



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

Choix des mesures d'entretien à partir des relevés d'état des chaussées pour la planification de l'entretien

Wahl der Erhaltungsmassnahmen aus Zustandserhebung für die Erhaltungsplanung

Choice of maintenance measures based on condition surveys for roads maintenance planning

Nibuxs Sàrl
Marc Delaby, Ing. civil EPF
Mehdi Ould Henia, Ing. civil, dr. ès science EPF
Jacques Perret, Ing. civil, dr. ès science EPF
Nicolas Etique, Ing. civil EPF

Projet de recherche VSS 2016/416 sur demande de l'Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Octobre 2021

1709

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)



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

Choix des mesures d'entretien à partir des relevés d'état des chaussées pour la planification de l'entretien

**Wahl der Erhaltungsmassnahmen aus Zustandserhebung
für die Erhaltungsplanung**

**Choice of maintenance measures based on condition
surveys for roads maintenance planning**

Nibuxs Sàrl
Marc Delaby, Ing. civil EPF
Mehdi Ould Henia, Ing. civil, dr. ès science EPF
Jacques Perret, Ing. civil, dr. ès science EPF
Nicolas Etique, Ing. civil EPF

**Projet de recherche VSS 2016/416 sur demande de 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
Mehdi Ould Henia, Nibuxs Sàrl

Membres

Marc Delaby, Nibuxs Sàrl
Nicolas Etique, Nibuxs Sàrl

Commission d'experts responsable

Commission technique 4 : Technique de construction et géotechnique

Commission de suivi

Président

Frank Schiffmann

Membres

Alain Jacot
Luzia Seiler
Martin Horat
Eric Simond
Cédric Pagani
Olivier Schalbetter

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	11
Summary	15
1 Introduction	19
1.1 Situation actuelle	19
1.2 Motivation et objectifs du projet de recherche	19
1.3 Démarche d'analyse et structure du rapport	20
1.3.1 Etape 1) Récolte de données et croisement de données d'état et de travaux	21
1.3.2 Etape 2) Analyse statistique des données d'état et de travaux	21
1.3.3 Etape 3) Proposition de seuils de déclenchement, validation sur plusieurs réseaux	21
2 Connaissances	23
2.1 Situation de la normalisation	23
2.2 Etat de l'art	29
2.2.1 Au niveau Suisse	29
2.2.2 Dans d'autres pays	40
2.3 Relations théoriques entre caractéristiques relevées et mesures d'entretien	48
2.3.1 Indice d'état I1 (dégradations de surface) et ses sous-indices	48
2.3.2 Indice d'état I0 (dégradations de surface, sans ornières)	50
2.3.3 Indice d'état I2 (planéité longitudinale)	50
2.3.4 Indice d'état I3 (planéité transversale)	51
2.3.5 Indice d'état I4 (qualité antidérapante)	52
2.3.6 Indice d'état I5 (portance)	53
2.3.7 Synthèse	53
3 Données récoltées et traitement	55
3.1 Données d'état récoltées et traitement	56
3.1.1 Indicateurs disponibles	56
3.1.2 Traitement des données	58
3.1.3 Etat global des réseaux étudiés	58
3.2 Données de travaux récoltées et traitement	60
3.2.1 Informations disponibles et traitement	60
3.2.2 Types de mesures réalisées	61
3.3 Autres données récoltées	63
4 Analyse statistique exploratoire	65
4.1 Etapes d'analyses	65
4.2 Réseaux et données pour l'analyse exploratoire	65
4.3 Analyse exploratoire sur les réseaux A et N	67
4.3.1 Détermination des indices permettant de trouver les zones en plus mauvais état	67
4.3.2 Définition d'un indice de qualité	69
4.3.3 Définition des types de mesures et de valeurs seuils	70
4.4 Analyse exploratoire complémentaire sur le réseau F	71
4.4.1 Ajustement de l'indice de qualité et comparaison avec l'expert métier	72
4.4.2 Prédiction du type de travaux par machine learning	73
4.5 Synthèse de l'analyse statistique exploratoire	75
5 Analyses statistiques systématiques	77
5.1 Résultats généraux	77
5.1.1 Résultats généraux pour les réseaux cantonaux	77
5.1.2 Résultats généraux pour le réseau national	79

5.1.3	Résultats généraux pour les réseaux communaux	79
5.2	Résultats par type de mesure	80
5.2.1	Résultats pour l'indice I1, réseaux cantonaux	80
5.2.2	Résultats pour l'indice IA2, réseaux cantonaux	82
5.2.3	Résultats pour l'indice IA4, réseaux cantonaux	84
5.2.4	Résultats pour l'indice I2, réseaux cantonaux	85
5.2.5	Résultats pour l'indice I3, réseaux cantonaux	87
5.2.6	Particularités sur certains réseaux cantonaux (indice IA5)	89
5.2.7	Cas d'un réseau cantonal sans indices IAi	90
5.2.8	Résultats pour la partie de réseau national	90
5.2.9	Résultats pour les réseaux communaux	92
5.2.10	Particularités et retour d'expérience pour la mesure Enduit superficiel	96
5.3	Résultat après lissage des données	97
5.3.1	Méthodes de lissages	97
5.3.2	Impact du lissage sur les données cantonales	97
5.3.3	Cas des routes nationales	99
5.3.4	Cas des routes communales	100
5.4	Impacts d'autres facteurs dans le choix des mesures	101
6	Construction de seuils de déclenchement et validation sur données	104
6.1	Construction de seuils	104
6.1.1	Choix des indices	104
6.1.2	Choix des valeurs seuils	104
6.2	Application des seuils sur un réseau	105
6.3	Analyse de sensibilité des valeurs seuils	108
6.3.1	Analyse avec des seuils plus élevés	108
6.3.2	Analyse avec des seuils plus bas	109
6.3.3	Constats	111
6.4	Analyse machine-learning pour retrouver les seuils choisis	111
6.5	Influence de l'état moyen du réseau	112
6.6	Adaptation des seuils pour le réseau national	114
6.7	Adaptation des seuils pour les réseaux communaux	117
6.8	Synthèse	118
7	Conclusions	121
	Annexes	125
	Glossaire	127
	Bibliographie	129
	Clôture du projet	131

Résumé

La présente recherche a pour objectif d'établir un catalogue de familles de mesures d'entretien qui se base sur les relevés d'état de la chaussée et de déterminer quels indices des normes VSS 40 925 et 40 926 sont pertinents pour le choix d'une mesure d'entretien dans une démarche de gestion de l'entretien PMS (*Pavement Management System*). Cette planification stratégique, réalisée sur l'ensemble d'un réseau, vise à évaluer les besoins d'entretien, à définir des sections prioritaires pour l'entretien et la nature de l'intervention nécessaire à différents horizons temporels. Par l'application de coût unitaire par type de mesure, une démarche PMS permet au gestionnaire d'établir des estimations financières de besoins futurs en entretien d'un réseau.

Le gestionnaire d'un réseau routier peut se baser sur les travaux menés dans le cadre du projet de recherche VSS 2004/711 qui propose un catalogue comportant une quarantaine de mesures d'entretien standardisées. L'utilisation de ces mesures standardisées nécessite que le gestionnaire fasse un choix parmi les mesures proposées. En effet, la norme VSS 40 980 recommande de ne considérer que 5 à 8 mesures d'entretien standards à ce stade de la planification. Le gestionnaire doit également définir des seuils adaptés à l'état de son réseau en utilisant des combinaisons d'indices et de sous-indices d'état.

Pour parvenir à définir un catalogue de famille de mesures d'entretien et leurs conditions d'application selon l'état, la présente recherche propose une démarche basée sur un retour d'expérience à partir de travaux réalisés, par une exploitation statistique des données d'état relevées avant ces travaux et ayant a priori contribué au choix de la mesure réalisée. Pour cette exploitation, le centre de recherche a fait appel à des spécialistes en analyse de données.

Les données récoltées pour effectuer cette analyse regroupent sept cantons, une filiale des routes nationales et deux communes, avec parfois plusieurs campagnes de relevé et plusieurs périodes de travaux réalisés. Cette récolte a permis de constater que les cantons et filiales disposent généralement de différents indicateurs d'état (indice I0 ou I1, I2, I3 et parfois I4), tandis que les communes ne disposent souvent que d'un relevé visuel des dégradations de surface (indice I1 et ses sous-indices I1a). Les données disponibles sont donc à prendre en considération dans la construction des seuils des mesures d'entretien.

Les données des travaux réalisés ne sont souvent pas suffisamment détaillées pour définir précisément la nature de la mesure d'entretien mise en œuvre. Dès lors, la recherche s'est focalisée sur un catalogue de 4 familles de mesures d'entretien, qui décrivent 4 niveaux d'intervention allant du plus léger au plus lourd. Ce choix est suffisant pour une estimation du coût et de la durée de service des mesures d'entretien et répond aux besoins du gestionnaire de réseau à un niveau de planification stratégique de l'entretien. Les 4 familles de mesures proposées seraient alors :

- Enduits superficiel et/ou traitement de surface (gravillonnage, revêtement fins, pontage de fissures, etc)
- Remplacement de la couche de roulement (1 couche réalisée)
- Remplacement de la superstructure bitumineuse (2 ou 3 couches réalisées)
- Reconstruction totale y compris les couches non liées

A partir des données récoltées, une première analyse exploratoire a été menée en collaboration avec les spécialistes en analyse de données. Cette étude a permis de poser un regard sans a priori sur les données d'un réseau cantonal et d'une partie du réseau national, en considérant l'ensemble des valeurs relevées, dans le but de développer des outils d'analyse mathématique et de prédiction des travaux.

Les données des autres cantons et communes ont ensuite été analysées statistiquement de manière systématique, en calculant notamment les valeurs moyennes des notes d'indices d'état ainsi que la distribution des notes par catégorie d'état pour les différentes familles de mesures et pour le reste du réseau qui n'a pas subi de travaux. Les statistiques

sont exploitées de manière à effectuer des comparaisons entre réseaux et tirer des tendances générales.

Les différentes démarches testées n'ont pas permis de déterminer avec précision des seuils sur les indices d'état permettant de classer avec suffisamment de distinction les 4 familles de mesures, ceci pour différentes raisons :

- Les indices d'état ne contiennent pas toutes les informations qui ont contribué au choix de la mesure d'entretien. Des facteurs extérieurs sont souvent autant voire plus déterminants que l'état de la chaussée.
- Hétérogénéité / variabilité des données d'état pour une même mesure réalisée. Pour chaque type de travaux, sur les réseaux analysés, il existe plusieurs combinaisons d'indice d'état.
- Des probables adaptations entre la mesure identifiée au stade de la planification et la mesure réalisée après les études, une fois des informations récoltées sur les couches inférieures, ou en raison de contraintes budgétaires, ou pour des raisons autres (aménagement, élargissement, assainissement au bruit, etc.).
- Stratégie d'entretien propre à certain type de travaux : en particulier les enduits superficiels qui sont souvent employés comme des mesures temporaires en attendant la réalisation de travaux plus importants ou comme solution économique sur des routes peu sollicitées.

Il est aussi apparu lors des analyses statistiques systématiques que l'état moyen des différents réseaux avait une influence sur l'état des tronçons avant travaux. Sur les réseaux globalement plus dégradés, les travaux concernent des tronçons en plus mauvais état. A l'inverse, pour des réseaux en bon état, comme le réseau des routes nationales, des chaussées sont rénovées avant l'apparition de dégradations importantes, ceci aussi en raison d'exigences plus élevées. Pour refléter ces différences, il apparaît comme nécessaire d'adapter les seuils à la situation.

Malgré les difficultés énoncées, des seuils ont été proposés, en se basant sur les définitions des indices d'état et quelles informations ceux-ci fournissent sur les états observés et supposés des différentes couches de la chaussée. Ainsi, les seuils sont basés sur les indices et sous-indices d'état ayant été jugés les plus pertinents pour identifier des tronçons problématiques d'un réseau et décrivant des dégradations nécessitant vraisemblablement une intervention. Les seuils proposés d'abord sur les réseaux cantonaux ont été adaptés, pour le réseau national pour tenir compte d'exigences plus élevées, et pour les réseaux communaux, pour lesquels on ne dispose souvent que des indices relevés visuellement (I1 et sous-indices IAi).

Tab. R.1 Proposition de valeurs seuils pour des réseaux cantonaux

Mesure d'entretien	Indice IA2	Indice IA4	Indice I2	Indice I3
ES Enduit superficiel	> 2.0	-	-	-
CR Couche de roulement	> 3.0	-	-	-
RS reconstruction superstructure bitumineuse	> 4.0	> 2.0	> 3.5	> 3.5
RT reconstruction totale	-	> 3.0	> 4.0	> 4.0

Tab. R.2 Proposition de valeurs seuils pour le réseau national

Mesure d'entretien	Indice IA2	Indice IA4	Indice I2	Indice I3
ES Enduit superficiel	≥ 1.5	-	-	-
CR Couche de roulement	≥ 2.5	≥ 1.5	-	≥ 1.5
RS reconstruction superstructure bitumineuse	≥ 3,5	≥ 3.5	≥ 3.5	≥ 3.5
RT reconstruction totale	-	-	≥ 4.5	≥ 4.5

Tab. R.3 Proposition de valeurs seuils pour des réseaux communaux pour des données d'état issues d'un relevé visuel (indice I1 et sous-indices IAi)

Mesure d'entretien	Indice IA1	Indice IA2	Indice IA3	Indice IA4	Indice IA5
ES Enduit superficiel	-	> 2.0	-	-	-
CR Couche de roulement	-	> 3.0	> 2.0	-	-
RS reconstruction superstructure bitumineuse	-	> 4.0	> 3.0	> 2.0	> 3.0
RT reconstruction totale	-	> 4.0	> 3.0	> 4.0	> 4.0

Ces seuils ont été testés sur différents réseaux en vue de leur validation. Dans l'ensemble, ils permettent d'identifier avec une bonne précision les tronçons qui nécessiteraient des travaux, puisque les tronçons ainsi identifiés ont effectivement souvent fait l'objet de travaux. En revanche, ils sont moins précis pour déterminer quelle mesure devrait être réalisée, en comparaison avec la mesure effectivement réalisée. Les raisons de ces divergences sont les mêmes que celles qui empêchaient de déterminer des seuils à partir des travaux réalisés.

Des adaptations de ces seuils peuvent être envisagées, pour tenir compte notamment de dégradations spécifiques d'un réseau ou de l'état général moyen du réseau en question, toutefois, en veillant à conserver leur signification technique.

Finalement, les 4 familles de mesures proposées et leurs seuils doivent essentiellement servir à la planification de l'entretien, dans une vue stratégique, permettant d'identifier tout d'abord les secteurs problématiques d'un réseau, et dans un second temps, d'évaluer quel niveau d'intervention, et quelle ampleur de mesure serait vraisemblablement nécessaire. De tels résultats constituent une aide précieuse au gestionnaire pour la définition de plannings prévisionnels des travaux incluant une estimation de leurs coûts, et ainsi pouvoir argumenter des demandes de budget auprès des autorités politiques. Les mesures ainsi proposées devraient toutefois systématiquement faire l'objet de vérifications avant la réalisation de projets concrets.

Concernant la poursuite de la recherche pour cette thématique, il serait utile de définir des seuils de déclenchement pour de nouveaux indicateurs d'état de la surface des chaussées et qui pourraient intégrer la normalisation suisse, notamment l'indicateur de fissuration. En outre, la disponibilité de nouvelles informations (âge et type des couches de la chaussées, trafic, etc.) dans les bases de données des gestionnaires pourrait être valorisée notamment dans la définition des conditions d'application des mesures d'entretien.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Forschung ist, einen Katalog von Unterhaltsmassnahmenfamilien basierend auf Belagszustandserhebungen zu erstellen und zu bestimmen, welche Indizes der VSS-Normen 40 925 und 40 926 für die Auswahl einer Unterhaltsmassnahme in einem Erhaltungsmanagement (PMS: Pavement Management System) Ansatz relevant sind. Diese strategische Planung, die für ein ganzes Netz durchgeführt wird, zielt darauf ab, den Erhaltungsbedarf zu bewerten, vorrangige Abschnitte für die Erhaltung zu definieren und die Art der notwendigen Massnahmen in verschiedenen Zeithorizonten festzulegen. Durch die Anwendung von Einheitskosten pro Massnahmentyp ermöglicht ein PMS-Ansatz dem Betreiber, finanzielle Schätzungen des zukünftigen Erhaltungsbedarfs für ein Netzwerk zu erstellen.

Der Betreiber eines Strassennetzes kann sich auf die Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojekts VSS 2004/711 stützen, das einen Katalog von etwa 40 standardisierten Erhaltungsmaßnahmen vorschlägt. Die Verwendung dieser standardisierten Massnahmen erfordert, dass der Betreiber eine Auswahl unter den vorgeschlagenen Massnahmen trifft. Die Norm VSS 40 980 empfiehlt, dass auf dieser Planungsstufe nur 5 bis 8 Standard-Erhaltungsmassnahmen berücksichtigt werden sollten. Der Betreiber muss auch Schwellenwerte definieren, die an den Zustand seines Netzwerks angepasst sind, indem er Kombinationen von Zustandsindizes und Teilindizes verwendet.

Um einen Katalog von Erhaltungsmassnahmen und deren Anwendungsbedingungen je nach Zustand zu definieren, schlägt diese Forschung einen Ansatz vor, der auf Rückmeldungen von durchgeführten Bauarbeiten basiert, durch eine statistische Analyse von Zustandsdaten, die vor diesen Arbeiten erhoben wurden und a priori zur Wahl der durchgeführten Massnahme beigetragen haben. Für die Auswertung zog das Forschungszentrum Spezialisten für die Datenanalyse hinzu.

Die für diese Analyse gesammelten Daten umfassen sieben Kantone, eine Nationalstrassen-Filiale und zwei Gemeinden, wobei manchmal mehrere Erhebungskampagnen und mehrere Arbeitsperioden durchgeführt wurden. Die Datensammlung zeigte, dass die Kantone und Filialen in der Regel verschiedene Zustandsindikatoren haben (Index I0 oder I1, I2, I3 und manchmal I4), während die Gemeinden oft nur eine visuelle Erhebung der Oberflächenschäden durchführen (Index I1 und seine Teilindizes IAI). Die verfügbaren Daten müssen daher bei der Bildung von Schwellenwerten für Erhaltungsmassnahmen berücksichtigt werden.

Die Daten über die durchgeführten Bauarbeiten sind oft nicht detailliert genug, um die Art der durchgeführten Erhaltungsmassnahme genau zu definieren. Daher fokussierte sich die Forschung auf einen Katalog von 4 Familien von Erhaltungsmassnahmen, die 4 Eingriffsstufen von der leichtesten bis zur schwersten beschreiben. Diese Auswahl ist für eine Abschätzung der Kosten und der Lebensdauer der Erhaltungsmassnahmen ausreichend und entspricht den Bedürfnissen des Netzbetreibers auf der Stufe einer strategischen Erhaltungsplanung. Die 4 vorgeschlagenen Massnahmenfamilien wären dann:

- Oberflächenbehandlung (Schottertränkungen, Dünnbeschichtung, Rissüberbrückung, usw.)
- Erneuerung der Deckschicht (1 Schicht gebaut).
- Erneuerung des bituminösen Oberbaus (2 oder 3 Schichten gebaut)
- Gesamtumbau inklusive ungebundener Schichten

Auf Basis der gesammelten Daten wurde in Zusammenarbeit mit Datenanalyse-Spezialisten eine erste explorative Analyse durchgeführt. Diese Studie ermöglichte eine unvoreingenommene Sicht auf die Daten eines kantonalen Netzes und eines Teils des nationalen Netzes unter Berücksichtigung aller erhobenen Werte, mit dem Ziel, mathematische Analyse- und Arbeitsprognosetools zu entwickeln.

Die Daten aus den anderen Kantonen und Gemeinden wurden danach systematisch statistisch ausgewertet, insbesondere durch Berechnung der Durchschnittswerte der Zustandsindexwerte sowie der Verteilung der Werte nach Zustandskategorie für die verschiedenen Massnahmenfamilien und für den Rest des Netzes, an dem nicht gearbeitet wurde. Die Statistiken werden verwendet, um Vergleiche zwischen Netzwerken anzustellen und allgemeine Trends abzuleiten.

Die verschiedenen getesteten Ansätze ermöglichten es nicht, mit Präzision Schwellenwerte für die Zustandsindizes zu bestimmen, um die 4 Familien von Massnahmen mit ausreichender Unterscheidung zu klassifizieren, dies aus verschiedenen Gründen:

- Die Zustandsindizes enthalten nicht alle Informationen, die zur Auswahl der Erhaltungsmassnahme beigetragen haben. Externe Faktoren sind oft genauso wichtig oder wichtiger als der Zustand des Belags.
- Heterogenität / Variabilität der Zustandsdaten für dieselbe Messung. Für jede Art von Bauarbeiten gibt es in den analysierten Netzwerken mehrere Kombinationen des Zustandsindex.
- Wahrscheinliche Anpassungen zwischen der in der Planungsphase identifizierten Massnahme und der nach den Studien durchgeführten Massnahme, nachdem Informationen über die unteren Schichten gesammelt wurden, oder aufgrund von Budgetbeschränkungen oder aus anderen Gründen (Erschliessung, Verbreiterung, Lärmsanierung usw.).
- Erhaltungsstrategie, die sich auf bestimmte Arten von Arbeiten bezieht: insbesondere die Oberflächenbehandlung, die oft als zeitweilige Massnahme eingesetzt wird, während man auf die Durchführung wichtigerer Arbeiten wartet, oder als kostengünstige Lösung auf Strassen mit wenig Verkehr.

Bei den systematischen statistischen Analysen zeigte sich auch, dass der durchschnittliche Zustand der verschiedenen Netze einen Einfluss auf den Zustand der Abschnitte vor der Arbeit hatte. Bei Netzen, die generell in einem schlechteren Zustand sind, betreffen die Arbeiten Abschnitte in einem schlechteren Zustand. Im Gegensatz dazu werden in Netzen in gutem Zustand, wie z. B. dem Nationalstrassennetz, die Beläge erneuert, bevor eine grössere Beschädigung auftritt, auch aufgrund der höheren Anforderungen. Um diese Unterschiede zu berücksichtigen, ist es notwendig, die Schwellenwerte an die jeweilige Situation anzupassen.

Trotz dieser Schwierigkeiten wurden Schwellenwerte vorgeschlagen, basierend auf den Definitionen der Zustandsindizes und den Informationen, die sie über den beobachteten und angenommenen Zustand der verschiedenen Belagsschichten liefern. Die vorgeschlagenen Schwellenwerte basieren also auf den Zustandsindizes und Unterindizes, die für die Identifizierung problematischer Netzabschnitte und die Beschreibung von Verschlechterungen, die wahrscheinlich ein Eingreifen erfordern, als besonders relevant erachtet wurden. Die zuerst für die kantonalen Netze vorgeschlagenen Schwellenwerte wurden für das nationale Netz angepasst, um den höheren Anforderungen zu berücksichtigen, sowie für die kommunalen Netze, für die oft nur visuell erhobene Indizes (I1 und Teilindizes IAi) verfügbar sind.

Tab. Z.1 Vorgeschlagene Schwellenwerte für kantonale Netze

Erhaltungsmassnahmen	Indiz IA2	Indiz IA4	Indiz I2	Indiz I3
ES: Oberflächenbehandlung	> 2.0	-	-	-
CR: Erneuerung der Deckschicht	> 3.0	-	-	-
RS: Erneuerung des bituminösen Oberbaus	> 4.0	> 2.0	> 3.5	> 3.5
RT: Gesamtumbau	-	> 3.0	> 4.0	> 4.0

Tab. Z.2 *Vorgeschlagene Schwellenwerte für nationale Netze*

Erhaltungsmassnahmen	Indiz IA2	Indiz IA4	Indiz I2	Indiz I3
ES: Oberflächenbehandlung	≥ 1.5	-	-	-
CR: Erneuerung der Deckschicht	≥ 2.5	≥ 1.5	-	≥ 1.5
RS: Erneuerung des bituminösen Oberbaus	≥ 3,5	≥ 3.5	≥ 3.5	≥ 3.5
RT: Gesamtumbau	-	-	≥ 4.5	≥ 4.5

Tab. Z.3 *Vorgeschlagene Schwellenwerte für kommunale für Zustandsdaten aus einer visuellen Erhebung (Indiz I1 et Teilindizes IAi)*

Erhaltungsmassnahmen	Indiz IA1	Indiz IA2	Indiz IA3	Indiz IA4	Indiz IA5
ES: Oberflächenbehandlung	-	> 2.0	-	-	-
CR: Erneuerung der Deckschicht	-	> 3.0	> 2.0	-	-
RS: Erneuerung des bituminösen Oberbaus	-	> 4.0	> 3.0	> 2.0	> 3.0
RT: Gesamtumbau	-	-	> 4.0	> 3.0	> 4.0

Diese Schwellenwerte wurden zur Validierung an verschiedenen Netzwerken getestet. Im Allgemeinen ermöglichen sie es, mit einer guten Genauigkeit die Abschnitte zu identifizieren, die Bauarbeiten erfordern würden, da die so identifizierten Abschnitte tatsächlich oft Bauarbeiten gehabt haben. Andererseits sind sie weniger genau in der Bestimmung der durchzuführenden Massnahme, verglichen mit der tatsächlich durchgeführten Massnahme. Die Gründe für diese Unterschiede sind dieselben, die auch bei den durchgeführten Bauarbeiten die Ermittlung der Schwellenwerte verhindert haben.

Anpassungen dieser Schwellenwerte können ins Auge gefasst werden, um insbesondere einer spezifischen Beschädigung eines Netzes oder dem allgemeinen durchschnittlichen Zustand des betreffenden Netzes zu berücksichtigen, wobei sichergestellt wird, dass ihre technische Bedeutung erhalten bleibt.

Schliesslich sollten die 4 vorgeschlagenen Massnahmenfamilien und ihre Schwellenwerte im Wesentlichen für die Erhaltungsplanung aus strategischer Sicht dienen, indem sie es ermöglichen, erstens die problematischen Sektoren eines Netzes zu identifizieren und zweitens zu bewerten, welcher Interventionsgrad und welche Massnahmengrösse wahrscheinlich notwendig wären. Diese Ergebnisse sind eine wertvolle Hilfe für den Betreiber, um vorläufige Arbeitspläne einschließlich einer Schätzung der Kosten festzulegen und so Budgetanträge bei den politischen Behörden zu begründen. Die so vorgeschlagenen Massnahmen sollten jedoch systematisch überprüft werden, bevor konkrete Projekte durchgeführt werden.

Im Hinblick auf die weitere Forschung in diesem Bereich wäre es sinnvoll, Schwellenwerte für neue Indikatoren für den Belagszustand zu definieren, die in die Schweizer Normung integriert werden könnten, insbesondere der Indikator für Rissbildung. Darüber hinaus könnte die Verfügbarkeit neuer Informationen (Alter und Typ der Belagsschichten, Verkehr usw.) in den Datenbanken der Straßenbetreiber genutzt werden, insbesondere bei der Festlegung der Anwendungsbedingungen für Erhaltungsmaßnahmen.

Summary

The objective of this research is to establish a catalogue of groups of maintenance measures based on pavement condition surveys and to identify which indices of the VSS 40 925 and 40 926 standards are relevant for the selection of a maintenance measure in a Pavement Management System (PMS) approach. This strategic planning, carried out over an entire network, aims to assess maintenance needs, to define priority sections for maintenance and the nature of the intervention required over different time horizons. By applying a unit cost per type of measure, a PMS approach allows the network administrator to establish financial forecasts of future network maintenance needs.

The administrator of a road network can rely on the work carried out within the VSS 2004/711 research project, which proposes a catalogue of some 40 standardised maintenance measures. The use of these standardised measures requires the administrator to choose from among the proposed measures. Indeed, the VSS 40 980 standard recommends that only 5 to 8 standard maintenance measures should be considered at this planning stage. The administrator must also define threshold values adapted to the condition of his network by using combinations of condition indexes and sub-indexes.

To define a catalogue of families of maintenance measures and their application conditions depending on the condition, the current research proposes an approach based on feedback from completed maintenance works, through a statistical analysis of condition data collected before these works and having a priori contributed to the choice of the implemented measure. For this analysis, the research centre called on data analysis specialists.

The data collected for this analysis covers seven cantons, one national road branch and two municipalities, sometimes with several survey campaigns and several maintenances works periods. The data collection showed that the cantons and national road branches usually have various condition indicators (index I0 or I1, I2, I3 and sometimes I4), whereas the municipalities often only have a visual survey of surface deterioration (index I1 and its sub-indices IAI). The available data should therefore be considered in the construction of threshold values for maintenance measures.

The data of the works undertaken are often not detailed enough to precisely define the nature of the maintenance measure implemented. Therefore, the research focused on a catalogue of 4 families of maintenance measures, which describe 4 levels of intervention from the lightest to the heaviest. This choice is suitable for estimating the cost and service life of maintenance measures and meets the needs of the network administrator at a strategic maintenance planning level. The 4 families of measures proposed would then be:

- Surface coating and/or surface treatment (gravelling, thin layer, crack sealing, etc).
- Replacement of the surface layer (1 layer built).
- Replacement of bituminous superstructure (2 or 3 layers built).
- Total reconstruction including unbound layers.

Based on the collected data, an initial exploratory analysis was conducted in collaboration with data analysis specialists. This study made it possible to take an unprejudiced look at the data from a cantonal network and part of the national network, considering all the values recorded, aiming to develop mathematical analysis and work prediction tools.

The data from the other cantons and municipalities were then analysed statistically in a systematic way, by calculating the average values of the condition index ratings as well as the distribution of the ratings by condition category for the different families of measures and for the rest of the network that had not undergone any work. The statistics are used to make comparisons between networks and to draw general trends.

The various approaches tested did not make it possible to precisely determine the threshold values for the condition indices that would allow the four families of measures to be classified with sufficient distinction, for several reasons:

- The condition indices do not contain all the information that contributed to the choice of the maintenance measure. External factors are often just as or more important than pavement condition.
- Heterogeneity/variability of condition data for the same measure. For each type of work, on the networks analysed, there are several combinations of condition indexes.
- There are likely to be changes between the measurement identified at the planning stage and the measurement carried out after the studies, once information has been gathered on the bottom layers, or due to budgetary constraints, or for other reasons (development, widening, noise reduction).
- Maintenance strategy specific to certain types of works: in particular surface treatments, which are often used as temporary measures until more important works are carried out or as an economical solution on roads with low traffic levels.

It also appeared during the systematic statistical analyses that the average condition of the various networks had an influence on the condition of the sections before the works. On networks that are generally more damaged, the works concern sections in worse condition. On the contrary, for networks in good condition, such as the national road network, pavements are renovated before the development of major damages, also due to higher requirements. To reflect these differences, it seems necessary to adapt the threshold values to the situation.

Despite the stated difficulties, threshold values have been proposed, based on the definitions of the condition indices and what information they provide on the observed and assumed conditions of the different pavement layers. The proposed thresholds are based on the condition indices and sub-indices which have been deemed the most relevant for identifying problematic sections of the networks and describing damage likely to require intervention. The threshold values initially proposed for the cantonal networks were adapted for the national network to reflect the higher requirements, and for the municipal networks, for which only visually surveyed indices (I1 and sub-indices IAi) are often available.

Tab. S.1 Proposed threshold values for cantonal networks

Maintenance measure	Index IA2	Index IA4	Index I2	Index I3
ES: surface coating	> 2.0	-	-	-
CR: surface layer replacement	> 3.0	-	-	-
RS: bituminous superstructure replacement	> 4.0	> 2.0	> 3.5	> 3.5
RT: total reconstruction	-	> 3.0	> 4.0	> 4.0

Tab. S.2 Proposed threshold values for national networks

Maintenance measure	Index IA2	Index IA4	Index I2	Index I3
ES: surface coating	≥ 1.5	-	-	-
CR: surface layer replacement	≥ 2.5	≥ 1.5	-	≥ 1.5
RS: bituminous superstructure replacement	≥ 3,5	≥ 3.5	≥ 3.5	≥ 3.5
RT: total reconstruction	-	-	≥ 4.5	≥ 4.5

Tab. S.3 *Proposal of threshold values for municipal networks for condition data from a visual survey (index I1 et sub-indexes IAI)*

Maintenance measure	Index IA1	Index IA2	Index IA3	Index IA4	Index IA5
ES: surface coating	-	> 2.0	-	-	-
CR: surface layer replacement	-	> 3.0	> 2.0	-	-
RS: bituminous superstructure replacement	-	> 4.0	> 3.0	> 2.0	> 3.0
RT: total reconstruction	-	-	> 4.0	> 3.0	> 4.0

These thresholds have been tested on different networks for validation. Overall, they are quite accurate in identifying the sections that would require work, since the sections identified in this way have often had work carried out. On the other hand, they are less accurate in determining which measure should be implemented, compared to the measure implemented. The reasons for these discrepancies are the same as those which prevented the determination of threshold values based on the works carried out.

Adaptations of these threshold values can be proposed, to consider specific deteriorations of a network or the general average condition of the network under study, while ensuring that their technical meaning is preserved.

Finally, the 4 families of measures proposed, and their threshold values should essentially be used for maintenance planning, from a strategic point of view, making it possible to first identify the problematic sectors of a network, and secondly, to evaluate what level of intervention, and what scale of measure, is most likely to be required. Such results are a valuable aid to the administrator in defining provisional work schedules including an estimate of their costs, and thus being able to argue budget requests to the political authorities. However, the measures proposed in this way should be systematically checked before the implementation of actual projects.

Regarding further research in this area, it would be useful to define trigger thresholds for new pavement surface condition indicators that could be integrated into the Swiss standards, particularly the cracking indicator. In addition, the availability of new information (age and type of pavement layers, traffic, etc.) in the administrators' databases could be exploited, particularly in defining the conditions for the application of maintenance measures.

1 Introduction

La présente recherche a pour objectif d'établir un catalogue de familles de mesure d'entretien, d'en définir les conditions d'application sur la base de relevés d'état de la chaussée, et de tenir compte des conditions propres au réseau considéré. On cherche en particulier à déterminer quels indices des normes VSS 40 925 [2] et 40 926 [3] sont pertinents pour le choix d'une mesure d'entretien.

1.1 Situation actuelle

Les normes VSS 40 925b [2] et 40 926 [3] définissent la procédure à suivre pour le relevé d'état des chaussées et les calculs des différents indices d'état I1 à I5 et indices individuels. Ces indices fournissent une évaluation relativement objective de l'état des chaussées que les propriétaires de routes peuvent utiliser pour planifier l'entretien des chaussées de leur réseau selon diverses stratégies budgétaires.

La définition des stratégies d'entretien repose généralement sur la décomposition du réseau en tronçons de routes dont l'état est aussi homogène que possible et auxquels des mesures d'entretien sont associées. Le choix de la mesure à appliquer sur un tronçon homogène donné se fait notamment sur la base des valeurs des indices d'état et des indices individuels obtenues sur ce tronçon.

Pour la gestion de l'entretien des chaussées, la norme VSS 40 980 [7] recommande de considérer 5 à 8 mesures d'entretien standards, cette phase s'inscrivant dans le cadre de la planification, en amont de la réalisation opérationnelle des interventions. Pour choisir ces mesures, le gestionnaire d'un réseau routier peut se baser sur les travaux menés dans le cadre du projet de recherche VSS 2004/711 [11] qui propose un catalogue comportant une quarantaine de mesures d'entretien standardisées. L'utilisation de ces mesures standardisées nécessite donc que le gestionnaire fasse un choix parmi les mesures proposées, qu'il affine leur domaine d'application par la définition de seuils adaptés à l'état de son réseau et qu'il définisse les combinaisons d'indices et de sous-indices qui sont à considérer.

1.2 Motivation et objectifs du projet de recherche

Le catalogue de mesures d'entretien proposé dans le rapport de recherche VSS 2004/711 [11] constitue une base très complète et détaillée pour la planification de l'entretien, généralement applicable dans la phase de réalisation d'une intervention d'entretien (phase opérationnelle, avant-projet).

Toutefois, cette base peut difficilement être exploitée pour la planification de l'entretien à l'échelle d'un réseau ; comme évoqué précédemment, il convient de regrouper les mesures du catalogue des mesures standardisées en familles de mesures en fonction de leur aptitude à réparer certains dommages, mais aussi selon les restrictions à leur usage. Les conditions d'application de ces familles de mesures doivent également être spécifiées par la fixation de seuils de déclenchement, utilisables dans une démarche systématique de gestion de l'entretien d'un réseau routier.

La présente étude vise donc à répondre aux besoins de la planification de l'entretien à un niveau stratégique, dans le cadre d'une démarche de gestion de l'entretien des infrastructures routières, aussi appelé *Pavement Management System* (PMS). Une telle démarche, réalisée sur l'ensemble d'un réseau, vise à évaluer les besoins d'entretien, à définir des sections prioritaires pour l'entretien et la nature de l'intervention nécessaire, en distinguant les besoins d'entretien à court- (moins de 5 ans), moyen- (5 à 15 ans) et long-terme (au-delà de 15 ans). Par l'application de coût unitaire par type de mesure, une telle démarche permet au gestionnaire d'établir des estimations financières de besoins futurs en entretien d'un réseau.

La présente étude doit donc permettre d'établir un catalogue de mesures spécifiques au réseau traité. Elle est conçue comme un développement nécessaire pour la mise en pratique du rapport VSS 2004/711, comme illustré dans la Fig. 1.

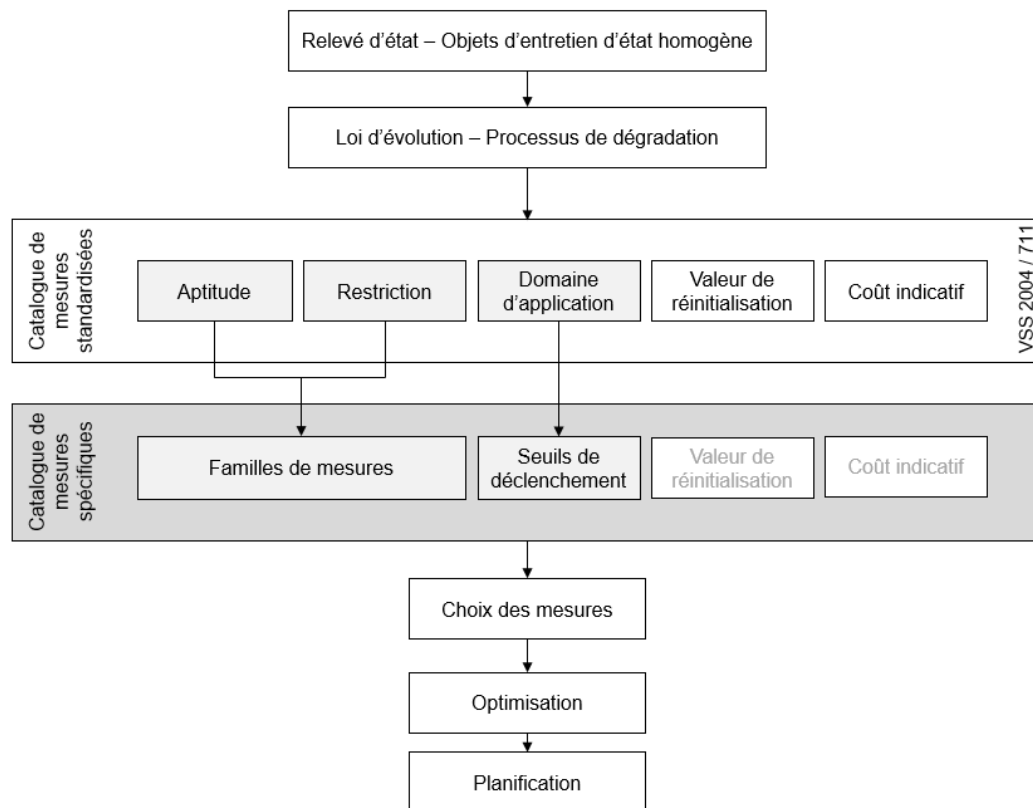


Fig. 1 : Inscription de la présente recherche dans une démarche PMS et en relation avec le rapport de recherche VSS 2004/711 [11].

La démarche proposée a pour objectif d'établir un catalogue de familles de mesures d'entretien, d'en définir les conditions d'application selon les relevés d'état et de tenir compte des conditions propres au réseau considéré (agrégation de données, biais de l'évaluation, qualité attendue du réseau, état actuel du réseau, etc.). Le projet de recherche vise à valider et implémenter le catalogue de mesure d'entretien sur trois types de réseau routiers : routes nationales, cantonales et communales.

La présente recherche se focalise sur les chaussées en enrobé bitumineux, les chaussées en béton étant généralement rencontrées de manière minoritaire à l'échelle d'un réseau, et pouvant faire l'objet d'une planification distincte, ne nécessitant pas forcément la même systématique d'analyse. L'approche proposée est néanmoins applicable aux chaussées en béton (ou d'autres types non-inclus dans les normes), en adaptant les familles de mesures aux spécificités de ces revêtements.

1.3 Démarche d'analyse et structure du rapport

Après une mise à jour des connaissances (chapitre 2), la présente recherche propose une démarche en trois étapes devant aboutir à la formulation de familles de mesure d'entretien et de seuils de déclenchement. Cette démarche se base sur un retour d'expérience à partir de travaux réalisés, par une exploitation statistique des données d'état relevées avant ces travaux et ayant *a priori* contribué au choix de la mesure réalisée. Pour cette exploitation, le centre de recherche a fait appel à des spécialistes en analyse de données et de méthodes d'apprentissage statistique et automatique (Machine Learning).

1.3.1 Etape 1) Récolte de données et croisement de données d'état et de travaux

La démarche d'analyse se focalise sur des familles de mesures d'entretien types, de manière similaire à celle proposée par le guide des communes [18], sans considérer les mesures d'entretien d'exploitation (réparation localisées) qui ne font généralement pas l'objet d'une planification pluriannuelle, au sens d'une démarche PMS. Les mesures d'entretien ainsi considérées sont :

- Enduit superficiel, revêtement fin
- Remplacement de la couche de roulement
- Renouvellement des couches bitumineuses
- Reconstruction totale

Les données de travaux réalisés récoltées pour les réseaux étudiés seront ainsi classées selon ces quatre familles de mesures. Le choix d'un nombre relativement restreint de mesure vise à simplifier le classement des travaux réalisés dans une famille de mesure, et permet de constituer des échantillons de taille plus importants pour effectuer des analyses statistiques. Ce choix correspond également à la pratique des gestionnaires pour la planification de l'entretien (voir état de l'art suisse au chapitre 2.2.1), mais aussi au niveau de détail des informations disponibles concernant les chantiers réalisés. En effet, les gestionnaires tiennent généralement à jour des bases de données qui renseignent les travaux réalisés en détaillant le nombre de couches réalisés, mais qui ne contiennent rarement des informations plus précises sur la nature de la mesure réalisée.

Cette étape est présentée dans le chapitre 3.

1.3.2 Etape 2) Analyse statistique des données d'état et de travaux

Cette analyse statistique est menée sur des réseaux cantonaux et nationaux en premier lieu, ceux-ci disposant d'une plus grande variété d'indicateurs d'état. Les analyses sont appliquées dans un second temps sur des réseaux communaux, sur lesquels on ne dispose dans certains cas que de l'indice d'état I1.

Une première analyse exploratoire a d'abord été menée en collaboration avec les spécialistes en mathématique et en analyse de données de Swiss-SDI (Statistical Design & Innovation). Cette étude a permis de poser un regard sans a priori sur les données d'un réseau cantonal (réseau A) et d'une partie du réseau national (N), en considérant l'ensemble des valeurs relevées, dans le but de développer des outils d'analyse mathématique et de prédiction des travaux. Les résultats de cette analyse exploratoire sont synthétisés dans le chapitre 4.

Les données des autres cantons ont ensuite été analysées statistiquement de manière systématique, en calculant notamment les valeurs moyennes des notes d'indices d'état ainsi que la distribution des notes par catégorie d'état pour les différentes familles de mesures et pour le reste du réseau qui n'a pas subi de travaux. Les statistiques sont exploitées de manière à effectuer des comparaisons entre réseaux et tirer des tendances générales.

Ces résultats sont présentés au chapitre 5 pour trois réseaux cantonaux jugés représentatifs, ainsi que pour une partie du réseau national et deux réseaux communaux.

1.3.3 Etape 3) Proposition de seuils de déclenchement, validation sur plusieurs réseaux

Partant des résultats des précédentes études, de l'état de l'art et de la définition des indices selon la normalisation, des seuils de déclenchements sont proposés pour un réseau cantonal. Les mesures ainsi obtenues sont comparées à celles effectivement réalisées par le canton. Des analyses de sensibilités sont réalisées, puis les seuils sont testés sur deux autres réseaux cantonaux.

Une proposition d'adaptation des seuils est ensuite testée sur les données du réseau national. Enfin, une adaptation spécifique aux deux réseaux communaux est présentée.

Ces propositions sont discutées au chapitre 6.

2 Connaissances

2.1 Situation de la normalisation

Ce chapitre est consacré au recensement de la normalisation suisse en vigueur visée par le sujet de cette étude.

Gestion de l'entretien des infrastructures

Ce projet de recherche s'inscrit dans le cadre de la gestion de l'entretien des infrastructures routières, aussi appelé *Pavement Management System* (PMS). Ce processus est décrit dans la norme VSS 40 900a [1] à l'échelle des différents systèmes partiels. Il est représenté à la Fig. 2, avec comme point d'entrée une évaluation de l'état du système au moyen de relevés, qui servent de base à la planification des mesures du système. Une coordination des mesures des différents systèmes doit ensuite être effectuée avant d'établir un programme de construction. Finalement, chaque projet d'exécution est établi dans le détail.

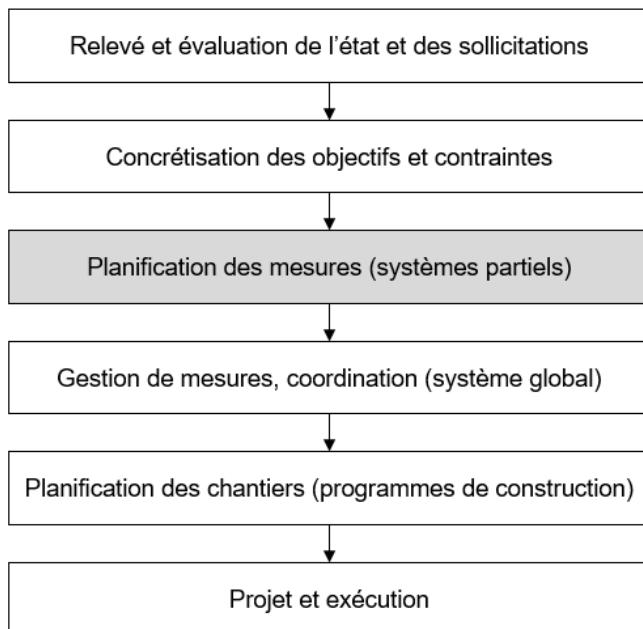


Fig. 2 : Processus de gestion de l'entretien (d'après Fig. 4 [1]).

La présente étude vise à approfondir la problématique de la planification des mesures. Selon [1], la planification vise à déterminer des mesures sur la base de l'évaluation de l'état et son évolution, en tenant compte des stratégies d'entretien. Le gestionnaire d'un réseau est donc amené à établir un catalogue de mesures d'entretien et de définir les conditions de leur mise en œuvre, qui peuvent dépendre de l'évaluation de l'état, mais également d'autres critères (trafic, situation, climat, etc.).

Avant de coordonner l'ensemble des mesures à l'échelle du réseau (système global), la planification des mesures s'effectue pour chaque système partiel séparément. Les différents domaines (systèmes partiels) de la gestion de l'entretien proposés dans l'annexe de la norme VSS 40 900a [1] sont les suivants :

- Gestion de l'entretien des chaussées et chemins (GEC) ;
- Gestion de l'entretien des ouvrages d'art (GEO) ;
- Gestion de l'entretien des installations électromécaniques (GEI) ;
- Gestion de l'entretien des réseaux enterrés (GER) ;
- Gestion de l'entretien des installations annexes et objets particuliers (GEA).

Gestion de l'entretien des chaussées et chemins (GEC)

La présente étude se focalise sur la gestion de l'entretien des chaussées, dont la terminologie et la structure sont définies dans l'annexe de la norme VSS 40 900a [1] (Fig. 3), et plus spécifiquement sur l'étape de planification des mesures de l'entretien dit « constructif », qui vise à garantir la sécurité de l'ouvrage ainsi que le maintien de sa structure et de sa fonction. Il doit être distingué de l'entretien « d'exploitation », dont le but est d'assurer la sécurité de l'exploitation des chaussées, et des « modifications », qui impliquent l'extension ou le remplacement de la chaussée.

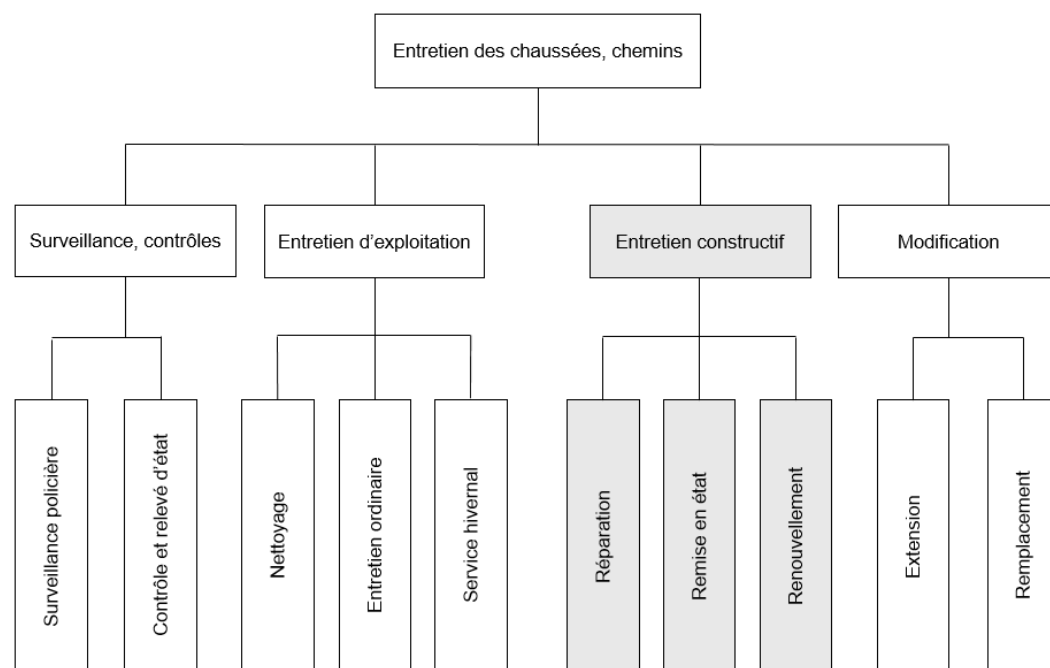


Fig. 3 : Système partiel chaussées, chemins – Structure et relation de l'entretien (Fig. 2 Annexe [1]).

