



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Planéité longitudinale : Exigences et indices d'état à partir des méthodes d'exploitation européennes

**Längsebenheit: Anforderungen und Zustandsindex gemäss
europäischen Auswertungsmethoden**

**Longitudinal unevenness: Requirements and state index for
the European methods**

Nibuxs Sàrl
Parisa Rossel, Ing. civil, dr ès science KTH
Jacques Perret, Ing. civil, dr ès science EPF
Mehdi Ould-Henia, Ing. civil, dr ès science EPF
Marc Delaby, Ing. civil EPF

Infralab SA
Robert Braber, Ing. Dipl. HTS
Anthony Gautier, Ing dipl. INSA

IMP Bautest AG
Carsten Frey, Diplom-Ingenieur (BA)

**Projet de recherche VSS 2016/322 sur demande de l'Association suisse
des professionnels de la route et des transports (VSS)**

Mai 2020

1674

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten 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 les auteurs ayant obtenu l'appui de 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)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

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

The content of this report engages only the author(s) supported 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)



Planéité longitudinale : Exigences et indices d'état à partir des méthodes d'exploitation européennes

**Längsebenheit: Anforderungen und Zustandsindex gemäss
europäischen Auswertungsmethoden**

**Longitudinal unevenness: Requirements and state index for
the European methods**

Nibuxs Sàrl
Parisa Rossel, Ing. civil, dr ès science KTH
Jacques Perret, Ing. civil, dr ès science EPF
Mehdi Ould-Henia, Ing. civil, dr ès science EPF
Marc Delaby, Ing. civil EPF

Infralab SA
Robert Braber, Ing. Dipl. HTS
Anthony Gautier, Ing dipl. INSA

IMP Bautech AG
Carsten Frey, Diplom-Ingenieur (BA)

**Projet de recherche VSS 2016/322 sur demande de l'Association suisse
des professionnels de la route et des transports (VSS)**

Impressum

Instance de recherche et équipe de projet

Direction du projet

Jacques Perret, Nibuxs Sàrl

Membres

Parisa Rossel, Nibuxs Sàrl

Mehdi Ould Henia, Nibuxs Sàrl

Marc Delaby, Nibuxs Sàrl

Robert Braber, Infralab SA

Anthony Gautier, Infralab SA

Carsten Frey, IMP Bautest AG

Commission d'experts responsable

Commission d'experts CNR 3.5 : Méthodes et technique de mesure, caractéristiques des chaussées

Commission de suivi

Président

Alain Jacot

Membres

Wolf-Henrik von Loeben

Laurent Linder

Frank Schiffmann

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

Impressum	4
Résumé	7
Zusammenfassung	10
Summary	13
1 Contexte	17
2 Méthodes d'exploitation du profil longitudinal	19
2.1 Valeurs d'angle (W et sw)	19
2.2 Indice d'uni international (IRI)	21
2.3 Analyse par bande d'onde (NBO)	23
2.4 Profil longitudinal pondéré (BLP)	27
2.5 Densité spectrale de puissance (DSP)	30
2.6 Prétraitement des signaux	32
3 Statistiques et analyses	33
3.1 Comparaisons des indicateurs	33
3.1.1 Entre réseaux	34
3.1.2 Types de routes (canton VS)	37
3.1.3 Trace de gauche / trace de droite	42
3.2 Corrélations entre tous les indicateurs	44
3.3 Corrélation entre s_w et IRI	45
4 Valeurs limites	49
4.1 Valeurs limites existantes	49
4.1.1 Valeurs limites suisses : réception et indice d'état I2	49
4.1.2 Valeurs limites allemandes	50
4.1.3 Valeurs limites françaises	51
4.1.4 Valeurs limites suédoises	53
4.2 Comparaison entre l'état des réseaux et les valeurs limites	53
4.2.1 Valeurs d'angle s_w et Wmax	54
4.2.2 IRI	55
4.2.3 NBO	56
4.2.4 BLP	57
4.3 Valeurs de réception (après travaux)	60
4.3.1 Valeurs d'angle s_w et Wmax	62
4.3.2 IRI	63
4.3.3 NBO	64
4.3.4 BLP	67
4.4 Calcul de valeurs limites à partir de la Densité Spectrale de Puissance (DSP)	68
4.4.1 Calcul des valeurs BLP à partir de la DSP	68
4.4.2 Calcul des valeurs du IRI à partir de la DSP	71
4.4.3 Calcul des EBO et des NBO à partir de la DSP	72
4.4.4 Synthèses des valeurs limites obtenues à partir de la DSP	73
4.5 Application des valeurs limites obtenues à partir de la DSP	74
4.6 Valeurs limites recommandées	76
5 Détection de défauts de surface à partir des indicateurs d'uni longitudinal	81
5.1 Types de défauts de surface selon leur fréquence d'occurrence	81
5.2 Exemple à travers des cas concrets	84
5.2.1 Tronçon 1 : Défaut ponctuel : joint de pont	85
5.2.2 Tronçon 2 : Défaut ponctuel : réparation sur une fouille	86

5.2.3	Tronçon 3 : Défaut périodique	87
5.2.4	Tronçon 4 : Fissures de surface	89
5.2.5	Tronçon 5 : Cas de dégradations très avancé	90
5.2.6	Tronçon 6 : Défaut de planéité en grandes ondes	91
6	Conclusions	95
7	Recommandations	97
	Annexes	99
	Glossaire	113
	Bibliographie	115
	Clôture du projet	117
	Index des rapports de recherche en matière de route	121

Résumé

Une irrégularité longitudinale est définie comme l'écart du profil longitudinal par rapport à la ligne droite de référence dans une plage de longueurs d'onde comprises entre 0.5 m et 50 m [1]. Le profil longitudinal d'une route est en premier lieu garant du confort de l'usager mais il peut également fournir des informations concernant l'état de la route (dégradations de surface ou dégradations structurelles dans les couches inférieures de la chaussée). De plus, la présence d'irrégularité dans le profil longitudinal tend à accélérer la dégradation d'une chaussée en raison de l'augmentation des charges dynamiques des véhicules.

Les mesures à grand rendement du profil longitudinal ont débuté dans les années 60 avec le développement du profilomètre inertiel au Laboratoire de General Motors aux Etats-Unis [18]. Depuis, les appareils de mesures du profil longitudinal des routes ont évolué, devenant plus accessibles et plus précis. Cependant, le principal enjeu demeure l'utilisation des informations enregistrées par ces appareils pour permettre de repérer et quantifier les défauts de planéité longitudinale des chaussées.

La nouvelle norme européenne [1] propose plusieurs méthodes afin de quantifier les données brutes collectées avec des appareils profilométriques. La première méthode permet de déterminer l'Indice d'uni international (IRI), un des indicateurs les plus couramment utilisés dans le monde. Une autre méthode mentionnée dans la norme EN est l'analyse par bande d'onde, développée en France dans les années 1970. Cet indicateur exprime l'énergie de trois bandes de longueurs d'onde différentes (petites, moyennes et longues ondes) qui sont ensuite transformées en note par bande d'onde (NBO). Finalement, la troisième méthode mentionnée dans la norme EN est le profil longitudinal pondéré (BLP). Cette méthode, développée en Allemagne au début des années 2000 est basée sur l'amplitude accentuée des longueurs d'onde les plus courtes du profil longitudinal, afin de ne pas perdre les informations importantes contenues dans ces bandes de longueurs d'onde. Ces trois méthodes d'analyse du profil longitudinal ont été intégrées dans la nouvelle version de la norme suisse [5] publiée en 2017, en plus de la valeur d'angle W utilisée depuis longtemps en Suisse pour la détermination de l'indice de planéité longitudinale.

Le présent projet de recherche présente tout d'abord une brève présentation des quatre méthodes, avec une discussion des avantages et des inconvénients des indicateurs qui peuvent en être extraits.

L'objectif principal de ce projet est d'appliquer les quatre méthodes de la norme suisse SN 640 517 [5] à des profils réels mesurés sur différents réseaux de routes (nationale, cantonale et communale), afin de déterminer et comparer les indicateurs de planéité longitudinale qui peuvent en être tirés. Dans ce but, des données de profils mesurés dans les cantons du Valais (VS) et de Zurich (ZH) ont tout d'abord été choisies. Les différences entre le canton montagneux du Valais et le canton plus urbain de Zurich ont permis d'obtenir un large éventail de profils de chaussées. Les analyses ont aussi porté sur les profils longitudinaux de 60 km d'autoroute du réseau des routes nationales ainsi que sur des données provenant de trois communes suisses.

Tout d'abord, les algorithmes implémentés pour le calcul des indicateurs du profil longitudinal basé sur la norme EN ont été utilisés pour chacun de ces réseaux. Ensuite, les résultats obtenus sur les différents réseaux routiers ont été comparés par des analyses statistiques. Finalement, l'impact de différentes dégradations de surface de la chaussée sur les différents indicateurs du profil longitudinal a été discuté sur la base de cas concrets.

Les résultats des investigations faites sur les différents indicateurs de planéité longitudinale ont montré que les indicateurs IRI et sw (méthode de la valeur d'angle) ne sont efficaces que pour des défauts de planéité dont la longueur d'onde est limitée, et ne sont donc pas à même d'identifier certains défauts d'uni. Il semble en outre que l'indicateur sw est plus sensible à des défauts locaux (nids de poule, joints de ponts, etc.) que le IRI.

L'analyse par bandes d'ondes (méthode NBO) prend en compte des longueurs d'onde plus étendues, ce qui lui permet de mieux mettre en évidence différents types de défauts. Les trois indicateurs sont en revanche peu efficaces pour repérer des défauts périodiques.

Quant aux indicateurs (SBW et DBW) issus de l'analyse du profil longitudinal pondéré (BLP), ils s'annoncent comme très prometteurs pour l'analyse de la planéité longitudinale. Leur représentation combinée des deux indicateurs sur un seul graphique offre notamment des possibilités nouvelles pour l'exploitation des résultats à différentes échelles (réseau, par type de route, par axe, etc). Les indicateurs sont sensibles à toutes les longueurs d'onde. A ce sujet, la prise en compte des longues ondes, peu gênantes sur les routes où la Vitesse des véhicules est faible (comme par exemple les routes de montagne valaisannes), peut parfois "biaiser" les résultats. Compte tenu que cette méthode est relativement nouvelle, on manque malheureusement encore un peu de recul par rapport aux possibilités qu'elle offre, notamment pour la représentation combinée des résultats.

Les valeurs des indicateurs obtenues pour les réseaux de ZH et du VS ont été étudiées afin de trouver des corrélations. Cette démarche a été effectuée avec deux types de corrélation (Pearson et Spearman) afin de pouvoir mettre en évidence des corrélations linéaires ou non-linéaires. Ces résultats sont présentés dans des matrices par l'intermédiaire de leur coefficient de corrélation. A l'exception du IRI et du sw, (pour lesquels on est proche d'une relation 1:1), il n'y a pas de fortes corrélations entre les indicateurs. Il existe une certaine corrélation des petites ondes (NPO) et les deux indicateurs corrélé (IRI et sw), mais pas aussi forte qu'entre ces deux derniers. Cela démontre la capacité des différents indicateurs de mettre en évidence des phénomènes différents, et par conséquent, leur complémentarité.

La comparaison des résultats obtenus pour les différents réseaux montre que la majorité des indicateurs suivent des tendances qui correspondent à la qualité de chaque réseau. Les 60 kilomètres de routes nationales obtiennent les meilleurs résultats pour tous les indicateurs, suivis par le réseau du canton de ZH. Comme attendu, le réseau VS et les réseaux communaux présentent les résultats les plus mauvais en termes de planéité longitudinale. Les résultats obtenus pour le canton du VS étaient attendus et s'expliquent en grande partie par les nombreuses routes de montagne sur lesquels les vitesses sont en général relativement faibles, rendant moins dommageable les problèmes de planéité. Il faut encore souligner que le canton de ZH comprend pas mal de résultats aberrant (outliers) pour l'indicateurs DBW (méthode BLP), ce qui est peut-être dû à un procédé de mesure différent.

En plus de ces comparaisons entre des réseaux, on a testé un certain nombre de valeurs-limites pour les différents indicateurs. Ces tests ont été effectués sur l'ensemble des routes en service, puis en se limitant à des routes « neuves », c'est-à-dire sur lesquelles des travaux de maintenance avaient été effectués moins de deux ans avant le relevé des profils. Compte tenu de l'absence dans les normes suisses de valeurs-limites pour tous les indicateurs, on a utilisé les valeurs en vigueur dans d'autres pays (France, Allemagne et Suède).

Pour le réseau VS, il est apparu que les résultats obtenus pour les différents indicateurs sont très sensibles au type de routes. Les routes principales obtiennent systématiquement des valeurs moyennes meilleures que celles des routes secondaires. Il en va de même lorsqu'on compare les routes de plaines et les routes de montagne. A titre d'exemple, entre 70 et 80 % des routes principales de plaine remplissent les valeurs de réception des normes suisses ($sw \geq 1.4$) alors que les pourcentages ne sont que de 30 à 40 % pour celles de montagne, en dépit d'exigences plus faible ($sw \geq 2.2$).

De plus, comme on pouvait s'y attendre, les résultats obtenus sur le canton de ZH sont nettement meilleurs que ceux du VS, également pour les résultats après travaux. De façon similaire à ce qui avait été observé pour le canton du VS entre les routes de plaine et de montagne, on constate une nette différence de résultat selon qu'on considère les routes de ZH situées en milieu urbain ou rural.

En outre, les résultats des différents indicateurs routiers ont été utilisés pour proposer de nouvelles valeurs seuils (*i.e.* valeur de réception, valeur d'alarme et valeur critique) des indicateurs du profil longitudinal dans la normalisation suisse. Ces valeurs ont été comparées avec les limites existantes dans la norme SN 640 525 [6] et pourraient potentiellement être intégrées par la suite aux normes de gestion de l'entretien (SN 640 925b [2]). Elles ont été déterminées selon une approche théorique, puis selon une approche statistique.

L'approche théorique repose sur une relation théorique entre les indicateurs issus du profil longitudinal pondéré (BLP) et la densité spectrale de puissance (DSP) des profils longitudinaux. Des relations entre le IRI et la DSP ont été tirées de la littérature, alors que les liens entre la DSP et les NBO ont été établis dans le cadre du projet. L'approche théorique intègre aussi la corrélation 1:1 observée dans l'analyse statistique entre le sw et le IRI. Les limites de classe ont été établies sur la base des valeurs utilisées en Allemagne.

Les résultats limites obtenus pour les indicateurs NBO en utilisant des approximations relativement simples de la DSP (ligne) n'étant pas satisfaisants (valeurs trop sévères par rapport à celles utilisées en France), on a utilisé des approximations fines de la DSP pour la détermination des valeurs limites. Ces valeurs ont ensuite été appliquées sur les différents réseaux. Il est alors apparu que certaines des valeurs proposées (notamment les NGO) n'étaient pas suffisamment sensibles.

La seconde approche, dite statistique, a consisté à choisir des valeurs limites pour les différents indicateurs de façon à obtenir des distributions par classe similaires à celles obtenues à partir de l'échelle utilisée dans les normes suisses pour l'indice de planéité longitudinale I2 (qui est calculé à partir de la valeur sw). Une fois les valeurs limites ainsi déterminées, elles ont été transformées en valeurs DSP afin d'être comparées avec les valeurs de la norme ISO [8]. Cette approche a été complétée par une seconde proposition d'échelle de classification basée sur une valeur des paramètres de la DSP pour chaque type de route. On a ensuite déterminé les percentiles des indicateurs de la BLP pour chaque classe. Les valeurs limites des autres indicateurs ont été fixées de façon à respecter ces percentiles. Les deux échelles ainsi obtenues sont relativement proches.

L'analyse et la comparaison des résultats présentés dans ce rapport montrent qu'il est envisageable de remplacer l'usage de la valeur d'angle (sw, Wmax) par la valeur IRI pour calculer l'indice I2, puisque les résultats obtenus selon ces deux méthodes sont statistiquement comparables. Ce choix permettrait en Suisse d'assurer le suivi de l'indice I2 tout en faisant référence à une valeur largement utilisée au niveau international. Il faut cependant être conscient, que l'indice I2 ainsi déterminé ne prend pas en compte les grandes longueurs d'ondes.

Enfin, les résultats obtenus permettent de proposer des valeurs limites (seuils de réception, d'alarme et critiques) distinctes selon la catégorie de route et la vitesse de circulation. Moyennant quelques compléments d'analyse, les recommandations et valeurs limites établies dans le cadre du présent projet sont une excellente base pour affiner la normalisation suisse.

Zusammenfassung

Eine Längsunregelmässigkeit ist definiert als die Abweichung des Längsprofils von der Referenzlinie in einem Wellenlängenbereich zwischen 0,5 m und 50 m [1]. Das Längsprofil einer Strasse ist in erster Linie eine Garantie für den Benutzerkomfort, kann aber auch Auskunft über den Strassenzustand geben (Oberflächen- oder Strukturschäden in den tiefen Schichten der Fahrbahn). Darüber hinaus kann das Vorhandensein von Unregelmässigkeiten im Längsprofil die Degradation der Fahrbahn durch erhöhte dynamische Fahrzeuglasten tendenziell beschleunigen.

Hochleistungsmessungen des Längsprofils begannen in den 1960er Jahren mit der Entwicklung des Trägheitsprofilometers am General Motors Laboratory in den USA [18]. Seitdem haben sich die Geräte zur Messung des Längsprofils von Strassen weiterentwickelt und sind erschwinglicher und genauer geworden. Die grösste Herausforderung bleibt jedoch die Verwendung der von diesen Geräten aufgezeichneten Informationen zur aussagekräftigen Identifizierung und Quantifizierung von Längsunebenheiten auf der Fahrbahn.

Die neue europäische Norm [1] bietet mehrere Methoden zur Quantifizierung der mit profilometrischen Geräten erfassten Rohdaten. Die erste Methode wird zur Bestimmung des International Rauigkeit Index (IRI) verwendet, einem der weltweit am häufigsten verwendeten Indikatoren. Eine weitere in der EN-Norm erwähnte Methode ist die Wellenbandanalyse, die in den 1970er Jahren in Frankreich entwickelt wurde. Dieser Indikator drückt die Energie von drei unterschiedlichen Wellenlängenbereiche (kleine, mittlere und lange Welle) aus, die anschliessend in eine Note pro Wellenband (NBO) umgewandelt werden. Die dritte in der EN-Norm erwähnte Methode ist das gewichtete Längsprofil (BLP). Diese in Deutschland Anfang der 2000er Jahre entwickelte Methode basiert auf der erhöhten Amplitude der kürzesten Wellenlängen des Längsprofils, um die in diesem Wellenlängenbereich enthaltenen wichtigen Informationen nicht zu verlieren. Zusätzlich zum in der Schweiz seit langem verwendeten Winkelwert W zur Bestimmung des Längsebenheitsindex, sind diese drei Methoden der Längsprofilanalyse in die 2017 veröffentlichte neue Version der Schweizernorm (SN 640 517 [5]) integriert worden.

Das Forschungsprojekt beginnt mit einer kurzen Vorstellung der vier Methoden und mit einer Diskussion der Vor- und Nachteile der daraus festgelegten Indikatoren. Darüber hinaus werden in diesem Bericht einige Angaben zur Vorverarbeitung von Rohdaten diskutiert, da dieser Schritt einen erheblichen Einfluss auf die Endergebnisse haben kann.

Hauptziel dieses Projekts ist es, die vier Methoden der Schweizer Norm SN 640 517 [5] auf reale Profile anzuwenden, die auf verschiedenen Strassennetzen (national, kantonal und kommunal) gemessen wurden, um die daraus ableitbaren Längsebenheitsindikatoren zu bestimmen und zu vergleichen. Zu diesem Zweck wurden zunächst Profildaten ausgewählt, die in den Kantonen Wallis und Zürich gemessen wurden. Die Unterschiede zwischen dem Walliser Bergkanton und dem städtischeren Kanton Zürich haben zu einer breiten Palette von Fahrbahnprofilen geführt. Die Analysen umfassen auch Längsprofile von 60 km Autobahnen im nationalen Strassennetz, sowie Daten aus drei Schweizer Gemeinden.

Zunächst wurden für jedes dieser Strassennetze die implementierten Algorithmen zur Berechnung der Indikatoren des Längsprofils auf Basis der EN-Norm verwendet. Anschliessend wurden die Ergebnisse der verschiedenen Netze durch statistische Analysen verglichen. Schliesslich wurde anhand konkreter Fälle der Einfluss verschiedener Schäden der Fahrbahnoberfläche auf die verschiedenen Indikatoren des Längsprofils diskutiert.

Die Ergebnisse dieser vergleichenden Analysen haben gezeigt, dass die beiden Indikatoren IRI und sw (Winkelmethode) nur Unebenheiten mit kurzen Wellenlängen akkurat benoten, und somit gewisse Unebenheiten gar nicht erfassen. Es scheint

ausserdem, dass der Indikator sw lokale Unebenheiten (Schlaglöcher, Brückenübergänge, usw.) sensitiver als der IRI ermittelt.

Die Wellenbandanalyse (NBO Methode) berücksichtigt einen deutlich grösseren Wellenlängen-bereich und ist somit in der Lage, verschiedene Arten von Unebenheiten zu qualifizieren. Die drei Indikatoren dieser Methode sind hingegen wenig geeignet zur Kennzeichnung von periodischen Unebenheiten.

Die Indikatoren SBW und DBW der Methode des gewichteten Längsprofils (BLP) sind zur Analyse der Längsebenheit vielversprechend. Ihre gemeinsame graphische Darstellung bietet neue Möglichkeiten zur selektiven Betrachtung von unterschiedlichen Datensätzen (Gesamtnetz, Strassenkategorien, einzelne Achsen, usw.). Die BLP-Methode berücksichtigt alle Wellenlängen mit einer ähnlicheren Sensitivität. Auf Strassen, die nur eine begrenzte Geschwindigkeit ermöglichen (zum Beispiel die Bergstrassen im Kanton Wallis), kann es aber eine situative Beurteilung der Ergebnisse erschweren. Da diese Methode noch relativ neu ist, sind die möglichen Auswertungen noch nicht vollumfänglich etabliert, insbesondere was die gemeinsame Darstellung SBW/DBW anbelangt.

Die Ebenheitswerte der Kantonsnetze ZH und VS sind zwecks Korrelation analysiert worden. Diese Analyse wurde anhand zwei unterschiedlichen Korrelationsarten (Pearson et Spearman) ausgeführt. Somit können sowohl lineare als auch nicht lineare Korrelationen überprüft werden. Die Ergebnisse sind in Matrixform anhand der Korrelationskoeffizienten dargestellt. Mit Ausnahme von IRI und sw, wo das Verhältnis fast 1:1 liegt, besteht keine starke Korrelation zwischen den verschiedenen Ebenheitsindikatoren. Eine gewisse Korrelation besteht noch zwischen den NBO und IRI bzw. sw, aber nicht so ausgeprägt als zwischen IRI und sw selber. Diese Ergebnisse bestätigen die unterschiedlichen Prägungen der Indikatoren, und somit ihre Komplementarität.

Die Vergleiche zwischen den Indikatoren der verschiedenen Netze zeigen, dass die Ebenheitswerte grösstenteils die Typisierung dieser Netze widerspiegeln. Die 60 Kilometer Nationalstrassen weisen für sämtliche Indikatoren die besten Ergebnisse auf, gefolgt vom Netz des Kantons Zürich. Erwartungsgemäss sind die Ebenheitswerte des Kantons Wallis und der Gemeinden deutlich schlechter. Die schlechteren Ergebnisse des Kantons Wallis sind aufgrund der vielen Bergstrassen eigentlich nicht erstaunlich. Aufgrund der im allgemeinen kleineren Fahrgeschwindigkeit auf solchen Strecken, sind die vorhandenen Ebenheitsproblemen nicht unbedingt problematisch.

Neben diesen Netzvergleichen wurden verschiedene Beurteilungswerte der Indikatoren (z.B. Abnahme-, Gewährleistungs- oder Grenzwert) getestet. Diese Tests wurden einerseits anhand der gesamten Netze und andererseits ausschliesslich mit den «neuen» Fahrbahn, d.h. Fahrbahnen die in den zwei Jahren vor den Aufnahmen instandgesetzt wurden. Da die Schweizernormen nicht alle betrachteten Indikatoren behandeln, haben wir die Beurteilungswerte anderer Länder (Frankreich, Deutschland und Schweden) beigezogen.

Für das Strassennetz des Kantons Wallis ist es zu bemerken, dass die Werte der verschiedenen Ebenheitsindikatoren sehr direkt vom Strassentyp abhängen. Die Hauptstrassen weisen systematisch bessere Werte als die Sekundärstrassen auf. Das Gleiche gilt beim Vergleich zwischen Strassen in der Ebene und Bergstrassen. Zum Beispiel, 70 bis 80% der Hauptstrassen in der Ebene erfüllen die Abnahmewerte ($sw \geq 1.4$) der Schweizernorm. Dieser Prozentsatz beträgt hingegen nur 30 bis 40% auf den Bergstrecken, trotz gesenkter Anforderung ($sw \geq 2.2$).

Erwartungsgemäss sind die Ergebnisse der Zürcher Staatsstrassen deutlich besser als diejenigen im Kanton Wallis, ebenfalls bei den Werten nach ausgeführten Instandsetzungen. Im Kanton Zürich wurden auch klare Qualitätsunterschiede zwischen den Strassenabschnitten in Agglomeration und in ländlichen Gebieten festgestellt.

Darüber hinaus wurden aus den Ergebnissen der verschiedenen Strassenindikatoren neue Grenzwerte (d.h. Abnahme-, Warn- und Schwellenwerte) für die Längsprofilindikatoren in der Schweizer Normung vorgeschlagen. Diese Werte wurden mit den bestehenden Grenzwerten der SN 640 525 [6] verglichen und könnten möglicherweise in die Normen für das Erhaltungsmanagement (SN 640 925b [2]) aufgenommen werden. Für diese Analyse wurden sowohl der statistische Ansatz als auch ein eher theoretischer Ansatz verwendet.

Der theoretische Ansatz basiert auf dem Verhältnis zwischen den Indikatoren des bewerteten Längsprofils (BLP) und der spektralen Dichte (DSP). Das Verhältnis zwischen IRI und DSP wurde aus der Literatur entnommen. Hingegen sind die Relationen zwischen DSP und NBOs im Rahmen des Projekts untersucht worden. Der theoretische Ansatz berücksichtigt ebenfalls das 1:1 Verhältnis zwischen IRI und sw. Für die Klassifizierung wurden die in Deutschland eingesetzten Grenzwerte als Basis genommen.

Die aufgrund einer einfachen linearen Näherungsfunktion der DSP ermittelten Ergebnisse der NBO waren unbefriedigend (zu strenge Grenzwerte im Vergleich mit den französischen Richtwerten). Die Näherungsfunktion der DSP wurde in einem zweiten Schritt deswegen verfeinert. Die damit ermittelten Grenzwerte wurden für die verschiedenen Netzkategorien angewendet. Man hat dabei festgestellt, dass die vorgeschlagenen Grenzwerte, insbesondere die NGO, teilweise zu träge waren.

Der zweite, sogenannte statistische, Ansatz ist so konzipiert, dass die Grenzwerte der unterschiedlichen Indikatoren den Klassen der Schweizernorm für den Längsebenheitsindex I2 entsprechen (I2 ist momentan anhand von sw bestimmt). Die somit bestimmten Grenzwerte wurden anschliessend als DSP-Wert umgewandelt, und mit den Werten der ISO-Norm [8] verglichen. Dieser Ansatz ist mit einem zweiten Vorschlag von DSP basierten Grenzwertskalen für jede Strassenkategorie ergänzt worden. Die Perzentile der BLP-Indikatoren sind anschliessend für jede Kategorie ermittelt worden. Die Perzentile der anderen Ebenheitsindikatoren sind so gewählt, dass sie den BLP-Skalen entsprechen. Die somit bestimmten zwei Klassifizierungen sind relativ kongruent.

Die ermittelten Ergebnisse haben die Komplementarität der verschiedenen Auswertemethoden gezeigt. Dies spricht für die Möglichkeiten der Schweizernormen, die eine Auswertung und Begutachtung der Längsebenheit mit unterschiedlichen Methoden anbietet.

Die Analyse der Ergebnisse zeigt eine sehr gute statistische Übereinstimmung zwischen den Werten der Winkelmethode (sw, Wmax) und der IRI-Berechnung. Die für die I2-Berechnung bisher angewendeten Winkelwerte könnten somit durch die IRI-Werte ersetzt werden. Dies würde die Kontinuität der I2-Betrachtung gewährleisten und gleichzeitig die Einbindung eines international weitverbreiteten Kennwerts ermöglichen. Man muss jedoch im Klaren sein, dass die somit bestimmten I2-Werte die langen Unebenheitswellen nicht berücksichtigen.

Als Schlussergebnis sind je nach Strassenkategorie und Geschwindigkeitsbereich verschiedene Sollwerte der Längsebenheit (Abnahmewert, Warnwert, Schwellenwert) vorgeschlagen. Unter Berücksichtigung von einigen Ergänzungen bilden die Ergebnisse und Empfehlungen dieser Forschungsarbeit eine ausgezeichnete Grundlage zur Weiterentwicklung der entsprechenden Schweizernormen.

Summary

The longitudinal unevenness is the deviation of the longitudinal profile from a straight reference for a wavelength range between 0.5 and 50 meter [1]. Longitudinal road profile do not only guaranty the road users comfort but also can give an indication of the road surface condition such as existence of different types of road surface degradation as well as some degradation due to lower layers of the pavement structure. Moreover, an uneven road will have an accelerated rate of degradation since it will cause a higher amplitude of loads implied on the road due to higher dynamic impacts from the passing vehicles.

High-speed road profiling has begun since the 1960's with development of the inertial profilometer at the General Motors Laboratory in the USA [18]. Since then, the measurement devices for the longitudinal road profile have evolved and become more accessible and more precise. However, the main challenge remains on how to use the information recorded by these devices in order to quantify the condition of the longitudinal road unevenness.

In the new European standard [1], several methods have been proposed in order to quantify the raw data collected with different profilometer devices. International Roughness Index (IRI) is one of the most common indicators which is used worldwide. Another indicator that has been mentioned in the EN is the "Wave band analysis", which initially was developed in France in 1980. This indicator gives the energy related to three different wavebands (short, medium and long waveband) which is afterwards translated in terms of a score for each range of wavebands (NBO). Finally, the weighted longitudinal profile, (BLP) is the third calculation method of longitudinal profile indicator that has been mentioned in the EN standard. This method is developed in Germany in early 2000s and is based on the magnified amplitude of the shorter wavelengths while reducing the magnitude of the longer wavelengths of the longitudinal profile, in order to keep the important information concerning these wavebands. These three methods of longitudinal profile analysis have been integrated in the new Swiss standard (SN 640 517 [5]) in addition to the former method (valeur d'angle W) which was released in 2017.

In the present research project, initially an introduction on the theory of each of these indicators, which have been mentioned in the EN, is given with some discussion on pros and cons of each method.

The main objective of this work is to utilize these algorithms with real measured profile data in order to quantify each of the aforementioned longitudinal profile indicators. For this purpose, the measured profile data from two Swiss cantons of Valais (VS) and Zurich (ZH) were primarily chosen. The difference between the mountainous canton of Valais and the more urban canton of Zurich provided a vast range of different road surface profiles. Moreover, in order to make a more complete comparison between the results, 60 km of a national highway network as well as the data from three different Swiss municipalities were also included in the study.

Initially, the implemented algorithms for calculating the longitudinal profile indicators based on the EN standard were utilized for each of these networks. Later, the comparison between the road networks was done through performing different statistical analysis on the obtained results from the developed algorithms. Finally, the impact of different road surface degradation on different longitudinal road profile indicators was discussed with various visual examples.

The results of the investigation on different longitudinal profile indicators showed that IRI and sw (method of valeur d'angle W) indicators are only effective on a limited wavelength range and thus incapable of characterising certain surface unevenness defects. However, it was observed that the sw indicator is more sensitive to the singular defects (e.g. potholes or bridge joints) as compared to the IRI indicator.

The waveband indicators (NBO method) are applied on a broader range of wavelength and therefore are more capable of identifying different surface degradations. However the waveband indicators are incapable of identifying the periodic defects.

At last, the weighted longitudinal profile (BLP) indicators (SBW and DBW) were proven to be one of the most powerful indicators of the pavement surface roughness. The representation with the combination of two different parameters on a same plot for a network gives new potentials for analysis of the results in a network with different scales (i.e. by road-type, road axis, etc). However, since the indicators are sensitive to all the wavelength range, they are sometimes biased due to longer wavelength which are less important in the smaller roads with lower riding speed such as in mountainous roads in VS. Moreover, considering that the method is relatively new, it lacks experience from the users, especially the combined representation of the indicators.

The calculated values for the different indicators on the ZH and VS network were used in order to study the existing correlations between the longitudinal profile indicators. For this reason, two different types of correlation matrices (i.e. Pearson and Spearman) were constructed to study the possible linear and non-linear correlations. It was shown that except for the IRI and the sw indicator, where an approximate 1:1 correlation exist, the rest of the indicators do not have a very strong correlation with each other. The NPO indicator, however, was also found to have a close correlation with the IRI and sw indicator but not as strong as the correlation between the aforementioned indicators. In general, it could be said that different longitudinal profile indicators capture different phenomena relative to the longitudinal profile unevenness and could be used in a complementary manner.

The results of the comparison between different networks demonstrated that for the majority of the indicators, the tendency follows the quality of the road network. The 60 km segment of the national road has the best results of the longitudinal unevenness indicator followed by the ZH network. The results of the comparison also showed that, as expected, the VS network and the municipality have a less good quality in terms of the longitudinal road unevenness. Considering the situation of the canton of VS and the lower riding speed in the mountainous roads which constitute the majority of the network and influence directly the ride quality, these results were expected. However more outliers were detected for the DBW indicator (BLP method) on the ZH network, which could be due to different measurements process.

In addition to the comparison between the different networks, the limit values of the longitudinal profile indicators have been tested for the roads in service as well as the values for the acceptance limit after the construction (the roads with a construction work less than 2 years old were chosen for this analysis). Since, for the time being, the limiting values do not exist for all the longitudinal roughness indicators in the Swiss standards, the missing values were chosen from other countries (i.e. France, Germany and Sweden).

For the VS network, it was shown that the longitudinal unevenness indicators are noticeably sensitive to the type of the roads. As an example, it was shown that the principal roads are generally in a better condition as compared to the secondary roads and the roads on the plain have better overall values compared to the mountainous roads. As an example, between 70 to 80% of the principle roads in the plain meet the Swiss requirements for the sw indicator ($sw \geq 1.4$) for the acceptance value after the construction, while only 30 to 40% of the secondary roads meet the requirement for these category of the roads ($sw \geq 2.2$).

Moreover, as it could be expected, the longitudinal profile indicators in the ZH network are noticeably better as compared to the VS network even after the reconstruction work. Identical to the VS network, a clear separation of the results could be observed for the road inside and outside of the urban areas in the ZH network.

Furthermore, the results of different road indicators were used for proposing new limiting values of longitudinal profile indicators (i.e. reception value, warning value and critical value) in the Swiss standard. These values have been compared with the existing limiting values in SN 640 525 [6] and could potentially be further integrated in the Swiss

maintenance standard (SN 640 925b [2]). For this analysis, a theoretical approach as well as a statistical approach has been employed.

The theoretical approach was based on the existing theoretical relationship between the weighted longitudinal profile indicators (BLP) and the Power Spectral Density (PSD) of the road profile unevenness. The relationship between IRI and PSD was extracted from the existing literature and for the NBO indicators, it was developed by the authors. Moreover, based on the results presented formerly in the report, a 1:1 correlation was used between sw and IRI indicators. For this approach the limits mentioned in the German standard for the PSD were used.

The results for the limiting values obtained for the NBO indicators using the simple approximations of the PSD curve (i.e. simple line) were relatively extreme in comparison with the values used in France. The relation was further improved where more detailed approximations of the PSD curve were used. Furthermore, the obtained values were tested on the different networks where the global condition of the different network could be observed. However, it could be seen that certain proposed values (such as NGO indicator) were not fitted enough for the evaluation of the network.

