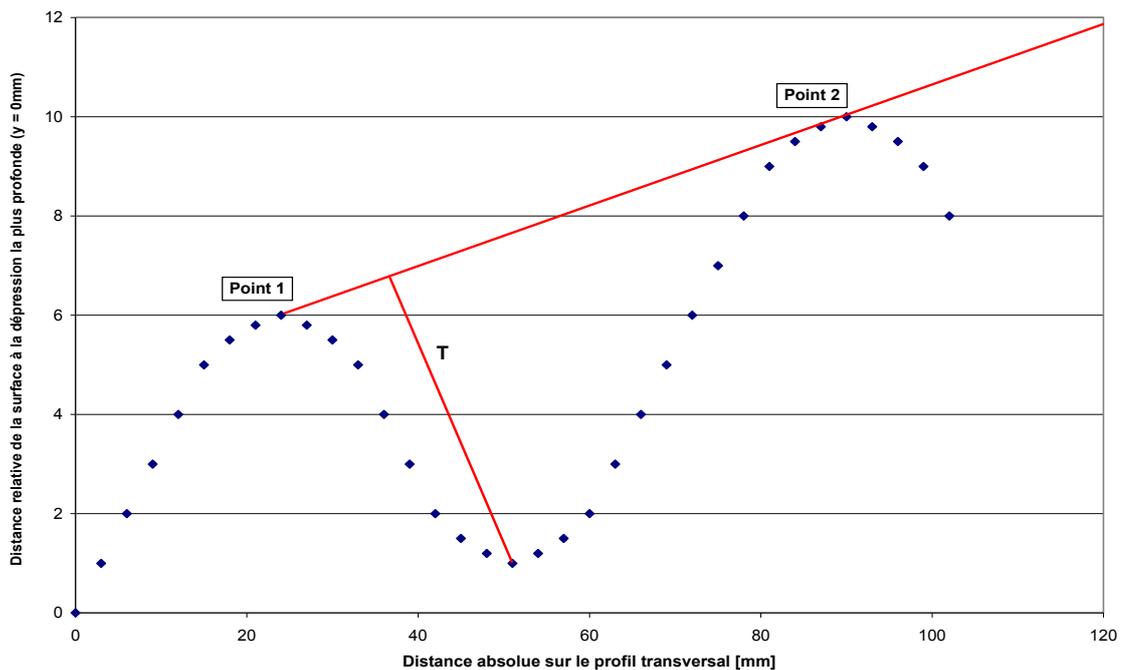
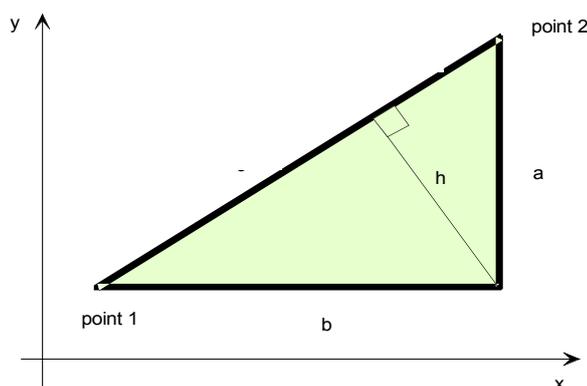


Fig. 49 : Méthode « WIRE » adaptée (largeur variable des traces de roulement)

La procédure de calcul suit les étapes suivantes :

1. La largeur de la voie, qui détermine la largeur de calcul, est définie pour chaque profil transversal relevé avant de calculer la profondeur d'ornière. Les données en dehors de cette largeur ne sont pas prises en compte dans les calculs.
2. L'algorithme recherche la pente la plus positive à partir des points représentés à la fig. 46. Par exemple, à partir du point 1, chaque pente entre ce point et tous les autres points vers la droite de celui-ci est calculée. Le point conduisant à la pente la plus positive est sélectionné comme second point ("point 2") pour chaque point se trouvant entre les points 1 et 2. Le point 2 devient maintenant le point 1 dans l'algorithme et la procédure exposée ci-dessus est répétée jusqu'à ce que le dernier point sur le profil transversal soit atteint.
3. Afin de déterminer la profondeur d'ornière, il s'agit d'abord de trouver la hauteur (h) d'un triangle rectangle. Les points 1 et 2 ci-dessous représentent les extrémités de la ligne (fil) enjambant l'ornière. La hauteur est donnée par  $h = ab/c$  étant donné que :