Relevé et évaluation de l'état

Point de départ du processus de gestion de l'entretien (Fig. 2) le relevé d'état doit permettre de caractériser l'état d'un tronçon de route donné par le biais de différents indices d'état définis dans la norme VSS 40 925b [2], qui sont rappelés dans le Tab. 1.

Tab. 1 : Caractéristiques d'état

Indice d'état	Caractéristique d'état	Propriété mesurée	Symbole	Unité
I0 ou I1	Dégradations de surface	-	-	-
I2	Planéité longitudinale	Ecart-type de la variation angulaire W	S _w	‰
I3	Planéité transversale	Profondeur d'ornièr	T	mm
I4	Qualité antidérapante	Coefficient de frottement	μ	-
I5	Portance	Déflexion Benkelman	-	mm/100
Indice individuel	Groupe principal			
Enrobé bitumineux	Groupe de dégradations			
IA1	Surface glissante			
IA2	Dégradations du revêtement			
IA3i0 ou IA3i1	Déformations du revêtement	Gravité (S) et étendue (A) des dégradations		
IA4	Dégradations structurelles			
IA5	Réparations			

Les indices I1 et IA3i1 incluent les ornières dans les dégradations de surface tandis que les indices I0 et IA3i0 ne les prennent pas en compte ; ces derniers sont généralement considérés lorsque l'indice I3 est également relevé, pour éviter une redondance des caractéristiques évaluées.

Comme l'indique le Tab. 1, les caractéristiques d'état des indices I2, I3, I4 et I5 décrivent un paramètre unique mesuré au moyen d'appareils de mesure ou d'un appareil d'auscultation à grand rendement (AGR), qui est transformé en valeur d'indice selon les abaques de la norme [2].

L'indice I0 ou I1 est quant à lui relevé dans le cadre d'un relevé visuel ou alors au moyen d'un AGR, en évaluant différentes dégradations qui sont ensuite regroupées et pondérées. Pour les chaussées en revêtement bitumineux, l'annexe à la norme [2] propose un catalogue de 22 dégradations (13 pour les chaussées en béton). Ces dégradations sont regroupées en 5 groupes principaux (6 pour le béton), auxquels la norme VSS 40 926 [3] fait correspondre des indices individuels IAi (IBi pour les chaussées en béton) aussi appelés « sous-indice ».

Chaque dégradation qui compose ces groupes principaux est évaluée individuellement, selon sa gravité (S) et son étendue (A), chacun des deux critères étant noté sur une échelle allant de 1 à 3 selon une procédure spécifique qui est détaillée dans l'annexe à la norme [2]. Lors de l'évaluation, la gravité et l'étendue sont combinées dans la matrice d'évaluation (M) qui peut prendre les valeurs données dans la Fig. 4.

$M_i = A_i \cdot S_i$		Ausmass Etendue			
		A 0	A 1	A 2	A 3
Schwere Gravité	S 1	0	1	2	3
	S 2	0	2	4	6
	S 3	0	3	6	9

Fig. 4 : Valeur de la matrice d'évaluation (M) en fonction de la gravité (S) et de l'étendue (A) (Tab.5 [2]).

Dans chaque groupe principal, la valeur maximale de la matrice d'évaluation de chaque dégradation qui le compose est retenue afin d'évaluer la valeur de l'indice d'état I0 ou I1, en pondérant la matrice de chaque groupe principal comme suit :

$$I_{0,1} = \min \left(\frac{1}{10} \cdot \sum_{i=1}^5 M_i \cdot G_i ; 5 \right)$$

où :

- Mi la valeur de la matrice d'évaluation maximale du groupe principal i ;
- Gi le facteur de pondération du groupe principal i selon Tab.6 [2].

La valeur des indices individuels IAi est calculée à partir de la valeur maximale des matrices d'évaluation des dégradations du groupe principal correspondant, en ramenant les valeurs s'échelonnant entre 0 et 9 (Fig. 4) à une échelle allant de 0 à 5, commune à tous les indices d'état (Tab. 2). La relation utilisée est la suivante :

$$I_{Ai} = 5/9 \cdot M_i$$

où :

- Mi la valeur de la matrice d'évaluation maximale du groupe principal.

L'évaluation des dégradations du revêtement par le biais de la matrice d'évaluation (M) conduit à une distribution de valeur discrète pour les indices individuels, qui ne peuvent prendre que les valeurs répertoriées dans la Fig. 5, contrairement aux indices d'état I2 à I5 dont la distribution de valeur est continue.

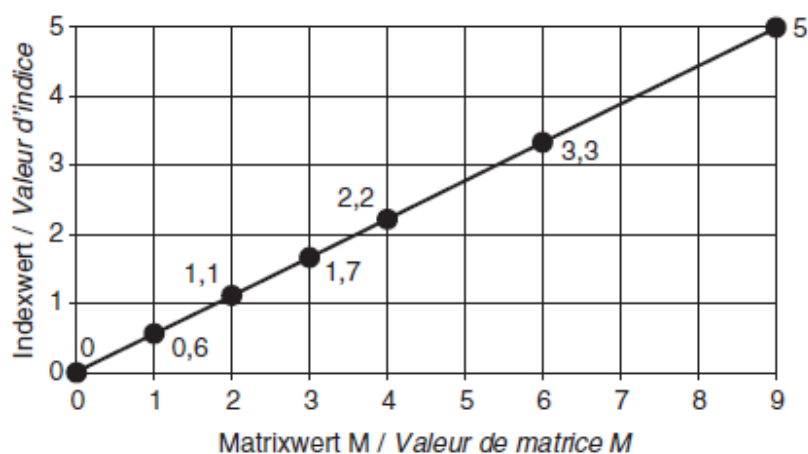


Fig. 5 : Abaque de conversion de la valeur de matrice M en valeur d'indice IAi (Fig.1 [3])

Finalement, les valeurs d'indice d'état et d'indice individuels, qui s'échelonnent de 0 à 5, sont traduites en note, 0 représentant la meilleure note (bon) et 5 la plus mauvaise (mauvais), comme illustré au Tab. 2.

Tab. 2 : Valeurs et note des indices d'état et indices individuels

Valeurs de l'indice I0 à I5 et des indices individuels IAi et IBi	Note
0 à 1	Bon
1 à 2	Moyen
2 à 3	Suffisant
3 à 4	Critique
4 à 5	Mauvais

Exigence pour les caractéristiques de surface des chaussées

Les exigences pour les valeurs mesurées des caractéristiques de la surface des chaussées sont définies dans la norme VSS 40 525 [4]. Ces exigences concernent essentiellement des valeurs de réception après travaux. Ainsi, suite à un renouvellement de la couche de roulement ou à la construction d'une nouvelle chaussée, les revêtements mis en place doivent satisfaire des valeurs minimales de planéité longitudinale, de déformation localisée ou d'adhérence.

La seule valeur seuil indiquée dans cette norme concerne la profondeur d'eau théorique t , caractéristique qui est généralement mesurée conjointement avec l'orniérage lors de l'évaluation de la planéité transversale (valeur PEA pour les routes nationales et cantonales dans la base de données MISTRA Trasse). Cette valeur dépend de la vitesse maximale signalisée :

- $V_{\max} > 80 \text{ km/h}$ (HLS, RGD) $t_{\max} : 4 \text{ mm}$
- $60 \text{ km/h} > V_{\max} > 80 \text{ km/h}$ (hors localité) $t_{\max} : 8 \text{ mm}$

La norme ajoute que les valeurs mesurées en localité doivent être évaluées de cas en cas car elles concernent principalement le problème des projections d'eau sur les trottoirs. Aucune valeur de seuil n'est indiquée pour ce type de route.

L'exigence sur la hauteur d'eau théorique trouve sa justification dans des considérations de sécurité de la circulation ; si cette limite ne peut pas être garantie, des mesures

d'urgence sont à prendre (art 10 [4]). Dans la pratique, cela se traduit généralement par la mise en place d'une signalisation indiquant le risque d'aquaplaning et/ou par l'abaissement de la limite de vitesse.

Choix et planification des mesures

La norme VSS 40 730b [5] vise à décrire la démarche pour le choix et la planification des mesures nécessaires à l'entretien des chaussées, sur la base du relevé d'état et l'évaluation des routes. Elle assure un lien entre la norme relative au relevé d'état et celles présentant les bases pour l'élaboration de mesure d'entretien à l'échelle du projet individuel (Fig. 6).

Le Tab.1 de la norme [5] de 1997 n'est toutefois plus actuel, les normes SN 40 731a et SN 640 732a adoptées en 1993 ayant été remplacées depuis 2013 par la norme VSS 40 731 [6]. La norme de renforcement SN 640 733a (1993) a quant à elle été remplacée par la norme VSS 40 733b (1997) traitant du renforcement à l'aide de mesures de déflexion. De manière similaire, pour les chaussées en béton, la norme VSS 40 735b remplace les normes SN 640 735a (1996) et SN 640 736a (1995). La Fig. 6 a donc été actualisée en conséquence.

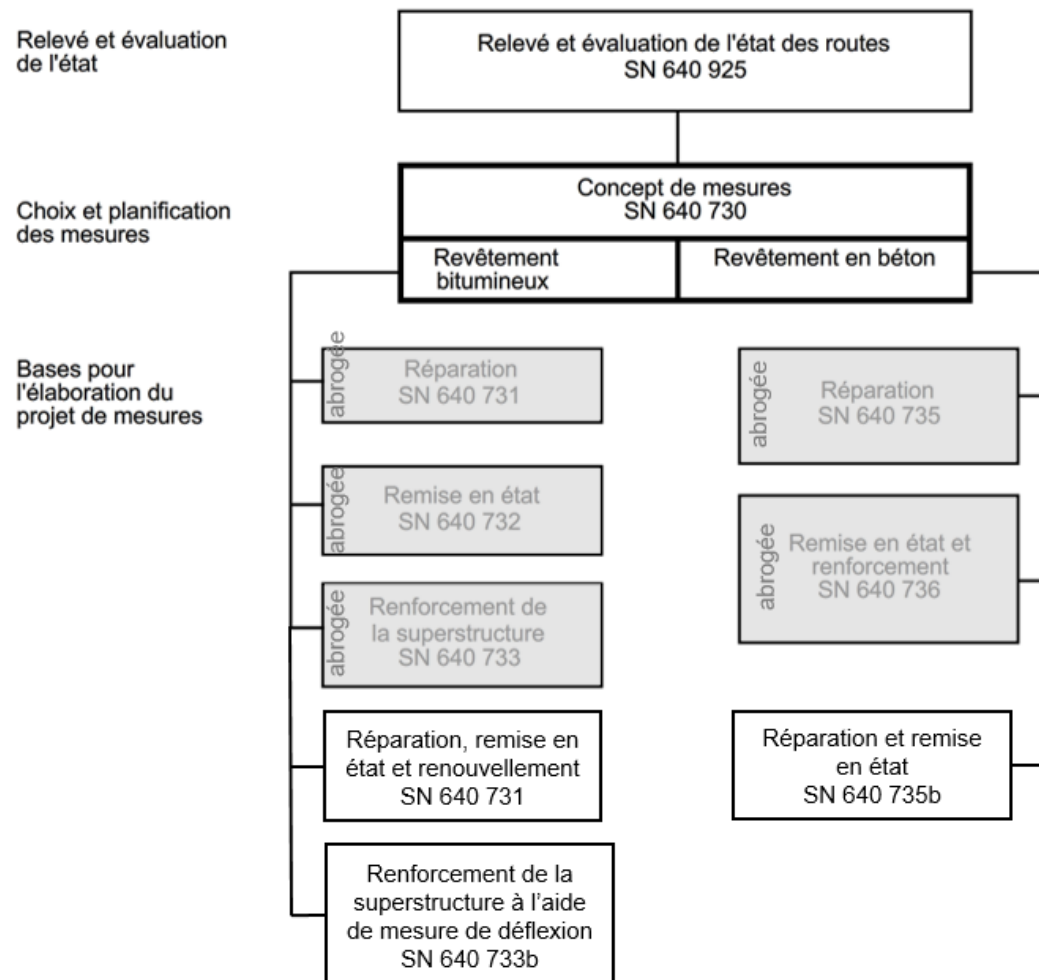


Fig. 6 : Entretien des chaussées, récapitulation des normes applicables (Tab. 1 [5]) après actualisation des normes.

Le concept de mesures de la norme VSS 40 730 [5] consiste à déduire les causes possibles des dégradations relevées à partir de leur aspect (genre, étendue, gravité) et de leur moment d'apparition, ceci afin de déterminer la mesure d'entretien nécessaire au niveau du projet. Ces éléments sont synthétisés dans la Fig. 7 tirée de [5], qui distingue trois niveaux de dégradation :

- Dégradations localisées ;

- Dégradations étendues du revêtement ;
- Dégradations structurelles.

Dans le cas où une combinaison de ces dégradations est rencontrée, la mesure doit être adaptée aux dégâts prédominants ou les plus graves.

Aspect des dégradations	Dégradations localisées		Dégradations étendues du revêtement			Dégradations structurelles	
	Dégradations localisées du revêtement (p.ex. désenrobage, fissures aberrantes, déformations, nids de poule) Fissures isolées et fissures de joint	Affaissements et flaches localisés Affaissements de bords Apparition locale de faïençage	Surface glissante résultant du ressuage ou du polissage	Perte de matériaux: usure, désenrobage, perte de sable ou de gravillons, pelades, nids de poule Fissures aberrantes, fissures de réflexion	Déformations du revêtement: ornières, bourrelets, tôle ondulée et déformation par poussée	Défauts d'uni importants par suite de soulèvements dus au gel Fissures isolées béantes	Flaches et affaissements prononcés Faïençage étendu
Moment de l'apparition				Principalement en hiver	Plein été	Période de gel	Période de dégel
Causes possibles des dégradations	Défauts de formulation et/ou défaut d'exécution	Portance et/ou sécurité au gel insuffisantes	Défaut de formulation et/ou défaut d'exécution	Défaut de formulation et/ou défaut d'exécution	Résistance insuffisante contre des déformations permanentes	Soulèvements différentiels dus à une résistance au gel insuffisante	Portance et/ou résistance au gel insuffisantes
	Vieillessement et/ou fatigue des matériaux	Talus instables, tassement par consolidation, érosion	Granulats polissables	Vieillessement avancé du liant	Liaison insuffisante des couches, fatigue du matériau	Drainage insuffisant	Drainage insuffisant
Normes SN à appliquer	Réparation SN 640 731		Remise en état SN 640 732			Renforcement de la super-structure SN 640 733	

Fig. 7 : Aspect et causes possibles des dégradations, chaussées avec revêtement bitumineux (Tab. 2 [5]), références aux normes SN caduques.

Dans l'optique de la planification et de l'établissement d'un projet d'entretien, cette norme développe également des concepts qui concernent notamment les relevés d'état :

- Unité de planification : Section de route où l'aspect des dégradations et les données du projet sont homogènes, en tenant également compte des revêtements en place, des sollicitations particulières (pente, carrefours), des conditions climatiques locales (partie à l'ombre ou ensoleillée) ou encore des constructions et entretiens précédents.
- Relevé complémentaire : Une évaluation de la mesure nécessaire uniquement basée sur un relevé visuel devrait être dans certains cas complétée par un relevé à l'aide d'appareil de mesure :
 - Mesure de la planéité transversale en cas d'orniérage ;
 - Mesure de la qualité antidérapante en cas de surface glissante ;
 - Mesure de portance en cas de graves dégradations structurelles.

Cette norme vise donc principalement à l'établissement de projets individuels d'entretien et n'aborde pas la question de la gestion de l'entretien à l'échelle d'un réseau, selon une démarche PMS exploitant de manière systématique l'évaluation résultant d'un relevé de l'état des chaussées.

Réparation, remise en état et renouvellement des couches en enrobé bitumineux

La norme VSS 40 731 [6] approfondit le concept de mesure afin de mettre en œuvre un projet de réparation, de remise en état ou de renouvellement. Elle propose une procédure qui se base sur l'ensemble de dégradations figurant dans le catalogue de la norme VSS 40 925b [2]. Le choix des mesures d'entretien est ici aussi envisagé à l'échelle d'un projet et non à l'échelle d'un réseau.

A travers différents tableaux, cette norme développe pour chacune des dégradations du catalogue :

- Les causes possibles de la dégradation réparties suivant leur origine (dimensionnement, matériau, exécution ou interfaces) ;

- Les études et mesures sur les matériaux à réaliser concernant la structure des couches, les liants, l'enrobé, la surface de chaussée ou le dimensionnement ;
- Le type de mesure à réaliser (immédiate, réparations, remise en état) avec des solutions de réfection (ES, DSK, remplacement couche de roulement, fraisage, renouvellement, etc.) ainsi que la référence aux normes correspondantes.

Gestion de l'entretien dans les agglomérations

La norme de base VSS 40 980 [7] pour la gestion de l'entretien dans les agglomérations développe et spécifie des éléments de la norme VSS 70 900a [1] au contexte particulier des agglomérations, qui engendre des contraintes liées notamment à l'urbanisme, à la politique ou au financement. La gestion de l'entretien doit suivre une stratégie basée sur le programme politique et les objectifs en matière de prestations. En raison de la densité élevée de construction en agglomération, il existe une importante dépendance entre le système routiers et les autres systèmes partiels. Aussi, en matière de planification des mesures, il faut privilégier la coordination afin d'exploiter des synergies et d'économiser des frais.

Une des conséquences pour la gestion de l'entretien concerne la surveillance qui est nécessaire pour connaître l'état actuel des systèmes partiels et pouvoir anticiper les dégradations futures, afin d'effectuer une planification stratégique. A cet effet, la norme [7] recommande de réaliser un relevé d'état des chaussées tous les 3 à 5 ans et estime que la détermination de l'indice I1 est généralement suffisante pour la planification.

Concernant les propositions de mesures pour les différents systèmes partiels, celles-ci doivent être basées sur l'état effectif et les objectifs stratégiques fixés. Pour chaque système partiel, la norme [7] suggère de travailler avec des mesures d'entretien standardisées, en établissant un catalogue de 5 à 8 mesures qui renseigne également leur prix indicatif.

Ces propositions de mesures constituent alors la base de la coordination des mesures entre les systèmes partiels. Pour chaque mesure, la norme [7] indique qu'il faut préciser au moins :

- Genre de la mesure ;
- Coût estimé ;
- Emplacement de la mesure ;
- Période de réalisation ;
- Priorité.

La norme [7] précise que les mesures ne sont déterminées en détail qu'après leur coordination et qu'il est souvent nécessaire de réaliser des relevés supplémentaires et des essais de matériaux.

Enfin, concernant les moyens d'aides à disposition des gestionnaires et décideurs, pour les étapes de planification et de coordination des mesures, la norme [7] fait référence au Guide Maintien de la valeur des routes [18].

2.2 Etat de l'art

Ce chapitre recense tout d'abord les différents travaux de recherche suisses qui abordent la question du choix des mesures d'entretien au travers de différentes approches pour la planification de l'entretien des chaussées. Des méthodes employées dans d'autres pays sont ensuite présentées afin d'en tirer des exemples d'indicateurs pertinents pour le choix des mesures.

2.2.1 Au niveau Suisse

Rapport de recherche VSS No 357 « Système de gestion de l'entretien (SGE) Développement d'un modèle de travaux, stratégie, et frais » (1996) [16]

Les auteurs de ce rapport proposent trois modèles d'appui au gestionnaire pour la planification des travaux de maintenance (modèle de travaux, modèle de stratégie et modèle de coût).

Le modèle de travaux s'apparente à un catalogue de travaux d'entretien comprenant 11 types de mesures, avec pour certaines une ou plusieurs variantes, qui proviennent des normes SN 640 730, 640 731 et 640 732 de 1993, remplacée depuis 2013 par [6]. Pour chaque mesure et ces éventuelles variantes, le catalogue contient :

- Description technique de la mesure ;
- Norme(s) de référence ;
- Domaine d'application de la mesure (*Anwendungsbereich*) ;
- Gestion du trafic et signalisation ;
- Coût de réalisation ;
- Rendement journalier.

Dans le cadre de la présente étude, le domaine d'application de la mesure (*Anwendungsbereich*) fournit des informations pertinentes quant aux dégradations que les mesures peuvent corriger, en précisant si la mesure est réalisable de manière locale ou sur l'ensemble de la surface de la chaussée et si elle est applicable pour des dégradations de faible gravité ou également lorsque celles-ci deviennent graves. Ces informations sont fournies sous forme de texte dans l'annexe 1 de [16]. Elles ne contiennent toutefois pas d'indications relatives aux valeurs d'indices d'état et d'indices individuels correspondant aux dégradations décrites, ce qui ne permet pas d'établir des seuils d'application des mesures.

Le modèle stratégie consiste en un catalogue de stratégies d'entretien pour différents niveaux de dégradations (des plus locales aux plus graves) réparties en trois catégories (dégradations de surface, déformation du revêtement et dégradations structurelles). Ces stratégies planifient l'entretien sur 20 ans, en combinant des mesures locales et une ou deux mesures sur l'ensemble de la chaussée, afin d'évaluer le coût actualisé de la stratégie (selon « modèle coût ») sur la période de 20 ans considérée. Chaque stratégie est encore adaptée pour les types de route tels que défini par la norme VSS 40 040b, à l'exception des routes collectrices (RC) et de desserte (RD).

Pour chacune des stratégies détaillées dans le catalogue, l'année optimale de réalisation des mesures d'entretien est déterminée à l'aide d'un modèle théorique de dégradation de l'état de la chaussée dans le temps (modèle de comportement) et en définissant un seuil d'intervention fixé sur la note d'état qui varie pour chaque type de route.

Le modèle de comportement proposé (Fig. 8) décrit l'évolution de l'état de la chaussée dans le temps d'après l'indice d'état¹ pour une chaussée correctement dimensionnée et pour une chaussée sous-dimensionnée. Ces modèles admettent qu'une chaussée sous-dimensionnée passe d'un état neuf à un état « mauvais » en 20 ans alors que pour une chaussée correctement dimensionnée cette durée est de 40 ans. Les zones d'intervention définissent les valeurs seuils de l'indice d'état pour lesquelles une intervention est jugée optimale. Ces valeurs sont plus élevées pour les routes à grand débit (RGD) que pour les routes de liaison (RL), ce qui signifie qu'un meilleur état est attendu sur les routes à fort trafic. Ainsi, le fait d'avoir des exigences variables suivant les types de route implique d'intervenir plus ou moins rapidement après l'apparition de dégradations.

En appliquant l'échelle de notation actuelle de l'indice d'état I1, les seuils d'interventions proposés dans [16] seraient alors :

¹ L'indice d'état (*Zustandswert*) considéré dans le rapport de recherche [16] est basé sur l'indice I₁ de la norme SN 640 925 de 1990, avec toutefois des différences dans les groupes principaux considérés (dégradations du revêtement, déformation du revêtement et dégradations structurelles dans [16]). Le calcul de l'indice d'état est similaire à celui de la norme de 1990 et se fait sur une échelle inversée par rapport à la norme VSS 40 925b actuelle, avec la relation : $\text{Indice d'état} = 5.00 - 1/10 \times \text{Somme}(M \times G)$. Cela signifie qu'une note entre 4.0 et 5.0 correspond à un état « bon », tandis qu'une note inférieure à 1.0 correspond à un état « mauvais ».

- Intervention sur une route à grand débit (RGD) $I1 = 1.0 - 1.2$ (état « moyen »)
- Intervention sur une route principale (RP) $I1 = 1.5 - 1.7$
- Intervention sur une route de liaison (RL) $I1 = 2.0 - 2.2$ (état « suffisant »)

Cette conversion doit toutefois être considérée avec une certaine réserve, ceci car l'indice d'état défini dans [16] ne tient pas compte des mêmes groupes principaux de dégradations (3 groupes contre 5 dans la norme [2] actuellement en vigueur) et considère une pondération différente de groupes principaux ($\Sigma Gi = 6$ alors que $\Sigma Gi = 10$ selon [2]).

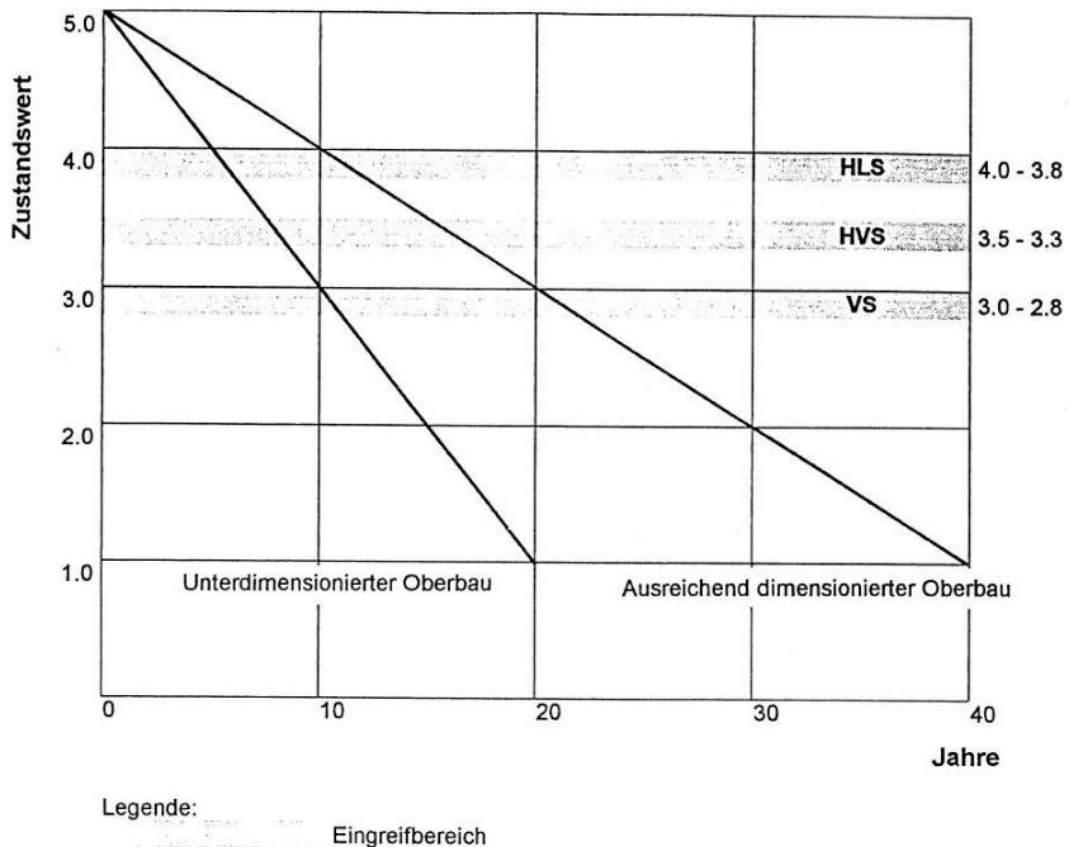


Fig. 8 : Modèle de comportement théorique considéré dans [16] pour une chaussée sous-dimensionnée et correctement dimensionnée, avec zone d'intervention pour RDG, RP et RL.

Paquet de recherche VSS 2004/710-716 « Planification des mesures de gestion de l'entretien des chaussées », Rapport de synthèse (2008) [10]

Ce paquet de recherche comporte 5 rapports de recherche ainsi qu'un rapport de synthèse [10] qui abordent les thèmes en lien avec la gestion de l'entretien suivants :

- EP1 – Mesures d'entretien standardisées [11] ;
- EP2 – Processus de dégradation et courbes de performance [12] ;
- EP3 – Dégradations de la surface et de la portance [13] ;
- EP4 – Bénéfice total – rapport coût-rentabilité des mesures d'entretien [14] ;
- EP5 – Modèle de décision coûts-valeur actuelle [15].

Les résultats de ces différents projets de recherche sont mis en commun dans un processus de planification des mesures (Fig. 9), qui se base sur un relevé d'état conforme aux normes [2] et [3]. Les données d'état sont ensuite agrégées par tronçon de 100 m puis par tronçons homogènes selon leurs indices d'état. Le catalogue de mesures standardisées établi dans [11] intervient ensuite dans la détermination des mesures d'urgence et dans l'élaboration des variantes de mesures d'entretien. Ces dernières font intervenir des prévisions de l'évolution de l'état selon les modèles développés dans [12].

Enfin, une optimisation économique est effectuée afin de retenir la variante optimale qui sera développée en projet d'entretien à l'aide des normes VSS 40 731 et 40 733b.

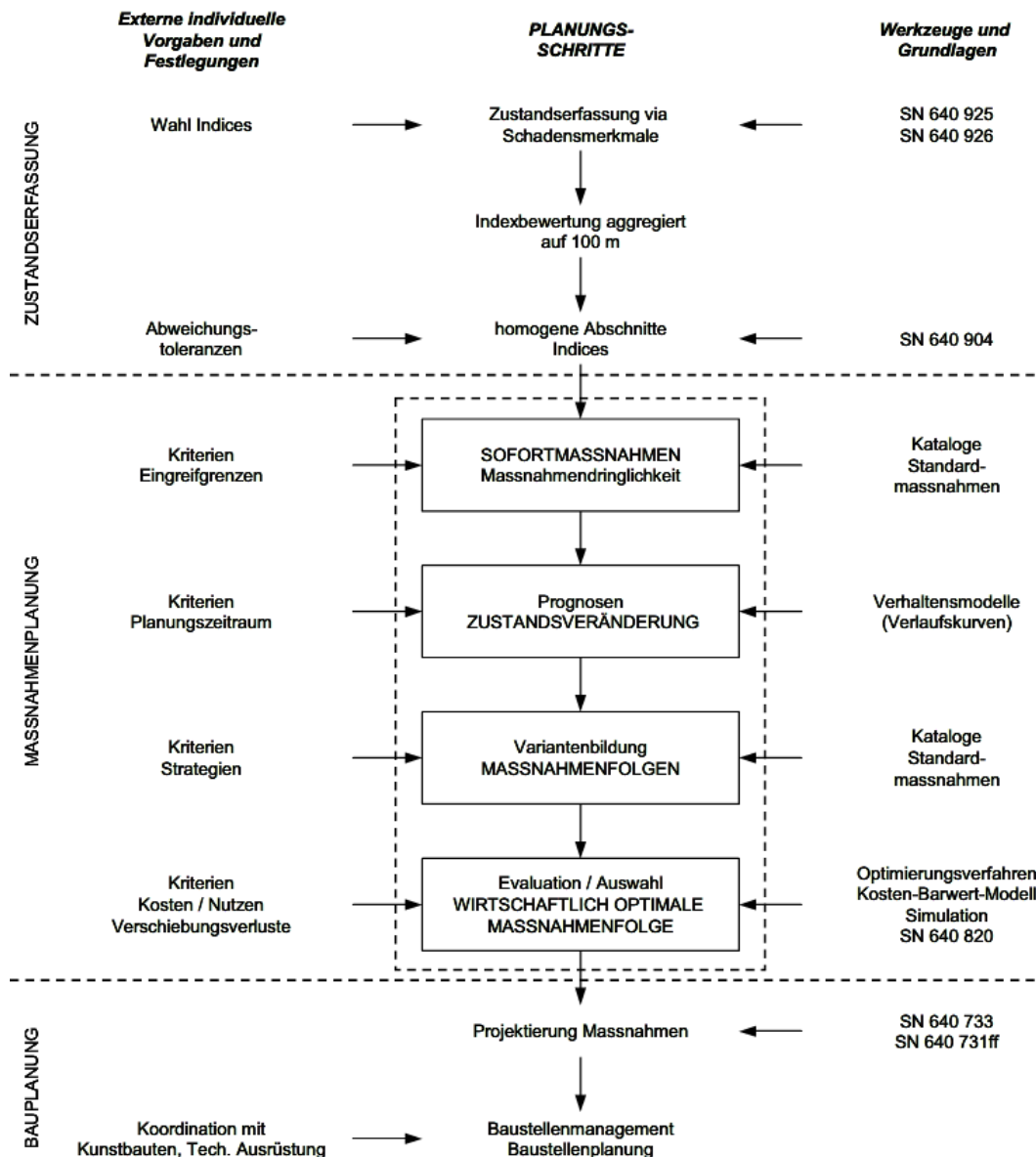


Fig. 9 : Processus de planification des mesures (Fig.6 [10]).

Rapport de recherche 1235 VSS 2004/711 « Mesures d'entretien standardisées » (2008) [11]

Ce rapport, qui fait partie du paquet de recherche VSS2004 / 710-716 sur la planification des mesures dans la gestion de l'entretien des chaussées, propose un catalogue de 37 mesures d'entretien « standardisées » qui recense pour chacune :

- Pour quelle(s) dégradation(s) la mesure est adaptée (*Eignung*) ;
- Pour quelle(s) dégradation(s) la mesure doit être exclue (*Einschränkung*) ;
- Le domaine de mise en œuvre de la mesure sur la base des notes d'indices d'état et des indices individuels (*Anwendungsbereich*) ;
- L'effet de la mesure sur l'état de la chaussée, par le biais de valeur de réinitialisation des notes d'indices d'état et d'indices individuels (*Rücksetzwert*) ;
- Le comportement de la chaussée suite à l'application de la mesure, par rapport aux lois d'évolution (*Wirkung*) ;
- Le coût de la mesure et son rendement journalier.

Tab. 3 Portées (Anwendungsbereich) des mesures d'entretien standardisées (Annexe 8.1 [11])

	Mesure	I1	IA1	IA2	IA3	IA4	IA5	I2	I3	I4	I5
1.	Réparations										
1.1	Pontage de fissures <i>Riss - Instandsetzung</i>	0.4-0.8		1.1-2.2		1.1-2.2					
1.2	Petite réparation de surface <i>Flächenflick, kleine Einzelfläche</i>	0.6-1.2		1.1-2.2		1.1-2.2					
1.3	Grosse réparation de surface <i>Flächenflick, grosse Einzelfläche</i>	0.5-1.5		1.1-3.3		1.1-3.3					
1.4	Réparation de fouille <i>Grabenflicke Instand stellen</i>	0.6-0.9					3.3-5.0				
1.5	Scellement de joint <i>Fugen RA ausgiessen</i>										
2.	Remise en état et renforcement										
2.1	Amélioration de la surface <i>Oberflächenverbesserungen</i>										
2.1.1	Enduit superficiel fin (trottoir) <i>OB fein (Gehweg)</i>	0.8-1.2	1.7-3.3	2.2-3.3		1.1-2.2				3.0-4.0	
2.1.2	Enduit superficiel rugueux <i>OB grob</i>	0.8-1.2	1.7-3.3	2.2-3.3		1.1-2.2				3.0-4.0	
2.1.3	Enduit superficiel bicouche <i>OB doppelt</i>	1.4-2.4	1.7-3.3	2.2-3.3	1.7-2.2	1.1-2.2				3.0-4.0	
2.1.4	Enduit superficiel synthétique <i>OB Kunststoff</i>	0.8-1.2	1.7-3.3	2.2-3.3						3.0-4.0	
2.2	Revêtement en couche mince <i>Dünnschichtbelag</i>										
2.2.1	Coulis à froid, 15 mm, sans fraisage <i>Kaltmicro (DASK), 15 mm, ohne Vorfräsen</i>	0.8-1.2	1.7-3.3	2.2-3.3		1.1-2.2					
2.2.2	Coulis à froid, 15 mm, avec fraisage	1.4-2.0	1.7-3.3	2.2-3.3	1.7-2.2	1.7-2.2		2.0-3.0	2.0-3.0		
2.2.3	Coulis à chaud, 20 mm, sans fraisage <i>Heissmicro (ACVTL), 20 mm, ohne Vorfräsen</i>	1.4-2.4	1.7-3.3	2.2-3.3		1.1-2.2					
2.2.4	Coulis à chaud, 20 mm, avec fraisage	2.3-3.2	1.7-3.3	2.2-3.3	1.7-2.2	1.7-2.2		2.0-3.0	2.0-3.0		
2.3	Rechargement (couche de roulement) <i>Hocheinbau (Deckschicht)</i>										
2.3.1	40 mm, sans fraisage	2.5-3.5	1.7-2.2	2.2-5.0	1.7-2.2	1.7-2.2	1.7-3.3	2.0-3.0	2.0-3.0	3.0-4.0	3.0-4.0
2.3.2	40 mm, avec fraisage	2.5-3.5	1.7-2.2	2.2-5.0	1.7-5.0	1.7-2.2	1.7-3.3	2.0-3.0	3.0-4.0	3.0-4.0	3.0-4.0
2.3.3	40 mm avec fraisage et renfort <i>40 mm mit Vorfräsen und Asphaltbewehrung</i>	2.5-3.5	1.7-2.2	2.2-5.0	1.7-5.0	1.7-3.3	2.2-5.0	2.0-3.0	3.0-4.0	3.0-4.0	3.0-4.0
2.4	Rechargement (couche roulement et liaison) <i>Hocheinbau (Deck- und Bindschicht)</i>										
2.4.1	100 mm, sans fraisage	3.0-4.0	3.3-5.0	3.3-5.0	1.7-3.3	3.3-5.0	3.3-5.0	2.5-3.5	2.5-3.5	> 3.5	> 3.5
2.4.2	100 mm, avec fraisage	3.0-4.0	3.3-5.0	3.3-5.0	1.7-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	2.5-3.5	> 3.5	> 3.5	> 3.5
2.4.3	100 mm, avec fraisage et renfort	3.0-4.0	3.3-5.0	3.3-5.0	1.7-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	2.5-3.5	> 3.5	> 3.5	> 3.5
2.5	Remplacement (couche de roulement) <i>Tiefereinbau (Deckschicht)</i>										

1709 | Choix des mesures d'entretien à partir des relevés d'état des chaussées pour la planification de l'entretien

2.5.1	20 mm (trottoir)	3.0-4.0	1.7-2.2	2.2-3.3	0.6 -1.7	1.7-3.3	1.1-3.3				
2.5.2	40 mm	3.0-4.0	1.7-3.3	2.2-3.3	2.2-3.3	1.7-3.3	1.1-3.3	2.5-3.5	> 3.5	3.0-4.0	
2.5.3	40 mm avec renfort	3.0-4.0	1.7-3.3	2.2-3.3	2.2-3.3	1.7-5.0	1.7-3.3	2.5-3.5	> 3.5	3.0-4.0	2.0-3.0
2.6	Remplacement (couche de roulement et de liaison) <i>Tiefenbau (Deck- und Binderschicht)</i>										
2.6.1	100 mm	3.5-4.5	2.2-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	2.2-5.0	2.2-5.0	3.0-4.0	> 3.5	3.0-4.0	2.0-3.0
2.6.2	100 mm avec renfort	3.5-4.5	2.2-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.0-4.0	> 3.5	3.0-4.0	2.5-3.5
2.7	Réparation des ornières (fraisage, revêtement) <i>Spurrinnen – Instandsetzung (Fräsen, Belag)</i>										
2.7.1	2 traces de roue (1 voie)	0.8-1.8			2.2-3.3				3.0-4.0		
2.7.2	4 traces de roue (2 voies)	1.2-2.4			3.3-5.0				3.0-4.0		
3.	Renouvellement										
3.1	Renouvellement complet <i>Gesamt - Erneuerung</i>										
3.1.1	200 mm (Couches de roulement, de liaison et de base)	4.0-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	> 3.5	> 3.5		
3.1.2	250 mm (Fondation ACF, couches de roulement et de base)	4.0-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	> 3.5	> 3.5		4.0-5.0
3.1.3	400 mm (300 mm grave de fondation)	4.0-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	> 3.5	> 3.5		4.0-5.0
3.1.4	600 mm (400 mm grave de fondation)	4.0-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	> 3.5	> 3.5		4.0-5.0
3.2	Renouvellement des bords et accotements <i>Bankett- und Rand Erneuerung</i>										
3.2.1	Un côté, sans renouvellement du revêtement	0.8-1.8				1.7-3.3			2.0-3.0		3.0-4.0
3.2.2	Un côté, avec renouvellement du revêtement (recharge)	2.0-3.0	1.1-3.3	1.1-3.3	1.1-3.3	1.7-3.3			2.5-3.5		3.0-4.0
3.2.3	Deux côtés, sans renouvellement du revêtement	1.2-2.4				2.2-5.0			2.5-3.5		3.0-4.0
3.2.4	Deux côtés, avec renouvellement du revêtement (recharge)	3.0-4.0	1.7-5.0	1.7-5.0	1.7-5.0	2.2-5.0			3.0-4.0		3.0-4.0
3.3	Procédé de recyclage <i>Recyclingverfahren</i>										
3.3.1	200 mm KMF, 15 mm coulis à froid <i>200 mm KMF, 15 mm Kaltmicrobelag</i>	4.0-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	> 3.5	> 3.5		4.0-5.0
3.3.2	250 mm KMF, 40 mm couche de roulement	4.0-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	> 3.5	> 3.5		4.0-5.0
3.3.3	300 mm KMF, 100 mm couche de roulement et de base	4.0-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	3.3-5.0	> 3.5	> 3.5		4.0-5.0
		1.7 – 2.2 = L'indice I1 seul n'est pas suffisant pour la planification des mesures 1.7 – 2.2 = Principale(s) caractéristique(s) de déclenchement									

Les domaines d'application (Tab. 3) sont décrits sous forme d'intervalles de notes pour certains indices et sous-indices. La prise en compte de tel ou tel indice ou sous-indice dépend de la nature de la mesure et de sa capacité à réparer la catégorie de dégradations concernée par le(s) (sous)-indice(s) retenu(s). Ces limites d'intervalles de notes peuvent être assimilées à des seuils de déclenchement, soit la note à partir de laquelle la mesure est pertinente, mais aussi comme des seuils de limitation, soit la note au-delà de laquelle la mesure n'est plus (assez) efficace. La description des domaines d'application figure également dans un tableau en annexe de [11].

Parmi les domaines d'application décrits, ceux de certains indices sont indiqués comme étant les caractéristiques principales de déclenchement (indiqués en **gras** dans le Tab. 3), ce qui semble indiquer que le choix d'une mesure est plus fortement dépendant de ces indices mis en évidence. Les déclencheurs principaux les plus fréquemment proposés concernent les indices individuels IA2 (dégradations du revêtement), IA4 (dégradations structurelles) et l'indice d'état I5 (portance). D'autre part, les valeurs données pour l'indice I1 sont avant tout indicatives et ne doivent pas être considérées seules. L'indice I1 étant calculé à partir des indices individuels (IAi), il n'offre pas d'indication précise quant à la cause de dégradation et comment y remédier, contrairement aux indices individuels.

Les auteurs du rapport ne précisent toutefois pas de quelle manière les domaines d'application décrits doivent être utilisés pour le choix de la mesure dans le processus de gestion de l'entretien des chaussées. Il n'est notamment pas défini si les domaines proposés doivent être considérés de manière stricte et simultanée (toutes les conditions doivent être remplies) ou si l'une d'entre-elles suffit. La manière dont les déclencheurs principaux doivent être considérés n'est non plus spécifiée. Constituent-ils une condition nécessaire et obligatoire pour le choix de la mesure ? Enfin, certaines mesures ont exactement les mêmes domaines d'application, ce qui signifie que pour un état donné, le gestionnaire aura le choix entre plusieurs mesures, et devra baser son choix sur d'autres critères.

Il n'est non plus précisé comment doit procéder le gestionnaire dans le choix de la mesure lorsque toutes les informations ne sont pas connues, en particulier lorsque certains indices d'état n'ont pas été relevés. Ce cas est notamment rencontré dans les communes qui n'effectuent souvent qu'une évaluation de l'état des chaussées selon l'indice d'état I1 et les indices individuels IAi, au moyen d'un relevé visuel. D'autre part, même pour les réseaux cantonaux ou nationaux, il est rare que la portance (indice d'état I5) soit évaluée sur l'entier du réseau, en raison du rendement et du coût de la mesure de déflexion. Ces mesures sont davantage envisagées comme investigation complémentaire lors de l'élaboration de projets particuliers.

Le catalogue des 37 mesures d'entretien standardisées a été établi à la suite d'une consultation auprès de tous les cantons suisses et des 20 communes les plus peuplées de suisse. Des réponses ont finalement été fournies par 11 cantons et 8 communes (Tab. 4). Il est intéressant de relever que toutes ne disposaient pas à cette époque d'un catalogue de mesure d'entretien, et que ceux-ci contenaient au maximum une quinzaine de mesures.

Tab. 4 Synthèse des catalogues de mesures fournis par les cantons et les communes (Tab.4 et 5 [11])

Canton	Catalogue de mesure ?	Nombre de mesures (chaussée bitumineuse)
AI	Non, en préparation	-
BE	Oui	14 (y compris distinction selon la classe de trafic)
BL	Non, en préparation	-
FR	Oui	3
GE	Non	-
NW	Non	-
SZ	Oui	15
TG	Oui	18
TI	Oui	9
ZG	Non	-
ZH	Non	-
Commune	Catalogue de mesure ?	Nombre de mesures (chaussée bitumineuse)
Bern	Oui	14 (y compris distinction selon la classe de trafic)
Emmen	Non	-
Köniz	Non	-
Lausanne	Non	-
Lucerne	Non	-
Schaffhouse	Non	-
Winterthur	Non	-
Zürich	Oui	4

Rapport de recherche VSS No 390 « Système informatisé de gestion des chaussées » (1997) [17]

Ce rapport de recherche mène une étude comparative de systèmes de gestion de l'entretien des chaussées basée d'une part sur une méthode de priorité des interventions et d'autre part sur une démarche d'optimisation du choix des interventions. Cette seconde démarche est réalisée à l'aide du logiciel VIAPMS (devenu par la suite dTIMD, développé par l'entreprise canadienne Deighton).

Cette étude comparative est menée sur des tronçons d'entretien du réseau cantonal neuchâtelois ainsi que sur la route nationale N5 sur le territoire du canton Neuchâtel. Elle se base sur des données d'état agrégées issue de campagnes de relevé :

- Indice d'état I1 (sur la base d'un relevé sommaire)
- Indice d'état I2
- Indice d'état I3
- Indice global IG = $0.2 \cdot I1 + 0.45 \cdot I2 + 0.35 \cdot I3$
- Indice de portance IPC (l'indice I5 n'étant à l'époque pas encore normalisé), évalué en fonction des mesures au déflectographe Lacroix et de l'importance du trafic, et prenant les valeurs suivantes : 1 = bonne, 2 = suffisante, 3 = insuffisante.

Le logiciel d'optimisation utilisé dans cette étude requiert de définir des lois de comportement pour les caractéristiques d'état (modèles de comportement) et utilise un catalogue composé de 14 mesures d'entretien défini par le canton de Neuchâtel. Des règles d'application des mesures ainsi que l'influence des mesures sur les indices d'état ont également été définies sous forme de règles logiques qui permettent leur utilisation systématique dans un logiciel informatique. Les règles d'application, qui correspondent à

des seuils de déclenchement, sont rappelées dans le Tab. 5, où les valeurs des seuils ont été adaptées à l'échelle de notation actuelle de la norme VSS 40 925b [2].

Tab. 5 Règles d'application des mesures d'entretien utilisées dans [17]

	Mesure	Seuils de déclenchement
ESSN	Enduit superficiel simple avec liant modifié	$I1 > 0.5$ et $I1 < 1.5$ et $IPC = 1$ et $TJM < 10'000$
ESSD	Enduit superficiel double avec liant modifié	$I1 > 0.5$ et $I1 < 1.5$ et $I3 < 2$ et $IPC = 1$
RO	Remplissage des ornières	$I2 > 2$ et $I3 > 2$ et $I3 < 2.6$ et $IPC \leq 2$ et Type $\neq$ RN et Type $\neq$ bretelle RN
MF	Micro-tapis à froid	$I1 > 0.5$ et $I1 < 1.5$ et $I3 < 1.5$ et $IPC = 1$ et $TJM < 10'000$
CMN	Revêtement en couche mince avec liant normal	$I1 > 1$ et $I1 < 2.5$ et $I3 < 2.5$ et $IPC = 1$ et Zone = hors localité et $TJM < 10'000$
CMS	Revêtement en couche mince avec liant modifié	$I1 > 1$ et $I1 < 2.5$ et $I3 < 2.5$ et $IPC = 1$ et Zone = hors localité
FNT	Fraisage et pose d'un nouveau tapis AB11S	$I1 > 1.5$ et $I2 > 1.5$ et $I3 > 2$ et $IPC = 1$
REP	Renouvellement couche d'usure par Repave	$(I1 > 1$ ou $I4 > 3)$ et $IPC = 1$ et Zone = hors localité
REM	Renouvellement couche d'usure par Remix	$(I1 > 1$ ou $I4 > 3)$ et $IPC = 1$ et Zone = hors localité
DS40	Resurfaçage, 40 mm AB11S, liant modifié	$I1 > 1$ et $I1 < 3.5$ et $I3 < 3.5$ et $IPC < 3$ et Zone = hors localité
DS80	Resurfaçage 2 couches, 80 mm HMT/AB11S, liant modifié	$I1 > 2.5$ et $I2 > 2.5$ et Zone = hors localité et Type $\neq$ RN et Type $\neq$ bretelle RN
R100	Renforcement, épaisseur totale 100 mm	$I1 > 2.5$ et $I2 > 2.5$ et Zone = hors localité et Type $\neq$ RN et Type $\neq$ bretelle RN
R120	Renforcement, épaisseur totale 120 mm	$I1 > 2.5$ et $I2 > 2.5$ et Zone = hors localité et Type $\neq$ RN et Type $\neq$ bretelle RN
RR12	Renouvellement partiel sur 120 mm	$I1 > 2.5$ et $I2 > 2$

IPC : indice de portance ; 1 = bonne, 2 = suffisante, 3 =insuffisante

Le nombre important de mesures du catalogue (14) doit être relativisé du fait que l'usage de certaines mesures est restreint par des critères fonctionnels qui ne dépendent pas des caractéristiques d'état (situation, trafic, etc.).

Il apparaît également que certaines mesures présentent exactement les mêmes conditions d'application (p.ex. REP et REM). Ces mesures se distinguant par leur coût, le choix de la mesure est guidé par le critère économique qui rentre en ligne de compte lors du processus d'optimisation utilisé par le logiciel VIAPMS.

Contrairement au catalogue des mesures standardisées (qui n'avait pas encore été établi), les dégradations de surface sont considérées dans leur ensemble au travers de l'indice $I1$, et non pas au niveau des indices individuels IA_i , qui fournissent des informations plus précises quant à l'origine de la dégradation.