The second approach, a statistical approach, was used to obtain a new evaluation scale for different indicators. To do so, the evaluation scale for different indicators were defined so that they give an identical distribution as the existing scale in the Swiss standard for the sw indicator. Moreover, using the theoretical relationship between the SBW and PSD indicators, the PSD approximation parameters for each road type and scale were obtained and compared with the existing values in ISO standard [8]. Based on this approach evaluation scales were proposed for the longitudinal unevenness indicators. Moreover, a second evaluation scale was also proposed where initially the PSD approximation parameters were defined for each evaluation class. Afterwards, based on the theoretical relationship the BLP indicators were defined for each class, and finally the other indicators were defined so that they have an identical distribution as the SBW indicator for each defined class. It could be seen that the values for the two propositions were relatively close.

Based on the analysis and comparison of the results presented in this report, there is a possibility of replacing the angle value (sw, Wmax) by the IRI value to calculate the I2 Index, since the results obtained using these two methods are statistically comparable. This choice would allow monitoring the I2 index while referring to a widely use value in an international level. However, it should be noted that the I2 index determined does not take into account the long wavelengths.

Finally, the results obtained make it possible to propose separate limit values (reception, alarm and critical thresholds) according to road categories and traffic speed. Moreover, with the additional analysis, the recommendations and limit values established in this project provide an excellent basis for further refining of the Swiss standard.

1 Contexte

Une irrégularité longitudinale est définie comme l'écart du profil longitudinal par rapport à la ligne droite de référence dans une plage de longueurs d'onde comprises entre 0.5 m et 50 m [1]. Le profil longitudinal d'une route est en premier lieu garant du confort de l'utilisateur mais il peut également fournir des informations concernant l'état de la route (dégradations de surface ou dégradations structurelles dans les couches inférieures de la chaussée). De plus, la présence d'irrégularité dans le profil longitudinal tend à accélérer la dégradation d'une chaussée en raison de l'augmentation des charges dynamiques des véhicules.

En Suisse, la planéité longitudinale des chaussées est généralement évaluée à partir de l'indice I2 défini dans la norme SN640 925b [2]. Cet indice est déterminé à partir de l'écart-type s_w de l'angle W formé entre deux cordes adjacentes d'une longueur de 1m qui suivent le profil longitudinal relevé [5]. Cette méthode (valeurs d'angle) ne couvre qu'une plage de longueurs d'onde limitée et n'est pas normalisée en Europe.

La nouvelle norme européenne (prEN 13036-5) [1] propose quant à elle trois autres méthodes d'exploitation du profil longitudinal relevé :

- International Road Index (IRI) : cet indice vise à quantifier le confort de roulement pour l'utilisateur.
- Analyse par bande d'ondes NBO (petites PO, moyennes MO et grandes GO) : cette analyse définit trois notes permettant de situer dans quelles longueurs d'ondes les éventuelles irrégularités de planéité longitudinale se trouvent.
- Profil longitudinal pondéré (BLP) : ce profil consiste à définir un nouveau profil en pondérant les amplitudes du profil relevé dans différentes longueurs d'ondes de façon à ce qu'elles acquièrent un poids équivalent dans son analyse. Il est caractérisé par l'écart-type et la valeur maximale de ses amplitudes.

Dans le cadre de l'adoption des normes européennes par la Suisse, ces trois nouvelles méthodes ont été introduites en 2017 dans la norme SN 640 517 [5], ceci sur la base des résultats du mandat de recherche [13]. Des échelles d'évaluation des résultats obtenus par ces trois méthodes existent dans plusieurs pays, mais pas en Suisse.

Le présent mandat de recherche s'intéresse aux indicateurs pouvant être obtenus avec ces quatre méthodes pour différents types de réseaux.

Les deux principaux objectifs du projet de recherche sont de :

- préciser les domaines d'utilisation des méthodes d'évaluation de la planéité longitudinale normalisées par la nouvelle SN 640 517 [5] et, le cas échéant, proposer des adaptations pour une future nouvelle version de cette norme ;
- proposer des échelles d'évaluation pour ces différentes méthodes pour fixer des exigences et définir des indices utilisables en Suisse pour la gestion de l'entretien des chaussées.

La recherche s'articule sur l'analyse d'une sélection de données issues de relevés à grand rendement de la planéité longitudinale fournies par l'OFROU, des cantons et des communes. Ces profils longitudinaux, qui ont déjà été exploités pour obtenir les valeurs W, s_w et sa transformation en indice I2 selon les normes suisses, ont été traités selon les trois méthodes de la norme européenne.

D'un point de vue méthodologique, l'exploitation des résultats se fait principalement par le biais de comparaison de valeurs statistiques. Ces analyses statistiques ont été menées à différentes échelles et sur différents types de route.

On a finalement cherché à établir des liens entre les valeurs statistiques obtenues pour les mesures effectuées en Suisse et les recommandations en vigueur dans les pays qui

utilisent déjà les procédures de la norme européenne. Ces valeurs ont été utilisées pour proposer de nouvelles valeurs seuils (*i.e.* valeur de réception, valeur d'alarme et valeur critique) des indicateurs du profil longitudinal dans la normalisation suisse.

2 Méthodes d'exploitation du profil longitudinal

Le projet de recherche porte sur les quatre méthodes de quantification de la planéité longitudinale figurant dans la norme SN 640 517 [5] :

- Valeurs d'angle (W et s_w)
- Indice d'uni international (IRI)
- Analyse par bande d'onde (NBO)
- Profil longitudinal pondéré (BLP)

Un résumé des paramètres étudiés est donné dans le Tab. 1:

Tab. 1 Synthèse des quatre méthodes de quantification de la planéité longitudinale

Méthode	Référence	Paramètre	Unité	Description
Valeurs d'angle	[5]	W	‰	changement de pente dans le profil longitudinal
		s_w	-	l'écart type des angles mesurés
Indice d'uni international	[21]	IRI	m/km , mm/m	La différence de position verticale entre deux composants du véhicule normée par la longueur de l'intervalle d'exploitation
Analyse par bande d'onde (NBO)	[7] [14]	EPO	cm ³	Energie par bande des petites ondes
		EMO		Energie par bande des moyennes ondes
		EGO		Energie par bande des grandes ondes
		NPO	-	Note par bande des petites ondes
		NMO		Note par bande des moyennes ondes
		NGO		Note par bande des grandes ondes
Profil longitudinal pondéré (BLP)	[16][17]	SBW	mm	Ecart type du profil pondéré
		DBW	mm	Amplitude maximale du profil pondéré

Ce chapitre décrit brièvement les principes des algorithmes utilisés pour les quatre méthodes d'exploitation de la planéité longitudinale. En complément des méthodes mentionnées ci-dessus, la méthode de densité spectrale de puissance (DSP) est également présenté dans cette chapitre car cette méthode est plus loin utilisé afin d'établir les relations analytiques pour trouver les valeurs limites pour les différents méthodes.

2.1 Valeurs d'angle (W et s_w)

L'exploitation des valeurs d'angle a été développée avant l'utilisation généralisée de l'informatique, et a donc été conçue pour pouvoir être mesurée *in situ*, sans avoir à relever l'ensemble du profil. La mise en œuvre de cette méthode a demandé le développement d'appareils de mesure spécifiques, dont le Goniograph, qui fut pendant longtemps l'appareil le plus utilisé en Suisse.

La méthode valeurs d'angle repose sur « la mesure de la variation angulaire de deux segments adjacents de 1 mètre de longueur » [13]. La planéité longitudinale, est caractérisée par deux valeurs pour chaque intervalle d'exploitation [5]:

- W correspond à un changement de pente dans le profil longitudinal (Fig. 1). La valeur maximale (en valeur absolue) de l'angle W sur l'intervalle d'exploitation (W_{max}) est généralement utilisée pour détecter des défauts ponctuels du profil.
- s_w est l'écart type des angles mesurés sur toute la longueur de l'intervalle d'exploitation. Il caractérise l'état général de la planéité longitudinale de l'intervalle.

La valeur d'angle W représentée dans la Fig. 1, et son écart type évalué sur l'intervalle d'exploitation s_w , sont calculés selon les équations issues de [5] et rappelées ci-dessous :

$$W_i = \frac{1}{\Delta x} (y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}) \cdot 1000$$

$$= (y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1})$$

$$s_w = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W})^2} \quad [\text{‰}]$$

Où

W_i : Changement de pente en ‰ au point i ;

y_i : Amplitude des points du profil longitudinal ;

Δx : Pas de mesures = 1000mm ;

n : Nombre des valeurs W_i sur l'intervalle d'exploitation.

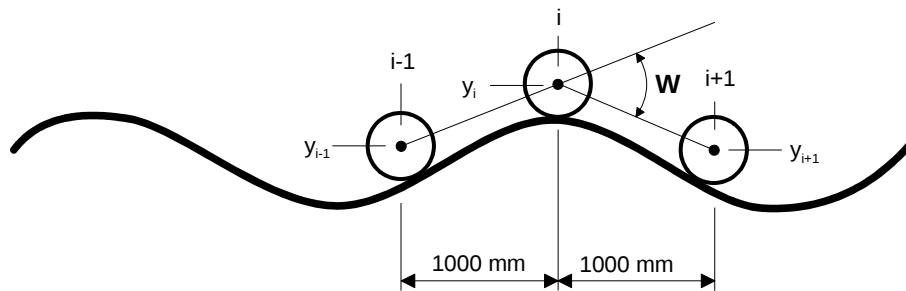


Fig. 1 Valeur d'angle W [‰] [5]

Définition selon SN 640517

La valeur W représente un changement de pente (en ‰) dans le profil longitudinal. Elle correspond à l'angle formé par deux cordes adjacentes de 1 m de longueur. Elle permet de détecter des irrégularités locales. Elle est aussi utilisée pour calculer la valeur s_w qui permet l'appréciation globale de tronçons (notamment par le biais de l'indice d'état I_2). La valeur s_w correspond à l'écart-type des valeurs W sur l'intervalle d'exploitation choisi.

Inputs

Réalisation des mesures *in situ*, ou
Profil longitudinale mesuré / pseudo-profil

Outputs

Une valeur d'angle maximal W_{max} et un écart-type s_w par intervalle d'exploitation

Désavantages

Ne capte que les défauts ayant des petites longueurs d'ondes (courtes)

2.2 Indice d'uni international (IRI)

Cet indicateur a été proposé par la banque mondiale au début des années 1980 [19] pour des raisons pratiques, notamment sa reproductibilité et la bonne stabilité de l'essai et de ces résultats ([21][18]). Mathématiquement, il correspond à l'intégrale de la valeur absolue de la différence de vitesse entre la masse et l'essieu du quart de véhicule modélisé (Fig. 2) à une vitesse de 80 km/h divisée par la longueur de l'intervalle d'exploitation. Le modèle est un quart de véhicule et a été normalisé selon le rapport de la banque mondiale [19] afin de pouvoir l'utiliser au niveau international. La fonction de transfert du modèle (Fig. 3) montre les longueurs d'ondes qu'il prend en compte. La méthode est basée sur un calcul purement théorique et ne dépend donc pas des appareils de mesure, mais uniquement des profils relevés par ces derniers :

$$IRI = \frac{1}{L} \int_0^x |\dot{Y}_u - \dot{Y}_s| dt$$

Selon la norme suisse [5], L'IRI peut être calculé pour différents intervalles d'exploitation et l'intervalle retenu doit être mentionné dans le résultat (e.g. 20, 50 ou 100 m). Pour les comparaisons internationales, il est recommandé d'utiliser un intervalle d'exploitation de 100m.

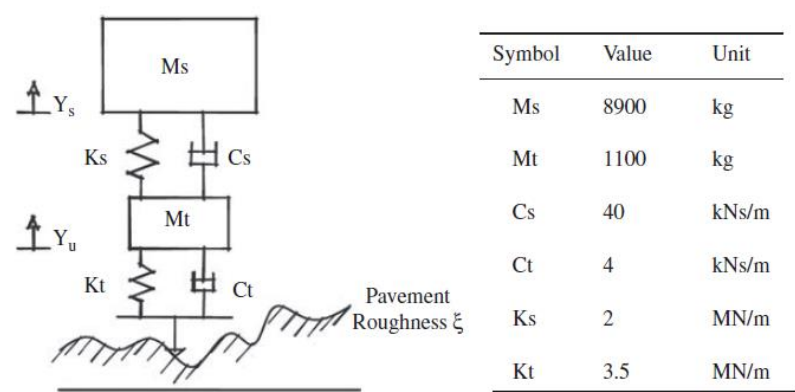


Fig. 2 Schéma du modèle de « quart de véhicule » [22]

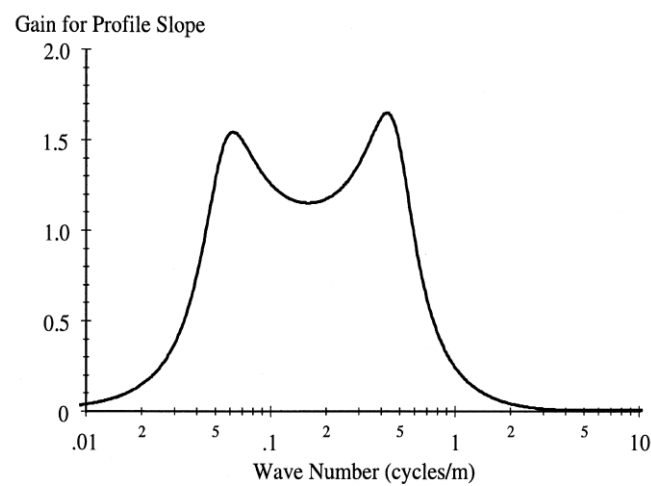


Fig. 3 Fonction de transfert d'IRI [30]

Définition selon SN 640 517

L'IRI permet de quantifier le confort de roulement pour l'utilisateur de la route. Il est notamment utilisé pour les comparaisons internationales. Cet indice est calculé à partir de la simulation du mouvement vertical subi par la suspension modélisée d'un quart de véhicule parcourant le profil longitudinal mesuré.

Inputs :

- Modèle mathématique de « quart de véhicule »
- Profil longitudinal mesuré

Output :

La valeur d'IRI (mouvement cumulé / longueur tronçon) [m/km]. C'est une différence de position verticale entre deux composants du véhicule normée par la longueur de l'intervalle d'exploitation

Désavantage :

- Le modèle « quart de véhicule » n'est pas représentatif de toutes les fréquences importantes d'un véhicule.
- La réponse du modèle se situe dans l'intervalle ~1.2 – 30 m. Il a été montré par [24] que l'IRI n'est pas capable de capter les effets des réparations de la chaussée car il a une plus faible sensibilité aux ondes plus courtes que 2 m et plus longues que 20 m.
- La vitesse réelle des véhicules n'est pas toujours de 80 km/h.

2.3 Analyse par bande d'onde (NBO)

Les Notes par Bande d'Onde (NBO) ont initialement été développées dans les années 1970s en France.

Les trois bandes de longueurs d'onde retenues par la norme française (NF P 98-218-3) [7] sont :

- Petites ondes **PO** : $0.707 < \lambda < 2.828$ (mètres)
- Moyennes ondes **MO** : $2.828 < \lambda < 11.312$ (mètres)
- Grandes ondes **GO** : $11.312 < \lambda < 45.248$ (mètres)

Pour chaque bande d'onde et pour l'intervalle d'exploitation choisi, l'énergie du signal filtré est calculée avec la relation suivante :

$$E = dx \cdot \sum_{i=1}^n A_i^2$$

Avec : dx l'échantillonnage et A l'amplitude.

Les énergies par bandes (cm^3) d'onde sont alors définies :

- **EPO₂₀** : énergies petites ondes calculées sur des segments de 20 mètres ;
- **EMO₁₀₀** : énergies moyennes ondes calculées sur des segments de 100 mètres ;
- **EGO₂₀₀** : énergies grandes ondes calculées sur des segments de 200 mètres ;

Un exemple de décomposition d'un profil dans les trois bandes de longueurs d'onde et de calcul des énergies par bandes est présenté dans la Fig. 4.

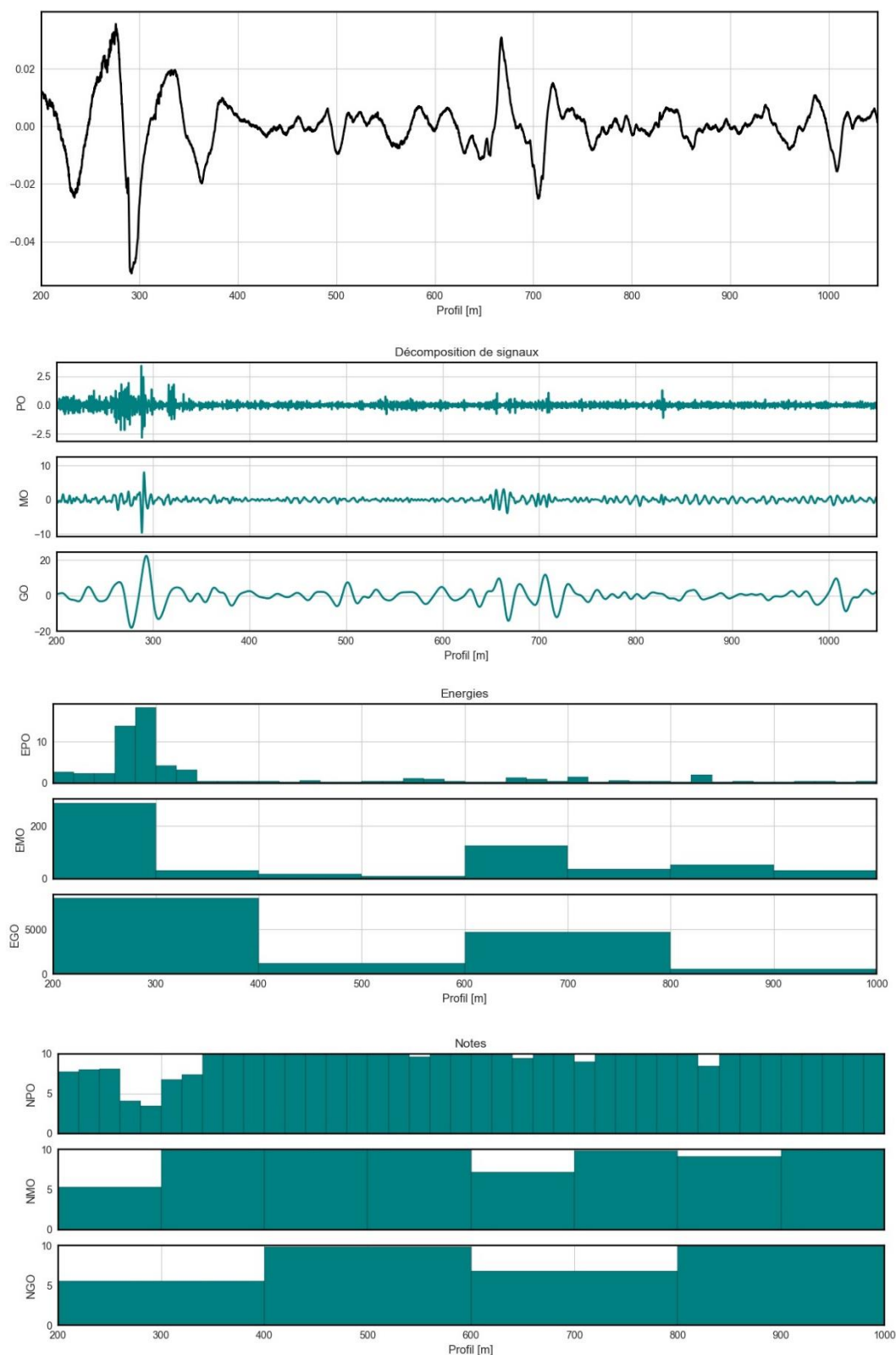


Fig. 4 Exemple d'analyse NBO

La méthode française transforme les énergies en notes (0...10) par bandes d'onde selon les relations présentées dans le Tab. 2 avec une résolution de 0.5. Une note NBO de 0 exprime un état de planéité longitudinale très dégradé alors qu'une note NBO de 10 indique une excellente planéité longitudinale.

Tab. 2 Transformation des énergies en notes [14]

NBO	Intervalle des énergies EBO		
	EPO [cm3]	EMO [cm3]	EGO [cm3]
10	0 - 1.1	0 - 39	0 - 1267
9.5	1.1 - 1.4	39 - 49	1267 - 1585
9	1.4 - 1.7	49 - 62	1585 - 1983
8.5	1.7 - 2.2	62 - 77	1983 - 2481
8	2.2 - 2.7	77 - 97	2481 - 3103
7.5	2.7 - 3.4	97 - 121	3103 - 3882
7	3.4 - 4.2	121 - 151	3882 - 4857
6.5	4.2 - 5.3	151 - 189	4857 - 6076
6	5.3 - 6.6	189 - 236	6076 - 7601
5.5	6.6 - 8.2	236 - 296	7601 - 9509
5	8.2 - 10.3	296 - 370	9509 - 11896
4.5	10.3 - 12.9	370 - 463	11896 - 14882
4	12.9 - 16.1	463 - 579	14882 - 18618
3.5	16.1 - 20.2	579 - 725	18618 - 23292
3	20.2 - 25.3	725 - 906	23292 - 29139
2.5	25.3 - 31.6	906 - 1134	29139 - 36453
2	31.6 - 39.5	1134 - 1419	36453 - 45604
1.5	39.5 - 49.5	1419 - 1775	45604 - 57051
1	49.5 - 61.9	1775 - 2220	57051 - 71372
0.5	61.9 - 77.4	2220 - 2778	71372 - 89288
0	> 77.4	> 2778	> 89288

Les NBO peuvent aussi être calculées avec les équations suivantes [15]:

$$NPO = -2.2373 \times \ln(EPO_{20}) + 9.975$$

$$NMO = -2.2317 \times \ln(EMO) + 17.947$$

$$NGO = -2.2326 \times \ln(EGO) + 25.700$$

Définition selon SN 640 517

Cette analyse permet de quantifier dans quelles longueurs d'ondes les éventuelles irrégularités de planéité longitudinale se situent.

Dans l'analyse par bandes d'ondes, le profil longitudinal mesuré est décomposé en trois profils longitudinaux correspondant aux trois bandes de longueurs d'ondes (PO, MO, GO) définies dans la prEN 13036-5 [1]. L'énergie du signal filtré est calculée pour chacun de ces trois profils et est ensuite transformée en notes par bandes d'ondes (NBO) à l'aide d'une échelle de qualité.

Inputs

Profil longitudinale mesuré / pseudo-profil

Outputs

Une valeur d'énergie (cm^3) par intervalle d'exploitation et par bande d'ondes, qui peut être transformée en note d'indice (0...10)

Désavantages

Ne permet pas de détecter les défauts périodiques

2.4 Profil longitudinal pondéré (BLP)

La méthode du profil longitudinal pondéré (BLP) a été développée en Allemagne au début des années 2000. Le calcul peut être divisé en trois étapes principales :

- Filtrage (filtre passe-haute) pour atténuer les longueurs d'onde supérieures à 100 m.
- Pondération du profil filtré
- Calcul de l'écart type ($\sigma_{\text{BLP}} = \text{SBW}$) et de l'amplitude maximale ($\Delta_{\text{BLP}} = \text{DBW}$) du profil pondéré

La pondération du profil (Fig. 5) est réalisée en appliquant la démarche de la Fig. 6. Des informations détaillées sur l'algorithme de cette méthode peuvent être obtenues dans [16] et [17]. Les valeurs SBW (σ_{BLP}) et DBW (Δ_{BLP}) sont calculées sur la base du profil pondéré dans lequel l'énergie générée par les petites ondes est amplifiée alors que celles des grandes ondes est réduite. Ce traitement est effectué afin de conserver les informations relatives aux petites et aux grandes ondes en leur donnant une importance similaire à celles des ondes moyennes.

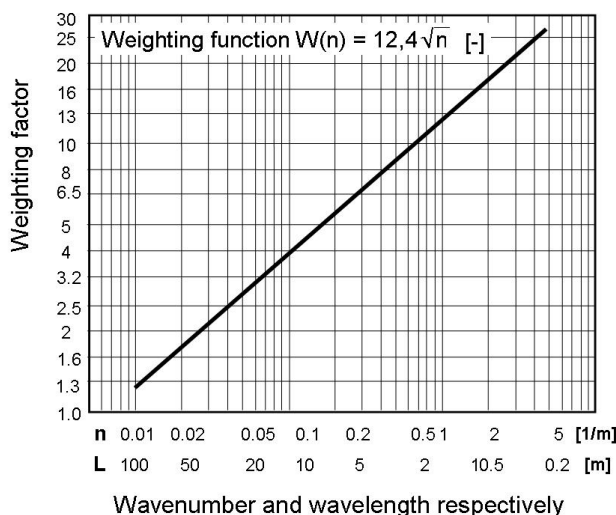


Fig. 5 Fonction de pondération pour la méthode BLP [16]

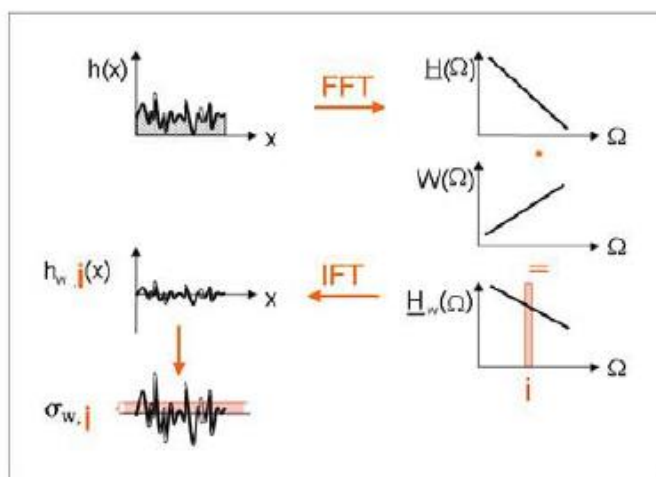


Fig. 6 Schéma de l'algorithme de la méthode BLP [16]

La Fig. 7 présente un exemple de la pondération du profil d'un tronçon de 100 m. Les couleurs vertes, jaunes et rouges indiquent les trois niveaux de seuils (Abnahme = réception : en vert, Schwellenwert = valeur seuil en jaune, et Warnwert = valeur d'alarme en rouge) qui seront présentés dans le chapitre relatif aux exigences (chap. 4.1.2).

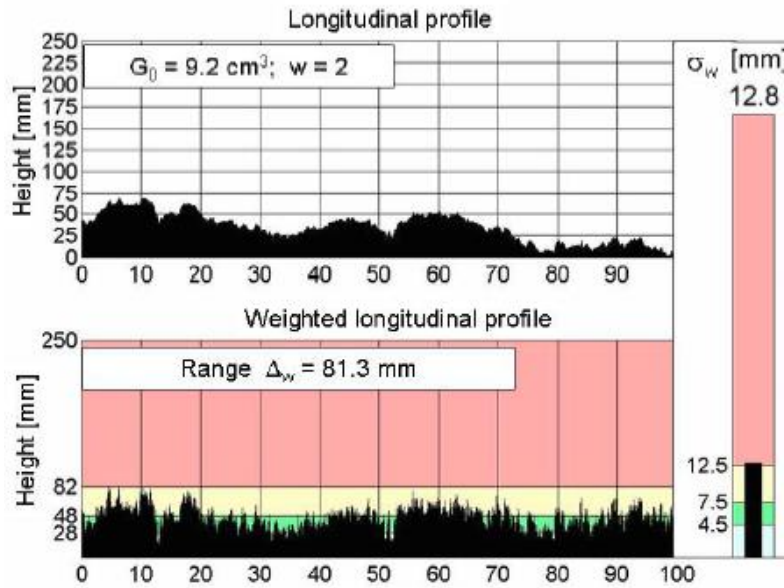


Fig. 7 Exemple de pondération du profil [16]

La Fig. 8 illustre la représentation des données pour un tronçon de route (ici d'une longueur de 5.8 km). Les trois niveaux de couleurs correspondent aux valeurs seuils. Cette représentation fait apparaître que, plus des points sont décalés vers le haut, plus le tronçon possède des défauts périodiques. Au contraire, si les défauts sont plus locaux (e.g. nid-de-poule), les points sont décalés vers le bas.

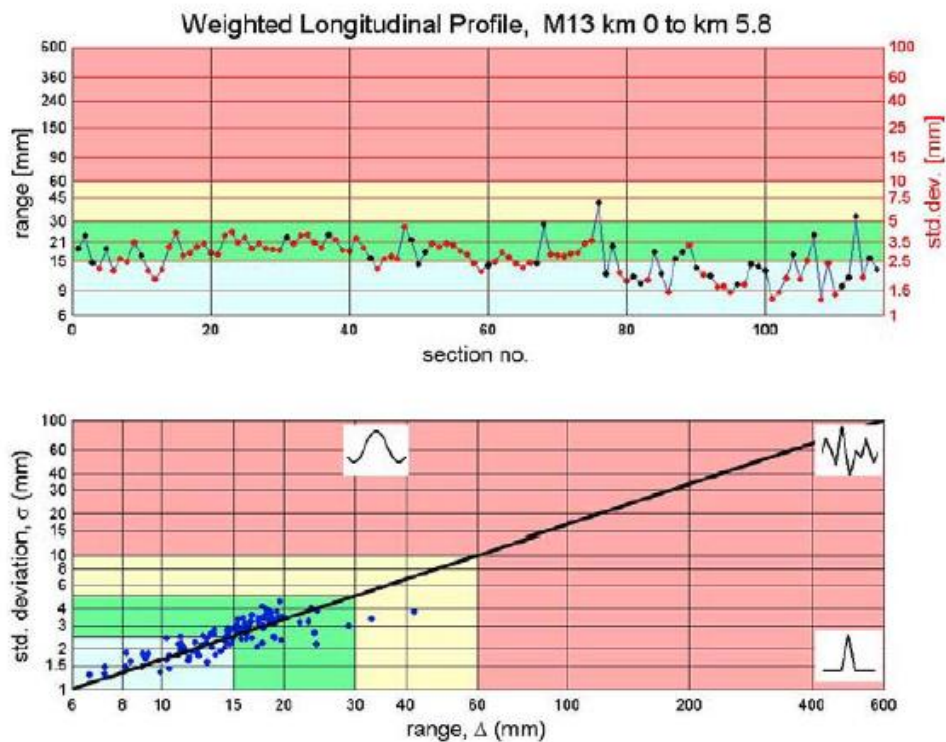


Fig. 8 Exemple de représentation combinée des résultats d'une analyse BLP [16]

Définition selon SN 640 517

Le profil longitudinal pondéré consiste à définir un nouveau profil en pondérant les amplitudes du profil relevé dans différentes longueurs d'ondes de façon à ce qu'elles acquièrent un poids équivalent dans son analyse. Le but de cette pondération est d'amplifier l'effet des petites ondes et réduire celui des grandes ondes, tout en conservant les informations relatives aux différentes longueurs d'ondes utilisées pour calculer les valeurs de SBW et DBW.

Inputs

- Profil longitudinal mesuré / pseudo-profil
- Fonction de pondération

Outputs

- Profil pondéré
- Ecart-type du profil pondéré (SBW)
- Amplitude maximale du profil pondéré (DBW)

Désavantages

La méthode étant relativement nouvelle, on manque par conséquent de recul sur les résultats qu'elle fournit.

2.5 Densité spectrale de puissance (DSP)

La densité spectrale de puissance (DSP) n'est pas une méthode normalisée et donc n'est pas mentionnée dans la nouvelle norme européenne [1] ni dans la norme suisse [5]. Toutefois, puisque dans le présent projet de recherche le DSP est utilisé à fin d'établir les relations analytiques, une brève description sur cette méthode est donnée dans ce chapitre.

La DSP est la représentation statistique de l'importance des divers nombres d'ondes. Le guide français [14] donne la définition suivante:

« La densité spectrale de puissance (DSP) est la répartition de la puissance d'un signal suivant les fréquences. On définit la DSP comme étant le carré du module de la transformée de Fourier divisé par le pas fréquentiel :

$$DSP = \frac{|X(v)|^2}{df} = |X(v)|^2 \cdot np \cdot dx$$

Où :

v est le signal ;

$X(v)$ est la transformée de Fourier ;

df est le pas fréquentiel ;

np est le nombre de points ;

dx est le pas d'échantillonnage. »

Pour des raisons de précision statistique de l'estimation de la DPS, la section doit être d'une longueur supérieure à 1000 mètres.

Le DSP est souvent défini par les fonctions approximatives. La modèle, la plus simple est la modèle proposé par ISO [8] qui est une modèle linéaire :

$$G(\Omega) = AUN \times \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-w}$$

Où G = Densité Spectrale de Puissance,

AUN = coefficient d'irrégularité (allgemeine Unebenheitsmaß),

Ω = fréquence angulaire spatiale (nombre d'onde),

Ω_0 = fréquence angulaire spatiale pour la longueur d'onde de référence de 6.28 m (2π m) = 1m^{-1}

w = waviness

Un exemple de DSP d'un tronçon de route est disponible dans la Fig. 9.

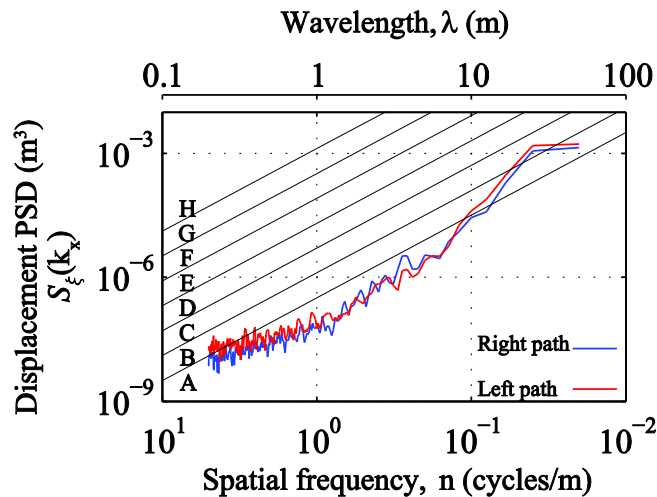


Fig. 9 Exemple de résultats de DSP

La classification des routes ISO [8] à partir de la valeur AUN est donnée dans le Tab. 3 :

Tab. 3 Classification des routes en fonction de leur DSP selon ISO [8]

Classe de routes	AUN (cm ³)
A	< 2
B	2-8
C	8-32
D	32-128
E	128-512
F	512-2048
G	2048-8192
H	> 8192

Un autre exemple d'approximation de la modèle de DPS est donné par le BSI [9] ou le DPS est coupé par deux lignes :

$$G_d(\Omega) = \begin{cases} AUN \Omega^{-w_1} & 0 \leq \Omega \leq \Omega_0 \\ AUN \Omega^{-w_2} & \Omega_0 \leq \Omega \leq \infty \end{cases}$$

où selon la norme BSI [9] la valeur pour Ω_n est défini à $(1/(2\pi))$.

2.6 Prétraitement des signaux

L'appareil de mesure enregistre un profil longitudinal numérisé de la surface. Ce profil brut n'est en général pas directement utilisable pour les analyses numériques et doit subir un certain nombre de prétraitements.

La norme européenne [1] définit pour chaque méthode d'évaluation du profil (IRI, NBO et BLP) une démarche de prétraitement propre (Tab. 4).

Tab. 4 Prétraitement associé à chaque méthode d'exploitation selon la norme européenne [1]

Méthode	Prétraitements du signal			
	Redressement	Ré-échantillonnage	Filtre passe-haut	Filtre passe-bas
S_w				
IRI		< 125 mm (linéaire)		250 mm
NBO	Régression linéaire	50 mm (linéaire)	100 m	
BLP	Régression linéaire	100 mm (linéaire)	100 m	

La sensibilité de chaque méthode aux différentes démarches de prétraitement a été évaluée avec les différents exemples (voir annexe). Les résultats d'analyse de sensibilité montrent qu'une seule démarche de prétraitement pourrait être définie pour la normalisation, applicable aux trois méthodes d'évaluation IRI, BLP et NBO. Une proposition pour une telle démarche de prétraitement générale est proposée ci-dessous :

- Application d'un algorithme de redressement sur le profil mesuré
- Ré-échantillonnage d'intervalle $dx = 5\text{cm}$ ou $dx = 10\text{cm}$ avec interpolation linéaire du profil mesuré.
- Filtrage passe-haut des longueurs d'onde plus grandes de 100 m. Selon [1], le filtre :
- doit réduire l'amplitude des longueurs d'onde de plus que 150 m d'au moins 50%.
- Ne doit pas distordre la phase des profils (e.g. application des filtres numériques aller-retour (filtfilt))

3 Statistiques et analyses

Le présent chapitre est consacré à l'évaluation de la planéité longitudinale de différents réseaux routiers (routes nationales, cantonales et communales) selon les quatre méthodes présentées au chapitre 2. Les principales caractéristiques des réseaux considérés pour cette analyse sont synthétisées dans le Tab. 5. A l'exception du Valais où des profils ont été relevés dans les deux traces, les données de profil ont été mesurées dans la trace de roue droite sur une des voies de l'axe (mesure dans une seule direction).