$$\left(\frac{1}{2} \cdot c_1 \cdot h\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot c_2 \cdot h\right) = \frac{1}{2} \cdot a \cdot b \quad \text{et} \quad c = c_1 + c_2 \quad \Rightarrow \quad h \cdot c = a \cdot b$$



Toutefois, si la condition  $b/a > 5$  est remplie (c'est à dire que la pente entre les droites c et b ne dépasse pas 20 %), alors la hauteur peut être calculée par approximation comme étant  $h = 0.98 \cdot a$  soit :  $h = a - 2\%$ .

Le recours à cette approximation permet d'éviter les calculs arithmétiques en virgule flottante, qui prennent beaucoup de temps, et les 2% d'erreur sont insignifiants.

4. Enfin, l'ornière gauche et l'ornière droite sont sélectionnées. L'ornière gauche/droite est l'ornière la plus profonde du côté gauche/droite du profil transversal.

### 7.3.3 Méthode « Straightedge »

Dans la nouvelle norme EN 13036-8, la profondeur d'ornière est définie comme la distance (perpendiculaire) entre le profil transversal et une ligne de référence virtuelle. Normalement la longueur de cette ligne de référence correspond à la moitié de la largeur de la chaussée à ausculter (1.5 à 2 m). Néanmoins, cette longueur est de 3 m dans le cadre des mesures de réception d'un chantier de pose.

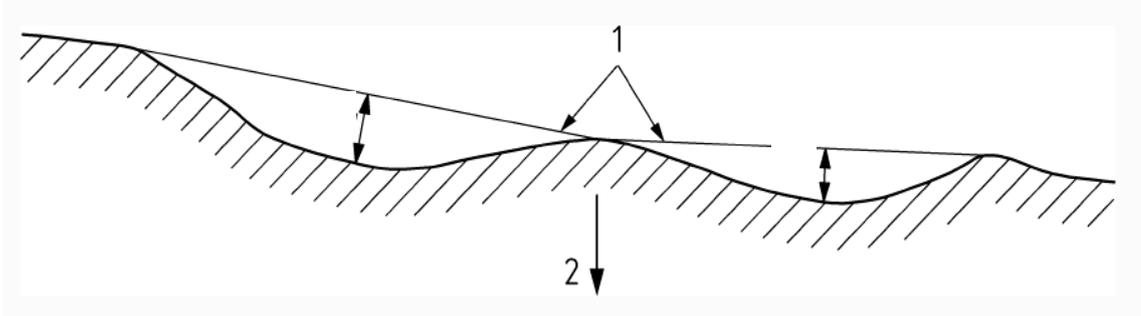


Fig. 50 : Illustration de la méthode « Straightedge » selon EN 13036-8 [4]

### 7.3.4 Influence des méthodes selon le type de profil

En règle générale, il existe principalement 2 types de profil transversal. Pour les profils de type I, les points élevés se situent sur les 2 bords de la largeur de voie mesurée. Dans ce cas de figure, les résultats diffèrent selon les méthodes d'exploitation. Dans le cas de profil de type II avec un des points élevés entre les deux ornières (route avec bord et/ou accotement déformés), les résultats des différentes méthodes d'analyse sont en général semblables. Il est donc indispensable de préciser la méthode d'exploitation utilisée.