Guide pour le maintien de la valeur des routes [18]

Ce guide édité par l'Association des communes suisses et l'Union des villes suisses s'adresse aux responsables de l'entretien de réseaux routiers communaux mais également aux responsables des finances.

Se basant sur le modèle du maintien de la valeur décrit dans la norme VSS 40 981 (Fig. 10), il accompagne d'une part le gestionnaire dans le processus de relevé d'état et de planification des mesures d'entretien (approche *bottom-up*) et d'autre part dans l'inventaire de son réseau qui permet l'évaluation de la valeur de remplacement et de la dépréciation annuelle du réseau (approche *top-down*). Selon ce modèle, le maintien de la valeur du

réseau est atteint lorsque les montants des mesures d'entretien réalisées sont égaux aux montants de la dépréciation annuelle du réseau.

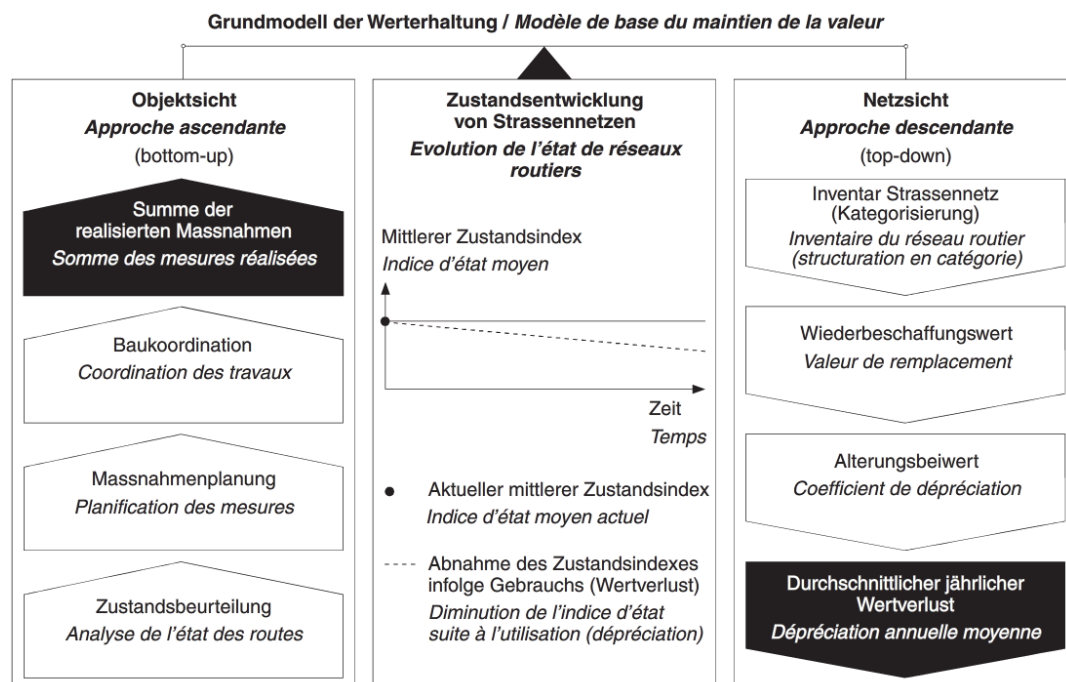


Fig. 10 : Modèle du maintien de la valeur (Fig. 1 norme VSS 40 981)

Concernant la planification des mesures, le guide prévoit que les personnes réalisant le relevé d'état formulent des propositions lors du relevé pour chaque section auscultée. À cet effet, le guide propose 5 mesures :

- Réparations localisées (entretien d'exploitation) ;
- Amélioration de la surface / enduit superficiel ;
- Renouvellement de la couche de roulement ;
- Renouvellement du revêtement avec renforcement partiel ;
- Renouvellement de la chaussée.

A partir des propositions des releveurs, le gestionnaire peut ensuite concevoir des projets d'entretien. Le choix de la mesure d'entretien est établi d'après les dégradations relevées qui lui indiquent la ou les mesures appropriées, à l'aide du Tab. 6. Le gestionnaire devrait également se référer à l'historique des secteurs (âge, travaux précédents, etc.) et devrait considérer les possibilités de coordination interservices.

L'approche décrite dans ce guide se contente de faire correspondre certaines dégradations avec certaines mesures appropriées, sans établir de seuils de déclenchement basé sur les notes d'indices d'état ou d'indices individuels. Le choix de la mesure ainsi que de l'année de réalisation sont laissés à l'appréciation du gestionnaire, qui sont définis au niveau de chaque projet plutôt qu'à l'échelle du réseau dans son ensemble.

Tab. 6 Mesures d'entretien appropriées selon les dégradations (Figure 2 [18])

Entretien	Entretien d'exploita- tion		Remise en état					Renouvel- ement
Groupe de mesure	Réparation localisé	Amélioration de la surface			Renouvellement du revêtement		Renouvel- ement du revêtement avec ren- forcement	Renouvel- ement de la chaussée
Description de la mesure	Réparation de fissures, joints, nids de poule	Léger fraisage, evt. après réparation préalable	Traitement superficiel, evt. après réparation préalable	Enduit superficiel (couche mince ou unique)	Enduit superficiel (plusieurs couches)	Renouvel- ement du revêtement	Renouvel- ement du revêtement avec ren- forcement de la chaussée	Renouvel- ement
Coût [CHF/m²]	10 – 15.-	15.-	20.-	30 – 50.-	50.-	80 – 100.-	140 – 250.-	250 – 400.-
Dégradations localisées								
Dégradations locales du revêtement : désenrobage, fissures diverses, fissures de joints, déformations, nids de poule	+	+	+	+	-	-	-	-
Affaissement, flaches et faïençage localisés, affaissement des bords	+/-	+	+	+	-	-	-	-
Dégradation du revêtement								
Surface glissante résultant du ressuage ou du polissage	-	+/-	+	+	+	+	-	-
Perte de matériaux : usure, désenrobage, perte de sable ou de gravillons, pelades, nids de poule	-	-	-	+/-	+	+	-	-
Déformation du revêtement : ornières, bourrelets, tôle ondulée et déformation par poussée	-	-	-	-	+	+	+/-	-
Dégradations structurelles								
Défauts de planéité importants, longitudinaux et transversaux, fissures isolées béantes	-	-	-	-	-	+/-	+	+/-
Flaches et affaissements prononcés, déformations, faïençage étendu	-	-	-	-	-	-	+	+/-
Durée de vie	5		6-8	10-12	25	35	50	85
+ : mesure appropriée +/- : mesure appropriée sous réserve - : mesure inappropriée								

2.2.2 Dans d'autres pays

L'objectif de cette revue des pratiques dans d'autres pays n'est pas fournir en détails les démarches PMS appliquées ou les mesures d'entretien réalisées, les techniques et la structures des coûts pouvant fortement varier d'un pays à l'autre et n'étant pas nécessairement représentatives de la Suisse. Cette revue vise avant tout à identifier les indicateurs d'état de la chaussée qui sont relevés et utilisés pour planifier des travaux d'entretien.

AIPCR – Association mondiale de la route

En préambule, le Tab. 7 propose une liste des indicateurs (indices) retenus par les administrations pour la gestion stratégique du réseau routier selon une publication du comité technique de l'AIPCR [20]. On constate que les indicateurs considérés en Suisse le sont également par d'autres pays. Certaines dégradations, telles que la fissuration, les nids de poule et l'arrachement sont toutefois intégrées dans un indice global (indice I0 ou I1) et non considérée individuellement. Enfin, concernant la planéité longitudinale, la majorité des pays se basent sur l'IRI, la Suisse faisant figure d'exception avec l'utilisation de son propre indicateur (sW). Relevons toutefois que la norme VSS 40 517 publiée en 2017 [8] inclut à présent cet indicateur, tout comme d'autres indicateurs prévus dans la normalisation européenne.

Tab. 7 Indices retenus par les administrations selon étude de l'AIPCR (tableau 6 [20]).

Pays	IRI	Compacité	Portance	Orniérage	Fissuration	Adhérence	Nid de poule	Arrachement	Fissures scellées	Drainage
Canada	X		X	X	X	X				
Estonie	X	X	X							
Allemagne	X			X	X	X				
Hongrie	X		X							
Japon	X									
Lituanie	X					X		X		
Nlle-Zélande	X			X		X				
Norvège				X						
Suède							X		X	X
Québec	X			X	X	X	X			
Suisse	~		X	X	*	X	*	*		

Légende : * = : intégré dans l'indice I0-I1.

Allemagne

En Allemagne, le comité de travail « Management de l'entretien des routes » de la FGSV a édité des documents de travail qui fournissent des indications et des recommandations. La série de documents K [24], qui formalise les lignes directrices du document [25] ainsi que les recommandations du document [26] à l'échelle de réseaux communaux, fournit des renseignements sur l'organisation et le déroulement du relevé des caractéristiques d'état des chaussées, sur leur évaluation en valeur d'état, et leur exploitation pour le management de l'entretien. La construction et la gestion d'une base de données routières sont également traitées.

Selon ces recommandations, les caractéristiques d'état relevées sont la planéité longitudinale et transversale, la substance de la surface (dégradations de surface), alors que l'adhérence et la capacité portante ne sont pas systématiquement relevées. Sur un réseau communal, ces relevés peuvent être réalisés à l'aide d'appareil de mesures ou, pour certaines caractéristiques, par relevé visuel. Les caractéristiques d'état et les grandeurs correspondantes, mesurées à l'aide d'appareil, sont indiquées avec leur échelle d'évaluation (facteurs de normalisation) dans le *Tab. 8*.

Tab. 8 Facteurs de normalisation des groupes de dégradations relevés avec appareil de mesures pour les chaussées bitumineuses pour les classes de fonction (FK) A et B (Tableau 3, sous-section K.3.1 [24])

Groupe de dégradation	Caract. d'état	Grandeur d'état	FK	Facteurs de normalisation			Valeur d'état	Indicateur d'état
				Valeur 1.5	Valeur d'alarme	Valeur seuil		
Planéité transversale	Ornières	SPH	A / B	0.1 mm	4.0 mm	6.0 mm	ZWSPH	Maximum de la profondeur d'eau fictive (valeur moyenne) gauche et droite
		SPT	A / B	4.0 mm	15.0 mm	25.0 mm	ZWSPT	Maximum de la profondeur d'ornière (valeur moyenne) gauche et droite
Planéité longitudinale	Défaut de planéité générale	SM4L_M	A	4.0 mm	12.0 mm	16.0 mm	ZWSM4L_M	Maximum des points de mesures au milieu de la latte de 4m
			B	4.0 mm	16.0 mm	25.0 mm		
		SM4L_A	A	1.0 mm	2.5 mm	3.5 mm	ZWSM4L_A	Moyenne des points de mesures au milieu de la latte de 4m
			B	1.0 mm	3.5 mm	5.0 mm		
							ZWSM4L	MAX (ZWSM4L_M, ZWSM4L_A)
		LWI	A / B	1.0	3.0	9.0	ZWLI	Indice des effets induits
Indicateur de substance (Couche de roulement)	Fissures	RISS	A	1 %	15 %	25 %	ZWRISS	Fissures, zone touchée (%)
			B	5 %	20 %	33 %		
	Réparations (patch)	FLI	A	1 %	15 %	25 %	ZWAFLI	Réparations, zone touchée (%)
			B	5 %	20 %	33 %		
	Autres dégradations de surface	OFS	A	1 %	15 %	25 %	ZWOFS	Autres dégradations, surface touchée (%)
			B	5 %	20 %	50 %		

Pour obtenir une évaluation objective des sections relevées, pour pouvoir les comparer entre elles, et pour pouvoir établir un indicateur global de l'état des chaussées, les grandeurs d'état relevées sont normalisées en valeurs d'état sur une échelle allant de 1.0 (très bon) à 5.0 (très mauvais). 4 catégories d'état sont délimitées par 3 valeurs frontières :

- Valeur 1.5, note de 1.5 – Objectif pour une nouvelle chaussée.

- Valeur d'alerte, note de 3.5 – Valeur à partir de laquelle une surveillance est nécessaire et éventuellement la planification de mesure.
- Valeur seuil, note de 4.5 – Valeur à partir de laquelle l'introduction de mesure constructive ou de limitation de circulation doivent être vérifiée.

Les valeurs des grandeurs d'état correspondant à ces frontières sont indiquées dans le Tab. 8. Elles permettent d'établir les fonctions d'évaluations convertissant les grandeurs mesurées dans leurs unités propres en note d'état adimensionnelle, à l'aide de fonctions linéaires entre les valeurs frontières. Les exigences n'étant pas les mêmes suivant la fonction de la route évaluée, les valeurs retenues pour ces facteurs de normalisation dépendent du type de route, deux classes de fonction (*Funktionklasse FK*) étant distinguées :

- FK A : Routes principales, de liaison et collectrices.
- FK B : Routes de quartiers et résidentielles.

Un exemple de fonction d'évaluation pour la caractéristique d'état des fissures est donné dans la Fig. 11, celle-ci n'admettant pas les mêmes valeurs frontières pour les routes de classe A et de classe B.

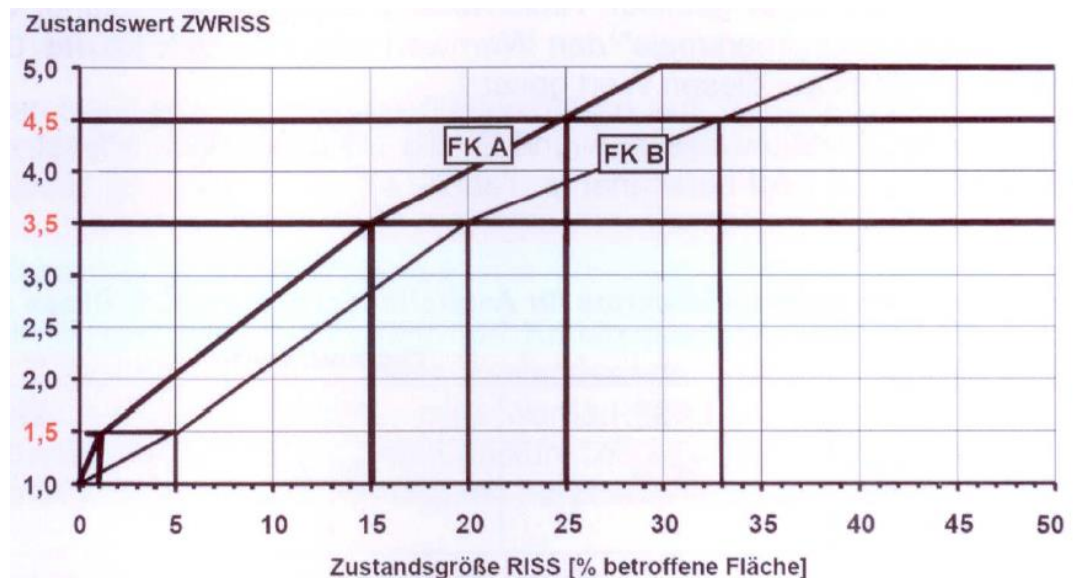


Fig. 11 : Fonction d'évaluation pour la caractéristique d'état « fissures », indiquant la valeur de l'indicateur d'état ZWRISS en fonction de la grandeur RISS (exprimée en % de la surface touchée), pour les classes de fonction (FK) A et B (Figure 4, sous-section 3.1, [24])

Dans l'optique de la gestion de l'entretien, mais aussi pour permettre une évaluation de l'état global du réseau, les valeurs d'état peuvent être pondérées en valeurs cibles partielles et en valeur globale :

- Valeur cible partielle d'utilisation (*Teilzielwert Gebrauch*) : décrit la praticabilité de la chaussée et le confort pour l'utilisateur.
- Valeur cible partielle de la substance (*Teilzielwert Substanz*) : décrit la qualité structurelle de la chaussée au niveau de sa couche de roulement
- Valeur globale : valeur maximale des deux valeurs cibles partielles.

Le processus de calcul des valeurs partielles et de la valeur globale est décrit dans la Fig. 12. A noter que les pondérations font parfois intervenir le maximum de deux valeurs d'état.

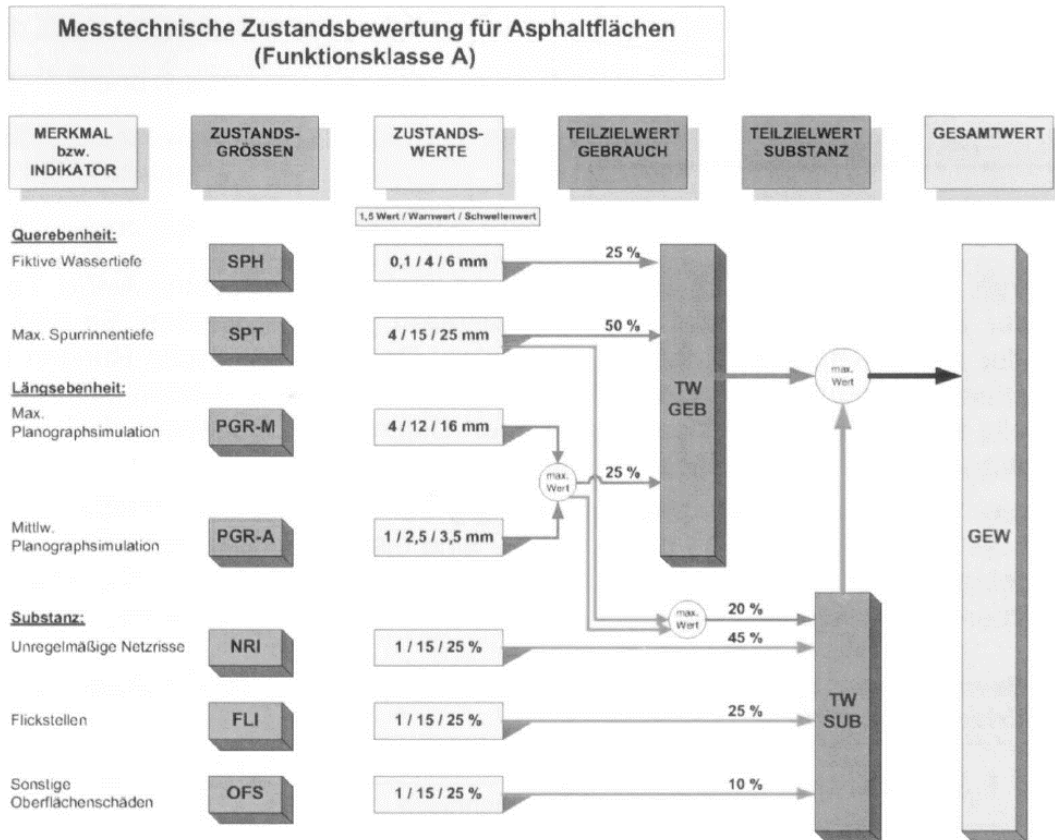


Fig. 12 : Calcul des valeurs cibles partielles et de la valeur globale à partir des grandeurs d'état issues de relevé automatique (Messtechnische) pour des chaussées bitumineuses, de classe de fonction A (Figure 1, sous-section 3.1 [24]).

Enfin, les recommandations concernant le management de l'entretien (sous-section 4.1 [24]) s'appliquent aux mesures d'entretien (*Instandsetzung*) et de renouvellement (*Erneuerung*) mais pas aux réparations ponctuelles (*Bauliche Unterhaltung*) ni aux agrandissements ou aux nouvelles constructions. Cette délimitation est équivalente au cadre de la procédure PMS telle qu'elle a été délimitée dans le présent projet de recherche. Il est notamment proposé de regrouper les tronçons relevés en tronçons d'état homogène puis en tronçons d'entretien.

Ces recommandations mentionnent la possibilité de mettre en place un processus de gestion assisté de moyens informatiques, notamment pour les étapes de priorisation des interventions sous contraintes budgétaires. Pour le choix des mesures, un exemple de modèle basé sur des classes de dégradations est présenté (Tab. 9), chaque sorte de mesure d'entretien étant associée à une ou plusieurs classes de dégradations ou de défauts. Ces documents édités par la FGSV [24] ne fournissent volontairement pas de seuils chiffrés permettant de distinguer des limites de déclenchement des mesures d'entretien, mais renvoient à plusieurs rapports de recherche étudiant la mise en place de procédure PMS informatisée.

Tab. 9 Classification des catégories de mesures, des sortes de mesures et des classes de dégradations ou défauts (Tableau 8, sous-section 4.1 [24]).

Catégorie de mesure	Sorte de mesure	Classe de défauts
Renouvellement <i>Erneuerung</i>	Remplacement des couches de roulement et de liaison	SVS, OFS, WAS, NSU
	Remplacement des couches liées	NSU, UOT
	Rechargement des couches de roulement et de liaison	NSU, UOT
Entretien <i>Instandsetzung</i>	Comblement d'ornières	SVS, WAS
	Revêtement en couche mince	OFS
	Traitement de surface	OFS
	Remplacement de la couche de roulement	SVS, OFS, WAS, TGS, NSU
	Rechargement de la couche de roulement	SVS, OFS, WAS, TGS, NSU
Abréviation	Classe de défauts	
SVS	Déformation des couches de roulement et de liaisons	
OFS	Dégradations de surface	
WAS	Rétention d'eau	
NSU	Insuffisance de l'ensemble de la superstructure (dégradations de surface mineures)	
UOT	Insuffisance de l'ensemble de la superstructure (dégradations de surface marquées)	
TGS	Insuffisance des couches liées (indicateur : ornières)	

Autriche

Le processus d'évaluation de l'état des routes en Autriche, tel qu'il est décrit dans [28], est relativement proche de celui en vigueur en Allemagne en ce qui concerne les caractéristiques relevées :

- Profondeur d'ornière (mm)
- Planéité longitudinale IRI (m/km)
- Adhérence (μ_{SRM})
- Fissuration (%)
- Dégradations de surface (%)

La transformation des caractéristiques mesurées en valeurs d'état est également comparable, celle-ci employant des fonctions de normalisation linéaires discontinues avec des valeurs frontières à 1.5, 3.5 et 4.5.

La méthodologie appliquée en Autriche se distingue toutefois lors du calcul des valeurs partielles d'utilisation et de substance et de la valeur globale. Le calcul de la valeur de substance fait en effet intervenir des caractéristiques d'état mise en relation avec l'âge de la couche de roulement (*Alter Decke*) et l'âge de la couche de base (*Alter Tragschicht*), comme indiqué dans la Fig. 13.

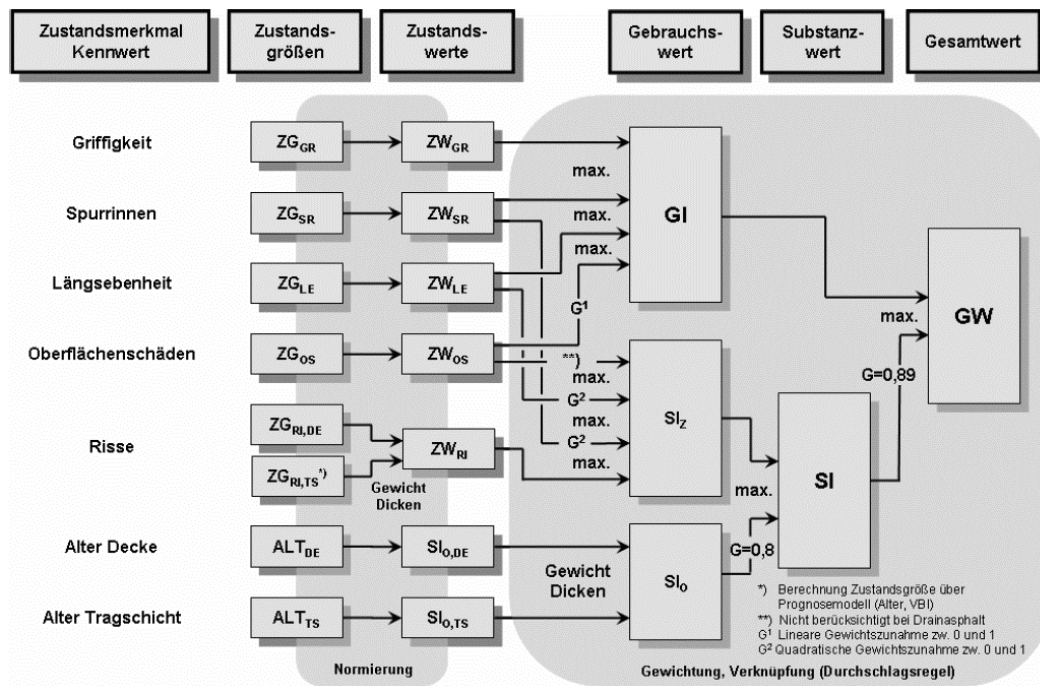


Fig. 13 : Calcul des valeurs cibles partielles et de la valeur globale à partir des grandeurs d'état en Autriche (figure 2-5 [28]).

La prise en compte de ces indicateurs s'avère utile lors de l'évaluation de l'état de chaussées dont seule la couche de roulement a été rénovée, et dont les couches inférieures sont plus âgées. En effet, dans une telle situation, les valeurs d'état pour la planéité ou les dégradations de surface seraient en principe très satisfaisantes, ce qui conduirait à des valeurs partielles comparable à une chaussée entièrement neuve selon l'évaluation allemande. Dans l'évaluation autrichienne, la contribution de la valeur d'état de l'âge de la couche de base, dont la note serait plus élevée, conduirait à une valeur partielle de substance plus élevée, reflétant vraisemblablement mieux l'état de cette chaussée. Néanmoins, cette précision supplémentaire ne peut être obtenue qu'avec une connaissance des structures existantes des chaussées, informations qui ne sont dans la pratique pas toujours connues.

France

Sur le réseau routier national non-concédé (RRN NC), géré par la Direction des infrastructures de transport, l'indicateur IQRN (Image Qualité des Routes Nationales) est évalué. Il s'agit ainsi d'un indicateur financier reflétant la gravité de l'état structurel et de surface du tronçon considéré. Son échelle de notation allant de 0 à 20 est linéaire par rapport au prix de remise en état mais pas de l'état. Les spécialistes en entretien considèrent que des mesures d'entretien, notamment préventif, sont déjà nécessaires en dessous d'une note de 18/20.

L'échelle de notation de l'IQRN, est indiquée à titre d'information :

- Note entre 0 et 5 : état « mauvais » ;
- Note entre 6 et 10 : état « plutôt mauvais » ;
- Note entre 11 et 15 : état « plutôt bon » ;
- Note entre 16 et 20 : état « bon ».

Selon le Guide GEPUR Volet n°1 de l'IDRIM [21], l'IQRN est évalué à partir d'un relevé visuel au moyen d'un véhicule de relevé à grand rendement (AGR). Différents modes opératoires sont définis dans la méthode LPC n°38-2 [23] dont les conditions d'utilisation dépendent du type de route mais aussi de l'objectif de l'étude et du relevé ; ainsi, un relevé comportant un plus grand nombre de dégradations est prévu pour les diagnostics pour un

entretien ou un renforcement (catalogue M1, 17 dégradations) que lors de la surveillance de l'état des chaussées (utilisation du catalogue M3, 8 dégradations).

Pour la surveillance de l'état, les 8 dégradations considérées pour le mode opératoire M3, et définies dans la méthode LPC n°52 [22], sont énumérées ci-après :

- Déformations (orniérage et affaissement)
- Arrachements / pelade / désenrobage localisé ou généralisé ;
- Glaçage / ressuage localisé ou généralisé ;
- Réparations ;
- Fissure longitudinale ou joint (pontée / franche / ramifiée) ;
- Faïençage ;
- Fissure transversale ou joint (pontée / franche / ramifiée ou dégradée) ;
- Nids de poule.

A partir de ces relevés, différentes notes sont établies :

- Note de structure : dépend des dégradations et des déformations relevés
- Note de surface : se divise en trois composantes :
 - Imperméabilité de la couche de roulement (fissure et arrachements par exemple) ;
 - Ressenti de l'usage (arrachements, nids de poule, orniérage, etc.) ;
 - Sécurité (macrotexture, déformations, glaçage, etc.)
- Note globale : 2/3 note structure et 1/3 note de surface

Le Guide GEPUR [21] s'adresse en premier lieu aux gestionnaires de routes départementales (correspondant aux routes cantonales suisses) et propose une démarche comportant la caractérisation du réseau et sa hiérarchisation, l'évaluation de son état et le choix de la technique d'entretien, ceci afin d'estimer les budgets d'entretien. Il décrit ainsi de manière globale les différentes étapes d'une approche PMS. Le guide fournit des exemples mais ne pose pas de critères fixes, attendant de chaque collectivité qu'elle définisse ses propres critères (catégorie de réseau, niveau de service, choix des techniques d'entretien, etc).

Le Guide GEPUR donne à titre d'illustration des exemples de pratiques, dans des départements, des méthodes de gestion de l'infrastructure et de choix de techniques d'entretien, en fonction de l'étendue des dégradations, avec pour chaque type de dégradation une grille d'analyse (se référant au relevé de l'IQRN). La Fig. 14 illustre à titre d'exemple la grille d'analyse pour les fissures transversales, qui précise la mesure envisagée suivant l'ampleur et l'étendue de la dégradation.

	0	20	30	100
0				COLMA
15				COLMA+ PURGE
25	PURGE	PURGE		COLMA+ PURGE
100				

Fig. 14 : Grille d'analyse pour la dégradation « fissures transversales », avec échelle de gravité en ordonnée et échelle d'étendue en abscisse [21].

Concernant le choix des techniques d'entretien, le guide GEPUR propose l'exemple d'un autre département où les techniques sont réparties selon la catégorie (hiérarchie) de la route. Selon le guide, une part plus élevée de mesures d'entretien légères pourrait être mise en œuvre sur des routes moins importantes. Dans le détail, le guide propose la répartition la suivante :

- Pour la catégorie de réseau la plus importante : 25% de béton bitumineux semi-grenu, 10% de matériaux bitumineux coulés à froid et 65% d'enduit superficiel d'usure.
- Pour la catégorie de réseau la moins importante : 5% de béton bitumineux semi-grenu, 10% de matériaux bitumineux coulés à froid et 85% d'enduit superficiel d'usure.

Québec

Le Guide [19] pour l'élaboration d'un plan d'intervention pour les infrastructures routières locales du Québec prévoit une planification en 7 étapes :

1. Description du réseau routier local (inventaire)
2. Elaboration d'un profil socioéconomique
3. Désignation des routes prioritaires (comparable à l'analyse fonctionnelle)
4. Bilan de l'état des routes prioritaires
5. Elaboration de la stratégie d'intervention
6. Evaluation préliminaire des coûts
7. Elaboration du plan d'intervention

Dans l'étape 4, ce guide liste des caractéristiques de surface des chaussées minimales et souhaitées pour établir une planification de l'entretien, qui sont indiquées dans le *Tab. 10*.

Tab. 10 *Caractéristiques minimales et souhaitables relative aux chaussées pour la production d'un plan d'intervention [19].*

Caractéristiques d'état	Minimales	Souhaitables
Confort au roulement IRI – été	X	
Confort au roulement IRI – hiver		X
Ornière (profondeur)	X	
Ornière (type)		X
Fissuration	X	
Déflexion		X
Macrotexture		X
Pelades / Nids-de-poule		X
Désenrobage		X
Ressuage		X
Courbe, pente, dévers		X
Fissures scellées		X

Le diagnostic des chaussées réalisé à cette étape vise à déterminer les causes de la dégradation et à établir les interventions appropriées pour résoudre le ou les problèmes en cause. Pour des réseaux de grande envergure, l'automatisation de cette analyse est possible mais une validation par un spécialiste est nécessaire.

A l'étape 5, des stratégies d'intervention sont établies avec pour objectif d'optimiser le rapport coûts-avantages. Les avantages sont définis comme l'amélioration nette de l'état de la route. Les seuils d'état admissible pour chacun des indicateurs sont à fixer par le gestionnaire en concordance avec la réalité socioéconomique, les objectifs établis pour l'état du réseau et du budget.

Finalement, selon la démarche proposée par ce guide, le plan d'intervention défini à l'étape 7 prévoit des interventions sur une période de 5 ans afin d'atteindre les objectifs politiques visées. Cette procédure correspond à la démarche stratégique du PMS considérée dans la présente recherche.

2.3 Relations théoriques entre caractéristiques relevées et mesures d'entretien

Les indices d'état définis dans la norme VSS 40 925b [2] renseignent sur différentes caractéristiques qui permettent d'exprimer l'état de la chaussée, et par extension les différents types de dégradations qu'elle peut présenter. Le type de dégradation ainsi relevées, ainsi que leur ampleur, exprimée par le biais d'une note d'indice d'état, fournissent donc des informations permettant d'identifier les causes probables des dégradations et par conséquent sur la manière de les traiter avec une mesure d'entretien.

Les indices d'état ont été définis dans le but d'exprimer chacun des caractéristiques distinctes de la chaussée et fournissent donc chacun et avec un minimum de redondance une information sur différents types de dégradations. Ces informations peuvent ensuite être combinées afin de mieux cibler l'origine des dégradations relevées et comment y remédier. Par exemple, un défaut de portance de la chaussée, qui se traduit par un indice d'état I5 obtenant une note élevée, peut également s'exprimer par la présence de fissures longitudinale visible à la chaussée qui sont quant à elles renseignées dans l'indice I1 exprimant les dégradations de surface, et son sous-indice IA4 concernant plus spécifiquement les dégradation structurelles (dont la présence traduit des défauts dans les couches profondes de la chaussée, donc des défauts de portance).

On propose ci-après une analyse des différents indices, avec la caractéristique de la chaussée qu'ils expriment, les causes des dégradations identifiées par ces caractéristiques, et les couches de la chaussée qui sont potentiellement endommagées et devraient être renouvelées dans le cadre d'un entretien.

Il faut bien évidemment rester prudent face à ces informations. Les indicateurs d'état sont tous relevés ou mesurés à la surface de la chaussée, aussi si certains peuvent fournir des indications sur de possibles dégradations des couches profondes, qui nécessiteraient alors le remplacement de plusieurs couches bitumineuses de la chaussée, ces indications doivent impérativement être vérifiées avant d'entreprendre effectivement une mesure. La réalisation d'une mesure effective est précédée en principe par la réalisation, d'investigations complémentaires qui sont généralement entreprises afin d'étayer ou d'adapter le choix de la mesure d'entretien. Les informations fournies par les relevés d'état demeurent néanmoins utiles pour le gestionnaire, en particulier pour l'élaboration d'une planification pluriannuelle des interventions d'entretien (démarche PMS).

Signalons encore que la norme VSS 40 731 [6] propose des mesures d'entretien pour chacune des 23 dégradations relevées pour l'indice I1, selon le même principe. Dans le présent rapport, ces propositions sont synthétisées par famille de mesure et pour les cinq groupes principaux de dégradations caractérisés par les sous-indices IA1 à IA5 de l'indice I1. En effet, la prise en compte des 23 dégradations dans une démarche PMS n'est généralement pas adaptée à cet échelon de planification stratégique.

2.3.1 Indice d'état I1 (dégradations de surface) et ses sous-indices

L'indice d'état I1 défini par la norme VSS 40 925b exprime les dégradations de surfaces de la chaussée. Celles-ci sont quantifiées à l'aide d'un relevé visuel.

L'indice I1 exprime l'ensemble des dégradations de surface, qui sont décomposée, pour les chaussées bitumineuses, en 5 sous-indices d'état IA1 à IA5, qui forment chacun des groupes de dégradations. Ces 5 groupes rassemblent des dégradations dont l'origine peut être commune, comme le sous-indice IA2 regroupant les dégradations du revêtement, ou le sous-indice IA5 des réparations, ou qui provoquent une perte d'une qualité de la chaussée, par exemple le sous-indice IA1 exprimant la surface glissante ou le sous-indice IA3i1 pour les déformations du revêtement.

La note de l'indice I1 constitue finalement une somme pondérée de ces différents groupes de dégradations. Son calcul est décrit au chapitre 2.1.

Dans l'optique du choix d'une mesure d'entretien, l'indice I1 renseigne avant tout quant à la nécessité d'effectuer une intervention, et l'état général de la chaussée tel qu'il est perçu par les utilisateurs de la route. Cependant, il ne fournit pas directement d'indications sur le type d'intervention nécessaire. En effet, un tronçon peut obtenir une note d'indice I1 élevée s'il présente une combinaison de 2 ou 3 sous-indices d'état avec des notes élevées, voire même une combinaison des 5 sous-indices chacun avec des notes modérées.

En revanche, les sous-indices d'état IA1 à IA5, puisqu'ils regroupent chacun des types de dégradations distinctes, fournissent davantage d'indications pour le choix de la mesure d'entretien.

Le Tab. 11 détaille les 5 sous-indices avec les dégradations qu'ils regroupent, les causes probables de ces dégradations, ainsi que les couches de la chaussée concernées par celles-ci et donc les mesures d'entretien qui pourraient être envisagées.

Tab. 11 Types de dégradations pour les sous-indices IAi de l'indice I1 [2], leur origine et les couches de chaussées concernées

Sous-indice	IA1	IA2	IA3*	IA4	IA5
Groupe de dégradation	Surface glissante	Dégradation du revêtement	Déformation du revêtement	Dégradation structurelle	Réparation
Dégradations incluses selon VSS 40 925b	Polissage	Usure	Ornières*	Fissures d'affaissement	Réparation
	Ressuage	Désenrobage	Bourrelets	Affaissements	(regroupe toute les dégradations précédentes, du moment qu'elles sont situées sur une réparation réalisée suite à une fouille)
		Pertes de gravillons	Tôle ondulée	Affaissements des bords	
		Pelades	Déformations de poussée	Soulèvements dus au gel	
		Nids de poule		Fissures longitudinales	
		Fissures de joints		Faiénçage	
		Fissures transversales		Fissures d'épaulement	
		Fissures diverses			
Origine des dégradations du groupe	Dégradation de la couche de roulement, au niveau de l'un de ces constituants (liant, granulat)	Dégradation de la couche de roulement, au niveau de l'enrobé ou l'un de ces constituants (liant, granulat)	Déformation de la couche de roulement et parfois des couches inférieures sous l'effet du trafic	Défauts de portance du sol support, de la couche de fondation, des couches bitumineuses inférieures	Remplacement localisé des couches de la chaussée lors d'une fouille.
Couches de la chaussée concernées	Surface de la couche de roulement	Couche de roulement	Couche de roulement	Couche de roulement	Couche de roulement
		Peut s'étendre aux couches bit. inférieures (nid-de poule)	Couches bitumineuses inférieures, suivant l'ampleur	Couches bitumineuse inférieures	Couches bitumineuse inférieures, suivant l'ampleur
				Couche de fondation, suivant l'ampleur	Couche de fondation, suivant l'ampleur
				Sol support, suivant l'ampleur	
Mesure d'entretien	Surfaçage, enduit Rempl. Couche de roulement	Surfaçage, enduit Rempl. Couche de roulement	Rempl. Couche de roulement Rempl. des couches bit.	Rempl. des couches bit. Reconstruction totale	Intervention localisée sur la réparation

*IA3i0 sans ornières, IA3i1 avec ornières

Cette analyse fait apparaître que certains sous-indices expriment des dégradations provenant uniquement de la couche de roulement, ne nécessitant donc qu'un entretien sur cette dernière, soit le remplacement de cette couche ou bien encore la recouvrir par une nouvelle couche ou un enduit superficiel. Dans le cas de la surface glissante (IA1), une mesure superficielle sur la surface de la couche de roulement visant à lui rendre sa qualité antidérapante, comme un micro-fraisage ou un grenailage, pourrait suffire.

D'autres groupes de dégradations indiquent par contre de probables défauts dans les couches bitumineuses, ce qui nécessiterait leur remplacement, voir même des défauts de portance de la couche de fondation voire du sol support, ce qui pourrait nécessiter dans les cas extrêmes la reconstruction de la chaussée. Le choix de la mesure doit dans ces cas tenir compte de l'ampleur de la dégradation, exprimée par sa note (et par extension son étendue et sa gravité). Par exemple, pour l'indice IA4, une note élevée (IA4 = 2.2, 3.3 ou 5.0), ou une gravité élevée (G = 3) peut indiquer que des travaux lourds, sur plusieurs couches bitumineuses voire une reconstruction totale, pourraient être nécessaires.

Enfin, le sous-indice IA5 des réparations constitue un cas particulier puisqu'il regroupe toutes les autres dégradations si celles-ci apparaissent au niveau d'une réparation (effectuée sur une fouille). Ces dégradations peuvent généralement être traitées à l'aide d'une mesure d'entretien localisée au niveau de la réparation et non pas sur l'ensemble de la chaussée.

Une dernière remarque concerne le sous-indice IA3i1 qui inclut les ornières, et l'indice d'état I3 exprimant la planéité transversale, qui est évalué à partir des profondeurs d'ornières. Lorsque les indices I1 et I3 sont tous deux disponibles (relevé combinant le relevé visuel et le relevé avec appareil de mesure), le sous-indice IA3i1 est généralement redondant avec l'indice I3. En effet les autres dégradations de l'IA3i1 (tôle ondulée, déformation de poussée) sont rarement rencontrées, ce qui rend ce sous-indice principalement dépendant des ornières. Les sociétés d'auscultation utilisent souvent directement la profondeur d'ornière mesurée pour évaluer ce sous-indice. Ainsi, lorsque l'indice I3 est également disponible, il est préférable de baser le choix de la mesure d'entretien sur ce dernier plutôt que sur l'IA3i1, son évaluation étant plus fine et plus précise.

2.3.2 Indice d'état I0 (dégradations de surface, sans ornières)

L'indice d'état est identique à l'indice I1, à l'exception près que son évaluation ne considère pas les ornières parmi les dégradations relevées. Il a été introduit pour les cas où les relevés d'état comportent l'indice I3, afin de ne pas comptabiliser les ornières deux fois.

Le sous-indice d'état IA3i0, qui ne contient pas les ornières, est donc en principe très peu corrélé à l'indice I3 et fournit une information complémentaire à l'indice I3 pour le choix de la mesure d'entretien. Dans la pratique, les dégradations de l'IA3i0 sont souvent trop peu fréquentes, ce qui limite le potentiel d'utilisation de ce sous-indice pour identifier des tronçons nécessitant des travaux.

2.3.3 Indice d'état I2 (planéité longitudinale)

L'indice d'état I2 exprime l'irrégularité du profil longitudinal, à partir d'une exploitation du profil longitudinal de la chaussée selon la méthode des valeurs d'angle W. La méthode de la valeur d'angle repose sur « la mesure de la variation angulaire de deux segments adjacents de 1 mètre de longueur » [29]. L'indice d'état I2 est calculé à partir de l'écart type de l'angle W, noté sW, sur l'intervalle d'exploitation donné.

Les défauts de planéité influencent le confort de roulement de l'utilisateur et la sécurité routière. Ils peuvent également fournir des informations concernant l'état de la route, puisque des dégradations de surface ou des dégradations structurelles dans les couches inférieures de la chaussée peuvent induire des défauts de planéité.

Les causes des défauts de planéité longitudinale sont multiples. La valeur sW est sensible à des défauts situés dans des longueurs d'onde allant de 0.3 m à 6 m [8]. Les irrégularités sur des longueurs d'ondes courtes peuvent être dues à des défauts ponctuels comme des fissures, nids de poule, ou encore à des joints de ponts. Des irrégularités dans les longueurs d'onde plus grandes sont générées par des déformations de plus grandes amplitudes, comme des affaissements de la chaussée, qui peuvent provenir des couches bitumineuses inférieures voire de la fondation.

Il n'est toutefois pas possible de faire correspondre directement une certaine valeur de sW avec un certain type de défauts ou de dégradations. En effet, une valeur élevée de sW, et donc une note élevée d'indice I2, peut-être dû aussi bien à une succession de défauts locaux qu'à des déformations importantes.

Il est cependant raisonnable de penser que des mesures d'entretien qui n'interviennent que sur la surface ou la couche de roulement ne seront probablement pas suffisantes pour corriger des défauts importants de la planéité longitudinale.

D'autres indicateurs de la planéité longitudinale sont décrits dans la norme sur la planéité longitudinale [8]. Certains d'entre eux permettent de mieux identifier certaines dégradations de la chaussée. Le lecteur trouvera plus d'information dans le rapport de recherche VSS2016/322 [30] traitant de ces autres indicateurs. Toutefois, ces indicateurs, mis à part l'IRI, ne sont à l'heure actuelle pas encore relevé de manière fréquente sur les réseaux suisses.

Précisons encore que, l'indice I2 est calculé à partir du sW en utilisant une règle d'évaluation qui dépend de l'importance de la route, selon la norme VSS 40 925b. Des exemples sont donnés ci-dessous.

Tab. 12 Exemples de valeur de l'indice I2 en fonction de sW et du type de route, évaluation selon VSS 40 925b

Valeur de sW	Note d'indice I2 selon le type de route		
	RGD	RP	RL/RC/RD
3.0 ‰	2.6 « suffisant »	2.0 « suffisant »	1.4 « moyen »
5.5 ‰	4.0 « mauvais »	3.5 « critique »	3.0 « critique »
8.0 ‰	5.0 « mauvais »	4.6 « mauvais »	4.0 « mauvais »

Dans l'optique de définir des seuils d'intervention ou pour le choix d'une mesure d'entretien, il faut être conscient que la note d'indice I2 intègre donc déjà une notion d'exigence, qui est plus sévère sur des routes importantes.

2.3.4 Indice d'état I3 (planéité transversale)

L'indice I3 est calculé à partir de la profondeur d'ornièrre ou de flache T. Cet indice exprime donc directement une dégradation des matériaux de chaussées. Les ornières influencent aussi la sécurité de l'utilisateur, augmentant le risque d'aquaplanage. En localité, elles peuvent constituer un risque pour les usagers de deux-roues.

Les ornières se forment principalement sous le passage répété des charges d'essieux. Les propriétés de l'enrobé et les conditions de mise en œuvre influencent significativement le développement de l'orniérage. Les flaches (affaissements) peuvent se former sous l'effet du trafic ou en raison de problèmes de portance de la chaussée ou d'instabilité des bords de la chaussée.

L'orniérage se manifeste principalement dans la couche de roulement, qui est la plus sollicitée. Il se peut cependant qu'il se développe d'abord dans une couche intermédiaire si celle-ci n'est pas assez performante vis-à-vis de l'orniérage, la déformation se répercutant sur la couche de roulement. Des cas d'orniérage des couche profondes sont parfois aussi rencontré, on parle alors d'orniérage structurel ou d'ornière à grand rayon.

Il n'est donc pas possible d'identifier la couche orniérante uniquement à partir de la valeur de la profondeur d'ornière, des investigations complémentaires étant nécessaires (prélèvement de carotte ou de tranche, essai d'orniérage, etc). Il n'est non plus possible de définir *a priori* une valeur limite de la profondeur d'ornière à partir de laquelle une mesure d'entretien devrait inclure, en plus du remplacement de la couche de roulement, le remplacement des couches bitumineuses inférieures. Quant aux mesures d'entretien de type enduit superficiel, en raison de leur faible épaisseur, ceux-ci ne peuvent corriger que de très faibles profondeurs d'ornières, de l'ordre de 5 mm voire 10 mm pour des enduits multicouches.

La profondeur d'eau théorique t est un autre indicateur de la planéité longitudinal qui est généralement calculée conjointement avec la profondeur d'ornière lors de campagne de relevé d'état. La norme VSS 40 925b ne prévoit toutefois pas d'indice permettant d'évaluer cette caractéristique sous forme de note. La norme fournit des valeurs indicatives du point de vue de la sécurité à ne pas dépasser de 4.0 mm pour les routes à plus de 80 km/h et 8.0 mm pour les autres routes.

Précisons encore que, tout comme l'indice I2, l'indice I3 est aussi établi en utilisant une règle d'évaluation qui dépend de l'importance de la route, selon la norme VSS 40 925b. Des exemples sont donnés ci-dessous.

Tab. 13 Exemples de valeur de l'indice I3 en fonction de T et du type de route, évaluation selon VSS 40 925b

Valeur de T	Note d'indice I3 selon le type de route		
	RGD	RP	RL/RC/RD
6.0 mm	2.0 « suffisant »	1.3 « moyen »	1.0 « moyen »
12.0 mm	4.0 « mauvais »	3.0 « critique »	2.4 « suffisant »
16.0 mm	5.0 « mauvais »	3.7 « critique »	3.0 « critique »

Dans l'optique de définir des seuils d'intervention ou pour le choix d'une mesure d'entretien, il faut être conscient que la note d'indice I3 intègre donc déjà une notion d'exigence, qui est plus sévère sur des routes importantes.

2.3.5 Indice d'état I4 (qualité antidérapante)

L'indice I4 est calculé à partir du coefficient de frottement mesuré à la surface de la chaussée, par la méthode de la roue bloquée sur surface mouillée selon les normes VSS 40 510 et 40 511.

Les causes conduisant à une perte de la qualité antidérapante sont multiples, s'agissant en autres, du polissage des granulats à la surface de la chaussée, de perte de la macrotexture de l'enrobé, de ressuage du liant, etc.

Les mesures d'entretien visant à rétablir la qualité antidérapante de la chaussée traite généralement la surface de la chaussée (mesure superficielle comme la pose d'un enduit ou d'un gravillonnage, ou visant reconstituer la texture de l'enrobé comme le micro-fraisage ou le grenailage) ou peuvent éventuellement conduire au remplacement de la couche de roulement si celle-ci ne présente pas les caractéristiques requises vis-à-vis de la glissance.

L'indice I4 permet au gestionnaire d'identifier des chaussées présentant un problème de glissance. A la suite de relevé, lorsque des chaussées sont jugées problématiques (dans un état « critique » ou « mauvais »), il est en principe tenu de prendre immédiatement des mesures pour assurer la sécurité des usagers et d'effectuer une étude approfondie dans les plus brefs délais. L'indice I4 ne semble donc pas pertinent dans l'optique d'une planification de l'entretien sur plusieurs années, des mesures devant être réalisées immédiatement. Il s'agit davantage d'un critère d'alarme.

2.3.6 Indice d'état I5 (portance)

L'indice I5 est calculé à partir de mesure de déflexions avec la poutre de Benkelman, selon la norme VSS 70 362, ou d'autres méthodes reconnues, et en calculant une valeur de déflexion déterminante pour une section homogène donnée à l'aide de la norme VSS 40 733.

Des déflexions importantes peuvent indiquer des défauts de portances des couches bitumineuses et/ou de la fondation de la chaussée. L'identification des couches potentiellement problématiques nécessite l'étude des bassins de déflexion (calcul inverse) et n'est donc pas possible uniquement avec l'indice I5. L'indice I5 constitue néanmoins un bon indicateur pour identifier des chaussées nécessitant un entretien lourd, soit le remplacement de plusieurs couches bitumineuses, ou un renforcement voire une reconstruction totale comprenant également la fondation.