Tab. 5 Caractéristiques des réseaux considérés pour l'analyse

	Type de réseau	Longueur de réseau analysé (km)	Remarques
Canton du Valais (VS)	Cantonal	1767.6	Canton alpin, avec une majorité de routes en campagne, et une forte présence de routes de montagne + Profils disponibles pour les traces de roue gauche et droite
Canton du Zurich (ZH)	Cantonal	1956.8	Canton plat, avec environ une moitié de routes urbaines, et une moitié de routes en campagne
Route nationale N2 (N)	National	60.2	Portion de 60 km sur 1 axe autoroutier suisse
Le Mont sur Lausanne	Communal	108.4	3 communes de taille moyenne, avec une majorité de routes urbaines
Olten	Communal	140.8	
Lyssach	Communal	173.6	

3.1 Comparaisons des indicateurs

La comparaison des résultats obtenus dans ce chapitre est présentée dans les figures suivantes pour les indicateurs obtenus à partir des quatre méthodes étudiées. Les trois réseaux communaux (*i.e.* Le Mont sur Lausanne, Olten et Lyssach) obtenant des résultats statistiquement similaires, seuls ceux du réseau de la commune du Mont-sur-Lausanne sont présentés ici, sous la dénomination « Com ».

Les comparaisons se font à partir de résultats statistiques, qui ont notamment été représentés sous forme de « boxplot » (Fig. 10). Sur un « boxplot », la médiane est visible, ainsi que les percentiles 25% et 75%. Ces trois éléments forment la « boîte ». Les « moustaches », disposées à une distance de 3 écarts-types ($\pm 3\sigma$) par rapport à la valeur moyenne, servent à isoler les valeurs aberrantes situées au-delà.

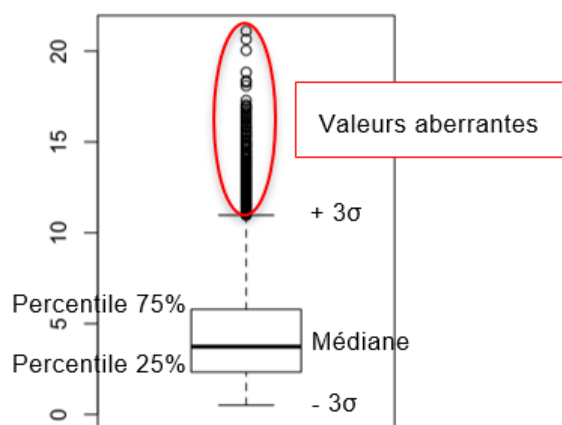


Fig. 10 Exemple de représentation "Boxplot"

3.1.1 Entre réseaux

Dans ce chapitre une comparaison entre les différents réseaux présenté dans le Tab. 5 est présenté. Cette comparaison comprend un tronçon de routes nationales (N), le réseau cantonal valaisan (VS) (avec une forte proportion de routes de montagnes qui sont souvent en mauvais état), le réseau cantonal zurichois (ZH) (avec une répartition égale entre des routes de plaine en milieu urbain ou en milieu campagnard) et le réseau de routes communales du Mont-sur-Lausanne (les résultats obtenus pour les deux autres communes sont statistiquement similaires à ceux du Mont-sur-Lausanne qui figurent avec la dénomination « Com »).

Des comparaisons entre les types de réseau ont tout d'abord été faites par l'intermédiaire d'un résumé des principales valeurs statistiques (moyenne, écart type, percentiles 25, 50, 75 et 90%) des indicateurs de l'uni longitudinal (Tab. 6)

Tab. 6 Valeurs statistiques des indicateurs de la planéité longitudinale pour les 4 réseaux étudiés

		SW	IRI	SBW	DBW	Wmax	NPO	NMO	NGO
ZH	moyenne	2.4	2.2	6	52.9	11.7	7.3	7	5.8
	Ecart-type	1.4	1.1	3.3	54.4	10.7	2	2.2	2.5
	25%	1.4	1.4	3.8	26.1	5.4	6	5.4	4.2
	50%	2	2	5.2	39.5	8.7	7.6	7	6
	75%	3	2.7	7.3	61.9	14.5	9	8.8	7.6
	90%	4.2	3.7	10	96.3	22.6	9.7	10	8.9
VS	moyenne	3.9	3.9	10.9	79.6	19.9	5.9	5	2.6
	Ecart-type	2.5	2.2	6	55.5	15.7	2.5	2.6	2.4
	25%	2.1	2.3	6.5	41.4	8.4	4.1	3	0
	50%	3.2	3.3	9.7	66	15.5	6.1	4.9	2.2
	75%	5.1	4.9	14	102.7	27.1	7.9	6.9	4.2
	90%	7.3	6.9	18.8	145.6	40.4	9.1	8.7	6
N	moyenne	1.4	1.2	3.6	36.4	7.8	9	9.1	9.3
	Ecart-type	0.8	0.5	1.7	41.1	9.8	1.2	1.3	1.1
	25%	0.9	0.8	2.4	17.1	3.2	8.3	8.5	8.9
	50%	1.2	1	3	23.1	4.7	9.5	10	10
	75%	1.8	1.4	4.2	38.9	8.7	10	10	10
	90%	2.4	1.8	5.6	69.7	14.7	10	10	10
Com	moyenne	4.9	4.6	11.4	99.1	25.1	5.1	4	2.6
	Ecart-type	3	2.8	6.2	64.3	18.9	2.5	2.5	2.5
	25%	2.6	2.5	6.8	54.3	11.4	3.1	2.2	0
	50%	4.1	3.7	9.8	82.2	20.6	5.2	4.2	2.2
	75%	6.5	6	14.4	127	32.6	7	5.8	4.7
	90%	9.1	9	19.7	174.9	48.3	8.3	7.3	5.9

Pour expliquer le fonctionnement de la statistique basée sur les percentiles, on observe par exemple que 75% du réseau du canton du Zurich obtient une valeur d'IRI inférieure à 2.7 m/km. Cette valeur est de 4.9 m/km pour le réseau du canton du Valais, de 1.4 m/km pour le tronçon de route nationale et de 6.0 m/km pour la commune du Mont.

Les valeurs statistiques du Tab. 6 amènent les commentaires suivants :

- De manière général, la planéité longitudinale du réseau zurichois (ZH) et du tronçon de route nationale (N) est meilleure que celui du canton du Valais (VS) et de la commune (Com),
- On constate une différence importante entre les valeurs SBW de VS et ZH : à titre d'exemple, alors que seul 10% du réseau de ZH a une valeur de SBW supérieure à 10.0, près de 50% du réseau du VS atteint cette valeur.
- Les écart-type obtenus pour l'ensemble des indicateurs sont relativement élevés, ce qui est révélateur de la diversité de la qualité des tronçons analysés pour chaque réseau. La valeur d'écart type du VS est cependant sensiblement plus élevée que celle de ZH.
- Plus que 50% des tronçons de routes nationales ont une note de NBO (i.e. NPO, NMO, NGO) égale à 10, qui correspond à un excellent état, alors que seulement 10% des réseaux ZH et VS ont une note de NPO égale à 10. Ce pourcentage est moins que 10% pour la commune.

- Environ 10% du réseau ZH a une note de NMO (moyennes ondes) égale à 10, tandis que cette valeur pour le réseau valaisan est inférieure à 2%.
- La différence entre les valeurs de NGO (grandes ondes) des réseaux de la Com, du VS, de ZH et de N est très importante. Plus de 50% des tronçons de N ont une note de NGO égale à 10, alors que seulement 10% des tronçons de ZH ont une valeur de NGO supérieure à 8.9 et quasiment 90% des tronçons du VS et Com ont une note de NGO inférieure à 6.

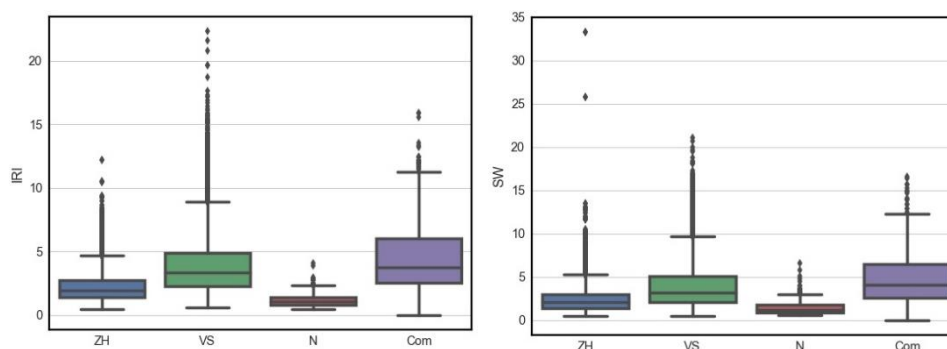


Fig. 11 Comparaison des valeurs de s_w et IRI pour les différents réseaux

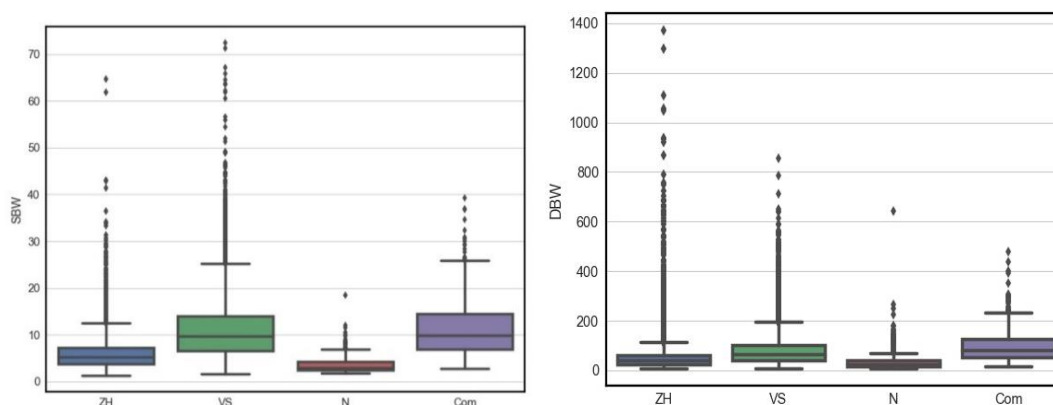


Fig. 12 Comparaison des valeurs de SBW et DBW de la méthode BLP pour les différents réseaux

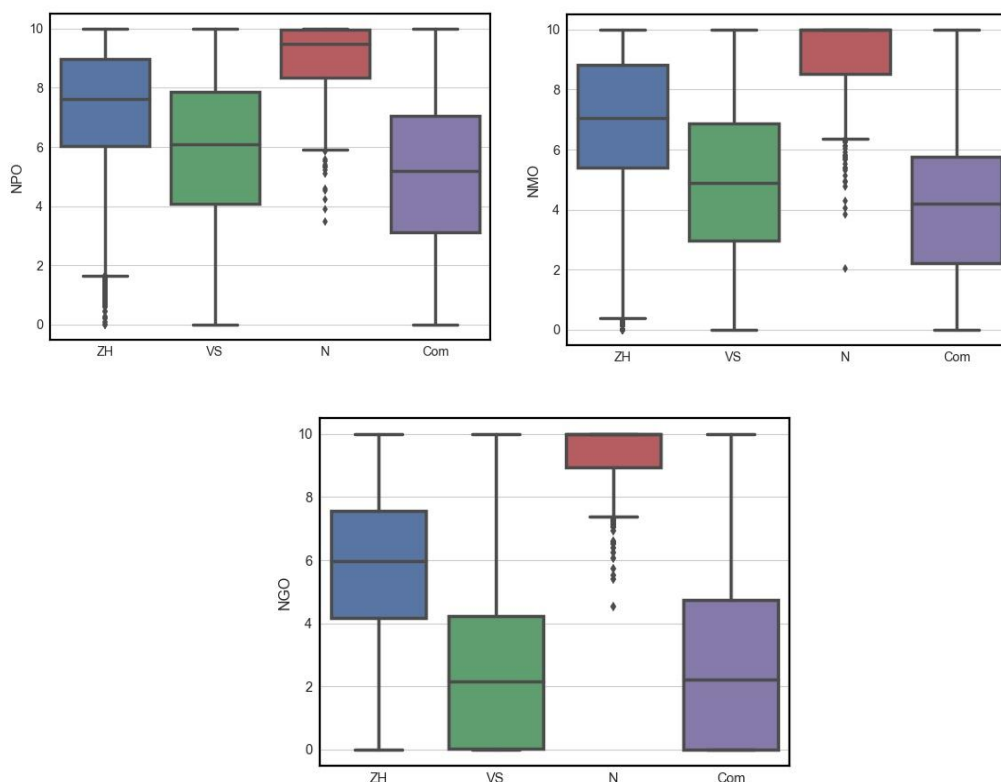


Fig. 13 Comparaison des valeurs de NBO pour les différents réseaux

Selon les boxplots de la Fig. 11, la Fig. 12 et la Fig. 13, on observe que les résultats obtenus sur le tronçon de route nationale sont clairement les meilleurs et sont aussi ceux qui sont le moins dispersés. On constate ensuite que les résultats obtenus pour le canton de Zurich sont sensiblement meilleurs que ceux du canton du Valais. Cela s'explique probablement par la forte proportion de routes de montagne dont l'état général est plutôt mauvais. Finalement, les résultats statistiques du canton du Valais sont assez similaires à ceux obtenus pour le réseau communal

Par contre, le nombre de valeurs DBW aberrantes pour ZH est plus important que pour VS (Fig. 12). Après discussion avec le responsable des relevés ZH, il semble que cela s'explique probablement par l'utilisation d'appareils de mesures différents pour les relevés sur ces deux réseaux cantonaux. Le véhicule ARAN, utilisé en Valais, détermine le profil de la route à l'aide d'un laser unique positionné sur la trace de roue après élimination des mouvements du véhicule mesurés avec un accéléromètre. Le véhicule STIER, utilisé à Zurich, applique pour sa part le principe du système HRM du TRRL décrit dans [13]. Le profil de la route est déterminé en combinant les lectures de quatre lasers alignés sur une poutre dans le sens longitudinal. Cette méthode présente l'avantage d'être peu sensible à la vitesse de mesure pour autant que les capteurs laser mesurent dans leur gamme nominale [32]. Il est probable que le système profilométrique laser du STIER soit plus sensible à une lecture ponctuelle erronée d'un laser, résultant par exemple de la présence d'un gravillon ou une feuille sur la chaussée.

3.1.2 Types de routes (canton VS)

Les réseaux cantonaux regroupent souvent des routes situées en milieu urbain, hors localité voire en montagne. C'est notamment le cas du réseau valaisan qui se distingue

par une typologie permettant de distinguer les routes principales et secondaires ainsi que les routes de plaines et celles de montagnes. La classification des routes du canton du Valais est indiquée dans le Tab. 7, avec la longueur de réseau correspondant à chaque type.

Tab. 7 Classification des routes du canton du Valais

Type de routes	Longueur de réseau analysée (Km)	
Route principale suisse	223.0	13%
Route principale de plaine	202.0	11%
Route principale de montagne	256.7	15%
Route secondaire de plaine	126.0	7%
Route secondaire de montagne	925.9	52%
Chemin cantonal	31.8	2%

La répartition des types des routes du canton du Valais est présentée dans la Fig. 14. A noter que 52% du réseau est constitué de routes secondaires de montagne.

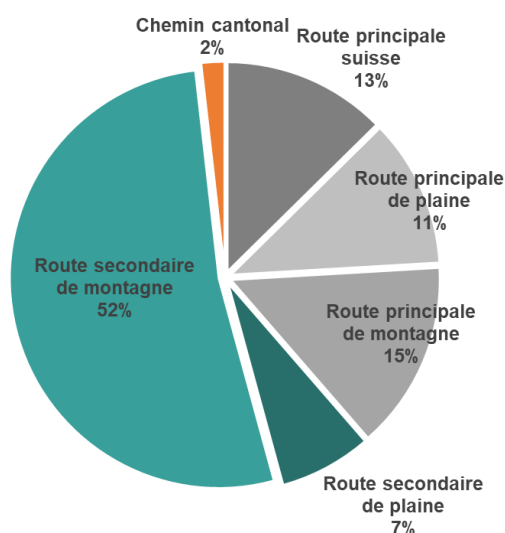


Fig. 14 Répartition des routes du canton du Valais

Le Tab. 8 regroupe les principales valeurs statistiques (moyenne, écart type, percentiles 25, 50, 75 et 90%) des indicateurs de l'uni longitudinal calculées pour les différents types de routes cantonales valaisannes. Un code couleur allant du vert (bon) au rouge (mauvais) permet de faire apparaître les valeurs extrêmes de chaque indicateur (par colonne).

Ces résultats font apparaître que les routes valaisannes peuvent être séparées en trois groupes selon la qualité de leur uni longitudinal. Les « routes principales suisses » et les « routes principales de plaine » présentent des planétés longitudinales statistiquement semblables. Leur planéité longitudinale est dans l'ensemble bien meilleure que celle des autres types des routes. Ce constat est valable pour l'ensemble des indicateurs étudiés. Il semble aussi possible de rassembler les « routes principales de montagne » et les « routes secondaires de plaine » au sein d'un même groupe dont l'état moyen est sensiblement moins bon que le premier groupe. Finalement, les « routes secondaires de montagne » et les « chemins de montagne », qui représentent respectivement la part la plus importante et la moins importante des routes valaisannes, obtiennent les plus mauvais résultats quel que soit l'indicateur à l'exception du W_{max} .

Tab. 8 *Résumé des statistiques pour les différents types des routes VS*

		DBW	SBW	IRI	SW	Wmax	NPO	NMO	NGO
Route principale suisse	moy.	47.6	7.7	2.6	2.5	10.4	7.3	6.6	4.5
	25%	24.6	4.5	1.6	1.4	4.3	5.9	5	3.1
	50%	35.1	6.5	2.2	2	6.9	7.9	6.7	4.5
	75%	56.2	9.5	3.2	3.1	12.9	9.5	8.4	6
	90%	90.6	4.6	4.9	13.4	22.2	10	9.7	7.5
Route principale de plaine	moy.	44.1	6.8	2.4	2.4	10	7.7	6.9	5.1
	25%	20.6	3.8	1.4	1.2	3.8	6.2	5.1	3.5
	50%	30.7	5.4	1.9	1.8	6.3	8.4	7.1	5.6
	75%	53	8.2	2.9	2.9	12.3	10	9	7.1
	90%	89.4	4.3	4.7	12.3	22.3	10	10	8.2
Route principale de montagne	moy.	67.5	11	3.9	3.8	15.6	5.9	4.9	2.6
	25%	34.7	6.5	2.2	2	6.4	3.8	3	0.8
	50%	53.4	9.6	3.3	3.1	11.5	6.3	4.9	2.6
	75%	84.5	13.8	4.9	5	20.8	8.3	6.8	4.1
	90%	126.5	7	7.4	18.9	32.4	9.8	8.4	5.4
Route secondaire de plaine	moy.	67.5	10.7	3.8	3.8	15.7	6	4.9	3.1
	25%	33.2	6.2	2.2	1.9	6.4	3.9	3	0.7
	50%	53	9	3.2	3	11.5	6.4	4.9	3.2
	75%	86.8	13.6	4.8	5	20.8	8.4	6.8	4.7
	90%	127	6.7	7.2	18.7	32.6	9.9	8.2	6.1
Route secondaire de montagne	moy.	80.3	13.7	4.7	4.5	9.3	5.3	4	1.5
	25%	44.4	8.6	2.8	2.5	4.3	3.1	2.3	0
	50%	66	12.2	4.1	3.7	6.7	5.5	3.9	1
	75%	99.8	17	5.8	5.9	11.4	7.5	5.7	2.7
	90%	141.4	8	8.4	22.4	37.3	9.1	7.1	4
Chemin cantonal	moy.	72.2	11.6	4.3	4.3	16.6	5.4	4.5	2.2
	25%	37.4	6.9	2.4	2.2	7	3.1	2.8	0
	50%	56.5	10.1	3.5	3.4	12.4	5.7	4.4	2
	75%	96.5	14.8	5.4	5.7	23.4	7.6	6.3	3.6
	90%	134.2	7.7	8.3	19.5	34	9.5	8.2	4.7

Des comparaisons de la distribution des différents indicateurs pour les différents types de routes du Valais sont données dans les figures suivantes (Fig. 15 à Fig. 18). Ces diverses figures, en plus de confirmer la pertinence des groupements proposés à partir du Tab. 8, permet de visualiser la variabilité des différents indicateurs.

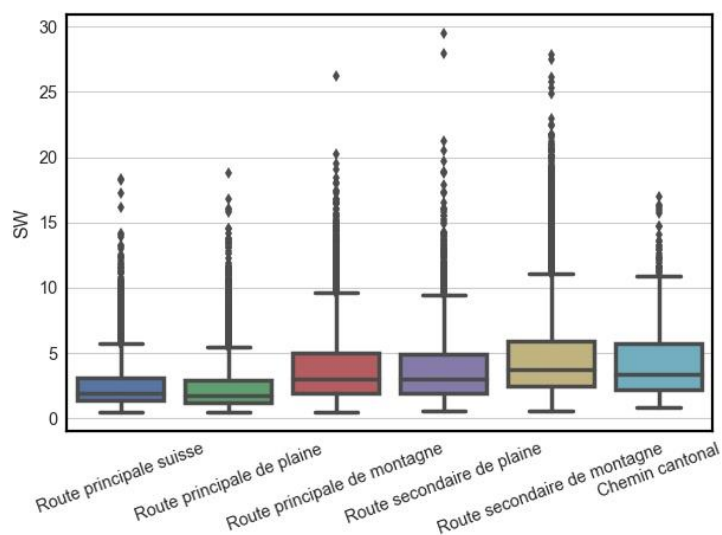


Fig. 15 Distribution des valeurs de s_w pour les différents types de route dans le canton du Valais

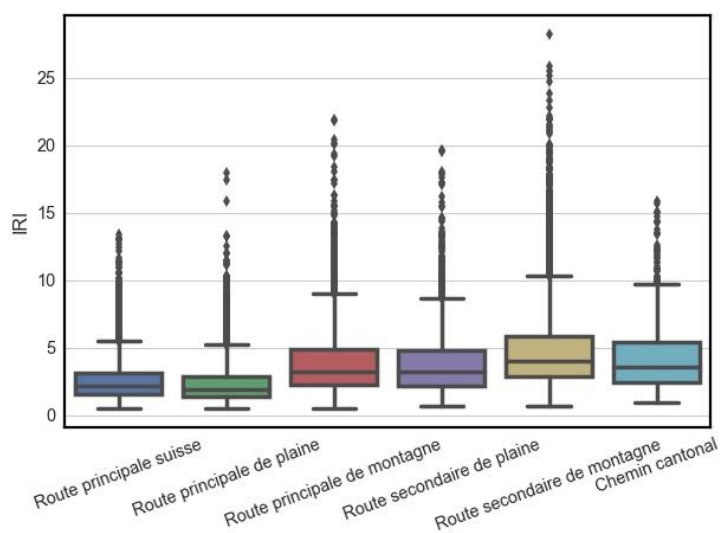


Fig. 16 Distribution des valeurs d'IRI pour les différents types de route dans le canton du Valais

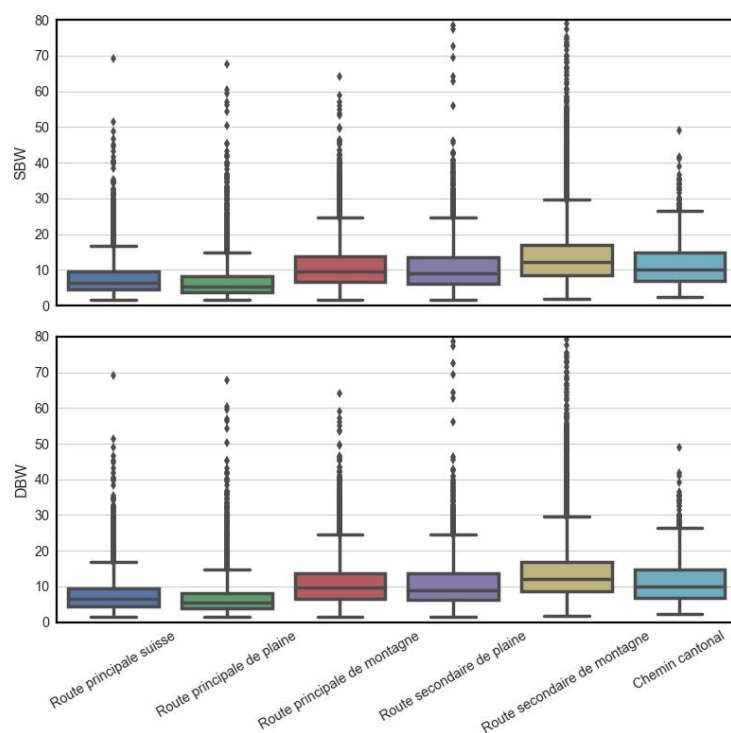


Fig. 17 Distribution des valeurs de SBW et DBW pour les différents types de route dans le canton du Valais

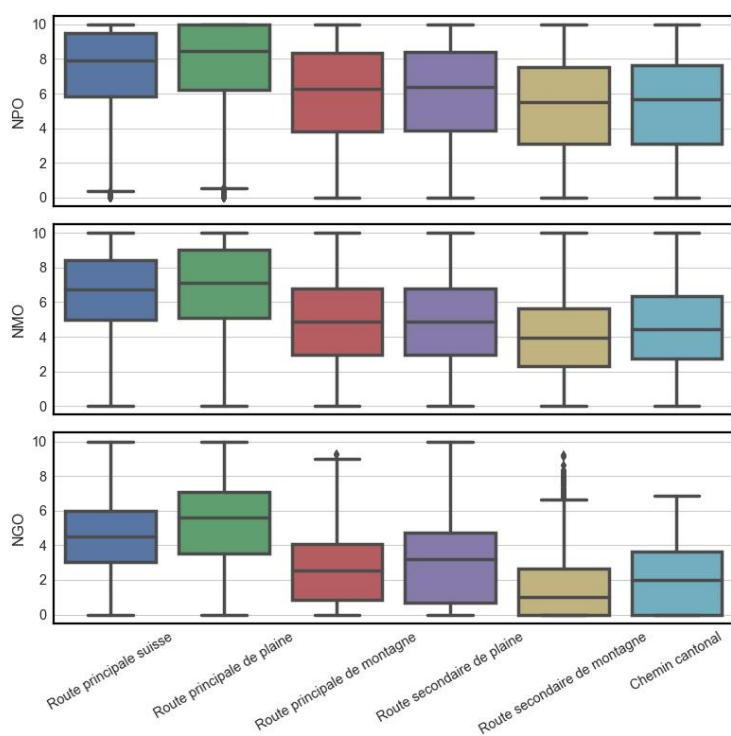


Fig. 18 Distribution des valeurs de NBO pour les différents types de route dans le canton du Valais

3.1.3 Trace de gauche / trace de droite

Cette comparaison n'est faite que sur le réseau valaisan pour lequel le profil longitudinal a été mesuré pour les traces de roues gauche et droite, mais uniquement dans la voie de droite dans le sens positif de l'axe (le profil n'a été mesuré que dans la trace de roue droite sur les autres réseaux).

Le Tab. 9 synthétise les valeurs statistiques concernant les valeurs des indicateurs de la planéité longitudinale pour les traces de roues droite et gauche. Pour l'ensemble des indicateurs (à l'exception de l'écart-type pour le NGO), la valeur moyenne et l'écart type de la trace de roues gauche sont inférieurs à ceux de la trace de roues droite.

Tab. 9 Synthèse des statistiques d'uni longitudinal pour la trace de roue droite et gauche

	Valeur moyenne		% différence	écart type	
	Trace de roue gauche	Trace de roue droite		Trace de roue gauche	Trace de roue droite
Sw	3.4	4.3	21%	2.4	2.9
Wmax	13.7	17.7	23%	11.8	14.9
IRI	2.6	4.3	40%	2.2	2.6
SBW	10.2	12.3	17%	6.4	7.4
DBW	60.5	74.7	19%	44.8	54.3
NPO	6.4	5.6	14%	2.8	3
NMO	5.4	4.5	20%	2.5	2.6
NGO	2.8	2.3	22%	2.5	2.3
EPO	12.8	20.1	36%	27.4	42
EMO	542.7	883.8	39%	2832.1	5367.1
EGO	37986.7	51535.2	26%	89234	129949.2

Une comparaison des différents indicateurs du profil longitudinal relevés sur le réseau cantonal du Valais en fonction de la trace de roues considérée sur la forme de boxplot est présentée dans les figures ci-dessous.

Les Fig. 19 à Fig. 22 montrent la distribution des indicateurs d'uni longitudinal selon qu'ils ont été calculés avec des données relevées dans la trace de droite ou celle de gauche. Ces deux figures confirment que la trace de droite se caractérise par une valeur médiane plus élevée et par une plus grande dispersion des valeurs. Cela signifie que le bord de la chaussée est dans l'ensemble en moins bon état que le centre et justifie la recommandation d'effectuer les mesures dans la trace de droite.

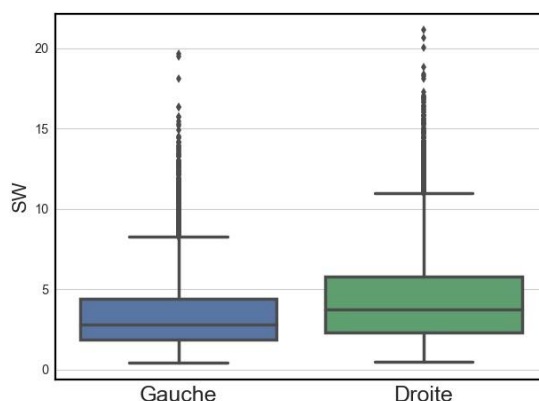


Fig. 19 Comparaison des valeurs de s_w (trace gauche et droite)

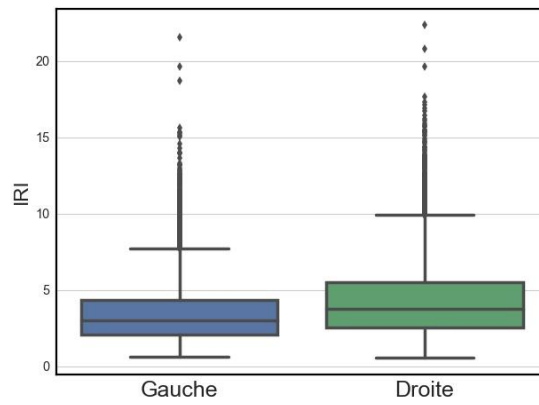


Fig. 20 Comparaison des valeurs d'IRI (trace gauche et droite)

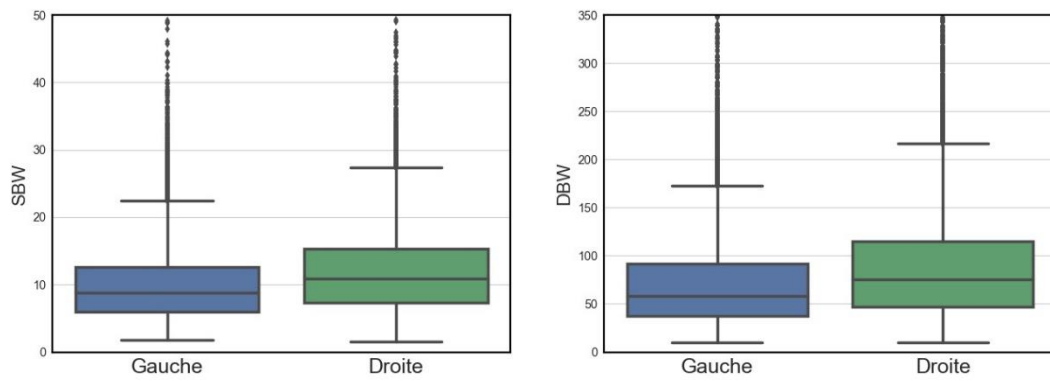


Fig. 21 Comparaison des valeurs de BLP (trace gauche et droite)

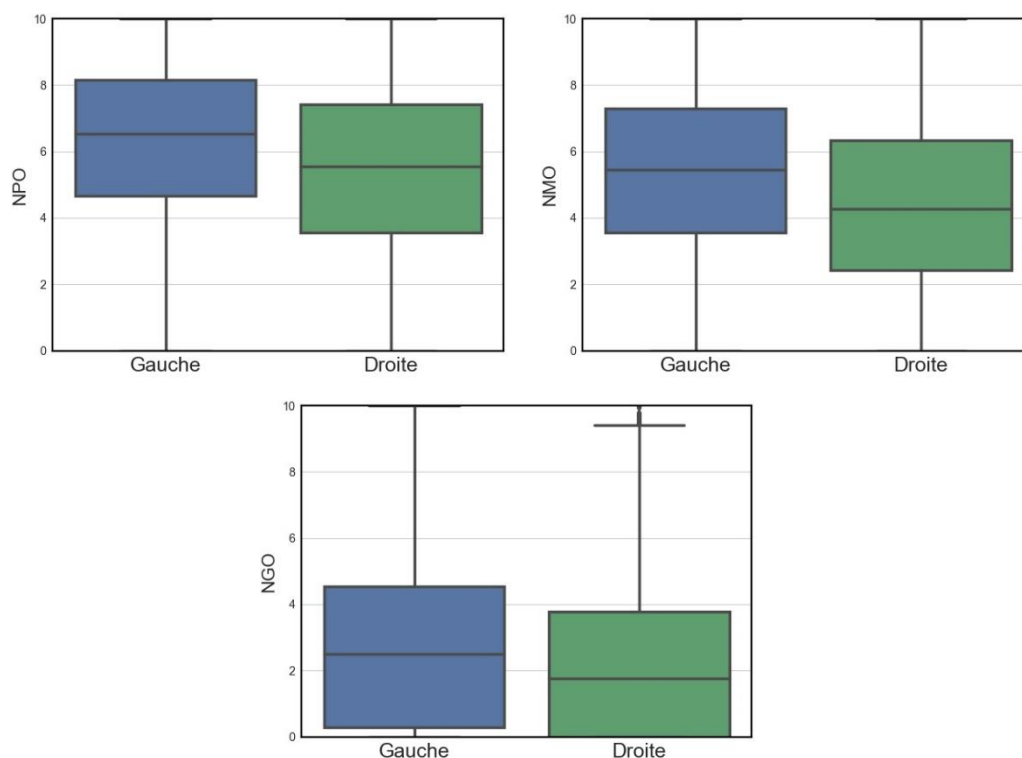


Fig. 22 Comparaison des valeurs de NBO (trace gauche et droite)

3.2 Corrélations entre tous les indicateurs

Ce chapitre est consacré à la comparaison des corrélations entre les indicateurs calculés pour les deux réseaux cantonaux (VS et ZH).

Afin d'effectuer ces corrélations, les valeurs des indicateurs ont préalablement dû être ramenées sur les des tronçons identiques de 100 mètres. Cette longueur correspond à celle utilisée pour la détermination de la plupart des indicateurs (IRI, s_w , Wmax, NMO, SBW et DBW). Chaque NPO étant calculée pour une longueur de 20 mètres, la note associée aux tronçons de 100 mètres correspond à la moyenne des cinq valeurs de NPO obtenues sur les tronçons de 20 mètres. Pour les NGO, qui sont calculées sur des longueurs de 200 mètres, on considère une valeur égale pour les deux tronçons de 100 mètres.

Deux types de matrices de corrélation ont été établis pour les réseaux de VS et ZH (Fig. 23 et la Fig. 24).

Dans la matrice de corrélation de Pearson, les valeurs proches de 1 indiquent une relation linéaire entre les paramètres comparés. Dans les matrices de Spearman, des coefficients de corrélation proches de 1 signifient que les deux paramètres sont corrélés selon le rang des valeurs (classement similaire des données), cette seconde corrélation pouvant être non-linéaire. Concernant les NBO, ce sont les corrélations effectuées à partir des racines cubiques des énergies qui ont donné les résultats les plus probants.