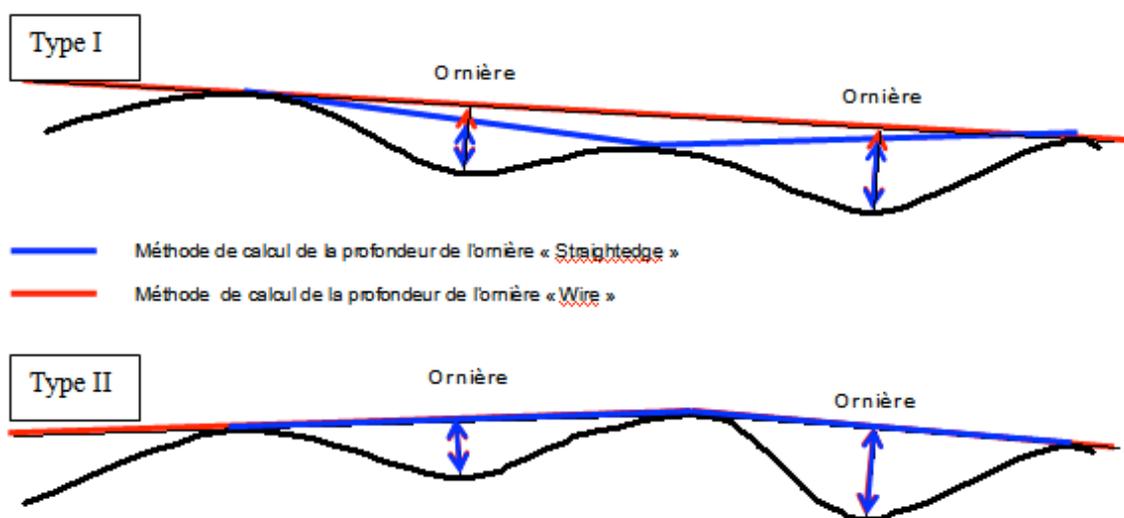
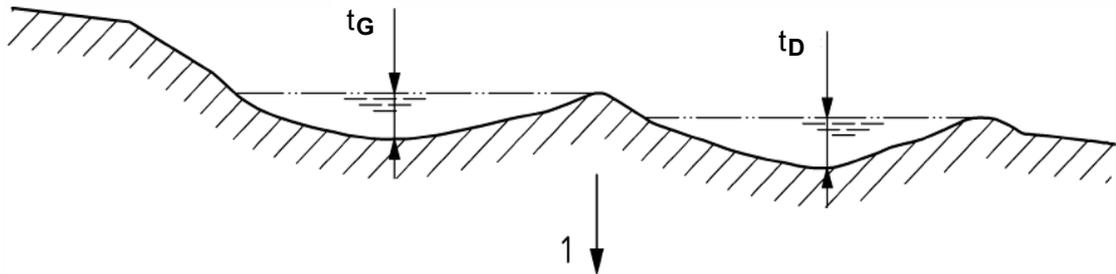


Fig. 51 : Influences du profil (selon position des points élevés) sur les valeurs mesurées avec les différentes méthodes d'exploitation (Straightedge, Wire, Wire modifiée)

## 7.4 Détermination de la profondeur d'eau théorique

La profondeur d'eau théorique représente la profondeur des flaches par rapport à l'horizontale et se calcule pour chaque bande de roulement (tL : droite et tG : gauche) comme présenté dans la figure ci-dessous [2].



1 : gravité terrestre / t<sub>G</sub> & t<sub>D</sub> : profondeur d'eau théorique de gauche et droite

Fig. 52 : Profondeur d'eau théorique dans la trace de roue gauche et droite

Pour le calcul de la profondeur d'eau (t) il faut orienter correctement le profil en travers. Le dévers de la chaussée est défini comme la pente d'une ligne de régression passant à travers les points du profil en travers. Pour un relevé automatique et à grand rendement, le dévers de cette ligne est égal au dévers  $\alpha$  de la barre du véhicule (donné par le système de positionnement embarqué, ligne rouge) corrigé par l'angle  $\beta$  entre le plan de la barre et la ligne de régression (ceci permet d'éliminer les erreurs dues aux oscillations latérales du véhicule). Une fois le profil a été orienté correctement, un algorithme de calcul détermine les profondeurs d'eau à gauche et à droite t<sub>G</sub> et t<sub>D</sub>.