Dans la pratique, l'évaluation de l'indice I5 est cependant rarement disponible à l'échelle d'un réseau, les appareils de mesures ne permettant actuellement pas d'effectuer des relevés à grand rendements. Des mesures de déflexion sont davantage réalisées lors de projet ciblé d'entretien et de réfection.

2.3.7 Synthèse

Les indices d'état définis dans la norme VSS 40 925b [2] renseignent le gestionnaire d'un réseau sur différentes caractéristiques et différents types de dégradation des chaussées de son réseau.

Ces indices, tels qu'ils sont définis, ne permettent par contre pas d'identifier avec une grande certitude quelles couches de la chaussée devraient être entretenues ou remplacées. En effet, ils sont tous mesurés ou relevés à la surface de la chaussée, de manière non-destructive ou sans faire de prélèvements dans la chaussée. Ils fournissent néanmoins des informations qui peuvent aider le gestionnaire à présélectionner une mesure d'entretien, ou à éliminer certaines mesures qui ne sont pas appropriées pour y remédier.

Tous peuvent donc être potentiellement utilisés pour la planification de mesures dans une démarche de gestion de l'entretien, à l'exception de l'indice I4, qui, comme mentionné précédemment, constitue une valeur d'alarme nécessitant la mise en œuvre de mesures immédiates.

Nous proposons finalement une synthèse dans le *Tab. 14*, pour chaque indice d'état, des couches de la chaussée que l'on peut identifier comme étant concernées (+) ou probablement concernée (–) par les dégradations ou défauts relevés par chaque indice et des mesures d'entretien qui seraient pertinentes pour y remédier (oui) ou qu'il faudrait écarter car pas adaptées/inefficaces (non).

Tab. 14 : Relation entre des indices d'état, les couches de chaussée concernées et les mesure d'entretien appropriées.

Indices d'état		IA1	IA2	IA3	IA4	IA5	I1	I2	I3	I4	I5
Couches de la chaussée concernées	couche de roulement	+	+	+	+	*		~	+	+	
	couches bit. Inférieures		~	~	+	*	Voir IAI	~	~		+
	couche de fondation			~	+	*		~			+
	sol support				~			~			~
Mesure d'entretien pertinente	Traitement en surface	oui	oui	non	non	*		non	limité	oui**	non
	Rempl. Couche roulement		oui	oui	oui	*	Voir IAI	oui	oui	oui**	
	Rempl. couches bitumineuses				oui	*		oui	oui		oui
	Reconstr. totale				oui			oui			oui

*IA5 : localisé au niveau des réparations

** I4 : mesure immédiate, pas dans une démarche PMS

3 Données récoltées et traitement

Le présent chapitre présente les données récoltées pour ce projet de recherche sur sept réseaux cantonaux, ainsi que sur une partie du réseau national, et deux réseaux communaux. Les données récoltées comportent d'une part des données d'état issues de campagnes périodiques de relevé, et d'autre part des données relatives aux travaux exécutés. Les données d'état doivent être antérieures à l'année de réalisation des travaux considérés, puisque le but de cette étude est de chercher à expliquer le choix de réaliser des travaux et le choix de la mesure d'entretien sur la base de l'état de la chaussée.

Le Tab. 15 résume les réseaux pour lesquels des données d'état et de travaux ont été récoltées, en précisant les années considérées. Il indique également les analyses réalisées et dont les résultats sont présentés aux chapitres 4 et 5.

Tab. 15 Données récoltées et analysées

Réseau	Etendue du réseau d'état - analysé	Données d'état - Année	Travaux - Période considérée	Analyse			
				exploratoire Swiss-SDI	systématique	systématique approfondie	validation
Cantonal	1'500-2'000 km						
A_11	1'500 - 2'000 km	– 2011	2012-2016	x	x		
A_16	500 - 800 km	2016	2017-2019	x	x		
B	500 - 800 km	2010	2012-2016		x	x	x
C	1'500 - 2'000 km	– 2013	2014-2017		x		
D	800 - 1'200 km	– 2015	2016-2017		x		
E_10	800 - 1'200 km	– 2010	2011-2014		x		
E_14	800 - 1'200 km	– 2014	2015-2018		x	x	x
F	1'200 - 1'500 km	– 2013	2014-2018	x ¹	x	x	x
G		2014	2015-2018		x		
National	~1'700 km voie						
N_13	~1'500 km voie	2013	2014-2017		x	x	x
N_17		2017	2018-2022	x	x		
Communal	500 - 800 km						
K1	0 - 100 km	2013-15	2015-2019		x		x
K2	Etendue du réseau analysé	2015-16	2016-2019		x		

¹: données du réseau F utilisées dans l'analyse exploratoire complémentaire de SDI

Les campagnes de relevé d'état retenues pour les réseaux étudiés ne sont volontairement pas les dernières disponibles, ceci pour pouvoir analyser sur plusieurs années les travaux

réalisés, et ainsi disposer d'un nombre suffisamment important de données concernant les mesures d'entretien.

Pour deux réseaux cantonaux et la partie de réseau national, deux campagnes de relevé et deux périodes de travaux ont été analysées afin de suivre l'évolution des tendances entre plusieurs campagnes. Cependant, les campagnes antérieures à 2010 n'ayant pas été considérées (notamment en raison de l'évolution des appareils de mesures), des campagnes plus récentes ont dû être utilisées, pour lesquels les travaux réalisés ensuite sont moins nombreux ou pas encore réalisés. Pour cette raison, l'analyse des campagnes plus récentes fait appel, dans le cas des réseaux A_16 et N_17, à des travaux planifiés, et qui n'avaient donc pas encore été tous réalisés au moment de la présente étude. Il est donc possible que dans quelques cas, les type de mesures finalement réalisées soit différents de ceux prévus, ou que certains travaux soient reportés.

L'étude exploratoire menée avec Swiss-SDI s'est concentrée sur un réseau cantonal (A) pour lequel on disposait de deux campagnes (A_11 et A_16), pour comparer des tendances sur un même réseau, ainsi que sur la partie du réseau national (N_17) afin que les exploitations effectuées soient aussi applicables sur une autre typologie de réseau. Une analyse complémentaire a également été réalisée sur un autre réseau cantonal (F) présentant une plus grande variété de travaux réalisés.

Par la suite, toutes les données de réseaux récoltées ont fait l'objet d'une analyse systématique. Quelques réseaux (E_14, F, N_13, K1) ont été analysés plus en détail, pour chercher à affiner les résultats précédents. Des propositions de seuils ont également été testées sur ces réseaux pour procéder à leur validation.

3.1 Données d'état récoltées et traitement

3.1.1 Indicateurs disponibles

Les indicateurs d'état relevés pour chacun des réseaux étudiés sont détaillés dans le Tab. 16. En plus des valeurs des notes, les bases de données analysées intègrent, lorsqu'elles sont disponibles, les valeurs liées qui permettent le calcul des notes. Par exemple, pour l'indice I2, en plus de la note d'indice, les données disponibles sur les réseaux cantonaux comprennent la valeur sWg (trace de gauche) et la valeur sWd (trace de droite) ainsi que leur maximum max_Sw qui est retenu pour le calcul de la note. Sur les routes nationales, les données relevées pour l'indice I2 comportent par contre les valeurs max_Sw et Wmax.

Tab. 16 Données d'état récoltées : Indices et valeurs liées

Réseau	Etendue du réseau analysé	Année	Nombre données sans NA	I0 / I1	IA1-IA5	I2	I3	I4	I5	Autre
Cantonal				(I1)						
A_11	1'500-2'000 km	2011	29'208	Note	Note, ExG, E, G	Note, max_sW, sWG, sWD	Note, max_T, Tg, Td	-	-	PEA
A_16	1'500 – 2'000 km	2016	29'709	Note	Note, ExG, E, G	Note, max_sW, sWG, sWD	Note, max_T, Tg, Td	-	-	PEA, %_Fiss
B	500 - 800 km	2010	12'679	Note	Note, ExG, E, G	Note, max_sW, sWG, sWD	Note, max_T, Tg, Td	-	-	PEA
C	500 - 800 km	2013	11'518	Note	Note, ExG, E, G	Note, max_sW, sWG, sWD	Note, max_T, Tg, Td	-	-	PEA
D	1'500 – 2'000 km	2015	34'814	Note	Note, ExG, E, G	Note, max_sW, sWG, sWD	Note, max_T, Tg, Td	-	-	PEA
E_10	800 – 1'200 km	2010	19'004	Note	Note, ExG, E, G	Note, max_sW, sWG, sWD	Note, max_T, Tg, Td	-	-	PEA
E_14	800 – 1'200 km	2014	19'911	Note	Note, ExG, E, G	Note, max_sW, sWG, sWD	Note, max_T, Tg, Td	-	-	PEA
F	800 – 1'200 km	2013	23'429	Note	Note, ExG, E, G	Note, max_sW, sWG, sWD	Note, max_T, Tg, Td	-	-	PEA
G	1'200 – 1'500 km	2014	5'380*	Note**	-	Note	Note	-	-	PEA
National				(I0)						
N_13	~1'700 km voie	2013	15'720	Note	Note, ExG, E, G	Note, max_sW, Wmax	Note, max_T, perc90, Td	Note, μ_80km/h, μ, sμ_80km/h	-	PEA
N_17	~1'500 km voie	2017	17'219	Note	Note, ExG, E, G	Note max_sW, Wmax	Note, maxT, perc90, Td	Note, μ_80km/h, μ, sμ_80km/h	-	PEA %_Fiss, %_ARRA, IRI, NBO, BLP
Communal				(I1)						
K1	500 - 800 km	2013-15	2'444	Note	Note, ExG, E, G	-	-	-	-	-
K2	0 – 100 km	2015-16	539	Note	Note ExG, E, G	-	-	-	-	-

*Données agrégées par secteurs **I1 calculé à partir d'autres indicateurs que les IAi.

Pour les réseaux cantonaux et la partie de réseau national, les données d'état disponibles sont renseignées par tronçons de 50 m (réseau cantonal) ou de 100 m (réseau national), à l'exception du canton G qui a transmis des données agrégées par secteurs d'entretien dont la longueur varie entre 2 m et 2845 m, avec une longueur moyenne de 250 m environ.

En outre, le réseau cantonal G présente la particularité de ne pas avoir de données pour les sous-indices IAi. En effet, sur ce réseau, l'indice I1 est calculé à partir d'indicateurs utilisés en Allemagne (AUN, T, %_RISS et %_FLI) en appliquant une formule développée à l'interne.

De manière générale, aucun des réseaux étudiés ne dispose de données d'indice I5 relevées sur l'ensemble de leur réseau. La problématique de la disponibilité de cet indicateur avait été évoquée au chapitre 2.3.6.

Il apparaît aussi que les routes nationales sont les seuls à disposer de données d'indice I4 pour l'ensemble de leur réseau. Comme cela a déjà été mentionné au chapitre 2.3.5, cet indice ne sera pas inclus dans l'analyse, car il conduit à prendre des mesures immédiates, qui n'entrent pas dans le cadre d'une planification pluriannuelle des interventions d'entretien.

Enfin, les réseaux communaux étudiés ne disposent que des données d'indice I1 et de ses sous-indices IAi, ceci car elles procèdent à un relevé visuel des dégradations, et non à un relevé à l'aide d'un appareil à grand rendement. Cette situation reflète le cas de nombreuses communes de taille modérée, pour qui un relevé à grand rendement est une opération qui n'est pas envisageable d'un point de vue financier.

On peut également préciser que pour les réseaux communaux, les tronçons sont parfois relevés par sections de tailles variables, en définissant lors du relevé visuel des tronçons dont l'état de dégradation est homogène, tandis que sur les réseaux cantonaux et nationaux, les données sont définies par tronçons de 50 m lors du dépouillement des relevés effectués à l'aide des appareils de mesures à grand rendement.

3.1.2 Traitement des données

Le traitement des données d'état consiste, pour la majorité des réseaux, à rassembler l'ensemble des indicateurs dans une table de données unique, les données étant séparées par indice dans la majorité des bases de données routières des cantons. Le découpage spatial de ces données est identique pour tous les indices, soit en principe des tronçons de 50 m.

Pour les réseaux cantonaux, ces données d'état concernent l'ensemble de la chaussée, mais sont généralement relevée dans une seule direction. Dans le cas du réseau B, les données ont été relevées par direction. On a alors considéré la pire des deux valeurs par direction, partant du principe que des travaux d'entretien serait défini sur la base du côté de la chaussée le plus défavorable. Ce traitement entraîne une augmentation de la valeur moyenne des indices d'état de 0.1 à 0.5 points.

Pour les réseaux communaux, l'indice I1 et ses sous-indices étaient dans les deux cas déjà renseignés dans une base commune.

Sur l'ensemble des réseaux, les tronçons relevés qui ne disposaient pas de données pour chaque indice étudié ont été exclus. Il se peut en effet qu'au cours du relevé, une mesure ou un relevé visuel n'ait pas pu être effectué. On dispose ainsi d'une base de données de taille unique regroupant tous les indices, sans éléments vides. Le nombre de données finalement traité est indiqué dans le Tab. 16.

3.1.3 Etat global des réseaux étudiés

L'état global des réseaux est illustré avec les valeurs moyennes des notes d'indice d'état dans le (Tab. 17). Ce résultat général permet de constater que les réseaux cantonaux étudiés sont dans des états globaux différents, avec des réseaux en état « bon », d'autre « moyen » et d'autre en état « suffisant ». Ces différences peuvent s'expliquer par la typologie de réseau (cantons de plaine vs. cantons de montagne), de leur longueur ou des moyens financiers disponibles pour l'entretien du réseau.

On peut donc s'attendre à ce que les travaux ne soient pas réalisés à un même état de dégradation suivant l'état initial du réseau. Ces différences dans les données de base permettront de développer la question d'une adaptation des seuils de déclenchement suivant l'état de base. Il y a également des différences importantes entre les 3 types de

réseaux étudiés ; la partie de réseau national est nettement en meilleur état, et les seuils doivent être adaptés à un niveau d'exigence plus élevé.

Tab. 17 Données d'état récoltées : Valeurs moyennes des indices

Réseau	Etendue du réseau analysé	Année	I0 / I1 moy.	IA1 moy.	IA2 moy.	IA3 moy.	IA4 moy.	IA5 moy.	I2 moy.	I3 moy.	I4 moy.
Cantonal			(I1)	(IA3i1)							
A_11	1'500-2'000 km	2011	1.75	1.01	2.02	0.90	0.48	0.41	1.63	1.34	
A_16	1'500 – 2'000 km	2016	2.00	1.13	2.36	0.83	0.66	0.52	1.53	1.00	
B	500 - 800 km	2010	1.85	1.03	1.74	1.35	0.75	0.27	1.96	1.93	
C	500 - 800 km	2013	2.19	1.06	2.50	0.91	0.74	1.03	1.96	1.21	
D	1'500 – 2'000 km	2015	2.28	1.07	2.34	0.95	1.18	0.61	2.40	1.33	
E_10	800 – 1'200 km	2010	2.16	1.49	2.02	0.82	1.00	0.32	3.00	1.42	
E_14	800 – 1'200 km	2014	2.33	1.27	2.80	1.10	1.39	0.58	3.00	1.75	
F	800 – 1'200 km	2013	1.77	0.83	2.29	0.65	0.60	0.41	1.56	1.18	
G	1'200 – 1'500 km	2014	1.20						1.48	0.82	
National			(I0)	(IA3i0)							
N_13	~1'700 km voie	2013	0.22	0.01	0.64	0.00	0.19	0.18	1.50	1.22	0.48
N_17	~1'500 km voie	2017	0.16	0.01	0.38	0.00	0.20	0.12	1.21	0.54	0.26
Communal			(I1)	(IA3i1)							
K1	500 - 800 km	2013-15	1.95	0.39	1.73	0.57	1.40	1.28			
K2	0 – 100 km	2015-16	2.29	1.67	1.50	0.70	1.72	0.79			

Ces résultats généraux font également apparaître des différences entre les notes obtenues pour les différents indices. Sur un même réseau, ces notes moyennes peuvent être jugées « bonnes » pour certains indices et atteindre un état moyen « critique » pour d'autres. Tous les indices n'identifient pas les mêmes niveaux de dégradations.

Dans l'ensemble, il apparaît que les sous-indices IA1, IA3, IA5 et dans une moindre mesure IA4 n'identifient que peu de dégradations sur les réseaux, étant majoritairement jugés « bon » sur les réseaux étudiés. Ces sous-indices devraient donc vraisemblablement s'avérer moins pertinents pour expliquer le choix des mesures d'entretien réalisées. Néanmoins, le sous-indice IA4 identifie parfois des parts non-négligeables du réseau avec un état jugé « critique » ou « mauvais », soit des dégradations structurelles qui peuvent induire des travaux sur les couches inférieures de la chaussée.

Pour la partie du réseau national analysée, ces résultats globaux indiquent que le réseau est dans un état nettement meilleur, avec des indicateurs moyens tous situés dans les catégories « bon », sauf le I2 et le I3 de 2013 dans la catégorie « moyen ». Certaines dégradations de surface, comme le IA1 et IA3i0 ne sont quasiment jamais rencontrées. En

conséquence, l'indice I0, contrairement à l'indice I1 des réseaux cantonaux, offre relativement moins d'informations sur l'état du réseau.

Enfin, concernant les réseaux communaux étudiés, on constate tout d'abord que les communes ont généralement recours à un relevé visuel de l'indice I1 et de ses indices individuels mais ne disposent pas des indices I2, I3, voire I4 ou I5, qui nécessitent un relevé avec des appareils de mesure. L'état du réseau K1 se situe au niveau de certains cantons, avec un indice moyen I1 jugé « moyen ». Le réseau K2 est dans un état un peu plus dégradé, avec un indice moyen I1 jugé « suffisant ».

Au niveau des indices individuels, les indices IA2 et IA4 montrent les notes les plus élevées, suivis par l'indice IA5 pour le réseau K1. Le sous-indice IA5, qui n'était pas déterminant sur les réseaux nationaux ou cantonaux, ne devrait pas être négligé pour les réseaux communaux. Les réparations (fouilles) sont en effet plus fréquentes sur les réseaux en milieux construits, dans les communes urbaines, en raison de la densité élevée des réseaux enterrés. Pour les réseaux communaux, il y a donc lieu d'évaluer si cet indice doit être pris en compte dans le choix d'intervenir, alors qu'il n'était pas déterminant sur les réseaux cantonaux et nationaux. Pour le réseau K2, l'indice IA1 est relativement élevé, la dégradation « polissage » ayant souvent été relevée dans cette commune. Des traitements de surface (mesure ES) pourrait alors être envisagés spécifiquement pour ce réseau.

3.2 Données de travaux récoltées et traitement

3.2.1 Informations disponibles et traitement

Les informations concernant les travaux fournis par les gestionnaires des différents réseaux étudiés recouvrent différentes périodes, que l'on indique dans le *Tab. 18*. Avec la contrainte de devoir disposer de données de travaux postérieures aux données d'état disponibles, nous avons été contraints de considérer pour une minorité de réseaux (A_16, N_17) des travaux planifiés et non-encore réalisés au moment de l'étude, mais pour lesquels le type de mesure d'entretien était déjà défini.

Les informations concernant les travaux réalisés proviennent de sources variées suivant les réseaux étudiés :

1. Base de données renseignant le nombre et le types de couches posées (MISTRA Trassee ou outil similaire) : Cantons B, C, D, E, routes nationales N
2. Liste des travaux renseignant le type de la couche de roulement et le nombre de couche de la structure : Canton F
3. Liste des travaux, avec type de travaux (parfois inconnu) : Canton A
4. Liste des travaux, avec type de travaux et description : Commune K2
5. Type de travaux renseigné par secteur homogène : Canton G, routes nationales N, Commune K1

Les informations concernant le type de travaux (points 3 et 4) ont fait l'objet d'un traitement, réalisés par les cantons, de manière à ce qu'ils correspondent aux types de travaux qu'on propose d'étudier dans la démarche. Lorsque les travaux ont été décrits selon le type et le nombre de couches (points 1 et 2), les types de travaux ont pu être directement déduits à partir du type ou de l'âge des couches.

Pour les réseaux où cette information est disponible, on détaillera le nombre de couches bitumineuses remplacées. Ceci permet une distinction supplémentaire entre la mesure « remplacement de la couche de roulement » (1 couche remplacée) et celle « renouvellement des couches bitumineuses », où il peut y avoir 2 à 3 couches bitumineuses remplacées. Précisons que le choix du nombre de couches renouvelées (2 ou 3) dépend généralement de la structure en place et de la classe de trafic et n'est donc *a priori* pas nécessairement lié à l'état de la chaussée.

Au-delà de 3 couches remplacées, on admettra qu'il s'agit d'une mesure « reconstruction totale », les couches supplémentaires mise en œuvre étant généralement des ACF, où l'on

peut admettre que la chaussée a été reprise et améliorée jusqu'à sa fondation, comme dans le cas d'une reconstruction totale.

Concernant la mesure « enduit superficiel », celle-ci a été considérée lorsque 1 couche a été réalisée et que celle-ci est un mélange bitumineux de type : DSK, DSA, MF, OB, ECF.

En outre, lorsque cette information était disponible, les travaux concernant la pose de revêtement phono-absorbants ont été exclus, partant du principe que ces travaux sont souvent planifiés pour des questions d'assainissement du bruit routier et non en raison de l'état de la chaussée. Des travaux ont ainsi été exclus des analyses statistiques pour les cantons B, C, et F., et pour les deux réseaux communaux.

3.2.2 Types de mesures réalisées

La répartition entre les types de mesures réalisées est détaillée dans le Tab. 18, qui indique le ratio (en longueur de réseau traité) entre les mesures et le nombre de chantiers réalisés par année pour chaque type (on considère en tant que chantier tout projet continu sur un axe). La part de réseau traitée annuellement est également indiquée.

On constate que les mesures d'entretien les plus fréquentes sur les réseaux cantonaux sont le remplacement d'une ou deux couches bitumineuses. Le remplacement de trois couches bitumineuses est moins fréquent, les chaussées cantonales n'étant pas nécessairement constituées de trois couches.

Les reconstructions totales sont plutôt rares, s'agissant de la mesure d'entretien la plus couteuse et la plus contraignante du point de vue de la réalisation. Quant aux enduits superficiels, ils n'ont pas été employés par tous les cantons sur les périodes analysées. Le nombre de projets pour ce type de mesure est relativement faible, mais des parts de réseau traitées plus élevées que pour les reconstructions totales, car ce type de mesure est réalisé sur des chantiers de longueur importantes en raison de son coût faible et son rendement.

Ces observations sont également valables pour la partie du réseau national analysée. La mesure reconstruction totale est très rarement envisagée, ceci car la couche de fondation des chaussées de ce réseau est de bonne qualité et n'a pas encore atteint la fin de sa durée de vie, les autoroutes suisses ayant toutes moins de 60 ans. Précisons encore que les travaux (période 2018-2022) renseignés comme étant des reconstructions totales concernent exclusivement des revêtements situés sur des ouvrages arts ; il s'agit alors d'un remplacement d'un ou deux couches bitumineuses (épaisseurs limitées sur les ponts) réalisé en même temps que l'assainissement de l'ouvrage. On n'a donc recensé aucune reconstruction de la chaussée jusqu'à sa fondation dans les travaux étudiés pour le réseau national.

Pour la commune K1, les travaux renseignés n'incluent pas les mesures déclenchées en raison de services tiers, ce qui peut expliquer le faible pourcentage de réseau traité (0.7% par année). Les travaux en lien avec l'assainissement au bruit n'ont non plus pas été fournis. Les travaux renseignés sont finalement ceux qui ne dépendent que de l'état de la chaussée. Il s'agit en majorité de travaux de reconstruction / renforcement de la superstructure, suivi par le remplacement de la couche de roulement. Les mesures de traitement superficiel (ES) analysées sur cette période n'ont été réalisées que sur des axes à très faible trafic (classe T1). Le questionnaire du réseau indique que cette mesure a surtout été retenue car les chaussées traitées étaient anciennes et ne disposaient pas d'une structure en enrobé classique. Il précise par ailleurs son constat que ce type de mesure n'est pas particulièrement efficace.

Pour la commune K2, contrairement à K1, aucune mesure de reconstruction n'a été réalisée sur la période de travaux analysés. Les chantiers les plus fréquents sont ceux d'enduits superficiels (2 à 3 par an), suivi du remplacement d'une ou deux couches bitumineuses, avec 1 chantier par an pour chaque cas. En incluant l'assainissement au bruit, on passe alors à environ 1.5 chantiers par année en moyenne.

En revanche, la commune K2 a également fourni des renseignements concernant les interventions d'entretien légères, qui sont réalisées ponctuellement sur le réseau. Ces mesures d'entretien légères regroupent le traitement des fissures (50% des cas), le point-à-temps (45% des cas) et les purges localisées (5%). Ces mesures légères permettent à la commune de traiter alors environ 10% de son réseau annuellement. En cumulant l'entretien léger aux autres mesures, 13% du réseau est entretenu chaque année. Ces mesures légères n'ont cependant pas le même effet sur l'état de la chaussée que les mesures d'entretien considérées dans ce projet de recherche. Il s'agit de mesure pour une amélioration à court-terme, généralement réalisées dans l'attente de travaux plus conséquents. Certains tronçons du réseau sont d'ailleurs parfois entretenus plusieurs années des suites, les mesures devant être répétées.

Tab. 18 Travaux réalisés : répartition des types de mesure d'entretien

Réseau	Période considérée	% du réseau traité par année	Type de mesure : % du réseau traité et nombre de chantiers par année				
			ES	1 couche	2 couches	3 couches	RT
Cantonal							
A_11	2012-2016	2.2%	0% 0	10% 4.2	80% 18.0	9% 2.8	1% 1.2
A_16	2017-2019	5.1%	0% 0	2% 0.7	88% 19.0	10% 3.7	0% 0
B	2012-2016	2.0% (3.8%*)	5% 0.6	40% 9.6	50% 19.6	0% 0.4	5% 2.8
C	2014-2017	2.7% (3.4%*)	13% 0.3	27% 7.8	39% 5.0	15% 5.8	5% 4.3
D	2016-2017	1.4%	0% 0	71% 47.0	15% 12.0	3% 3.5	11% 6.0
E_10	2011-2014	2.2%	19% 7.5	21% 41.0	36% 55.3	10% 10.3	14% 22.3
E_14	2015-2018	3.2%	24% 17.5	30% 52.0	35% 64.8	7% 10.5	3% 8.3
F	2014-2018	2.0% (2.9%*)	14% 2.0	9% 6.6	46% 14.4	27% 12.8	5% 4.8
G	2015-2018	2.0%	3% 1.8	6% 9.0		73% 57.5	18% 21.8
National							
N_13	2014-2017	5.0%	13% 3.3	33% 13.8	51% 16.5	3% 1.5	0% 0
N_17	2018-2022	4.1%	0% 0	46% 15	47% 13.6	4% 0.8	2% 4.0
Communal							
K1	2015-2019	0.7% **	0.1%** 3.6	0.16%** 1.6		0.04%** 0.8	0.37%** 5.6
K2	2016-2019	2.0% (3.3%*) 11.7%***	1.1% 2.3	0.5% 1	0.4% 1.3	-	-

* en incluant les tronçons avec assainissement au bruit routier

** pour la commune K1, une part de travaux est réalisée en raison d'autres réseaux (mesures tierces), mais n'est pas comptabilisée ici, où seule les mesures dites « PMS » sont considérées.

*** pour la commune K2, 9.7% du réseau est entretenu annuellement avec des mesures d'entretien légères (traitement fissures, purges, point-à-temps)

3.3 Autres données récoltées

D'autres données ont été fournies certains gestionnaires des réseaux étudiés concernant notamment :

- Données fonctionnelles relatives au réseau (hiérarchie des routes dans le réseau)
- Données de trafic (TJM)
- Données sur l'âge des couches ou le cycle de vie de la structure

N'étant pas disponibles pour l'ensemble des réseaux étudiés, ces données n'ont pas été intégrées dans la phase de traitement statistique systématique. Toutefois, quelques observations sont proposées dans le chapitre 5.4 concernant les facteurs autres que l'état pouvant influencer le choix d'une mesure d'entretien.

4 Analyse statistique exploratoire

Le présent chapitre résume les analyses statistiques exploratoires menées en collaboration avec la société Swiss-SDI. Le rapport complet établi par Swiss-SDI est remis sous forme d'annexe électronique au rapport de recherche, tout comme le rapport de l'analyse complémentaire.

La collaboration avec Swiss SDI pour effectuer une partie des analyses s'inscrit dans une volonté du centre de recherche de disposer d'un regard neuf sur les jeux de données récoltés, sans idées préconçues sur les indices d'état. De plus, en raison de la démarche retenue, en grande partie basée sur des analyses statistiques, il s'avère nécessaire de disposer d'un partenaire avec des compétences de pointe en mathématiques et en analyse de données.

4.1 Etapes d'analyses

Un cahier des charges a été défini afin de guider les analyses de Swiss-SDI, dont les buts s'inscrivent dans le cadre du présent projet de recherche, soit la définition d'indices pertinents et de seuils pour les familles de mesures. Quatre niveaux successifs d'analyse ont été proposés :

- a. **Détermination des indices permettant de trouver les zones en plus mauvais état** : Etape visant à définir les indices d'état pertinents et de mettre en évidence d'éventuelles redondances. Les valeurs liées aux indices et contenues dans les bases de données (notamment la caractéristique mesurée avant sa conversion en note) sont également considérées, celles-ci pouvant porter des informations complémentaires aux indices.
- b. **Analyse des données selon l'état et la présence ou non de travaux** : Il s'agit ici de trouver si certaines données d'état permettent d'expliquer pourquoi des travaux ont été effectués à certains endroits et non ailleurs, mais sans distinction des types de travaux.
- c. **Analyse des données selon l'état et le type de travaux** : Même analyse mais en distinguant les types de mesures, afin d'évaluer si le choix d'un type de mesure plutôt qu'un autre peut s'expliquer à partir des données d'état.
- d. **Identification de valeurs seuils** : à partir du point 3, peut-on identifier des états (des notes) à partir desquels un certain type de mesures est appliqué plutôt qu'un autre.

4.2 Réseaux et données pour l'analyse exploratoire

L'analyse exploratoire est appliquée sur un nombre limité de réseaux, pour orienter les analyses systématiques qui seront réalisées ultérieurement sur les autres réseaux. Afin que cette démarche soit confrontée à différentes typologies de réseau, un réseau cantonal et une partie de réseau national ont été retenus. D'autre part, pour pouvoir comparer l'incidence d'une évolution de l'état moyen du réseau sur les prévisions, deux campagnes de relevé d'un même réseau ont été analysées. Ainsi, trois sets de données ont été retenus :

- Réseau A_2011
- Réseau A_2016
- Réseau N_2017

Les données analysées comportent, en plus des notes d'indices d'état, les caractéristiques d'état qui permettent d'établir la note. Pour les indices individuels IA_i , on étudie ainsi les valeurs d'étendue E et de gravité G ainsi que leur produit. Pour $I2$ et $I3$, on étudie la caractéristique mesurée dans les traces de roues droite et gauche. Ces informations étant généralement disponibles dans les bases de données routières, il est intéressant d'évaluer

si elles peuvent fournir une information supplémentaire et/ou complémentaire à la note d'indice.

Comme dans les analyses systématiques, les données comportent également des informations sur la présence de travaux d'entretien réalisé après les relevées d'état ainsi que sur le type de mesure d'entretien réalisé. Enfin, des données annexes, disponible à l'échelle du réseau, ont également été incluses. Il s'agit de données renseignant sur l'importance des tronçons à l'échelle du réseau, comme la charge de trafic ou la hiérarchie. En gestion de l'entretien, ces données servent notamment à définir des critères fonctionnels, selon la norme VSS 40 908 [9].

Les données d'état considérées pour cette analyse sont détaillées dans le Tab. 19.

Tab. 19 Liste des indices d'état pour les données A_2010 et A_2016 considérés dans l'analyse exploratoire.

Nom des indices	Description
IA1_E	Valeur de l'étendue E correspondant au groupe de dégradations IA1 Surface glissante.
A1_G	Valeur de la gravité G correspondant au groupe de dégradations IA1 Surface glissante.
IA2_E	Valeur de l'étendue E correspondant au groupe de dégradations IA2 Dégradation du revêtement.
IA2_G	Valeur de la gravité G correspondant au groupe de dégradations IA2 Dégradation du revêtement.
IA3i1_E	Valeur de l'étendue E correspondant au groupe de dégradations IA3i1 Déformations du revêtement, avec ornières.
IA3i1_G	Valeur de la gravité G correspondant au groupe de dégradations IA3i1 Déformations du revêtement, avec ornières.
IA4_E	Valeur de l'étendue E correspondant au groupe de dégradations IA4 Dégradation structurelle.
IA4_G	Valeur de la gravité G correspondant au groupe de dégradations IA4 Dégradation structurelle.
IA5_E	Valeur de l'étendue E correspondant au groupe de dégradations IA5 Réparations.
IA5_G	Valeur de la gravité G correspondant au groupe de dégradations IA5 Réparations.
I1_Note	Note de l'indice I1 des dégradations de surface.
I2_Note	Note de l'indice I2 de planéité longitudinale.
I2_SWG	Sw trace de roue gauche, Sw: déviation-standard des angles W sur le segment.
I2_SWD	Sw trace de roue droite Sw: déviation-standard des angles W sur le segment.
I2_maxSW	Maximum de Sw gauche et Sw droite.
I3_Note	Note de l'indice I3 de planéité transversale.
I3_TG	Profondeur d'ornière T trace de roue gauche, valeur moyenne sur le segment.
I3_TD	Profondeur d'ornière T trace de roue droite, valeur moyenne sur le segment.
I3_maxT	Maximum de T gauche et T droite.
PEA_max-t	Maximum de PEA gauche et PEA droite.
PEA_tG	Hauteur d'eau théorique t trace de roue gauche, valeur moyenne sur le segment.
PEA_tD	Hauteur d'eau théorique t trace de roue droite valeur moyenne sur le segment.
Pour 2016 uniquement	
FISS_%	Taux de fissuration (%), calculé par 50m.

FISS_G-IA4	Valeur pondérée de la gravité (correspondant au sous-indice IA4) attribuée à chaque fissure ; vaut 0 si les fissures n'appartiennent pas au IA4 ; vaut 3 si l'ensemble des fissures ont une gravité IA4 = 3.
FISS_longueur	Longueur totale de fissures détectées automatiquement par un logiciel d'analyse d'image pour chaque intervalle de 50m.

Relevons encore que les bases de données comportent des caractéristiques d'état relatives à la fissuration de la chaussée (taux de fissuration, expression de sa gravité). Bien que ces valeurs ne soient pas normalisées et ne disposent de fait pas d'un indice d'état exprimé par une note, ces valeurs ont été intégrées car elles constituent un complément à certains indices individuels contenant, en partie, de la fissuration (indice individuel IA2 et IA4), ainsi qu'en raison du mode de relevé de cette grandeur automatisé qui réduit la part de subjectivité. Une définition du taux de fissuration tel qu'il est déterminé dans les normes allemandes peut être trouvée dans [27].

4.3 Analyse exploratoire sur les réseaux A et N

Les principales démarches effectuées et les résultats obtenus dans chaque étape d'analyse sont résumés dans ce qui suit.

4.3.1 Détermination des indices permettant de trouver les zones en plus mauvais état

Dans cette première étape, les distributions des valeurs de chaque caractéristique d'état ont tout d'abord été étudiées. Puis, les relations entre l'ensemble des indicateurs ont été quantifiées au moyen de la corrélation de Spearman, dont les résultats sont présentés sous forme de matrice (explications fournies dans les résultats).

L'analyse des distributions des valeurs a mis en évidence une différence importante entre les indices individuels IA_i , dont les valeurs sont discrètes, et les indices d'état dont la distribution est continue. L'évaluation des indices individuels, par la combinaison de trois valeurs possibles d'étendue et de gravité des dégradations observées, a logiquement une répercussion sur les distributions des valeurs qui comportent alors un nombre limité de valeurs possibles (valeurs discrète). Il est en outre apparu que certaines notes d'indices individuels étaient parfois surreprésentées. Pour les données analysées, c'est particulièrement le cas pour les indices IA1 et IA2, comme le montre le Tab. 20.

Tab. 20 Répartition des valeurs relevées par sous-indices (%) pour les données A_2016

Valeur relevées	IA1_G	IA2_G	IA3_G	IA4_G	IA5_G	IA1_E	IA2_E	IA3_E	IA4_E	IA5_E
0	2.3%	2.2%	54.8%	53.2%	62.8%	2.3%	2.2%	54.8%	53.2%	62.8%
1	94.1%	52.8%	40.7%	36.6%	36.8%	48.2%	0.2%	0.0%	11.8%	6.0%
2	4.5%	43.3%	4.4%	11.1%	0.4%	2.2%	2.6%	0.0%	19.3%	7.5%
3	0.1%	1.7%	0.1%	0.1%	0.0%	47.4%	95.0%	45.2%	15.7%	23.6%

Le contraste entre les valeurs est ainsi réduit, ces indices ayant des valeurs quasi-constantes. De plus, il apparaît dans le cas du IA2 que la grande majorité des tronçons relevés (95%) obtiennent la valeur d'étendue E maximale. Dès lors, l'identification de tronçon en plus mauvais état est compromise.

L'analyse des corrélations au moyen de matrice de Spearman fournit des informations sur la relation entre les différents indices. La corrélation de Spearmann se distingue par le fait qu'elle tient compte du rang des valeurs dans le set de données permettant de mettre en évidence des relations non linéaires, contrairement à une corrélation classique (Pearson)

évaluant une relation linéaire entre deux indicateurs. Une valeur de corrélation élevée (proche de 1) indique donc un lien fort entre deux indicateurs, au contraire d'une valeur faible (proche de 0). Une valeur négative indique une relation inversement proportionnelle.

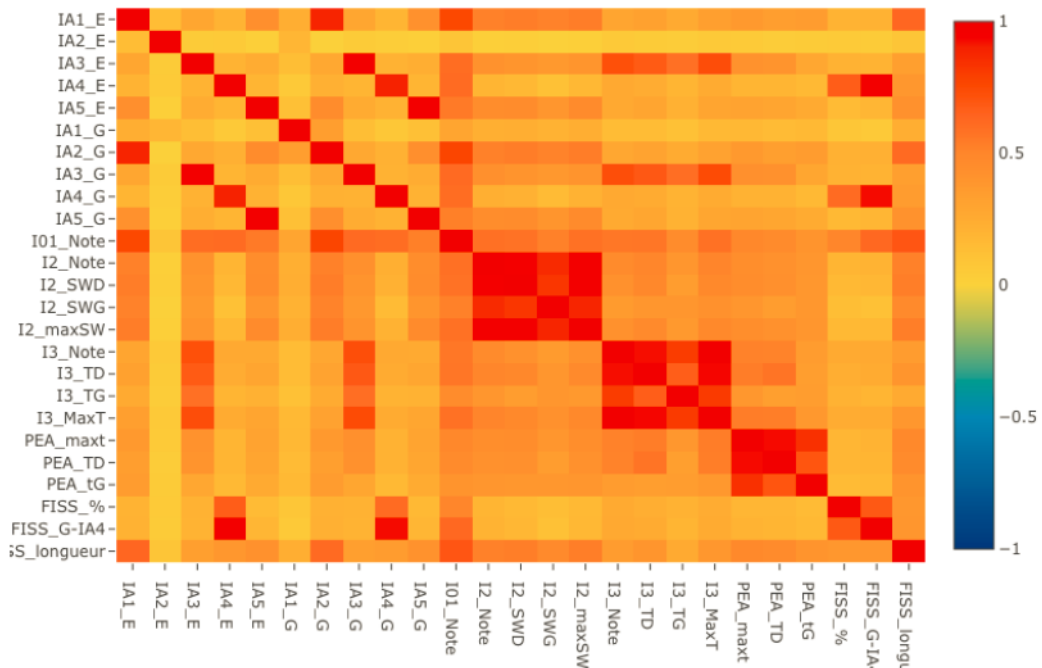


Fig. 15 : Matrice de corrélation de Spearman pour les données A_2016

La matrice représentée dans la Fig. 15 indique par exemple que, de manière attendue, la note I1 ou I0 est corrélée avec les valeurs des différents indices individuels IAi (valeur de corrélation proche de 1). Au niveau des indices individuels IA3, IA4 et IA5, les étendues ont une dépendance assez forte avec leurs gravités. Cela signifie que ce sont souvent les mêmes couples qui apparaissent dans les données. Pour ces trois indices, c'est en particulier la prédominance du couple {0 ; 0}, soit l'absence de dégradation, qui induit cette dépendance.

Pour les indices mesurés avec des appareils (I2, I3, PEA), il apparaît que la note est non seulement corrélée avec la caractéristique mesurée (I2 et max_sW par exemple), ce qui est logique, mais également avec les autres caractéristiques mesurées qui permettent d'établir la valeur qui est ensuite convertie en note (SWG et SWD). Il y a donc une certaine dépendance entre les valeurs mesurées dans les traces de roues gauche et droite, les valeurs les plus élevées étant généralement obtenues sur chaque tronçon. Ce résultat indique donc qu'au sein d'un même indicateur, une seule valeur pourrait être retenue pour représenter l'état de la chaussée, soit généralement la note d'indice.

Finalement, il n'apparaît pas de relation très marquée de dépendance entre différents indicateurs qui pourraient autoriser de n'utiliser qu'un d'entre eux. Tous les indicateurs sont porteurs d'une information pertinente et non redondante. Fait exception l'indice IA3 qui exprime généralement, et de manière discrète, la même dégradation que l'indice I3, soit la profondeur d'ornières (les autres dégradations de cette catégorie de dégradation étant très rares).

A titre d'information, on peut également signaler que le taux de fissuration (FISS_%) obtient une bonne corrélation avec le sous-indice IA4, ce dernier regroupant, en autres dégradations, des fissures (longitudinales et d'épaule, faïençage). En revanche, la corrélation est inexistante avec le sous-indice IA2, malgré qu'il regroupe également des fissures (fissures transversales, de joint ou diverses). D'autres dégradations sont donc vraisemblablement déterminantes lors de l'évaluation de ce sous-indice, notamment l'usure ou la perte de gravillons.

4.3.2 Définition d'un indice de qualité

Afin de répondre à la problématique de l'identification des zones en mauvais état et de la vérification des travaux (étape b de la démarche), un **indice de qualité** de la route est construit par étapes successives. Cet indice caractérisant l'état de la route sera comparé aux travaux effectués.

Partant du constat que des travaux d'entretien sont généralement réalisés non pas en raison de l'état de l'ensemble des tronçons d'un secteur mais plutôt les tronçons en plus mauvais état du secteur, la 1^{ère} étape de la démarche effectue une propagation et une uniformisation des données. Les valeurs des caractéristiques d'état de chaque tronçon sont ainsi recalculées en considérant le percentile à 90% des valeurs sur une fenêtre de +/- 250m autour du tronçon étudié. Ainsi, sur les 10 valeurs considérées dans la fenêtre, la seconde pire est retenue, ce qui permet de propager l'information *a priori* pertinente pour le choix d'effectuer des travaux. Ensuite, les résultats sont normalisés entre 0 et 1, pour disposer d'échelle identique pour tous les indicateurs (ce qui n'était pas le cas pour les valeurs mesurées, comme sW). Ainsi, un indice normalisé de 0 correspond à un état « bon », tandis qu'un indice normalisé de 1 correspond au pire état rencontré sur le réseau. L'effet de ce processus est illustré sur des données de note I2 dans la Fig. 16 ci-dessous.



Fig. 16 : Illustration de la démarche de propagation du mauvais état avec un percentile considérant les données sur une fenêtre de +/- 250m, puis de normalisation des résultats.

Dans une seconde étape, les différents indicateurs propagés et uniformisés sont combinés afin d'établir un indice de qualité unique. Un nouveau percentile à 90% est cette fois appliqué pour chaque tronçon de 50m à l'ensemble de ces indicateurs d'état, pour ainsi ne retenir qu'une valeur. Par exemple si 15 indicateurs sont considérés, la valeur retenue est interpolée entre la 2^{ème} et 3^{ème} pire valeur.

Finalement, la dernière étape consiste à définir un seuil sur l'indice de qualité au-delà duquel on estime que des travaux sont nécessaires. L'analyse des résultats a permis de retenir un seuil de 0.85 sur 1.00, ce qui implique que des travaux seraient nécessaires sur 15% du réseau.

Cette démarche a été confrontée aux travaux effectivement réalisés sur les réseaux analysés (Fig. 17). Il apparaît que, plus l'indice de qualité est élevé, plus une part importante de tronçons avec des travaux est identifiée. A l'inverse, peu de travaux ont été entrepris sur des tronçons avec un faible indice de qualité.

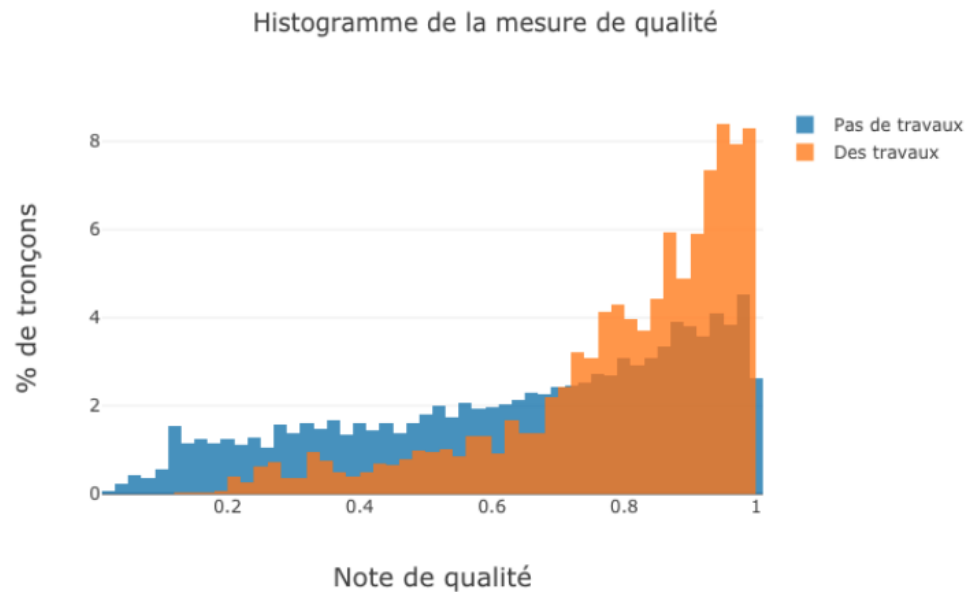


Fig. 17 : Répartition des notes de qualité sur les tronçons ayant eu des travaux et ceux n'ayant pas eu de travaux, données A_2016.

Ce résultat fait néanmoins apparaître qu'un certain nombre de tronçons avec un indice de qualité élevé, et où des travaux auraient été en principe nécessaires en raison du mauvais état de la route, n'ont pas été entretenus. Cela peut probablement s'expliquer par les contraintes financières qui interviennent lors de la définition des travaux et qui ne permettent pas de les entreprendre tous.

Il y a également certains tronçons avec un faible indice de qualité qui ont tout de même fait l'objet de travaux d'entretien (faux positifs). En procédant à des vérifications, il apparaît que certains de ces travaux ont été déclenchés pour d'autres raisons que l'état de la chaussée (aménagement, correction tracé, réseaux enterrés, etc).

Précisons que cette démarche a également été testée sur le jeu de données N_2017 et que l'indice de qualité fournit ici aussi des résultats relativement satisfaisant. L'application d'une fonction de normalisation ainsi que le recours au percentile rend la méthode indépendante de l'état générale du réseau considéré et permet toujours d'identifier les pires tronçons d'un réseau donné, de manière relative.

L'avantage de cette grande flexibilité de la méthode comporte néanmoins un point faible, puisque les résultats s'éloignent pour certains réseaux de la valeur technique et « absolue » des notes d'indices. Il se peut en effet que, sur un réseau en très bon état, l'indice de qualité identifie les pires tronçons, mais que ceux-ci ne nécessitent finalement pas de travaux car leur état est encore satisfaisant.

À titre d'information, on peut enfin signaler que la prise en compte du taux de fissuration (disponible dans les données 2016) en complément des autres indicateurs améliore les prédictions.

4.3.3 Définition des types de mesures et de valeurs seuils

La méthode proposée permet d'identifier les zones en plus mauvais état d'un réseau, relativement à l'état global. L'indice de qualité combinant l'ensemble des indicateurs disponibles, l'identification des zones mauvaise est améliorée, mais il devient alors plus difficile de déterminer quels indices ou valeurs sont responsables du mauvais état obtenu. Sur les réseaux analysés, de nombreuses combinaisons d'indices sont ainsi rencontrées. La Fig. 18 indique à cet effet, pour les différentes zones avec travaux, quels indices sont responsables du dépassement du seuil fixé (0.85) et contribuent ainsi à retenir le secteur comme zone en mauvais état. Les combinaisons obtenues sont ainsi très diverses.

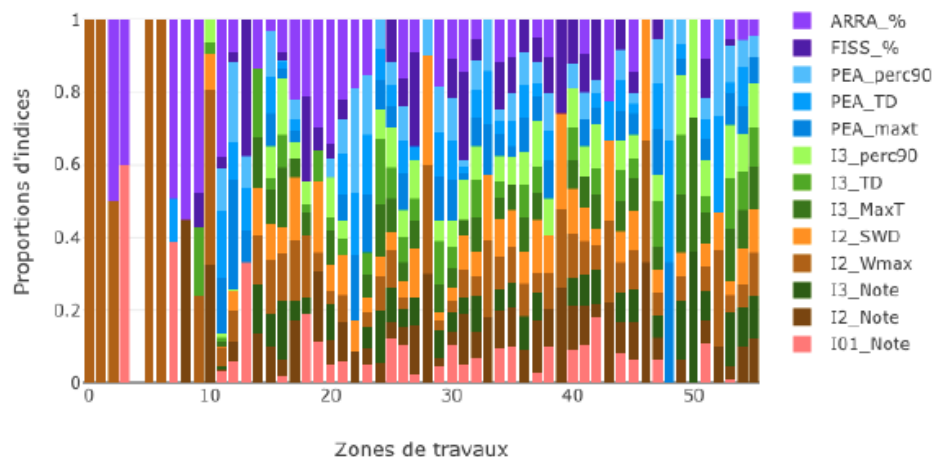


Fig. 18 : Répartition du nombre d'indice avec une valeur supérieure à 0.85 dans les zones avec travaux.

La méthode proposée peine alors à mettre en évidence les combinaisons d'indices qui permettent d'expliquer le choix des travaux. Par conséquent, il est encore plus complexe de distinguer les types de mesures réalisées et de définir des critères propres à chaque mesure à l'aide de l'indice de qualité.