Les matrices de corrélation indiquent :

- La matrice de Pearson montre une forte corrélation linéaire entre le s_w , le IRI et la racine cubique d'EPO. Ces indicateurs sont efficaces pour des faibles longueurs d'onde ;
- La matrice de Pearson, la corrélation linéaire entre le SBW et le IRI est relativement forte ;
- Indépendamment du type d'analyse, la corrélation entre EGO et les autres indicateurs est relativement faible ;

- Selon la matrice de Pearson, une corrélation linéaire entre la valeur de DBW et Wmax est visible dans les matrices de corrélation. Les deux valeurs quantifient les défauts ponctuels ;
- La corrélation entre DBW et les autres indicateurs est en général plus non-linéaire (la corrélation de Spearman est plus marquée que celle Pearson).

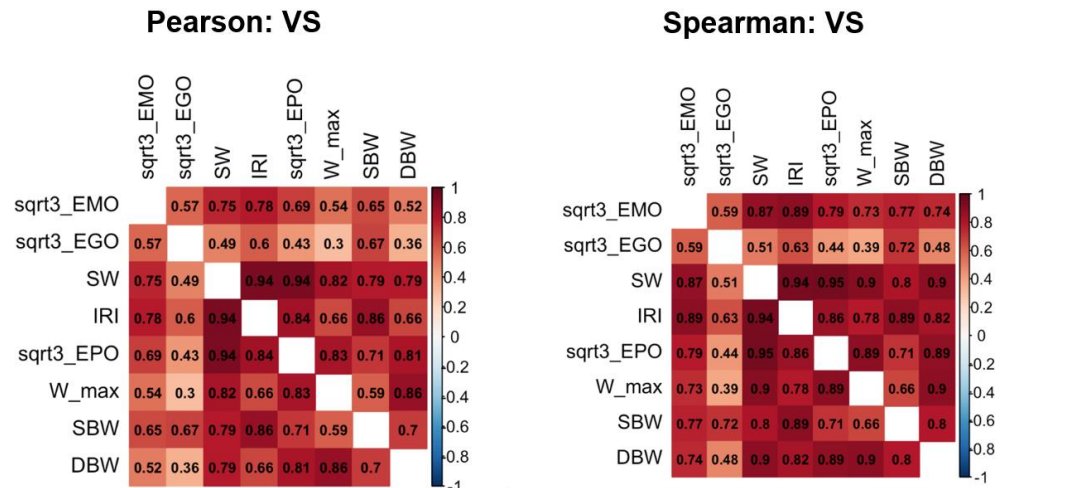


Fig. 23 Matrice de corrélation des indices de l'uni longitudinal (réseau VS)

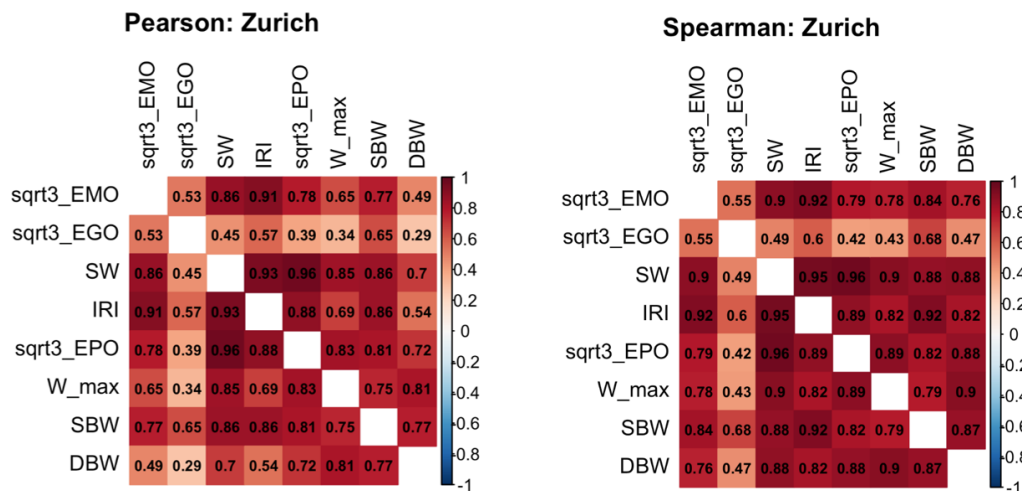


Fig. 24 Matrice de corrélation des indices de l'uni longitudinal (réseau ZH)

On observe tout d'abord que les matrices de corrélation obtenues sont relativement semblables pour les deux réseaux. Si, comme on pouvait s'y attendre, de fortes corrélations sont visibles entre les indicateurs qui privilégient les petites ondes, l'absence de corrélation entre certains indicateurs souligne la nécessité de ne pas se contenter d'un seul de ces indicateurs, mais d'envisager une utilisation combinée des résultats qui peuvent être obtenus à partir de relevés profilométriques.

3.3 Corrélation entre s_w et IRI

Le coefficient de corrélation de Pearson entre le s_w et le IRI est supérieur à 0.9, ce qui indique l'existence d'une corrélation quasi-linéaire entre les valeurs de s_w et IRI.

La Fig. 25 compare les valeurs IRI et s_w des deux réseaux cantonaux (VS et ZH). La droite de régression obtenue a une pente proche de 45° ce qui démontre que les deux valeurs sont quasiment identiques. Les résultats des régressions linéaires pouvant être extraites de ces données (pente a, ordonnées b, corrélation R^2) sont synthétisés dans le Tab. 10.

Les paramètres de régression obtenus sont comparés dans le Tab. 10 avec ceux d'une étude menée aux Etats-Unis en 2001 [29] dans laquelle une analyse similaire a été réalisée sur la base de données de LTPP (Long-term Pavement Performance). La différence entre les régressions provient vraisemblablement de la quantité de données analysées ; dans la présente étude, le nombre des valeurs utilisées pour la régression est d'environ 150'000 (pour les deux cantons) alors que l'étude américaine est basée sur un set de données beaucoup plus restreint (environ 1000 données).

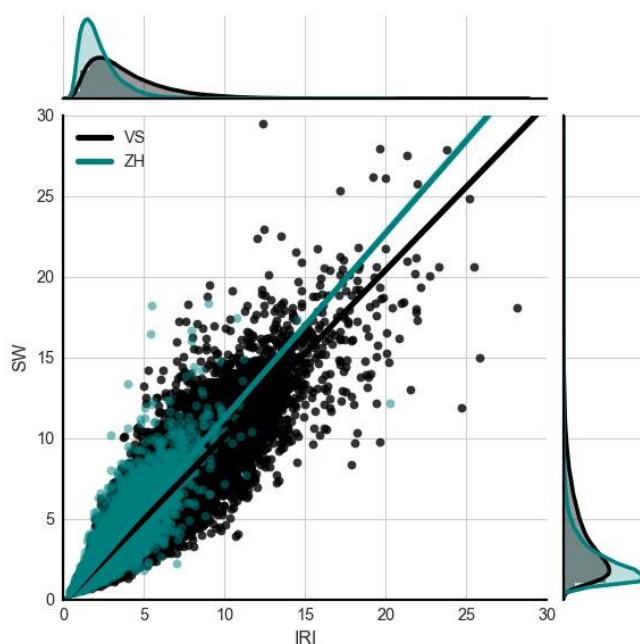


Fig. 25 Corrélation entre IRI et s_w pour réseaux VS et ZH

Tab. 10 Résultats de régression linéaire entre les valeurs de s_w et IRI

	Modèle $s_w = a \cdot IRI + b$		
	a	b	R^2
VS	1.028	-0.178	0.93
ZH	1.136	-0.176	0.92
VS + ZH	1.024	-0.0366	0.93
LTPP	0.7652	-0.0644	0.93

Il convient ici de rappeler que, pour un réseau cantonal, les valeurs s_w sont en général calculées sur des longueurs de 50 mètres. Comme expliqué précédemment, pour pouvoir chercher des corrélations, cet indicateur a été calculé sur la base d'une longueur de 100 mètres. Il apparaît que la qualité des corrélations pouvant être observée varie selon que les résultats obtenus sur les deux secteurs de 50 mètres sont proches ou non : la Fig. 26 illustre la relation entre les valeurs de s_w et IRI en fonction du ratio entre la valeur maximale et minimale de s_w sur deux sections consécutives de 50 m. Les codes de couleur de la Fig. 26 sont définis de la manière suivante :

$$\begin{cases} SW_{50-max}/SW_{50-min} < 1.5 & SW_{ratio} = 0 \\ 1.5 < SW_{50-max}/SW_{50-min} < 3.5 & SW_{ratio} = 1 \\ SW_{50-max}/SW_{50-min} > 3.5 & SW = 2 \end{cases}$$

Où

SW_{50-max} est la valeur la plus grande de s_w et

SW_{50-min} est la valeur la plus petite de s_w entre les deux sections consécutives de 50m

La pente d'une droite de régression de la Fig. 26 est plus élevée pour les points rouges ($SW_{ratio} = 2.0$). Cela signifie que lorsqu'il y a une différence significative entre les deux segments de 50m (par exemple en cas de défauts locaux), l'IRI obtient une valeur plus faible que le s_w . Autrement dit, l'IRI est moins sensible aux défauts locaux. Cela peut être expliqué par le fait que, dans l'algorithme de calcul du IRI, le profil est lissé par une moyenne mobile dont la longueur de base est de 250 mm.

Dans l'optique de la formulation d'exigences pour ces indicateurs, il faut donc garder à l'esprit que si les exigences proposées sont identiques sur les valeurs d'indice s_w et IRI, elles risquent en fait d'être un peu plus sévères pour le s_w , en raison de sa plus grande sensibilité aux défauts locaux.

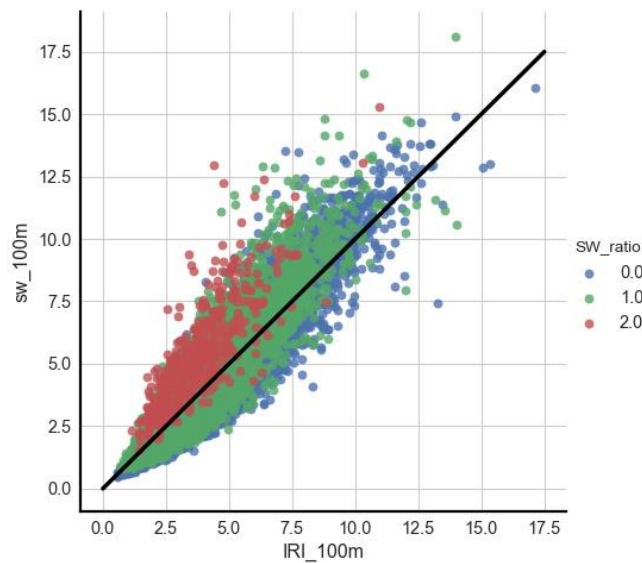


Fig. 26 Corrélation entre IRI et s_w en fonction de leur ratio

4 Valeurs limites

Ce chapitre présente dans un premier temps les valeurs limites utilisées en Suisse d'une part pour la réception des travaux et d'autre part pour la détermination de l'indice de planéité longitudinale I2. Comme il n'existe pas de valeurs limites en Suisse pour tous les indicateurs étudiés, des valeurs limites utilisées dans d'autres pays sont également données. Ces valeurs limites ont été comparées avec les valeurs obtenues en appliquant les différentes méthodes d'exploitation des profils longitudinaux sur différents réseaux.

On a ensuite défini des relations analytiques afin de pouvoir proposer des valeurs limites pour les indicateurs étudiés. Ces valeurs ont finalement été comparées à un set de données limité à des secteurs de routes ayant récemment été l'objet de travaux.

4.1 Valeurs limites existantes

4.1.1 Valeurs limites suisses : réception et indice d'état I2

La norme 640 525 [6] définit pour la planéité longitudinale des exigences à la réception (Fig. 27). Ces exigences varient en fonction de la vitesse de circulation et du nombre de couches bitumineuses renouvelées. Les exigences sont plus sévères pour les vitesses élevées et lorsque plusieurs couches sont remplacées.

Längsebenheit: Abnahmewerte für die Auswertung in Winkelwerte θ und für die Wellenbandanalyse (NBO-Noten)						
Planéité longitudinale: valeurs de réception pour l'exploitation en valeurs d'angle W et pour l'analyse par bandes d'ondes (notes NBO)						
Abnahmewerte Valeurs de réception		Winkelwerte Valeurs d'angle		Wellenbandanalyse NBO Analyse par bandes d'ondes NBO		
Anzahl der erneuerten Schichten Nombre de couches renouvelées	$V_{\max}$	s_w 0,3...6 m	$W_{\max}$ 0,3...6 m	NBO_PO 0,7...2,8 m	NBO_MO 2,8...11,3 m	NBO_GO 11,3...45 m
Neubau oder Gesamterneuerung des Oberbaus Construction nouvelle ou renouvellement complet de la chaussée	> 80 km/h	($\leq 1,4$)	(≤ 10)	≥ 7	≥ 7	$\geq 8^{1)}$
	60...80 km/h	($\leq 1,8$)	(≤ 14)	≥ 7	≥ 7	$\geq 7^{1)}$
	≤ 50 km/h	($\leq 2,2$)	(≤ 14)	≥ 6	≥ 6	—
Deckschichterneuerung Renouvellement couche de roulement	> 80 km/h	$\leq 1,4$	≤ 10	$\geq 6^{2)}$	$\geq 7^{3)}$	—
	60...80 km/h	$\leq 1,8$	≤ 14	$\geq 5^{2)}$	$\geq 6^{3)}$	—
	≤ 50 km/h	$\leq 2,2$	≤ 14	$\geq 5^{2)}$	—	—
Erneuerung von 2 bis 3 Asphaltsschichten Renouvellement de 2 à 3 couches en enrobé bitumineux	> 80 km/h	($\leq 1,4$)	(≤ 10)	$\geq 6^{4)}$	$\geq 7^{4)}$	—
	60...80 km/h	($\leq 1,8$)	(≤ 14)	$\geq 6^{4)}$	$\geq 6^{4)}$	—
	≤ 50 km/h	$\leq 2,2$	≤ 14	$\geq 6^{4)}$	$\geq 6^{4)}$	—

($\leq \dots$) Gültig nur für die kurzen Wellen (PO)
 1) Für Einbaulänge ≥ 1000 m
 2) Maximale Verbesserung der Note mit dem Einbau: + 2
 3) Wenn Note vor Massnahme mindestens gleich hoch ist
 4) Maximale Verbesserung der Note mit dem Einbau: + 3

Tab. 4
Längsebenheit: Abnahmewerte für die Auswertung in Winkelwerte W und für die Wellenbandanalyse (NBO-Noten)

($\leq \dots$) Valable seulement pour les petites ondes (PO)
 1) Pour longueur de pose ≥ 1000 m
 2) Amélioration maximale de la note après pose: + 2
 3) Si note avant travaux au moins égale
 4) Amélioration maximale de la note après pose: + 3

Tab. 4
Planéité longitudinale: valeurs de réception pour l'exploitation en valeurs d'angle W et pour l'analyse par bandes d'ondes (notes NBO)

Fig. 27 Valeurs des exigences suisses pour la réception [6]

Dans la version actuelle de la norme [6], les valeurs limites de réception sont données uniquement pour le s_w et le $W_{\max}$ ainsi que pour les notes par bande d'onde (NBO). Pour s_w et $W_{\max}$, les exigences figurent entre parenthèses car elles ne permettent que de vérifier qu'il n'y a pas de défauts avec des petites ondes.

Quant aux exigences pour les grandes ondes GO, elles ne sont applicables que pour les nouvelles constructions ou le renouvellement complet de la chaussée et seulement pour des poses d'une longueur ≥ 1000 m.

Pour l'évaluation de la planéité longitudinale dans le cadre d'un relevé d'état, la norme suisse 640 925b [2] définit un indice I_2 dont la note (allant de 0 à 5) est calculée à partir de la valeur s_w . La conversion des valeurs de s_w , en note d'indice I_2 s'effectue selon une règle d'évaluation tenant compte du type de route (Fig. 28).

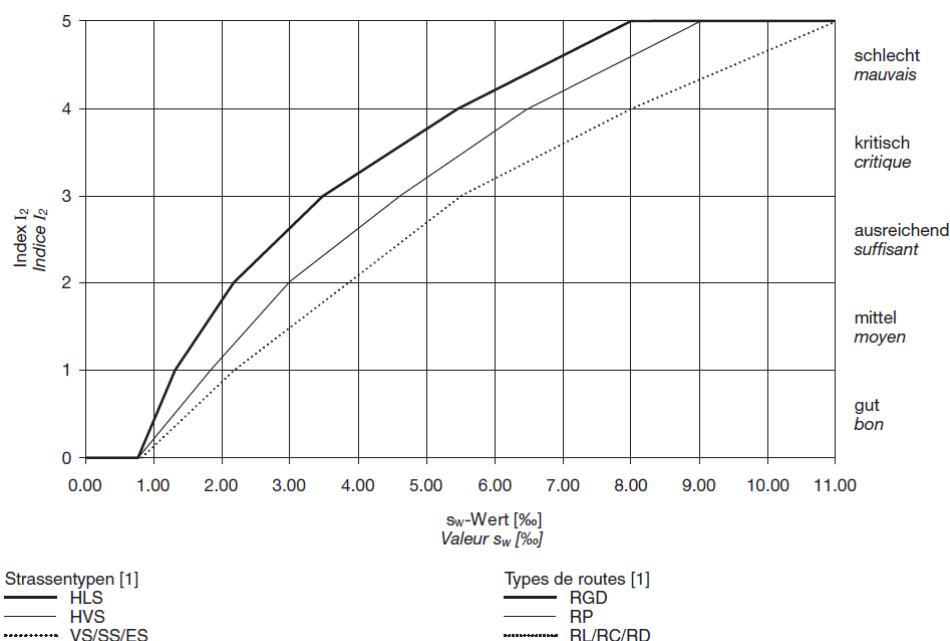


Fig. 28 Transformation de la valeur s_w en indice I_2 [2]

4.1.2 Valeurs limites allemandes

Au moment de la rédaction du présent rapport, et bien que la méthode BLP soit mentionnée comme une technique de mesures [12], aucune exigence n'est donnée en Allemagne [11] pour les indicateurs de BLP, SBW et DBW. En revanche, des exigences pour trois classes de route (FK1 à FK3) y sont données pour les valeurs AUN (voir le Tab. 11).

Tab. 11 Exigences allemandes pour AUN [11]

Grenzwert	valeurs limites	note ZW	AUN (cm3) par classe de route		
			FK1 *	FK2	FK3
Zielwert	valeur objectif	1.5	1	2	4
Warnwert	valeur d'alarme	3.5	3	6	12
Schwellenwert	valeur seuil (critique)	4.5	9	18	36

* FK : Funktionsklasse

Les valeurs limites des indicateurs SBW et DBW pour la méthode BLP peuvent être calculés selon le cahier S73 du BAST [17] (voir aussi chapitre 4.4.1) (Tab. 12).

Le calcul de la note ZW à partir des indicateurs SBW et DBW est donné par la relation suivante, issue de [17] :

$$ZW_{SBW} = \sqrt{2.0 \cdot (SBW - 2.875)}$$

$$ZW_{DBW} = \sqrt{(DBW - 17.25)/3.0}$$

$$ZW = \max (ZW_{SBW}, ZW_{DBW})$$

Tab. 12 Exigences allemandes pour SBW et DBW (FK1) calculées selon [17]

Grenzwert	valeurs limites	note ZW	SBW (mm)	DBW (mm)
Zielwert	valeur objectif	1.5	4	24
Abnahmewert	valeur de réception	2.5	6	36
Gewährleistungswert	valeur de garantie	2.87	7	42
Warnwert	valeur d'alarme	3.5	9	54
Schwellenwert	valeur seuil (critique)	4.5	13	78

4.1.3 Valeurs limites françaises

Les valeurs limites pour la réception sont définies dans le guide sur l'uni longitudinal [14] à partir de notes par bande d'onde (NBO) minimales. Les exigences sont fonction du rôle (roulement, liaison, base, fondation) des couches de structure de la chaussée (Tab. 13).

Tab. 13 Définition des couches de structure de la chaussée selon le guide [14]

N	Couche de roulement			
N-1	Liaison	Base	Liaison	Fondation
N-2	Base	Fondation	Fondation	Forme
N-3	Fondation	Forme	Forme	
N-4	Forme			

Les exigences sont logiquement plus sévères pour les couches bitumineuses supérieures que pour les couches profondes. Elles dépendent de la vitesse de circulation : 90, 110 ou 130 km/h. Elles sont également fonction de l'épaisseur de la couche de roulement, les exigences imposées aux couches profondes étant moins sévères lorsque la couche de roulement a une épaisseur supérieure à 3 cm.

Les valeurs de réception pour une couche de roulement sont données dans la Fig. 29 (épaisseur inférieure à 3 cm) et la Fig. 30 (épaisseur supérieure à 3 cm).

V (km/h)	LONG. D'ONDES	NOTE MINIMALE D'UNI POUR LA COUCHE*				SPÉCIFICATIONS POUR LA COUCHE DE ROULEMENT (N)	
		N-4	N-3	N-2	N-1	Chantier inférieur à 1000 mètres et supérieur à 200 mètres	Lots de 1000 mètres ou incluant extrémité de chantier
90	PO	sans objet	sans objet	≥ 3	≥ 5	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7
	MO	sans objet	≥ 3 S'il s'agit de la couche de forme, sans objet	≥ 4	≥ 6	100 % des notes ≥ 6	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7
	GO	≥ 3	≥ 4	≥ 5	≥ 5	Sans objet	100 % des notes ≥ 5 80 % des notes ≥ 6
110	PO	sans objet	sans objet	≥ 3	≥ 5	100% des notes ≥ 6 90% des notes ≥ 7	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7
	MO	sans objet	≥ 4 S'il s'agit de la couche de forme, sans objet	≥ 5	≥ 7	100% des notes ≥ 7	100 % des notes ≥ 7 90 % des notes ≥ 8
	GO	≥ 5	≥ 6	≥ 7	≥ 7	Sans objet	100 % des notes ≥ 7 80 % des notes ≥ 8
130	PO	sans objet	sans objet	≥ 3	≥ 5	100% des notes ≥ 6 90% des notes ≥ 7	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7
	MO	sans objet	≥ 4 S'il s'agit de la couche de forme, sans objet	≥ 5	≥ 7	100% des notes ≥ 7	100 % des notes ≥ 7 90 % des notes ≥ 8
	GO	≥ 6	≥ 7	≥ 8	≥ 8	Sans objet	100 % des notes ≥ 8 80 % des notes ≥ 9

Tableau 10 : Travaux de construction avec couche de roulement d'épaisseur ≤ 3 cm (ou en B80r)
 * Note minimale équivalant à ce que 100 % des notes soient supérieures à la valeur proposée.

Fig. 29 Exigences françaises pour la réception des couches de roulement minces (≤ 3 cm) [14]

V (km/h)	LONG. D'ONDES	NOTE MINIMALE D'UNI POUR LA COUCHE *				SPÉCIFICATIONS POUR LA COUCHE DE ROULEMENT (N)	
		N-4	N-3	N-2	N-1	Chantier inférieur à 1000 mètres et supérieur à 200 mètres	Lots de 1000 mètres ou incluant extrémité de chantier
90	PO	sans objet	sans objet	≥ 3	≥ 5	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7
	MO	sans objet	sans objet	≥ 3	≥ 5	100 % des notes ≥ 6	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7
	GO	≥ 3	≥ 4	≥ 5	≥ 5	Sans objet	100 % des notes ≥ 5 80 % des notes ≥ 6
110	PO	sans objet	sans objet	≥ 3	≥ 5	100% des notes ≥ 6 90% des notes ≥ 7	100 % des notes ≥ 6 90 % des notes ≥ 7
	MO	sans objet	sans objet	≥ 4	≥ 6	100% des notes ≥ 7	100 % des notes ≥ 7 90 % des notes ≥ 8
	GO	≥ 5	≥ 6	≥ 7	≥ 7	Sans objet	100 % des notes ≥ 7 80 % des notes ≥ 8
130	PO	sans objet	sans objet	≥ 3	≥ 5	100% des notes ≥ 6 90% des notes ≥ 7	100% notes ≥ 6 90% notes ≥ 7
	MO	sans objet	≥ 3 S'il s'agit de la couche de forme, sans objet	≥ 4	≥ 6	100% des notes ≥ 7	100% notes ≥ 7 90% notes ≥ 8
	GO	≥ 6	≥ 7	≥ 8	≥ 8	Sans objet	100% notes ≥ 8 80% notes ≥ 9

Tableau 11 : Travaux de construction avec couche de roulement d'épaisseur > 3
 * note minimale équivalant à ce que 100 % des notes soient supérieures à la valeur proposée.

Fig. 30 Exigences françaises pour la réception des couches de roulement épaisses (> 3cm) [14]

4.1.4 Valeurs limites suédoises

La Suède impose des exigences pour les routes en service à partir des valeurs de l'IRI. Elles dépendent de la vitesse et de la classe de trafic des routes. Ces valeurs sont mesurées dans la trace de roue droite et pour des tronçons de 100m (Fig. 32). Pour la réception des travaux, des exigences supplémentaires sont données pour un tronçon de 400m (Fig. 31). Des valeurs plus sévères sont requises pour des routes à trafic important et avec une vitesse de circulation élevée, pour des raisons de sécurité et de confort de roulement.

Skyltad hastighet	IRI för varje 20m-sträcka	För varje 400m-sträcka	
		Max std-avvikelse	Max medelvärde
VR ≤ 50 km/h, ÅDT _k ≤ 4 000	$x \leq 2,4$	$s \leq 0,7$	$\bar{x} \leq (1,8-0,4s)$
VR 50 km/h, ÅDT _k > 4 000	$x \leq 2,2$		
VR 60 km/h, ÅDT _k ≤ 4 000	$x \leq 2,2$	$s \leq 0,7$	$\bar{x} \leq (1,8-0,4s)$
VR 60 km/h, ÅDT _k > 4 000	$x \leq 2,0$	$s \leq 0,6$	$\bar{x} \leq (1,6-0,4s)$
VR 70 km/h, ÅDT _k ≤ 4 000	$x \leq 2,0$	$s \leq 0,6$	$\bar{x} \leq (1,6-0,4s)$
VR 70 km/h, ÅDT _k > 4 000	$x \leq 1,8$		$\bar{x} \leq (1,5-0,4s)$
VR 80 km/h, ÅDT _k ≤ 4 000	$x \leq 1,8$	$s \leq 0,6$	$\bar{x} \leq (1,5-0,4s)$
VR 80 km/h, ÅDT _k > 4 000	$x \leq 1,7$	$s \leq 0,5$	$\bar{x} \leq (1,4-0,4s)$
VR 90 km/h, ÅDT _k ≤ 4 000	$x \leq 1,7$	$s \leq 0,5$	$\bar{x} \leq (1,4-0,4s)$
VR 90 km/h, ÅDT _k > 4 000	$x \leq 1,5$		$\bar{x} \leq (1,2-0,4s)$
VR 100 km/h, ÅDT _k ≤ 4 000	$x \leq 1,5$	$s \leq 0,5$	$\bar{x} \leq (1,2-0,4s)$
VR 100 km/h, ÅDT _k > 4 000	$x \leq 1,4$	$s \leq 0,4$	$\bar{x} \leq (1,1-0,4s)$
VR 110 km/h, klimatzon 3-5	$x \leq 1,4$	$s \leq 0,4$	$\bar{x} \leq (1,1-0,4s)$
VR 110 km/h, klimatzon 1-2	$x \leq 1,2$		
VR 120 km/h	$x \leq 1,1$	$s \leq 0,3$	$\bar{x} \leq (1,0-0,4s)$

Fig. 31 Exigences sur les valeurs du IRI pour la réception des travaux selon la norme suédoise [10]

Trafik (fordon/dygn)	Skyltad hastighet (km/h)							
	120	110	100	90	80	70	60	50
0-250		$\leq 4,3$	$\leq 4,7$	$\leq 5,2$	$\leq 5,9$	$\leq 6,7$	$\leq 6,7$	$\leq 6,7$
250-500		$\leq 4,0$	$\leq 4,4$	$\leq 4,9$	$\leq 5,5$	$\leq 6,3$	$\leq 6,3$	$\leq 6,3$
500-1000		$\leq 3,7$	$\leq 4,1$	$\leq 4,5$	$\leq 5,1$	$\leq 5,8$	$\leq 5,8$	$\leq 5,8$
1000-2000		$\leq 3,0$	$\leq 3,3$	$\leq 3,7$	$\leq 4,2$	$\leq 4,8$	$\leq 5,2$	$\leq 5,2$
2000-4000	$\leq 2,4$	$\leq 2,6$	$\leq 2,9$	$\leq 3,2$	$\leq 3,6$	$\leq 4,1$	$\leq 4,9$	$\leq 4,9$
4000-8000	$\leq 2,4$	$\leq 2,6$	$\leq 2,9$	$\leq 3,2$	$\leq 3,6$	$\leq 4,1$	$\leq 4,9$	$\leq 4,9$
>8000	$\leq 2,4$	$\leq 2,6$	$\leq 2,9$	$\leq 3,2$	$\leq 3,6$	$\leq 4,1$	$\leq 4,9$	$\leq 4,9$

Fig. 32 Exigences sur les valeurs du IRI pour les routes en service selon la norme suédoise [10]

4.2 Comparaison entre l'état des réseaux et les valeurs limites

Ce chapitre compare les différentes valeurs limites décrites au chapitre 4.1 avec les résultats obtenus au chapitre 3.1.1 à partir des données relevées sur un tronçon de routes nationales (N), sur deux réseaux cantonaux (ZH et VS) et des routes communales (Com).

A noter que cette comparaison est donnée à titre indicatif et qu'elle ne permet pas de juger de la pertinence des valeurs de réception, puisque les valeurs mesurées sur les réseaux ne correspondent pas forcément à des secteurs où des travaux ont été effectués récemment (voir à ce sujet chapitre 0).

4.2.1 Valeurs d'angle s_w et W_{max}

Le Tab. 14 donne les percentiles des valeurs s_w et W_{max} qui correspondent aux exigences de réception (Fig. 27) de la norme suisse [6] pour les réseaux de ZH, VS, N et Com.

Tab. 14 Valeurs de percentile pour les valeurs de réception de s_w et W_{max} selon [6]

V (km/h)	>80	>60 , <80	≤50
s_w	1.4	1.8	2.2
N	65%	79%	87%
ZH	27%	44%	58%
VS	12%	22%	32%
Com	4%	7%	13%
W_{max}	10	12	14
N	88%	91%	94 %
ZH	70%	77%	83%
VS	45%	53%	59%
Com	18%	25%	31%

Ces résultats indiquent que :

- 65% du secteur de routes nationales (N) ont une valeur de s_w inférieure à 1.4 ('exigence la plus sévère pour des vitesses supérieures à 80 km/h). Ce résultat confirme le bon état du secteur de routes nationales (chapitre 3.1.1, plus de 50% du secteur ayant une NPO égale à 10).
- Seul 32% des tronçons du VS respectent l'exigence la moins sévère ($s_w < 2.2$, vitesse max de 50 km/h) pour la réception de travaux (Nous reviendrons sur ce faible pourcentage par le biais d'analyse incluant les types de routes). En revanche, plus de la moitié (58%) des tronçons du ZH respectent cette exigence.
- Les exigences sur W_{max} suivent la même tendance que les celles sur s_w , mais les valeurs d'exigence pour W_{max} sont dans l'ensemble moins pénalisantes que celles sur s_w (ce qui peut signifier qu'il y a peut-être moins de problème de défauts locaux).

Compte tenu des mauvais résultats obtenus en VS par rapport à ZH, on s'est intéressé à la répartition des valeurs de s_w et W_{max} pour les différents types de route du VS (Tab. 15). Comme relevés auparavant (Tab. 14), les valeurs de réception de s_w sont plus pénalisantes que celles de W_{max} . On observe de plus que :

- 61%, resp. 50% des routes principales de plaine ont une valeur de s_w inférieure à 2.2, resp. à 1.8. En revanche, 79% des tronçons de ce réseau ont une valeur de W_{max} inférieure à 14 (l'exigence sur W_{max} est indépendante de la vitesse pour les routes cantonales).
- La grande majorité des routes secondaires de montagne (80%) ont une valeur de s_w supérieure à 2.2 et ne respecte donc pas l'exigence la moins sévère pour cette grandeur.

Tab. 15 Valeurs de percentile pour les valeurs de *sw* et *Wmax* pour les différents types de routes du VS

V (km/h)	>80	>60 , <80	≤50
SW	1.4	1.8	2.2
Route principale suisse	25%	44%	57%
Route principale de plaine	34%	50%	61%
Route principale de montagne	10%	21%	32%
Route secondaire de plaine	10%	21%	32%
Route secondaire de montagne	4%	10%	19%
Chemin cantonal	9%	17%	24%
Wmax	10	12	14
Route principale suisse	66%	72%	78%
Route principale de plaine	68%	74%	79%
Route principale de montagne	44%	52%	58%
Route secondaire de plaine	44%	52%	58%
Route secondaire de montagne	35%	43%	50%
Chemin cantonal	40%	49%	53%

4.2.2 IRI

Le Tab. 16 donne les percentiles qui correspondent aux valeurs limites d'IRI suédoises pour les routes en service (Fig. 32) pour les réseaux de ZH, VS, N et Com.

Tab. 16 Valeurs de percentile pour les valeurs d'IRI

IRI (mm/m)	2.4	3.2	4.2	5.2	6.3	6.7
N	97%	99%	100%	100%	100%	100%
ZH	66%	83%	93%	97%	99%	99%
VS	30%	48%	65%	77%	85%	88%
Com	16%	31%	44%	53%	61%	62%

Alors que la quasi-totalité des tronçons de ZH (93%) ont une valeur d'IRI inférieure à 4.2 mm/m (exigence suédoise pour 1000 à 2000 vhc/j et une vitesse de 80 km/h), seuls 65% des tronçons de VS et 44% des tronçons Com respectent cette même condition. Pour les secteurs de routes nationales étudiés (N), 97% des tronçons respectent l'exigence suédoise la plus sévère de 2.4 mm/m pour les routes en service avec une vitesse de 120 km/h.

La différence assez marquée entre les deux cantons s'explique partiellement par les différents types de routes de VS (Tab. 17) : la planéité des « principales de plaine » et des « principales suisses » est comparable à celle des routes du canton de Zurich. Les résultats soulignent en outre la mauvaise qualité de la planéité longitudinale des routes de montagnes secondaires

Tab. 17 Répartition des valeurs d'IRI pour les différents types de routes du VS

IRI (mm/m)	2.4	3.2	4.2	5.2	6.3	6.7
Route principale suisse	57%	76%	87%	93%	97%	98%
Route principale de plaine	64%	79%	89%	95%	97%	98%
Route principale de montagne	30%	49%	66%	78%	86%	89%
Route secondaire de plaine	31%	50%	67%	79%	88%	90%
Route secondaire de montagne	15%	33%	53%	68%	79%	82%
Chemin cantonal	24%	43%	60%	73%	83%	85%

4.2.3 NBO

Le Tab. 18 et le Tab. 19 permettent de visualiser les percentiles¹ correspondant aux exigences de la norme SN 640 525 [6] pour les NBO (Fig. 27). Selon le Tab. 18:

- Pour les NPO, 88% du secteur de route nationale (N), 70% du réseau zurichois (ZH) et 42% du réseau valaisan (VS) ont des notes supérieures à 7 alors que 40% du réseau communal (Com) a des NPO supérieures à 6, et respectent donc les exigences de réception les plus sévères de la norme SN 640 525 [6].
- Pour les NMO, les pourcentages de notes supérieures à 7 sont de 91% (N), 50% (ZH) et 24% (VS) et de 45 % (notes supérieures à 6) pour le réseau communal (Com)
- Pour les NGO, à l'exception du secteur de route nationale (N) dont 80, resp. 88% des secteurs présente des notes supérieures à 8, resp. à 7, les réseaux cantonaux et communaux ne respectent que très faiblement les exigences NGO. Cette différence considérable sur la note NGO entre les réseaux cantonaux et les routes nationales apparaît aussi par le fait que seulement 5% des tronçons valaisans ont une NGO supérieure à 7 alors que 74% des tronçons de N ont une note supérieure à 9.

