



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

Orthophotos et modèles numériques de surface pour quantifier les dégradations des revêtements routiers

Orthophotos und numerische Flächenmodelle für die Quantifizierung der Strassenbelagsschäden

Orthophotos and digital surface models to quantify pavement distress

HEIG-VD / CCDR
Françoise Beltzung

HEIG-VD / Groupe géomatique
Gildas Allaz

Ingénieur Conseil Sàrl
Michel Acquadro

Ville de La Chaux-de-Fonds, Service technique
Nicolas Monnin

Projet de recherche VSS 2016/321 sur demande de l'Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS).

Décembre 2020

1697

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)



Orthophotos et modèles numériques de surface pour quantifier les dégradations des revêtements routiers

Orthophotos und numerische Flächenmodelle für die Quantifizierung der Strassenbelagsschäden

Orthophotos and digital surface models to quantify pavement distress

HEIG-VD / CCDR
Françoise Beltzung

HEIG-VD / Groupe géomatique
Gildas Allaz

Ingénieur Conseil Sàrl
Michel Acquadro

Ville de La Chaux-de-Fonds, Service technique
Nicolas Monnin

Projet de recherche VSS 2016/321 sur demande de l'Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS).

Décembre 2020

1697

Impressum

Instance de recherche et équipe de projet

Direction du projet

Françoise Beltzung

Membres

Gildas Allaz

Michel Acquadro

Commission d'experts responsable

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

Commission de suivi

Président

Jacques Perret

Membres

Vincent Gorgé

Alain Jacot

Wolf-Henrik von Loeben

René Lutz

Margarita Rodriguez

Sabine Würmli

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	9
Zusammenfassung	13
Summary	17
1 Introduction	21
1.1 Exposé préliminaire	21
1.2 Solutions embarquées du marché	22
1.3 Le potentiel du système ARRPA	23
1.4 Les dégradations	24
1.5 Objectifs du mandat de recherche VSS 2016/321	24
2 Méthodes d'auscultation embarquées et automatisées et notions de géomatique	27
2.1 Concepts technologiques	27
2.2 Les équipements embarqués	27
2.2.1 Capteurs de surface routière	27
2.2.2 Capteurs de géolocalisation	28
2.2.3 Précision	29
2.2.4 Points de calage	29
2.2.5 Résolution	30
2.3 La photogrammétrie	31
2.4 Post-traitement des données acquises sur le terrain	35
2.5 Les géodonnées	35
2.5.1 Définition	35
2.5.2 Géoréférencement	35
2.5.3 Géodonnées vectorielles	36
2.5.4 Géodonnées raster	36
2.6 La méthode ARRPA	37
2.6.1 ARRPA en bref	37
2.6.2 Quelques points de détail sur le traitement des données avec ARRPA	38
2.7 Les apports de la géomatique	41
2.7.1 L'interopérabilité	41
2.7.2 Les outils SIG	42
2.7.3 La géolocalisation précise	42
2.7.4 La modélisation intégrale	46
2.8 Durée des calculs	48
2.9 Coûts	49
2.9.1 Généralités	49
2.9.2 Le cas d'ARRPA	49
3 Méthodologie	51
3.1 Fil rouge	51
3.2 Détection des fissures et faïençage	52
3.3 Détection de la perte de gravillons	52
3.4 Détection des nids de poule et pelades	53
3.5 Choix des tronçons d'essai	53
3.5.1 Charles-Naine	53
3.5.2 Commerce	54
3.5.3 Helvétie	54
3.5.4 Stavay-Mollondin	55
3.6 Dégradations types par tronçon d'essai	56
3.7 Validation de la méthode	56
3.7.1 Auscultations croisées et pistes de référence: exemples du Québec et de l'Allemagne ..	56
3.7.2 Les mesures de terrain	58

4	Exploitation des résultats d'ARRPA	59
4.1	Quantifier les fissures	59
4.2	Quantifier le faïençage	59
4.3	Quantifier la perte de gravillons	60
4.4	Quantifier les nids de poule et pelades	60
4.5	Volume de matière perdue	61
5	Résultats par type de dégradation	63
5.1	Fissures et faïençage	63
5.1.1	Principe de la détection des fissures et du faïençage	63
5.1.2	Statistiques	65
5.1.3	Facteurs influençant la qualité de la détection et contrôles	66
5.1.4	Résultats des relevés sur l'ensemble des tronçons	67
5.1.5	Répétabilité des mesures	68
5.1.6	Mise en perspective avec un relevé manuel	68
5.1.7	Évolution temporelle	69
5.1.8	Durée du processus de détection avec ARRPA	70
5.1.9	Corrélation faïençage / flache / ornière	70
5.1.10	Observation d'une remontée de fissure	71
5.2	Perte de gravillons	72
5.2.1	Principe de la détection de la perte de gravillons	72
5.2.2	Statistiques	73
5.2.3	Résultats des relevés sur l'ensemble des tronçons	74
5.2.4	Contrôle de pertinence et répétabilité des mesures	74
5.2.5	Facteurs influençant la qualité de la détection	76
5.2.6	Évolution temporelle	78
5.2.7	Durée du processus de détection avec ARRPA	79
5.3	Pelades et nids de poule	80
5.3.1	Principe de la détection des pelades et des nids de poule	80
5.3.2	Cas concret de la rue de l'Helvétie	80
5.3.3	Statistiques	81
5.3.4	Facteurs influençant la qualité de la détection et contrôles	82
5.3.5	Résultats des relevés sur l'ensemble des tronçons	82
5.3.6	Évolution temporelle	83
5.3.7	Durée du processus de détection avec ARRPA	84
6	Relevés visuels	85
6.1	Relevés visuels I ₁	85
6.2	Le relevé détaillé	85
6.2.1	Rue du Commerce	86
6.2.2	Avenue Charles-Naine	86
6.2.3	Carrefour Stavey-Mollondin	88
7	Interprétation des résultats	91
7.1	Apport de la géomatique	91
7.2	Précision du géoréférencement	91
7.3	Résolution de la méthode ARRPA	91
7.4	Détection des fissures	92
7.5	Détection des fissures colmatées	92
7.6	Détection du faïençage	92
7.7	Détection de la perte de gravillons	93
7.8	Détection des nids de poule et pelades	94
7.9	Utilisation des grandeurs objectives proposées en relation avec la norme VSS 40925	94
7.10	Champs d'application différenciés	95
7.11	Perspectives de développement	96
8	Conclusions	97

Remerciements	98
Annexes	99
Glossaire	115
Bibliographie	116
Clôture du projet	117

Résumé

Les solutions embarquées développées par le domaine routier

A l'heure actuelle, l'auscultation routière automatique la plus aboutie est fondée sur un appareil constitué d'un laser et d'une caméra linéaire qui, ensemble, fournissent des images de la surface avec une résolution longitudinale et transversale de 1 mm et une résolution verticale de 0.25 mm. Le logiciel qui l'accompagne détecte et quantifie les fissures, la perte de gravillons et la profondeur moyenne de texture (en plus des nids de poule, de l'orniérage, de l'affaissement, etc). Les véhicules d'auscultation sont munis d'au moins deux de ces appareils qui conjointement balayent la chaussée sur une largeur de plus de 4 m. L'auscultation est réalisable de jour comme de nuit à une vitesse pouvant atteindre 100 km/h. La géolocalisation des dégradations est précise à 1 m près. Cette technologie a un prix élevé, de l'ordre du million de CHF par véhicule.

Une méthode alternative provenant du domaine de la géomatique

Une autre méthode d'auscultation routière numérique a été développée récemment à la HEIG-VD. Elle repose sur le principe de la photogrammétrie. Elle se passe de laser et ne s'appuie que sur une série de caméras plein cadre. Cette configuration a l'avantage d'être bien plus abordable financièrement tout en offrant des résolutions d'image assez semblables à celles obtenues avec le couplage laser + caméra linéaire. Du reste, l'accent est mis sur une amélioration substantielle de la précision de la géolocalisation qui est de l'ordre de 1 cm, permettant une analyse fine de l'évolution des dégradations ainsi que la superposition avec d'autres données de l'environnement routier. Selon le principe de l'interopérabilité, toutes les données numériques produites (géodonnées) sont enregistrées dans des formats échangeables entre les différents intervenants. En revanche, en relation avec les caractéristiques techniques du mode rafale des caméras plein cadre actuelles, la vitesse d'auscultation est limitée à 15 km/h. Il s'agit là d'un inconvénient majeur si une auscultation sur routes principale ou à grand débit est en jeu. Toutefois, en dépit de cette limitation, la méthode garde tout son intérêt pour les tronçons de tailles réduites (d'une centaine de mètre à un ou deux kilomètres selon les caractéristiques actuelles des composants), pour des ouvrages tels que des ponts ou pour des secteurs critiques ou représentatifs d'un réseau plus vaste (échantillonnage de secteurs jugés homogènes).

Contrairement à une hypothèse énoncée initialement, la méthode photogrammétrique dans son ensemble n'est pas à faible coût. Il faut compter avec un prix au km de l'ordre de 10000 CHF pour un relevé complet, c'est-à-dire qui comporte les fissures, la perte de gravillons, les nids de poule et les déformations permanentes. Il est important de noter que ce coût comprend un relevé géométrique du secteur ausculté.

Objectif du mandat de recherche

Les débuts de l'auscultation automatique par la méthode photogrammétrique avaient d'ores-et-déjà permis de démontrer sa capacité à détecter des dégradations de type nid de poule ou ornière, à calculer la hauteur d'eau, à quantifier les déformations [14]. Ce mandat de recherche VSS va au-delà en essayant de se rapprocher des capacités d'auscultation du couplage laser + caméra linéaire. Parmi les principaux objectifs, citons:

- Déterminer la capacité du système à détecter correctement la perte de gravillons ;
- Déterminer la capacité du système à distinguer correctement les nids de poule des pelades ;
- Déterminer la capacité du système à détecter correctement les fissures et à distinguer les fissures du faïençage ;
- Proposer des grandeurs quantitatives absolues ;
- Estimer l'exactitude de ces grandeurs (valider la méthode) ;
- Identifier les grandeurs les plus adaptées à la gestion de l'entretien (indicateurs d'état).

Il va de soi que ces objectifs ne dépendent pas seulement de la collecte des données. Le stockage des données et la puissance de calcul sont déterminants, de même que l'ajustement du paramétrage des algorithmes de détection.

Pavemetrics versus ARRPA en chiffres

Un système performant en ce début d'année 2020 est celui proposé par la société Pavemetrics. Cette entreprise vient de lancer sa deuxième génération de capteurs : les LCMS-2 (LCMS pour Laser Crack Measurement System). Quant au système dont il est question dans ce travail, uniquement basé sur la photogrammétrie, il a reçu l'acronyme ARRPA (Auscultation de Revêtements Routiers par Photogrammétrie Automatisée). Les caractéristiques techniques des deux systèmes sont comparées dans Tab. 1.

Tab. 1 Vue d'ensemble des principales caractéristiques des systèmes d'auscultation automatique Pavemetrics et ARRPA (état 2020).