Dans le cadre d'un relevé manuel, l'angle  $\beta = 0^\circ$ .

$\alpha$	: l'angle donné par le système de positionnement embarqué (ligne rouge)
$\beta$	: l'angle entre le plan de la barre et la ligne de régression des valeurs des lasers (ligne verte)
T	: profondeur d'ornièrre [mm]
t	: profondeur d'eau théorique [mm]
dévers	: $\alpha - \beta$

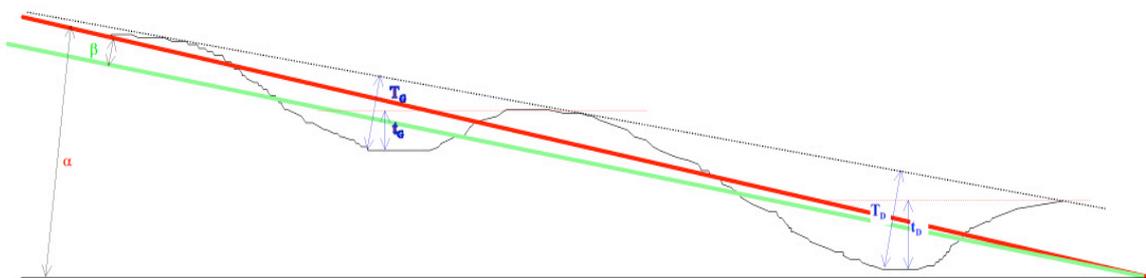


Fig. 53 : Paramètres d'évaluation du profil en travers (après correction de l'orientation)

## Abréviations

<b>Sigle</b>	<b>Signification (appareil de mesure)</b>
APL	Analyseur de profil en long
ARAN	Automatic Road Analyser
HRM	Highspeed Road Monior
QPM	Quer Profil Messgerät
SDP	South Dakota Profilometer

<b>Sigle</b>	<b>Signification (méthode d'exploitation)</b>
AUN	Allgemeine Unebenheit Nummer
CAPL	Coefficient APL
DSP	Densité spectrale de puissance
EBO	Energie par bandes d'ondes
IRI	International Roughness Index
LO	Bande des grandes ondes
LWI	Längsebenheit Wirk-Index
MO	Bande des moyennes ondes
PO	Bande des petites ondes
PSD	Power Spectral Density

<b>Sigle</b>	<b>Organisations et normalisation</b>
BAST	Bundesanstalt für Strassenwesen
CEN	Comité Européen de Normalisation
DOT	Département des Transports de l'état de Dakota du Sud
EN	Norme Européenne
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
GMR	General Motors Research
NCHRP	National Cooperative Highway Research Programm
SN	Norme Suisse
TRL	Transport Research Laboratory - Wokingham, United Kingdom
TRRL	Transport and Road Research Laboratory (ancienne domination du TRL)
VSS	Association suisse des professionnels de la route et des transports
ZEB	Zustandserfassung und Bewertung
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen

## Bibliographie

- [1] prEN 13036-5 (2008) Caractéristiques de surface des routes et aéroports – Méthodes d'essais – Partie 5: Détermination des indices longitudinaux
- [2] EN 13036-6 Caractéristiques de surface des routes et aéroports – Méthodes d'essais – Partie 6: Mesure de profils transversaux et longitudinaux dans le domaine de longueurs d'ondes correspondant à l'uni et à la mégatexture
- [3] EN 13036-7 Caractéristiques de surface des routes et aéroports – Méthodes d'essai – Partie 7: Mesurage des déformations localisées des couches de roulement des chaussées: essai à la règle
- [4] EN 13036-8 Caractéristiques de surface des routes et aéroports – Méthodes d'essais – Partie 8: Détermination des indices d'uni transversal
- [5] TRRL high-speed road monitor: assessing the serviceability of roads, bridges and air-fields TRRL Research Report 11
- [6] AIPCR « Inventaire des appareils de mesure des caractéristiques de surface des chaussées » 1995
- [7] AIPCR « Symposium International sur l'impact environnemental des défauts d'uni des routes » 1999
- [8] FILTER: Fehrl investigation on longitudinal and transversal evenness of roads
- [9] AFNOR Norme NFP 98 218 2-3 et NF 98 219 4-5
- [10] Bundesministerium für Verkehr, Sammlung und Auswertung von Strassenunebenheitsdaten, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 598, Bonn 1990
- [11] Deutsche Bahn, Vorschriften über die Beladung der Güterwagen (Beladevorschriften), Deutscher Eisenbahn-Gütertarif
- [12] DIN 30786 Transportbeanspruchungen, Mechanisch-dynamische Beanspruchungen, Schwingungen und Stossbeanspruchungen beim Strassentransport, Teil 2, Entwurf Oktober 1986
- [13] ISO 2631-1 Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: General requirements, 1997
- [14] Steinauer, Dr.-Ing. habil. B. Der Längsebenheitswirkindex LWI, Forschungsauftrag FE 04.186/2000/DGB, Institut für Strassenwesen, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Schlussbericht 2001
- [15] Ueckermann, A. Sammlung und Auswertung von Strassenunebenheitsdaten, Teil 2: Untersuchung und Vergleich verschiedener Messgeräte und Auswerteverfahren auf Eignung zur routinemässigen Erfassung und Bewertung des Ebenheitszustandes, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 598, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, 1991
- [16] Ueckermann, A. Der Längsebenheitswirkindex, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 839, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, 2002

- [17] Ueckermann, Dr.-Ing. A. Ein geometrisch basiertes Verfahren zur Lokalisierung und Bewertung einzelner, periodischer und regelloser Unebenheiten im Strassenlängsprofil, Institut für Strassenwesen, Aachener Mitteilungen Strassenwesen, Erd- und Tunnelbau, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2004
- [18] VDI 2057 Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen, Ganzkörperschwingungen, Blatt 1, Entwurf 1999
- [19] Everything you always wanted to know but were afraid to ask, Thomas D. Gillespie, Ph. D. University of Michigan Transportation Research Institute, 1992
- [20] Surface Characteristics of Road and Airfield Pavements, Test Methods – Part 5, Determination of Longitudinal Unevenness Indices, pr EN 13036-5, 2008
- [21] Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 8: Transverse unevenness and irregularities, definitions, methods of evaluation and reporting, EN 13036-8, 2008
- [22] ARAN Mesures d'orniérage, rapport d'essais, centre de recherches routières, Bruxelles, 1996
- [23] The Little Book of Profiling, Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles, Michael W Sayers and Steven, Karamihas, septembre 1998
- [24] ASTM E950, Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Travelled Surfaces with an Accelerometer Established Inertial Profiling Reference, 2004
- [25] SN 640520a, Norme Suisse, Planéité, Contrôle de la géométrie
- [26] SN 640521c, Norme Suisse, Planéité, Exigences de qualité
- [27] Establishing Reference Transverse Profiles for Rut Depth Measurements in New Zeland, C.R. Bennett, Proceedings Pavement Evaluation Conference, Roanoke, VA, October 2002



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,  
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Office fédéral des routes OFROU

## RECHERCHE EN MATIERE DE ROUTES DU DETEC

ARAMIS RPT

### Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le:

#### Données de base

Projet N°:

Titre du projet:

Echéance effective:

#### Chef de projet

Nom:  Prénom:

Service ou entreprise:

Rue et N°:

NPA:  Email:

Lieu:  Téléphone:

Canton, pays:  Fax:

#### Textes:

Résumé des résultats du projet:

Les normes suisses relatives au relevé et à l'évaluation de la planéité des couches de roulement routières et aéroportuaires ont été publiées en 1977 et ne sont plus adaptées aux besoins actuels. Cette recherche doit fournir les bases conceptuelles à la révision de la normalisation dans ce domaine.