Tab. 18 Compléments de percentile pour les notes par bande d'onde

		5	6	7	8	9
NPO	N	96%	93%	88%	80%	67%
	ZH	83%	74%	70%	48%	32%
	VS	64%	54%	42%	30%	19%
	Com	55%	40%	28%	16%	9%
NMO	N	99%	97%	91%	80%	67%
	ZH	80%	66%	50%	36%	23%
	VS	48%	35%	24%	15%	8%
	Com	55%	45%	38%	35%	32%
NGO	N	100%	99%	96%	86%	74%
	ZH	64%	49%	34%	20%	10%
	VS	17%	10%	5%	3%	1%
	Com	37%	28%	25%	23%	22%

¹ Ces tableaux contiennent la valeur du complément des percentiles car les notes NBO élevées correspondent à des routes en bonne état

Tab. 19 Complément de percentile pour les NBO pour les différents types de routes du VS

		5	6	7	8	9
NPO	Route principale suisse	82%	74%	63%	49%	33%
	Route principale de plaine	84%	77%	68%	56%	42%
	Route principale de montagne	64%	53%	41%	29%	18%
	Route secondaire de plaine	65%	54%	43%	30%	18%
	Route secondaire de montagne	56%	44%	31%	20%	10%
	Chemin cantonal	58%	45%	32%	21%	13%
NMO	Route principale suisse	75%	61%	45%	31%	17%
	Route principale de plaine	76%	65%	52%	39%	25%
	Route principale de montagne	48%	35%	23%	13%	7%
	Route secondaire de plaine	48%	35%	22%	11%	5%
	Route secondaire de montagne	34%	21%	11%	5%	2%
	Chemin cantonal	42%	28%	17%	11%	5%
NGO	Route principale suisse	41%	25%	13%	7%	4%
	Route principale de plaine	58%	42%	27%	12%	5%
	Route principale de montagne	13%	6%	2%	1%	0%
	Route secondaire de plaine	22%	12%	5%	2%	1%
	Route secondaire de montagne	4%	1%	0%	0%	0%
	Chemin cantonal	8%	2%	0%	0%	0%

4.2.4 BLP

La norme SN 640 525 [6] ne donnant pas d'exigence pour les indicateurs issus de la méthode BLP (SBW et DBW), on utilise ici trois des cinq valeurs limites (« objectif », « réception », et « critique ») définies en Allemagne pour évaluer les résultats des quatre réseaux étudiés (N, ZH, VS, Com). Le Tab. 20 contient les percentiles correspondant à ces trois valeurs limites (voir Tab. 12).

Pour les valeurs « objectif », 73% du secteur de routes nationales (N) a une valeur de SBW inférieure à 4 mm et 65% une valeur de DBW inférieure à 24 mm. Ces pourcentages se réduisent à 32 % (identiques pour les deux valeurs SBW et DBW) pour le canton de ZH, et à 8, resp. 11 % pour le canton du VS. Ils deviennent extrêmement faibles pour le réseau communal, avec resp. 3 et 4 %.

On observe une tendance générale similaire pour les valeurs limites « réception » (SBW $\geq$ 6mm ou DBW $\geq$ 36mm), avec là aussi des pourcentages très faibles pour le canton du VS et la commune.

Finalement, environ 30% des routes du canton du Valais sont dans un état « critique » (SBW $\geq$ 13mm ou DBW $\geq$ 78mm), contre environ 10% pour le Canton du Zurich (5% pour SBW et 11% pour DBW) et des pourcentages encore plus faibles pour le secteur de routes nationale (0% pour SBW et 4% pour DBW).

Tab. 20 Valeurs de percentile pour les valeurs de BLP

SBW [mm]	4	6	7	9	13
N	73%	91%	95%	98%	100%
ZH	32%	62%	72%	84%	95%
VS	8%	22%	30%	45%	68%
Com	4%	18%	27%	43%	67%
DBW [mm]	24	36	42	54	78
N	65%	80%	85%	90%	96%
ZH	32%	57%	66%	77%	89%
VS	11%	28%	36%	50%	70%
Com	3%	10%	14%	25%	45%

Tab. 21 Répartition des valeurs de SBW et DBW pour les différents types de routes du VS

SBW [mm]	4	6	7	9	13
Route principale suisse	18%	44%	56%	72%	89%
Route principale de plaine	29%	56%	66%	79%	91%
Route principale de montagne	5%	20%	29%	45%	71%
Route secondaire de plaine	7%	23%	33%	50%	73%
Route secondaire de montagne	1%	9%	14%	28%	55%
Chemin cantonal	3%	16%	26%	42%	68%
DBW [mm]	24	36	42	54	78
Route principale suisse	23%	52%	60%	73%	86%
Route principale de plaine	35%	59%	66%	76%	87%
Route principale de montagne	9%	27%	36%	51%	71%
Route secondaire de plaine	11%	30%	38%	51%	70%
Route secondaire de montagne	3%	14%	22%	37%	61%
Chemin cantonal	5%	23%	33%	47%	65%

Une façon particulièrement judicieuse de présenter les résultats d'analyse de la méthode BLP consiste à afficher les deux valeurs obtenues (SBW-DBW) comme abscisse et ordonnée d'un même graphique (voir Fig. 8). Comme mentionné au chapitre 2, les couleurs utilisées sur ces graphiques correspondent aux valeurs seuils recommandées par le Bast [17] pour les autoroutes (voir chapitre 4.1.2). Sur ces représentations (Fig. 33 et Fig. 34), la ligne $DBW \cong 6 \text{ SBW}$ correspond au cas où les points de profil ont une distribution normale et le processus est stationnaire (*i.e.* chaque échantillon des données possède des propriétés statistiques similaires à l'ensemble des données). Plus des points sont décalés vers le haut ($DBW << SBW$), plus le tronçon possède des défauts périodiques. Au contraire, si les défauts sont plus locaux, les points sont décalés vers le bas ($DBW >> SBW$).

Les figures contiennent aussi les valeurs de pourcentage des sections de 100m dont le ratio SBW/DBW est supérieur ou inférieur à 6. Les pourcentages des valeurs hors limites (part des valeurs dans la zone) rouge sont également présentés sur chaque figure.

On voit que, comme dans le Tab. 20, seules 4% des données de réseau N se situent dans la zone rouge. Ce pourcentage est de 15% pour ZH, de 41% pour VS et de 57% pour Com. Bien que les valeurs limites devraient peut-être être différenciées selon les réseaux (celles des figures correspondent à celles présentées au chapitre 4.1.3 pour des autoroutes allemandes), nous pouvons constater que :

- Pour le réseau N, la grande majorité (94%) des points sont situés sous la ligne. Parmi ces points, ceux situés dans la zone rouge (valeur DBW très élevée) correspondent majoritairement à des sections comprenant des joints de pont.
- 81% des points ZH et (86%) de Com se situent eux aussi sous de la ligne, ce qui signifie probablement que, comme pour le réseau N, la majorité des sections critiques de ces deux réseaux sont aussi dues à des défauts locaux.
- Le pourcentage sous la ligne est en revanche sensiblement plus faible en VS (59%).

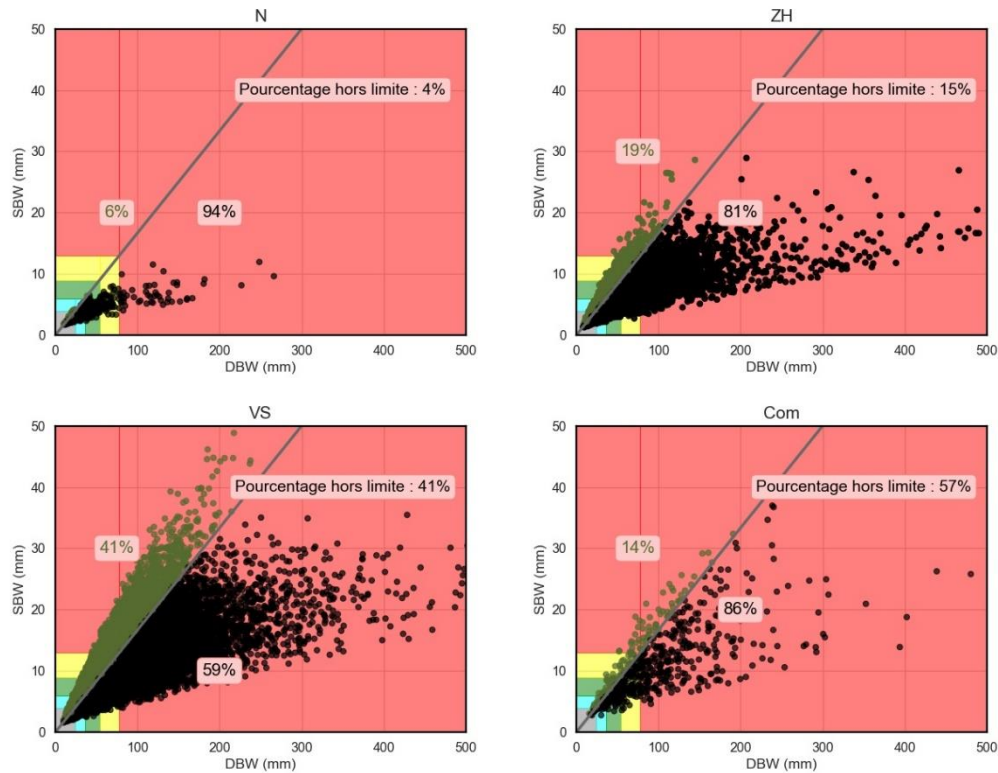


Fig. 33 Représentation combinée des résultats de l'analyse BLP pour les différents réseaux

Des représentations similaires de SBW et DBW pour les différents types de route du VS sont données sur la Fig. 34 sur laquelle on peut voir que :

- Les routes principale suisse et routes principale de plaine n'ont qu'environ 20% (21% et 18%) des sections dans la zone rouge, alors que ce pourcentage est de l'ordre de 40 à 50 % pour les autres types de route.
- En revanche, la répartition des données en-dessus et en-dessous de la ligne reste relativement constante pour les différents types de routes, puisque le ratio reste compris entre 30-40% (resp. 60-70%).

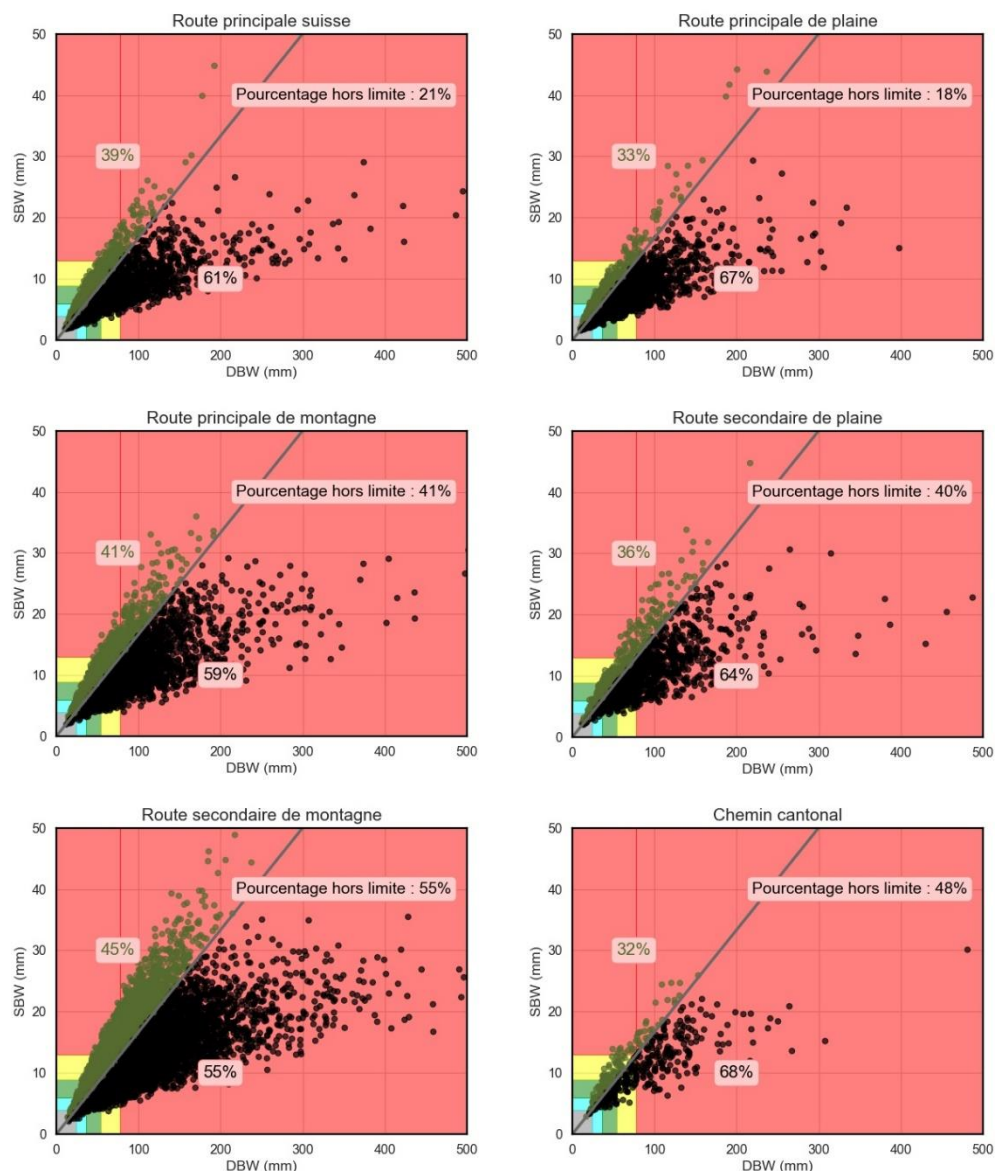


Fig. 34 Représentation combinée des résultats de l'analyse BLP pour les différents types de routes du VS

4.3 Valeurs de réception (après travaux)

Les valeurs de réception des différents indicateurs d'uni longitudinal ont été comparées avec les valeurs mesurées sur des routes ayant été l'objet de travaux récents (moins de 2 ans avant le relevé d'état). Les données analysées correspondent à 138.2 km de routes de VS (années 2013 et 2014) et 137.0 km de routes de ZH (années 2012, 2013, 2014).

Les cantons du VS et de ZH ne répartissent pas leur route selon des catégories similaires.

La répartition des travaux récents selon le type de route est donnée sur la Fig. 35.

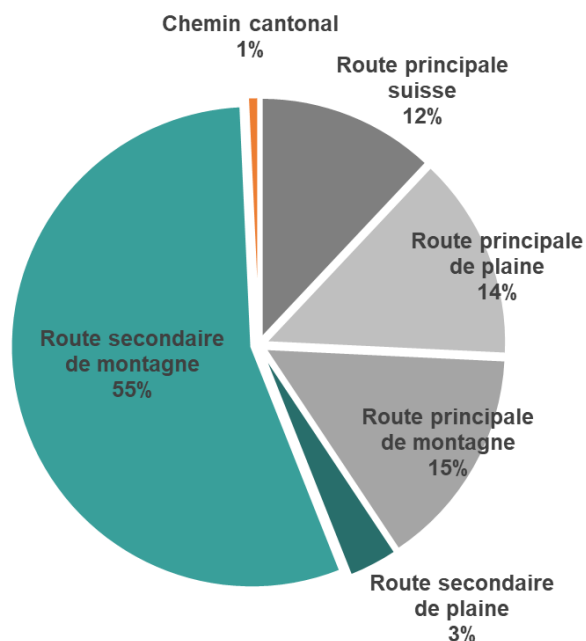


Fig. 35 Répartition des kilométrages des travaux effectués sur les différents type de routes en Valais

Pour le réseau de ZH, deux types de répartition des routes sont donnés sur la Fig. 36.

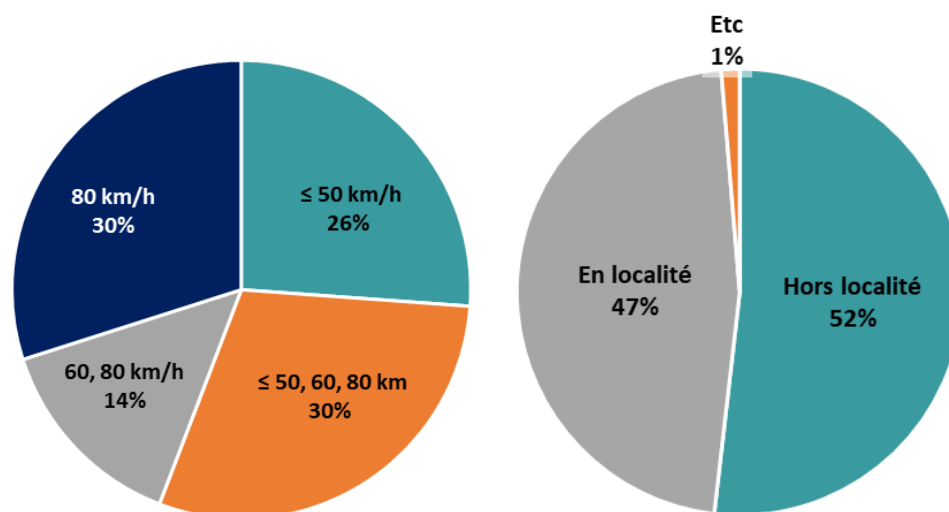


Fig. 36 Répartition des kilométrages des travaux effectués sur les différents types de routes à Zurich (par types des routes et limite de vitesse)

Les valeurs de réception des différents indicateurs ont été choisies de la façon suivante :

- pour les valeurs s_w et W_{max} et les NBO : exigences selon la norme suisse SN 640 525 [6] (voir Fig. 27) ;
- pour les valeurs SBW et DBW (correspondant à la méthode BLP) : exigences sur AUN selon le guide du BAST [17] (voir Tab. 12) ;
- pour le IRI : exigences identiques à celles de s_w , conformément à la corrélation observée au chapitre 3.3. Ces valeurs sont en outre proches des exigences de réception utilisées en Suède (Fig. 31).

Les pourcentages figurant dans les tableaux de ce chapitre correspondent aux percentiles des différentes valeurs limites.

4.3.1 Valeurs d'angle s_w et W_{max}

Les pourcentages des secteurs de route sur lesquels des travaux ont été entrepris il y a moins de 2 ans et dont les valeurs s_w et W_{max} respectent les exigences de réception sont donnés dans le Tab. 22 (VS) et dans le Tab. 23 (ZH).

Tab. 22 Pourcentage des valeurs s_w et W_{max} respectant les exigences de réception selon SN 640 525 [6] (VS)

s_w	1.4 (> 80km/h)	1.8 (60-80km/h)	2.2 (<50km/h)
Route principale suisse	48%	80%	90%
Route principale de plaine	57%	73%	80%
Route principale de montagne	9%	25%	44%
Route secondaire de plaine	2%	15%	30%
Route secondaire de montagne	9%	26%	42%
Chemin cantonal	20%	50%	60%
VS	20%	39%	54%
W_{max}	10 (> 80km/h)	12 (non normalisé)	14 (<50km/h)
Route principale suisse	84%	87%	92%
Route principale de plaine	78%	84%	88%
Route principale de montagne	52%	65%	71%
Route secondaire de plaine	41%	50%	61%
Route secondaire de montagne	57%	68%	75%
Chemin cantonal	90%	100%	100%
VS	62%	72%	78%

En Valais, la répartition des valeurs de s_w et W_{max} (Tab. 22) diffère sensiblement selon le type de routes. Les différences sont conformes à ce qu'on pouvait attendre pour un réseau de ce type :

- les routes principales obtiennent de meilleurs résultats que les routes secondaires
- les routes de plaine obtiennent de meilleurs résultats que celles de montagne
- entre 70 et 80% des routes principales de plaine/suisse remplissent les exigences du s_w pour la réception.
- seuls 30-40% des routes secondaires répondent à l'exigence s_w de 2.2 après les travaux.

Le fait que les routes secondaires valaisannes enregistrent de forts pourcentages de non-respect des exigences s'explique peut-être par le fait que les travaux effectués ne couvrent pas forcément l'ensemble de la surface de la route et par la présence éventuelle de grilles d'évacuation d'eau (ou d'autres éléments influençant le profil longitudinal).

Finalement, on constate que les exigences pour W_{max} sont ici encore systématiquement moins pénalisantes que celles pour s_w .

Tab. 23 Pourcentage des valeurs s_w et W_{max} respectant les exigences de réception selon SN 640 525 [6] (ZH)

s_w	1.4 (> 80km/h)	1.8 (60-80km/h)	2.2 (<50km/h)
80 km/h	54%	75%	84%
60, 80 km/h	67%	84%	89%
60 km/h	27%	42%	61%
≤ 50 km/h, 80 km/h	41%	63%	77%
≤ 50 km/h, 60, 80 km/h	19%	40%	65%
≤ 50 km/h, 60 km/h	41%	54%	73%
≤ 50 km/h	18%	39%	56%
En localité	26%	47%	63%
Hors localité	52%	73%	83%
ZH	39%	59%	73%
W_{max}	10 (> 80km/h)	12 (non normalisé)	14 (<50km/h)
80 km/h	80%	85%	87%
60, 80 km/h	85%	90%	92%
60 km/h	61%	73%	80%
≤ 50 km/h, 80 km/h	72%	78%	86%
≤ 50 km/h, 60, 80 km/h	64%	71%	80%
≤ 50 km/h, 60 km/h	75%	81%	85%
≤ 50 km/h	54%	64%	73%
En localité	60%	70%	78%
Hors localité	79%	85%	88%
ZH	69%	76%	82%

Les valeurs après travaux de s_w et W_{max} pour les routes de ZH (Tab. 23) sont dans l'ensemble meilleures que celles du VS.

- En général, environ 40% des routes de ZH ont une valeur de s_w inférieur à 1.4, alors que ce pourcentage pour VS n'est que de 20% en Valais.
- Le pourcentage des routes conformes à la norme ayant une vitesse autorisée de moins de 50 km/h est inférieur à celui des routes conformes ayant des vitesses plus élevées. Cela s'explique probablement par le fait que ces routes sont souvent situées en localité où l'existence de « défauts » locaux (les grilles évacuation d'eaux, etc) peut affecter la qualité de l'uni longitudinal.
- Probablement pour les mêmes raisons, les résultats des routes hors localité sont meilleurs que ceux des routes en localité pour s_w et W_{max} .

4.3.2 IRI

Les pourcentages des secteurs de route sur lesquels des travaux ont été entrepris il y a moins de 2 ans et dont les valeurs d'IRI respectent les exigences de réception (admises identiques à celles de s_w) sont donnés dans le Tab. 24 (VS) et le Tab. 25 ZH.

- Pour le réseau valaisan, les valeurs de réception admises ici pour le IRI sont généralement plus pénalisantes que les exigences fixées sur la valeur s_w . Cela contredit apparemment ce qui avait été signalé précédemment (chapitre 3.3) concernant la plus grande sensibilité du s_w aux défauts locaux.
- Pour le réseau zurichois, les valeurs de percentiles pour l'IRI sont très proches de celles du s_w .

Tab. 24 Pourcentage des valeurs de IRI respectant les exigences de réception similaires à celle de s_w (VS)

IRI (mm/m)	1.4	1.8	2.2
Route principale suisse	25%	50%	73%
Route principale de plaine	46%	67%	82%
Route principale de montagne	4%	14%	33%
Route secondaire de plaine	0%	4%	15%
Route secondaire de montagne	2%	9%	23%
Chemin cantonal	10%	10%	30%
VS	11%	23%	39%

Tab. 25 Pourcentage des valeurs de IRI respectant les exigences de réception similaires à celle de s_w (ZH)

IRI	1.4	1.8	2.2
80 km/h	54%	75%	87%
60, 80 km/h	71%	88%	94%
60 km/h	27%	45%	69%
≤ 50 km/h, 80 km/h	38%	62%	80%
≤ 50 km/h, 60, 80 km/h	21%	42%	72%
≤ 50 km/h, 60 km/h	38%	61%	77%
≤ 50 km/h	18%	42%	59%
En localité	24%	46%	63%
Hors localité	49%	70%	84%
ZH	40%	62%	77%

4.3.3 NBO

Rappel : une note de 10 correspond à une route en parfait état et une note de 0 à un très mauvais état.

Les pourcentages des secteurs de route sur lesquels des travaux ont été entrepris il y a moins de 2 ans et dont les valeurs de NBO respectent les exigences de réception sont donnés dans le Tab. 26 (VS) et le Tab. 27 (ZH).

Tab. 26 Pourcentage des notes NBO respectant les exigences de réception selon SN 640 525 [6] (VS)

	5	6	7	8
Route principale suisse	99%	96%	92%	84%
Route principale de plaine	96%	95%	91%	82%
Route principale de montagne	92%	83%	64%	45%
Route secondaire de plaine	80%	72%	50%	30%
Route secondaire de montagne	86%	73%	57%	39%
Chemin cantonal	100%	90%	90%	80%
VS	90%	80%	67%	51%
Route principale suisse	95%	91%	76%	54%
Route principale de plaine	86%	82%	73%	56%
Route principale de montagne	68%	47%	26%	13%
Route secondaire de plaine	46%	30%	13%	4%
Route secondaire de montagne	64%	46%	27%	12%
Chemin cantonal	67%	50%	33%	17%
VS	71%	57%	39%	24%
Route principale suisse	37%	20%	6%	1%
Route principale de plaine	73%	50%	36%	15%
Route principale de montagne	14%	5%	1%	0%
Route secondaire de plaine	4%	0%	0%	0%
Route secondaire de montagne	4%	1%	1%	0%
Chemin cantonal	40%	20%	0%	0%
VS	19%	11%	6%	2%

Tab. 27 Pourcentage des notes NBO respectant les exigences de réception selon SN 640 525 [6] (ZH)

	5	6	7	8
80 km/h	97%	95%	91%	81%
60, 80 km/h	99%	98%	95%	83%
60 km/h	92%	88%	74%	47%
≤ 50 km/h, 80 km/h	98%	93%	86%	70%
≤ 50 km/h, 60, 80 km/h	93%	90%	80%	66%
≤ 50 km/h, 60 km/h	97%	96%	90%	70%
≤ 50 km/h	91%	83%	69%	45%
En localité	94%	87%	75%	54%
Hors localité	98%	95%	91%	79%
ZH	95%	90%	82%	64%
80 km/h	91%	87%	78%	63%
60, 80 km/h	98%	94%	84%	73%
60 km/h	86%	66%	50%	36%
≤ 50 km/h, 80 km/h	91%	81%	69%	49%
≤ 50 km/h, 60, 80 km/h	91%	71%	45%	27%
≤ 50 km/h, 60 km/h	95%	74%	60%	46%
≤ 50 km/h	82%	66%	46%	27%
En localité	87%	70%	52%	35%
Hors localité	92%	87%	77%	60%
ZH	89%	78%	64%	48%
80 km/h	71%	55%	43%	26%
60, 80 km/h	78%	68%	55%	34%
60 km/h	69%	50%	34%	15%
≤ 50 km/h, 80 km/h	69%	52%	30%	15%
≤ 50 km/h, 60, 80 km/h	64%	49%	44%	14%
≤ 50 km/h, 60 km/h	72%	56%	32%	13%
≤ 50 km/h	39%	25%	11%	3%
En localité	52%	37%	21%	9%
Hors localité	73%	56%	41%	23%
ZH	60%	45%	30%	16%

Il est possible de faire les observations suivantes :

- Près de 70% des routes VS et 95% des routes ZH ont une note pour les petites ondes (NPO) supérieure à 7 à la réception.
- Environ 30% des routes VS et seulement 11% des routes en ZH ont une NMO inférieur à 5, soit une part non négligeable des zones ayant été l'objet de travaux récents.
- La plupart des routes VS (94%) et de celles de ZH (70%) ne respectent pas les exigences pour les NGO.
- Plus de 70% des routes principales suisse et plaine en Valais ont une NMO supérieure à 7.
- A l'exception des routes secondaires et montagneuses de Valais, plus de 50% des routes ont une note inférieure à 7 pour les NPO et NMO.
- Comme pour tous les autres indicateurs (s_w , IRI, BLP), les valeurs des routes hors localité sont nettement meilleures que celles des routes en localité pour le réseau ZH.

Les faibles pourcentages bas de routes ayant des NGO supérieures à 5 ou 6 montrent le manque de pertinence de cet indicateur pour la réception des travaux : les défauts de longues ondes ne peuvent en général pas être corrigés par le remplacement d'une ou deux couches d'enrobé.

4.3.4 BLP

Les pourcentages des secteurs de route sur lesquels des travaux ont été entrepris il y a moins de 2 ans et dont les valeurs de BLP respectent les exigences de réception (calculées à partir de la valeur AUN) sont donnés dans le Tab. 28 pour VS et le Tab. 29 pour ZH.

Tab. 28 Répartition des valeurs de réceptions (SBW et DBW) (VS)

SBW [mm]	4	6	7	9	13
Route principale suisse	17%	50%	63%	84%	98%
Route principale de plaine	40%	72%	86%	94%	98%
Route principale de montagne	3%	26%	39%	62%	83%
Route secondaire de plaine	2%	17%	24%	48%	76%
Route secondaire de montagne	1%	13%	20%	41%	74%
Chemin cantonal	17%	33%	33%	50%	67%
VS	9%	29%	38%	58%	82%
DBW [mm]	24	36	42	54	78
Route principale suisse	23%	63%	78%	88%	95%
Route principale de plaine	39%	74%	81%	88%	94%
Route principale de montagne	6%	24%	41%	57%	82%
Route secondaire de plaine	0%	15%	22%	37%	63%
Route secondaire de montagne	2%	17%	28%	51%	79%
Chemin cantonal	17%	33%	50%	67%	100%
VS	11%	32%	44%	62%	83%

Tab. 29 Répartition des valeurs de réceptions (SBW et DBW) (ZH)

SBW [mm]	4	6	7	9	13
80 km/h	54%	79%	85%	92%	97%
60, 80 km/h	71%	89%	93%	96%	98%
60 km/h	33%	74%	83%	91%	97%
≤ 50 km/h, 80 km/h	40%	77%	86%	92%	98%
≤ 50 km/h, 60, 80 km/h	25%	68%	85%	90%	99%
≤ 50 km/h, 60 km/h	37%	76%	86%	95%	99%
≤ 50 km/h	26%	59%	73%	87%	97%
En localité	29%	65%	77%	88%	97%
Hors localité	50%	79%	86%	93%	97%
ZH	43%	74%	83%	91%	97%
DBW [mm]	24	36	42	54	78
80 km/h	47%	73%	80%	86%	94%
60, 80 km/h	52%	80%	84%	92%	95%
60 km/h	25%	53%	63%	76%	87%
≤ 50 km/h, 80 km/h	36%	64%	73%	83%	92%
≤ 50 km/h, 60, 80 km/h	22%	44%	56%	76%	89%
≤ 50 km/h, 60 km/h	32%	64%	74%	89%	99%
≤ 50 km/h	16%	42%	53%	73%	89%
En localité	21%	48%	57%	76%	90%
Hors localité	42%	69%	77%	85%	93%
ZH	35%	62%	70%	82%	92%

Il est possible de faire les observations suivantes :

- Les valeurs de réception du BAST [17] pour les valeurs de SBW et DBW sont respectivement de 6 et 36 mm. Seules environ 30% (29 et 32) des routes VS respectent ces valeurs à la réception, ce qui est très faible. Les pourcentages sont sensiblement plus élevés (74 et 62%) sur les routes ZH.
- En Valais, environ 60% (58 et 62) des routes présentent des résultats inférieurs aux valeurs d'alarme (9 et 54 mm), alors que ces pourcentages sont supérieurs à 80% (91 et 82%) à Zürich.
- Les exigences fixées par le BAST [17] sont a priori très (trop) sévères pour les routes valaisannes.

4.4 Calcul de valeurs limites à partir de la Densité Spectrale de Puissance (DSP)

Des relations analytiques entre les différents indicateurs des quatre méthodes étudiées et la valeur de DSP (voir chapitre 2.5) peuvent être exploitées pour calculer des valeurs limites communes.

4.4.1 Calcul des valeurs BLP à partir de la DSP

La norme ISO [8] utilise la Densité Spectrale de Puissance (DSP) pour classer les routes en fonction de leur uni longitudinal. La Fig. 37 propose une estimation linéaire (trait rouge) de la DSP calculée (trait noir).

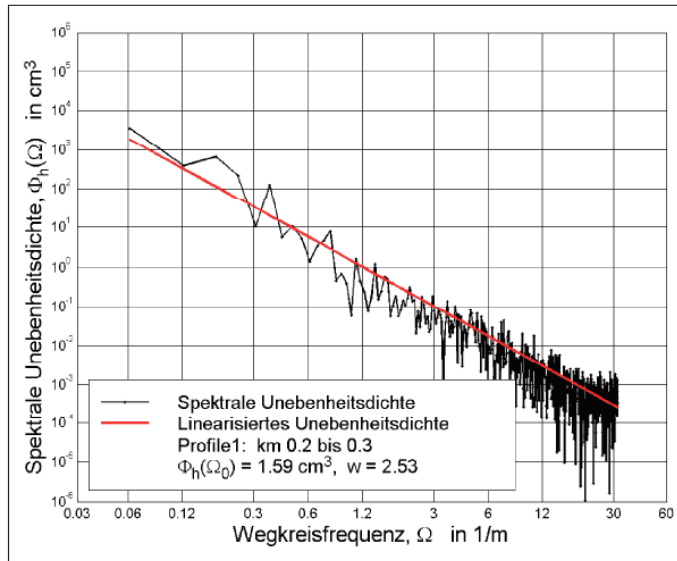


Fig. 37 Exemple d'estimation de DSP avec la formule simple [17]

Les valeurs limites de SBW peuvent être calculées à partir l'équation suivante [17]:

$$SBW^2 = \frac{AUN \cdot \Omega_0^w}{(w-1)(2\pi)^{w-1}} (L_{max}^{w-1} - L_{min}^{w-1})$$

Les paramètres w , L_{min} et L_{max} dépendent du type de réseau. Dans les calculs suivants, la valeur de w (waviness) a été admise égale à 2.6, ce qui correspond à la valeur utilisée dans la norme européenne [1]. La valeur de L_{min} a été admise égale à 0.5 (valeur recommandée selon [1]) alors que L_{max} vaut 50 mètres. Ces paramètres, toutefois peuvent être différents selon les différents types de routes. L'effet des différents paramètres a été étudié par la Bast [17].

Dans le cas d'un profil stationnaire Gaussien (i.e. sans les défauts locaux), la valeur DBW peut être obtenue à l'aide de la relation suivante :

$$DBW = 6 \cdot SBW$$

Ces formules permettent de calculer les valeurs correspondant aux différentes classes de routes d'après ISO (Tab. 30) :

Tab. 30 Valeurs de SBW et DBW correspondantes au classement d'ISO

Classe de routes	AUN Range (cm ³)	AUN Moyenne géométrique (cm ³)	SBW (mm)	DBW (mm)
A	< 2	1	4.0	24.0
B	2-8	4	8.0	48.0
C	8-32	16	17.0	102.0
D	32-128	64	33.0	198.0
E	128-512	256	66.0	396.0
F	512-2048	1024	133.0	798.0
G	2048-8192	4096	266.0	1596.0
H	> 8192	16384	532.0	3192.0

Cette classification aboutit à des valeurs parfois (classe de route E à H) très élevées pour les indicateurs de SBW et DBW, des valeurs qui ne correspondent en rien à celles qui ont été relevées sur les réseaux étudiés au chapitre 4.1.2.

Une étude réalisée en 2018 concernant cette classification [31] a révélé que les classes de route D à H correspondent généralement à des routes non-revêtues. Cette étude donne également les vitesses maximales recommandées de chaque classe pour garantir la sécurité (Tab. 31).

Tab. 31 Vitesse maximale recommandée [31]

Class des routes ISO	A	B	C	D	E
AUN (cm3)	1	4	16	64	256
Vmax (km/h)	> 100	> 100	~ 59	~15	~4

Il ressort de ces différents éléments que les routes suisses appartiennent majoritairement aux classes A à C.

Pour rappel, selon le guide du « BAST » [17] pour la méthode allemande, les valeurs limites pour la méthode BLP sont les suivantes :

Tab. 32 Valeurs limites de SBW et DBW selon la norme allemande [17]

Valeurs limites		AUN (cm3)	SBW (mm)	DBW (mm)
Zielwert	Valeur objectif	1	4	24
Abnahmewert	Valeur de réception	2	6	36
Gewährleistungswert	Valeur de garantie	3	7	42
Warnwert	Valeur d'alarme	5	9	54
Schwellenwert	Valeur seuil	10	13	78

w=2.6 et L_{min} et L_{max} sont 0.3 et 50 m.