Système proposé	Vitesse du véhicule [km/h]	Capteurs	Résolution planimétrique	Résolution verticale	Précision géolocalisation	Exportation
LCMS-2	100	Laser	1 mm	0.25 mm	1 m	CAO SIG BIM
ARRPA	15	Caméra	1 mm	1 mm	0.01 m	CAO SIG BIM

Les produits Pavemetrics sont très employés en Amérique du Nord, notamment au Québec où le ministère des Transports possède plusieurs véhicules qui en sont équipés. Chaque année, cette administration ausculte plus de 18'000 km de routes. En Allemagne prévaut le système PPS-Plus de la société Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik. Les systèmes PPS et PPS-Plus sont agréés depuis 2012 par la Bundesanstalt für Strassenwesen BAST.

Les grandeurs proposées

La géolocalisation très précise d'ARRPA permet de découper la surface en éléments de petites dimensions que nous appelons grille. Dans ce travail, une grille est un quadrillage géoréférencé, axé nord/sud et ayant des mailles de 50x50 cm. Une statistique classique par section de route de longueur donnée est également proposée.

La digitalisation de la surface de la chaussée offre une grande souplesse quant à l'information que l'on peut en tirer. Des exemples concrets sont présentés dans Tab. 2.

Tab. 2 Vue d'ensemble des grandeurs statistiques proposées par type de dégradation.

Dégradations	Statistiques par section (surface définie manuellement)	Statistiques par grille (automatique, résolution selon les besoins)
Fissures	<ul style="list-style-type: none"> somme de la longueur des fissures par section [m] proportion de fissures par surface [m/m²] 	carte de densité de fissuration [m/cellule] et [m/m ²] carte binaire [0/cellule] et [1/cellule]
Faièncages	<ul style="list-style-type: none"> surface de faièncage par section [m²] proportion de surface de faièncage par section [%] 	carte de densité de faièncage [m ² /cellule] et [% de cellule] carte binaire [0/cellule] et [1/cellule]
Perte de gravillons	<ul style="list-style-type: none"> densité de gravillons perdus [gravillons/m²] 	carte de densité de gravillons perdus [gravillons / cellule] et [gravillons / m ²]
Pelades	<ul style="list-style-type: none"> somme des surfaces de pelades pour chaque section [m²] proportion de la surface de pelades par rapport à celle de la section [%] 	carte de densité de pelades [m ² /cellule] et [m ² /m ²] carte binaire [0/cellule] et [1/cellule]

Nids de poule	• somme des surfaces des nids de poule pour chaque section [m ²]	carte de densité de nids de poule [m ² /cellule] et [m ² /m ²]
	• nombre de nids de poule pour chaque section [nids de poule]	carte binaire [0/cellule] et [1/cellule]

Du reste, avec une précision de la géolocalisation de 1 cm, des auscultations successives se laissent superposer et, ce faisant, l'évolution dans le temps d'une dégradation peut être déterminée avec exactitude.

La détection des dégradations

Pour les besoins du mandat, la Ville de La Chaux-de-Fonds a mis à disposition quatre tronçons de route communale. Les tronçons ont été choisis en fonction de leurs dégradations types, c'est-à-dire : fissures et faïençage, perte de gravillons, pelades et nids de poule. Après la collecte des données, dans un premier temps, le traitement s'est contenté de quantifier les dégradations types du tronçon de référence. Puis, une fois les paramètres de calcul précisés, le traitement a été étendu aux trois autres tronçons.

Il n'a pas été procédé à une validation manuelle des surfaces de nids de poule et de pelades. Leur taille et leur nombre étant nettement visibles sur les orthophotos, nul besoin de se rendre sur site pour les compter. En revanche, un comptage manuel des fissures et des pertes de gravillons a été jugé indispensable afin d'évaluer la justesse de la détection automatique. Ce travail est résumé dans le Tab. 3.

Tab. 3 Différences relatives entre deux mesures successives (fidélité) et entre relevés manuel et ARRPA (justesse).

Tronçon d'essai	Type de dégradation	Différence entre 2 relevés automatiques successifs	Différence entre relevés manuel et automatique
Charles-Naine	Fissure	2.9 %	+25 %
	Fissure colmatée	0.6 %	+7 %
	Faïençage	4.0 %	-50 %
Commerce	Perte de gravillons	1...4 %	+(8...13) %

A partir de deux mesures ARRPA successives (même heure, même opérateur, même équipement, même luminosité), nous avons estimé la fidélité du processus de collecte et de calcul. Le résultat montre que l'erreur est de l'ordre de quelques pourcents.

A partir d'une comparaison entre un relevé manuel et un relevé ARRPA, le bilan est plus mitigé. La fissure colmatée, facilement détectable à l'œil et à l'image, est un type de dégradation qui ne semble poser aucun problème à ARRPA puisqu'on trouve une bonne corrélation entre les deux techniques (7% de différence). Avec les fissures, la différence est bien plus prononcée (25 %). Ici, l'œil humain est plus perspicace car il est capable de voir des fissures ayant une faible ouverture (< 2 mm) et, de ce fait, il repère plus de fissures que ne le fait ARRPA. Quant au faïençage, la comparaison a montré que l'opérateur et le système automatique n'ont pas appliqué la même définition, ce qui a conduit à une très nette surévaluation de cette dégradation par ARRPA. Ce résultat reflète un problème classique de discordance entre l'information recherchée et ce qui a été mathématiquement défini dans l'algorithme.

Le cas de la perte de gravillons doit être considéré à part car le nombre de gravillons éjectés ne peut pas être déterminé avec exactitude, ni par l'humain ni par la machine. L'important ici est de constater que les deux sont assez proches.

Les limites de détection de la méthode ARPPA

La résolution de détection d'ARPPA est semblable à celle obtenue avec les meilleurs couples laser + caméra linéaire du marché. Elle permet de détecter des trous laissés par des gravillons perdus de l'ordre de 4 mm et des fissures avec une ouverture de l'ordre de 2 mm. La BAST allemande a fixé pour l'ouverture des fissures un seuil de détection de 1 mm. À l'heure actuelle, aucun système automatique n'est capable d'atteindre cet objectif et c'est la raison pour laquelle, en Allemagne, cette donnée continue à être saisie manuellement à l'écran.

Le lien avec la norme VSS 40 925b

Le bureau d'ingénieurs ERTEC propose quelques pistes pour faire évoluer la norme VSS 40 925b, initialement rédigée pour le relevé d'état visuel, vers une nouvelle prise en compte de l'auscultation automatique. Mis à part l'avantage certain d'obtenir des données quantitatives objectives, l'auscultation automatique offre aussi la possibilité de rigoureusement combiner différents types de dégradation dans le but de former une image très précise de l'état de la route en tout point. Le trio déterminant pour déclencher une alerte pourrait par exemple être fissure + perte de gravillons + déformation permanente.

La quantité de données issues de ce mandat ne suffit pas à établir un lien ni avec les gravités définies dans SN 40 925b, ni avec la gestion de l'entretien telle qu'elle est pratiquée actuellement.

Il paraît cependant important de souligner que les définitions des dégradations devraient être revues et adaptées pour les rendre compatibles avec la capacité de détection des systèmes d'auscultation automatique. Cette révision inclut nécessairement une définition de la taille des objets à détecter (longueur minimale de fissure, surface minimale de pelade, etc).

Les développements futurs en matière d'auscultation automatique

Nous avons constaté une certaine difficulté à trouver des moyens de validation de nos propres résultats, notamment en ce qui concerne la fissuration. Or, vraisemblablement, d'autres opérateurs de systèmes d'auscultation automatique rencontrent des problèmes similaires. Les auteurs jugent que le moment serait venu de s'inspirer des exemples du ministère des Transports du Québec et du BAST allemand en matière de contrôle qualité de l'auscultation automatique. Au Québec et en Allemagne, les autorités ont construit un banc d'essai national pour homologuer les prestataires d'auscultation automatique (publics ou privés). Ces derniers doivent pourvoir prouver que leur système est opérationnel et répond aux critères d'exactitude fixés par le maître d'ouvrage. Inversement, ces mêmes prestataires peuvent faire usage du banc d'essais pour leur étalonnage annuel et la mise au point de leur paramètres de calcul, par exemple après un changement de capteur.

À l'inverse des systèmes embarqués à grand rendement, les points forts d'ARPPA sont de pouvoir proposer une analyse des détails et un suivi dans le temps et « à la loupe » d'un processus de dégradation tel celui de la perte de gravillons, par exemple. Les deux outils sont complémentaires si chacun est exploité à l'échelle à laquelle il est le plus performant. Pour cette raison, il est important de continuer à développer l'auscultation par photogrammétrie précisément géoréférencée. Un axe important de développement est une collecte de données plus rapide pour pouvoir circuler librement dans un flux de véhicules.

Zusammenfassung

Vom Strassensektor entwickelte Messfahrzeuge

Die derzeit fortschrittlichste automatische Zustandserhebung basiert auf einer Vorrichtung, die aus einem Laser und einer Zeilenkamera besteht, die zusammen Bilder der Oberfläche mit einer Längs- und Querauflösung von 1 mm und einer vertikalen Auflösung von 0,25 mm liefern. Die mitgelieferte Software erkennt und quantifiziert dann Risse, Kornausbrüche und durchschnittliche Texturtiefe (zusätzlich zu Schlaglöchern, Spurrinnen, Setzungen usw.). Die Messfahrzeuge müssen mit mindestens zwei dieser Vorrichtungen ausgestattet sein, die zusammen die Fahrbahn über eine Breite von mehr als 4 m erheben. Die Untersuchung kann Tag und Nacht mit einer Geschwindigkeit von bis zu 100 km/h durchgeführt werden. Die Geolokalisierung von Schäden ist bis auf 1 m genau. Diese Technologie ist mit einem hohen Preis verbunden, in der Größenordnung von einer Million CHF pro Fahrzeug.

Eine alternative Methode aus dem Bereich der Geomatik

Eine weitere automatische Straßenkontrollmethode wurde kürzlich an der HEIG-VD entwickelt. Es basiert auf dem Prinzip der Photogrammetrie. Es verzichtet auf Laser und verlässt sich nur auf eine Reihe von Vollbildkameras. Diese Konfiguration hat den Vorteil, dass sie kostengünstiger ist und gleichzeitig Bildauflösungen bietet, die denen mit Laser + Linearkamera sehr ähnlich sind. Darüber hinaus wird der Schwerpunkt auf eine wesentliche Verbesserung der Genauigkeit der Geolokalisierung gelegt, die in der Grössenordnung von 1 cm liegt und eine Feinanalyse der Schadensentwicklung sowie eine Überlagerung mit anderen Strassenmerkmale ermöglicht. Gemäss dem Prinzip der Interoperabilität werden alle produzierten digitalen Daten (Geodaten) in Formaten gespeichert, die zwischen den verschiedenen beteiligten Strassenfachleuten ausgetauscht werden können. In Bezug auf die technischen Eigenschaften des Burst-Modus der aktuellen Vollbildkameras ist die Messgeschwindigkeit jedoch auf 15 km/h begrenzt. Dies ist ein schwerer Nachteil, wenn es sich um eine Zustandserfassung Ausserorts handelt. Trotz dieser Einschränkung ist die Methode jedoch interessant für kleinere Abschnitte (von hundert Metern bis zu einem oder zwei Kilometern mit den aktuellen technischen Merkmalen der Komponenten), für Bauwerke wie Brücken oder für kritische Sektoren oder Sektoren, die für ein grösseres Netz repräsentativ sind (Stichproben die als homogen gelten).