En ce qui concerne les différents systèmes de relevé de l'uni longitudinal, et au vu des impératifs dictés par la norme EN 13036-5 sur le domaine des longueurs d'ondes à exploiter (50 cm à 50 mètres), seuls les appareils permettant de réaliser un enregistrement profilométrique des défauts d'uni par rapport à un profil idéal peuvent être valablement considérés comme base d'exploitation.

En ce qui concerne les multiples indices d'uni longitudinal existants, trois possibilités ont été retenues: l'IRI (le plus répandu au monde, mais avec certaines limitations), les NBO françaises (notes par bandes d'ondes, correspondant à une des méthodes de la EN 13036-5) et une nouvelle méthode prometteuse développée en Allemagne: le profil longitudinal pondéré. Cette dernière, de part la pondération différentielle du signal sur 9 bandes de longueurs d'ondes, semble avoir l'aptitude de très bien décrire les différents types de défauts d'uni (ondulations de longueurs d'ondes et d'amplitudes variables, défauts aléatoires, défauts isolés).

Atteinte des objectifs:

Aussi bien au niveau des procédés de relevés à grand rendement de l'uni longitudinal qu'en ce qui concerne les méthodologies actuelles de l'évaluation de la qualité de la planéité des couches de chaussées routières et aéroportuaires, la recherche passe en revue les différentes techniques et méthodes utilisées actuellement en Europe et dans le monde. Les variantes sont analysées et des propositions de choix pour la future normalisation suisse sont décrits et justifiés.

Un aperçu des méthodes de relevé de l'uni transversal est également proposé dans le rapport.

Sur la base de ce rapport, la commission VSS en charge du dossier sera en mesure de procéder aux choix pour une révision conséquente de la normalisation dans le domaine. Les objectifs du mandat sont ainsi pleinement atteints.

Déductions et recommandations:

Les normes suisses doivent prescrire, conformément à la norme EN 13036-5, l'utilisation d'appareils de relevé de la planéité longitudinale couvrant avec une précision suffisante le domaine normalisé des longueurs d'ondes à exploiter (0.50 à 50 mètres).

Pour l'évaluation de la planéité longitudinale, la normalisation suisse doit retenir une méthodologie qui d'une part décrit au mieux les différents types de défauts d'uni (ondulations répétitives de longueurs d'ondes et d'amplitudes variables, défauts aléatoires, défauts isolés) et d'autre part, offre un niveau de compréhension et de simplicité d'utilisation propice à sa bonne utilisation et à son acceptation dans la pratique (contrôle qualité à la réception de l'ouvrage ou relevés d'état au niveau d'un réseau).

Publications:



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,  
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC  
Office fédéral des routes OFROU

**Appréciation de la commission de suivi:**

Cette appréciation de la commission de suivi remplace l'ancienne évaluation technique détachée.

Evaluation:	<p>Le rapport décrit de façon détaillée les divers appareils et procédés de relevés à grand rendement de l'uni longitudinal actuellement engagés pour ce genre de mesures. Les nombreuses méthodologies d'évaluation et de notation de la qualité de la planéité des couches de chaussées routières et aéroportuaires sont également traitées de façon extensive. Les différentes variantes sont analysées et des propositions de choix pour la future normalisation suisse sont faites et justifiées.</p> <p>Un aperçu des méthodes de relevé de l'uni transversal est également proposé dans le rapport.</p> <p>Sur la base de ce rapport, la commission VSS en charge du dossier sera en mesure de procéder aux choix pour une révision complète de la normalisation dans le domaine. Les objectifs du mandat sont ainsi pleinement atteints.</p>
Mise en oeuvre:	Commission d'experts VSS 7.06 « Chaussées » (précédemment 7.11, caractéristiques de surface).
Besoin supplémentaire en matière de recherche :	Aucun
Influence sur les normes:	Bases permettant la refonte complète de la normalisation dans ce domaine, soit selon la norme de base SN 640'510 sur les caractéristiques de surface, la création de la nouvelle norme SN 640'516 « Planéité » et la définition des éléments d'appréciation correspondant rentrant dans la SN 640'520 « Caractéristiques de surface des chaussées, Exigences ».