D'autres approches de type « machine learning » ont également été testées par Swiss-SDI dans le but de définir un algorithme pouvant expliquer le choix d'un type de mesure d'entretien. Pour tenir compte des relations multiples, des algorithmes d'arbre de classification ont été appliqués. Les résultats obtenus sur une partie des données n'étaient toutefois pas généralisables à l'ensemble du jeu de données. Aucun résultat satisfaisant n'a été obtenu, les données étudiées ne présentant pas suffisamment de contraste entre les différents types de mesures pour définir des règles de choix. De plus, certains types de mesures étaient trop peu représentés, rendant ainsi plus difficile la construction de règle de décision.

La considération des données fonctionnelles en supplément, comme la charge de trafic ou la catégorie de route, n'a non plus permis de constituer des sous-groupes sur lesquels des règles spécifiques auraient pu être définies.

Sur la base de trois réseaux étudiés, il est donc conclu « qu'il n'y avait pas de lien apparent entre les indices et le type de travaux effectués. Les éventuelles tendances qui pourraient laisser penser qu'un lien existe n'ont pas pu être généralisées à l'ensemble des données afin d'en faire un outil de classification du type de travaux à effectuer en fonction des indices ».

Comme la différenciation entre les mesures d'entretien n'a pu se faire, il n'a non plus été possible de définir des valeurs de seuils pour chaque type de mesure d'entretien. De plus, comme indiqué précédemment, les combinaisons d'indice permettant d'expliquer le mauvais état sont nombreuses et diverses, et il n'est alors plus possible d'inverser la fonction de l'indice de qualité pour retrouver les indices correspondants et les valeurs atteintes, en raison de l'utilisation des fonctions percentiles.

4.4 Analyse exploratoire complémentaire sur le réseau F

Comme la première démarche exploratoire n'a pas permis de répondre à l'ensemble des questions posées, en particulier pour la définition des seuils des différents types de mesures d'entretien, il a été décidé d'effectuer une analyse complémentaire sur autre base de données présentant *a priori* des caractéristiques plus favorables, notamment une meilleure représentation des différentes mesures et une logique décisionnelle *a priori* plus uniforme.

Ainsi, les données du réseau F ont été soumises à une nouvelle analyse. Se basant sur les résultats présentés aux chapitres 4.3 et 5.1, seuls les indices d'état jugés les plus pertinents ont été retenus, soit les notes d'indices IA2, IA4, I2 et I3.

La démarche complémentaire s'est focalisée sur le procédé de « machine learning » permettant d'identifier des logiques de classement et d'établir le cas échéant des recommandations pour les seuils des mesures d'entretien. De plus, dans le but d'améliorer les prédictions grâce à l'indice de qualité, les travaux réalisés et une partie des prédictions ont été contrôlées par un expert métier du centre de recherche.

4.4.1 Ajustement de l'indice de qualité et comparaison avec l'expert métier

L'indice de qualité défini lors de l'analyse exploratoire a été adapté afin de ne tenir compte que des indicateurs jugés pertinents pour le choix des mesures d'entretien, soit les notes d'indices IA2, IA4, I2 et I3. L'étape de propagation et d'uniformisation des données à l'aide d'une fenêtre mobile et d'un percentile à 90% est conservée. Comme 4 indicateurs seulement sont considérés cette fois, l'indice de qualité obtenu tient compte des deux pires indicateurs.

Ce nouvel indice de qualité a été évalué sur les tronçons avec travaux et sans travaux réalisés (Fig. 19). Il apparaît que les tronçons avec travaux obtiennent majoritairement une note de qualité élevée (proche de 1), contrairement aux tronçons sans travaux. Comme espéré, cette différenciation est plus marquée pour le réseau F, les tronçons avec travaux étant dans un état plus dégradé.

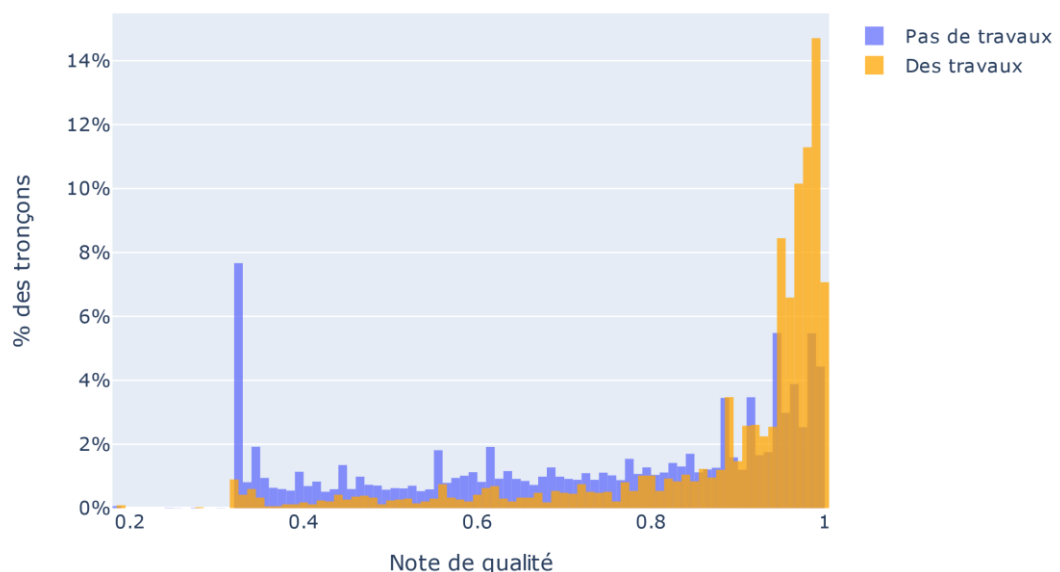


Fig. 19 : Répartition des notes de qualité sur les tronçons ayant eu des travaux et ceux n'ayant pas eu de travaux, données F.

Dans le but d'affiner les prédictions, un expert métier du centre de recherche a procédé à une vérification de la justification des travaux réalisés par l'état. Chaque zone avec travaux a été évaluée pour définir si les travaux pouvaient s'expliquer à partir de l'état, au niveau des indices IA2 IA4, I2 et I3. Pour ces zones avec travaux, on s'aperçoit que l'indice de qualité est généralement plus élevé pour les tronçons avec validation des travaux selon l'expert métier que pour les zones où l'expert métier juge les travaux non nécessaires selon les indices d'état (Fig. 20).

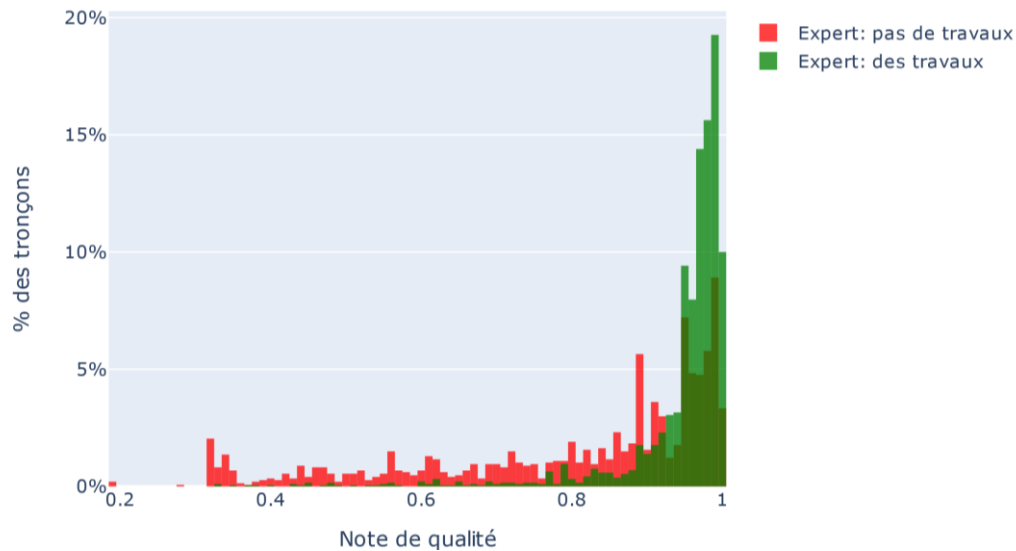


Fig. 20 : Répartition des notes de qualité sur les tronçons ayant eu des travaux en fonction de l'évaluation de l'expert métier quant à la pertinence des travaux, données F.

L'indice de qualité déterminé à partir d'un choix plus réduit d'indicateurs semble donc fournir de meilleures prédictions pour identifier les secteurs nécessitant des travaux.

Relevons encore qu'un seuil fixé à 0.87 sur l'indice de qualité permet d'obtenir les meilleurs taux de prédiction des travaux effectués, en maximisant le couple précision et rappel, que l'on définit comme suit :

- Précision = rapport entre les travaux prédits réalisés (vrais positifs) et les travaux prédits non réalisés (faux positifs)
- Rappel = rapport entre travaux prédits réalisés (vrais positifs) et travaux réalisés non-prédits (faux négatifs)

Afin de confronter les prédictions de l'algorithme en appliquant ce seuil avec l'avis de l'expert métier, l'analyse s'est portée sur des groupements de tronçons de 800m pour limiter la quantité de données à contrôler par l'expert. De cette manière, en additionnant le contrôle sur les travaux réalisés et le contrôle sur les tronçons prédits de plus de 800m, près de 29% du réseau a été contrôlé par l'expert métier.

Sur cette partie de réseau contrôlée, la précision de l'algorithme est alors de 100%. En effet, toutes les zones prédites par l'algorithme sont considérées comme correspondant à des zones pouvant nécessiter des rénovations par l'expert métier. Le rappel obtenu dans ces conditions est de 92%. Seul 8 zones sur 99 mises en évidence par l'expert ne sont pas détectées. Parmi les 8 zones, l'algorithme en détecte 6 lorsque la condition sur la taille des zones est abaissée de 800m à 500m.

4.4.2 Prédiction du type de travaux par machine learning

Tout comme le nombre d'indicateurs pertinents, il a également été proposé de réduire les types de travaux réalisés sur le réseau F en effectuant des regroupements pour espérer améliorer les prédictions. Ainsi, les types de travaux relativement proches, en termes de nombre de couches remplacées, ont été regroupés (Tab. 24).

Tab. 21 Répartition des différents types de travaux réalisés sur le réseau F et nombre de zone de travaux après regroupement

Type de travaux réalisés sur le réseau F	Nombre de zones	Nombre de zones après regroupement
Enduit	11	11
1 couche	42	42
2 couches	92	182
3 couches	90	
4 couches	26	27
5 couches	1	

Les variables de décision pour la procédure de machine Learning consistent en les notes des indices jugés pertinents : IA2, IA4, I2 et I3. Finalement, pour les 4 indices, les variables d'agrégation suivantes sont établies :

- Moyenne
- Médiane
- Déviation standard
- Minimum
- Maximum
- Différence entre maximum et minimum
- Les quantiles 5, 10, 25, 75, 90 et 95%

Un set de données étendu est également généré afin de tester si de meilleurs résultats peuvent être obtenus en augmentant le nombre de variables à disposition. Les données supplémentaires sélectionnées sont alors l'ensemble des valeurs mesurées pour chaque indice jugé pertinent, soit : IA2_G, IA4_G, IA4_E, I2_Note, I2_maxSW, I2_SWG, I2_SWD, I3_Note, I3_maxT, I3_TG, I3_TD, Pea_max-t, PEA-tG et PEA-tD.

Dans le premier cas, le nombre de variables évaluées dans les algorithmes de machine Learning est de 96, puis de 372 dans la seconde alternative.

Plusieurs algorithmes de machine Learning ont été testés au cours de l'analyse exploratoire (voir rapport en annexe électronique), selon différentes approches :

- Approche par classification : Logistiques avec une pénalisation L1 : séparation en catégorie pour chaque famille de travaux réalisés
- Approche par régression : Modèles Lasso : classification sans limite de catégories strictes.
- Approche non supervisée : Clustering : regroupement de secteurs aux caractéristiques similaires puis vérification s'il s'agit des mêmes travaux réalisés.

Comme lors de l'analyse exploratoire, et malgré un set de données avec une meilleure représentation des différents types de mesures réalisées, les algorithmes de machine learning n'ont pas été en mesure de définir des seuils sur les indicateurs testés qui permettent de séparer les différentes mesures d'entretien et donc d'expliquer le choix de la mesure à partir des données d'état.

Les résultats obtenus par l'approche de classification sont rappelés (Fig. 21) afin d'illustrer les difficultés rencontrées pour catégoriser les différents types de mesures réalisées à l'aide des variables retenues (cas 1). On s'aperçoit notamment que l'algorithme conduit à une prédiction qui ne correspond souvent pas au type de travaux réalisés. Le taux de bonne prédiction est de $38.8 \pm 2.7\%$ sur l'ensemble d'entraînement et de $32.2 \pm 4.8\%$ sur l'ensemble de test.

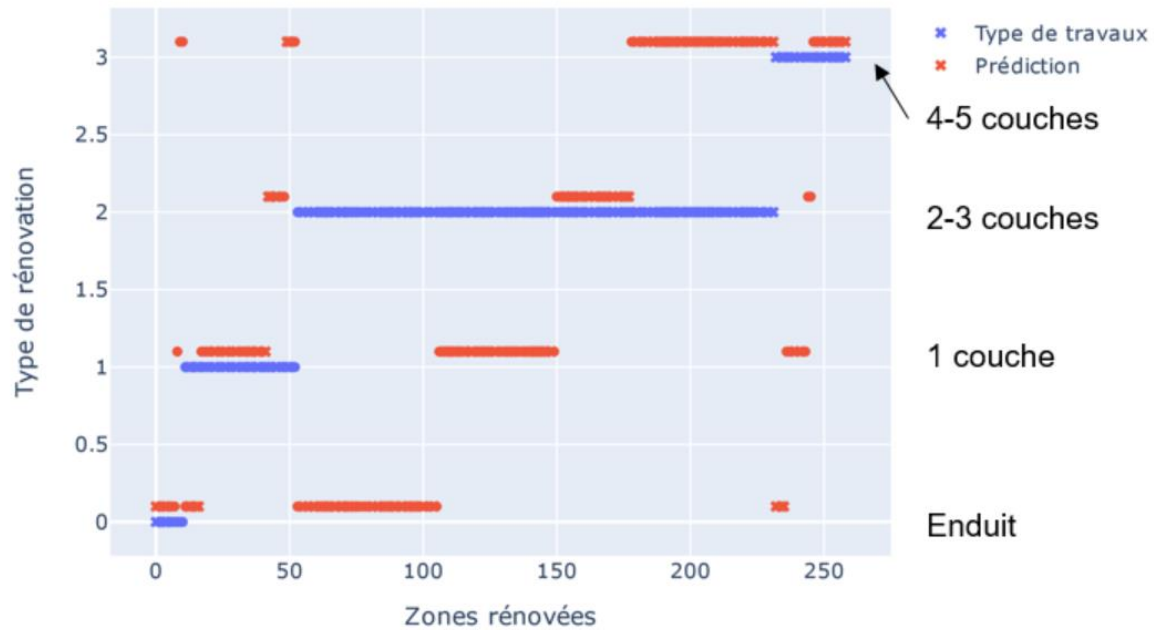


Fig. 21 : Représentation des résultats de classification pour l'ensemble de variable de base (cas 1) sur un ensemble d'entraînement du modèle logistique.

Il est intéressant de constater que les résultats sur le set de données étendu sont meilleurs sur le set d'entraînement ($52.7 \pm 3.2\%$) mais sont quasiment identiques sur le set de test ($32.3 \pm 6.7\%$). Cela indique que l'algorithme fait de l'over-fitting et que les données supplémentaires n'apportent pas d'informations utiles pour la classification.

Enfin, les algorithmes ont également été testés sur la partie du réseau qui avait fait l'objet d'un contrôle de l'expert métier, mais sans obtenir de meilleurs résultats.

Les experts mathématiques avancent deux hypothèses qui permettraient d'expliquer les pauvres performances de ces algorithmes :

- Les variables extraites ne capturent pas les éléments qui permettent de différencier les différents types de travaux.
- Les indicateurs d'état ne contiennent pas l'information nécessaire pour faire cette discrimination ; il y aurait d'autres facteurs, externes aux données, qui influencent le type de travaux réalisé.

4.5 Synthèse de l'analyse statistique exploratoire

L'analyse exploratoire menée en collaboration avec les mathématiciens de Swiss-SDI a mis en évidence plusieurs éléments à prendre en compte pour la définition de seuils de mesures d'entretien à partir des données d'état.

L'analyse des bases de données et des différentes caractéristiques d'état a montré que les groupes d'indices exprimant chacun des dégradations différentes (dégradation de surface, planéité longitudinale, transversale) n'étaient généralement pas dépendant entre eux, et donc que chacun portait une information digne d'intérêt pour identifier des zones nécessitant des travaux. En revanche, au sein d'une même famille de dégradation, ou entre les valeurs mesurées de la caractéristique (par exemple dans la trace de roue droite et la trace de roue gauche) et sa note d'indice, les valeurs sont souvent liées entre elles.

L'analyse des données a également montré la difficulté d'utilisation des valeurs discrètes des indices individuels, d'autant plus que certaines observations (couples d'étendue et gravité) sont surreprésentées, réduisant encore le contraste entre les valeurs.

La méthode proposée par Swiss-SDI établit un indice de qualité combinant les différents indicateurs. Cet indice permet d'identifier de manière relativement satisfaisante les tronçons ayant eu des travaux ou qui auraient dû en avoir. Toutefois, les données comportent également des interventions réalisées probablement sans tenir compte de l'état de la chaussée, et que la méthode ne peut ainsi pas déceler.

Cette méthode présente l'avantage de s'adapter à l'état du réseau, permettant de définir des zones nécessitant des travaux peu importe l'état général du réseau. Cette approche relative peut néanmoins constituer un problème sur les réseaux en très bon état, puisqu'elle ne tient plus compte des valeurs techniques des notes des indices qui permettent de juger l'état « absolu » des chaussées.

Enfin, l'analyse complémentaire réalisée sur un set de données très favorable avec des approches de machine-learning n'a pas permis de catégoriser les différents types de travaux réalisés à partir d'un nombre plus restreint d'indicateurs (note des indices IA2, IA4, I2 et I3). Ces difficultés s'expliquent vraisemblablement par le fait que ces indicateurs ne comportent pas la totalité des informations permettant de faire cette classification et que d'autres informations, non exprimées dans ces indices, ont souvent été déterminantes pour le choix du type de travaux réalisés.

5 Analyses statistiques systématiques

Les données récoltées sur les différents réseaux cantonaux ainsi que sur une partie des routes nationales et sur deux réseaux communaux (décrites au chapitre 3) ont toutes fait l'objet d'une analyse statistique, afin d'établir des valeurs représentatives (valeurs moyenne d'indice et distribution des notes par catégorie d'état par type de travaux) qui permettent d'effectuer des comparaisons entre les différents réseaux. Ces résultats sont présentés de manière synthétique pour chaque réseau au chapitre 5.1, tandis que des comparaisons plus ciblées sont présentées au chapitre 5.2 afin d'illustrer certains phénomènes. L'effet de certaines techniques de lissage sur les données est présenté au chapitre 5.3 avant de discuter au chapitre 5.4 d'autres facteurs influençant le choix des mesures.

5.1 Résultats généraux

5.1.1 Résultats généraux pour les réseaux cantonaux

La première analyse consiste à comparer, pour chaque réseau, les valeurs moyennes des indices d'état pour des tronçons ayant subi des travaux ou pas.

Tab. 22 Valeurs moyennes des indices d'état des tronçons avec et sans travaux pour les réseaux cantonaux

Réseau	Travaux	I1 moy.	IA1 moy.	IA2 moy.	IA3i1 moy.	IA4 moy.	IA5 moy.	I2 moy.	I3 moy.	PEA moy. mm
A_11	oui	2.08	1.07	2.20	1.06	0.73	0.68	2.06	1.51	2.26
	non	1.71	1.00	2.00	0.88	0.45	0.37	1.58	1.32	1.76
A_16	oui	2.62	1.45	2.75	1.20	0.99	0.80	1.99	1.29	1.31
	non	1.89	1.07	2.29	0.76	0.60	0.46	1.45	0.94	0.98
B	oui	2.39	1.19	2.10	1.80	1.11	0.39	2.30	2.48	3.16
	non	1.79	1.01	1.70	1.29	0.70	0.26	1.92	1.86	2.25
C	oui	3.08	1.68	3.11	1.20	1.09	1.89	2.36	1.43	2.51
	non	2.06	0.97	2.42	0.86	0.69	0.91	1.89	1.17	2.17
D	oui	3.28	1.48	2.85	1.58	2.01	1.19	3.05	2.04	3.07
	non	2.25	1.06	2.32	0.93	1.15	0.59	2.38	1.31	1.69
E_10	oui	2.77	1.57	2.34	1.14	1.64	0.43	3.53	1.75	2.26
	non	2.10	1.49	1.98	0.79	0.94	0.31	2.95	1.39	1.54
E_14	oui	2.79	1.63	3.15	1.37	2.00	0.80	3.36	2.08	3.76
	non	2.14	1.22	2.75	1.06	1.30	0.55	2.94	1.70	2.94
F	oui	2.53	1.49	2.80	0.95	0.93	0.65	2.17	1.55	2.55
	non	1.68	0.75	2.23	0.62	0.56	0.38	1.49	1.13	1.88
G	oui	2.13	-	-	-	-	-	2.21	1.22	0.65
	non	1.11	-	-	-	-	-	1.42	0.78	0.36

Il apparaît tout d'abord que pour l'ensemble des indices d'état, les notes moyennes des tronçons avec travaux sont plus élevées que ceux sans travaux. Ce résultat est attendu, mais il peut surprendre sur certains sous-indices (IA3, IA4, IA5) qui ne permettent *a priori* pas d'identifier de tronçons en mauvais état. Sur ces derniers, les états moyens sont souvent « bon » ou « moyen » dans les deux situations, mais avec tout de même une moyenne plus élevée pour le cas avec travaux.

Les indices I1, IA2, I2 et I3 se distinguent par des notes moyennes relativement élevées sur les tronçons avec travaux, pouvant atteindre un état « suffisant ». Ce résultat doit

toutefois être relativisé, car les secteurs sans travaux ont certes une note inférieure mais qui demeure toute de même relativement élevée.

On peut s'étonner que les notes moyennes obtenues pour les secteurs en travaux n'atteignent jamais l'état « critique » ou « mauvais ». L'analyse des distributions des notes (résultats figurant en annexe) nous indique que les secteurs avec travaux comportent toute de même un certain nombre de tronçons dans un état satisfaisant, qui peuvent laisser penser que ces travaux n'étaient pas forcément nécessaires. Cela provient probablement du fait que les secteurs avec travaux ne sont mal notés par tous les indices simultanément, un seul indice pouvant déclencher la réalisation de travaux. D'autre part, pour des questions d'organisation et d'économie d'échelle, les travaux sont généralement réalisés sur des longueurs assez importantes, en englobant parfois des tronçons en meilleur état situé entre des tronçons en mauvais état.

Entre les réseaux, des différences de notes moyennes apparaissent tant sur les sections avec travaux que sans travaux, et ce pour tous les indices. Sur les réseaux identifiés au chapitre 3.1.3 comme étant globalement plus dégradés (C, D et E), les travaux sont effectués sur des tronçons en moyenne plus dégradés que sur les autres réseaux. Les sections sans travaux sont également dans un état plus dégradé par rapport aux autres réseaux, ce qui est attendu compte tenu de l'état global de ces réseaux.

Par ailleurs, pour les deux réseaux sur lesquels deux campagnes de mesures et de travaux ont été analysés (réseaux A et E), il apparaît que les états moyens avec et sans travaux varient légèrement (au maximum 0.8 points), avec dans les deux situations des réseaux qui sont un peu plus dégradés selon la seconde campagne. Les travaux sont alors également effectués sur des tronçons un peu plus dégradés. Néanmoins, les indicateurs pertinents pour l'identification des travaux demeurent les mêmes entre les deux campagnes.

La Fig. 22 présente les différences entre les valeurs moyennes de tronçons avec et sans travaux, afin de mettre en évidence les indices qui présentent le plus de contraste entre les deux situations.

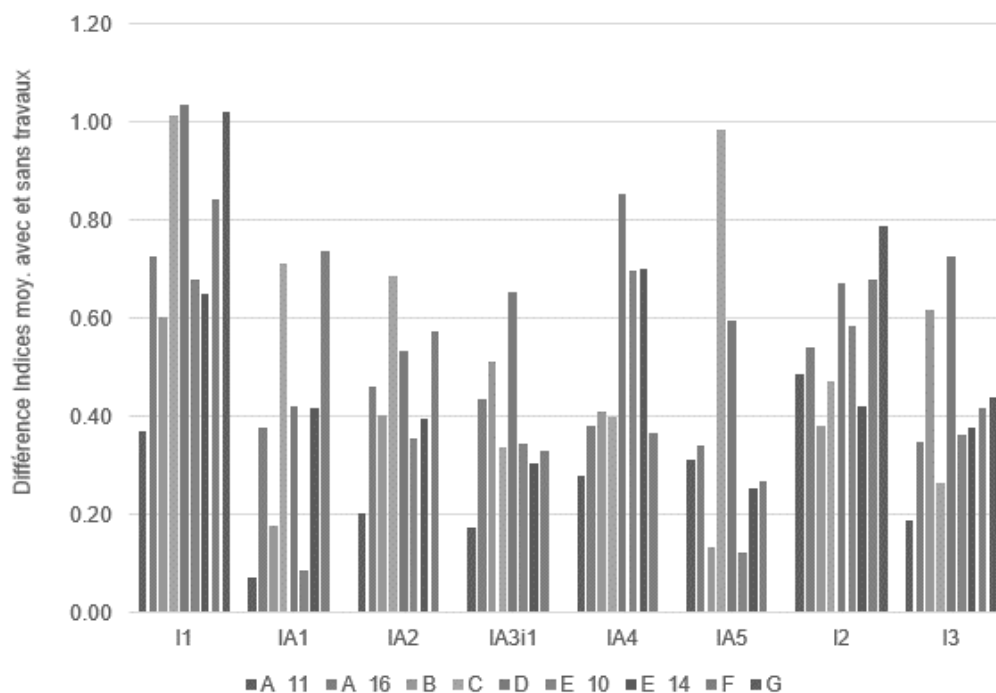


Fig. 22 Valeurs de la différence des indices moyens avec et sans travaux pour les réseaux cantonaux.

L'analyse des différences des valeurs moyennes entre tronçons avec et sans travaux montre que le contraste entre ces deux situations est moins net pour certains indices. C'est le cas pour les indices IA1 et IA5 sur une partie des réseaux, sur lesquels les différences sont inférieures à 0.3. Couplé au fait que ces deux indices obtiennent des notes globalement très satisfaisantes sur les réseaux, on peut conclure que ces deux indicateurs ne semblent pas pertinents pour identifier et déclencher des travaux.

Sur les réseaux plus dégradés (C, D, E), le sous-indice IA4 fournit parfois une bonne explication aux travaux réalisés. La présence de dégradations structurelle semble être un important déclencheur de travaux. Il est par contre moins déterminant sur des réseaux en meilleur état car ce type de dégradations est plus rare.

De manière attendue, il apparaît aussi que le sous-indice IA3 a un comportement très proche de celui du I3, ces deux indices exprimant le même type de dégradations (ornières). Un seul de ces deux indicateurs peut être considéré. On retient l'indice I3 car il est noté sur une échelle continue, ce qui offre plus de possibilités pour définir des seuils.

Enfin, les indices I1, et I2 obtiennent les moyennes les plus élevées dans les situations avec travaux, ainsi que les plus fortes différences entre les deux situations. Étant donné que ces indices élevés peuvent obtenir des notes élevées en raison de plusieurs combinaisons de dégradations, ils semblent exprimer le mieux la nécessité d'effectuer des travaux. Cela constitue néanmoins un inconvénient au moment de définir le type de mesure, puisque les causes des dégradations sont multiples.

Des comparaisons de cas spécifiques seront donc effectuées sur les indices I1, IA2, IA4, I2 et I3, les autres indices n'étant pas jugés pertinents, n'apportant pas assez de contraste ou n'identifiant pas réellement de dégradations.

5.1.2 Résultats généraux pour le réseau national

Une analyse similaire est effectuée pour la partie du réseau national analysée. Les valeurs moyennes pour les tronçons avec et sans travaux sont comparées dans le Tab. 23.

Tab. 23 Valeurs moyennes des indices d'état des tronçons avec et sans travaux pour la partie du réseau national

Réseau	Travaux	I0 moy.	IA1 moy.	IA2 moy.	IA3i0 moy.	IA4 moy.	IA5 moy.	I2 moy.	I3 moy.	PEA moy. mm
N_13	oui	0.45	0.01	1.33	0.00	0.39	0.36	1.89	1.68	0.46
	non	0.16	0.01	0.46	0.00	0.14	0.13	1.40	1.10	0.10
N_17	oui	0.21	0.01	0.55	0.00	0.22	0.17	1.51	0.78	0.18
	non	0.15	0.02	0.33	0.00	0.20	0.10	1.13	0.48	0.10

Les différences les plus importantes pour le réseau national sont obtenues sur les indices IA2, I2 et I3. Pour les indices I0 et IA4, contrairement aux réseaux cantonaux, les différences sont faibles, ceci car les dégradations de surface, excepté IA2, sont moins fréquentes et moins graves sur ce réseau. Pour le IA1 et IA3i0, elles sont presque totalement absentes de ce réseau, ces indices obtenant des notes proches ou égales à 0.

De manière générale, le réseau national se caractérise par un état général nettement meilleur que les réseaux cantonaux. Il n'est alors pas surprenant que les travaux soient effectués pour des valeurs moyennes d'indice nettement moins élevées.

Cela démontre que les seuils de mesures pour les routes nationales doivent vraisemblablement être adaptés à l'état moyen du réseau, qui est meilleur, mais aussi au niveau d'exigence, qui est en principe plus élevé sur ce réseau.

5.1.3 Résultats généraux pour les réseaux communaux

Finalement, cette analyse est effectuée au niveau des réseaux communaux. Le Tab. 24 indique les valeurs moyennes d'indice dans les situations avec et sans travaux. Pour le réseau K2, les travaux d'entretien léger sont présentés à part.

Tab. 24 Valeurs moyennes des indices d'état des tronçons avec et sans travaux pour la partie du réseau national

Réseau	Travaux	I1 moy.	IA1 moy.	IA2 moy.	IA3i1 moy.	IA4 moy.	IA5 moy.	I2 moy.	I3 moy.	PEA moy. mm
K1	oui	3.19	0.97	2.50	1.08	2.39	1.77	-	-	-
	non	1.91	0.37	1.70	0.55	1.37	1.27	-	-	-
K2	oui	3.47	1.80	2.55	1.15	3.29	1.03	-	-	-
	oui (entr. léger)	2.72	2.03	1.82	0.85	2.10	0.89			
	non	1.83	1.36	1.14	0.52	1.28	0.72	-	-	-

L'indice I1 semble bien exprimer le besoin de travaux puisque les tronçons traités obtiennent des notes moyennes d'indice situées dans l'état « critique ». En particulier, pour le réseau K1, la totalité des tronçons traités sont dans un état « suffisant » à « mauvais » selon I1, les données provenant de segments homogènes.

Les autres indices présentant des différences importantes entre la situation avec et sans travaux sont le IA2 et le IA4. Dans le cas de K1, on peut ajouter le IA5, tandis que le IA1 semble un indicateur plus important pour le réseau K2.

Il est intéressant de noter que pour le réseau K2, les mesures d'entretien légères sont réalisées sur des tronçons qui sont globalement moins dégradés que ceux avec des mesures d'entretien standard, ce qui semble cohérent. En particulier, l'indice IA1 apparaît comme étant plus déterminant pour le choix des mesures légères que pour déclencher une mesure d'entretien standard.

5.2 Résultats par type de mesure

Dans les sous-chapitres suivants, les résultats sont présentés sous la forme d'histogrammes des distributions des notes d'indice en 5 catégories selon un code couleur allant du vert (état « bon ») au rouge (état « mauvais »). La valeur moyenne de l'indice est également indiquée. Ces résultats sont détaillés pour chaque famille de mesure d'entretien et pour les tronçons sans travaux, en utilisant les abréviations suivantes :

- ES : enduit superficiel / traitement de surface
- 1.c. : 1 couche bitumineuse
- 2.c. : 2 couches
- 3.c. : 3 couches
- RT : reconstruction totale

Ces résultats sont présentés en particulier pour 3 réseaux cantonaux, qui sont représentatifs de trois niveaux d'état différents, du moins dégradé (B) au plus dégradé (E_14), avec un réseau intermédiaire (F). Puis, on s'intéresse à quelques cas particuliers. Enfin, les spécificités des réseaux nationaux et cantonaux sont présentées.

Ces trois réseaux cantonaux sont également retenus car ils comportent un nombre de chantiers réalisés pour chaque type de mesures qui est jugé suffisamment important pour être représentatif, contrairement aux réseaux sur lesquels certains types de mesures restent exceptionnels ou ne sont même jamais réalisés.

5.2.1 Résultats pour l'indice I1, réseaux cantonaux

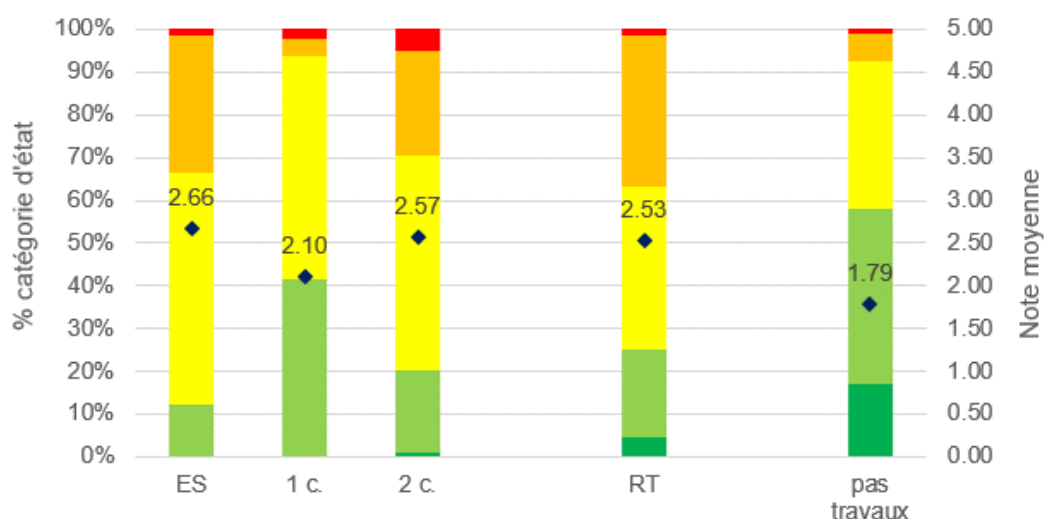


Fig. 23 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I1 par type de mesure, réseau B

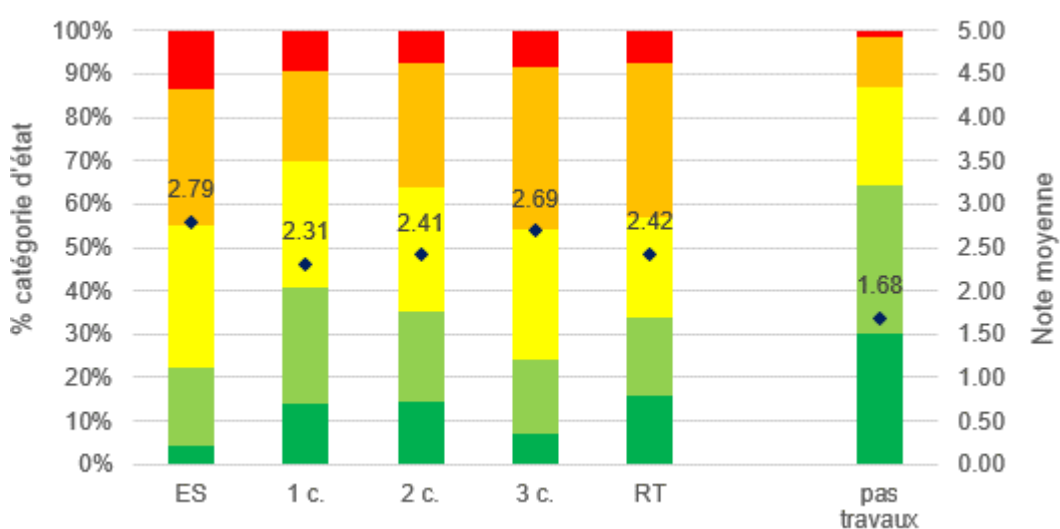


Fig. 24 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I1 par type de mesure, réseau F

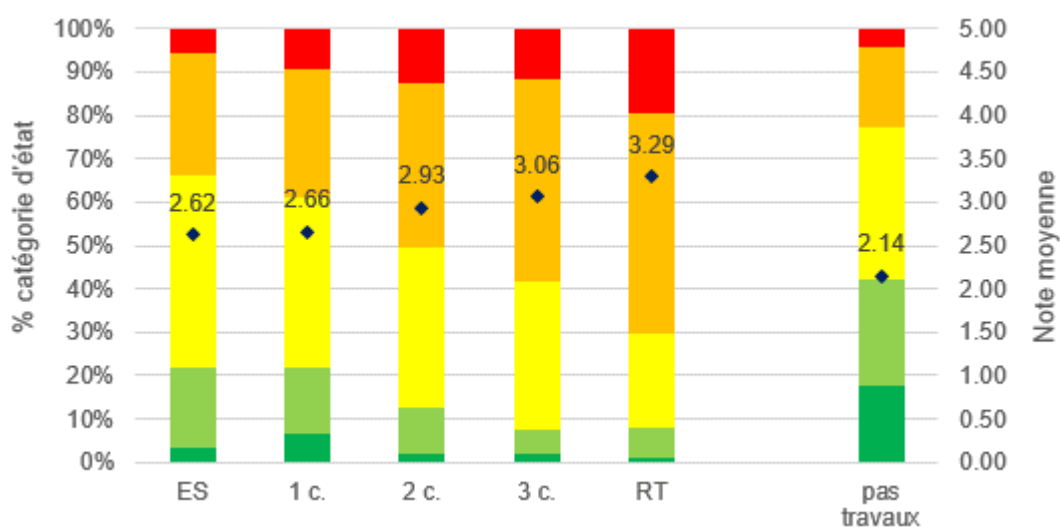


Fig. 25 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I1 par type de mesure, réseau E_14

Pour les trois réseaux présentés, tous les types de mesures sont effectués pour des état moyens atteignant des notes supérieures à 2.00, catégorie d'état « suffisant », parfois même « critique » pour le réseau le plus dégradé (E).

Au niveau des catégories d'état, une majorité des tronçons traités sont dans un état « suffisant » ou « critique » selon l'indice I1. Pour les réseaux F et E, il y a même des tronçons « mauvais » parmi les travaux. La totalité des tronçons « mauvais » n'est cependant pas traitée (voir part sans travaux), probablement pour des questions de moyens disponibles. D'autre part, très peu de mesures ont été réalisées sur des tronçons « bon », avec au maximum 15% sur le réseau F en état intermédiaire. De même, peu de tronçons « moyen » sont entretenus.

L'indice I1 semble donc être un bon indicateur de la nécessité d'effectuer des travaux. En effet, les tronçons sans travaux sont dans les 3 situations dans un état meilleur, avec 0.4 point au moins de moins sur la valeur moyenne de l'indice.

En revanche, pour les deux premiers réseaux, il ne permet pas d'expliquer le choix entre une mesure plutôt qu'une autre. Les tronçons qui ont en moyenne davantage de dégradations de surface sont autant traités (voire plus) par une mesure légère ES que par le remplacement d'une couche. Comme expliqué au chapitre 2.3, l'indice I1 ne comprend pas d'informations relatives aux causes des dégradations, s'agissant d'une agrégation de toutes les dégradations relevées en surface.

On note toutefois que sur le réseau le plus dégradé, il y a une aggravation de l'état plus cohérente entre les mesures, avec les mesures les plus lourdes effectuée sur des tronçons qui sont globalement plus dégradés, et qui comprennent davantage de tronçons jugés « mauvais ».

5.2.2 Résultats pour l'indice IA2, réseaux cantonaux

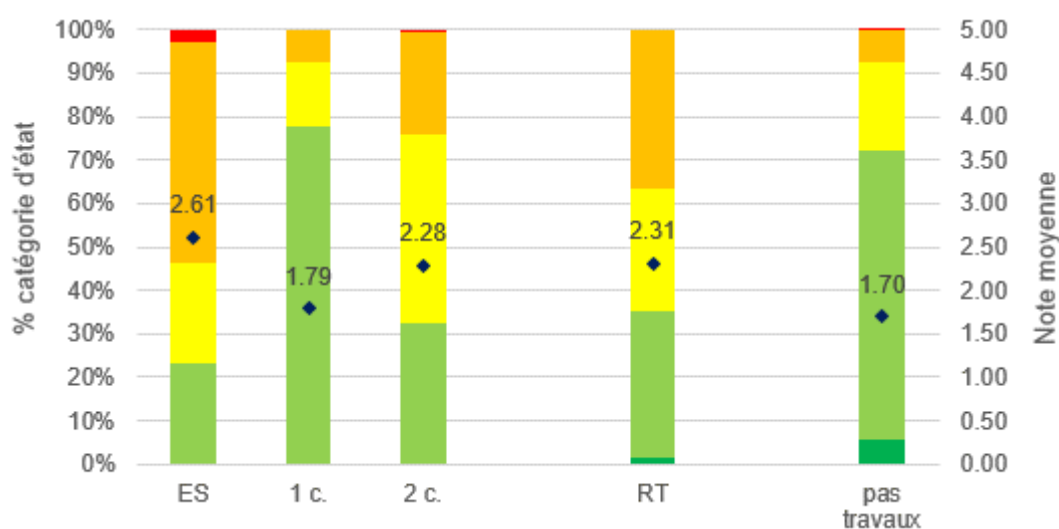


Fig. 26 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA2 par type de mesure, réseau B

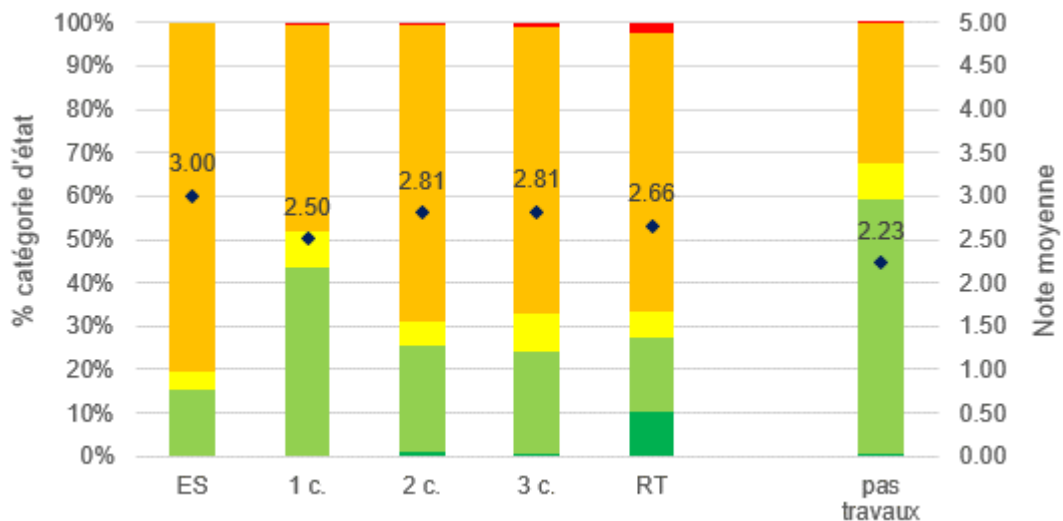


Fig. 27 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA2 par type de mesure, réseau F

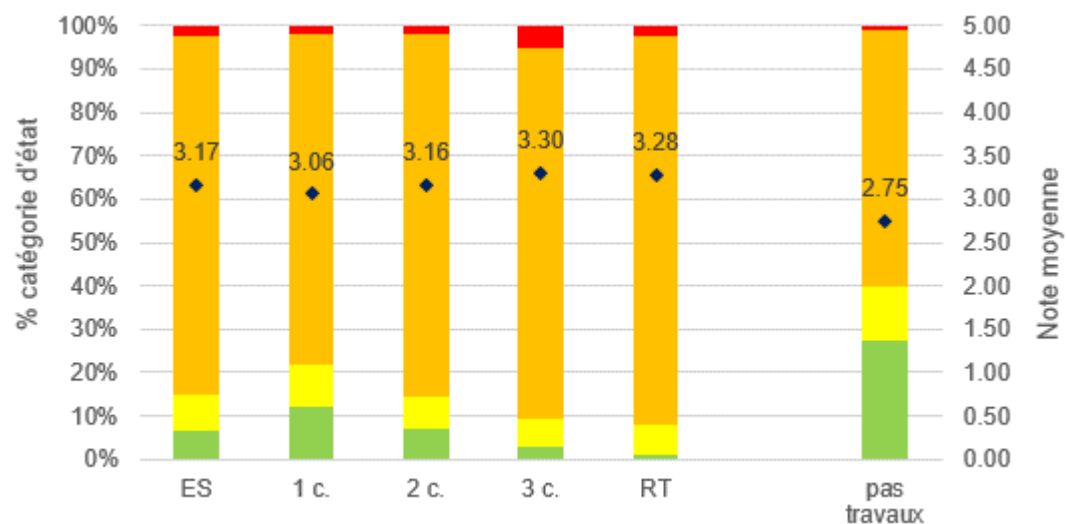


Fig. 28 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA2 par type de mesure, réseau E_14

Les notes d'indices IA2 sont relativement élevées pour les trois réseaux avec des mesures effectuées sur des tronçons qui sont jugés en moyenne comme étant « suffisant » ou « critique », à une exception près (mesure 1 couche sur réseau B). Les tronçons avec travaux sont globalement dans un plus mauvais état que le reste du réseau.

Concernant la différence entre les types de mesures, on observe tout d'abord que, sur les trois réseaux, la mesure « ES » est effectuée sur des tronçons un peu plus dégradés que la mesure 1 couche. Cette spécificité propre à la mesure « ES » et à son emploi sera abordée au chapitre 5.2.10.

Par contre, entre les mesures à 2 ou 3 couches ou les reconstructions totales, les états globaux sont très proches tant sur la valeur moyenne que la répartition des catégories d'état. L'indice IA2 ne semble donc pas adapté pour la décision d'effectuer des travaux sur les couches inférieures voire la fondation. Cela est cohérent avec la définition de cet indice, qui s'intéresse essentiellement à des dégradations de la couche de roulement (voir définition au chapitre 2.3.1).

Enfin, on observe, de manière attendue, que les notes moyennes des mesures sont plus élevées sur les réseaux les plus dégradés, tout comme le reste du réseau qui n'est pas traité. Sur le réseau E, presque tous les tronçons sont dans un état « suffisant » à

« critique ». Tandis que sur le réseau B, entre 20 et 80% des tronçons traités sont dans un état « moyen », sans différenciation avec le reste des tronçons sans travaux. Cela peut être dû à l'inhomogénéité des données, et du fait qu'il y a peut-être une ou deux valeurs qui sont déterminantes, dans un état plus dégradé, parmi des valeurs plus satisfaisantes à l'intérieur d'un même secteur avec des travaux. L'ensemble des tronçons de 50m au sein d'un chantier ne sont peut-être pas représentatifs, il est possible que seules les pires valeurs soient considérées lors de la décision. La question du lissage des valeurs sera étudiée dans le chapitre 5.3.

5.2.3 Résultats pour l'indice IA4, réseaux cantonaux

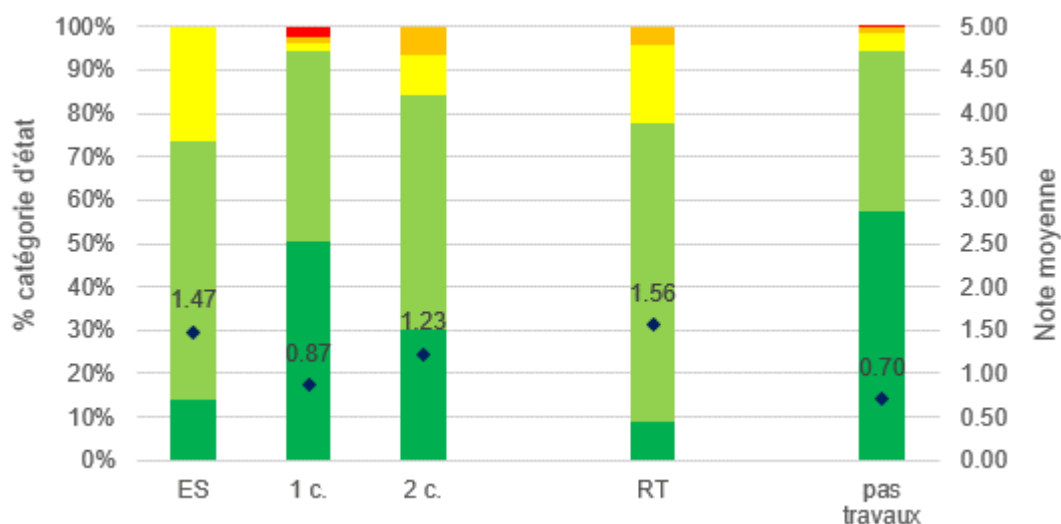


Fig. 29 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA4 par type de mesure, réseau B

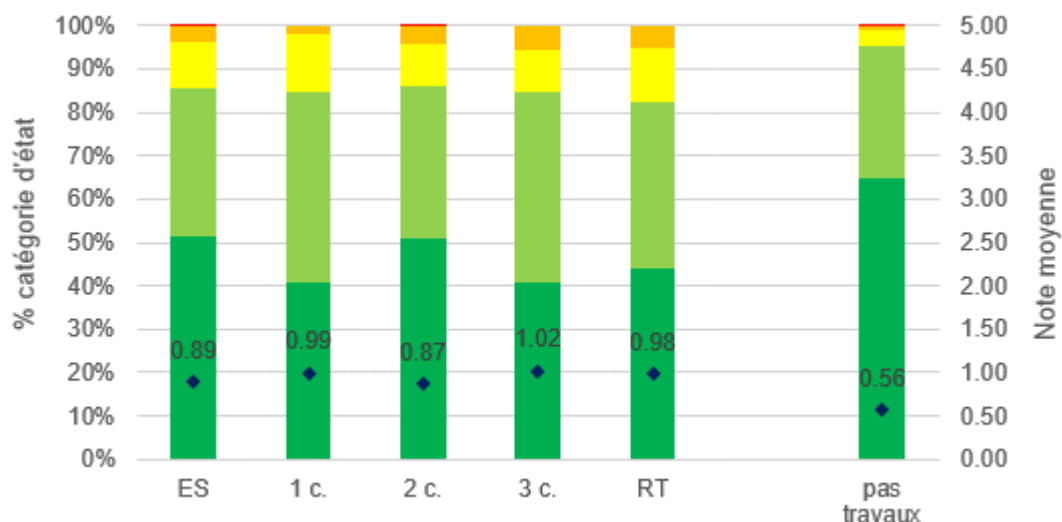


Fig. 30 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA4 par type de mesure, réseau F

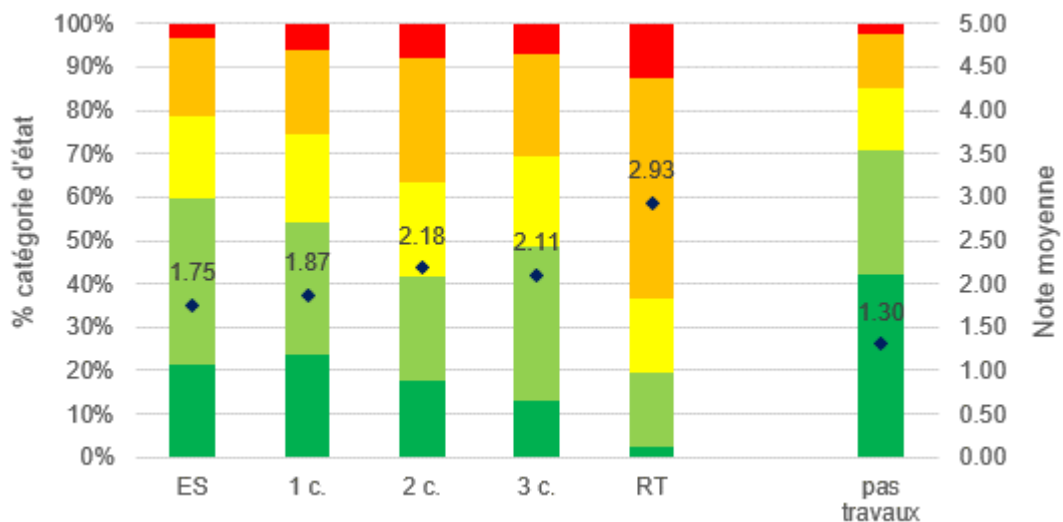


Fig. 31 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA4 par type de mesure, réseau E_14

Contrairement à l'indice IA2, les travaux réalisés concernent bien des tronçons avec quelques défauts en IA4, mais ceux-ci sont moins marqués, à l'exception du réseau E. Il semble donc que, pour les réseaux en bon état, où les dégradations IA4 sont peu fréquentes, cet indice n'est pas déterminant pour le choix des mesures.