Im Gegensatz zu einer anfänglich aufgestellten Hypothese ist die photogrammetrische Methode allgemein betrachtet nicht kostengünstig. Der Preis pro Kilometer beträgt etwa 10.000 CHF für eine vollständige Erfassung, d.h. einschließlich Risse, Kornausbruch, Schlaglöcher und bleibende Verformungen. Es ist wichtig zu beachten, dass diese Kosten eine geometrische Vermessung des Messabschnittes beinhalten.

Ziele des Forschungsmandats

Die Anfänge der automatischen Zustandserfassung mit der photogrammetrischen Methode hatten bereits gezeigt, dass sie in der Lage sind, Schlagloch- oder Spurrinnenschäden zu erkennen, die Wassertiefe zu berechnen sowie Gefälle und Setzungen zu messen [14]. Im Rahmen dieses VSS-Forschungsauftrages wurde dann die Entwicklung fortgesetzt, um den Möglichkeiten der Vorrichtung Laser + Linearkamera näher zu kommen. Zu den Hauptzielen gehören:

- Bestimmung der Fähigkeit des Systems, den Ausbruch von Körner korrekt zu erkennen;
- Bestimmung der Fähigkeit des Systems, Schlaglöcher von Ablösungen richtig zu unterscheiden;
- Bestimmung der Fähigkeit des Systems, Risse korrekt zu erkennen und Risse von Netzschnitten zu unterscheiden;
- Absolute quantitative Größen vorschlagen;
- Schätzung der Genauigkeit dieser Größen (Validierung des Verfahrens);

- Identifizierung der am besten geeigneten Größen für das Instandhaltungsmanagement (Zustandsindikatoren).

Es versteht sich von selbst, dass diese Ziele nicht nur von der Datenerhebung abhängen. Datenspeicherung und Rechenleistung sind ebenso entscheidend wie die Anpassung der Parametereinstellung der Erkennungsalgorithmen.

Pavemetrics versus ARRPA in Zahlen

Ein effizientes System zu Beginn des Jahres 2020 ist das von der Firma Pavemetrics vorgeschlagene. Das Unternehmen hat gerade seine zweite Sensorgeneration vorgestellt: das LCMS-2 (LCMS steht für Laser Crack Measurement System). Das ausschließlich auf Photogrammetrie basierende System erhielt das Akronym ARRPA (Auscultation de Revêtements Routiers par Photogrammétrie Automatisée). Die technischen Eigenschaften der beiden Systeme werden in Tab. 4 verglichen.

Tab. 4 Überblick über die Hauptmerkmale der automatischen Prüfsysteme Pavemetrics und ARRPA (Stand 2020).

Prüfsystem	Fahrzeug- geschwindigkeit [km/h]	Sensor	Planimetrische Auflösung	Altimetrische Auflösung	Genauigkeit der Geolokalisierung	Datenexport
LCMS-2	100	Laser	1 mm	0.25 mm	1 m	CAO SIG BIM
ARRPA	15	Caméra	1 mm	1 mm	0.01 m	CAO SIG BIM

Pavemetrics-Produkte sind in Nordamerika sehr beliebt, zum Beispiel in Quebec, wo das Verkehrsministerium mehrere Fahrzeuge damit ausgestattet hat. Jährlich überprüft diese Verwaltung mehr als 18.000 km Straßen. In Deutschland wird das PPS-Plus-System des Fraunhofer-Instituts für Physikalische Messtechnik eingesetzt. Die Systeme PPS und PPS-Plus sind seit 2012 von der Bundesanstalt für Strassenwesen BASt zugelassen.

Die vorgeschlagenen Größen

Die hochpräzise Geolokalisierung von ARRPA ermöglicht es, die Oberfläche in kleine Elemente zu teilen, die wir ein Gitter nennen. In dieser Arbeit ist ein Gitter ein georeferenziertes Raster, das nach Norden/Süden ausgerichtet ist und Maschenweiten von 50x50 cm aufweist. Eine klassische Statistik pro Straßenabschnitt von 10, 20, 50 oder 100 m ist ebenfalls verfügbar.

Die Digitalisierung der Fahrbahnoberfläche bietet eine große Flexibilität in Bezug auf die daraus ableitbaren Informationen. Konkrete Beispiele sind in Tab. 5 dargestellt.

Tab. 5 Übersicht über die statistischen Größen, die je nach Schadenmerkmale vorgeschlagen werden.

Schadenmerkmal	Statistik pro Strassenabschnitt (von Hand definiert)	Statistik pro Gitter (automatisch, Auflösung je nach Bedürfnisse)
Risse	<ul style="list-style-type: none"> • Summe der Risslänge pro Abschnitt [m] • Mittlere Risslänge pro Flächeneinheit [m/m²] 	Rissdichtekarte [m/Zelle] und [m/m ²] Binärkarte [0/Zelle] und [1/Zelle]
Netzrisse	<ul style="list-style-type: none"> • Netzrissfläche pro Abschnitt [m²] • Anteil Netzrissfläche bez. auf Gesamtfläche [%] 	Netzrissdichtekarte [m ² /Zelle] und [%-Anteil Zelle] Binärkarte [0/Zelle] et [1/Zelle]
Kornausbrüche	<ul style="list-style-type: none"> • Kornausbruchdichte [Körner/m²] 	Dichtekarte der Kornausbrüche [Körner/Zelle] und [Körner/m ²]

Ablösungen	<ul style="list-style-type: none"> • Summe der Ablösungsflächen pro Abschnitt [m²] • Anteil Ablösungsfläche bez. auf Gesamtfläche [%] 	Dichtekarte der Ablösungen [m ² /Zelle] und [m ² /m ²] Binärkarte [0/Zelle] und [1/Zelle]
Schlaglöcher	<ul style="list-style-type: none"> • Summe der Schlaglochflächen pro Abschnitt [m²] • Anzahl Schlaglöcher pro Abschnitt [Schlagloch] 	Dichtekarte der Schlaglöcher [m ² /Zelle] und [m ² /m ²] Binärkarte [0/Zelle] et [1/Zelle]

Darüber hinaus können dank der Geolokalisierung mit einer Genauigkeit von 1 cm aufeinanderfolgende Auskultationen überlagert werden, wodurch die zeitliche Entwicklung von Ausmaß und Schwere eines Schadens genau bestimmt werden kann.

Erkennung von Schäden

Für die Zwecke des Mandats hat die Stadt La Chaux-de-Fonds vier Abschnitte der städtischen Straße zur Verfügung gestellt. Die Abschnitte wurden nach ihren typischen Schäden ausgewählt, d.h. Risse und Netzzrisse, Kornverluste, Ablösungen und Schlaglöchern. Nach der Datenerhebung bestand die Datenverarbeitung zunächst nur darin, die typischen Schäden des Standardabschnitts zu quantifizieren. Nach der Festlegung der Berechnungsparameter wurde die Verarbeitung dann auf die anderen drei Abschnitte ausgedehnt.

Es gab keine manuelle Validierung von Schlaglöchern und Ablösungen. Ihre Größe und Anzahl ist auf den Orthophotos deutlich sichtbar, so dass man Sie nicht vor Ort zählen muss. Andererseits wurde eine manuelle Erhebung von Rissen und Kornausbrüche als unerlässlich erachtet, um die Richtigkeit der automatischen Erkennung zu beurteilen. Diese Arbeit ist in Tab. 6 zusammengefasst.

Tab. 6 Relative Unterschiede zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen (Präzision) und zwischen manuellen und ARRPA-Messungen (Richtigkeit).

Versuchsstrecke	Schadenmerkmal	Unterschied zwischen zwei aufeinanderfolgenden Messungen	Unterschied zwischen manueller Erhebung und ARRPA-Messung
	Risse	2.9 %	+25 %
Charles-Naine	Versiegelte Risse	0.6 %	+7 %
	Netzzrisse	4.0 %	-50 %
Commerce	Kornausbruch	1...4 %	+(8...13) %

Aus zwei aufeinanderfolgenden ARRPA-Messungen (gleiche Zeit, gleicher Bediener, gleiche Ausrüstung, gleiche Helligkeit) haben wir die Präzision des Sammel- und Berechnungsprozesses geschätzt. Das Ergebnis zeigt, dass der Fehler nur wenige Prozent beträgt, was als zufriedenstellend angesehen wird.

Basierend auf einem Vergleich zwischen einer manuellen Erhebung und einer ARRPA-Erhebung sind die Ergebnisse eher gemischt. Der versiegelte Riss, der für das Auge und das Bild leicht erkennbar ist, ist ein Schadenstyp, der für ARRPA kein Problem darstellt, da es eine gute Korrelation zwischen den beiden Techniken gibt (7% Unterschied). Bei Rissen ist der Unterschied viel ausgeprägter (25%). Hier ist das menschliche Auge wahrnehmungsstärker, weil es Risse mit einer kleinen Öffnung (< 2 mm) sehen kann und

dadurch mehr Risse erkennt als ARRPA. Was die Netzkrisse betrifft, so zeigte der Vergleich, dass der Überwacher und das automatische System nicht die gleiche Definition anwandten, was zu einer sehr deutlichen Überschätzung dieses Schadens durch ARRPA führte. Dieses Ergebnis spiegelt ein klassisches Problem der Diskrepanz zwischen der gesuchten Information und dem, was mathematisch im Algorithmus definiert wurde, wider.

Der Fall des Kornverlustes muss separat betrachtet werden, da die Anzahl der ausgebrochenen Körner weder vom Menschen noch von der Maschine genau bestimmt werden kann. Das Wichtigste dabei ist, dass die beiden sehr nahe beieinander liegen.

Die Nachweisgrenzen der ARRPA-Methode

Die Erhebungsauflösung von ARRPA ist ähnlich der, die mit den besten Laser + Zeilenkamera paaren auf dem Markt erzielt wird. Sie kann Löcher von ausgebrochenen Körner in der Größenordnung von 4 mm und Risse mit einer Öffnung in der Größenordnung von 2 mm erkennen. Die deutsche BASt verlangt, dass mindestens der 1 mm Riss erkannt wird. Derzeit ist kein automatisches System in der Lage, dieses Ziel zu erreichen, weshalb in Deutschland diese Daten weiterhin manuell am Bildschirm codiert werden.

Die Verbindung mit der Norm VSS 40 925b

Das ERTEC-Ingenieurbüro schlägt einige Möglichkeiten vor, die ursprünglich für die visuelle Zustandserhebung entwickelte Norm VSS 40 925b zu einer neuen Betrachtung der automatischen Zustandserfassung zu entwickeln. Neben dem entscheidenden Vorteil, objektive Daten zu erhalten, bietet die automatische Erfassung auch die Möglichkeit, verschiedene Schadensmerkmale konsequent zu kombinieren, um sich an jeder Stelle ein sehr genaues Bild vom Strassenzustand zu machen. Das bestimmende Trio könnte z.B. Rissbildung + Kornverlust + bleibende Verformung sein.

Die Datenmenge aus diesem Mandat reicht nicht aus, um eine Verbindung herzustellen, weder mit den in SN 40 925b definierten Schweregraden noch mit dem aktuellen Instandhaltungsmanagement.

Es erscheint jedoch wichtig zu betonen, dass die Definitionen von Schäden überprüft und angepasst werden sollten, um sie mit der Erkennungsfähigkeit automatischer Inspektionssysteme kompatibel zu machen. Diese Überarbeitung beinhaltet notwendigerweise eine Definition der Größe der zu erkennenden Objekte (minimale Risslänge, minimale Ablösungsfläche, etc.).