**Président de la commission de suivi:**

Nom:	Grieder	Prénom:	Markus
Service ou entreprise :	Tiefbauamt Basel-Landschaft		
Rue et N°:	Rheinstrasse 29		
NPA:	4410	Email:	Markus.Grieder@bud.bl.ch
Lieu:	Liestal	Téléphone	061 925 54 59
Canton, pays:	Basel-Landschaft, Suisse	Fax:	061 925 69 80

**Signature du président de la commission de suivi:**

## Verzeichnis der Berichte der Forschung im Strassenwesen

### Forschungsberichte seit 2009

Bericht-Nr.	Projekt Nr.	Titel	Datum
1334	ASTRA 2009/009	Was treibt uns an ? Antriebe und Treibstoffe für die Mobilität von Morgen <i>Transports de l'avenir ?</i> <i>Moteurs et carburants pour la mobilité de demain</i> <i>What drives us on ?</i> <i>Drives and fuels for the mobility of tomorrow</i>	2011
1335	VSS 2007/502	Stripping bei lärmmindernden Deckschichten unter Überrollbeanspruchung im Labormasstab <i>Désenrobage des enrobés peu bruyants des couches de roulement sous sollicitation de roulement en laboratoire</i> <i>Stripping of Low Noise Surface Courses during Laboratory Scaled Wheel Tracking</i>	2011
1336	ASTRA 2007/006	SPIN-ALP: Scanning the Potential of Intermodal Transport on Alpine Corridors <i>SPIN-ALP: Abschätzung des Potentials des Intermodalen Verkehrs auf Alpenkorridoren</i> <i>SPIN-ALP: Estimation du potentiel du transport intermodal sur les axes transalpins</i>	2010
1339	SVI 2005/001	Widerstandsfunktionen für Innerorts- Strassenabschnitte ausserhalb des Einflussbereiches von Knoten <i>Fonctions de résistance pour des tronçons routiers urbains en dehors de la zone d'influence de carrefours</i> <i>Capacity restraint functions for urban road sections not affected by intersection delays</i>	2010
1325	SVI 2000/557	Indices caractéristiques d'une cité-Vélo. Méthode d'évaluation des politiques cyclables en 8 indices pour les petites et moyennes communes. <i>Die charakteristischen Indikatoren einer Velostadt. Evaluationsmethode der Velopolitiken anhand von 8 Indikatorgruppen für kleine und mittlere Gemeinden</i> <i>Characteristic indices of a Bike City. Method of evaluation of cycling policies in 8 indices for small and medium-sized communes</i>	2010
1337	ASTRA 2006/015	Development of urban network travel time estimation methodology <i>Temps de parcours en réseau urbain</i> <i>Methodologie für Fahrzeitbewertung in städtischen Strassennetz</i>	2011
1338	VSS 2006/902	Wirkungsmodelle für fahrzeugseitige Einrichtungen zur Steigerung der Verkehrssicherheit <i>Modèles d'impact d'équipements de véhicules pour améliorer la sécurité routière</i> <i>Modelling of the impact of in-vehicle equipment for the enhancement of traffic safety</i>	2009
1341	FGU 2007/005	Design aids for the planning of TBM drives in squeezing ground <i>Entscheidungsgrundlagen und Hilfsmittel für die Planung von TBM-Vortrieben in druckhaftem Gebirge</i> <i>Critères de décision et outils pour la planification de l'avancement au tunnelier dans des conditions de roches poussantes</i>	2011