Les valeurs objectifs (Zielwert) de SBW et DBW correspondent à une classe de route A selon ISO, alors que les valeurs d'alarme (Warnwert) et de seuil (Schwellenwert) sont toutes deux situées sous la limite de la classe C.

4.4.2 Calcul des valeurs du IRI à partir de la DSP

L'indicateur d'IRI peut lui aussi être calculé à partir des valeurs de la DSP avec la formule ci-dessous ([25], [26] et [17]) :

$$IRI = S_0 \sqrt{(2\pi)^{-1} AUN \Omega_0^w v^{w-3} \int H_{IRI}^2(\omega) \omega^{2-w} d\omega}$$

Avec $H_{IRI,v}$ la fonction de transfert de modèle de quart de véhicule normalisé selon [19] (« Golden Car »), représentée dans la Fig. 38, dont les paramètres proviennent du modèle « quart de véhicule » présentés au chapitre 2.2.

Les valeurs d'IRI calculées avec l'équation ci-dessus sont représentées sur la Fig. 39.

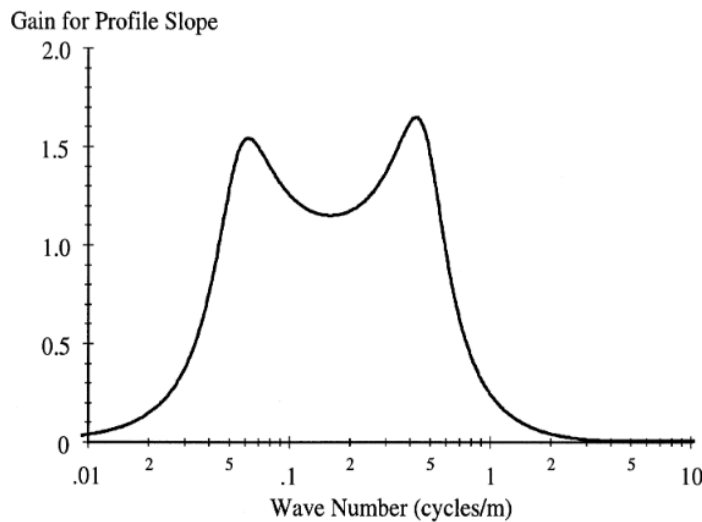


Fig. 38 Fonction du transfert du « Golden Car » [30]

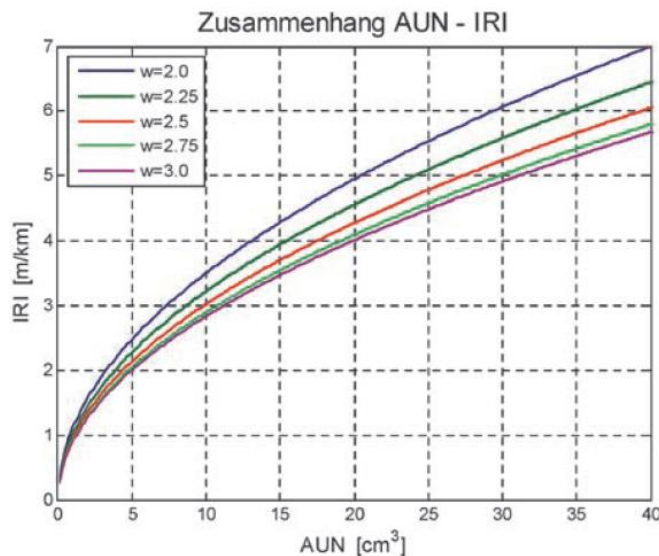


Fig. 39 IRI en fonction d'estimations de DSP [17]

Il est alors possible de déterminer des valeurs de l'IRI pour les valeurs limites allemandes en utilisant les valeurs AUN correspondantes (Tab. 33).

Tab. 33 Valeurs d'IRI correspondant à chaque valeur limite

Valeurs limites	AUN (cm3)	IRI (m/km)
Zielwert	1	1.1
Abnahmewert	2	1.5
Gewährleistungswert	3	1.8
Warnwert	5	2.1
Schwellenwert	10	3.1

w = 2.6

La valeur d'IRI obtenue pour la réception (Abnahmewert) est similaire à celles utilisées en Suède et correspond aussi plus ou moins à celle utilisée pour s_w .

Pour les autres valeurs, les résultats sont un peu plus restrictifs que ceux utilisés en Suède pour des routes en service ; la valeur d'alarme (Warnwert) est atteinte pour un IRI de 2.1 m/km, une valeur plus restrictive que la plus sévère des exigences suédoises (valeur de 2.4 m/km dans le cas le plus contraignant >8000 vhc/j et vitesse de 120 km/h, soit le cas d'une autoroute).

4.4.3 Calcul des EBO et des NBO à partir de la DSP

D'après la théorie de Parseval, l'énergie correspondant à chaque bande de longueurs d'onde (EBO) est la somme des puissances de la densité spectrale (DSP) dans les fréquences considérées :

$$EBO = \int_{l_1}^{l_2} DSP \cdot dl ;$$

$$EBO = \int_{l_1}^{l_2} \Omega_0 \cdot \Omega^{-w} \cdot d\Omega$$

A l'aide de cette relation, et de façon similaire à ce qui a été fait pour le IRI, il est alors possible d'établir les valeurs d'EBO correspondant aux cinq valeurs limites utilisées en Allemagne (Tab. 34).

Tab. 34 Valeurs d'EBO et NBO calculées pour chaque valeur limite

Valeurs limites	AUN (cm3)	EPO (cm3)	EMO (cm3)	EGO (cm3)	NPO	NMO	NGO
Zielwert	1	2.89	27.0	248.0	7.6	10.0	10.0
Abnahmewert	2	5.79	54.0	496.0	6.0	9.0	10.0
Gewährleistungswert	3	8.68	81.0	743.0	5.1	8.1	10.0
Warnwert	5	14.5	135.0	1240.0	4.0	7.0	9.8
Schwellenwert	10	28.9	270.0	2480.0	2.4	5.4	8.2

w = 2.6

Les valeurs d'énergie pour les ondes moyennes (EMO) et grandes (EGO) ainsi que les notes NMO et NGO correspondantes sont extrêmement sévères par rapport aux valeurs obtenues sur les différents réseaux suisses (chapitre 4.1.1) et aux exigences fixées en France. En particulier, pour NGO, environ 25% du réseau N, environ 90% du réseau ZH et la totalité du réseau VS dépasserait la valeur seuil critique (Schwellenwert), ce qui paraît excessif. De plus, des notes de 10 seraient alors exigées pour trois premières valeurs limites des NGO.

Cette différence provient vraisemblablement du fait que le paramètre w (i.e. la puissance utilisée pour l'estimation de la DSP) n'est pas constant pour toutes les longueurs d'onde. Ceci conduit à une sous-estimation de l'énergie des grandes ondes. Il est possible d'obtenir une approximation plus précise avec l'équation suivante :

$$\begin{cases} AUN \cdot \Omega^{-w_1} & \Omega < \Omega_n \\ AUN \cdot \Omega^{-w_2} & \Omega \geq \Omega_n \end{cases}$$

La norme BSI [9] définit la valeur $(1/(2\pi))$ pour Ω_n comme égale à. Cette même norme définit des valeurs de w_1 et w_2 égales à 3, resp. 2. Pour les réseaux suédois, Andrén [26] propose une valeur Ω_n de 0.82 cycle/m et une valeur $w_2 = 1.4$.

Le Tab. 35 indique les valeurs limites de NBO estimées à partir des valeurs DSP en utilisant l'équation ci-dessus et les valeurs retenues par Andrén [27] pour le réseau suédois. Les résultats semblent plus cohérents que ceux de la première estimation (Tab. 34) puisqu'ils correspondent mieux aux valeurs de réception de la norme suisse (qui sont elles-mêmes fortement inspirées des expériences françaises) et aux valeurs mesurées sur les réseaux suisses étudiés.

Tab. 35 Valeurs d'EBO calculés pour chaque valeur limite de DSP (estimation affinée)

Valeurs limites	AUN (cm3)	EPO (cm3)	EMO (cm3)	EGO (cm3)	NPO	NMO	NGO
Zielwert	1	3.71	59.91	958.17	7.0	8.8	10.0
Abnahmewert	2	7.43	119.83	1916.35	5.5	7.3	8.8
Gewährleistungswert	3	11.14	179.74	2874	4.6	6.4	7.9
Warnwert	5	18.57	299.57	4790.87	3.4	5.2	6.8
Schwellenwert	10	37.15	599.15	9581.74	1.9	3.7	5.2

Une investigation plus détaillée de la définition des valeurs d'estimation de DSP serait requise afin d'estimer avec plus de précisions les valeurs limites pour les différents indicateurs.

4.4.4 Synthèses des valeurs limites obtenues à partir de la DSP

Les différentes valeurs limites calculées à l'aide des relations analytiques présentées dans les chapitres précédents sont résumées dans le Tab. 36. Ce tableau comprend aussi les valeurs limites pour s_w obtenues en appliquant les corrélations observées au chapitre 3.2.

Tab. 36 Synthèse des valeurs limites calculées à partir de la DSP

		AUN	SBW	DBW	IRI	SW	EPO	EMO	EGO	NPO	NMO	NGO
Valeurs limites	ZW	(cm3)	(mm)	(mm)	(m/km)		(cm3)	(cm3)	(cm3)			
Zielwert	1.5	1	4	24	1.1	1.1	3.7	59.9	958.2	7.0	8.8	10.0
Abnahmewert	2.5	2	6	36	1.5	1.5	7.4	119.8	1916.3	5.5	7.3	8.8
Gewährleistungswert	2.87	3	7	42	1.8	1.8	11.1	179.7	2874.0	4.6	6.4	7.9
Warnwert	3.5	5	9	54	2.1	2.1	18.6	299.6	4790.9	3.4	5.2	6.8
Schwellenwert	4.5	10	13	78	3.1	3.1	37.1	599.1	9581.7	1.9	3.7	5.2

4.5 Application des valeurs limites obtenues à partir de la DSP

Afin de vérifier la pertinence des valeurs limites obtenues dans le chapitre précédent, l'état d'uni longitudinal du tronçon des routes nationales N (60 km), des réseaux cantonaux de VS et ZH et le réseau Com ont été classés selon les valeurs limites établies au chapitre précédent pour les différents indicateurs étudiés. L'échelle de notation appliquée reprend les valeurs limites du Tab. 36 et distingue cinq classes d'état. Les valeurs moyennes des indicateurs et des notes sont données dans le Tab. 37 alors que la répartition en classes d'état des quatre réseaux pour chaque indicateur est représentée dans la Fig. 40.

Tab. 37 Valeurs moyennes des notes (ZW)

	Indicateurs (valeurs moyennes)						
	sw	IRI	NPO	NMO	NGO	SBW	DBW
N	1.4	1.2	9.0	9.1	9.3	3.6	36.4
ZH	2.4	2.2	7.3	7.0	5.8	6.0	52.9
VS	3.9	3.9	5.9	5.0	2.6	10.9	79.6
Com	4.9	4.6	5.1	4.0	2.6	11.4	99.1

Notes moyennes colorées selon les valeurs limites du Tab. 36							
	sw	IRI	NPO	NMO	NGO	SBW	DBW
N	1.4	1.0	0.1	0.6	2.2	0.5	1.3
ZH	2.8	2.7	0.8	2.0	3.5	1.7	2.3
VS	3.6	3.8	1.7	3.1	4.3	3.1	3.3
Com	4.0	4.0	2.1	3.5	4.3	3.2	3.7



Fig. 40 Analyse de l'état de planéité des réseaux N, ZH, VS et Com en appliquant les valeurs limites calculées à partir de DSP

Ces représentations permettent de constater que :

- L'hypothèse d'égalité des échelles de s_w et IRI est valable puisque les quatre réseaux montrent quasiment la même répartition pour ces deux indices. Les parts d'état >4.5 , au-delà de la valeur critique allemande (Schwellenwert), sont légèrement plus importantes pour s_w , cet indicateur étant plus sensible aux défauts locaux (chapitre 3.3).
- Les notes moyennes pour les EPO sont plus favorables que celles du s_w et du IRI. Il est donc probable que les limites proposées pour EPO à partir de la DSP dans le Tab. 36 ne sont pas suffisamment sévères. Elles sont par ailleurs moins strictes que celles utilisées en France.
- Près de 80% du réseau VS dépasse la valeur critique (>4.5) pour l'indicateur EGO. Pour ce type de réseau cantonal composé en majorité de routes de montagne, les exigences sur les valeurs d'EGO sont vraisemblablement trop sévères. Il n'y a par contre aucun tronçon N qui atteint ce seuil, et environ 25% pour ZH. Ces résultats remettent en question la pertinence des analyses des grandes ondes sur les réseaux autres que ceux des routes nationales.
- Globalement, les échelles proposées permettent d'illustrer de manière représentatives l'état des quatre réseaux, comparativement aux observations faites dans l'analyse statistique des données de chaque réseau (chapitre 3.1.1) On montre clairement que le réseau des routes N est nettement en meilleur état que celui du canton ZH, qui lui-même comporte moins de défauts de planéité que le réseau du canton VS.

4.6 Valeurs limites recommandées

Les valeurs limites utilisées pour la détermination des indices d'état la norme suisse [2] ont été récapitulées au chapitre 4.1.1. Elles se basent uniquement sur l'indicateur s_w . La nouvelle norme suisse pour les exigences [6] fixent des valeurs pour la réception des travaux à partir de s_w et de W_{max} , ainsi que pour les notes par bande d'onde (NBO). Dans ce chapitre, deux approches ont été appliquées pour proposer des échelles d'évaluation pour les nouveaux indicateurs d'uni longitudinal introduits dans les normes suisses [5] et qui font référence à la norme européenne [1] :

Proposition a :

L'échelle basée sur les valeurs de s_w est utilisée afin de calculer des valeurs de percentile pour les différentes notes (i.e. 0 à 5). Ensuite, les valeurs limites sont choisies pour tous les autres indicateurs (à l'exception de DBW pour lequel on calcule la valeur à partir de la relation $DBW = 6SBW$) afin d'aboutir à des valeurs de percentile similaires à celles issues de s_w . On a finalement calculé les valeurs d'AUN à partir de SBW (voir le chapitre 4.4.1) afin de définir les classes de route ISO correspondante [8] (voir Tab. 38).

Proposition b :

On choisit des valeurs d'AUN pour les différentes valeurs limites sur la base des classes de route ISO (classes A à C pour $v > 50 \text{ km/h}$ et classes A à D pour $V < 50 \text{ km/h}$). Ensuite les valeurs de SBW sont calculées analytiquement selon la démarche du chapitre 4.4.1. Les valeurs de percentile obtenues à partir des limites sur SBW servent finalement à définir les valeurs limites des autres indicateurs (toujours à l'exception de DBW) (voir Tab. 39).

Les résultats sont présentés dans le Tab. 38 (proposition a) et le Tab. 39 (proposition b). Conformément à la norme suisse [2], des échelles d'évaluation distinctes sont données pour trois catégories de routes. Les percentiles des différentes échelles sont calculés à partir des données suivantes :

- RGD ($V > 80 \text{ km/h}$) : Réseau N et ZH
- RP ($V < 80 \text{ km/h}$ et $V > 60 \text{ km/h}$) : Réseau ZH et VS
- RL/RC/RD ($V < 50 \text{ km/h}$) : Réseau VS et Com

Conformément à ce qui se fait avec s_w , les valeurs de réception pour les différentes catégories de routes correspondent à un indice I2 égal à 1 (en gris dans les tableaux).

Tab. 38 L'échelle d'évaluation des indicateurs d'uni longitudinal (proposition a)

Note	SW	W	IRI	NPO	NMO	NGO	SBW	DBW	AUN	Classe ISO
RGD (V > 80 km/h)										
0	0.8	2.9	0.8	10.0	10.0	10.0	2.3	13.6	0.3	A
1	1.4	5.1	1.4	8.9	8.9	8.0	3.7	22.1	0.8	A
2	2.2	10.1	2.1	6.8	6.7	6.1	5.5	33.0	1.8	A
3	3.5	17.7	3.1	4.5	4.7	4.1	8.5	51.1	4.2	B
4	5.5	30.2	4.6	2.4	3.0	2.1	13.0	77.7	9.7	C
5	7.9	49.1	6.4	0.6	1.2	0.0	19.7	118.0	22.4	C
RP (V < 80 km/h & > 60 km/h)										
0	0.8	2.8	0.9	10.0	10.0	10.0	2.4	14.2	0.35	A
1	1.8	7.2	1.8	7.9	7.7	6.6	4.9	29.2	1.4	A
2	3.0	14.6	3.0	5.5	5.3	4.1	8.2	49.4	3.9	B
3	4.6	24.8	4.3	3.5	3.5	2.2	12.3	73.6	8.8	C
4	6.4	35.9	5.9	2.0	2.1	0.8	16.4	98.7	15.7	C
5	9.3	54.8	8.5	0.3	0.4	0.0	23.1	138.8	32.1	D
RL/RC/RD (V < 50 km/h)										
0	0.9	2.8	1.0	10.0	10.0	9.5	2.7	16.0	0.4	A
1	2.2	9.2	2.4	7.1	6.6	4.6	6.9	41.5	2.8	B
2	3.8	19.1	3.8	4.6	4.2	2.6	11.1	66.4	7.1	B
3	5.5	29.3	5.2	2.9	2.7	1.2	14.7	88.4	12.6	C
4	8.1	45.5	7.6	1.0	1.0	0.0	20.6	123.8	24.7	C
5	10.7	62.8	9.9	0.0	0.0	0.0	26.6	159.7	41.1	D

Tab. 39 L'échelle d'évaluation des indicateurs d'uni longitudinal (proposition b)

Note	SW	W	IRI	NPO	NMO	NGO	SBW	DBW	AUN	Classe ISO
RGD (V > 80 km/h)										
0	0.8	2.7	0.8	10.0	10.0	10.0	2.3	13.8	0.3	A
1	1.6	6.4	1.6	8.2	8.2	7.3	4.2	25.2	1.0	A
2	2.4	10.7	2.2	6.5	6.4	5.7	5.9	35.4	2.0	B
3	3.4	17.5	3.1	4.7	4.8	4.2	8.3	49.8	4.0	B
4	5.0	29.2	4.2	2.9	3.4	2.6	11.7	70.2	8.0	B
5	6.8	46.3	5.6	1.3	2.0	1.0	16.6	99.4	16.0	C
RP (V < 80 km/h & > 60 km/h)										
0	0.8	2.6	0.8	10.0	10.0	10.0	2.3	13.8	0.3	A
1	1.9	7.7	1.9	7.6	7.4	6.4	5.1	30.6	1.5	A
2	3.0	14.7	3.0	5.4	5.3	4.1	8.3	49.8	4.0	B
3	5.0	27.1	4.6	3.1	3.2	1.9	13.1	78.6	10.0	C
4	6.3	35.0	5.8	2.1	2.2	0.9	16.1	96.6	15.0	C
5	9.1	53.7	8.4	0.4	0.5	0	22.8	136.8	30.0	C
RL/RC/RD (V < 50 km/h)										
0	0.8	2.3	0.8	10.0	10.0	10.0	2.3	13.8	0.3	A
1	2.3	9.7	2.5	6.9	6.4	4.4	7.2	43.2	3.0	B
2	4.1	20.9	4.0	4.3	3.9	2.3	11.7	70.2	8.0	B
3	6.1	32.9	5.8	2.3	2.2	0.8	16.1	96.6	15.0	C
4	8.2	46.0	7.7	1.0	0.9	0	20.8	124.8	25.0	C
5	11.1	66.6	10.3	0	0	0	27.9	167.3	45.0	D

Les valeurs limites obtenues pour l'IRI sont similaires à celles issues de s_w , ce qui confirme les corrélations du chapitre 3.3. Leur ordre de grandeur pour les valeurs de réception (note égale à 1 correspondent de plus aux valeurs utilisées actuellement

Pour les deux propositions, les valeurs de réception obtenues pour les notes par bande d'onde (NBO) sont légèrement différentes de celles de la norme suisse [6]. Contrairement à ce qui figure actuellement dans la norme suisse (NPO et NMO supérieures à 7 et NGO supérieure à 8), les exigences à la réception proposées ici sont systématiquement plus sévères pour les petites et les moyennes ondes (NPO et NMO) que pour les grandes ondes (NGO). On obtiendrait en effet pour les routes principales les valeurs arrondies suivantes :

- Proposition a : $NPO \geq 9$ $NMO \geq 9$ et $NGO \geq 8$
- Proposition b : $NPO \geq 8$ $NMO \geq 8$ et $NGO \geq 7$

On observe une tendance similaire (NPO et NMO plus sévères que NGO) pour les autres types de route, avec des valeurs limites logiquement moins sévères que pour les routes principales. Les valeurs de NBO proposées ici sont en outre différentes et plus sévères que celles calculées analytiquement (chapitre 4.4.4, Tab. 36), puisqu'elles correspondent à des autres valeurs AUN.

En Allemagne, la valeur de réception pour SBW est de 6 (et par conséquent de 36 pour DBW) ce qui correspond à une valeur AUN de 2 cm³. Les valeurs de réception proposées ici pour les RGD et les RP sont donc légèrement plus sévères que les exigences allemandes. Les valeurs critique et alerte pour RGD restent en revanche très proches des valeurs allemandes.

En général, les valeurs limites des deux propositions sont relativement proches. Elles correspondent à des classes de routes selon ISO quasiment identiques. Comme signalé au Tab. 31 du chapitre 4.4.1, des vitesses maximales sont associées aux classes de routes

de l'ISO. Si les classes A et B peuvent sans autre supporter des vitesses supérieures à 100 km/h, il n'en va pas de même pour les autres. Cela signifie que des mesures administratives (signalisation ou limitation de la vitesse) lorsque les notes correspondant aux classes C ou D viennent à être atteint sur des secteurs de route.

5 Détection de défauts de surface à partir des indicateurs d'uni longitudinal

Les indicateurs de planéité longitudinale peuvent être utilisés pour détecter certains défauts de la surface de la chaussée. Ce chapitre propose une liste non exhaustive des défauts de surface pouvant être repérés à l'aide d'une analyse de la planéité longitudinale, tout en précisant les indicateurs qui permettent de les identifier. La démarche permettant d'aboutir à la détection de défauts est ensuite illustrée à partir de quelques exemples concrets extraits des données analysées.

5.1 Types de défauts de surface selon leur fréquence d'occurrence

Selon le guide français [15], les défauts de surface peuvent être classés selon leur fréquence d'occurrence :

- **Défauts aléatoires** : Ces défauts apparaissent dans une large gamme de longueurs d'onde, allant des petites ondes (0.5 à 2 m) jusqu'aux grandes ondes (3 à 35 m). Les gammes de longueur d'onde influençant les utilisateurs de la chaussée routière sont indiquées dans la Fig. 41.

Effect of Roughness		Roughness Wavelength Classification, metres				
Frequency Band Hz	Wave- Band metres	Very Short 0-0.5	Short 0.5-2	Medium 2-3	Long 3-35	Very Long 35-100
Road Damage (Axle Hop) 8-18	1.5-3.5					
(Body Bounce) 1-4	7-28					
Cargo Damage 3-7	4-9.3					
Driver's Disorder 2-10	2.8-14					
Ride Quality 3-8	3.5-9					

Fig. 41 Les longueurs d'onde affectant les utilisateurs de route à 100 km/h [28]

Défauts périodiques : Il s'agit de défauts qui se répètent avec une certaine fréquence. Ces défauts sont souvent liés à des problèmes lors de la construction de la chaussée.

Selon [15], ce sont souvent des problèmes de matériel ou de guidage lors de la mise en œuvre des matériaux bitumineux qui peuvent générer des défauts périodiques. Le compactage peut également être à l'origine de tels défauts.

Les défauts périodiques ne sont généralement pas visibles avec l'analyse par bande d'onde (NBO) car, étant très localisés, ils ne génèrent pas d'importantes énergies (intégrale du profil). Les longueurs d'onde de ces défauts n'entrent non plus pas toujours dans les bandes de longueur d'onde évaluées par s_w ou par l'IRI. En revanche, l'indice SBW de la méthode BLP est capable de détecter ces défauts.

Les guides français [14][15] proposent une analyse de la densité spectrale de puissance du signal (DSP) pour mettre en évidence ces types de défaut. Ces guides recommandent d'appliquer la méthode DSP par fenêtres glissantes (au sujet de laquelle on trouve des informations dans [14]). Ajoutons toutefois que pour pouvoir évaluer des défauts périodiques avec la DSP, les tronçons analysés doivent atteindre une longueur minimale (200 m d'après [15]).

La Fig. 42 illustre un cas de défauts périodiques relevés sur une couche de base en ACT. La norme suisse n'impose pas d'exigences pour les couches de base (exigences uniquement au niveau de la réception couche de roulement). Néanmoins, le guide français [14] préconise que les valeurs de NBO à la réception de la couche posée avant la couche de roulement doivent être supérieures à 5 pour une vitesse de circulation de 90 km/h. Nous pouvons ainsi constater que plusieurs valeurs de NPO sont inférieures à 5, de même que deux secteurs de 100m pour la NMO (entre km 12'700 et 12'900). La courbe de DSP de ce tronçon (au bas de la Fig. 42) fait apparaître également très clairement la présence de ce défaut périodique, dont la longueur d'onde est d'environ 2 m et qui est vraisemblablement dû à la pose. De plus, sur la représentation graphique de DBW-SBW, les points se situent majoritairement au-dessus de la ligne, ce qui est caractéristique de défauts périodiques (voir Chapitre 2.4).

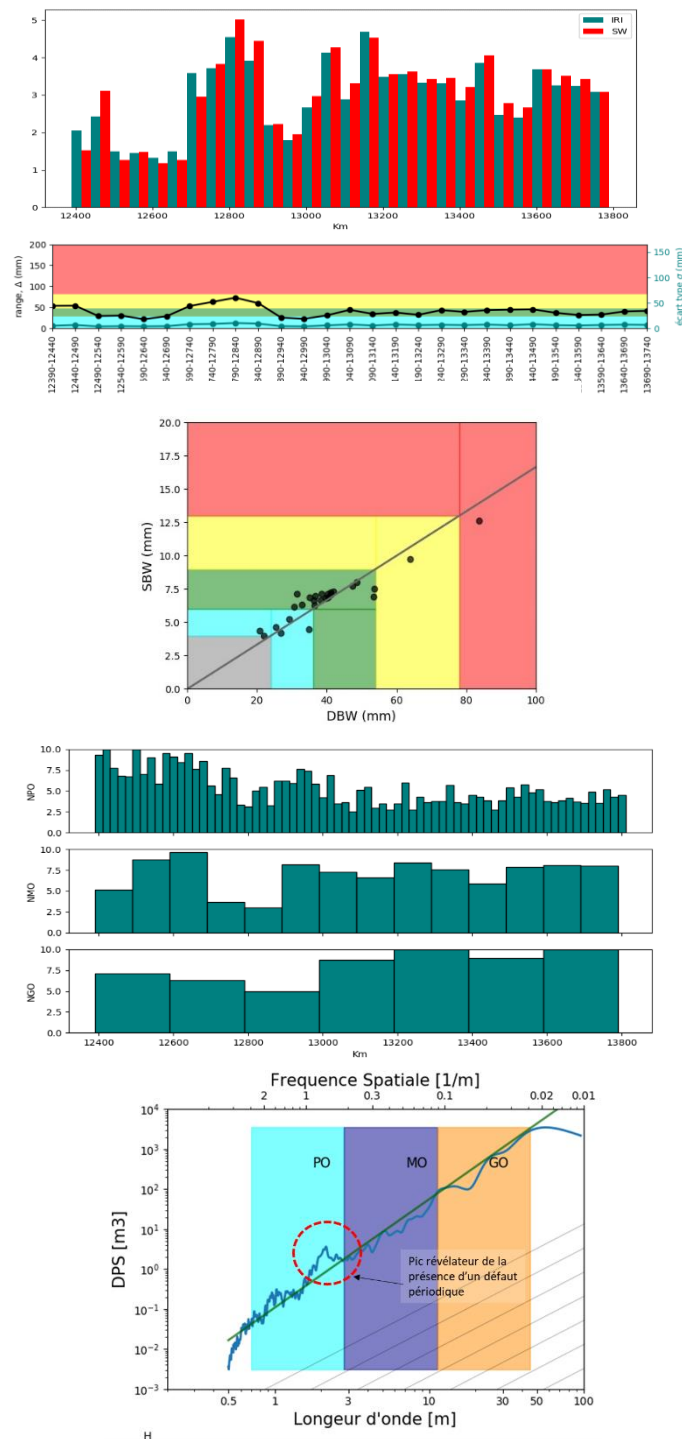


Fig. 42 Mise en évidence de défauts périodiques dus à la construction

Défauts ponctuels : Ces défauts se caractérisent par leur apparition irrégulière sur la chaussée et se situent généralement dans le domaine des petites ondes (0.7-2.8 m) [15]. Les joints des ouvrages d'art et les nids-de-poule sont des exemples de ce type de défaut. L'arrêt prolongé du finisseur ainsi que les joints de reprise peuvent créer des défauts ponctuels pendant la construction.

Comme ces défauts se situent principalement dans le domaine des petites ondes, l'indice NPO de la méthode NBO est souvent capable de les détecter. L'indice DBW de la méthode BLP est aussi adapté pour mettre en évidence les défauts ponctuels. Enfin, comme cela a été relevé précédemment (chap. 3.3), l'indice s_w est plus sensible aux défauts ponctuels que l'indice IRI.

Comme nous allons le montrer à travers quelques exemples, les défauts de l'uni longitudinale aléatoires, périodiques ou ponctuels peuvent traduire la présence de dégradations de surface dont l'origine peut être structurelle :

- **Défauts liés à un manque de portance** : la mauvaise qualité d'une couche de base/fondation (faible portance, irrégularités, etc) peut être mise en évidence par une analyse de l'uni longitudinal. Ces défauts ayant généralement une longueur d'onde relativement élevée, ils sont donc plutôt repérables avec les indices de NMO et NGO. Les indices de la méthode BLP (SBW et DBW) sont également capables d'identifier ces types de défauts, mais avec une sensibilité plus faible que les NMO et NGO.
- **Fissures** : les fissures qui apparaissent à la surface de la chaussée ont souvent une courte longueur d'onde. L'indice de NPO de la méthode française ainsi que l'indice SBW de la méthode BLP sont plus sensibles à ce type de défauts de surface. Ces défauts sont en général un peu moins visibles avec le s_w ou le IRI.

5.2 Exemple à travers des cas concrets

La détection de défauts de surface à l'aide des indicateurs de planéité longitudinale étudiés est illustrée par quelques cas concrets issus des données relevées en 2016 dans le canton du Valais. Six tronçons ont été identifiés sur la base des différents indicateurs d'uni longitudinal, dont les valeurs moyennes et critiques ont été calculées (Tab. 40). Les valeurs moyennes sont calculées pour chaque indicateur sur la longueur totale de chaque tronçon. Les valeurs critiques figurant dans la deuxième partie du tableau sont les valeurs maximales pour les indicateurs de s_w , Wmax, IRI, SBW et DBW et les valeurs minimales pour les notes françaises (NPO, NMO et NGO) enregistrées sur le tronçon.

Tab. 40 Tronçons étudiés et valeur moyenne des indicateurs par tronçon (Canton du Valais, 2016)

Tronçon	Valeur moyenne							
	IRI	SW	Wmax	NPO	NMO	NGO	SBW	DBW
1	1.9	2.5	24.3	8.8	7.7	4.9	7.2	101.6
2	1.6	1.9	24.6	8.0	9.3	7.7	6.1	133.4
3	1.5	1.4	8	9.5	7.6	6.1	9.8	39.4
4	2	2.7	15.3	5	8.5	10	8.7	92.5
5	9.8	10.2	44.3	1.2	0.3	0.4	23.2	188.9
6	3.2	2.7	12.6	7.4	4.8	1.1	11.2	58.7
	Valeur critique (minimum ou maximum)							
	IRI	SW	Wmax	NPO	NMO	NGO	SBW	DBW
1	2.27	3.7	45.59	0	6.7	4.9	8.5	177.4
2	1.6	1.9	24.6	3.3	9.3	7.7	6.1	133.4
3	1.5	1.4	8	6.4	7.6	6.1	9.8	39.4
4	2	2.7	15.3	3.9	8.5	10	8.7	92.5
5	14.2	13.0	79.9	0	0	0	32.4	310.4
6	3.7	4.1	17.1	3.8	3.4	1.0	15.3	68.7

5.2.1 Tronçon 1 : Défaut ponctuel : joint de pont

Sur ce tronçon de 200 m, le défaut se manifeste par une valeur moyenne de DBW de 101.6 mm (Tab. 40), nettement supérieure aux valeurs limites utilisées en Allemagne (voir chapitre 5.1.2). La valeur de W_{max} (24.3) est également nettement supérieure à l'exigence pour la réception ($W_{max} \leq 14$) de la norme suisse [6].

Le profil relevé et le profil pondéré (Fig. 44) montrent clairement la présence sur ce tronçon d'une irrégularité ponctuelle. Cette dernière résulte de la présence d'un joint de pont qui est à l'origine des importantes valeurs de DBW et de W_{max} .

La Fig. 45 montre les valeurs de DBW et SBW des deux tronçons de 100 mètres pris en compte dans ce cas : un des points est clairement situé dans la zone révélatrice de défauts locaux en bas à droite du graphique (voir Chapitre 2.4).

Ajoutons finalement que la NPO calculée du tronçon de 20 m où est situé ce joint est égale à zéro (très mauvais). Cette valeur locale n'a toutefois que peu d'influence sur l'ensemble du tronçon de 100 mètres, les autres valeurs de NPO sur ce tronçon étant très élevées. Dans ce cas, la valeur moyenne de NPO considérée sur l'ensemble du tronçon ne permet pas de détecter ce défaut local. Cela souligne l'importance d'utiliser les longueurs de 20 mètres pour les analyses NBO.



Fig. 43 Vue du défaut ponctuel (joint de pont) sur le tronçon 1

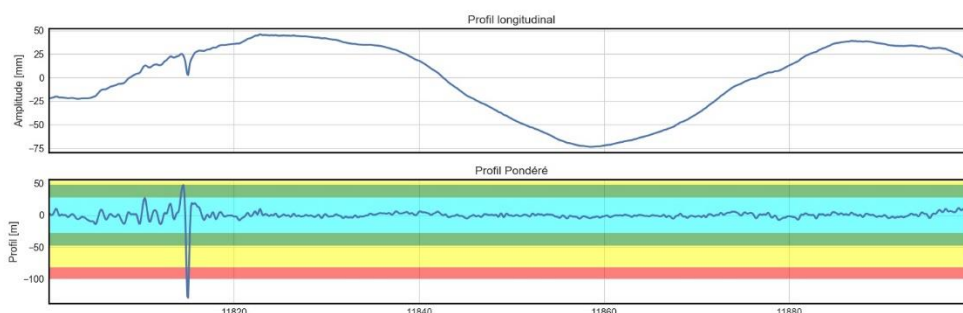


Fig. 44 Pondération du profil avec la méthode BLP (Tronçon 1)

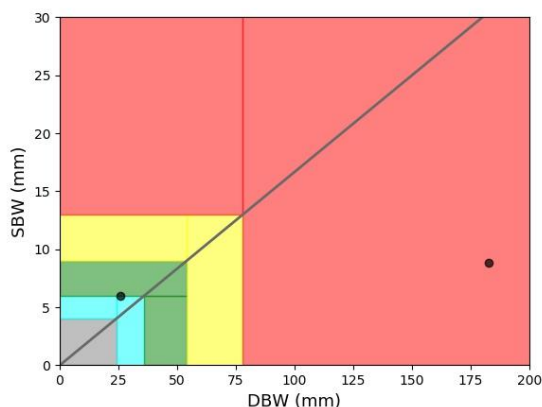


Fig. 45 Représentation combinée des résultats de l'analyse BLP (Tronçon 1)

5.2.2 Tronçon 2 : Défaut ponctuel : réparation sur une fouille

Ce deuxième exemple concerne un tronçon de 100 m et est comparable en bien des aspects au précédent, avec la présence d'un défaut très localisé, ici une réparation (fouille) qui semble s'affaisser (Fig. 46). La valeur DBW de 133.4 mm est plus élevée. La valeur moyenne de NPO de ce tronçon est similaire à celle du cas précédent. Il n'obtient pas de mauvais résultats pour les valeurs moyennes de NBO. Cependant, la note minimum de NPO sur le tronçon de 20 m où la fouille est située est 3.3, c'est qui est une valeur critique.