Zukünftige Entwicklungen in der automatischen Zustandserfassung

Wir hatten Schwierigkeiten, Wege zu finden, unsere eigenen Ergebnisse zu validieren, insbesondere im Hinblick auf die Rissbildung. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass andere Betreiber von automatischen Erfassungssystemen mit ähnlichen Problemen zu kämpfen haben. Die Autoren glauben, dass es an der Zeit ist, die Beispiele des Ministère des Transports du Québec und der deutschen BASt im Bereich der Qualitätskontrolle der automatischen Zustandserfassung heranzuziehen. In Quebec und Deutschland haben die Behörden einen nationalen Prüfstand aufgebaut, um Anbieter von (öffentlichen oder privaten) automatischen Erfassungssystemen zu zertifizieren. Letztere müssen in der Lage sein, nachzuweisen, dass ihr System funktionsfähig ist und die vom Auftraggeber festgelegten Genauigkeitskriterien erfüllt. Umgekehrt können dieselben Dienstleister den Prüfstand für ihre jährliche Kalibrierung und die Anpassung ihrer Berechnungsparameter, z.B. nach einem Sensorwechsel, nutzen.

Im Gegensatz zu schnellfahrenden Messfahrzeugen liegen die Stärken von ARRPA darin, eine detaillierte Analyse sowie eine Überwachung über die Zeit und "unter der Lupe" eines Schadens, wie z.B. dem Kornausbruch, anbieten zu können. Die beiden Instrumente ergänzen sich, wenn sie jeweils in dem Massstab eingesetzt werden, in dem sie am wirksamsten sind. Aus diesem Grund ist es wichtig, die genau georeferenzierte photogrammetrische Zustandserfassung weiter zu entwickeln. Eine grundlegende Entwicklungsachse ist die schnellere Datenerfassung, um sich in einem Fluss von Fahrzeugen auf Hauptstrassen frei bewegen zu können.

Summary

Automatic survey developed by the road sector

At present, the most advanced automatic survey is based on a device consisting of a laser and a line camera that together provide images of the surface with a longitudinal and transverse resolution of 1 mm and a vertical resolution of 0.25 mm. The accompanying software then detects and quantifies cracks, loss of chippings and mean texture depth (in addition to potholes, rutting, subsidence, etc.). The survey vehicles are equipped with at least two of these devices which together sweep the roadway over a width of more than 4 m. The survey can be performed day and night at a speed of up to 100 km/h. The geolocation of distress is accurate to within 1 m. This technology comes at a high price, in the order of one million CHF per vehicle.

An alternative method from the field of geomatics

Another automatic survey method has recently been developed at HEIG-VD. It is based on the principle of photogrammetry. It does without lasers and relies only on a series of full frame cameras. This configuration has the advantage of being much more affordable while offering image resolutions quite similar to those obtained with laser + linear camera coupling. Moreover, the emphasis is placed on a substantial improvement in the accuracy of geolocation, which is of the order of 1 cm, allowing a fine analysis of the evolution of distress as well as overlaying with other road environment data. According to the principle of interoperability, all the digital data produced (geodata) are stored in formats that can be exchanged between the various parties involved. However, in relation to the technical characteristics of the burst mode of the current full frame cameras, the speed of auscultation is limited to 15 km/h. This is a major disadvantage if a survey has to be conducted on a primary road. However, in spite of this limitation, the method is of interest for smaller sections (from a hundred metres to one or two kilometres depending on the current characteristics of the components), for structures such as bridges or for critical sectors or sectors representative of a larger network (sampling of sectors considered homogeneous).

Contrary to an initially stated assumption, the photogrammetric method as a whole is not low cost. A price per km in the order of CHF 10,000 is required for a complete survey, i.e. including cracks, loss of gravel, potholes and permanent deformations. It is important to note that this cost includes a geometric survey of the inspected area.

Goals of the research project

The early days of automatic auscultation by the photogrammetric method had already demonstrated its ability to detect pothole or rut-type distress, calculate water level, and measure slopes and subsidence [14]. Then, it was within the framework of this VSS research mandate that development continued in order to try to get closer to the auscultation capabilities of the laser + linear camera coupling. Among the main objectives are:

- To determine the system's ability to correctly detect the loss of chippings ;
- To determine the system's ability to correctly distinguish potholes from peelings ;
- To determine the system's ability to correctly detect cracks and distinguish cracks from crazing ;
- To propose absolute quantities ;
- To estimate the accuracy of these quantities (validate the method) ;
- To identify the most appropriate quantities for maintenance management.

It goes without saying that these objectives do not depend solely on data collection. Data storage and computing power are crucial, as is the adjustment of the parameter setting of the detection algorithms.

Pavemetrics versus ARRP in numbers

The most efficient system at the end of 2019 is the one proposed by Pavemetrics. This company has just launched its second generation of sensors: the LCMS-2 (LCMS for Laser Crack Measurement System). The system based solely on photogrammetry has been given the acronym ARRP (Auscultation de Coatings Routiers par Photogrammétrie Automatisée). The technical characteristics of the two systems are compared in Tab. 7.

Tab. 7 Overview of the main features of the Pavemetrics and ARRP automatic testing systems (as of 2019).

System	Vehicle speed [km/h]	Sensor	Length resolution	Vertical resolution	Geolocation accuracy	Data export
LCMS-2	100	Laser	1 mm	0.25 mm	1 m	CAO SIG BIM
ARRP	15	Caméra	1 mm	1 mm	0.01 m	CAO SIG BIM

Pavemetrics products are very popular in North America, for instance in Quebec where the Ministry of Transportation has several vehicles equipped with them. Every year, this administration checks more than 18,000 km of roads. In Germany, the PPS-Plus system from Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik is used. The PPS and PPS-Plus systems have been approved by the Bundesanstalt für Strassenwesen BAST since 2012.

The proposed quantities

ARRP's highly accurate geolocation allows the surface to be cut into small dimensions that we call a grid. In this work, a grid is a geo-referenced squaring, oriented north/south and having mesh sizes of 50x50 cm. A classic statistic per road section of 10, 20, 50 or 100 m is also available.

The digitization of the pavement surface offers great flexibility in terms of the information that can be derived from it. Concrete examples are presented in Tab. 8.

Tab. 8 Overview of the proposed statistics by type of distress.

Type of distress	Statistics by section (surface delimited manually)	Statistics by grid (automatic, variable mesh size)
Cracks	<ul style="list-style-type: none"> sum of crack length by section [m] ratio of crack length by surface [m/m²] 	crack density map [m/cell] and [m/m ²] binary map [0/cell] and [1/cell]
Crazing	<ul style="list-style-type: none"> surface of crazing by section [m²] surface percentage of crazing by section [%] 	crazing density map [m ² /cell] and [% by cell] binary map [0/cell] and [1/cell]
Loss of chippings	<ul style="list-style-type: none"> density of loss of chippings [aggregate/m²] 	loss of chippings density [aggregate/cell] and [aggregate/m ²]
Peeling	<ul style="list-style-type: none"> sum of peeling surfaces by section [m²] surface percentage of peeling by section [%] 	peeling density map [m ² /cell] and [m ² /m ²] binary map [0/cell] and [1/cell]
Pothole	<ul style="list-style-type: none"> sum of pothole surfaces by section [m²] number of potholes by section [pothole] 	pothole density map [m ² /cell] and [m ² /m ²] binary map [0/cell] and [1/cell]

Moreover, thanks to geolocation with an accuracy of 1 cm, successive auscultations can be superimposed and, in doing so, the evolution over time of the extent and severity of a distress can be accurately determined.

Distress survey

For the purposes of the mandate, the City of La Chaux-de-Fonds has made four sections of municipal road available. The sections were chosen according to their typical distresses, i.e. cracks and crazing, loss of chippings, peelings and potholes. After data collection, the treatment initially consisted only of quantifying the typical distress of the standard section. Then, once the calculation parameters were specified, the treatment was extended to the other three sections.

There was no manual validation of pothole and peeling surfaces. Their size and number being clearly visible on the orthophotos, no need to go on site to count them. On the other hand, a manual counting of cracks and loss of chippings was considered essential in order to assess the trueness of automatic detection. This work is summarized in Tab. 9.

Tab. 9 Relative differences between two successive measurements (precision) and between manual and ARRPA survey (trueness).

Test section	Type of distress	Differences between two successive measurements	Difference between manual and automatic survey
Charles-Naine	Crack	2.9 %	+25 %
	Sealed crack	0.6 %	+7 %
	Crazing	4.0 %	-50 %
Commerce	Loss of chippings	1...4 %	+(8...13) %

From two successive ARRPA measurements (same time, same operator, same equipment, same brightness), we estimated the precision of the collection and calculation process. The result shows that the error is only a few percent, which is considered satisfactory.

Based on a comparison between a manual survey and an ARRPA survey, the results leave a mixed impression. The sealed crack, easily detectable to the eye and image, is a type of distress that does not seem to pose any problem to ARRPA since there is a good correlation between the two techniques (7% difference). With cracks, the difference is much more pronounced (25%). Here, the human eye is more perceptive because it is able to see cracks with a small opening (< 2 mm) and, as a result, it detects more cracks than ARRPA does. As for crazing, the comparison showed that the operator and the automatic system did not apply the same definition, which led to a very clear overestimation of this distress by ARRPA. This result reflects a classical problem of discrepancy between the searched information and what has been mathematically defined in the algorithm.

The case of loss of chippings must be considered separately because the number of aggregates ejected cannot be accurately determined by either the human or the machine. The important thing here is to note that the two are quite close.

The detection limits of the ARRPA method

ARRPA's detection resolution is similar to that obtained with the best laser + line camera couples on the market. It can detect holes left by lost gravel of the order of 4 mm and cracks with an opening of the order of 2 mm. The German BAST has set a detection threshold of 1 mm for the crack width. At present, no automatic system is capable of reaching this target, which is why in Germany this data continues to be entered manually.

The link with the VSS 40 925b standard

The ERTEC engineering office proposes some ways to develop the VSS 40 925b standard, initially drafted for the visual survey, towards a new consideration of automatic survey. Apart from the definite advantage of obtaining objective quantitative data, automatic auscultation also offers the possibility of rigorously combining different types of distresses in order to form a very accurate picture of road conditions at any point. The determining trio could for example be cracking + loss of chippings + permanent deformation.

The amount of data from this mandate is not sufficient to establish a link either with the degrees of severity defined in SN 40 925b or with current maintenance management.

However, it seems important to stress that the definitions of distress should be reviewed and adapted to make them compatible with the detection capability of automatic survey systems. This revision necessarily includes a definition of the size of the objects to be detected (minimum crack length, minimum peeling surface, etc.).

Future developments in automatic survey of roads

We have found it difficult to find ways to validate our own results, particularly with regard to cracking. Presumably, other operators of automatic survey systems encounter similar problems. The authors believe that the time has come to draw inspiration from the examples of the Ministry of Transportation of Quebec and the German BAST for quality control of automatic survey. In Quebec and Germany, the authorities have built a national test bench to certify providers of automatic survey (public or private). The latter must be able to prove that their system is operational, and meets the accuracy criteria set by the owner of the road. Conversely, these same service providers can use the test bench for their annual calibration and the implementation of their calculation parameters, e.g. after a sensor change.