Pour les deux réseaux en meilleur état, les travaux comprennent des tronçons en légèrement plus mauvais état que le reste, mais les dégradations sont limitées, puisqu'elles sont en moyenne jugées « bon » ou « moyen ». Cela est certainement dû au fait que les dégradations IA4 sont rares sur ces deux réseaux. Il y donc également peu de différences entre les types de mesures.

Par contre, sur le réseau E, en plus mauvais état, où les dégradations IA4 sont plus fréquentes et plus marquées (indice IA4 moyen du réseau entier = 1.39, contre 0.75 et 0.60 pour B et F), cet indice permet d'identifier plus efficacement les zones avec des travaux. On constate également que cet indice est surtout déterminant pour les mesures avec remplacement de 2 et 3 couches, et encore plus pour les reconstructions totales. Ce résultat est cohérent avec les dégradations décrites par cet indice. Dans le cas « RT », plus de 80% des tronçons traités sont jugés « suffisant », « critique » ou « mauvais » en IA4.

5.2.4 Résultats pour l'indice I2, réseaux cantonaux

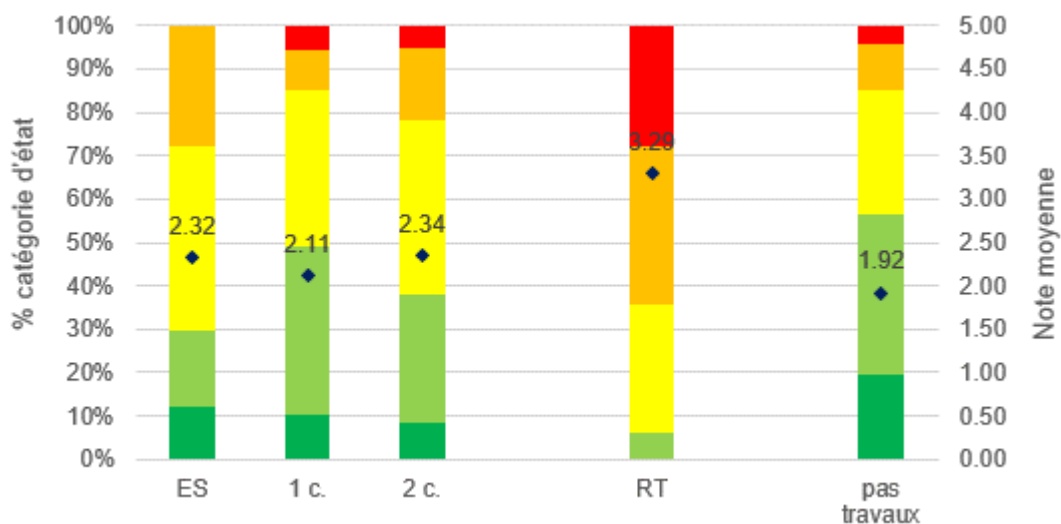


Fig. 32 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I2 par type de mesure, réseau B

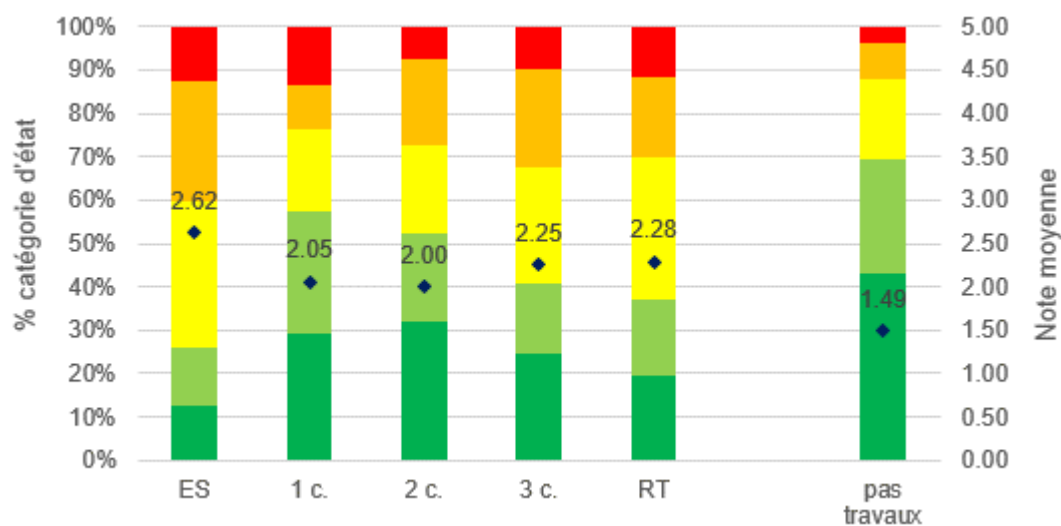


Fig. 33 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I2 par type de mesure, réseau F

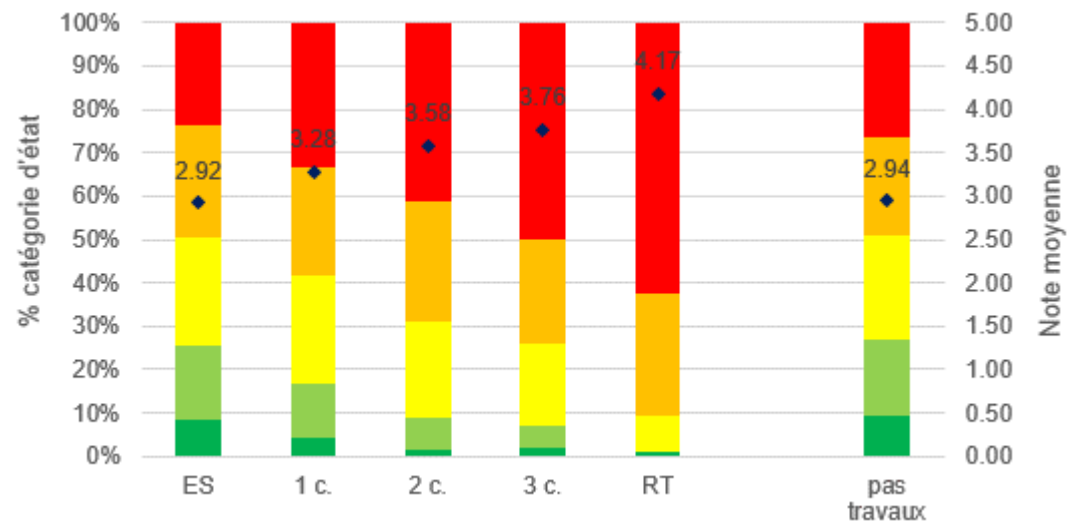


Fig. 34 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I2 par type de mesure, réseau E_14

Contrairement aux indices précédents, selon l'indice I2, le réseau B est globalement en moins bon état que le réseau F.

Pour les trois réseaux, on observe que les travaux sont effectués sur des tronçons avec une planéité longitudinale qui est, en moyenne, jugée « suffisante », avec une note moyenne supérieure à 2.00.

Le réseau F présente quelques tronçons ayant eu des travaux qui n'avaient pas de problème de planéité longitudinale, soit entre 10 et 30% d'état « bon » suivant les mesures. Cet indicateur n'est donc pas déterminant pour tous les cas. Ici, la répartition des données défavorables au sein d'un chantier, et la problématique du lissage peut vraisemblablement l'expliquer.

Entre les types de mesures, on observe une détérioration de l'état pour les travaux plus lourds, par rapport aux travaux plus légers. Plus de couches bitumineuses ont été remplacées lorsque la planéité était plus mauvaise. Ceci semble cohérent, car corriger les défauts importants de planéité nécessite généralement de remplacer plusieurs couches.

Pour les deux réseaux les plus dégradés en I2 (B et E), les mesures de reconstruction totale ont presque toutes été effectuées sur des tronçons dont la planéité était jugée « suffisante », « critique » ou « mauvaise ». Les notes moyennes obtenues pour ces mesures sont importantes (3.29 et 4.17), ce qui confirme que cette mesure est pertinente pour réparer d'importants défauts de planéité de la chaussée. Ces notes sont d'ailleurs plus élevées de 1.2 à 1.4 que celles des tronçons sans travaux.

Il est toutefois surprenant de voir des mesures « ES » réalisées sur des tronçons également en relativement mauvais état, cette mesure n'ayant que très peu d'effet sur les défauts de planéité. Il est probable que cette mesure ne visait pas à corriger ce défaut, ou alors uniquement des défauts limités à la surface de la chaussée.

5.2.5 Résultats pour l'indice I3, réseaux cantonaux

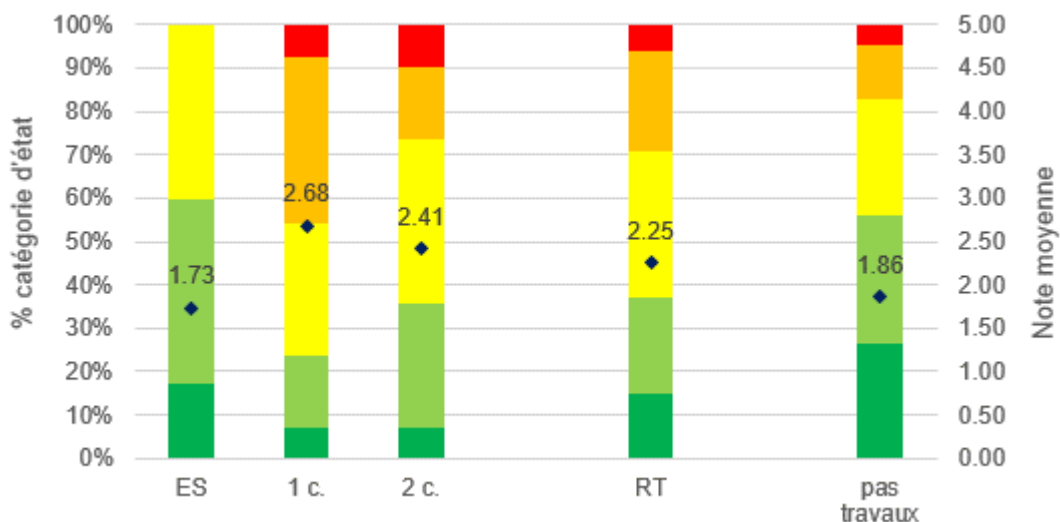


Fig. 35 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I3 par type de mesure, réseau B

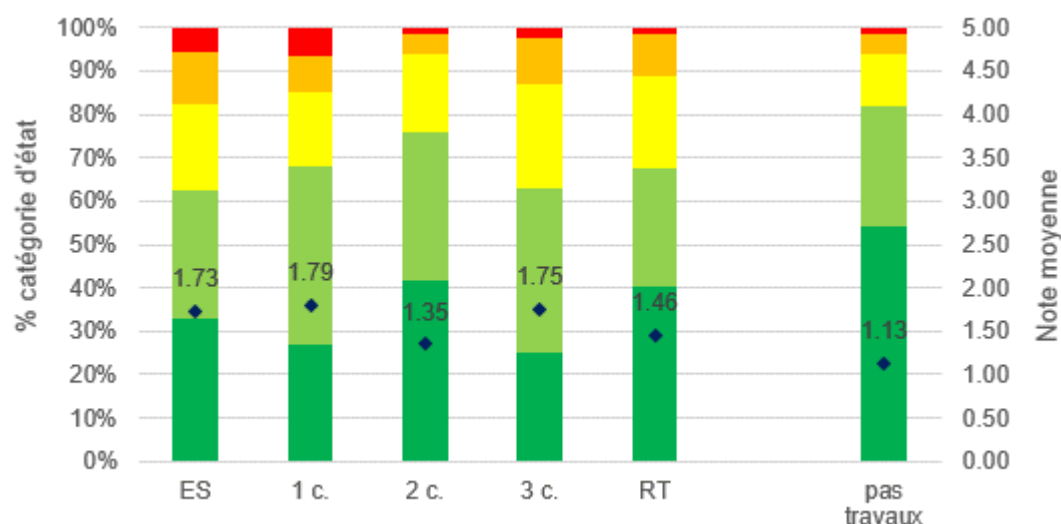


Fig. 36 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I3 par type de mesure, réseau F

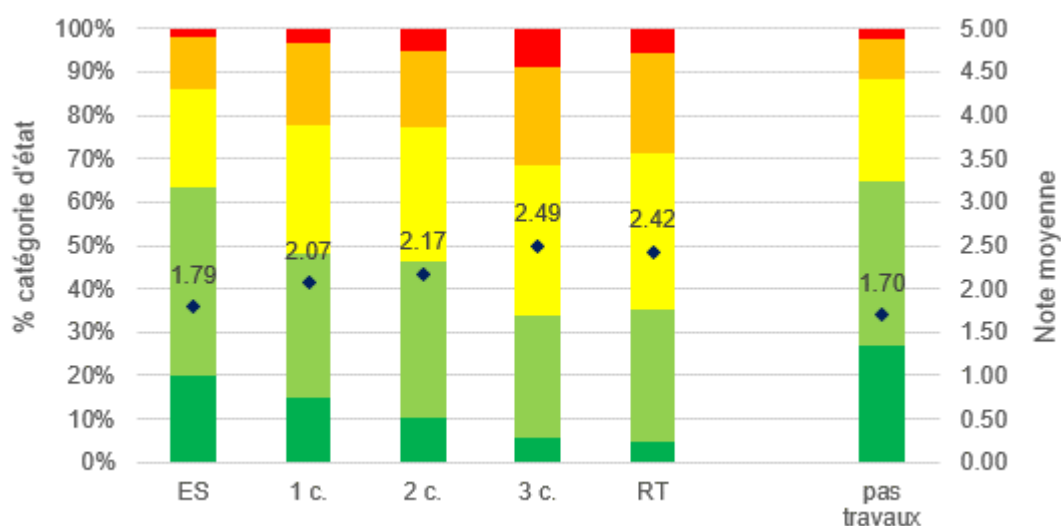


Fig. 37 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I3 par type de mesure, réseau E_14

Comme pour l'indice I2, le réseau B est également en moins bon état que le réseau F selon l'indice I3. Les travaux effectués sur le réseau B semblent avoir davantage été décidés d'après les défauts de planéité (transversale et longitudinale) alors que le réseau F se baserait plus sur les dégradations de surface (I0).

Sur les réseaux B et F, le choix du type de mesure semble indépendant de l'ampleur du défaut de planéité I3. Les travaux sont réalisés sur des tronçons qui présentent de tels défauts (par rapport aux tronçons sans travaux), mais il n'est pas possible d'identifier à partir de quelle profondeur d'ornièrre la mesure passerait de 1 à 2 couches remplacées.

Sur le réseau le plus dégradé (E), par contre, on note une augmentation de la profondeur d'ornièrre en moyenne lorsque 3 couches ou une reconstruction totale sont réalisées. Sur la base des valeurs moyennes de l'indice I3, on peut estimer que des mesures 1 et 2 couches sont réalisées jusqu'à 8 mm d'ornièrre, alors que des mesures 3 couches ou « RT » interviennent dès 10 mm d'ornièrre, ceci en considérant la règle d'évaluation des RP de la norme VSS 40 925b. Une explication plausible serait que la présence de 3 couches correspond à des secteurs avec un trafic plus lourd et donc une manifestation plus grave de l'ornièrage. Ce postulat ne se vérifie cependant pas sur les autres réseaux.

Sur les réseaux B et E, la mesure « ES » ne semble pas avoir été réalisée sur la base de ce critère, puisque leur état global est très proche de tronçons sans mesure. Dans le cas du réseau B, ces mesures ont même été réalisées sur des tronçons présentant moins d'ornièrisme que le reste du réseau. Ce résultat est attendu, étant donné que ce type de mesure avec revêtement fin ne permet de corriger qu'une très petite profondeur d'ornièrisme.

5.2.6 Particularités sur certains réseaux cantonaux (indice IA5)

Les résultats généraux présentés au chapitre 5.1.1 avaient conduit à exclure l'indice IA5 de l'analyse, celui-ci n'étant pas apparu comme déterminant pour identifier des tronçons avec travaux.

Cependant, les réseaux C et D constituent des cas particuliers. Cela est dû à la présence plus marquée de ce type de dégradations sur ces réseaux. Ces cas particuliers sont présentés afin d'illustrer le besoin d'adapter les seuils de déclenchement aux spécificités locales du réseau étudié.

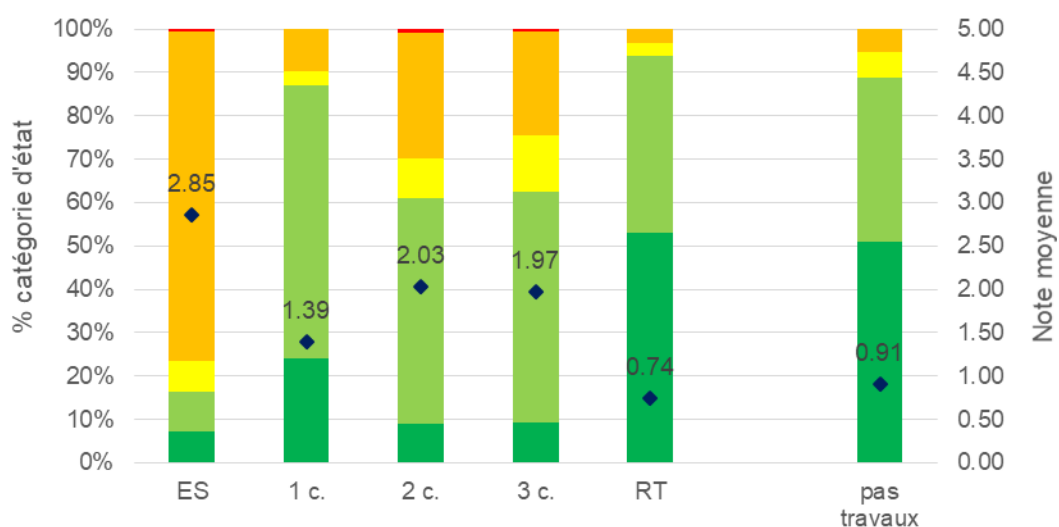


Fig. 38 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA5 par type de mesure, réseau C

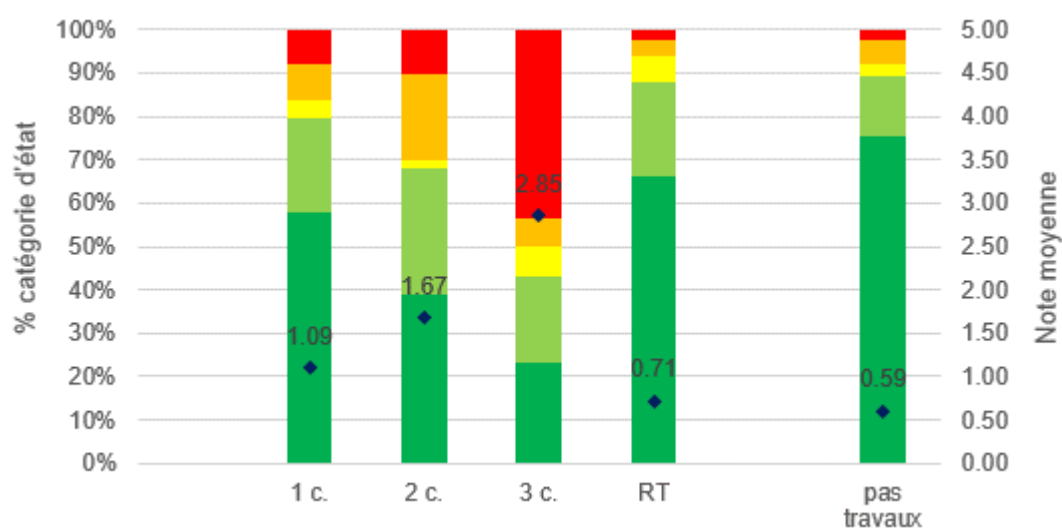


Fig. 39 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA5 par type de mesure, réseau D

Sur ces réseaux, il apparaît que certains types de mesures ont été particulièrement réalisés sur des tronçons avec des notes IA5 nettement plus élevées que les tronçons sans travaux.

Pour le réseau C, cela est le cas des mesures « ES », « 2 couches » et « 3 couches ». Sur le réseau D, cela concerne un peu la mesure « 2 couches » et de manière très marquée la mesure « 3 couche », qui a été réalisée sur des tronçons dont près de la moitié sont jugés « mauvais » selon l'indice IA5. Ce résultat doit cependant être relativisé du fait que la base de données du réseau D ne comporte que 3 chantiers sur cette période, et que les tronçons « mauvais » proviennent tous du même chantier, réalisé sur un tronçon en très mauvais état selon la plupart des indicateurs.

Par ailleurs, aucune mesure « RT » ne semble avoir été réalisées à cause de l'indice IA5, les tronçons traités étant majoritairement jugés « bon » ou « moyen ».

Sur ces réseaux plus que sur les autres, l'indice IA5 permet donc d'identifier des tronçons qui nécessitent des travaux, cet indice pouvant intervenir dans la décision ou dans la priorisation entre secteur. Par contre, il ne permet vraisemblablement pas de sélectionner un type de mesure plutôt qu'un autre. Ce point avait été soulevé au chapitre 2.3.1, puisque la dégradation « réparation » renseigne sur un élément localisé, différent du reste de la chaussée.

5.2.7 Cas d'un réseau cantonal sans indices IAi

Le réseau cantonal G constitue un cas particulier puisque sur celui-ci, les données d'indice IA1 à IA5 composant l'indice I1 ne sont pas relevées. Il est donc intéressant d'étudier si le choix des mesures peut tout de même être expliqué lorsque moins d'indicateurs sont disponibles.

Les données transmises pour le réseau G présentent en outre l'autre particularité d'être agrégées à l'échelle de secteurs d'entretien. On traitera donc de ce réseau dans le chapitre 5.3 ayant trait au lissage des données.

5.2.8 Résultats pour la partie de réseau national

Les résultats présentés pour la partie de réseau national sont basés sur les données d'état relevées en 2013, ceci car les travaux effectivement réalisés par la suite (période 2014-2017) comportent une plus grande variété des types de mesures que l'autre jeu de données à disposition (données d'état 2017 et travaux planifiés 2018-2022).

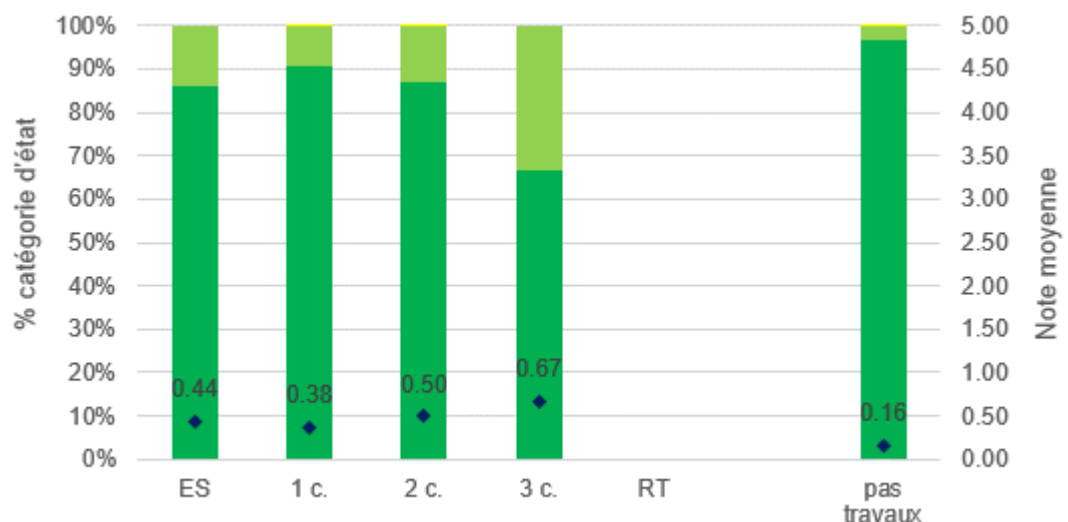


Fig. 40 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I0 par type de mesure, réseau N_13

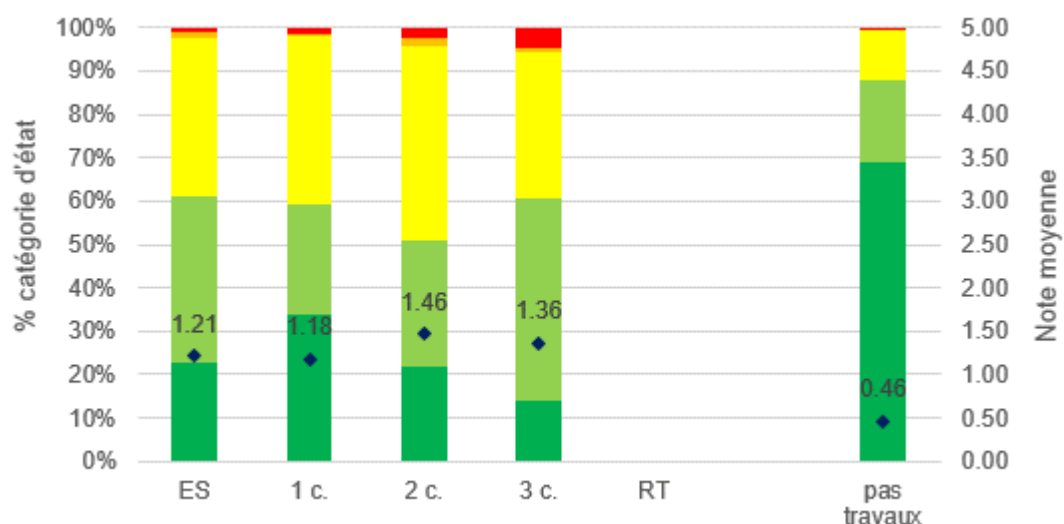


Fig. 41 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA2 par type de mesure, réseau N_13

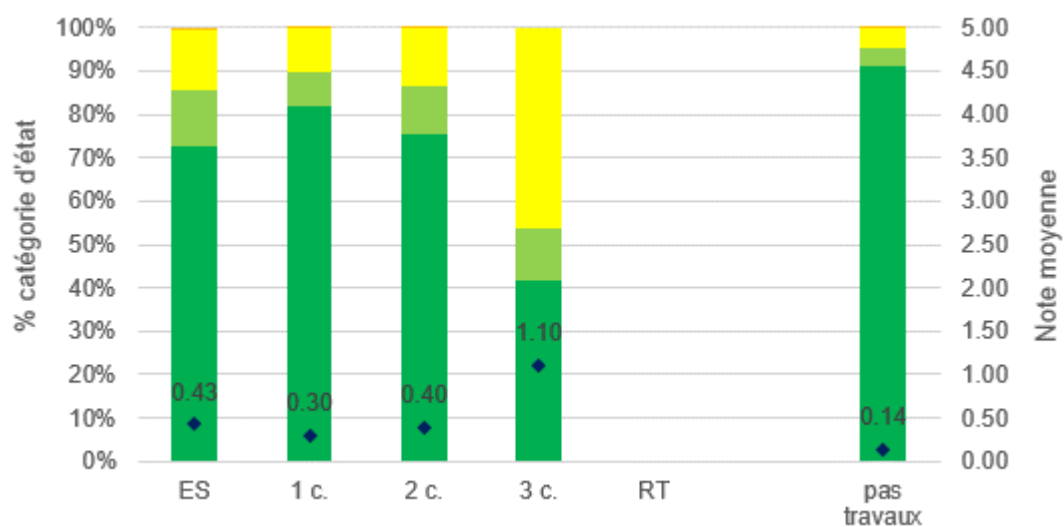


Fig. 42 Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA4 par type de mesure, réseau N_13

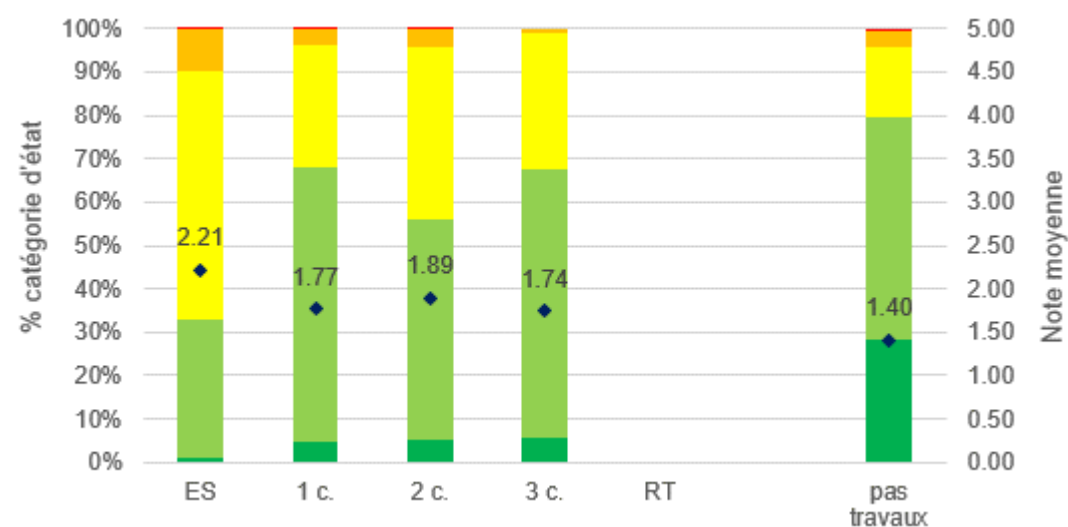


Fig. 43 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I2 par type de mesure, réseau N_13

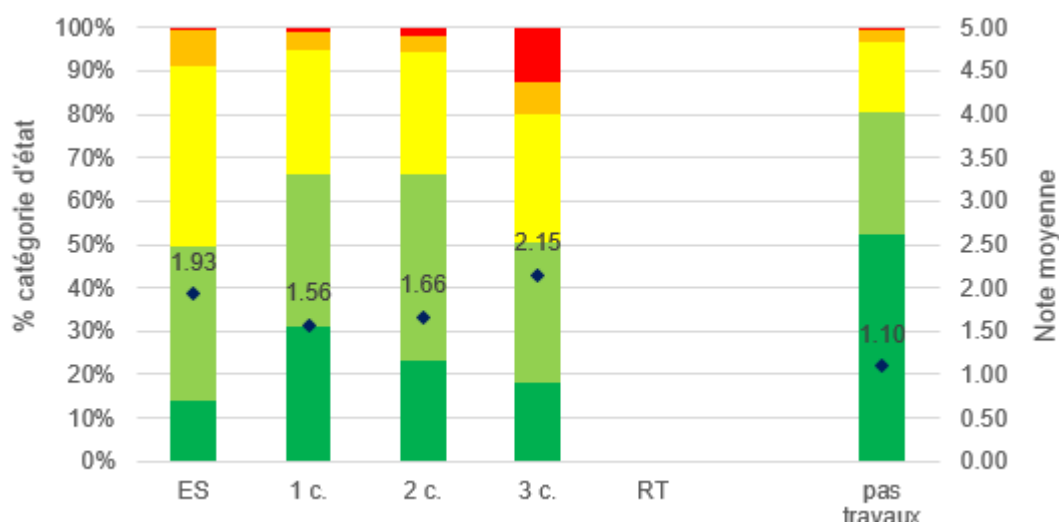


Fig. 44 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I3 par type de mesure, réseau N_13

Comme cela avait déjà été indiqué au chapitre 5.1.2, les routes nationales ont très peu de dégradations de surface. C'est donc sans surprise qu'on constate que tous les tronçons avec des travaux sont dans un état « bon » ou « moyen » selon l'indice I0, tout comme le reste du réseau.

En revanche, en se concentrant sur les dégradations de surface (indice IA2), il apparaît que les travaux réalisés concernent des tronçons plus dégradés que le reste du réseau, avec un indice moyen supérieure de 0.7 à 1.0 pt au reste du réseau, et avec une part non-négligeable de tronçons jugés « suffisant », ainsi que quelques « critique » ou « mauvais ». Par contre, cet indice ne permet pas de faire de distinction entre les types de mesures, ceci car les différents types obtiennent des notes relativement proches.

L'indice IA4 ne permet pas de faire une distinction nette entre les tronçons avec et sans travaux, à l'exception de la mesure « remplacement de 3 couches bitumineuses ». Bien que les dégradations structurelles (IA4) soient très rares sur le réseau national, elles semblent conduire dans de rares cas à réaliser des mesures conséquentes. Ce type de travaux demeure toutefois très peu fréquent.

Les indices de planéité I2 et I3 semblent pouvoir expliquer la réalisation de certains travaux, s'agissant de tronçons plus dégradés que le réseau, avec quelques tronçons jugés « suffisant », et parfois « critique » ou « mauvais ». Comme pour l'IA4, les rares défauts importants de planéité transversale I3 ont été corrigés par une mesure avec remplacement de 3 couches bitumineuses.

De manière générale, si les indices étudiés (sauf I0, et dans une moindre mesure IA4) permettent d'expliquer la décision d'effectuer des travaux, ils ne permettent pas d'opérer un choix entre les différents types de mesures. Ce résultat peut s'expliquer d'une part par le très bon état de ce réseau, les indicateurs fournissant alors très peu d'indications sur de possibles dégradations des couches plus profondes. D'autre part, dans le cas de la filiale de routes nationale étudiée, la décision du choix de la mesure (au niveau de la planification) tient principalement compte de l'âge des couches en place (approche basée sur le cycle de vie). Ainsi, si toutes les couches ont le même âge, seule la couche de roulement sera remplacée dans un premier temps, partant du principe que les couches inférieures ont une durée de vie plus importante. Le choix de la mesure ne dépend donc que très peu de l'état relevé. Néanmoins, les deux approches peuvent s'avérer complémentaires, les relevés d'état permettant d'identifier des revêtements problématiques, et l'âge des couches renseignant sur le nombre de couche à remplacer.

5.2.9 Résultats pour les réseaux communaux

Comme évoqué au chapitre 5.1.3, l'indice I1 constitue un bon indicateur pour exprimer le besoin d'entretien d'un tronçon, mais il ne permet pas de faire une réelle distinction entre les différentes familles de mesures, puisque cet indice combine différentes familles de dégradations qui sont autant de causes pouvant expliquer le choix d'une mesure.

Pour le réseau K1 (Fig. 45), on observe une légère augmentation de l'indice I1 moyen quand on passe des mesures les plus légères (ES) aux plus lourdes (RF-RT, pour renforcement-reconstruction). Néanmoins, tous les tronçons traités sont au minimum dans un état « suffisant » pour tous les types de mesures. Il n'y a donc pas de différences importantes.

Pour le réseau K2 (Fig. 46), on observe plutôt l'effet contraire, les tronçons les plus dégradés recevant plutôt une mesure ES. De plus, tous les types de mesures regroupent tant des tronçons jugés « mauvais » que des tronçons « bon » et « moyen ». Précisons qu'il s'agit là de chantiers (groupe de tronçon) qui sont tous dans un état satisfaisant, et non pas de tronçons isolés au milieu d'autres plus dégradés.

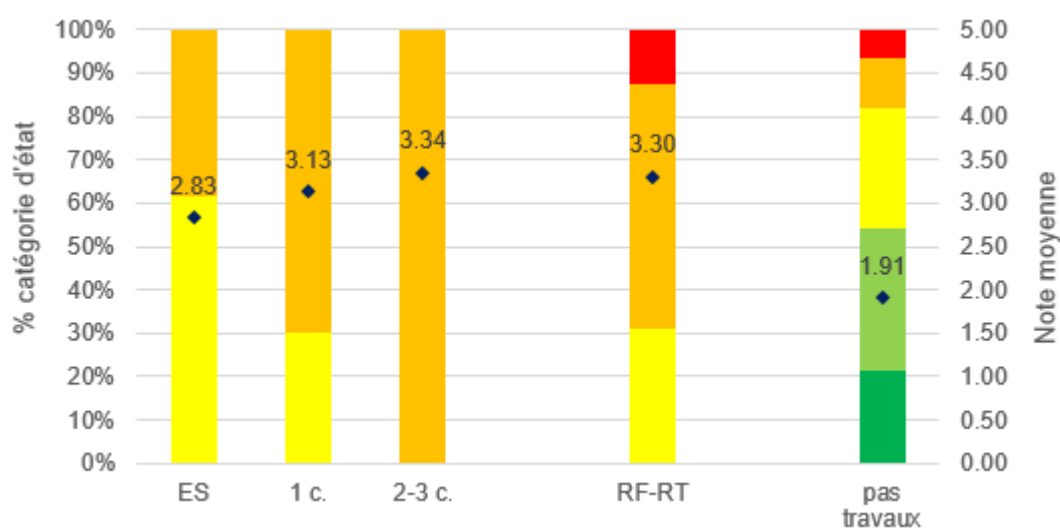


Fig. 45 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I1 par type de mesure, réseau K1

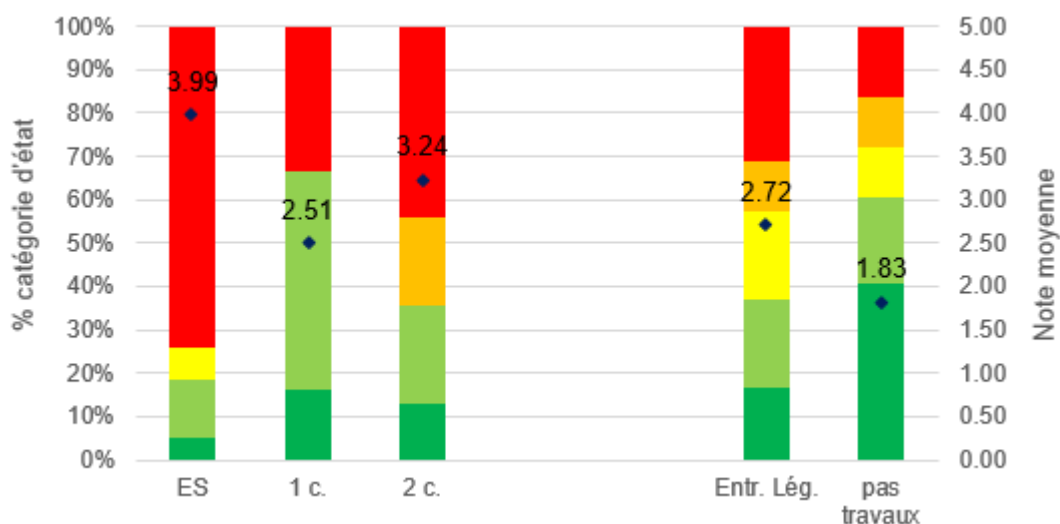


Fig. 46 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I1 par type de mesure, réseau K2

Concernant les indices individuels, les résultats pour l'indice IA2 pour le réseau K1 (Fig. 47) et K2 (Fig. 48) indiquent dans les deux cas que cet indice semble un peu plus déterminant pour des mesures de traitement de surface (ES) ou se limitant à la couche de

roulement (1 couche). Néanmoins, des tronçons avec des dégradations importantes en IA2 sont aussi traités avec des mesures lourdes, s'agissant souvent de tronçons présentant aussi des dégradations structurelles (IA4). Le réseau K2 étant en plus mauvais état que le réseau K1, il est cohérent que des mesures d'entretien même superficiel soient réalisées sur des tronçons comparativement plus dégradés.

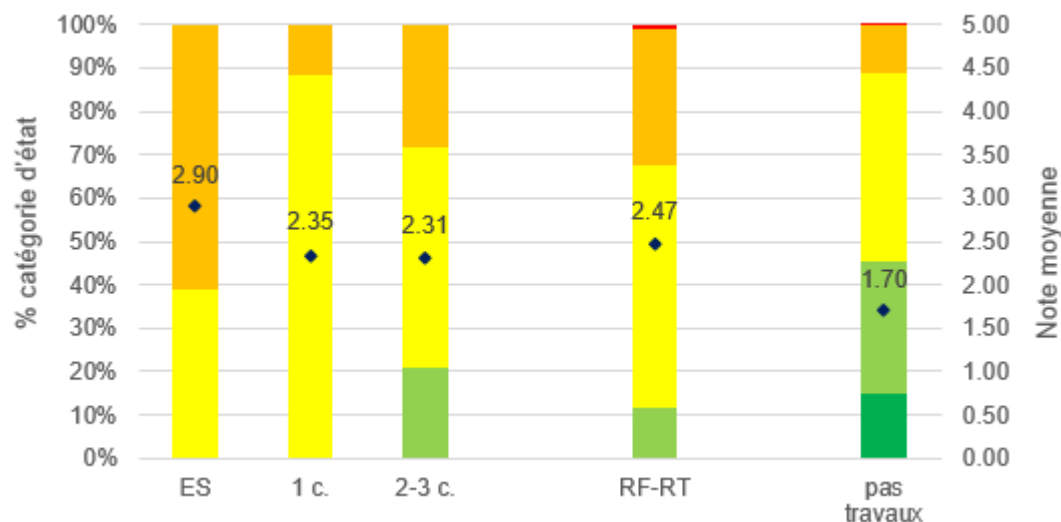


Fig. 47 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA2 par type de mesure, réseau K1

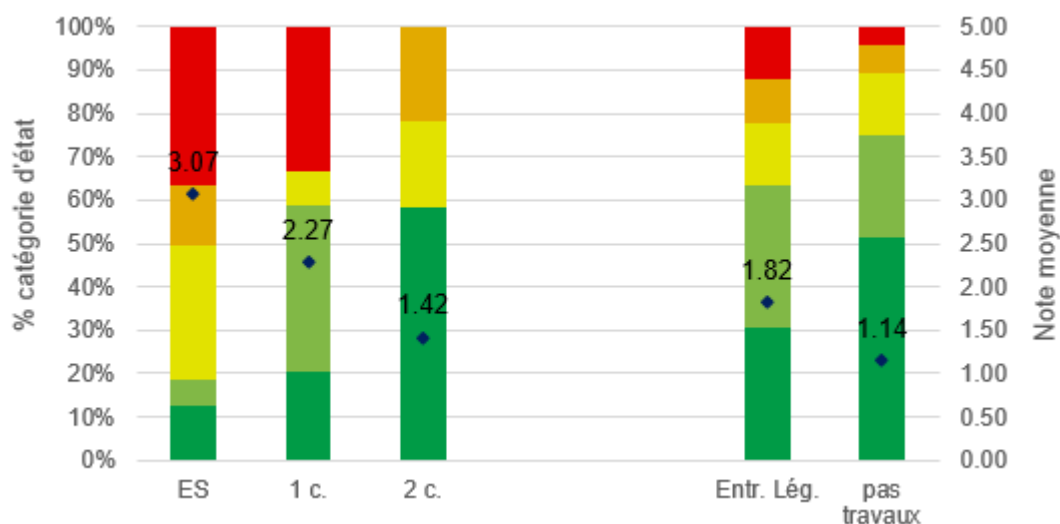


Fig. 48 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA2 par type de mesure, réseau K2

L'indice IA4 est également un bon indicateur de la nécessité d'effectuer des travaux. On observe aussi que les tronçons ayant reçu des mesures lourdes sont presque tous dans un état « suffisant », « critique » ou « mauvais » (Fig. 49, Fig. 50). De manière plus surprenante, il y aussi des tronçons avec des dégradations de ce niveau sur des tronçons qui n'ont été traités que de manière superficielle (ES). Cette décision a peut-être été guidée par des contraintes budgétaires, la mesure visant à traiter la fissuration en surface mais les moyens disponibles ne permettant pas un traitement en profondeur. De telles contraintes financières sont bien souvent déterminantes pour les réseaux communaux et ne reflète pas les besoins techniques de l'entretien de la chaussée.

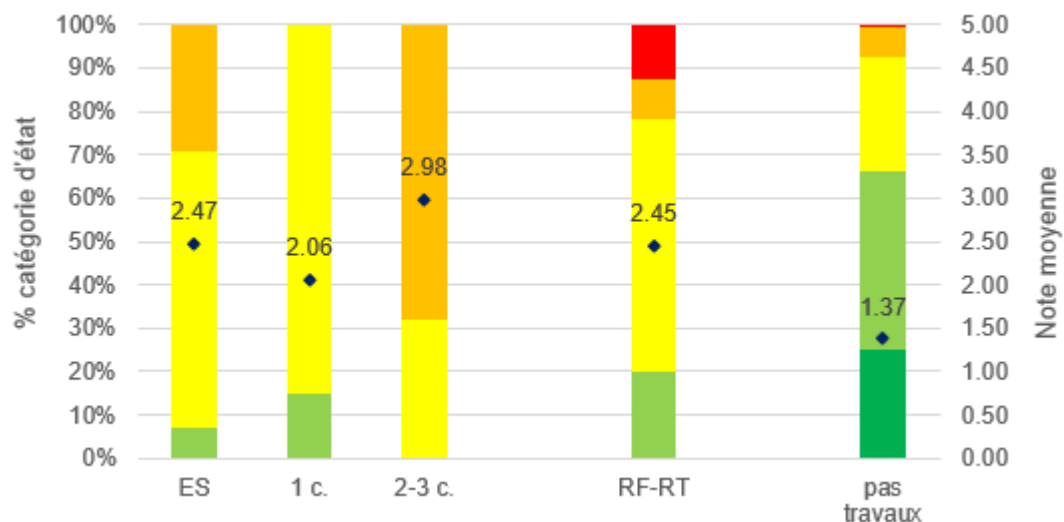


Fig. 49 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA4 par type de mesure, réseau K1

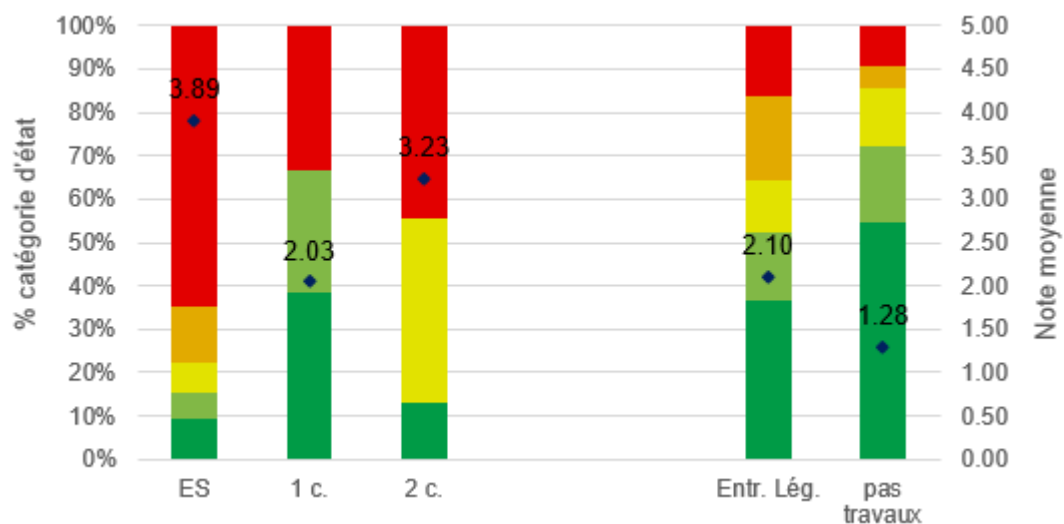


Fig. 50 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA4 par type de mesure, réseau K2

Pour l'indice IA1, on observe que quelques tronçons traités atteignent la note maximale en IA1, mais que ces tronçons ont également des dégradations importantes en IA2 et/ou en IA4. Le choix de la mesure d'entretien, surtout lorsqu'il s'agit du remplacement d'une ou deux couches, et pas d'un simple traitement de surface, semble donc avant tout dicté par ces autres dégradations.

Le même phénomène est observé pour l'indice IA3i1 sur le réseau K2. Cet indice est moins déterminant sur les réseaux communaux, l'orniérage y étant moins fréquent en raison de charges de trafic moins important. Il faut néanmoins être vigilant à quelques cas particuliers, comme le trafic de ligne de bus qui peut induire de telles dégradations. Les cas rares doivent alors être traités, et des seuils de déclenchement de mesures pourraient tout de même être envisagés.