1343	VSS 2009/903	Basistechnologien für die intermodale Nutzungserfassung im Personenverkehr <i>Basic technologies for detecting intermodal traveling passengers</i> <i>Les technologies de base pour l'enregistrement automatique des usagers de moyens de transports</i>	2011
1340	SVI 2004/051	Aggressionen im Verkehr <i>L'aggressivité au volant</i> <i>Aggressive Driving</i>	2011
1344	VSS 2009/709	Initialprojekt für das Forschungspaket "Nutzensteigerung für die Anwender des SIS" <i>Projet initial pour le paquet de recherche "Augmentation de l'utilité pour les usagers du système d'information de la route"</i> <i>Initial project for the research package "Increasing benefits for the users of the road and transport information system"</i>	2011
1345	SVI 2004/039	Einsatzbereiche verschiedener Verkehrsmittel in Agglomerationen <i>Application areas of various means of transportation in agglomerations</i> <i>Domaine d'application de différent moyen de transport dans les agglomérations</i>	2011
1342	FGU 2005/003	Untersuchungen zur Frostkörperbildung und Frosthebung beim Gefrierverfahren <i>Investigations of the ice-wall grow and frost heave in artificial ground freezing</i> <i>Recherches sur la formation corps gelés et du soulèvement au gel pendant la procédure de congélation</i>	2010
647	AGB 2004/010	Quality Control and Monitoring of electrically isolated post-tensioning tendons in bridges <i>Qualitätsprüfung und Überwachung elektrisch isolierter Spannglieder in Brücken</i> <i>Contrôle de la qualité et surveillance des câbles de précontrainte isolés électriquement dans les ponts</i>	2011
1348	VSS 2008/801	Sicherheit bei Parallelführung und Zusammentreffen von Strassen mit der Schiene <i>Sécurité en cas de tracés rail-route parallèles ou rapprochés</i> <i>Safety measures to manage risk of roads meeting or running close to railways</i>	2011
1349	VSS 2003/205	In-Situ-Abflussversuche zur Untersuchung der Entwässerung von Autobahnen <i>On-site runoff experiments on roads</i> <i>Essai d'écoulements pour l'évacuation des eaux des autoroutes</i>	2011
1350	VSS 2007/904	IT-Security im Bereich Verkehrstelematik <i>IT-Security pour la télématique des transports</i> <i>IT-Security for Transport and Telematics</i>	2011
1352	VSS 2008/302	Fussgängerstreifen (Grundlagen) <i>Passage pour piétons (les bases)</i> <i>Pedestrian crossing (basics)</i>	2011
1346	ASTRA 2007/004	Quantifizierung von Leckagen in Abluftkanälen bei Strassentunneln mit konzentrierter Rauchabsaugung <i>Quantification of the leakages into exhaust ducts in road tunnels with concentrated exhaust systems</i> <i>Quantification des fuites des canaux d'extraction dans des tunnels routiers à extraction concentrée de fumée</i>	2010

1351	ASTRA 2009/001	Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels <i>Entwicklung einer besten Praxis-Methode zur Risikomodellierung für Strassentunnelanlagen</i> <i>Développement d'une méthode de meilleures pratiques pour l'analyse des risques dans les tunnels routiers</i>	2011
1355	FGU 2007/002	Prüfung des Sulfatwiderstandes von Beton nach SIA 262/1, Anhand D: Anwendbarkeit und Relevanz für die Praxis <i>Essai de résistance aux sulfates selon la norme SIA 262/1, Annexe D: Applicabilité et importance pour la pratique</i> <i>Testing sulfate resistance of concrete according to SIA 262/1, appendix D: applicability and relevance for use in practice</i>	2011
1356	SVI 2007/014	Kooperation an Bahnhöfen und Haltestellen <i>Coopération dans les gares et arrêts</i> <i>Coopération at railway stations and stops</i>	2011
1362	SVI 2004/012	Aktivitätenorientierte Analyse des Neuverkehrs <i>Activity oriented analysis of induced travel demand</i> <i>Analyse orientée aux activités du trafic induit</i>	2012
1361	SVI 2004/043	Innovative Ansätze der Parkraumbewirtschaftung <i>Approches innovantes de la gestion du stationnement</i> <i>Innovative approaches to parking management</i>	2012
1357	SVI 2007/007	Unaufmerksamkeit und Ablenkung: Was macht der Mensch am Steuer? <i>Driver Inattention and Distraction as Cause of Accident: How do Drivers Behave in Cars?</i> <i>L'inattention et la distraction: comment se comportent les gens au volant?</i>	2012