In contrast to high-speed on-board systems, ARRPA's strengths are to be able to offer a detailed analysis as well as monitoring over time and "under the magnifying glass" of distress processes such as the loss of gravel, for example. The two tools are complementary if each is operated at the scale at which it performs best. For this reason, it is important to continue to develop auscultation by precisely georeferenced photogrammetry. An important axis of development is a faster data collection to be able to survey at the same speed as the traffic on major roads.

1 Introduction

1.1 Exposé préliminaire

Afin de pouvoir planifier les investissements pour la maintenance ou la remise en état d'un patrimoine routier à moyen et long terme, il faut connaître avec le plus de précision possible l'avancement de son vieillissement, qu'il soit de desserte, secondaire ou principal, en enrobé bitumineux ou en béton. Pour définir cet avancement, plusieurs méthodes de relevés sont disponibles. Du simple relevé visuel, selon les normes suisses en vigueur, aux techniques d'auscultation routière à grand rendement, toutes les méthodes ont le même objectif : classer un réseau routier selon son état de dégradation exprimé par différents indices normalisés. Cette classification est un outil efficace pour les décideurs, qu'ils soient responsables d'exploitation ou politiques, afin d'établir un budget annuel et concevoir une gestion efficace et économique de l'entretien du patrimoine.

Les moyens actuellement à disposition ont tous des avantages et naturellement aussi certains inconvénients. Si nous prenons, par exemple, la méthode visuelle, sa vitesse de relevé est particulièrement lente et elle mobilise des cantonniers sur de longues périodes. Mais elle est « facile » et « intuitive » et ne demande ni investissement lourd ni formation longue. En revanche, le résultat du relevé est fortement dépendant de l'observateur, donc subjectif et la géolocalisation (position géographique) des dégradations est purement indicative. Ces aspects rendent la comparaison entre différents relevés d'état successifs difficile.

Comparé au relevé visuel, le relevé automatique par des systèmes embarqués est rapide. Des véhicules munis de plusieurs capteurs (caméra, laser, accéléromètre, etc.) permettent d'ausculter la route à une vitesse pouvant aller jusqu'à 100 km/h, donc sans interruption du trafic, puis de traiter ces données de façon plus ou moins automatique pour en extraire les indicateurs souhaités.

L'auscultation des surfaces circulées ne se limite pas aux routes. Pour le suivi des terminaux portuaires et aéroportuaires [3], les collectivités publiques ou privées font aussi appel au relevé automatique. Il est, dans ce cas, adapté à des objets non linéaires de grande surface. Il leur permet, classiquement, de gérer les mesures d'entretien, mais aussi, le cas échéant, de vérifier l'état de l'infrastructure en début et en fin de concession.

Les méthodes d'auscultation ne se limitent pas non plus aux moyens terrestres. On recourt à l'auscultation aéroportée, par avion ou hélicoptère (exemple: helimap.ch), pour déterminer l'altimétrie de l'axe d'une route ou cartographier un réseau de routes. Elle offre une orthophoto macroscopique du paysage avec une résolution (§ 2.2.5) de 2 à 10 cm/pixel. Les données enregistrées à ces distances ne permettent pas de calculer des indices d'état, tels que nous les connaissons [4].

Et pourquoi pas des drones ? C'est la question souvent posée. Les images acquises par des caméras embarquées par des drones sont traitées par la technique de la photogrammétrie (§ 2.3) avec la possibilité d'en extraire des informations sur les dégradations des revêtements. Cependant, de nombreux éléments, soit pratiques, soit technologiques, rendent l'utilisation de drones inadaptée à une application routière. Une note plus détaillée sur l'utilisation des drones, a été rédigée lors de la définition du présent projet. Elle est disponible en annexe III.

1.2 Solutions embarquées du marché

Les équipements de relevé d'état et les sociétés qui les exploitent forment une constellation technico-commerciale en pleine évolution. Les différentes sociétés interagissent techniquement en se fournissant l'une chez l'autre tout en étant concurrentes, ou bien elles s'ignorent car les domaines de la route et de la géomatique ne se mêlent pas ou à peine.

D'un côté, les professionnels du domaine routier ont jusque-là conçu à l'interne des équipements mobiles à partir d'un assemblage de capteurs, servant chacun à détecter un type de dégradation du revêtement, en fonction de normes édictées bien avant l'apparition des instruments de mesure actuels. Ces sociétés commercialisent leur évaluation de l'état d'un réseau routier sous la forme d'une notation standard, sans toutefois exploiter la mesure géométrique en tant que géodonnée (§ 2.5) à usages multiples.

De l'autre côté, les professionnels de la géomatique ont développé des équipements de mesure géométrique de la chaussée et de ses abords. Certaines sociétés commercialisent des mesures mobiles (« *Mobile mapping* »), souvent à l'aide d'interfaces web permettant aux spécialistes du domaine routier d'effectuer des mesures géométriques de l'espace public (signalisation horizontale et verticale, glissière, obstacle, etc.) et aux aménagistes et urbanistes des relevés de l'environnement d'une chaussée (mobilier urbain, éclairage public, etc) [7] [8]. L'évaluation de la dégradation des revêtements ne fait généralement pas partie de leur mandat.

Toutefois, certains systèmes, comme par exemple celui de iNovitas, offrent des masques de saisie à remplir manuellement en observant des images à l'écran afin de noter la gravité et l'étendue des dégradations et d'en tirer les indices I_1/I_0 .

Le schéma présenté à la Fig. 1 se veut un résumé de ce qui précède. Il illustre le fait que, entre la route et la géomatique, domine une différence d'intention malgré une réelle similitude de moyens. Néanmoins, au fur et à mesure des développements technologiques et des dialogues entre ces domaines de compétence, cette dichotomie tend à s'atténuer.

Pour en revenir au domaine routier, les sociétés présentes sur le marché de l'auscultation à haut rendement n'ont pas toutes le même degré de technicité et d'aboutissement. Parmi les difficultés majeures, citons :

- la consultation des données extraites des systèmes actuels est souvent limitée à des interfaces informatiques dépendant du fournisseur de données et ne sont que difficilement exportables vers un système d'information géographique (SIG, § 2.7.2), ce qui permettrait la superposition avec d'autres données (exemples: conduites souterraines, signalisation verticale et horizontale, éclairage public, passages piétons, etc.).
- la détection des fissures n'est pas automatique et se fera ultérieurement sur écran, avec les incertitudes que cela entraîne (exemple : iNovitas).
- pour les systèmes capables de détecter automatiquement les fissures la limite de détection est fonction de l'ouverture de la fissure (*crack opening*) et de sa longueur ; à l'heure actuelle cette détection est peu fiable pour des ouvertures inférieures à 2 mm et des longueurs inférieures à 20 cm ; en deçà de cette longueur, les fissures peuvent être confondues avec la macrotecture ou du bruit.

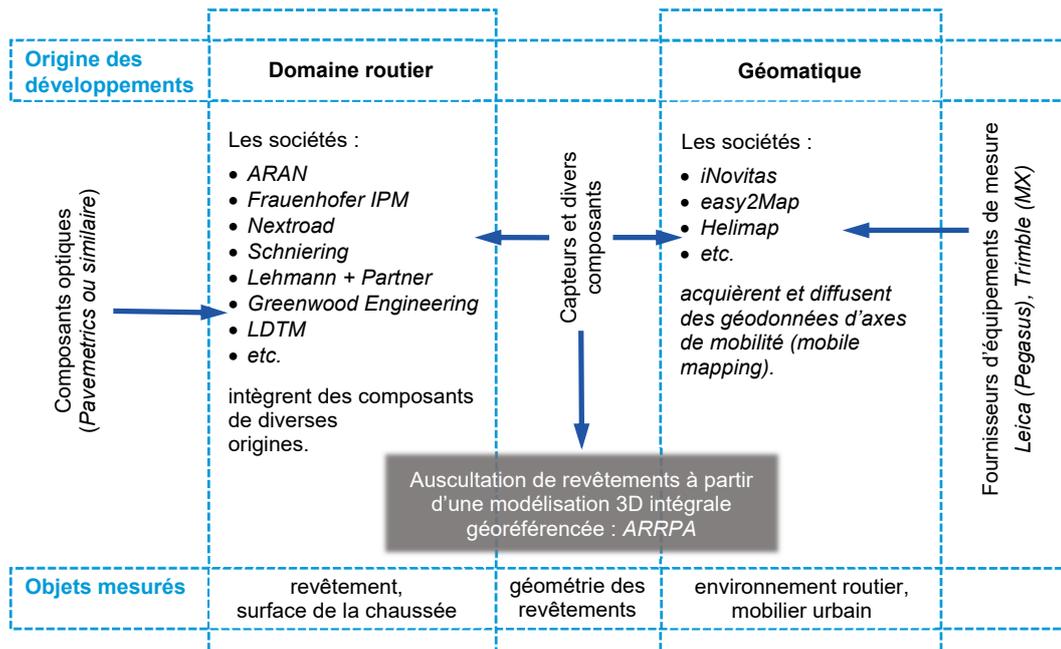


Figure 1 : Aperçu de la constellation des solutions actuelles (les sociétés citées dans ce schéma le sont à titre d'exemples non exhaustifs)

A notre connaissance, le système le plus performant en ce début d'année 2020 est celui proposé par Pavemetrics. Cette entreprise vient de lancer sa deuxième génération de capteurs : les LCMS-2 (LCMS pour Laser Crack Measurement System). Une comparaison des deux modèles de capteur est fournie dans Tab. 1. En raison du matériau de fixation (aluminium) des capteurs LCMS-1, ceux-ci ne pouvaient travailler à moins de 10 °C. Avec LCMS-2 ce problème est résolu car les fixations internes sont dorénavant en carbone.

Tab. 10 Vue d'ensemble des principales caractéristiques des systèmes d'auscultation automatique Pavemetrics, ARPPA et Fraunhofer PPS-Plus (état 2019).

Système proposé	Vitesse du véhicule [km/h]	Capteurs	Résolution planimétrique	Résolution verticale	Précision géolocalisation	Exportation
LCMS-1	100	Laser	5 mm	1 mm	1 m	CAO SIG BIM
LCMS-2	100	Laser	1 mm	0.25 mm	1 m	CAO SIG BIM
ARRPA	15	Caméra	1 mm	1 mm	0.01 m	CAO SIG BIM
PPS-Plus	80	Laser	1.2 x 1.7 mm			

1.3 Le potentiel du système ARPPA

La méthode d'auscultation automatisée ARPPA (Auscultation de Revêtements Routiers par Photogrammétrie Automatisée, § 2.6), issue du domaine de la géomatique, se distingue de la plupart des systèmes du marché par sa technique de géolocalisation et par l'emploi d'une seule sorte de capteur : des caméras. ARPPA repose sur le principe du relevé photogrammétrique de haute résolution (1 mm) couplé à un géoréférencement précis (± 1 cm) et se positionne comme un outil d'auscultation hybride « route + géomatique », utilisable même en milieu urbain où la disponibilité des constellations satellitaires de positionnement est restreinte. L'avantage du deux en un, c'est-à-dire de

mettre à disposition tant des géodonnées de base parfaitement géolocalisées que des statistiques de dégradations du revêtement, le tout dans des formats échangeables et intégrables dans tous les outils de représentation digitale, évite aux gestionnaires de la route de devoir procéder à deux campagnes d'auscultation.