La représentation du profil et du profil pondéré selon la méthode BLP (**Fig. 47**) indique que le défaut localisé a une longueur d'onde et une amplitude légèrement moins importante que dans le cas précédent.



Fig. 46 Présence des fouilles de réparation sur le tronçon 2

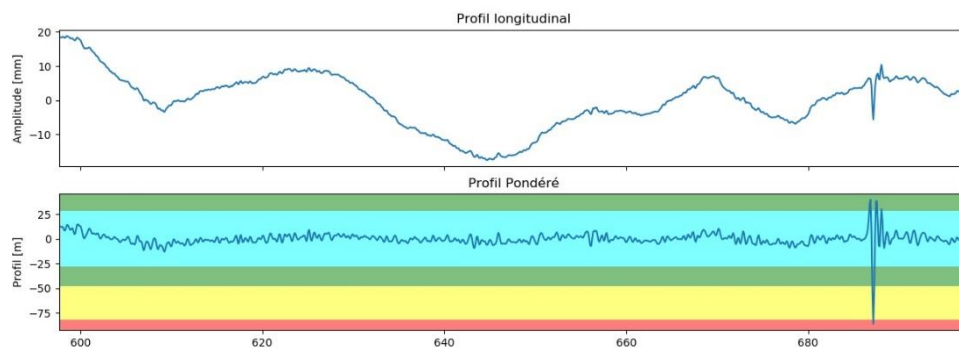


Fig. 47 Pondération du profil avec la méthode BLP (Tronçon 2)

5.2.3 Tronçon 3 : Défaut périodique

Les deux valeurs SBW et DBW issues de la méthode BLP pour ce tronçon de 100m sont alarmantes, avec respectivement 9.8 et 39.4, alors que les notes NBO et les indicateurs s_w et IRI sont relativement bons. Sur les prises de vues de ce tronçon (Fig. 48), aucun défaut structural n'est visible à la surface de la chaussée. Cela explique très certainement les bonnes valeurs de s_w , IRI et NBO.

Le profil pondéré (Fig. 49) révèle la présence d'un défaut périodique (sinusoïdal). Ce défaut périodique a une longueur d'onde d'environ de 60 m sur le profil original et 30 m sur le profil pondéré, comme cela apparaît également sur la représentation de la DSP (Fig. 51). Néanmoins, quoique faible, la note de 6.1 obtenue par ce tronçon pour les NGO reste satisfaisante pour ce type de route.

En effet, selon le guide français [15], l'indicateur de NBO est incapable de repérer les défauts périodiques de la chaussée. Dans ce cas, le guide recommande d'appliquer la méthode de DSP (chapitre 0) afin de repérer ce type de défaut. Cette adaptation de la méthode DSP peut s'avérer utile pour détecter des zones avec des défauts sinusoïdaux, à condition que le secteur avec ce défaut soit suffisamment long (i.e. environ 20 fois plus long que la longueur d'onde du défaut). Ainsi, pour pouvoir détecter un secteur avec un défaut périodique d'une longueur d'onde de 30 m, une longueur de secteur d'au moins 600 m serait idéalement nécessaire. Dans le cas présent, le secteur analysé est trop court (100 m) pour que la méthode DSP soit concluante, ce qui explique aussi que les notes NBO obtenues soient relativement satisfaisantes.

Sur la représentation combinée des résultats (SBW et DBW) de l'analyse BLP (Fig. 50), le point est situé au-dessus de la courbe diagonale, ce qui confirme plutôt la présence d'un défaut périodique sur la chaussée.



Fig. 48 L'état de surface du tronçon 3

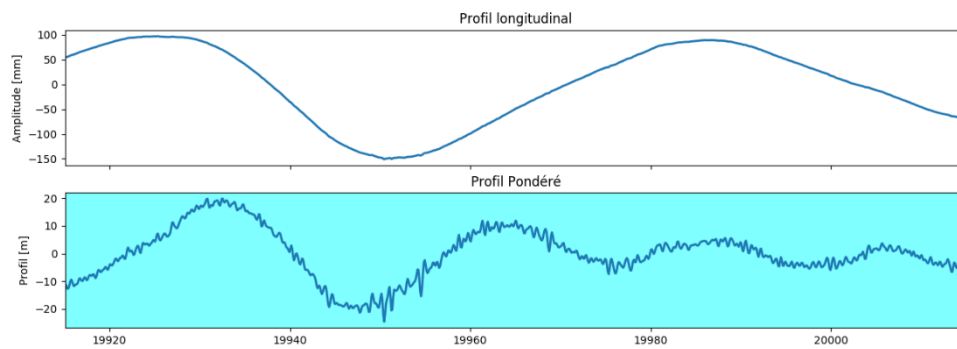


Fig. 49 Pondération du profil avec la méthode BLP (Tronçon 3)

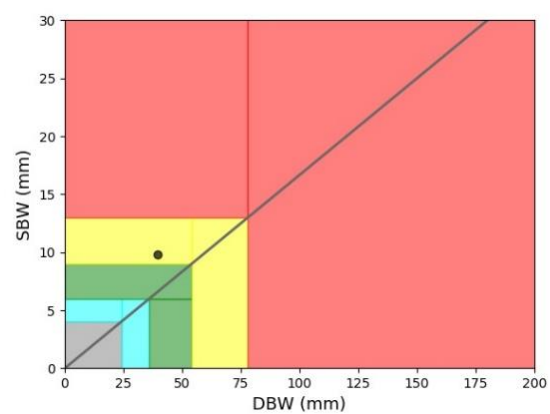


Fig. 50 Représentation combinée des résultats de l'analyse BLP (Tronçon 3)

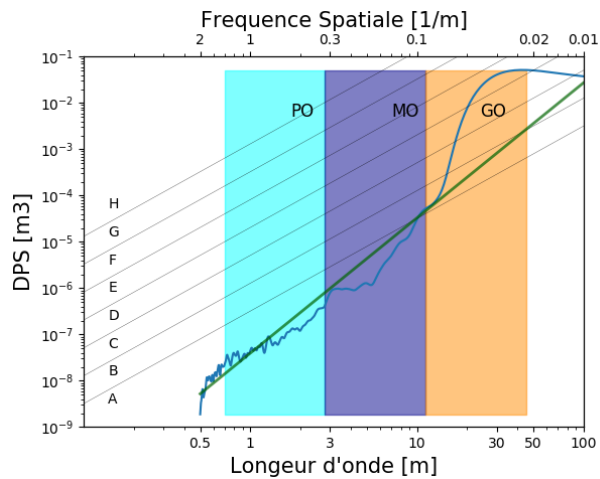


Fig. 51 DSP du tronçon 3

5.2.4 Tronçon 4 : Fissures de surface

Ce quatrième exemple concerne un tronçon de 100 m avec des valeurs moyennes de BLP relativement élevées : SBW de 8.7 au-delà de la valeur d'alarme (Warnwert) et un DBW de 92.5 qui dépasse quant à lui la valeur critique (Schwellenwert). Les valeurs de NPO ainsi que le Wmax sont également peu satisfaisantes. Les valeurs d'IRI et s_w ainsi que les notes de NMO et NGO sont quant à elles relativement bonnes.

La Fig. 52 montre que ce tronçon est relativement dégradé en surface, avec une quantité importante de fissures, notamment dans les bandes de roulement. Le profil de la chaussée (Fig. 53) présente de nombreuses irrégularités de faible amplitude, qui proviennent des fissures. Ces faibles irrégularités sont clairement accentuées sur le profil pondéré. De manière attendue, la NPO moyenne (5) de ce tronçon est également peu satisfaisante, au contraire des NMO (8.5) et NGO (10), ce qui confirme que la fissuration apparaît surtout à l'échelle des petites longueurs d'onde. La fissuration est moins visible avec le IRI et le s_w , car ces indicateurs sont un peu moins sensibles aux ondes courtes : ils fournissent des notes qui sont un peu plus satisfaisantes, sans être excellentes.



Fig. 52 Présence des fissures sur le tronçon 4

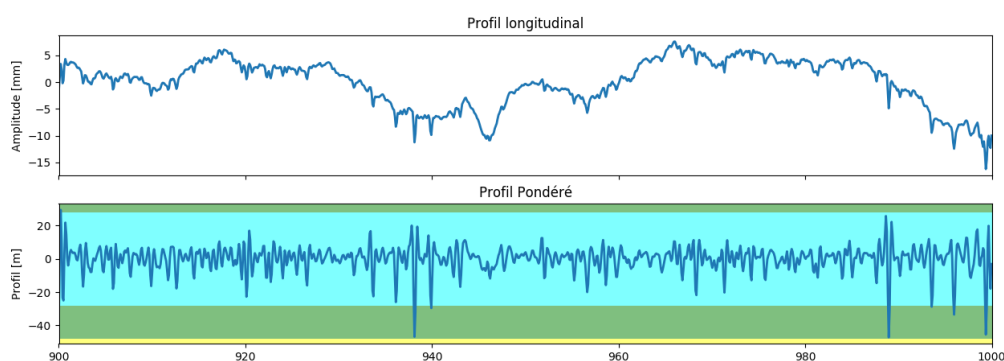


Fig. 53 Pondération du profil avec la méthode BLP (Tronçon 4)

5.2.5 Tronçon 5 : Cas de dégradations très avancé

Tous les indicateurs d'uni longitudinal sont dans un état critique sur ce tronçon de deux kilomètres. Celui-ci présente de fortes dégradations de surfaces (Fig. 54), ce qui démontre que les indicateurs d'uni longitudinal sont sensibles à la présence de certaines dégradations de la surface.

Sur la représentation combinée des résultats BLP (Fig. 55), les points sont quasiment tous dans la zone rouge et se situent dans le cadran situé sous la qui correspond à des dégâts ponctuels de la chaussée.



Fig. 54 Surface avec les dégradations très avancé (tronçon 5)

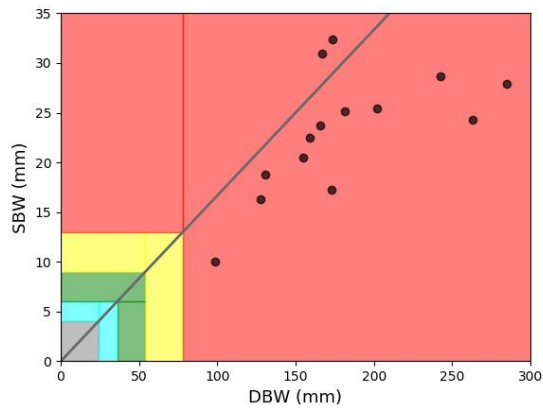


Fig. 55 Présentation graphique des paramètres de BLP (Tronçon 5)

5.2.6 Tronçon 6 : Défaut de planéité en grandes ondes

Ce tronçon de 600 m obtient une valeur moyenne de s_w légèrement supérieure aux exigences de réception de la norme suisse [6]. Convertie en valeur d'indice I2 selon la SN 640925 [2], la valeur moyenne de s_w correspond à un état « moyen » soit la 2^{ème} meilleure catégorie après « bon ». Par contre, les valeurs moyennes des indicateurs de la méthode BLP sont nettement plus mauvaises, avec une valeur DBW de 58.7 qui dépasse la valeur d'alarme (Warnwert) et une valeur SBW de 11.2 au-delà de la valeur seuil (Schwellenwert) utilisées en Allemagne (voir chapitre 4.1.2). Au niveau des NBO, la valeur NGO est très basse, la valeur NMO est également inférieure aux exigences de réception alors que la valeur de NPO est satisfaisante.

Les images du tronçon (Fig. 56) ne mettent pas en évidence des défauts de surface. Les défauts de planéité sont repérés par les notes NMO et NGO et proviennent probablement des couches inférieures ou de la fondation de la chaussée. Ces défauts ne sont probablement pas perçus par les utilisateurs, en raison de leur faible vitesse de circulation. La valeur relativement élevée DBW de la méthode BLP résulte principalement de l'amplitude des ondes longues (Fig. 57). Dans de tel cas, il convient d'être prudent avec les résultats alarmants que peuvent donner les NGO et les valeurs SBW et DBW de la méthode BLP.



Fig. 56 Vues du tronçon 6

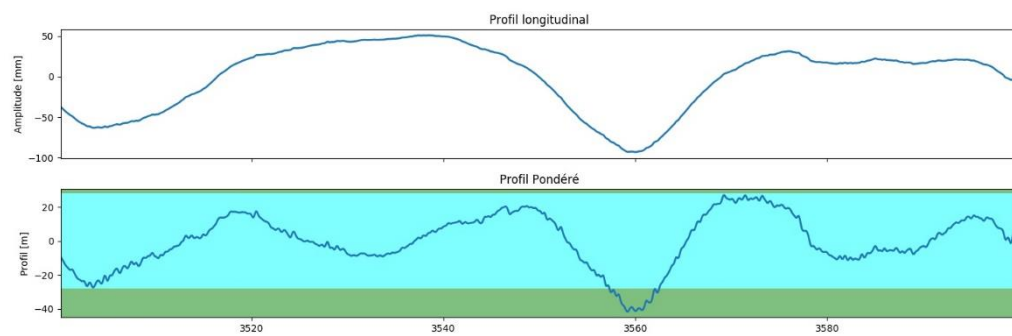


Fig. 57 Pondération du profil avec la méthode BLP (Tronçon 6)

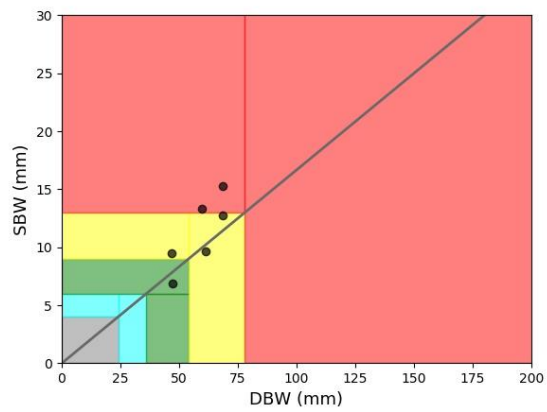


Fig. 58 Représentation combinée des résultats de l'analyse BLP (Tronçon 6)

6 Conclusions

En Suisse, l'échelle d'évaluation de l'état du profil longitudinal se base aujourd'hui essentiellement sur les valeurs d'angle, par l'intermédiaire de l'écart-type (sw) et de la valeur maximale (Wmax) enregistrés sur un tronçon d'une longueur donnée. L'écart-type sert en outre à déterminer l'indice de planéité longitudinale I2.

Sur la base de la future norme européenne [1], trois nouvelles méthodes pour l'évaluation de la planéité longitudinale ont été introduits dans la norme VSS 40 517 :

- International Road Index (IRI) : cet indice vise à quantifier le confort de roulement pour l'utilisateur.
- Notation par bande d'ondes NBO: cette méthode quantifie le défaut de planéité en déterminant trois énergies distinctes (petites ondes : PO, moyennes ondes MO et grandes ondes GO). Ces énergies sont ensuite exprimées sous forme de notes et permettent de situer dans quelles longueurs d'ondes d'éventuelles irrégularités de profil longitudinal se situent.
- Profil longitudinal pondéré (BLP) : cette méthode consiste à définir un nouveau profil numérique en pondérant les amplitudes du profil relevé dans différentes longueurs d'ondes de façon à ce que les amplitudes acquièrent un poids équivalent dans un nouveau profil dit pondéré. Ce nouveau profil pondéré est caractérisé par l'écart-type (SBW) et la valeur maximale (DBW) de ses amplitudes.

Ces trois méthodes se caractérisent par l'analyse de profils longitudinaux relevés par tout profilomètre fournissant des résultats conformes aux exigences de la norme EN xxx. Des considérations concernant l'influence du prétraitement des signaux numériques sont données en annexe.

Les différents indicateurs de planéité longitudinale de la norme VSS 40 517 ont été calculés à partir de profils longitudinaux mesurés sur différents types de route :

- un tronçon de 60 km de la route nationale N2 ;
- l'ensemble du réseau cantonal du Valais
- l'ensemble du réseau cantonal de Zurich
- trois communes de taille moyennes : Le Mont-sur-Lausanne, Olten et Lyssach

Les grandeurs calculées ont été analysées statistiquement afin de procéder à des comparaisons des résultats obtenus à partir des quatre méthodes retenues. Ces comparaisons ont principalement porté sur les deux réseaux cantonaux (VS et ZH), par la recherche de corrélations :

- Des corrélations ont ainsi pu être mises en évidence entre le sw, le IRI et l'EPO (énergie des petites ondes), trois indicateurs principalement destinés à la mise en évidence de défauts de petites longueurs d'ondes.
- La corrélation est particulièrement bonne entre la valeur sw et le IRI, ce qui signifie qu'il serait envisageable de remplacer la méthode de l'angle W par le calcul du IRI. Partant de ce constat, le calcul de l'indice I2 et éventuellement la définition d'une exigence spécifique aux petites ondes à partir du IRI est une démarche envisageable.
- Il n'existe pas de corrélations entre les grandes ondes (EGO) et les autres indicateurs : cet indicateur est donc le seul susceptible de mettre en évidence des problèmes sur des grandes longueurs d'onde. A noter toutefois que ces défauts ne sont généralement pas les plus gênants, à l'exception de routes autorisant de hautes vitesses.
- Il existe une corrélation linéaire entre l'amplitude maximale (DBW) du profil pondéré longitudinal (BLP) et la valeur maximale de l'angle W (Wmax). Toutefois, la corrélation entre DBW et les autres indicateurs est en général non-linéaire.

Une sélection des valeurs limites utilisées en Suisse ou à l'étranger a ensuite été faite afin de juger de leur applicabilité sur les différents réseaux étudiés. Cette évaluation a dans un premier temps été faite sur l'ensemble des données, puis, afin d'appréhender la pertinence des valeurs de réception, en se limitant à des secteurs des deux réseaux cantonaux sur lesquels des travaux avaient été récemment réalisés. L'analyse des valeurs de réception a été complétée par des propositions, pour chaque indicateur, de valeurs limites déterminées à partir d'une approche théorique reposant sur la densité spectrale de puissance (DSP) des signaux. Cette démarche a abouti à deux propositions d'échelles d'évaluation pour les différents indicateurs d'uni longitudinal.

7 Recommandations

Le présent chapitre rassemble les recommandations proposées aux gestionnaires de réseaux routiers pour le choix et l'utilisation des indicateurs caractérisant la planéité longitudinale :

- Les indicateurs s_w et IRI sont fortement corrélées et fournissent des valeurs similaires. Afin de favoriser les comparaisons entre réseaux (aussi à l'échelle internationale) et compte tenu des fortes corrélations observée sur ces deux valeurs, il est envisageable de remplacer la valeur s_w par le IRI.
- L'absence de corrélations significatives entre les autres indicateurs démontre leur complémentarité et qu'ils permettent de repérer des défauts de planéité différents. Cela signifie aussi que la planéité d'une route ne peut en général être quantifiée par une seule valeur.

Pour la suite, nous préconisons l'usage des indicateurs suivants :

- Utiliser l'indice d'IRI afin de qualifier l'état général de réseau et subsidiairement pour comparer l'état du réseau entre différentes campagnes. Il permettra aussi le cas échéant d'assurer la transition avec les valeurs issues du s_w .
- Utiliser les NBO afin de distinguer la nature des défauts d'uni longitudinal par l'intermédiaire des longueurs d'onde.
- N'utiliser les NGO que pour les routes autorisant des vitesses élevées.
- Les indicateurs allemands (SBW, DBW) sont en principe capables de détecter tous les types de défauts de planéité possibles. Leur représentation combinée sur un même graphique afin de pouvoir analyser des ensembles de données. Cette représentation permet ainsi de comparer la planéité de différents réseaux ou parties de réseaux ou encore d'étudier l'évolution des mesures effectuées sur un réseau.
- Finalement, les différents indicateurs d'uni longitudinal peuvent être utilisés pour fournir des informations complémentaires pour le choix des mesures dans une démarche de planification de l'entretien routier (PMS).

Annexes

I	Prétraitement des signaux	101
I.1	Méthodes de prétraitement	101
I.1.1	Redressement (Detrending)	101
I.1.2	Rééchantillonnage (resampling)	101
I.1.3	Filtre passe-haut (high pass filter)	101
I.1.4	Filtre passe-bas (Low pass filter)	102
I.2	Effets du prétraitement sur les indicateurs	103
I.2.1	Indice d'uni international (IRI)	103
I.2.2	Analyse par bande d'onde (NBO)	105
I.2.3	Profil longitudinal pondéré (BLP)	108
I.3	Conclusions du prétraitement et recommandations.....	111

I Prétraitement des signaux

L'appareil de mesure enregistre un profil longitudinal numérisé de la surface. Ce profil brut n'est en général pas directement utilisable pour les analyses numériques et doit subir un certain nombre de prétraitements. La norme européenne [1] définit pour chaque méthode d'évaluation du profil (IRI, NBO et BLP) une démarche de prétraitement propre. Dans cette annexe, la sensibilité de chaque méthode aux différentes démarches de prétraitement a été évaluée. Une méthode de prétraitement unique et applicable à toutes les méthodes d'évaluation est finalement proposée afin de regrouper les différents prétraitements.

I.1 Méthodes de prétraitement

I.1.1 Redressement (Detrending)

Le redressement consiste en une suppression de tendances monotone par rapport à une fonction polynomiale. Pratiquement, lorsqu'une chaussée monte d'un point A à un point B, la différence d'altitude ne doit pas intervenir dans l'évaluation de la planéité longitudinale. Le but des algorithmes de redressement est de repérer et d'annuler ce genre de tendances, qui peuvent influencer grandement l'exploitation du profil numérisé. Un exemple de redressement linéaire (ordre 1) est présenté dans la Fig. 1.

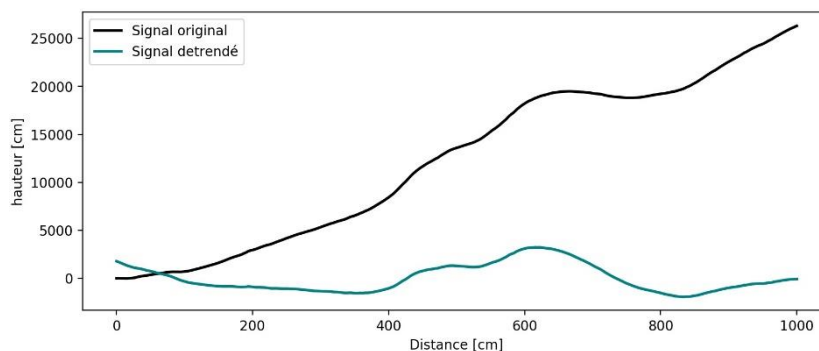


Fig. 1 Redressement linéaire

I.1.2 Rééchantillonnage (resampling)

Pour certaines analyses numériques du profil, la distance entre les points considérés doit être constante. Un rééchantillonnage est nécessaire en cas de distances irrégulières entre les points du profil numérisé brut.

Les données de base étant discrètes, une interpolation est nécessaire pour le rééchantillonnage. Différentes méthodes peuvent être utilisées à cet effet, par exemple l'interpolation linéaire ou la transformée de Fourier.

I.1.3 Filtre passe-haut (high pass filter)

Les transformations de Fourier permettent de décomposer le profil brut en une somme de signaux sinusoïdaux :

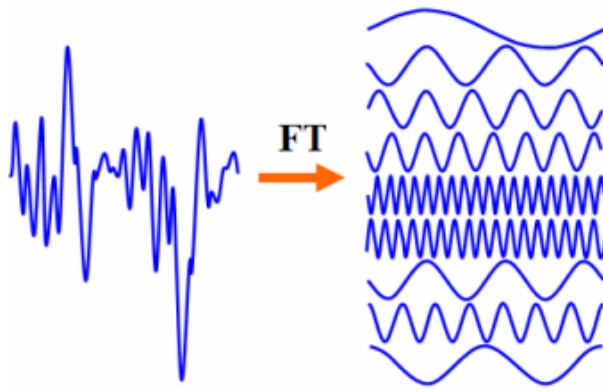


Fig. 2 Décomposition d'un signal avec transforme Fourier²

A partir de cette décomposition, il est possible de supprimer les ondes d'une longueur supérieure à un seuil donné en appliquant un filtre aux données (filtre passe-haut). La Fig. 3 donne un exemple d'application d'un filtre passe-haut dont le seuil est 100m : toutes les ondes dont la longueur est supérieure ou égale à 100m sont supprimées.

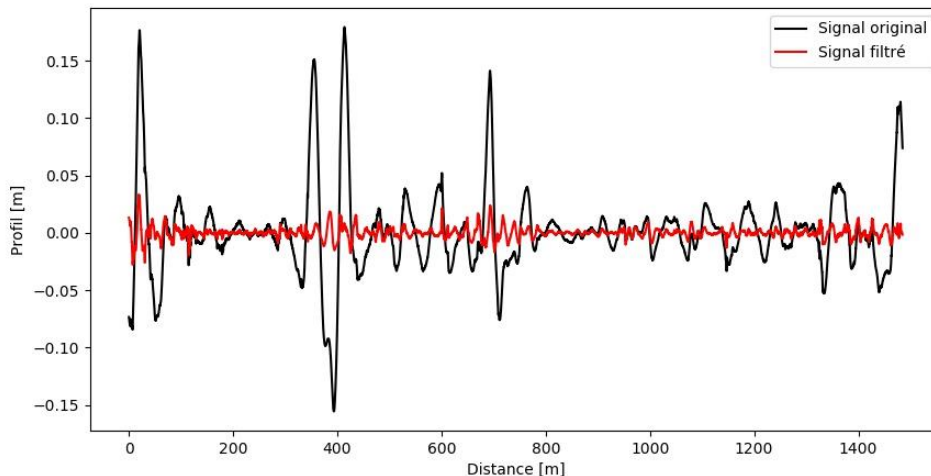


Fig. 3 Exemple d'application d'un filtre passe-haut (100 m)

I.1.4 Filtre passe-bas (Low pass filter)

Inversement au filtre passe-haut, le filtre passe-bas supprime les ondes dont la longueur est inférieure à un seuil donné. La Fig. 4 montre un exemple d'application d'un filtre passe-bas qui supprime toutes les ondes de longueur inférieure ou égale à 10m.

² <https://ranabasheer.files.wordpress.com/2014/03/ft.gif>

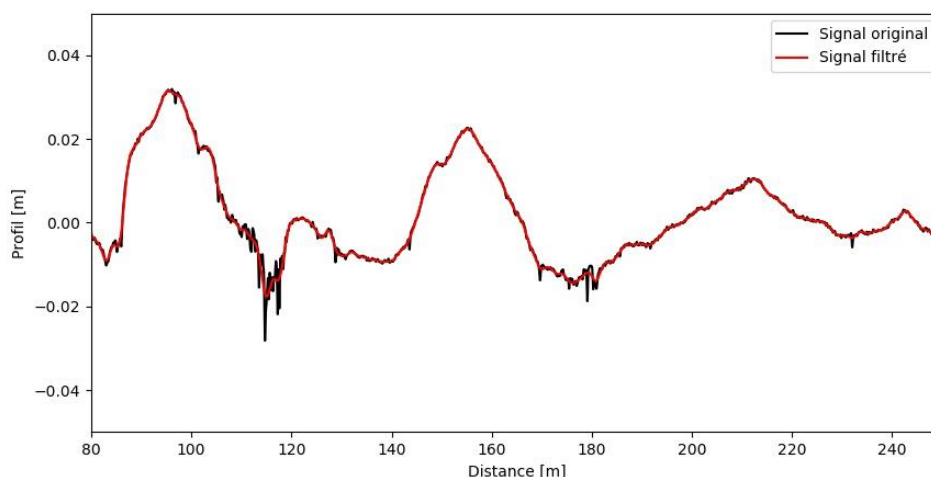


Fig. 4 : Exemple d'application d'un filtre passe-bas (10 m)

I.2 Effets du prétraitement sur les indicateurs

La norme européenne [1] mentionne différents processus de prétraitement pour chaque méthode d'exploitation de la planéité longitudinale. Un résumé des considérations de la norme européenne est présenté dans le Tab. 1.

Tab. 1 Prétraitement associé à chaque méthode d'exploitation selon la norme européenne

Méthode	Prétraitements du signal			
	Redressement	Ré-échantillonnage	Filtre passe-haut	Filtre passe-bas
S_w				
IRI		< 125 mm (linéaire)		250 mm
NBO	Régression linéaire	50 mm (linéaire)	100 m	
BLP	Régression linéaire	100 mm (linéaire)	100 m	

Les paragraphes suivants analysent les effets des différents prétraitements sur les résultats des différentes méthodes considérées. Les effets des différents prétraitements sont testés sur les différentes méthodes d'exploitations (sauf s_w , qui ne nécessitent aucun prétraitement), mêmes pour les prétraitements qui ne sont pas préconisés par la norme européenne selon le Tab. 1.

I.2.1 Indice d'uni international (IRI)

Redressement (Detrending)

L'IRI a été évalué sur un profil arbitraire brut, puis soumis à un algorithme de redressement, dans le but de déceler l'effet de cet algorithme sur l'évaluation. La Fig. 5 montre que les évaluations du profil par l'indicateur IRI sont semblables avec ou sans redressement, et que de ce fait l'effet de l'application de l'algorithme de redressement est négligeable pour cet indice (il n'est d'ailleurs pas préconisé par la norme européenne).

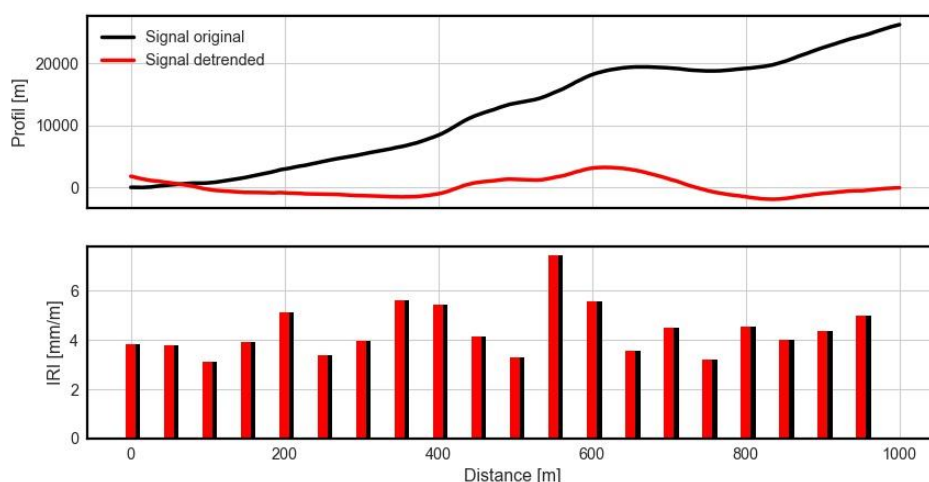


Fig. 5 Effet de l'application de l'algorithme de redressement sur les résultats d'IRI

Rééchantillonnage (Resampling)

Dans ce paragraphe, l'effet d'un rééchantillonnage sur différents intervalles de calcul dx d'un exemple numérique est étudié. Le rééchantillonnage est effectué sur la base d'une interpolation linéaire. Les résultats d'évaluation de l'IRI pour différents intervalles de rééchantillonnage sont présentés dans la Fig. 6. La norme EN préconise un échantillonnage linéaire avec des pas inférieurs à 125 mm. Nous pouvons voir dans l'exemple donnée ci-dessous que les valeurs d'IRI sont peu sensibles aux variations de l'intervalle de rééchantillonnage dx .

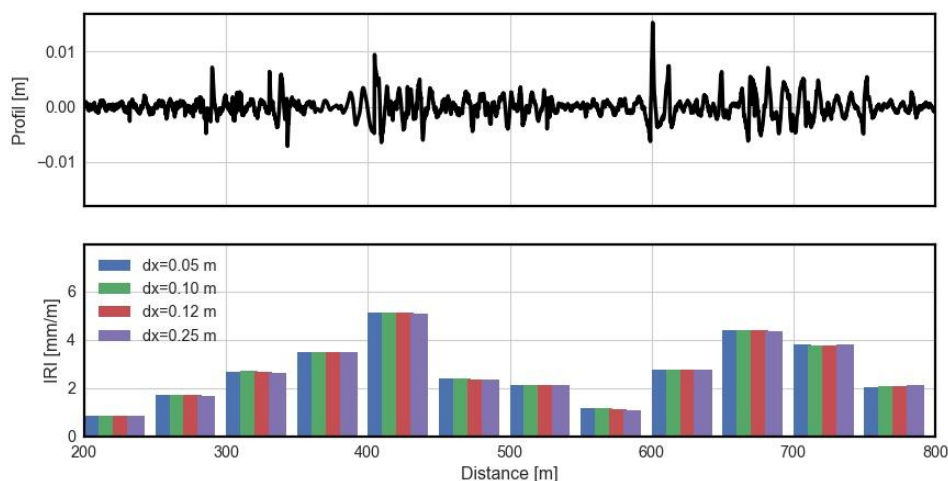


Fig. 6 Effet des variations de l'intervalle dx sur les évaluations d'IRI

Filtre passe-haut (High pass filter)

L'influence du filtrage passe-haut pour deux longueurs d'onde (respectivement 50 et 100 m) est présentée dans la Fig. 7. Le filtrage des longueurs d'onde plus grandes que 100 m n'a pas d'influence sur les évaluations. Une faible influence sur les évaluations de l'IRI après le filtrage des longueurs d'onde plus grandes que 50 m est par contre visible dans

la Fig. 8. Selon la norme européenne [1], le filtrage des ondes longues n'est pas nécessaire pour l'évaluation de l'IRI.

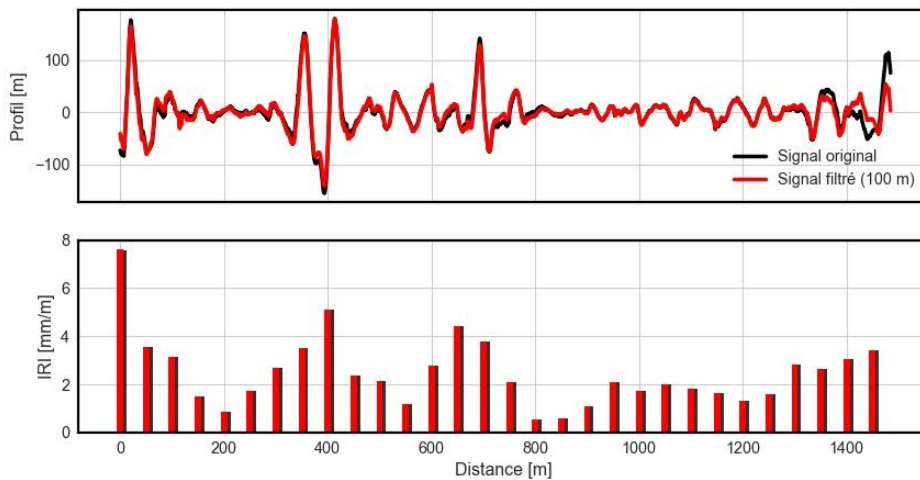


Fig. 7 Effet du filtrage passe-haut (100m) sur les résultats d'IRI

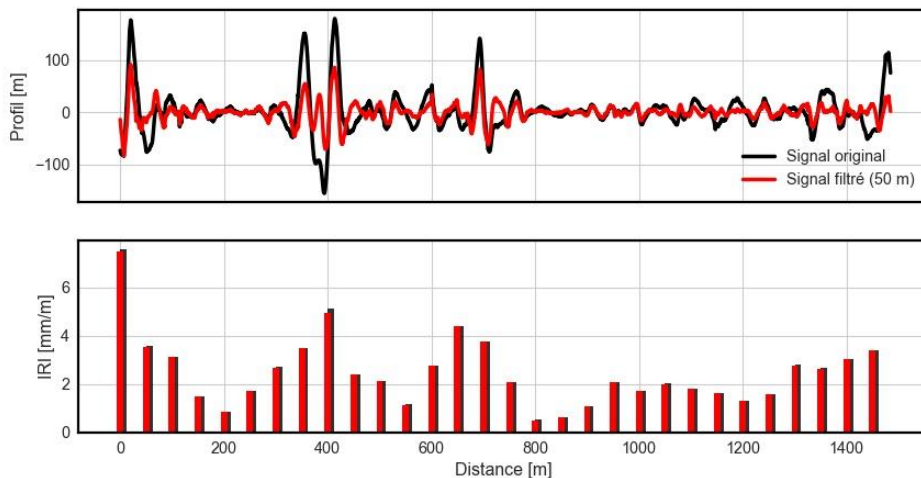


Fig. 8 Effet du filtrage passe-haut (50m) sur les résultats d'IRI

I.2.2 Analyse par bande d'onde (NBO)

Redressement (Detrending)

L'analyse par bandes d'onde NBO a été évaluée sur un exemple brut, puis sur le même exemple soumis à un algorithme de redressement dans le but de déceler l'effet de cet algorithme sur l'évaluation. La Fig. 9 montre que, à l'exception des bouts de section qui semblent plus sensibles à ce prétraitement, les évaluations du profil par NBO sont semblables avec ou sans redressement, et que de ce fait l'effet de l'application de l'algorithme de redressement est négligeable pour cet indice.