Enfin, concernant le IA5, même s'il les réparations sont plus fréquentes sur les réseaux urbains, cet indice ne permet pas de faire de distinction entre les types de mesures. La Fig. 51 indique en effet que, pour le réseau K1, des tronçons jugés « suffisant » ou « critique » en IA5 ont tantôt reçu une mesure superficielle ES, tantôt une mesure plus lourde (2 couches voire RT). Ce résultat est attendu, car par définition le IA5 exprime un défaut de la chaussée qui ne concerne que les réparations (fouille), sans donner plus d'informations sur l'état des couches de la chaussée d'origine.

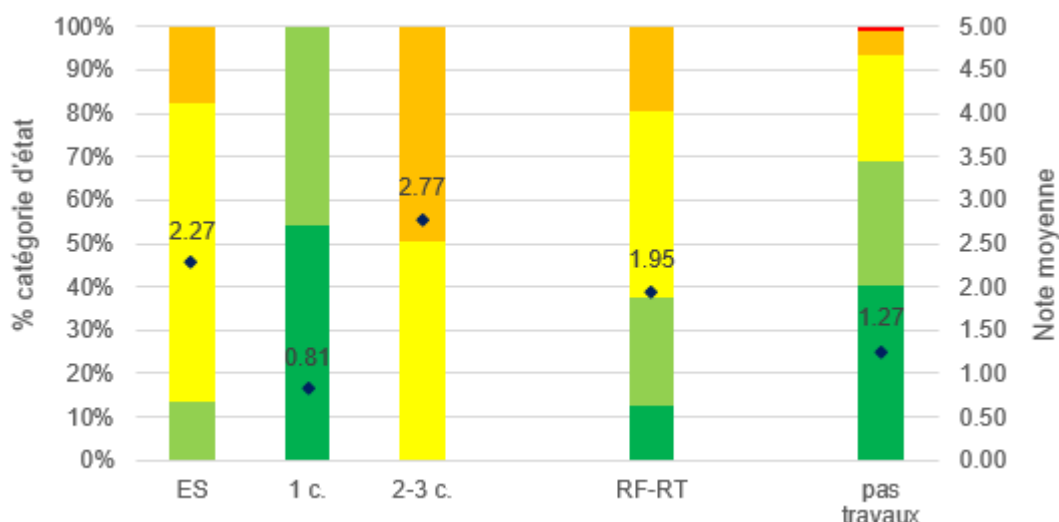


Fig. 51 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice IA5 par type de mesure, réseau K1

Sur la base de ces résultats, on peut conclure que les indices IA2 et IA4 sont les plus pertinents pour le choix des mesures d'entretien sur les réseaux communaux. Les résultats traités ici ne permettent toutefois pas d'établir des seuils qui distingueraient les mesures de manière satisfaisante. On peut néanmoins indiquer que l'indice IA2 semble plus déterminant pour des mesures superficielles ou sur la couche de roulement, tandis que le IA4 se réfère plus aux travaux sur les couches inférieures.

5.2.10 Particularités et retour d'expérience pour la mesure Enduit superficiel

Les résultats par indices présentés précédemment ont fait apparaître des tendances spécifiques pour la mesure « enduit superficiel » que l'on répertorie dans le présent chapitre.

Pour les trois réseaux cantonaux ainsi que les deux réseaux communaux présentés en détails, ce type de mesure a été mis en œuvre sur des tronçons qui présentent autant, voire davantage, de dégradations de surface selon l'indice I1 que les tronçons recevant des mesures plus lourdes.

Cette mesure semble adaptée pour les dégradations de surface IA2, mais on n'a toutefois pas observé de différence entre les mesures pour cet indice. Par contre, on constate qu'elle a parfois été réalisée sur des tronçons avec des dégradations structurelles IA4, bien que cette mesure ne soit pas destinée à en traiter la cause.

De même, cette mesure a parfois été mise en œuvre sur des tronçons avec des défauts de planéité I2 importants, bien qu'elle ne devrait avoir que peu d'effet sur ces défauts.

A contrario, cette mesure n'a que très peu été employée sur des tronçons avec d'importantes ornières I3, puisqu'elle est inefficace pour les traiter.

Ces tendances parfois contradictoires peuvent s'expliquer par l'emploi qui est fait de cette mesure. A titre d'exemple, un responsable du réseau F nous a indiqué que la mesure « ES » était employée comme mesure de réparation pouvant être réalisée rapidement, et dont le but principal est d'améliorer l'adhérence de la chaussée. Il a également indiqué que cette mesure était de moins en moins utilisée, optant de préférence pour le remplacement de la couche de roulement.

Un gestionnaire du réseau E indique quant à lui avoir un bon retour d'expérience avec ce type de mesure et dont la durée de vie peut parfois atteindre 10 à 15 ans. Sa facilité et rapidité d'exécution ainsi que son coût faible constituent des arguments importants au moment du choix de la mesure. Il envisage cette mesure pour traiter des dégradations de

surface mais aussi des déformations du revêtement, dans une certaine limite. L'application de cette mesure n'est pas limitée aux routes secondaires. Par contre, le gestionnaire déconseille fortement son emploi dans des virages, où les efforts de cisaillement sont importants.

En ce qui concerne les routes nationales, cette mesure est principalement envisagée comme une mesure temporaire, réalisée afin de prolonger de quelques années la durée de vie d'un secteur, avant la réalisation de travaux plus conséquents, généralement coordonnés entre différents domaines (Chaussées, Ouvrage d'art, BSA, etc.).

Enfin, pour les réseaux communaux, le gestionnaire du réseau K1 indique que cette mesure a été mise en œuvre sur des chaussées anciennes dont la structure n'est pas standard. Il s'agit en l'occurrence de tronçons à faible trafic, même si cela n'a pas été un critère de choix pour le gestionnaire. En revanche, ce gestionnaire déconseille l'utilisation des enduits superficiels dans les zones de stationnement, à cause des efforts de cisaillement.

Ces informations récoltées auprès des gestionnaires indiquent que la mesure « ES » est utilisée que dans quelques cas limités. Elle ne devrait pas être envisagée sur des axes à fort trafic. Si elle présente des avantages comme sa facilité de mise en œuvre, sa durée de vie est en principe plus réduite, elle devrait être envisagée surtout pour corriger des dégradations à la surface du revêtement, mais pas des défauts de planéité. Ces informations sont déterminantes pour l'établissement des seuils de déclenchement.

5.3 Résultat après lissage des données

5.3.1 Méthodes de lissages

Les analyses menées par Swiss-SDI ainsi que les résultats présentés au chapitre précédent ont mis en évidence la problématique de l'inhomogénéité des données d'état au sein des secteurs ayant reçus des travaux. Il est en effet fréquent que des tronçons en relativement bon état soient situés entre des tronçons plus dégradés. Les travaux sont alors décidés sur la base de ces tronçons les plus dégradés, mais les valeurs statistiques qu'on extrait de ces secteurs en chantier sont influencées aussi par les tronçons en bon état.

Dans sa démarche, Swiss-SDI a proposé une approche visant à homogénéiser l'état des secteurs en se basant sur les données les plus défavorables, celles-ci étant plus déterminantes dans le choix d'effectuer des travaux et pour le choix d'une mesure d'entretien. Cette méthode comporte un « lissage vers le haut », en considérant une fenêtre de +/-250m autour du tronçon étudié et en prenant sur cet intervalle la valeur du percentile à 90%, ce qui revient à considérer la seconde pire valeur. En procédant ainsi, on étend le mauvais état qui est déterminant pour la décision d'effectuer des travaux.

Cette démarche, qu'on appellera « percentile mobile », est appliquée sur d'autres réseaux, ceci afin d'accentuer les différences entre les tronçons avec et sans travaux, pour permettre d'établir des seuils.

D'autres approches sont également possibles pour rendre les données plus homogènes à l'intérieur des sections en travaux et dégager des valeurs déterminantes. Une autre approche propose de considérer la valeur moyenne du secteur avec travaux comme valeur déterminante. Afin de tenir compte des tronçons les plus dégradés, une variante propose ensuite d'augmenter la valeur moyenne de l'écart-type des valeurs dans le secteur en travaux.

5.3.2 Impact du lissage sur les données cantonales

L'impact de ces trois méthodes de « lissage » sur le résultat des analyses statistiques (cas présentés au chapitre précédent) est illustré ci-dessous, pour l'indice I1 sur le réseau F.

Ces approches n'ont été menées que sur les secteurs avec travaux et non sur l'entier du réseau (sauf l'approche du percentile, qui a été généralisée sur le réseau).

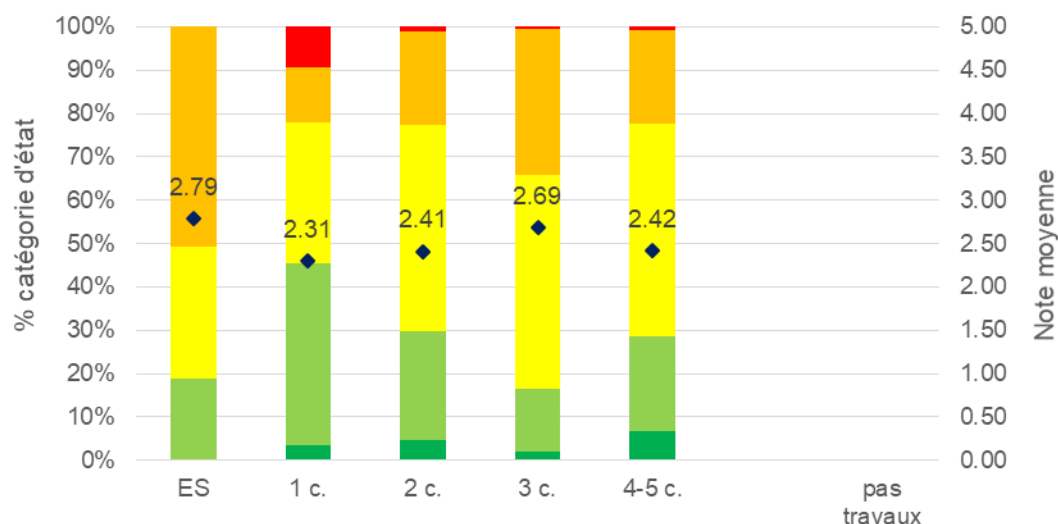


Fig. 52 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I1 par type de mesure, réseau F, lissage avec la valeur moyenne par secteur de chantier.

En comparaison au cas de base (Fig. 24), le lissage en ne considérant que la valeur moyenne pour chaque secteur de chantier conduit à réduire la proportion des valeurs extrêmes, dans les parts « bon » et « mauvais ». La valeur moyenne, demeure inchangée. Cette approche donne ainsi l'impression que les travaux concernent plus de secteurs « suffisant » ou « critique », mais n'amène pas plus de contraste sur les valeurs moyennes, qui pourraient aider à déterminer des seuils de déclenchement. Cette approche n'est donc pas retenue par la suite.

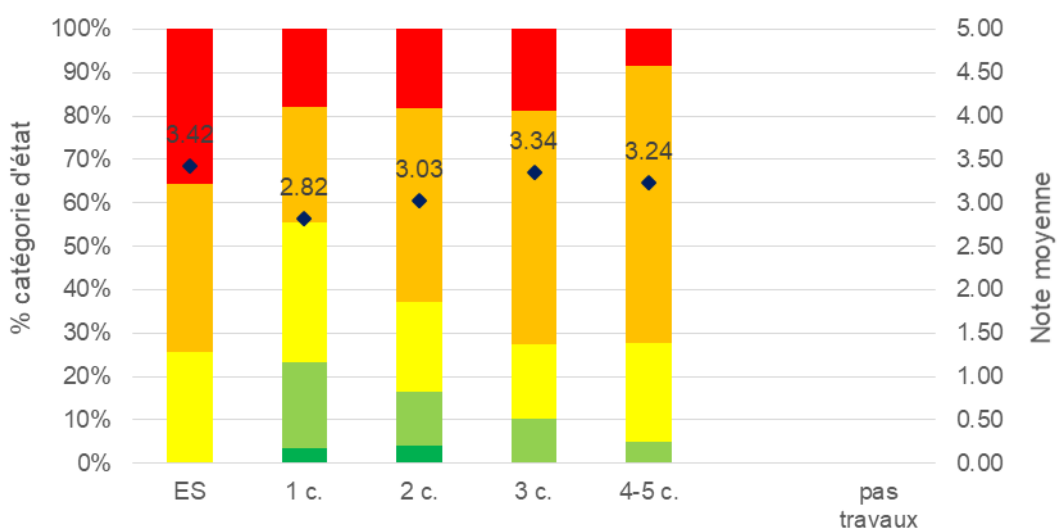


Fig. 53 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I1 par type de mesure, réseau F, lissage avec la valeur « moyenne + écart-type » par secteur de chantier.

De manière attendue, le fait d'ajouter l'écart-type à la valeur moyenne augmente la valeur d'état des secteurs avec chantiers en les faisant apparaître comme plus dégradés, donc plus proches des valeurs déterminantes pour le choix des travaux (Fig. 53).

En comparaison au cas de base (Fig. 24), le lissage en tenant également compte de l'écart-type augmente la proportion de tronçon « critique » et « mauvais » avec des travaux, les tronçons « bon » ayant presque disparus. Les valeurs moyennes sont augmentées. Cela

signifie que les seuils de déclenchement devraient également être adaptés en conséquence lorsque cette méthode est appliquée.

Par contre, le contraste entre les types de mesure ne change pas vraiment, les mêmes tendances apparaissent, mais transposée dans des états plus dégradés.

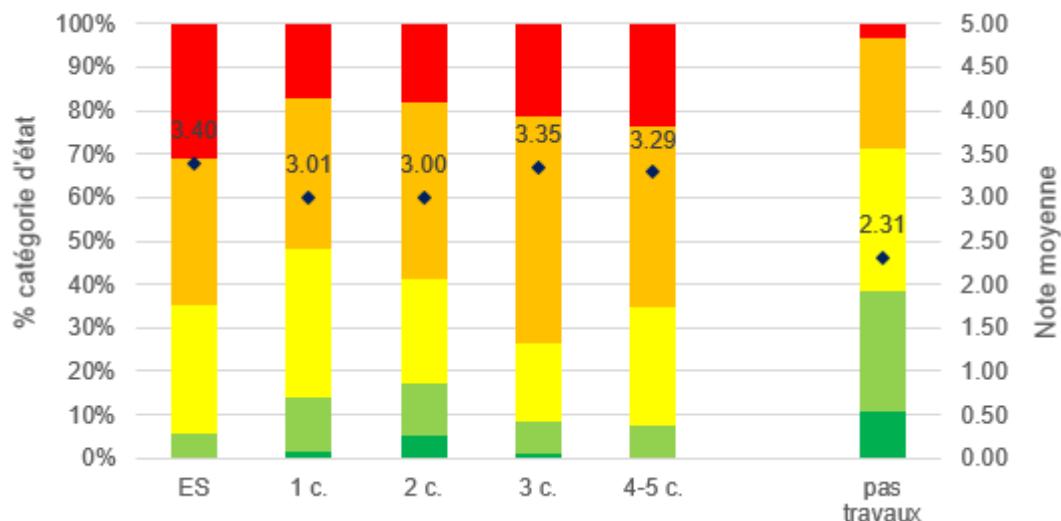


Fig. 54 : Valeur moyenne et distribution de l'Indice I1 par type de mesure, réseau F, lissage avec le percentile 90% sur une fenêtre de +/- 250 m, appliquée sur tout le réseau.

La dernière méthode de lissage, qui fait appel au percentile appliqué sur une fenêtre mobile, conduit à des résultats proches de ceux de la méthode avec la moyenne additionnée de l'écart-type ; les tronçons « bon » disparaissent et plus de tronçons « mauvais » sont traités.

En appliquant cette méthode à l'entier du réseau, y compris les tronçons sans travaux, on s'aperçoit que l'état des tronçons a également été détérioré. Cela indique que les tronçons sans travaux sont également inhomogènes et comportent des tronçons un peu plus dégradés qui influencent les tronçons voisins lors du lissage. Dans ce cas aussi, les valeurs moyennes, qui peuvent servir à déterminer des seuils de déclenchement, sont décalées vers le haut. Il faudrait donc adapter les seuils de déclenchement en conséquence si cette méthode de lissage est mise en œuvre.

5.3.3 Cas des routes nationales

Pour sa planification des travaux d'entretien routier, le gestionnaire du réseau N a défini des objets d'entretien qui constituent des unités spatiales à l'intérieur desquels la chaussée est composée généralement du même type de matériau et la même structure. Chaque ouvrage d'art (ponts et tunnels) correspond aussi à un objet d'entretien. Ces objets fournissent ainsi un découpage spatial du réseau sur lequel il est possible d'agréger des données d'état.

Les données d'état sont alors agrégées sur chaque objet d'entretien et exploitées à partir de leur valeur moyenne des notes. Néanmoins, pour pouvoir tenir compte de la possible hétérogénéité de l'état au sein d'un objet d'entretien, l'écart-type des notes est également considéré, en l'additionnant à la moyenne. Ainsi, les objets plus hétérogènes, avec un secteur plus dégradé en leur sein, apparaissent comme plus prioritaires que les objets dont l'état est très uniforme.

L'incidence de la prise en compte de l'écart-type est illustrée dans le Tab. 25, où est comparé l'état de ces objets d'entretien suivant que l'on considère leur valeurs moyennes agrégée puis leur valeur moyenne + écart-type. Ces résultats moyens sont comparés à ceux de l'ensemble des tronçons relevés de 100 m, sans agrégation. On indique dans

chaque situation la valeur moyenne à l'échelle du réseau N, ainsi que le nombre de km (d'objet d'entretien ou de tronçons relevés) dont la note moyenne (respectivement la moyenne + écart-type) est supérieure à 3, correspondant à un état « critique » ou « mauvais ».

Tab. 25 Impact sur les indices d'état de l'agrégation de données dans des objets d'entretien, réseau N_17.

Méthode d'agrégation	Indicateur à l'échelle du réseau N	IA2	IA4	I0	I2	I3
Valeur par tronçons de 100m	Moyenne	0.38	0.20	0.16	1.21	0.55
	Longueur (de voies) avec note > 3.0	17'300 m	3'350 m	140 m	58'570 m	3'850 m
Agrégation : valeur moyenne	Moyenne	0.38	0.20	0.16	1.21	0.55
	Longueur (d'objet) avec note > 3.0	144 m	25 m	0 m	5'314m	323 m
Agrégation : valeur moyenne + écart-type	Moyenne	0.73	0.47	0.31	1.70	0.98
	Longueur (d'objet) avec note > 3.0	9'400 m	411 m	0 m	44'538 m	6'260 m

Par rapport aux données de 100 m relevées par voie, l'agrégation sur des objets d'entretien en considérant la valeur moyenne des indices sur chaque objet ne modifie logiquement pas la valeur moyenne des indices du réseau. En revanche, la somme des longueurs d'objets en état « critique » ou « mauvais » (note > 3.0) diminue car les données extrêmes isolées sont lissées au sein des objets d'entretien. Il serait alors plus difficile d'identifier des portions de réseau problématiques au niveau des objets en appliquant les mêmes seuils de déclenchement. Ces derniers devraient alors être abaissés si le gestionnaire souhaite retrouver une quantité de mesures déclenchées comparable.

Lorsque l'écart-type des notes est additionné à la note moyenne des indices agrégés par objets, l'état moyen du réseau apparaît alors comme étant plus dégradé. De la même manière, la longueur de réseau « critique » ou « mauvais » (note > 3.0) augmente également. On n'atteint toutefois pas la même longueur qu'en considérant les données par tronçons de 100m. Cette différence est en partie due au fait que les données par 100m concernent des longueurs de voies, alors que les longueurs rapportées aux objets couvrent plusieurs voies. Avec cette méthode, une modification des seuils ne serait pas forcément nécessaire pour identifier des tronçons problématiques du réseau nécessitant vraisemblablement des travaux.

Précisons encore que ces objets d'entretien, dont la longueur varie entre une centaine de mètres et plusieurs kilomètres doivent souvent encore être regroupés par secteurs pour définir des chantiers de taille suffisante pour le gestionnaire, les contraintes d'organisation étant prédominante sur le réseau N. Ajoutons également que le gestionnaire compare les propositions d'entretien basées sur l'état à celles basées sur l'âge des couches de la chaussée (cycle de vie), informations qui est également renseignée pour chaque objet d'entretien. Pour sa planification, ces deux démarches (basée sur l'état ou basée sur l'âge) s'avèrent complémentaires et sont considérées conjointement.

5.3.4 Cas des routes communales

Pour les réseaux communaux, le relevé d'état s'effectue parfois directement à l'échelle de tronçons de route dont l'état est homogène, en dérogeant à l'unité de relevé de 50 m préconisée par la normalisation [2]. Le releveur subdivise la route auscultée en parties dont l'état est homogène et qui peuvent donc être de longueurs variables. La définition de tels tronçons facilite alors la planification de mesure d'entretien, puisque l'étendue de la mesure est déjà définie au moment du relevé. Cette procédure constitue une sorte de lissage des caractéristiques d'état au moment de leur récolte.

Cette démarche n'est pas appliquée dans les données récoltées pour la présente étude et ne peut pas être illustrée. Le réseau K1 définit des tronçons allant de carrefour à carrefour. Le réseau K2 décompose quant à lui son réseau en tronçons de 50 m environ, conformément à la normalisation. Relevons que lors de la planification des interventions sur le réseau K2, les gestionnaires regroupent généralement les tronçons de 50 m afin de former des chantiers de longueur plus importante, selon les mesures d'entretien déclenchées sur la base de l'état.

5.4 Impacts d'autres facteurs dans le choix des mesures

Les analyses réalisées ont montré que l'état de la chaussée ne permettait souvent pas d'expliquer à lui seul la décision d'effectuer des travaux ou le choix d'un type de mesure d'entretien et que d'autres facteurs intervenaient dans le processus de décision. Il n'est d'ailleurs pas rare que ces autres facteurs soient prédominants dans le processus de décision par rapport à l'état. On pense notamment à :

- Âge des différentes couches de la structure de la chaussée (cycle de vie de la chaussée)
- Critères fonctionnels, au sens de la norme VSS 40 908 [9], exprimant l'importance d'une route à l'échelle du réseau, parmi lesquels :
 - Trafic (trafic journalier moyen TJM) et trafic poids-lourds
 - Hiérarchie du réseau ou classification des routes
- Facteurs liés à la réalité du terrain, à la connaissance du gestionnaire, des chefs de projets et des voyers

Dans le cadre de cette étude, des données relatives au trafic (TJM) et à la hiérarchie du réseau ont pu être récoltées à l'échelle d'un réseau pour être mise en relation avec les données d'état, ceci pour la filiale des routes nationale (réseau N) et pour une majorité des réseaux cantonaux (A, B, C, D, E) , comme indiqué au chapitre 3.3.

Ces données fonctionnelles ont été comparées aux travaux effectivement réalisés, de manière similaire aux analyses statistiques réalisées avec les données d'état. En ce qui concerne la hiérarchie du réseau (classe de route), aucune tendance généralisable à l'ensemble des réseaux (cantonaux) étudiés n'a pu être établie. Il n'a ainsi pas été possible d'établir si un type de mesure d'entretien serait davantage appliqué sur le réseau principal alors qu'un autre type de mesure serait mise en œuvre sur le réseau secondaire.

Pour le trafic, une influence de la charge de trafic sur le nombre de couches mises en œuvre lors d'un entretien est attendue. En particulier, on s'attend à ce que davantage de travaux avec 3 couches soient réalisés sur les routes à fort trafic. Pour les réseaux étudiés, cela n'est pas observé.

A titre d'exemple, la répartition des types de travaux réalisés sur le réseau E est illustrée dans la *Fig. 55*, sur la période 2010 à 2014, puis sur la période 2015 à 2018, en fonction du trafic journalier moyen. On s'aperçoit que les mesures avec 2 ou 3 couches sont ici moins fréquemment réalisées sur les routes avec un trafic important, tout comme les reconstructions totales. Cela s'explique peut-être par des meilleures qualités de chaussées pour ces routes importantes (épaisseurs plus importantes, matériaux plus performants).

On constate également, qu'entre les deux périodes analysées, les ratios entre les différents types de travaux varient pour le même niveau de trafic, ce qui dénote d'une évolution de la stratégie voire de l'absence de stratégie basée sur le trafic pour le choix d'un type de travaux.

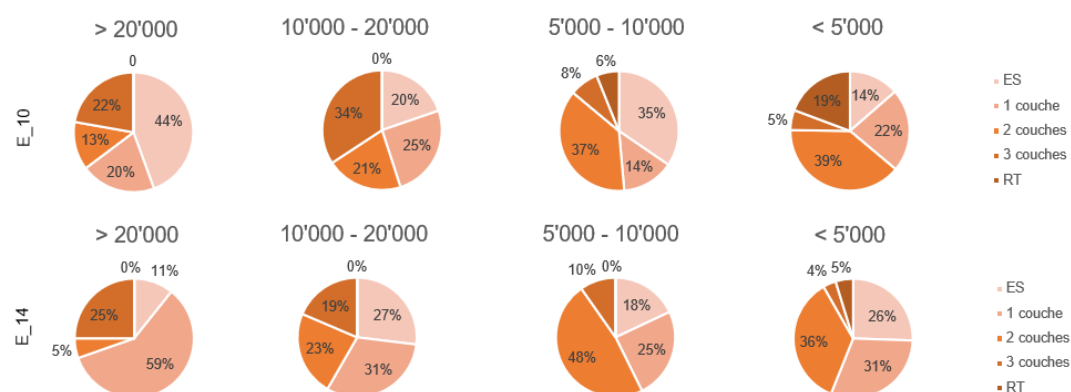


Fig. 55 : Répartition du type de travaux réalisés pour différents niveaux de trafic journalier moyen sur le réseau E, pour la période 2011-2014 (E_10) et pour la période 2015-2018 (E_14).

Concernant le cycle de vie des chaussées, dans le cadre de ce projet, peu de données exploitables ont pu être collectées. Pour les réseaux cantonaux, ces données ne sont souvent pas disponibles pour la totalité du réseau, et se limitent parfois uniquement à la couche de roulement.

Parmi les réseaux cantonaux étudiés, le réseau G fait figure d'exception, puisque ce dernier dispose d'informations sur la structure des chaussées pour la quasi-totalité de son réseau. Ses gestionnaires ont mis en place une planification de l'entretien essentiellement basée sur le cycle de vie de la chaussée, dont les principes peuvent être résumés comme suit : dans un premier temps, remplacement uniquement d'une couche de roulement (p. ex. après 20 ans), puis lors d'une seconde intervention d'entretien (p.ex. après 40 ans) remplacement de l'ensemble des couches bitumineuses, en vertu de durées de vie admises plus élevée pour les couches profondes.

Une telle stratégie est également employée par certaines filiales des routes nationales, dont celle participant à la présente étude (données N_13 et N_17). Afin de l'illustrer, on peut indiquer que pour les travaux 2017-2021 étudiés, la mesure prévue par le gestionnaire dépendait directement de la précédente mesure réalisée, comme évoqué au chapitre 6.2.8. Ainsi, le choix de la mesure ne dépend que partiellement de l'état relevé.

En ce qui concerne l'âge des couches comme facteur de décision pour l'entretien, la planification des travaux 2018-2021 permet d'illustrer la stratégie appliquée sur le réseau N. Il faut signaler que cette information (âge des couches avant travaux) n'était pas disponible pour la période de travaux 2014-2017 également traitée dans ce projet. La Fig. 56 indique la répartition par classe d'âge des tronçons avec travaux planifiés et celle des tronçons sans travaux planifiés. On observe ainsi que les tronçons avec travaux concernent des revêtements relativement anciens (intervalle 1987-1991) mais également des revêtements de 15 ans (intervalle 2002-2006) ou de 10 ans (intervalle 2007-2011). Il s'agit là de revêtement pour lesquels le gestionnaire admet des durées de vies pour les couches de roulement relativement courtes, comme les PA (10 ans) ou les ACMR (15 ans). Les quelques tronçons âgés de 5 ans et moins concernent des revêtements fins ACVTL, dont la durée de vie est admise à 5 ans par le gestionnaire. On constate néanmoins, de manière attendue, qu'une très faible part des revêtements de 5 ans et moins sont inclus aux travaux en comparaison au réseau sans travaux.

Précisons encore qu'au cours du processus de planification, ces propositions d'entretien basées sur l'âge sont confrontées aux données d'état afin d'identifier soit des tronçons qui se dégraderait rapidement malgré leur jeune âge et qui nécessiteraient une surveillance accrue, soit au contraire des tronçons âgés mais en état satisfaisant et qui ne nécessiteraient probablement pas d'entretien à court-terme.

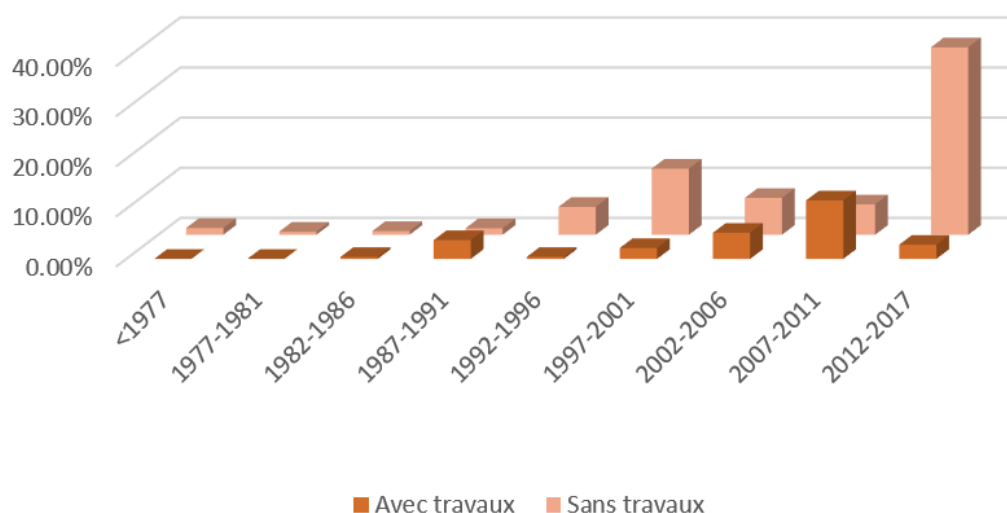


Fig. 56 : Répartition de l'âge des couches de roulement sur le réseau N pour les tronçons avec travaux (2018-2021) et pour les tronçons sans travaux.

Finalement, les facteurs découlant de la connaissance du terrain par les gestionnaires et voyers sont plus difficilement quantifiables et il est souvent problématique de les caractériser à l'échelle d'un réseau. L'étude de leur impact dans le choix des mesures ne peut alors pas être menée de manière statistique. Ces critères n'en demeurent pas moins très souvent déterminants dans la planification des travaux et dans le choix de la mesure d'entretien.

Dans le même ordre d'idée, la connaissance de la structure de la chaussée, de l'âge et du type des différentes couches, de la qualité des matériaux non liés, etc. s'acquiert souvent plus tardivement dans le processus de planification de l'entretien. Ces informations sont le plus souvent déterminées au stade de l'avant-projet de la solution d'entretien et peuvent modifier la mesure envisagée initialement. Ces raisons expliquent ainsi les difficultés à prédire le bon type de mesure d'entretien au stade de la planification. De ce fait, les tentatives pour expliquer le choix d'une mesure d'entretien *a posteriori* mais sans disposer de ces informations comportent forcément une grande part d'imprécisions.

6 Construction de seuils de déclenchement et validation sur données

6.1 Construction de seuils

6.1.1 Choix des indices

Dans l'optique d'une démarche stratégique de planification de l'entretien à l'échelle d'un réseau, on propose de travailler avec 4 familles de mesures d'entretien, qui correspondent aux différents niveaux d'interventions et de dégradations de la chaussée. Ces familles de mesures sont exprimées à travers les indices d'état (notamment IA2 et IA4), et correspondent globalement aux familles de mesures effectivement réalisées par les gestionnaires interrogés.

Des seuils de déclenchement applicables sur ces 4 familles de mesures sont recherchés et mis en relation avec les indices qui se sont révélés (chapitre 5) les plus significatifs pour expliquer la présence des travaux, et dans une moindre mesure le type de travaux.

Il s'agit pour rappel des indices I2, I3 et des sous-indices IA2 et IA4 de l'indice I1.

Comme présenté au chapitre 2.3, ces indicateurs fournissent différentes informations sur l'origine probable des dégradations et les couches de chaussée potentiellement endommagées. En synthèse, on peut résumer pour les 4 mesures d'entretien, l'ampleur des défauts qu'elles sont en mesure de corriger.

Tab. 26 Défauts exprimés par les indices d'état que les mesures d'entretien visent à corriger

Mesure d'entretien	Indice IA2	Indice IA4	Indice I2	Indice I3
ES Enduit superficiel	léger	-	-	-
CR Couche de roulement	important	-	-	-
RS reconstruction superstructure bitumineuse	très important	léger	léger	léger
RT reconstruction totale	-	important	important	important

Précisons que le déclenchement d'une mesure dépend de la vérification d'au moins une de ces conditions.

6.1.2 Choix des valeurs seuils

Les analyses statistiques menées au chapitre 5 ont montré qu'il était difficile de définir des seuils de déclenchement de mesures basés sur le retour d'expérience en raison de la grande variabilité des états dans lesquels se trouvait les chaussées avant travaux. Des tendances attendues sont néanmoins apparues, et correspondent à l'évolution des défauts des 4 indices présentés au chapitre précédent. Plus le défaut était (en moyenne) important, plus la mesure réalisée était lourde.

Sur la base de cette expérience et en se référant à l'ampleur des défauts exprimés par les indices choisis dans le Tab. 26, on établit une proposition de valeurs seuil à utiliser pour la présente application dans le Tab. 27. Les valeurs proposées tiennent notamment compte de l'observation que les mesures lourdes étaient davantage réalisées sur des tronçons dans un état jugé « critique » ou « mauvais » selon les catégories de notes proposées par la norme VSS 40 925b. Les limites entre catégories peuvent donc être considérées pour fixer des valeurs de seuils.

Pour les sous-indices IA_i , il faut également tenir compte du nombre limité de valeur qu'ils peuvent prendre en raison de leur évaluation discontinue. Ainsi, fixer un seuil de déclenchement avec $Note_IA2 > 4.0$ ou un seuil avec $Note_IA2 > 3.5$ aurait le même effet, les deux seules notes à proximité étant $IA2 = 5.0$ (étendue 3 x gravité 3) qui dépasse ces deux seuils, et $IA2 = 3.33$ (étendue 2 x gravité 3 et inverse), qui n'atteint pas ces deux seuils.

Tab. 27 Proposition de valeur seuils, utilisées pour l'application sur un réseau.

Mesure d'entretien	Indice IA2	Indice IA4	Indice I2	Indice I3
ES Enduit superficiel	> 2.0	-	-	-
CR Couche de roulement	> 3.0	-	-	-
RS reconstruction superstructure bitumineuse	> 4.0	> 2.0	> 3.5	> 3.5
RT reconstruction totale	-	> 3.0	> 4.0	> 4.0

Enfin, il faut pouvoir appliquer les seuils de manière à ce qu'au maximum 1 mesure d'entretien soit retenue. Si les données d'un tronçon remplissent les conditions des seuils de plusieurs mesures, on retiendra la plus lourde de manière à appliquer la mesure correcte du point de vue technique. Cela signifie qu'on teste en premier lieu la mesure la plus lourde (RT), puis, si les conditions ne sont pas satisfaites la seconde mesure (RS) et ainsi de suite.

SI ($IA4 > 3.0$ ou $I2 > 4.0$ ou $I3 > 4.0$) → mesure = RT ;

SI ($IA2 > 4.0$ ou $IA4 > 2.0$ ou $I2 > 3.5$ ou $I3 > 3.5$) → mesure = RS

SI ($IA2 > 3.0$) → mesure = CR

SI ($IA2 > 2.0$) → mesure = ES

Sinon → mesure = Ne rien faire

6.2 Application des seuils sur un réseau

Le réseau cantonal F est utilisé pour l'application des seuils. L'état global de ce réseau est rappelé à travers ses principaux indices ci-après (Tab. 28, Fig. 57). D'après ces indices moyens I1, I2 et I3, ce réseau se situe dans un état global jugé « moyen ». Parmi les sous-indices d'état, seul IA2 est en moyenne dans la catégorie « suffisant », avec 37% de chaussées en état « critique ».

Tab. 28 Etat global du réseau F, données d'état 2014, avec part (%) des catégories d'état et valeur moyenne d'indice

Catégorie d'état (%)	I1	IA1	IA2	IA3i1	IA4	IA5	I2	I3
Bon	27%	52%	0%	63%	62%	75%	40%	51%
Moyen	32%	32%	54%	34%	32%	21%	26%	29%
Suffisant	24%	2%	8%	0%	5%	3%	19%	14%
Critique	15%	4%	37%	3%	1%	1%	10%	5%
Mauvais	2%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	2%
Moyenne	1.77	0.83	2.29	0.65	0.60	0.41	1.56	1.18

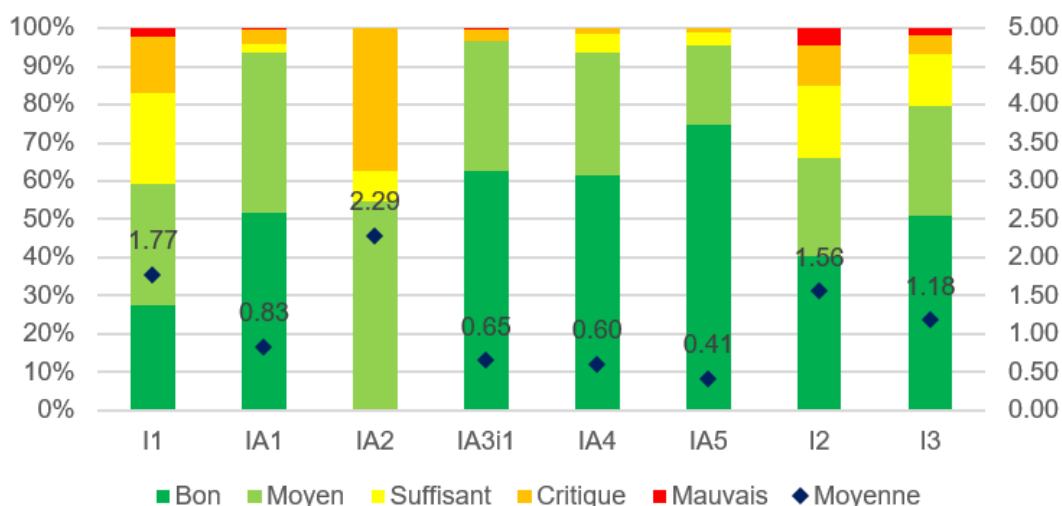


Fig. 57 : Etat global du réseau F, données d'état 2014, avec part (%) des catégories d'état et valeur moyenne d'indice

Les seuils définis au chapitre précédent sont appliqués sur les données d'état du réseau F relevées en 2014, à l'échelle de chacun des tronçons de 50 m relevés individuellement (sans agrégation préalable des données). On détermine ainsi pour chaque tronçon la famille de mesure d'entretien qui devrait être déclenchée.

Le Tab. 29 indique la répartition entre les 4 familles de mesures des tronçons à l'échelle du réseau complet et la part des tronçons qui n'atteignent aucun des seuils de déclenchement et pour lesquels aucune mesure n'est vraisemblablement nécessaire. Ce tableau indique également quels parts des travaux déclenchés selon les seuils correspondent aux travaux effectivement réalisés par le canton et quelle part n'a pas fait l'objet de travaux.

Tab. 29 Répartition des mesures déclenchées en appliquant les seuils aux données d'état sur le réseau F (données 2014), ainsi que sur les parties du réseau avec travaux et sans travaux

	ES	CR	RS	RT	aucune	Total
Réseau F	7%	27%	8%	7%	51%	100%
dont						
Réseau F avec travaux	1%	6%	2%	2%	3%	14%
Réseau F sans travaux	6%	21%	6%	5%	48%	86%

A l'échelle du réseau complet, les parts de déclenchements amènent les commentaires suivants :

- Environ la moitié des tronçons n'atteignent aucuns seuils de déclenchement. Cela correspond approximativement à la part de tronçon « bon » et « moyen » selon l'indice IA2, donc de tronçons présentant peu de dégradations du revêtement.
- La mesure CR est la plus représentée (autant que les 3 autres combinées). Ce résultat est à mettre en relation avec la part de 37% de chaussée « critique » selon l'indice IA2.
- La mesure RT est déclenchée pour 7% du réseau, ce qui correspond à la part « mauvais » cumulée des indices I2 et I3. Il y a donc très peu de tronçons qui combinent simultanément un mauvais I2 et un mauvais I3. De même, sur ce réseau, aucun tronçon n'est jugé mauvais selon IA4.
- Ces résultats sont donc globalement cohérents avec l'état global du réseau.

Concernant les travaux effectivement réalisés par le canton F :

- 14% du réseau a fait l'objet de travaux sur la période analysée, dont 11% concernent des tronçons atteignant des seuils de déclenchement de mesure selon leur état. Les 3% de tronçon, dont l'état ne nécessiterait vraisemblablement pas de travaux, sont détaillés ci-après.
- Parmi ces 11%, les travaux ont majoritairement été réalisés sur des tronçons nécessitant une mesure CR. Par contre, comme on le détaillera ci-après, la mesure effectivement réalisée ne correspond pas toujours au type de mesure préconisé par les seuils.
- Le canton a traité environ le tiers des tronçons nécessitant une mesure RS (2% traité sur 6% nécessitant cette mesure) ou une mesure RT (2% sur 5%). Cette part est nettement plus faible sur des tronçons nécessitant une mesure plus légère. Il semblerait donc que ce canton traite en priorité les tronçons les plus dégradés de son réseau et qui nécessiteraient les mesures les plus lourdes.

Cette analyse a mis en évidence que le canton a effectué des travaux sur environ 3% de son réseau (38 km) qui n'aurait vraisemblablement pas nécessiter de travaux selon son état puisqu'aucune mesure d'entretien n'y était déclenchée. Ces tronçons ont été analysés en détails pour retrouver une justification à ces travaux. Les explications vraisemblables sont présentées dans le *Tab. 30* ci-dessous, avec également la part de tronçons concernés parmi ces 3% du réseau (38 km).

Tab. 30 Explication probable de la réalisation de travaux non-explicable par l'état sur 38 km (3%) du réseau F.

Explication probable :	%	km
Travaux réalisés en 2014 <u>avant le relevé d'état</u> ; l'état relevé est « bon » et ne nécessite pas de travaux.	6%	2.3
Travaux avec pose d'un revêtement phono-absorbant, réalisés pour <u>l'assainissement au bruit</u> et non en raison de l'état	16%	6.1
<u>Chantiers très courts</u> , dont l'état n'est pas représentatif sur le ou les tronçons de 50m concernés	2%	0.7
Tronçons de 50m <u>regroupés dans un chantier</u> plus étendu, travaux qui s'explique par l'état des tronçons voisins.	47%	17.9
Pas d'explication, <u>vérification</u> auprès du gestionnaire	30%	11.5
Total général	100%	38.3

Parmi ces travaux indépendants de l'état, 30% ne peuvent pas être expliqués par les raisons présentées ici. Il s'agit de 18 chantiers pour lesquels des explications ont été demandées au gestionnaire du réseau. Voici les raisons indiquées par le gestionnaire pour ces 18 travaux :

- Amélioration d'une intersection, déclenchement par un tiers : 5 chantiers
- Augmentation de capacité d'une intersection, 3 chantiers
- Prolongation de la durée de vie (remplacement couche roulement) : 4 chantiers
- Élargissement avec ajout de bande cyclable : 3 chantiers
- Gestion du trafic et sécurité (construction îlots) : 1 chantier
- Assainissement des fissures : 1 chantier
- Raison inconnue : 1 chantier

Précisons que pour le chantier réalisé pour l'assainissement des fissures, où une nouvelle couche de roulement a été réalisée, les indices d'état établis lors du relevé d'état en 2014 n'atteignent pas les valeurs seuils considérées, et ne justifient vraisemblablement pas cette mesure. En particulier, l'indice IA2 obtient une note moyenne de 1.67 sur ce secteur, et l'indice IA4 une note moyenne égale à 0. Il est possible qu'entre le relevé de 2014 et la réalisation de cette mesure en 2017, l'état de la chaussée se soit dégradé.

En excluant les 3% du réseau avec des travaux réalisés sans lien avec l'état de la chaussée, une comparaison est effectuée dans le *Tab. 31* entre la mesure effectivement réalisée par le canton et la mesure déclenchée selon l'état et les seuils. Pour chaque famille de travaux réalisés, on indique la répartition entre les types de mesures déclenchées

Tab. 31 Comparaison des mesures déclenchées en appliquant les seuils aux données d'état (données 2014) par rapport aux travaux réalisés sur le réseau F.

		Mesure déclenchée avec seuil selon état				
		ES	CR	RS	RT	Total
Travaux réalisés sur le réseau F	Enduit superficiel	3%	59%	17%	21%	100%
	1 couche	8%	39%	26%	28%	100%
	2-3 couches	7%	52%	22%	20%	100%
	RT	7%	35%	26%	32%	100%

- Travaux réalisés **équivalents** à la mesure déclenchée avec seuil selon état (diagonale grisée du tableau) : seule une minorité des travaux réalisés correspond à la mesure déclenchée selon l'état. La meilleure correspondance est obtenue pour les travaux réalisés avec **1 couche** avec la mesure équivalente CR (39%). Tous les autres ratios sont inférieurs.
- Travaux réalisés **moins importants** que la mesure déclenchée avec seuil selon l'état (droite de la diagonale) : on peut supposer que le gestionnaire ait renoncé des travaux importants pour des raisons économiques ou ayant dû intervenir en urgence (réalisation d'une mesure superficielle provisoire).
- Travaux réalisés **plus importants** que la mesure déclenchée avec seuil selon l'état (gauche de la diagonale) : on peut supposer que les investigations complémentaires avant travaux ont révélés des couches inférieures ou de fondation dégradées, âgées et nécessitant leur remplacement. Il peut aussi s'agir de travaux de grande ampleur rendus nécessaires pour d'autres raisons (réaménagement, travaux sur les réseaux enterrés, etc).

Cette application des seuils proposés sur un réseau cantonal tend à confirmer les observations déjà effectués précédemment :

- Les seuils basés sur l'état permettent d'identifier assez précisément les tronçons nécessitant des travaux, puisque dans la majorité des cas, les travaux effectivement réalisés par le canton auraient aussi nécessité une mesure d'entretien déclenchée par les seuils.
- En revanche, le choix de la mesure préconisée par les seuils ne correspond généralement pas à la mesure effectivement réalisée, pour des raisons qui sont probablement indépendantes de l'état.

6.3 Analyse de sensibilité des valeurs seuils

Par un ajustement des valeurs seuils proposées, on cherche à améliorer la correspondance entre la mesure déclenchée selon l'état et le type de travaux effectivement réalisé.

On se limite ici volontairement à des modifications simples des seuils, portant au maximum sur deux indices à la fois, pour pouvoir aisément interpréter les résultats, en raison de la grande variété de combinaisons entre les indices que comportent les données étudiées.

6.3.1 Analyse avec des seuils plus élevés

On a constaté que les travaux réalisés avec 1 couche correspondaient parfois à des mesures plus lourdes selon l'état. On cherche alors à obtenir une meilleure

correspondance sur les travaux 1 couche en admettant que la mesure CR peut être réalisée aussi sur des tronçons avec un état plus dégradé. Les seuils sont modifiés ainsi :

Tab. 32 : Analyse de sensibilité des seuils : modification des seuils avec des valeurs plus élevées

Mesure d'entretien	Indice IA2	Indice IA4	Indice I2	Indice I3
ES Enduit superficiel	> 2.0	-	-	-
CR Couche de roulement	> 3.0	 > 2.0	-	-
RS reconstruction superstructure bitumineuse	> 4.0	> 2.0 > 3.0	> 3.5	> 3.5
RT reconstruction totale	-	> 3.0	> 4.0	> 4.0

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux ci-dessous à l'échelle du réseau puis par comparaison aux travaux effectivement réalisés. Les ratios obtenus dans l'application initiale sont indiqués entre ().

Tab. 33 Répartition des mesures déclenchées en appliquant les seuils avec valeurs plus élevées. Valeurs avec seuils initiaux indiqués entre ().

	ES	CR	RS	RT	aucune	Total
Réseau F	7%	30% (27%)	5% (8%)	7%	51%	100%
dont						
Réseau F avec travaux	1%	7% (6%)	1% (2%)	2%	3%	14%
Réseau F sans travaux	6%	24% (21%)	3% (6%)	5%	48%	86%

Tab. 34 Comparaison des mesures déclenchées en appliquant les seuils avec valeurs plus élevées avec les travaux réalisés sur le réseau F.

Mesure déclenchée avec seuils plus élevés						
		ES	CR	RS	RT	Total
Travaux réalisés sur le réseau F	Enduit superficiel	3%	65% (59%)	11% (17%)	21%	100%
	1 couche	8%	55% (39%)	10% (26%)	28%	100%
	2-3 couches	7%	62% (52%)	12% (22%)	20%	100%
	RT	7%	47% (35%)	15% (26%)	32%	100%

Comme les modifications des seuils ne concernent ici que la mesure CR et la mesure RS, les ratios des autres mesures (ES et RT) ne sont pas modifiés :

- A l'échelle du réseau, l'augmentation de la valeur seuil de la mesure CR sur l'indice IA4 au détriment de la mesure RS conduit logiquement à une plus grande apparition de la mesure CR, puisque 30% du réseau est concerné au lieu de 27% initialement. La part de RS diminue de manière contraire.
- Au niveau de la correspondance entre travaux réalisés et mesure déclenchée, on constate que les travaux avec 1 couche correspondent davantage à la mesure CR, avec un ratio passant à 55% au lieu de 39%. Par contre, les travaux avec 2-3 couches ont une moins bonne correspondance avec la mesure correspondante (RS), le ratio tombant à 12% contre 22% auparavant.

6.3.2 Analyse avec des seuils plus bas

On vise cette fois à améliorer la prédiction des travaux de reconstruction totale réalisés à l'aide des seuils basés sur l'état. Pour cela, on diminue les seuils de déclenchement de la mesure RT de manière à ce qu'elle soit davantage déclenchée et correspondent mieux aux travaux réalisés.

Tab. 35 Analyse de sensibilité des seuils : modification des seuils avec des valeurs plus bas.

Mesure d'entretien	Indice IA2	Indice IA4	Indice I2	Indice I3
ES Enduit superficiel	> 2.0	-	-	-
CR Couche de roulement	> 3.0	-	-	-
RS reconstruction superstructure bitumineuse	> 4.0	> 2.0	>3.5 > 2.5	>3.5 >2.5
RT reconstruction totale	-	> 3.0	>4.0 > 3.0	>4.0 > 3.0

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux ci-dessous à l'échelle du réseau puis par comparaison aux travaux effectivement réalisés. Les ratios obtenus dans l'application initiale sont indiqués entre ().