En dépit des apports de cette méthode, cette approche par photogrammétrie ne permet pas encore l'acquisition à grande vitesse d'images avec une résolution millimétrique. Le processus dépend des capacités des caméras à acquérir des images en rafale, ce qui limite la vitesse de déplacement du véhicule actuellement à 15 km/h. Ce paramètre évoluera naturellement, en même temps que la performance grandissante des capacités informatiques. Mais pour l'heure, on ne peut pas parler d'auscultation à haut rendement car la méthode est limitée à des tronçons allant d'une centaine de mètres à un ou deux kilomètres.

Le présent projet a pour but (§ 1.5) d'évaluer les possibilités offertes et les champs d'application de cette méthode.

1.4 Les dégradations

Le catalogue des dégradations édité par la VSS [1] comporte 22 dégradations qui sont typiques pour des revêtements bitumineux, et 13 pour des revêtements en béton. Bien que la méthode ARRPA serait tout à fait capable d'identifier les dégradations d'une chaussée en béton, comme par exemples, l'écaillage, l'absence de jointoyage, le soulèvement des coins d'une dalle ou les cassures, ce sont les chaussées hydrocarbonées qui sont au centre de la présente étude.

Les 22 dégradations sont classées en 5 groupes principaux, à savoir : surface glissante, dégradations du revêtement, déformations du revêtement, dégradations structurelles et réparations. Les algorithmes de reconnaissance à disposition ont pour cibles les fissures, la perte de gravillons, les pelades et les nids de poule. Il s'agit donc essentiellement de dégradations du revêtement. Viennent s'y ajouter les fissures longitudinales et le faïençage d'origine structurelle. Les fissures sont d'origine structurelle lorsqu'elles sont provoquées par des faiblesses de l'infrastructure ou de la couche de fondation comme, par exemples, un gonflement dû au gel qui provoque une fissure longitudinale ou, en remblai, un affaissement de bord qui provoque le faïençage. Les fissures dites du revêtement sont le résultat de sollicitations en traction dont l'origine se situe principalement dans les couches hydrocarbonées, soit entre deux couches voisines, soit au sein d'une même couche. En cause, citons la discontinuité des modules d'élasticité et l'insuffisance du retour élastique à basse température ou en cas de fortes sollicitations cycliques (fatigue).

En général, les nids de poule et les pelades sont très vite réparés. Les équipes de cantonniers n'attendent pas le résultat d'une auscultation ou d'un relevé d'état pour le faire, le repérage étant facile et la technique peu exigeante (remplissage avec des produits bitumineux de réparation à froid). Ces deux types de dégradation deviennent alors des réparations. D'autre part, la résolution des équipements d'auscultation actuellement en service est suffisante pour sommairement détecter les nids de poule et les pelades (sans toutefois être en capacité de distinguer qualitativement des deux types de dégradation). Ces deux observations mènent à la conclusion qu'avec la méthode ARRPA, il faut cibler ce que les autres techniques ne font pas, ou pas suffisamment bien, c'est-à-dire quantifier les fissures, le faïençage et les pertes de gravillons.

1.5 Objectifs du mandat de recherche VSS 2016/321

Les objectifs initialement définis en 2018 dans la demande de crédit sont énumérés ci-dessous.

- Evaluer la méthode d'auscultation orthophoto + MNS (relief) pour une éventuelle application dans le domaine routier,
- Déterminer sa capacité à détecter correctement la perte de matière (pelade, nid de poule, perte de gravillons),

- Déterminer sa capacité à détecter correctement les fissures
- Proposer des grandeurs quantitatives absolues
- Estimer l'exactitude de ces grandeurs (validation de la méthode)
- Identifier les grandeurs les plus adaptées à la gestion de l'entretien

Suite à la première réunion avec la Commission de suivi, il a été demandé de mettre l'accent sur la perte de gravillons, qui dans le champ de l'auscultation automatique n'en est qu'à ses débuts. La CS a également suggéré de faire la distinction entre fissure et fissure colmatée, cette deuxième étant au même titre que la première un signe de détérioration de la chaussée, ainsi que faire la distinction entre fissure et faïençage afin produire un marqueur de dégradation structurale.

La CS a aussi proposé de présenter les résultats sous forme de grille, comme cela se fait en Allemagne.

Et pour finir, la CS a souhaité un aperçu de la situation en Suisse et dans les pays voisins en matière de détection des fissures et des pertes de gravillons.

Pour chaque type de dégradation considérée, nous établissons les points ci-dessous.

- Description des principes techniques de base de sa détection
- Spécifier les cas où les paramètres de calculs doivent être adaptés en fonction du tronçon ausculté
- Description des limites et facteurs extérieurs influençant la détection automatique (ombre, nettoyage, etc.)
- Évaluation de la précision et de la fiabilité des quantités détectées
- Indication du temps de calcul automatique et des interventions manuelles
- Présentation des résultats sous forme de valeurs quantitatives

2 Méthodes d'auscultation embarquées et automatisées et notions de géomatique

Ce chapitre présente les grandes lignes des technologies actuelles de relevé de surfaces routières, puis décrit plus spécifiquement le système ARRPA (Auscultation de Revêtements Routiers par Photogrammétrie Automatisée) exploité durant cette recherche. Il est aussi question de décrire ici des notions issues du domaine de la géomatique et de ses apports dans le cadre de l'auscultation routière.

2.1 Concepts technologiques

Par systèmes d'auscultations embarqués, on entend tout ensemble de capteurs fixés sur un engin capable de se déplacer au-dessus d'une chaussée afin que chacun d'eux, selon sa spécificité, capture et enregistre des données sur un aspect de son état de surface.

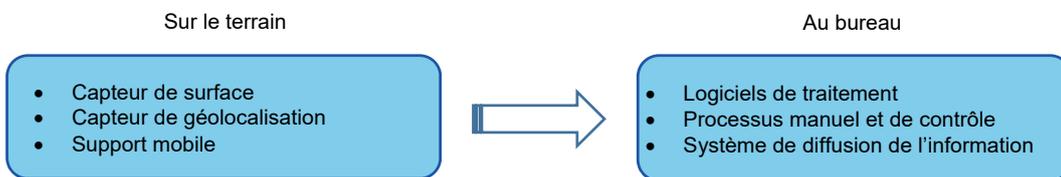


Figure 2: Distinction entre équipement de terrain et processus de post-traitement

Dès de début, il faut distinguer, dans le processus global d'auscultation, les équipements matériels, les technologies, les flux de données et outils informatiques exploités pour l'acquisition de données sur le terrain et leur post-traitement (exploitation et traitement des données a posteriori) dans un bureau pour en extraire par calcul les données sur l'état des chaussées.

2.2 Les équipements embarqués

2.2.1 Capteurs de surface routière

Pour déplacer un capteur à proximité d'un objet à observer, son support mobile sera choisi en fonction du type de capteur et du type d'objet à observer. Les supports envisagés peuvent aller du satellite au piéton, en passant par toute une gamme intermédiaire comme par exemples les avions, drones et bicyclettes. Dans le cas du domaine routier, le support le plus fréquent est l'automobile.

Couramment, les capteurs de surface font appel aux technologies qui traitent un signal ondulatoire émis, puis réfléchi par la surface observée, puis capturé à son retour dans le même capteur. Il peut s'agir de systèmes laser, lidar, radar, infrarouge ou autres. Mais il peut aussi être question d'instruments se contentant de capturer un signal émis naturellement (ou envoyé d'un émetteur naturel) par la surface observée, tels que des caméras et appareils photo.

Les capteurs embarqués dans les véhicules d'auscultation à grand rendement sont des instruments d'imagerie tels que laser et caméra linéaire. L'élément principal de type laser possède une précision de mesure de l'ordre de 0.2 mm et compte tenu de sa fréquence de mesure (64 MHz), permet des vitesses d'auscultation élevée de 80 km/h et plus.

Malgré la haute technicité des équipements d'auscultation automatique, les limitations de toutes sortes sont nombreuses. La caméra plein cadre par exemple, avec, dans le meilleur des cas, un mode rafale de 6 images par seconde, limite la vitesse d'auscultation à environ

15 km/h (4 m/s). Les caméras seules ne peuvent intervenir de nuit, et sont sensibles aux contrastes ombre/soleil ; tandis que les lasers ne fonctionnent pas sur chaussée mouillée. Et, dans les deux cas de figure, une chaussée sale (trafic agricole, chantier) constitue une entrave, de même que les marquages horizontaux décrépités.

2.2.2 Capteurs de géolocalisation

Quel que soit le capteur de surface, celui-ci n'enregistre qu'une position (et même bien souvent qu'une distance et/ou une direction) relative entre un élément fini de la surface auscultée (un pixel ou un point) et sa surface sensible (antenne, cellule CCD/CMOS, etc.). Or le but est d'obtenir une cartographie de l'élément observé, ne serait-ce que relative, entre chaque élément fini capturé. En d'autres termes, il est nécessaire de connaître la position de chaque impulsion capturée les unes par rapport aux autres. L'idéal, le plus facile et le plus évident dans le cas du domaine routier, est que chaque signal capturé soit positionné géographiquement (dans un référentiel de coordonnées nationales ou internationales, § 2.5.2).

La question du positionnement géographique se résout en adjoignant au système mobile un capteur de géolocalisation de type antenne GNSS (GPS, GLONASS, Galileo et autres satellites de positionnement) fonctionnant en mode de mesure relatif (mode d'exploitation professionnel utilisant les signaux captés par une ou plusieurs autres antennes fixes offrant un résultat d'une précision de quelques centimètres). La détermination de la position du véhicule d'acquisition sera améliorée à l'aide d'un odomètre.

Du reste, il faut encore connaître l'orientation du capteur. Pour ce faire, il faut ajouter au système mobile une plateforme inertielle (ensemble d'accéléromètres et de gyroscopes, en anglais : *IMU-inertial measurement unit* ou *INS-inertial navigation system*). La mesure de l'orientation des capteurs peut aussi être complétée par une deuxième antenne GNSS.

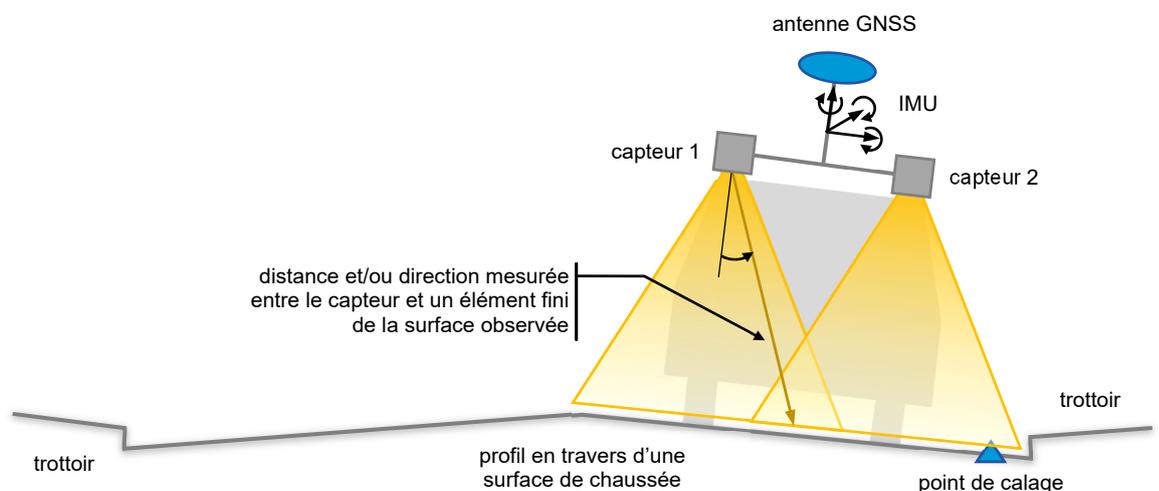


Figure 3 : Géoréférencement d'une mesure de surface routière

Le défaut du capteur GNSS seul survient en milieu urbain ou boisé où les signaux des satellites sont obstrués par les bâtiments ou les frondaisons. Dans les tunnels, le positionnement est même rendu impossible. En associant les mesures de l'INS au GNSS, la précision de la position peut aller jusqu'à ± 1 cm. Mais in fine elle dépendra de la durée d'absence de signal GNSS et de la qualité (et donc du prix) de l'INS. Après 60 secondes de perte de signal, la précision de positionnement ne serait plus que de 1 à 10 m pour une unité INS/GNSS d'une valeur inférieure à 1'000 EUR ; de 10 à 15 cm pour une unité à 100'000 EUR et plus [5]. Par exemple, le système Atlans (ixblue.com/products/atlans) garantit une dérive de position maximale de 15 cm après 1 minute de perte de signal.