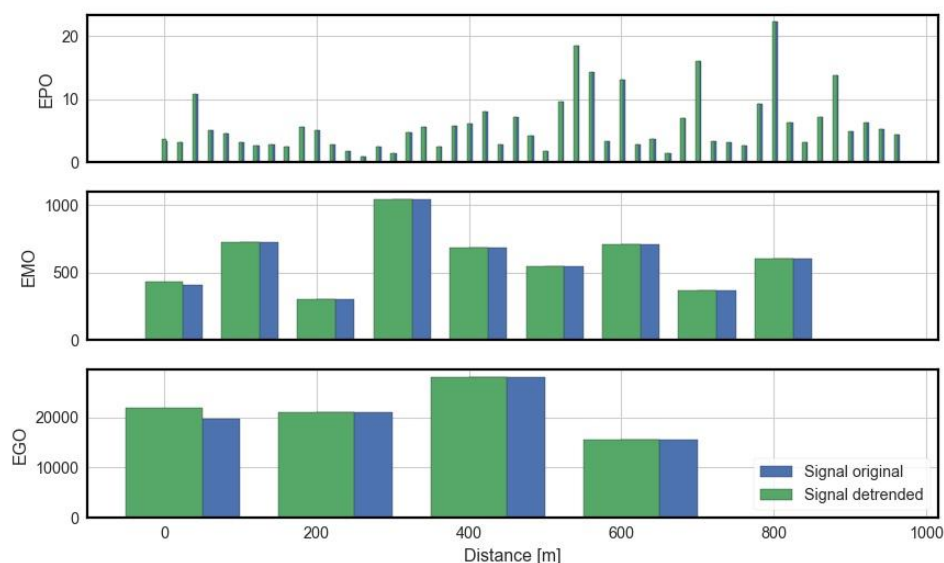


Fig. 9 Effet de l'application de l'algorithme de redressement sur les résultats de NBO

Rééchantillonnage (Resampling)

Selon la norme européenne [1], l'intervalle de rééchantillonnage dx pour la méthode de NBO est de 5 cm. L'influence de ce paramètre est étudiée sur la base de deux exemples (Fig. 10 et Fig. 11). L'évaluation des exemples montre que l'influence de la longueur de l'intervalle dx sur les résultats de NBO est faible.

Les longueurs d'onde de moins de 70 cm sont filtrées dans l'analyse NBO : ces longueurs d'onde n'influencent pas les résultats d'analyse de NBO. Malgré cela, quand la longueur de l'intervalle dx est élevée et proche de celle de la résolution de mesure, certains défauts de planéité longitudinale pourraient ne pas transparaître lors de l'évaluation par la méthode NBO.

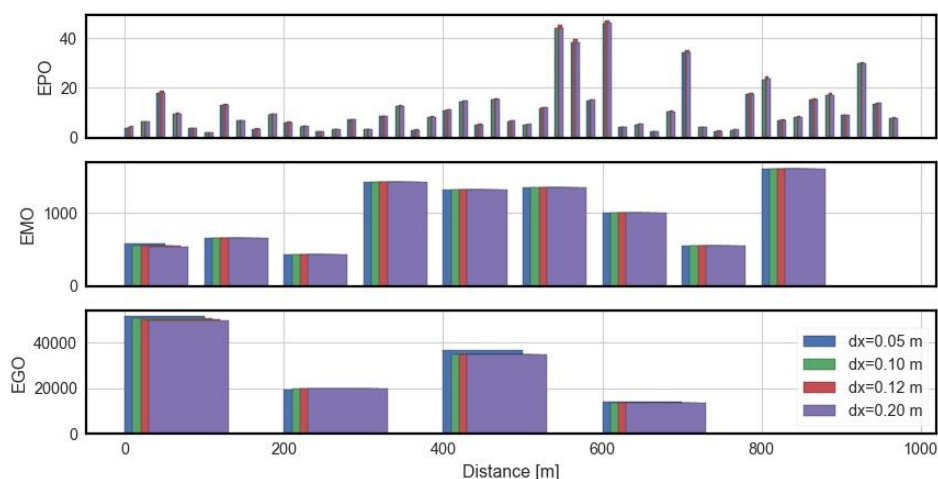


Fig. 10 Effet de la longueur de l'intervalle dx sur les résultats d'analyse NBO (Exemple A)

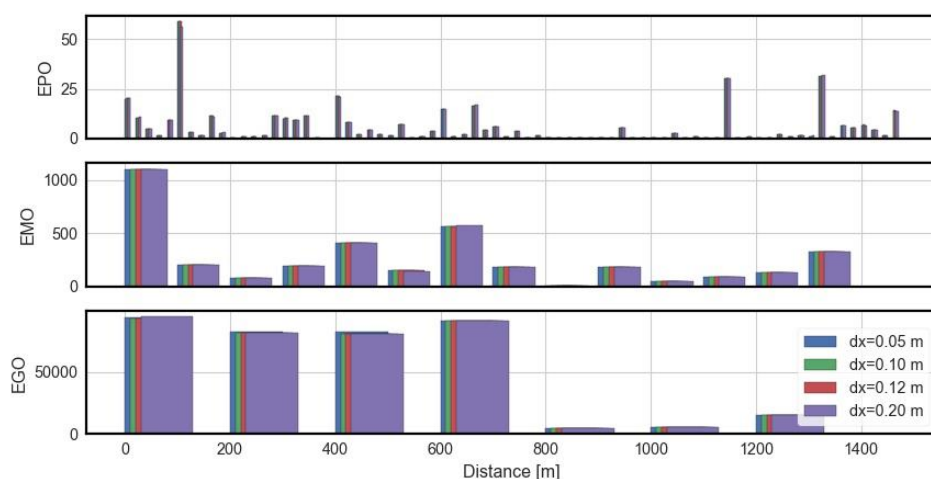


Fig. 11 Effet de la longueur de l'intervalle dx sur les résultats d'analyse NBO (Exemple B)

Filtre passe-haut (High pass filter)

L'effet de l'application du filtrage passe-haut sur les résultats d'un exemple d'évaluation de NBO est montré dans les Fig. 12 et Fig. 13. Le filtrage des longueurs d'onde plus grandes que 50 m a une influence sur les résultats d'analyse des grandes ondes (GO). L'influence de ce filtre sur les petites et moyennes ondes (PO et MO) est par contre négligeable. Le filtrage des ondes plus longues que 100 m (recommandé selon la norme EN) n'influence pas les évaluations de NBO.

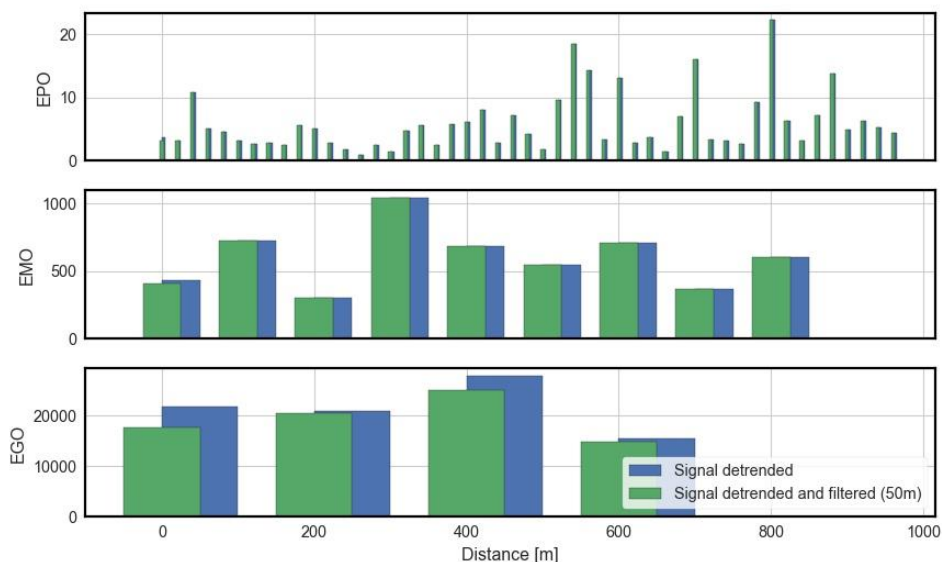


Fig. 12 Effet du filtrage passe-haut (50m) sur les résultats de NBO

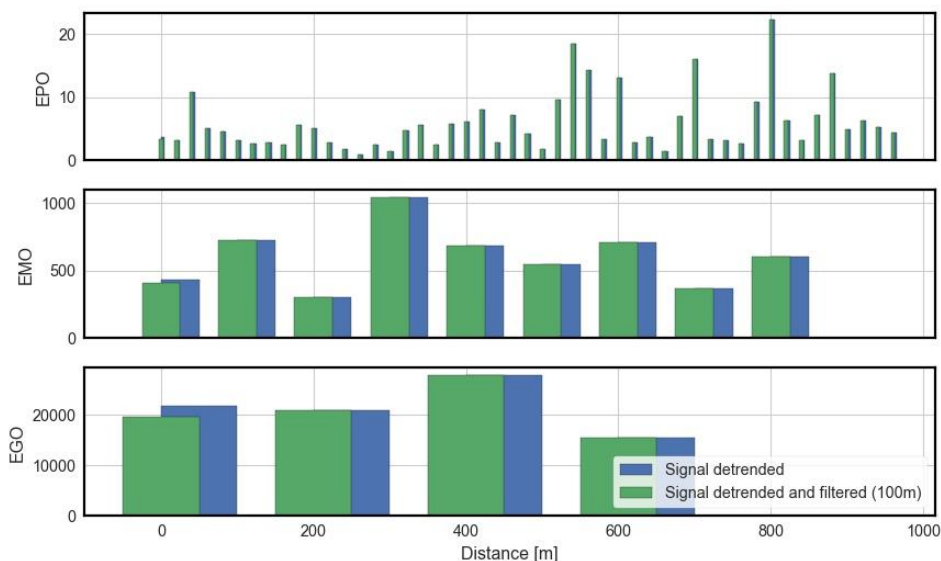


Fig. 13 Effet du filtrage passe-haut (100m) sur les résultats de NBO

I.2.3 Profil longitudinal pondéré (BLP)

Redressement (Detrending)

L'analyse de la planéité par la méthode du profil longitudinal pondéré (BLP) a été évaluée sur profil arbitraire brut (i.e. ERPUG high), puis sur le même profil soumis à un algorithme de redressement. La Fig. 14 montre que le prétraitement effectué ici a une grande influence sur l'évaluation de BLP pour une exploitation sur des sections de 50m alors que la Fig. 15 montre elle que cette influence est moindre pour une exploitation par 100m.

La norme européenne [1] préconise un redressement avant la l'évaluation du BLP, ce que les résultats obtenus confirment.

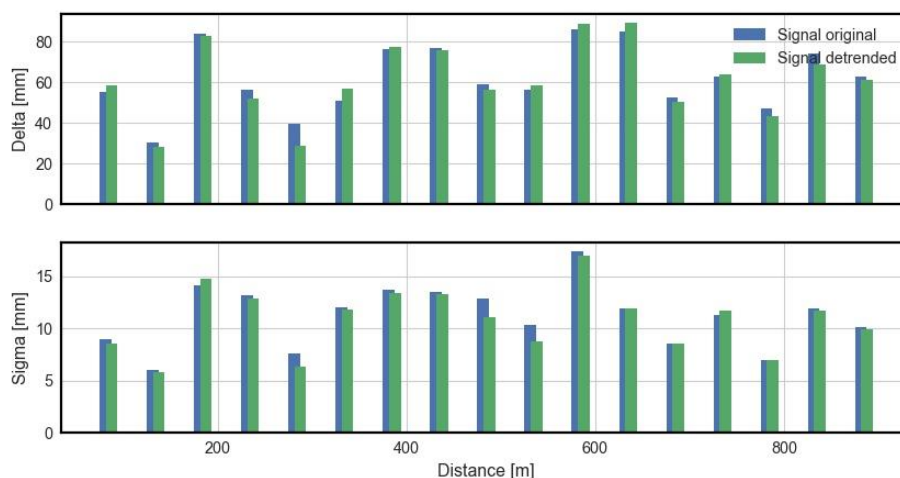


Fig. 14 Effet de l'application de l'algorithme de redressement sur les évaluations de BLP (section de 50m)

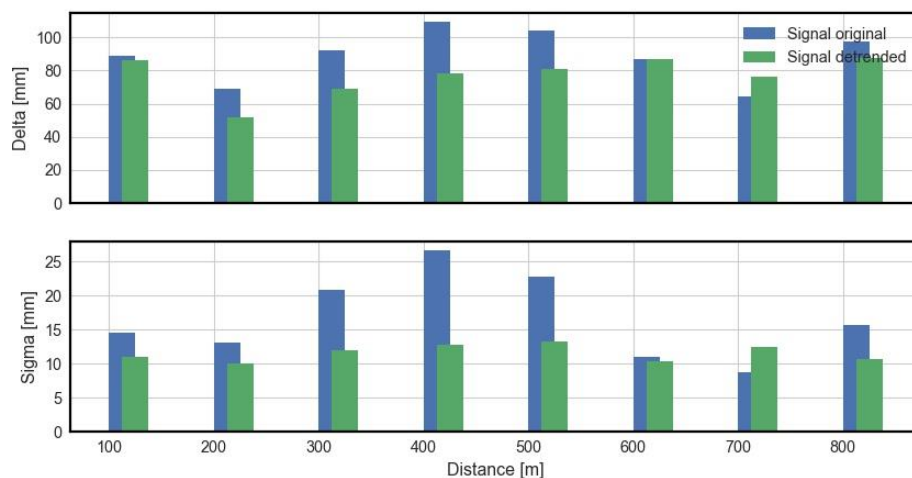


Fig. 15 Effet de l'application de l'algorithme de redressement sur les évaluations de BLP (section de 100m)

Rééchantillonnage (Resampling)

L'influence de l'intervalle de rééchantillonnage dx est étudiée sur la base de deux exemples (Fig. 16 et Fig. 17). Les exemples montrent que l'influence de l'intervalle dx est réelle, surtout lorsque l'intervalle devient grand. Les évaluations avec l'intervalle $dx = 5\text{cm}$ et $dx = 10\text{cm}$ sont semblables, alors qu'elles diffèrent de manière marquée avec l'évaluation de l'intervalle $dx = 20\text{cm}$.

De manière générale, plus l'intervalle dx est proche de l'intervalle de mesure, plus le profil traité sera proche du profil réel. Cela implique par contre souvent une augmentation du nombre de données, et donc une augmentation du temps d'analyse. La norme EN préconise un intervalle de 100 mm.

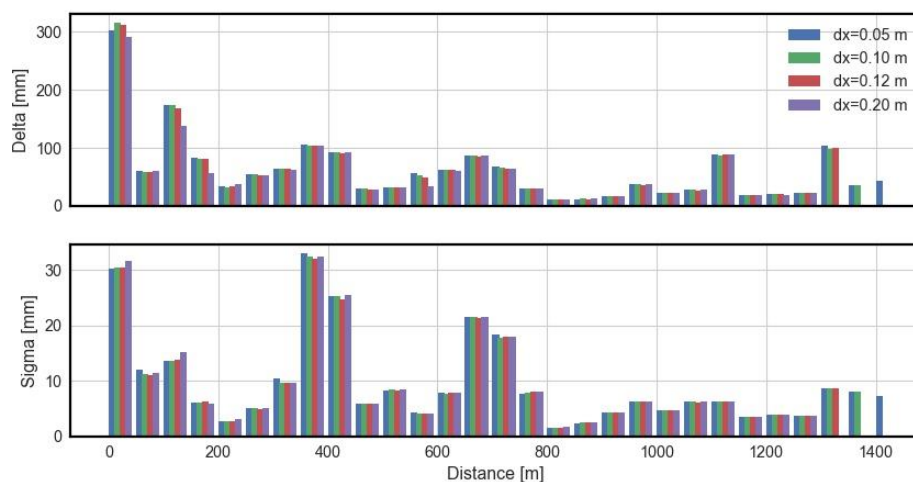


Fig. 16 Effet de la longueur de l'intervalle dx sur les résultats d'analyse BLP (Exemple A)

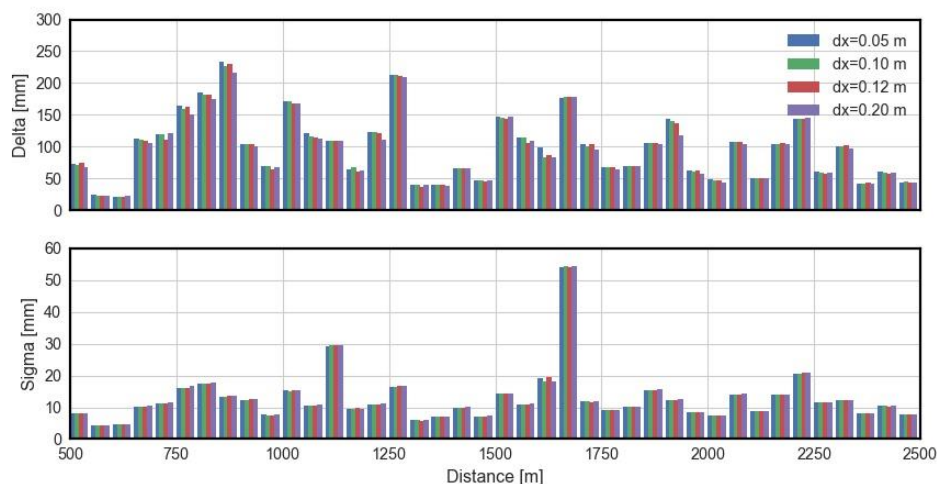


Fig. 17 Effet de la longueur de l'intervalle dx sur les résultats d'analyse BLP (Exemple B)

Filtre passe-haut (High pass filter)

L'effet de l'application du filtrage passe-haut sur les résultats d'un exemple d'évaluation de BLP est montré dans les Fig. 18 et Fig. 19. L'influence de ce prétraitement est négligeable pour les évaluations de BLP. Ceci s'explique par la présence d'un filtre passe-haut directement intégré dans l'algorithme propre à la méthode.

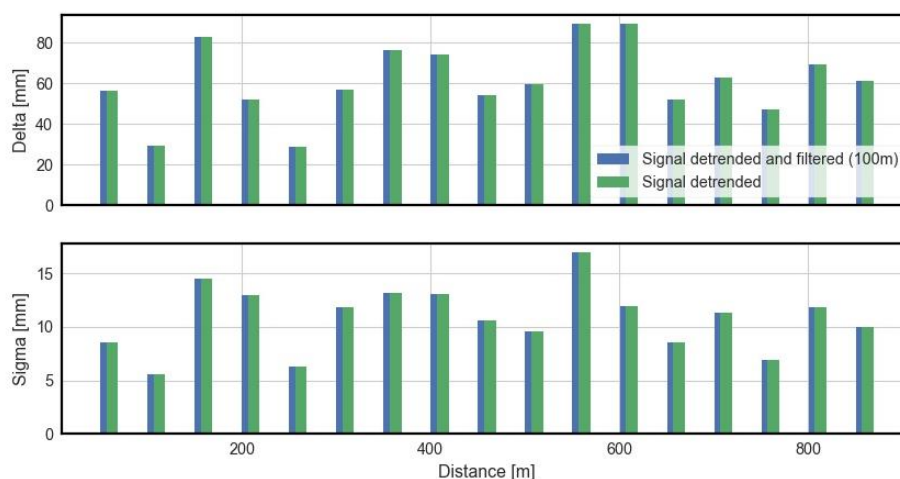


Fig. 18 Effet du filtrage passe-haut (section de 50m) sur les résultats de BLP

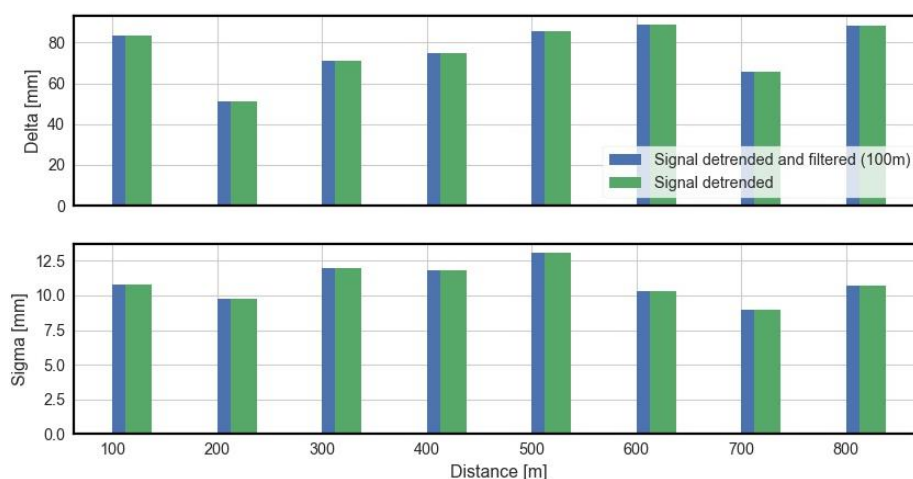


Fig. 19 Effet du filtrage passe-haut (section de 100m) sur les résultats de BLP

I.3 Conclusions du prétraitement et recommandations

Chaque mesure de prétraitement du signal avant l'évaluation du profil longitudinal mentionné dans [1] a été expliquée, puis leurs effets sur l'évaluation selon les quatre méthodes ont été étudiés. Un résumé des résultats obtenus est disponible dans le Tab. 2.

Tab. 2 Résumé de l'influence des mesures de prétraitement sur les méthodes d'analyse de profil longitudinal

	Sw	IRI	NBO	BLP
Resampling		-	-	±
Detrending		-	-	+
Filtre passe-haut (50 m)		-	+	+
Filtre passe-haut (100 m)		-	-	-

+ Influence importante
 - pas d'influence
 ± Peu d'influence

La norme européenne [1] définit pour chaque méthode d'évaluation du profil (IRI, NBO et BLP) séparément une démarche de prétraitement propre. Le Tab. 2 résume ces considérations.

Les résultats d'analyse de ce chapitre montrent qu'une seule démarche de prétraitement pourrait être définie pour la normalisation, applicable aux trois méthodes d'évaluation IRI, BLP et NBO. Une proposition de démarche de prétraitement générale est proposée ci-dessous :

1. Application d'un algorithme de redressement (detrending) sur le profil mesuré
2. Rééchantillonnage d'intervalle $dx = 5\text{cm}$ ou $dx = 10\text{cm}$ avec interpolation linéaire du profil mesuré.
3. Filtrage passe-haut des longueurs d'onde plus grandes de 100 m. Selon [1], le filtre :

- a. doit réduire l'amplitude des longueurs d'onde de plus que 150 m d'au moins 50%.
- b. Ne doit pas distordre la phase des profils (e.g. application des filtres numériques aller-retour (filtfilt))

Glossaire

Terme	Signification
SN	Normes suisses (SN)
EN	Norme européenne
prEN	Preliminary European Standard
ISO	Organisation internationale de normalisation
IRI	International Road Index
NBO	Note par bande d'ondes
NPO	Note par bande des petites ondes
NMO	Note par bande des moyennes ondes
NGO	Note par bande des grandes ondes
EPO	Energie par bande des petites ondes
EMO	Energie par bande des moyennes ondes
EGO	Energie par bande des grandes ondes
BLP	Profil longitudinal pondéré Bewertete Längsprofil
SBW	Ecart-type du BLP
DBW	Plage de variation du WLP
DSP	Densité Spectrale de puissance
AUN	Coefficient d'irrégularité Allgemeine Unebenheitsmaß

Bibliographie

Normes

- [1] prEN 13036-5 **Caractéristiques de surface des routes et aéroports – Méthodes d'essais – Partie 5: Détermination des indices d'uni longitudinal.**
- [2] SN 640 925 b **Gestion de l'entretien des chaussées (GEC) – Relevé d'état et appréciation en valeur d'indice.** VSS, 2003.
- [3] SN 640 520a **Planéité; contrôle de la géométrie.** VSS, 1977.
- [4] SN 640 510a **Caractéristiques de surface des chaussées – Norme de base.** VSS, 2010
- [5] SN 640 517 **Caractéristiques de surface des chaussées – Planéité longitudinale.** VSS, 2017.
- [6] SN 640 525 **Caractéristiques de surface des chaussées – Exigences.** VSS, 2017
- [7] NFP 98-218-3 **Essais relatifs aux chaussées – Essais liés à l'uni – Partie 3: détermination de quantificateurs d'uni longitudinal à partir de relevés profilométriques.** AFNOR, 1995.
- [8] ISO, ISOBS. "8608: 2016 Mechanical Vibration–Road Surface Profiles–Reporting of Measured Data." BSI Standards Publication: London, UK (2016)
- [9] BSI (1972) MEE/158/3/1 'Proposals for generalised road inputs to vehicles', British Standard Institution (BSI 72/34562), London, England.
- [10] Trafikverket (2012), **Underhållsstandard belagd väg 2011**
- [11] FGSV 490 AP 9/A 1 (2001), **Arbeitspapier Nr. 9/A 1 zur ZEB: Reihe A Auswertung, Abschnitt A 1 Zustandsbewertung.** Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung, Köln.
- [12] FGSV 490 AP 9 M (2019), **Systematik der Straßenerhaltung – Arbeitspapiere zur Zustandserfassung und -bewertung der Fahrbahnoberflächen von Straßen (ZEB) – Reihe M: Messtechnische Zustandserfassung von Straßen mit schnell fahrenden Messsystemen,** Köln

Documentation

- [13] Jacot, A., Braber, R., & Von Loebe, W.-H. **Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées.** Mandat de recherche VSS 2004/703. Rapport OFROU 1385. Novembre 2012.
- [14] Cerema IDRRIM. **Uni longitudinal – Etat de l'art et recommandations.** Septembre 2014.
- [15] Robert, B., Delaval, E., Martin, J. M., & Boulet, M. (2009). **Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques: Exécution et exploitation des relevés profilométriques: Méthode d'essai n° 46, Version 2.0.**
- [16] Steinauer, B., Ueckermann, A. **The Weighted Longitudinal Profile – A New Method to Evaluate the Longitudinal Evenness of Roads.** Road materials and pavement design, Vol. 9, No2, pages 136 – 157. 2008
- [17] Maerschalk, Günther, Andreas Ueckermann, Slawomir Heller. "Längsebenenheitsauswerteverfahren" **Bewertetes Längsprofil**: Weiterentwicklung der Längsebenenheitsbewertung der Zustandserfassung und -bewertung.", BASt Heft s 73, 2011.
- [18] Sayers, Michael W. & Karamihas Steven M. **The little book of profiling – Basic information about measuring and interpreting Road profiles.** September 1998.
- [19] Sayers, Michael W. "Guidelines for conducting and calibrating road roughness measurements." 1986
- [20] Descornet, G. **FILTER (FEHRL Investigation on Longitudinal and Transverse Evenness of Roads) – Final report.** 2002.
- [21] Sayers, Michael W. "On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile." *Transportation Research Record* 1501 (1995).
- [22] Khavassefat, Parisa, Denis Jelagin, and Björn Birgisson. "Dynamic response of flexible pavements at vehicle–road interaction." *Road Materials and Pavement Design* 16.2 (2015): 256-276.
- [23] Robert, Bernard, et al. "Mesure de l'uni longitudinal des chaussées routières et aéronautiques: Exécution et exploitation des relevés profilométriques: Méthode d'essai n° 46, Version 2.0." (2009)
- [24] Múčka, Peter, and Johan Granlund. "Is the road quality still better?." *Journal of Transportation Engineering* 138.12 (2012): 1520-1529.
- [25] Sun, Lu, Zhanming Zhang, and Jessica Ruth. "Modeling indirect statistics of surface roughness." *Journal of transportation engineering* 127.2 (2001): 105-111.
- [26] Johannesson, Pär, and Igor Rychlik. **Modelling of road profiles using roughness indicators.** 2012.

-
- [27] Andren, Peter. "**Power spectral density approximations of longitudinal road profiles.**" *International Journal of Vehicle Design* 40.1-3 (2005): 2-14.
-
- [28] McManus, K. J., and R. Hassan. "**The effect of long wavelength roughness on user's cost, safety, and comfort (heavy vehicles).**" *School of Engineering and Science, Swinburne University of Technology, Hawthorn, Victoria, Australia* ,1997.
-
- [29] Souza, R. O., S. D. Neto, and M. M. Farias. "**Statistical analysis between roughness indices and roughness prediction model using neural networks.**" *International Contest on Long-Term Pavement Performance Data Analysis, Federal Highway Administration, Washington, DC* (2006).
-
- [30] Karamihas, Steven M. "**Guidelines for longitudinal pavement profile measurement.**" (1999).
-
- [31] Můčka, Peter. "**Simulated road profiles according to ISO 8608 in vibration analysis.**" *Journal of Testing and Evaluation* 46.1 (2017): 1-14.
-
- [32] Still, P. B., P. G. Jordan, and C. P. Wroth. *Evaluation of the TRRL high-speed profilometer*. No. TRRL Lr922 Monograph. 1980.
-

Clôture du projet



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 DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Version du 09.10.2013

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le : 20.11.2019 / 10.12.2019

Données de base

Projet N° : VSS 2016/322
Titre du projet : Planéité longitudinale: Exigences et indices d'état à partir des méthodes d'exploitation européennes
Echéance effective : 30.11.2019

Textes :

Résumé des résultats du projet :

Le projet de recherche s'est occupé de définir le cadre pratique autorisant une mise en application des trois méthodes européennes d'évaluation de la planéité longitudinale définie dans l'EN 13036-5 et intégrées dans la nouvelle norme suisse VSS 40 517.

Le projet a considéré ces trois nouvelles méthodes d'évaluation de la planéité longitudinale (IRI, NBO et BLP) en plus de la méthode de valeur d'angle (W, sW) utilisée depuis longtemps en Suisse.

Les méthodes sont l'objet d'une présentation générale accompagnée d'une discussion de leurs avantages et inconvénients (limitations) d'un point de vue métier. Elles ont été appliquées sur des données brutes mesurées sur différents réseaux de routes (nationales, cantonales, communales) avec différentes typologies, fournissant des résultats représentatifs des routes suisses. Leur implémentation a fait l'objet de recommandations, notamment concernant le prétraitement des données brutes (signaux numérisés).

Les résultats obtenus ont démontré la complémentarité des valeurs fournies par les différentes méthodes, ce qui justifie la possibilité offerte par les normes suisses d'évaluer et d'analyser la planéité longitudinale selon des procédures différentes.

L'analyse et la comparaison des résultats montrent en outre qu'il est envisageable de remplacer l'usage de la valeur d'angle (sW, Wmax) par la valeur IRI pour calculer l'indice I2, puisque les résultats obtenus selon ces deux méthodes sont statistiquement comparables. Ce choix permettrait en Suisse d'assurer le suivi de l'indice I2 tout en faisant référence à une valeur largement utilisée au niveau international. Il faut cependant être conscient, que l'indice I2 ainsi déterminer ne prend pas en compte les grandes longueurs d'ondes.

Enfin, les résultats obtenus permettent de proposer des valeurs limites (seuils de réception, d'alarme et critiques) distinctes selon la catégorie de route et la vitesse de circulation. Moyennant quelques compléments d'analyse, les recommandations et valeurs limites établies dans le cadre du présent projet sont une excellente base pour affiner la normalisation suisse.



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

Atteinte des objectifs :

Les deux principaux objectifs du projet ont été atteints, à savoir:

- 1) Précision des domaines d'utilisation des méthodes d'évaluations de la planéité longitudinales introduites dans la nouvelle norme VSS 40 517
- 2) Proposition d'échelles d'évaluation pour ces différentes méthodes qui soient utilisables en Suisse pour la réception de travaux, pour l'évaluation de la qualité de la planéité longitudinale et pour son utilisation dans le cadre de la planification de l'entretien des chaussées.

Déductions et recommandations :

Les principales recommandations pour l'utilisation des nouvelles méthodes d'évaluation de la planéité longitudinales figurant dans la norme VSS 40 517 sont:

- 1) L'application des procédures de prétraitement des données brutes des profils numériques définies dans la norme EN 13036-5 est nécessaire et importante.
- 2) Les résultats fournis par les trois nouvelles méthodes sont en général complémentaires : une évaluation de la planéité par un choix de différents indices est justifiée et recommandée.
- 3) Le remplacement à terme de la valeur historique d'angle (sW, Wmax) par la valeur IRI, plus répandue au niveau international et tout à fait comparable, pourrait assurer la continuité dans le calcul de l'indice I2.
- 4) Les valeurs limites proposées pour chaque méthode peuvent servir de base pour affiner les normes suisses sur la planéité longitudinale.
- 5) Validation pour une future normalisation de la représentation combinée des deux principaux résultats (DBW et SBW) issus de la méthode BLP.

Publications :

Un article dans le journal de la VSS et une présentation dans le cadre d'une conférence internationale sont prévus dans le courant 2020.

Chef/cheffe de projet :

Nom : Perret

Prénom : Jacques

Service, entreprise, institut : Nibux Sàrl

Signature du chef/de la cheffe de projet :



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 DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

Appréciation de la commission de suivi :

Evaluation :

Le rapport de recherche fournit un bon aperçu des nouvelles méthodes d'évaluation de la planéité longitudinale, de leurs domaines d'application possibles et de leur complémentarité. La représentation dans un même graphique des deux résultats issus de la méthode BLP semble très prometteuse pour comparer les résultats obtenus à différentes échelles (tout ou partie d'un réseau, axe par axe, zone par zone). Compte tenu de la complémentarité des différentes méthodes et de leur aptitude à mettre en évidence des défauts distincts, le choix d'obtenir des répartitions (pourcentage) par classes d'état similaires pour tous les indices est peut-être discutable. Les propositions de valeurs limites pour les différents indicateurs basées sur cette méthodologie semblent néanmoins pertinentes au regard de celles utilisées dans d'autres pays. Elles constituent une bonne base pour affiner les normes suisses sur la planéité longitudinale.

Mise en oeuvre :

Le présent rapport de recherche devrait encourager les responsables de l'exploitation et de l'entretien des réseaux routiers suisses à utiliser les différentes méthodes d'évaluation de la norme VSS 40 517 pour l'appréciation de la planéité longitudinale. Le rapport souligne aussi l'importance du prétraitement des signaux numérisés selon l'EN 13036-5 pour l'évaluation correcte des indices de planéité. Les résultats obtenus permettent d'envisager de renoncer à l'utilisation du sW qui ne caractérise la planéité que sur une longueur d'ondes très restreinte. La représentation groupée de résultats selon la méthode BLP offre des possibilités intéressantes.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

Consolidation des résultats obtenus sur les routes nationales pour déterminer les valeurs limite à partir d'un échantillonnage plus large et mieux représentatif. Approfondissement du potentiel d'utilisation de la planéité longitudinale pour la planification de l'entretien des chaussées, en particulier la comparaison entre valeurs médianes et de bord (uni structurel).

Influence sur les normes :

Introduction possible de la méthode BLP dans les exigences de la norme VSS 40 525. Utilisation éventuelle de l'IRI pour le calcul de l'indice I2 selon la norme VSS 40 925.

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Jacot

Prénom : Alain

Service, entreprise, institut : Tiefbauamt des Kantons Zürich

Signature du président/ de la présidente de la commission de suivi :

Index des rapports de recherche en matière de route

L'index actuel des rapports publiés dernièrement peut être téléchargé sur notre site www.astra.admin.ch (Services --> Recherche en matière de routes --> Downloads --> Formulaires).