Tab. 36 Répartition des mesures déclenchées en appliquant les seuils avec valeurs plus basses. Valeurs avec seuils initiaux indiqués entre ().

	ES	CR	RS	RT	aucune	Total
Réseau F	5% (7%)	18% (27%)	12% (8%)	20% (7%)	45% (51%)	100%
dont						
Réseau F avec travaux	0% (1%)	3% (6%)	2%	6% (2%)	3%	14%
Réseau F sans travaux	4% (6%)	15% (21%)	10% (6%)	15% (5%)	42% (48%)	86%

Tab. 37 Comparaison des mesures déclenchées en appliquant les seuils avec valeurs plus basses avec les travaux réalisés sur le réseau F.

Mesure déclenchée avec seuils plus bas						
		ES	CR	RS	RT	Total
Travaux réalisés sur le réseau F	Enduit superficiel	1% (3%)	31% (59%)	18% (17%)	50% (21%)	100%
	1 couche	6% (8%)	20% (39%)	27% (26%)	48% (28%)	100%
	2-3 couches	4% (7%)	29% (52%)	21% (22%)	46% (20%)	100%
	RT	4% (7%)	13% (35%)	20% (26%)	62% (32%)	100%

Comme la modification des seuils concerne cette fois des mesures les plus lourdes et donc les plus prioritaires, elles ont une influence aussi sur la répartition des mesures plus légères. En effet, avec l'abaissement des seuils de RT et RS, des mesures qui auparavant étaient CR ou ES peuvent passer en RS ou RT à cause de leur note I2 ou I3.

A l'échelle du réseau complet, les parts de mesure déclenchée RS et RT augmentent au détriment des mesures plus légères ES et CR.

Concernant la correspondance avec les travaux réalisés, les travaux de RT correspondent davantage à la mesure déclenchée RT, avec une part de 62% de correspondance contre 32% initialement. Mais pour toutes les autres mesures, y compris RS dont on a aussi

abaissé les seuils, la prédiction est alors moins bonne par rapport aux travaux effectivement réalisés.

L'application de tels seuils pour les reconstructions totales doit néanmoins être questionnée du point de vue technique et de la signification des indices d'état et leur note. Ainsi, on peut se poser la question s'il est justifié d'effectuer une reconstruction totale sur des tronçons avec une note I2 = 3.0 sur un réseau cantonal.

6.3.3 Constats

Les deux variantes de seuils étudiées dans l'analyse de sensibilité ont montré qu'il n'est pas aisé d'améliorer la prédiction des travaux réalisés. En améliorant la prédiction d'un type de travaux, on dégrade la prédiction pour les autres types de travaux.

Cela s'explique par la grande hétérogénéité des données d'état au sein de chaque type de travaux réalisés ; dans chaque type de travaux réalisés, on trouve des tronçons dont l'état conduit alternativement au déclenchement des 4 types de mesures proposées.

Cette hétérogénéité avait déjà constitué un frein à l'établissement de seuils à partir des travaux effectivement réalisés et confirme encore une fois que l'état n'est pas le seul élément permettant d'expliquer le choix d'une mesure d'entretien.

Pour l'établissement de seuils de déclenchement, il faut également conserver à l'esprit la signification des limites et des catégories d'état, en se demandant si par exemple il est justifié d'intervenir avec une mesure lourde lorsque I2 = 3.0 (état critique) ou I2 = 4.0 (état mauvais) et se rapporter aux grandeurs physiques mesurées.

6.4 Analyse machine-learning pour retrouver les seuils choisis.

Par cette approche, on souhaite vérifier qu'une analyse à l'aide d'algorithme de type « machine-learning » (utilisé au chapitre 4.4.2) permet de retrouver des seuils de déclenchement pour des mesures d'entretien lorsqu'on dispose de données respectant des règles claires de distribution, mais que cette analyse ne peut pas converger pour des données trop hétérogènes. On cherche ainsi à démontrer que les données « réelles » dont on dispose pour la présente étude entrent bien dans cette seconde catégorie et sont effectivement trop hétérogènes.

On souhaite ainsi également confirmer que la méthode de machine-learning n'est pas à remettre en cause, mais bien les données sur lesquelles elle repose.

Pour mener cette vérification, un set de données est constitué en ne conservant que les travaux réalisés dont la mesure correspond à celle obtenue par l'application de seuils définis au chapitre 6.2. L'exécution d'un algorithme de classification sur ce set de données triées conduit à la classification représentée dans la Fig. 58. Il apparaît que les différentes conditions des seuils sont testées successivement et permettent de classer chaque type de travaux avec succès, le nombre de données classées (indiqué en 3^{ème} position dans les bulles) correspondant au nombre de données initialement dans cette classe, les autres valeurs entre [] étant égale à 0, ce qui signifie qu'aucuns travaux n'ont été classés de manière incorrecte. De manière attendue, les critères de classification utilisés par l'algorithme (indiqués en 1^{ère} position dans les bulles) sont très proches des seuils considérés pour le déclenchement des mesures et utilisés ici pour trier préalablement le set de données.

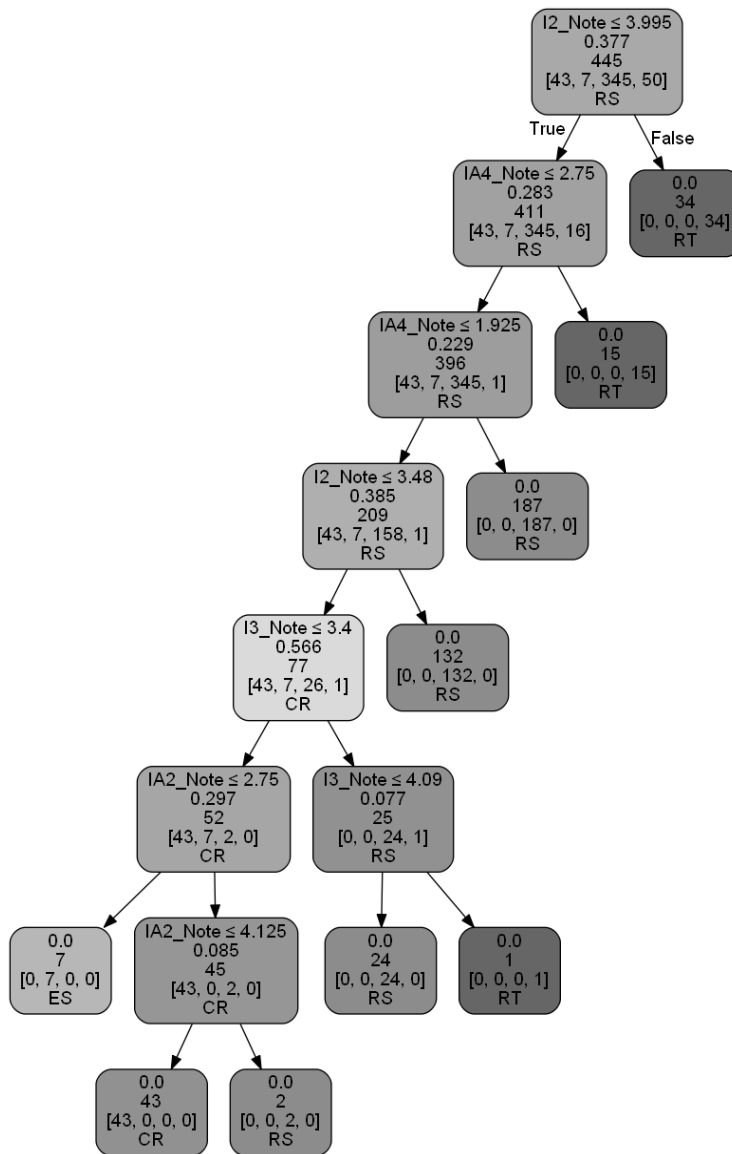


Fig. 58 : Arbre de décision (classification) obtenu à l'aide d'un algorithme de machine-learning sur un set de données préalablement triées.

En revanche, l'exécution d'un tel algorithme de classification sur le set de données complet et non-trié débouche systématiquement sur une classification erronée, reproduisant les erreurs déjà observées par les experts mathématiciens au chapitre 4.4.2. La raison de cet échec ne peut donc pas être imputée à la méthode employée (machine learning) mais provient bien de la trop grande hétérogénéité des données de base qui ne permettent pas de classer les différentes mesures réalisées selon leur état.

6.5 Influence de l'état moyen du réseau

Comme on l'a vu au chapitre 5, l'état dans lequel se trouvaient les tronçons avant la réalisation d'une mesure dépendait de l'état général du réseau considéré ; plus le réseau était dégradé dans son ensemble, plus les tronçons avec travaux étaient dans un état dégradé.

Dès lors, appliquer les mêmes seuils sur des réseaux dans des états différents résultera en des déclenchements de mesures différents ; sur un réseau plus dégradé, davantage de travaux lourds devraient être déclenchés.

Les seuils appliqués au chapitre 6.2 sur le réseau F sont également appliqués sur les réseaux B et E_14 déjà considérés lors des comparaisons au chapitre 5.2. Le réseau de route nationale N_17 est également inclus à cette analyse.

Les états moyens de ces réseaux pour les indices d'état pertinents sont rappelés dans le Tab. 38. Le réseau B présente moins de dégradations du revêtement IA2 que le réseau F, alors que le réseau E_14 est nettement plus dégradé que les deux premiers. Enfin, le réseau des routes nationales N_17 est dans un excellent état général.

Tab. 38 Etat moyen des réseaux comparés pour les indices d'état pertinents.

	I1 moyen	IA2 moyen	IA4 moyen	I2 moyen	I3 moyen
Réseau B	1.85	1.74	0.75	1.96	1.93
Réseau F (référence)	1.77	2.29	0.6	1.56	1.18
Réseau E_14	2.33	2.8	1.39	3.00	1.42
Réseau N_17	0.16	0.38	0.20	1.21	0.54

Les ratios entre les différentes mesures déclenchées à l'aide des seuils proposés au chapitre 6.2 sur ces réseaux considérés dans leur ensemble (tant les sections ayant eu des travaux que celle sans travaux) sont présentés dans le Tab. 39.

Tab. 39 Comparaison des répartitions des mesures déclenchées en appliquant les seuils proposés.

	ES	CR	RS	RT	aucune	Total
Réseau B	15%	5%	11%	11%	59%	100%
Réseau F (référence)	7%	27%	8%	7%	51%	100%
Réseau E_14	7%	21%	15%	35%	21%	100%
Réseau N_17	4%	0.4%	3%	1%	93%	100%

- De manière attendue, le réseau B nécessite moins de mesure CR que le réseau F, les dégradations de revêtement IA2 y étant moins importantes. Une mesure ES plus légère pourrait suffire pour traiter une partie (15%) de ces dégradations.
- Le réseau E présente davantage de mesures lourde (RS et RT) que les deux autres réseaux, ce réseau étant plus dégradé, particulièrement au niveau des dégradations structurelles IA4 et de la planéité longitudinale I2.
- Le réseau des routes nationales ne nécessite des mesures d'entretien que sur 7% de ce réseau en appliquant les mêmes seuils que pour les 3 réseaux cantonaux.

Ce dernier résultat démontre qu'un abaissement des seuils est vraisemblablement nécessaire sur les routes nationales pour pouvoir identifier des sections nécessitant des travaux. Cette proposition va dans le sens des exigences plus élevées que le gestionnaire et l'utilisateur ont concernant l'état des routes du réseau national. Des seuils spécifiques doivent être considérés.

Pour les 3 réseaux cantonaux, on fait l'exercice de modifier les seuils de déclenchement afin d'obtenir les mêmes ratios entre les types de mesures d'entretien, en prenant le réseau F comme référence. Pour y parvenir, les seuils devraient alors être modifiés comme indiqués dans le tableau suivant.

Tab. 40 Adaptation des valeurs seuils par réseau pour viser une répartition identique des ratios de mesures déclenchées.

Réseau	Indice IA2			Indice IA4			Indice I2			Indice I3		
	F	B	E-	F	B	E-	F	B	E-	F	B	E-
ES	>2.0	-	>2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CR	>3.0	>2.0	>3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
RS	>4.0	>4.0	>4.0	>2.0	>2.5	>3.0	>3.5	>3.7	-	>3.5	>3.7	-
RT	-	-	-	>3.0	>3.0	=5.0	>4.0	>4.3	=5.0	>4.0	>4.3	=5.0

Ces seuils permettent d'obtenir les répartitions suivantes entre les mesures (Tab. 41), qui ne correspondent pas exactement à celui du réseau cible F, une convergence exacte n'étant pas possible pour les raisons développées ci-après.

Tab. 41 Comparaison des répartitions des mesures déclenchées en appliquant les seuils modifiés pour obtenir des répartitions identiques.

	ES	CR	RS	RT	aucune	Total
Réseau B	0%	23%	8%	7%	62%	100%
Réseau F (référence)	7%	27%	8%	7%	51%	100%
Réseau E_14	8%	27%	32%	12%	21%	100%

- Sur le réseau B, les ratios de mesures RS et RT peuvent être amenés au même niveau que le réseau F, ceci car il est possible de modifier les seuils sur les indices I2 et I3 finement (au dixième près), la distribution de ces notes d'indices étant continue. Ces ajustements de seuils permettent de modifier la mesure déclenchée uniquement sur quelques tronçons, et donc ainsi atteindre le ratio ciblé.
- En revanche, les ratios de mesures ES et CR sont dépendant exclusivement du sous-indice IA2, qui a une distribution discontinue. Les seuils doivent être modifiés en passant d'une note de sous-indice à la suivante, ce qui modifie alors le déclenchement d'un grand nombre de tronçon. Il est alors souvent impossible d'atteindre le ratio cible visé.
- Pour le réseau E, une autre limitation est rencontrée ; il n'est pas possible de réduire davantage la part de tronçons nécessitant une mesure RT, ceci car la note maximale de 5.0 est atteinte sur l'indice I2 pour près de 11% du réseau. L'effet collatéral d'une telle augmentation du seuil de la mesure RT est d'accroître aussi la part des mesures RS. Si les seuils de la mesure RS étaient également modifiés, on changerait alors la répartition de la mesure CR.

Cet exercice, poussé ici à l'extrême, montre que les seuils devraient garder une certaine objectivité technique liée aux notes d'indices et aux limites de catégories d'état, et éviter ainsi de déclencher une mesure potentiellement inadaptée.

6.6 Adaptation des seuils pour le réseau national.

L'exercice mené au chapitre précédent a montré que les seuils pour le réseau national devaient être abaissés par rapport à ceux des réseaux cantonaux, en rapport avec les exigences plus élevées sur ce dernier, et également pour pouvoir identifier suffisamment de tronçons problématiques dans une démarche PMS visant à planifier l'entretien.

De plus, on a constaté que les travaux de reconstructions totales ne sont que très rarement réalisés sur le réseau national, ceci car les routes nationales disposent généralement de fondations de bonne qualité. Cette mesure pourrait être supprimée.

Les seuils suivants (Tab. 42) sont alors testés sur le réseau N_17. Par rapport aux réseaux cantonaux, les seuils des mesures ont été abaissés, signifiant qu'un niveau de dégradation moins important est toléré avant d'intervenir. Ces seuils tiennent également compte des valeurs différentes des notes de sous-indices IAi considérées par l'OFROU pour les routes nationales, à savoir (0, 1, 2, 2.5, 3, 4, 5) au lieu de (0, 0.56, 1.11, 1.67, 2.22, 3.33, 5) selon la norme VSS 40 926 [3].

Tab. 42 Proposition d'adaptation des valeurs seuils pour le réseau national

Réseau	Indice IA2		Indice IA4		Indice I2		Indice I3	
	F	N	F	N	F	N	F	N
ES Enduit superficiel	>2.0	≥ 1.5	-	-	-	-	-	-
CR Couche de roulement	>3.0	≥ 2.5	-	≥ 1.5	-	-	-	≥ 1.5
RS reconstruction superstructure bitumineuse	>4.0	≥ 3.5	>2.0	≥ 3.5	>3.5	≥ 3.5	>3.5	≥ 3.5
RT reconstruction totale (supprimée)	-	-	>3.0	-	>4.0	≥ 4.5	>4.0	≥ 4.5

Les mesures déclenchées sur le réseau N_17 avec ces seuils se répartissent selon les ratios indiqués dans le Tab. 43, en comparaison au réseau F ainsi qu'au réseau N en appliquant les seuils testés pour un réseau cantonal.

Tab. 43 Comparaison des répartitions des mesures déclenchées en appliquant les seuils proposés pour les routes nationales.

	ES	CR	RS	RT	aucune	Total
Réseau F (référence)	7%	27%	8%	7%	51%	100%
Réseau N_17 Seuils réseau cantonal	4%	0.4%	3%	1%	93%	100%
Réseau N_17 Seuils réseau national	5%	15%	2%	0.3%	78%	100%

- Par rapport aux déclenchements avec les seuils d'un réseau cantonaux, les seuils adaptés au réseau national augmentent comme attendu la quantité de mesures déclenchées. Ce ratio (22% toutes mesures confondues) est toutefois encore inférieur aux déclenchements généralement rencontrés sur des réseaux cantonaux (près de 50% de tronçon nécessitant une mesure). Le très bon état du réseau national permet d'expliquer cette différence.
- Avec l'application des seuils adaptés, on augmente très nettement la quantité de tronçon où le remplacement de la couche de roulement (CR) serait nécessaire, jusqu'à un niveau plus proche de celui des réseaux cantonaux.
- La masse de travaux potentiellement nécessaire ainsi identifiée devient suffisamment importante pour la mise en place d'une démarche PMS de planification de l'entretien.

Les mesures déclenchées avec ces seuils spécifiques au réseau national sont comparées aux travaux effectivement réalisés sur le réseau national suite au relevé d'état.

Tab. 44 Répartition des mesures déclenchées en appliquant les seuils spécifiques au réseau national sur le réseau N (données 2017), ainsi que sur les parties du réseau avec travaux et sans travaux

	ES	CR	RS	RT	aucune	Total
Réseau N_17	5%	15%	2%	0.3%	78%	100%
dont						
Réseau N_17 avec travaux	2%	4%	1%	0%	14%	21%
Réseau N_17 sans travaux	4%	10%	1%	0%	64%	79%

Tab. 45 Comparaison des mesures déclenchées en appliquant les seuils spécifiques au réseau national sur le réseau N (données 2017), par rapport aux travaux réalisés sur le réseau N.

Mesure déclenchée avec seuil selon état						
		ES	CR	RS	RT	Total
Travaux réalisés sur le réseau N_17	Enduit superficiel	-	-	-	-	-
	1 couche	36%	60%	4%	0%	100%
	2-3 couches	19%	67%	10%	3%	100%
	RT	-	-	-	-	-

- Des travaux ont été réalisés par le gestionnaire du réseau N pour 14% du linéaire sur des tronçons 100m où aucune mesure n'était déclenchée. Cela doit très certainement s'expliquer par la procédure de regroupement de tronçons en mauvais état et de tronçons en meilleur état dans un seul chantier de longueur importante (p.ex. UPLaNS), de manière encore plus marquée que sur les réseaux cantonaux. De tels chantiers, parfois déclenché en raison d'autres système (BSA, K, etc) que l'état des revêtements, visent à traiter des secteurs de taille importante afin de réduire l'impact sur les usagers et d'éviter les nouvelles interventions dans un proche avenir.
- Les moyens plus importants dont disposent généralement les gestionnaires du réseau N leur permettent aussi de traiter une part plus importante de réseau (21% contre 14% pour le réseau cantonal F, et ce sur un laps de temps plus réduit). Ce phénomène combiné à une part de mesure déclenchée moins importante (78% de tronçons sans déclenchement contre 51% pour réseau B) réduit également les chances d'obtenir de bonnes prévisions des travaux réalisés avec des seuils.
- Les travaux réalisés de remplacement d'une couche obtiennent une bonne correspondance avec la mesure CR. Ces travaux ont néanmoins aussi été réalisés sur des tronçons moins dégradés nécessitant uniquement une mesure ES. Comme déjà évoqué, dans la pratique, sur le réseau national, la mesure ES est rarement envisagée autrement que comme solution provisoire avant un entretien.
- Pour les travaux plus conséquents réalisés (2-3 couches), la prédiction est moins bonne. Encore plus que pour les réseaux cantonaux, le choix d'effectuer une mesure sur plusieurs couches ne l'est pas en fonction de l'état, mais plutôt en fonction de l'âge des couches inférieures, de leur cycle de vie et des caractéristiques des matériaux (carottes).

6.7 Adaptation des seuils pour les réseaux communaux

La spécificité des réseaux communaux en matière de données d'état est qu'ils ne disposent généralement que de l'indice I1 et ses sous-indices, en raison du relevé exclusivement visuel qui est réalisé.

Les seuils à appliquer doivent alors se passer des indices I2 et I3. On peut utiliser en remplacement de ceux-ci le sous-indice IA3i1 qui renseigne également sur les déformations du revêtement, dont les ornières (défaut de planéité transversale, I3) et les déformations de poussée et tôle ondulée (défaut de planéité longitudinale I2). Ces deux dernières dégradations sont relativement peu fréquentes.

Pour parer à la perte d'information liée au nombre plus restreint d'indicateurs, on peut alors se tourner vers les indicateurs jugés peu pertinents pour les réseaux cantonaux, comme les sous-indices IA1 et IA5. Les réparations IA5 sont particulièrement présentes sur les réseaux de communes urbaines et peuvent alors constituer un indicateur pertinent.

L'utilisation de l'indice I1 pour le déclenchement de mesure ne semble en revanche pas optimal, ce dernier agrégeant les informations des sous-indices, et mélangeant plusieurs sortes de dégradations et donc plusieurs causes de dégradation de la chaussée. Cet indice devrait davantage servir d'indicateur pour prioriser les interventions entre elles une fois la mesure définie, éventuellement en le combinant avec des critères fonctionnels (critères reflétant l'importance de la route dans le réseau, au sens de la norme VSS 40 508 [9]).

On propose ici des seuils qu'on imagine adaptés à un réseau communal urbain, en incluant le sous-indice IA5. Ces seuils sont testés sur le réseau K1.

Tab. 46 Proposition d'adaptation des valeurs seuils pour le réseau communal

Mesure d'entretien	Indice IA1	Indice IA2	Indice IA3	Indice IA4	Indice IA5
ES Enduit superficiel	-	> 2.0	-	-	-
CR Couche de roulement	-	> 3.0	> 2.0	-	-
RS reconstruction superstructure bitumineuse	-	> 4.0	> 3.0	> 2.0	> 3.0
RT reconstruction totale	-	-	> 4.0	> 3.0	> 4.0

Les mesures déclenchées avec ces seuils spécifiques aux réseaux communaux sont comparées aux travaux effectivement réalisés sur le réseau communal K1 suite au relevé d'état.

Tab. 47 Répartition des mesures déclenchées en appliquant les seuils spécifiques aux réseaux communaux sur le réseau K1 (données 2013-2015), ainsi que sur les parties du réseau avec travaux et sans travaux

	ES	CR	RS	RT	aucune	Total
Réseau K1	5%	19%	28%	9%	39%	100%
dont						
Réseau K1 avec travaux	0.3%	0.2%	2%	1%	0%	3%
Réseau K1 sans travaux	4%	19%	26%	8%	39%	97%

Tab. 48 Comparaison des mesures déclenchées en appliquant les seuils spécifiques aux réseaux communaux sur le réseau K1 (données 2013-2015), par rapport aux travaux réalisés sur le réseau K1.

		Mesure déclenchée avec seuil selon état				
		ES	CR	RS	RT	Total
Travaux réalisés sur le réseau K	Enduit superficiel	0%	0%	71%	29%	100%
	1 couche	15%	0%	85%	0%	100%
	2-3 couches	0%	0%	32%	68%	100%
	RT	8%	12%	59%	22%	100%

- Par rapport aux autres réseaux étudiés précédemment, la part de tronçons nécessitant des mesures d'entretien est plus élevée. Ce résultat est cohérent au regard de l'état moyen du réseau K1, qui se situe au niveau des réseaux cantonaux F ou E et qui sont relativement dégradés. Cela est particulièrement le cas pour l'indice IA4 (moyenne = 1.40) qui est plus élevé que sur les réseaux cantonaux, et qui conduit au déclenchement de mesures lourdes.
- Tous les travaux réalisés par la commune correspondent à des tronçons où une mesure d'entretien est déclenchée. Les seuils semblent donc efficaces pour localiser des tronçons nécessitant des travaux d'après leur état. On rappelle toutefois que la part de réseau traité est relativement faible (3%) en comparaison aux réseaux cantonaux et qu'elle ne contient pas les travaux déclenchés pour des raisons tierces (voir chapitre 3.2.2).
- Les travaux réalisés par la commune K1 correspondent presque en totalité à des tronçons avec une mesure déclenchée RS ou RT, soit des mesures importantes. Cela signifie que les tronçons avec travaux présentent des dégradations importantes, notamment selon l'indice IA4.
- Corolaire de la remarque précédente, la majorité des travaux effectivement réalisés avec des enduits ou 1 couche de roulement auraient dû nécessiter des mesures plus importantes selon leur état. Il est possible que le gestionnaire ait dû y renoncer pour des raisons budgétaires. Cela inclut également des tronçons à faible trafic pour lesquels le gestionnaire a opté pour un traitement de surface ES (voir aussi chapitre 5.2.10).
- Les travaux avec remplacement de plusieurs couches bitumineuses (RS) correspondent davantage à des tronçons très dégradés nécessitant une mesure RT, alors que les travaux réalisés avec reconstruction et/ou renforcement correspondent plus souvent à des tronçons moins dégradés nécessitant seulement une mesure RS. Il semble alors probable que le choix du gestionnaire d'effectuer une reconstruction jusqu'à la fondation (RT) plutôt que remplacer uniquement les couches bitumineuses (RS) tienne compte de la structure existante, des épaisseurs et de la qualité de la fondation, qu'il est difficile d'évaluer avec les indices IA1 à IA5.

6.8 Synthèse

Les indicateurs retenus pour le déclenchement des mesures, soit les indices d'état IA2, IA4, I2, I3 (et IA5 pour le réseau communal), semblent en mesure d'identifier les tronçons nécessitant des travaux sur les réseaux testés, puisque les travaux réalisés par les gestionnaires correspondent dans la majorité des cas à des tronçons avec des mesures déclenchées avec des seuils sur ces indices.

Il est par contre plus difficile de prédire correctement le type de travaux effectivement réalisés à l'aide de ces seuils. Comme cela avait déjà été mis en évidence dans les analyses exploratoires (chapitre 4), puis dans les analyses statistiques systématiques (chapitre 5), il y a trop d'hétérogénéité dans les données d'état dans chaque famille de travaux réalisés pour en tirer des seuils. Il est donc logique que les seuils proposés ne permettent pas d'obtenir une très bonne correspondance entre les mesures et les travaux finalement réalisés.

Des ajustements des seuils, basés sur des retours d'expérience comme dans la présente étude, peuvent améliorer les correspondances, mais dans une certaine limite seulement. En effet, en raison des différentes combinaisons d'indice rencontrées dans les données, plusieurs situations peuvent conduire au déclenchement d'une même mesure, il n'est alors généralement pas possible de converger vers une solution adaptée à chaque situation.

Les seuils peuvent également être ajustés afin de tenir compte de l'état moyen du réseau considéré, en étant par exemple plus sévères sur un réseau en meilleur état. Il faut néanmoins veiller à ce que les seuils choisis conservent leur signification technique, et ne pas déclencher des travaux sur des tronçons qui ne posent en réalité pas de problème.

De tels ajustements se justifient pour tenir compte d'exigences plus élevées vis-à-vis de l'état du réseau, comme pour le réseau des routes nationales. Au contraire, sur les réseaux cantonaux, les seuils pourraient être rendus moins sévères, pour éviter d'obtenir des mesures trop lourdes si elles ne correspondent pas aux travaux effectivement réalisés et qui correspondent au besoin technique de la chaussée.

7 Conclusions

Les informations récoltées justifient premièrement de considérer 4 familles de mesures d'entretien pour la planification puisque c'est généralement ainsi qu'elles sont renseignées dans les bases de données routières, avec un nombre de couches de chaussées qui a été rénové. Les 4 familles de mesures proposées décrivent ainsi 4 niveaux d'intervention allant du plus léger au plus lourd, sans établir spécifiquement la technique d'entretien à réaliser. Ce choix est suffisant pour une estimation du coût et de la durée de service des mesures d'entretien et répond aux besoins du gestionnaire de réseau à un niveau de planification stratégique de l'entretien. Les 4 familles de mesures proposées seraient alors :

- Enduits superficiel et/ou traitement de surface (gravillonnage, revêtement fins, pontage de fissures, etc)
- Remplacement de la couche de roulement (1 couche réalisée)
- Remplacement de la superstructure bitumineuse (2 ou 3 couches réalisées)
- Reconstruction totale y compris les couches non liées

Les différentes démarches testées n'ont pas permis de déterminer avec précision des seuils sur les indices d'état permettant de classer avec suffisamment de distinction les 4 familles de mesures, ceci pour différentes raisons :

- Les indices d'état ne contiennent pas toutes les informations qui ont contribué au choix de la mesure d'entretien. Des facteurs extérieurs sont souvent autant voire plus déterminants que l'état de la chaussée.
- Hétérogénéité / variabilité des données d'état pour une même mesure réalisée. Pour chaque type de travaux, sur les réseaux analysés, il existe plusieurs combinaisons d'indice d'état
- Des probables adaptation entre la mesure identifiée au stade de la planification et la mesure réalisée après les études, une fois des informations récoltées sur les couches inférieures, ou en raison de contraintes budgétaires, ou pour des raisons autres (aménagement, élargissement, assainissement au bruit, etc).
- Stratégie d'entretien propre à certain type de travaux : en particulier les enduits superficiels qui sont souvent employés comme des mesures temporaires en attendant la réalisation de travaux plus importants ou comme solution économique sur des routes peu sollicitées.

Il est aussi apparu lors des analyses statistiques systématiques que l'état moyen des différents réseaux avait une influence sur l'état des tronçons avant travaux. Sur les réseaux globalement plus dégradés, les travaux concernent des tronçons en plus mauvais état. A l'inverse, pour des réseaux en bon état, comme le réseau des routes nationales, des chaussées sont rénovées avant l'apparition de dégradations importantes. Ceci aussi en raison d'exigences plus élevées. Pour refléter ces différences, il apparaît comme nécessaire d'adapter les seuils à la situation.

Malgré les difficultés énoncées, des seuils ont été proposés, en se basant sur les définitions des indices d'état et quelles informations ceux-ci fournissent sur les états observés et supposés des différentes couches de la chaussée. Les seuils proposés d'abord sur les réseaux cantonaux ont été adaptés, pour le réseau national pour tenir compte d'exigence plus élevée, et pour les réseaux communaux, pour lesquels on ne dispose souvent que des indices relevés visuellement (I1 et sous-indices IAi).

Les seuils proposés ont été testés sur différents réseaux en vue de leur validation. Dans l'ensemble, ils permettent d'identifier avec une bonne précision les tronçons qui nécessiteraient des travaux, puisque les tronçons ainsi identifiés ont effectivement souvent fait l'objet de travaux. En revanche, ils sont moins précis pour déterminer quelle mesure devrait être réalisée, en comparaison avec la mesure effectivement réalisée. Les raisons de ces divergences sont les mêmes que celles qui empêchaient de déterminer des seuils à partir des travaux réalisés.

Les seuils ainsi proposés pour les 3 catégories de réseau (cantonal, national et communal) sont les suivants :

Tab. 49 Proposition de valeurs seuils pour des réseaux cantonaux

Mesure d'entretien	Indice IA2	Indice IA4	Indice I2	Indice I3
ES Enduit superficiel	> 2.0	-	-	-
CR Couche de roulement	> 3.0	-	-	-
RS reconstruction superstructure bitumineuse	> 4.0	> 2.0	> 3.5	> 3.5
RT reconstruction totale	-	> 3.0	> 4.0	> 4.0

Tab. 50 Proposition de valeurs seuils pour le réseau national

Mesure d'entretien	Indice IA2	Indice IA4	Indice I2	Indice I3
ES Enduit superficiel	≥ 1.5	-	-	-
CR Couche de roulement	≥ 2.5	≥ 1.5	-	≥ 1.5
RS reconstruction superstructure bitumineuse	≥ 3,5	≥ 3.5	≥ 3.5	≥ 3.5
RT reconstruction totale	-	-	≥ 4.5	≥ 4.5

Tab. 51 Proposition de valeurs seuils pour des réseaux communaux pour des données d'état issues d'un relevé visuel (indice I1 et sous-indices IAi)

Mesure d'entretien	Indice IA1	Indice IA2	Indice IA3	Indice IA4	Indice IA5
ES Enduit superficiel	-	> 2.0	-	-	-
CR Couche de roulement	-	> 3.0	> 2.0	-	-
RS reconstruction superstructure bitumineuse	-	> 4.0	> 3.0	> 2.0	> 3.0
RT reconstruction totale	-	-	> 4.0	> 3.0	> 4.0

Des adaptations de ces seuils peuvent être envisagées, pour tenir compte notamment de dégradations spécifiques d'un réseau ou de l'état général moyen du réseau en question. Toutefois, à trop les modifier, il y a un risque de perdre leur signification technique et de ne plus réaliser de travaux adaptés aux dégradations.

Enfin, les mesures proposées à l'aide de ces seuils doivent essentiellement servir à la planification de l'entretien, dans une vue stratégique, permettant d'identifier tout d'abord les secteurs problématiques d'un réseau, et dans un second temps, d'évaluer quel niveau d'intervention, et quelle ampleur de mesure serait vraisemblablement nécessaire. Les quatre niveaux de mesures proposés peuvent ainsi être utilisés dans la cadre d'une démarche stratégique et prédictive de la planification de l'entretien (démarche PMS), l'application de coût unitaire par type de mesure permettant d'établir des estimations financières de besoins futurs en entretien d'un réseau. De tels résultats constituent une aide précieuse au gestionnaire pour la définition de plannings prévisionnels des travaux incluant une estimation de leurs coûts, et ainsi pouvoir argumenter des demandes de budget auprès des autorités politiques.

Les mesures ainsi proposées devraient toutefois systématiquement faire l'objet de vérifications avant la réalisation de projets concrets. Des investigations pour déterminer l'état des couches inférieures et la qualité des matériaux sont fortement recommandées, car de telles informations ne sont pas exprimées au travers des indices d'état, et peuvent

considérablement modifier la mesure effectivement réalisée par rapport à celle qui avait été planifiée au niveau stratégique.

Annexes

Les annexes du présent rapport de recherche sont remises sous format électronique et peuvent être consultées via le lien suivant : <https://www.mobilityplatform.ch>.

Glossaire

Terme	Signification
OFROU ASTRA	Office fédéral des routes <i>Bundesamt für Strassen</i>
SN	Normes suisses (SN)
VSS	Association suisse des professionnels de la route et des transports
AIPCR	Association mondiale de la route (PIARC)
Swiss-SDI	Swiss Statistical Design & Innovation (spécialiste mathématique et analyse de données)
GEC EMF	Gestion de l'entretien des chaussées <i>Erhaltungsmanagement der Fahrbahnen</i>
PMS	Pavement management system (system de gestion de l'entretien)
FGSV	Société de recherche sur les routes et les transports (Allemagne) <i>Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen</i>
AGR	Appareil de relevé à grand rendement
sW	Écart-type de la valeur W (changement de pente) dans le profil longitudinal
T	Profondeur d'ornièrre en [mm]
t ou PEA	Profondeur théorique d'eau, en [mm]
IRI	International roughness index
ARRA	Taux d'arrachement
FISS RISS	Taux de fissuration <i>Rissenrate</i>
REPA FLI	Taux de réparation <i>Flickenrate</i>
AUN	<i>Allgemeine Unebenheitsmaß</i>
DSK ECF	<i>Dunnschicht kalt</i> Enrobé coulé à froid
DSA MF	<i>Kaltmikro Dünnschicht</i> Microrevêtement à froid couche mince
OB	<i>Oberflächebehandlung</i> Traitement de surface
ACVTL	<i>Asphaltbeton für dünne oder sehr dünne Schichten</i> Béton bitumineux pour couche minces ou très minces
SDA	<i>Semidichter Asphalt</i> Béton bitumineux semi-dense
PA	<i>Porous Asphalt / Offenporiger Asphalt</i> Béton bitumineux drainant
ACMR	Macrorugueux <i>Rauhasphalt</i>
ACF	Béton bitumineux pour couche de fondation
ES	Enduit superficiel
CR	Couche de roulement (abréviation famille de mesure d'entretien)
RS	Reconstruction superstructure bitumineuse (abréviation famille de mesure d'entretien)
RT	Reconstruction totale (abréviation famille de mesure d'entretien)
RF	Renforcement (abréviation pour type de travaux réalisés)
RGD	Route à grand débit (RGD)

HLS	Hochleistungsstrasse (HLS)
RL	Route de liaison (RL)
VS	Verbindungsstrasse (VS)
RP	Route principale (RP)
HVS	Hauptverkehrsstrasse (HVS)
TJM	Trafic journalier moyen
EES	Équipements d'exploitation et de sécurité (EES)
BSA	Betriebs- und Sicherheitsausrüstungen (BSA)
OA	Ouvrages d'art
K	Kunstabauten

Bibliographie

Normes (Suisse)

- [1] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2004), « **Gestion de l'entretien – Norme de base** », VSS 40 900a.
- [2] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2003), « **Gestion de l'entretien des chaussées (GEC) – Relevé d'état et appréciation en valeur d'indice** », VSS 40 925b.
- [3] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2005), « **Gestion de l'entretien des chaussées (GEC) – Relevé d'état visuel : indices individuels** », VSS 40 926.
- [4] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2017), « **Caractéristiques de surface des chaussées - Exigences** », VSS 640 525.
- [5] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (1997), « **Entretien des chaussées – Norme de base ; concept des mesures** », VSS 40 730b.
- [6] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2013), « **Entretien des chaussées – Réparation, remise en état et renouvellement des couches en enrobé bitumineux** », VSS 40 731.
- [7] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2009), « **Gestion de l'entretien dans les agglomérations – Norme de base** », VSS 40 980.
- [8] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (2017), « **Caractéristiques de surface des chaussées – Planéité longitudinale** », VSS 40 517.
- [9] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS (1999), « **Gestion de l'entretien – Evaluation de tronçons de route dans le réseau – Evaluation fonctionnelle** », VSS 40 908.

Documentation

- [10] Prof. H.P. Lindenmann (2008), « **Forschungspaket, Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen, Synthesebericht** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2004/710, Rapport VSS No. 1259*.
- [11] V. Gnehm (2008), « **Forschungspaket, Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen, Standardisierte Erhaltungsmassnahmen** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2004/711, Rapport VSS No. 1235*.
- [12] I. Scazziga (2008), « **Forschungspaket, Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen, Schadenprozesse und Zustandsverläufe** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2004/712, Rapport VSS No. 1304*.
- [13] A. Jacot (2009), « **Forschungspaket, Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen, Bedeutung Oberflächenzustand und Tragfähigkeit sowie gegenseitige Beziehung für Gebrauchs- und Substanzwert** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2004/713, Rapport VSS No. 1246*.
- [14] T. Hermann, J. Lüking, N. Schindele, B. Adey, R. Hajdin (2008), « **Forschungspaket, Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen, Gesamtnutzen und Nutzen-Kosten-Verhältnis von standardisierten Erhaltungsmassnahmen** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2004/714, Rapport VSS No. 1244*.
- [15] Prof. G. Girmscheid, A. Fastrich (2010), « **Forschungspaket, Massnahmenplanung im EM von Fahrbahnen, Zusatzkosten infolge Vor- und Aufschub von Erhaltungsmassnahmen** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 2004/715, Rapport VSS No. 1282*.
- [16] M. Blumer, E. Stahel (1996), « **Management der Strassenerhaltung (MSE) Entwicklung Massnahmen-, Strategie- und Kostemodell** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 15/93, Rapport VSS No. 357*.
- [17] M. Hussain-Khan, J.-D. Burnat, B. Collaud (1997), « **Système informatisé de gestion des chaussées** », Office fédéral des routes OFROU, *Projet de recherche VSS 27/86, Rapport VSS No 390*.
- [18] R. Staubli, T. Hirt (2007), « **Maintien de la valeur des routes. Guide à l'intention des communes et des praticiens** », Association des communes suisse et Union des villes suisses.
- [19] Ministère des transports du Québec (2016), « **Plan d'intervention en infrastructures routières locales – Guide d'élaboration** », Québec.
- [20] AIPCR, Comité technique C4.1. (2013), « **Stratégies routières et techniques d'entretien, Pratiques de la gestion du patrimoine routier** », AIPCR.
- [21] IDRRIM (Juin 2016), « **GEPUR : Gestion et entretien du patrimoine urbain et routier – méthodes outils et technique – Volet n°1 : Routes interurbaines et traverses d'agglomération** », France.

-
- [22] L. Bertrand et al (1998), « **Catalogue des dégradations de surface des chaussées – Méthode d'essai n°52, complément à la méthode d'essai 38-2** ». Laboratoire central des ponts et chaussées, France.
-
- [23] L. Bertrand, P. Lepert (1997), « **Relevé des dégradations de surface des chaussées – Méthode d'essai LPC n°38 Version 2.0** », Laboratoire central des ponts et chaussées, France.
-
- [24] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV (2016), « **Arbeitspapiere zur Systematik der Strassenerhaltung – Rehe K : Kommunale Strassen** », FGSV 490 AP 9 K
-
- [25] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV (2001), « **Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmassnahmen an Strassenbefestigungen** », RPE-Stra 01, FGSV 488
-
- [26] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV (2012), « **Empfehlungen für das Erhaltungsmanagement von Innerortstrassen** », E EMI 2012, FGSV 487
-
- [27] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen FGSV (2006), « **Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und –bewertung von Strassen** », ZTV ZEB-StB, FGSV 489
-
- [28] A. Weninger-Vycudil (2006), « **Bewertung des Strassenzustandes im Vergleich zwischen Österreich und Deutschland** », PMS Consult, Wien.
-
- [29] Jacot, A., Braber, R., & Von Loeben, W.-H. (2012) « **Bases pour la révision des normes sur la mesure et l'évaluation de la planéité des chaussées** ». *Projet de recherche VSS 2004/703. Rapport VSS No 1385.*
-
- [30] Perret J., Rossel P., Ould Henia M., Delaby M. (2020) « **Planéité longitudinale : Exigences et indices d'état à partir des méthodes d'exploitation européennes** », *Projet de recherche VSS 2016/322, Rapport VSS No 2016/32.*
-

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 : 12.07.2021

Données de base

Projet N° : VSS2016/416

Titre du projet : Choix des mesures d'entretien à partir des relevés d'état des chaussées pour la planification de l'entretien

Echéance effective :

Textes :

Résumé des résultats du projet :

Le projet de recherche s'est occupé de définir des familles de mesures d'entretien applicables dans une démarche de planification de l'entretien (PMS: Pavement Management System) et de déterminer quels indices des normes VSS 40 925 et 40 926 sont pertinents pour le choix de ces mesures.

Pour parvenir à définir un catalogue de familles de mesures d'entretien et leurs conditions d'application selon l'état, la présente recherche s'est basée sur des retours d'expérience et la corrélation des données de travaux réalisés et des données d'état relevées avant ces travaux et ayant a priori contribué au choix des mesures réalisées. Pour cette exploitation, le centre de recherche a fait appel à des spécialistes en analyse de données.

Les données récoltées concernent sept cantons, une filiale des routes nationales et deux communes, avec parfois plusieurs campagnes de relevé et plusieurs périodes de travaux réalisés. Les données relatives aux travaux obtenues permettent de proposer 4 familles de mesure d'entretien : enduits superficiels ; remplacement de la couche de roulement; remplacement de la superstructure bitumineuse; reconstruction totale.

Les différentes démarches testées n'ont pas permis de déterminer avec une fiabilité suffisante des seuils sur les indices d'état permettant de classer avec suffisamment de distinction les 4 familles de mesures. Ceci, notamment, car les indices d'état ne contiennent pas toutes les informations qui ont contribué au choix de la mesure d'entretien. Des facteurs extérieurs sont souvent autant voire plus déterminants que l'état de la chaussée.

Il est aussi apparu que l'état moyen du réseau étudié avait une influence sur l'état des tronçons avec travaux. Ainsi, les seuils considérés devraient tenir compte de cet état et aussi d'exigences plus élevées qui s'appliquent à certains réseaux, comme les routes nationales.

Finalement, des seuils ont été proposés, en se basant sur les indices d'état ayant été jugés les plus pertinents pour identifier des tronçons problématiques d'un réseau et décrivant des dégradations nécessitant vraisemblablement une intervention. Il s'agit des indices IA2, IA4, I2 et I3 pour les réseaux cantonaux et nationaux, et des indices IA2, IA3, IA4 et IA5 pour les réseaux communaux, les indices I2 et I3 n'étant généralement pas disponibles pour ces derniers.



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 :

Deux principaux objectifs du projet ont été atteints, à savoir:

- 1) Établir des familles de mesures d'entretien applicables dans une démarche de planification de l'entretien.
- 3) Prendre en compte les conditions particulières liées à la typologie du réseau ou à la nature des données d'état disponibles.

Les deux autres objectifs principaux du projet n'ont été atteints que partiellement :

- 2) Définir les indices pertinents pour le choix des mesures et leur domaine d'application.
- 4) Valider et implémenter ces familles de mesures sur trois types de réseaux routiers : routes nationales, cantonales et communales.

En effet, bien que les indices pertinents aient été identifiés, les seuils proposés n'ont pas permis pas d'expliquer la totalité des choix des mesures d'entretien réalisées pour les réseaux étudiés, ceci car des facteurs extérieurs sont souvent autant voire plus déterminants que l'état de la chaussée dans le choix de la mesure.

Déductions et recommandations :

Les principales recommandations pour le choix de mesure d'entretien à partir des relevés d'état des chaussées pour la planification de l'entretien sont :

- 1) Utiliser un nombre limité (4) de familles de mesures à ce stade de la planification.
- 2) Adapter les seuils aux indices d'état disponibles et aux conditions particulières du réseau (état moyen, exigences, stratégie d'entretien, etc.).
- 3) Appliquer les seuils dans le cadre d'une démarche stratégique dont le but est d'identifier les secteurs problématiques du réseau et d'estimer le niveau d'intervention (ampleur de la mesure) a priori nécessaire.
- 4) Vérifier systématiquement les mesures proposées à partir de ces seuils avant la réalisation de projet concrets, à l'aide d'investigations complémentaires (carottages, etc.).

Publications :

Un article dans le journal de la VSS est prévu dans le courant de l'année 2021.

Des associations dont les membres présentent un intérêt pour la problématique, à l'image de l'Union des villes suisses (UVS) et de l'Association romande des chefs de voirie (ARCV), pourront également être contactées afin d'actualiser leurs recommandations relatives à la gestion de l'entretien.

Chef/cheffe de projet :

Nom : Ould Henia

Prénom : Mehdi

Service, entreprise, institut : Nibuxs 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 :

Der Forschungsbericht gibt einen guten Überblick über Schweizer Standards und internationale Praktiken zur Zustandsbewertungen der Fahrbahnoberfläche und deren Nutzung für die strategische Erhaltungsplanung. Er verdeutlicht aber auch die Grenzen des Ansatzes, Erhaltungsmaßnahmen allein auf der Grundlage von standardisierten Zustandsindizes der Fahrbahnoberflächen auszuwählen. Die Ergebnisse ermöglichen, eine Erhaltungsstrategie zu definieren und damit festzulegen, wann auf einem Strassenabschnitt eingegriffen werden soll, reichen aber nicht unbedingt aus, um zu entscheiden, welche Art von Erhaltungsmaßnahme durchgeführt werden soll. Andere Faktoren, wie z. B. das Alter und der Zustand der unteren Schichten oder deren Dicke, haben ebenso viel oder mehr Einfluss auf die endgültige Wahl einer Erhaltungsmaßnahme. Die Anwendung einer begrenzten Anzahl von Typen von Erhaltungsmaßnahmen mit den vorgeschlagenen Schwellenwerten für verschiedene Zustandsindizes stellt dennoch eine wertvolle Hilfe für den Erhaltungsplaner dar, um vorläufige Arbeitspläne einschließlich einer Schätzung ihrer Kosten zu definieren und so Budgetanträge gegenüber den politischen Behörden argumentieren zu können. Insbesondere dann, wenn Daten zum Strassenoberbau und dessen Schichten noch nicht in den Strassendatenbanken für netzweite Analysen zur Verfügung stehen.

Mise en oeuvre :

Der vorliegende Forschungsbericht soll Erhaltungsplaner dazu ermutigen, die regelmässig und netzweit erhobenen Zustandsdaten für die strategische Erhaltungsplanung zu nutzen. Die Ergebnisse dieser Forschung werden Erhaltungsplaner unterstützen, die bestehenden Methoden der strategischen Erhaltungsplanung auf der Grundlage dieser Zustandsdaten anzuwenden und die Implementierung eines solchen Verfahrens erleichtern. Vor der Implementierung einer zustandsorientierten strategischen Erhaltungsplanung für ein Strassennetz wird empfohlen, eine Analyse der verfügbaren Daten, der Netzspezifika und der Anforderungen durchzuführen, um einen auf dieses Netz abgestimmten Typenkatalog von Erhaltungsmaßnahmen mit Kostenansätzen und Schwellenwerten erstellen zu können. Die in dieser Untersuchung dargestellten Grenzen des Ansatzes legen nahe, dass zukünftig bereits bestehende Strassendaten des Schichtenaufbaus aus den ausgeführten Erhaltungsprojekten maschinenlesbar in den Strassendatenbanken abgelegt werden sollten, um diese neben den Zustandsdaten der Fahrbahnoberfläche für eine netzweite Analyse verwenden zu können.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

In der Praxis werden zunehmend auch weitere Indikatoren der Fahrbahnoberfläche erhoben, welche unter Umständen auch Einzug ins Normenwerk finden werden. Zudem werden bei den Strassenbetreibern vermehrt die Schichtendaten netzweit und maschinenlesbar in Strassendatenbanken abgelegt. Unter der Voraussetzung einer genügenden Datenqualität dieses erweiterten Datenpools verschiedener Strassenbetreiber wäre eine Ausweitung der Analyse auf weitere Zustandsindikatoren zur Bestimmung von Schwellenwerten unter Einbezug des Schichtenaufbaus sinnvoll.

Influence sur les normes :

Die Ergebnisse haben aktuell keinen Einfluss auf das Normenwerk.

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Schiffmann

Prénom : Frank

Service, entreprise, institut : IMC - Infrastructure Management Consultants GmbH

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