On appelle « positionnement relatif » la position d'une mesure par rapport à une autre, réalisée soit au même instant t par deux capteurs de surface différents, soit à un instant $t+1$ entre deux capteurs ou avec le même capteur.

On parle de « positionnement absolu » lorsqu'il s'agit de donner des coordonnées géographiques à un objet, de manière à le superposer à d'autres objets déterminés dans le même système de coordonnées (exemple : cadastre des conduites et état de surface de la chaussée).

2.2.3 Précision

La précision du positionnement relatif dépend de la bonne connaissance de la position des appareils les uns par rapport aux autres ou du système de suivi temporel des mouvements du véhicule. Ces éléments doivent donc être calibrés.

Le concept de positionnement géographique absolu d'un objet mesuré uniquement à partir d'un capteur dont l'orientation est déterminée par une plateforme inertielle et positionné par une antenne GNSS se nomme le « géoréférencement direct ». La précision du positionnement géographique absolu de chaque point de la surface de la chaussée dépend notamment de :

- la précision du positionnement GNSS (dépendant notamment de la quantité de satellites GNSS visibles par l'antenne)
- la précision de la plateforme inertielle
- la précision de la mesure de la chaussée par le capteur de surface (distance, orientation)
- la calibration de la position relative entre les capteurs.

2.2.4 Points de calage

La position absolue des mesures peut être améliorée par la mesure d'objets appelés « points de calage » (en anglais : *ground control points - GCP*) dont les coordonnées sont déterminées par un équipement de topométrie assez précis. La précision géométrique de la détermination des points de calage (ainsi que la quantité et la répartition géographique de ces points) aura une influence directe sur la précision du résultat du relevé de l'état de surface de la chaussée. Cette précision dépend des instruments utilisés.

Tab. 11 Précision de la mesure des points de calage

Instrument	Précision (écart-type, erreur-moyenne)
Antenne GNSS (ensemble des satellites de positionnement, GPS, GLONASS, etc.) en mode RTK (<i>Real Time Kinematic</i> , cinématique en temps réel).	$1\sigma \approx \pm 0.05$ m (probablement insuffisant pour la mesure correcte du dévers d'une chaussée)
Station totale (théodolite, tachéomètre)	$1\sigma \leq \pm 0.01$ m

Ces points de calage peuvent être des objets existants (couvercles de chambre, grilles de dépoirs, etc.) ou fixés volontairement pour le relevé en question (clou d'arpentage).



Figure 4 : Exemple de détermination d'un point de calage (ici : joint de bordure de trottoir) à l'aide d'une station totale (théodolite), Yvonand (VD) 2016

Avec ces points de calage, répartis régulièrement le long du secteur d'auscultation, la géolocalisation tend vers une précision centimétrique tant longitudinale que transversale et en altitude. De plus, cette technique rend les mesures indépendantes des signaux des satellites. Mais il faut garder à l'esprit le travail préparatoire conséquent que représente les mesures tachéométriques des points de calage.

Une mauvaise qualité du géoréférencement s'observe directement sur le résultat des mesures de deux voies de circulation d'une même chaussée dont les surfaces numérisées ne coïncideront pas exactement.

2.2.5 Résolution

La qualité du relevé est non seulement déterminée par celle de la géolocalisation des mesures (précision) mais aussi par la finesse des éléments observés. On parle alors de « résolution ».

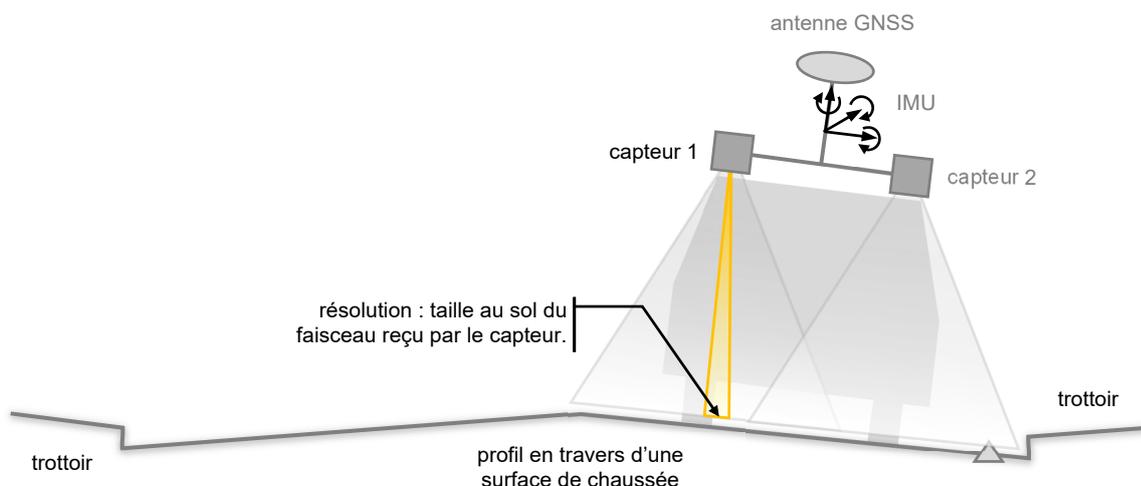
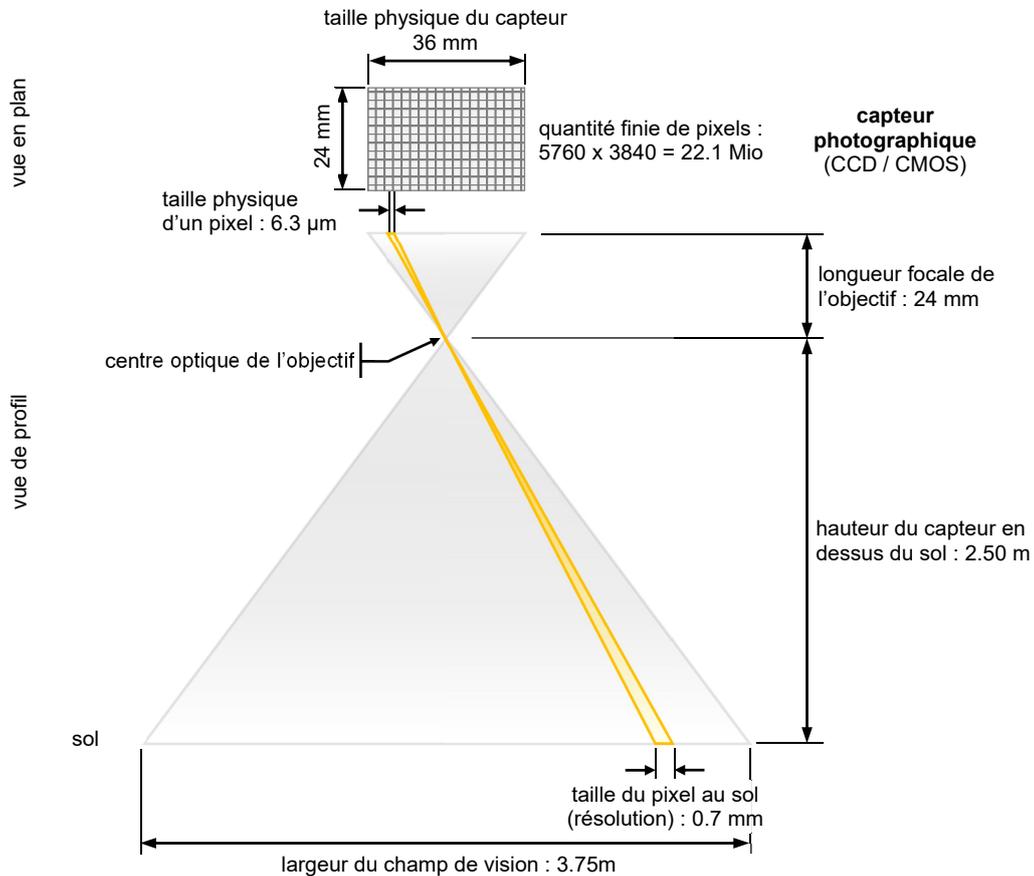


Figure 5 : Résolution au sol d'un capteur

La résolution est définie par la dimension de chaque élément fini capturé. Physiquement, elle est déterminée par la taille (diamètre) du faisceau laser émis, ou celle du pixel d'une

caméra. Dans le cas d'un capteur d'images (photo ou vidéo), on parle alors de résolution au sol (en anglais : *ground sampling distance – GSD*). Comme il s'agit d'une limite optique, il est impossible d'améliorer la résolution des informations capturées sur la chaussée par un traitement a posteriori. Un tel traitement n'est possible que sur ce qui a physiquement été capturé sur le terrain.



Les valeurs numériques sont un exemple basé sur l'appareil photographique Canon 5D Mark III. Le choix de l'objectif ainsi que la hauteur sur sol sont un exemple fictif.

Figure 6 : Résolution au sol (GSD) pour un capteur photographique (ou vidéo)

2.3 La photogrammétrie

Comme son nom l'indique, la photogrammétrie est une méthode de mesure à partir de photographies. Elle se base sur le principe de la stéréoscopie pour modéliser en trois dimensions un objet à partir d'un minimum de deux images de celui-ci.

Après avoir défini la position relative entre les centres optiques du ou des appareils photo ayant capturé les images, la forme de l'objet mesuré est définie par l'intersection spatiale depuis les différents points de vue d'où ont été pris les clichés.

Pour déterminer la position géographique et l'orientation dans lesquelles se trouvaient les appareils photo lorsque les images ont été capturées, on s'aidera d'une antenne GNSS et d'une plateforme inertielle embarquées dans le véhicule ainsi que des points de calage au sol.

Cette technique est apparue très rapidement après l'invention de la photographie au XIX^{ème} siècle. Historiquement, elle est employée pour des relevés architecturaux et topographiques. Dès que cela a été possible, des appareils photo ont été embarqués dans

des avions (auparavant même dans des montgolfières) afin d'établir des relevés complets de territoires pour leur cartographie. Encore de nos jours, la photogrammétrie aérienne est utilisée pour établir les cartes nationales suisses.

En appliquant ce principe de vue stéréoscopique à des photographies aériennes, on définira la position planimétrique et altimétrique de chaque objet du territoire observé et on produira un « modèle numérique de surface » (MNS).



Figure 7 : *Modèle numérique de surface (MNS) de la ville de Berne, source : swissALTI3D swisstopo*

Le relief d'une surface étant modélisé, on corrigera et redressera les images capturées afin qu'elles coïncident avec un plan horizontal situé dans un système de coordonnées. Ce produit s'appelle une « orthophoto ».

Ce principe MNS + orthophoto peut s'appliquer à d'autres besoins, tels que les routes, avec d'autres supports mobiles auxquels fixer des appareils photo, tels que des satellites (exemple de résultat : Google Earth), des drones ou des automobiles. En offrant à la fois une donnée sur son relief (MNS) et une donnée sur sa couleur (orthophoto), toutes deux parfaitement géolocalisées, la photogrammétrie fournit des données très complètes et à usages multiples.

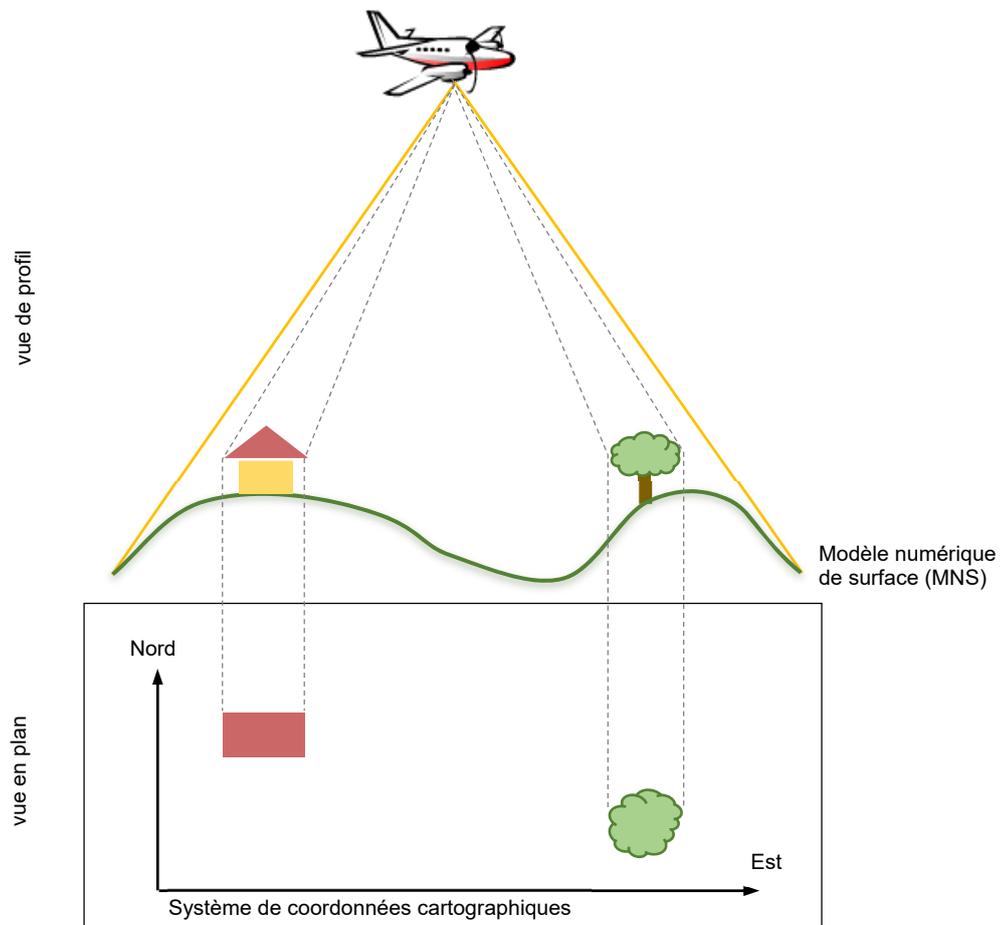


Figure 8 : Principe de base de la production d'une orthophoto



Figure 9 : Orthophoto de la ville de Berne, source : SWISSIMAGE swisstopo

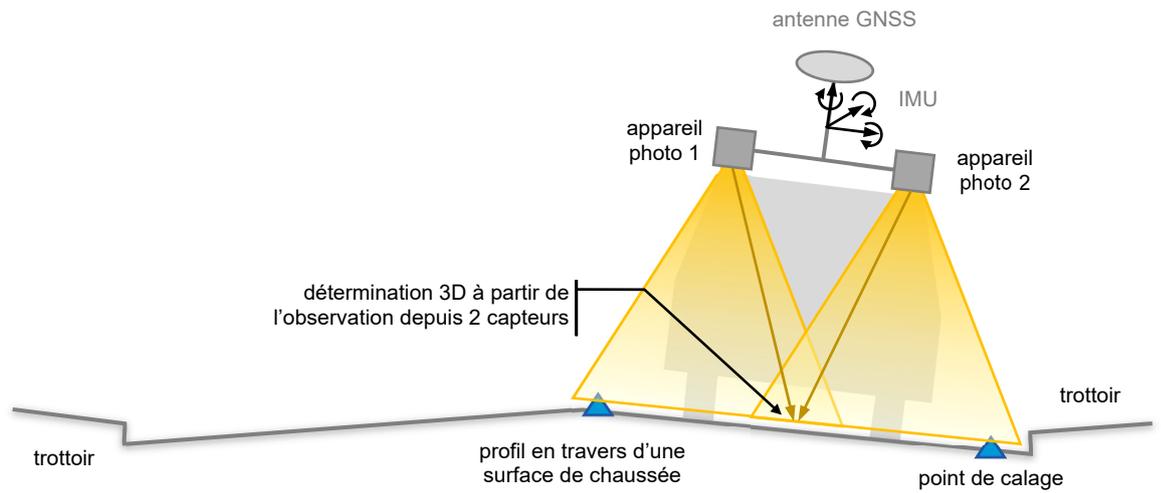


Figure 10 : Application de la photogrammétrie au relevé de surfaces de chaussées

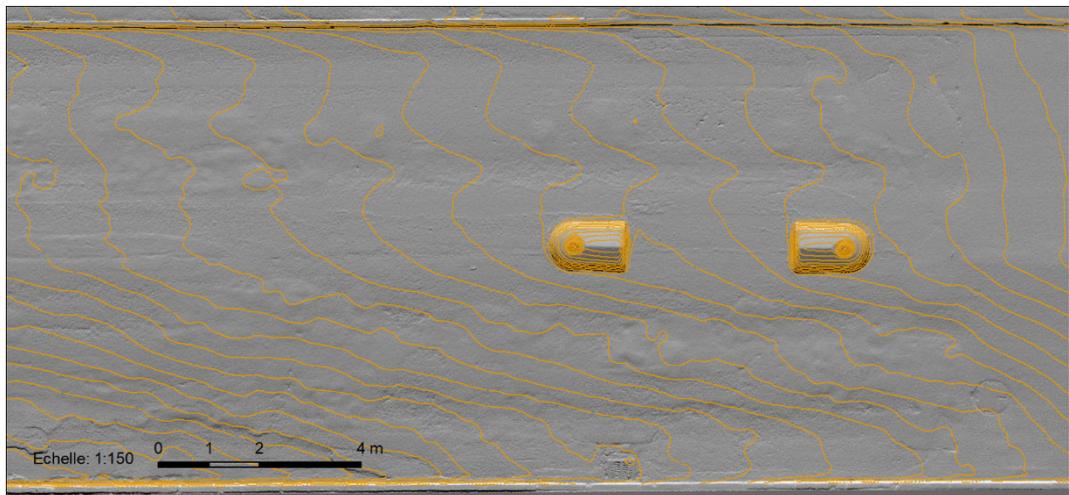


Figure 11 : Exemple de MNS de chaussée avec courbes de niveau (équidistance 2 cm)



Figure 12 : Exemple d'orthophoto de chaussée

2.4 Post-traitement des données acquises sur le terrain

Le traitement des données acquises sur le terrain, quel que soit la technologie utilisée, se décompose en deux phases principales :

- Assemblage des données provenant des différents capteurs de surface et de géolocalisation afin de déterminer la position géographique de chaque élément fini du revêtement capturé.
- Détection des dégradations et quantification (statistiques), établissement de rendu (cartes d'indice d'état).

Le géoréférencement des données suit les principes mathématiques développés depuis plusieurs décennies dans le domaine de la photogrammétrie et de la télédétection [12].

Les processus de détection des dégradations font appel aux sciences de traitement du signal appliquées aux signaux capturés sur les revêtements. Ces développements nécessitent des investissements particulièrement importants (équipes pluridisciplinaires travaillant durant plusieurs années) et c'est la raison pour laquelle les algorithmes détaillés ne sont bien souvent pas rendus publics. Le plus souvent, il s'agit de filtrages par noyau de convolution, de transformées de Fourier, de détecteurs de limite (*Canny edge detector*), ou tout autre algorithme disponible dans la littérature scientifique [13].

La difficulté du moment réside dans la fiabilité des traitements d'images entièrement automatiques, surtout en ce qui concerne la détection des fissures. Il n'est pas rare de devoir contrôler et affiner manuellement le résultat sur écran. Certains systèmes sont capables de mesurer l'ouverture des fissures (§ 1.2) mais leur fiabilité pour des ouvertures inférieures ou égales à 2 mm est très faible. Nous espérons que dans les années à venir, cette détection automatique s'améliorera graduellement, très probablement grâce à l'intelligence artificielle.

2.5 Les géodonnées

2.5.1 Définition

Une géodonnée est une donnée numérique (informatique) décrivant la géométrie d'un objet, dans le plan ou dans l'espace, et possédant une information sur sa position géographique. Ainsi, non seulement l'objet modélisé est décrit selon des dimensions clairement définies, mais en plus, grâce à la connaissance de sa position géographique, il peut être mis en relation avec d'autres objets, proches ou éloignés, dont la position est également connue. Une géodonnée est définie dans un format de fichier numérique créé pour être échangé entre différents intervenants territoriaux et faciliter le dialogue entre eux (§ 2.7.1). Une géodonnée est normalement accompagnée d'une description de sa provenance, de sa qualité, de ses auteurs, de sa date d'acquisition, etc. appelée « métadonnée ». Les géodonnées sont faites pour être intégrées et exploitées dans un Système d'Information Géographique (SIG, § 2.7.2) ou un *Building Information Model* (BIM). Un plan transmis au format pdf, ou un listing Excel, ne peuvent pas, à proprement parler, être considérés comme des géodonnées.

2.5.2 Géoréférencement

On appelle « géoréférencement » l'information de la position géographique d'un objet, définie dans un système de coordonnées national ou international.

Le principe de base du géoréférencement est de déterminer la position géographique d'un objet en référence à un autre objet jugé être une référence. En Suisse, la référence principale de géoréférencement est définie par les données de la mensuration officielle, elle-même basée sur la mensuration nationale, à son tour définie à partir de divers réseaux scientifiques internationaux de références rassemblant les résultats de technologies

géodésiques, géophysiques et astronomiques dont les systèmes de positionnement par satellite GNSS (ex.: EUREF).

Ainsi, depuis l'introduction du nouveau cadre de référence suisse MN95 CH1903+, les objets référencés dans ce système coïncident avec les systèmes de positionnement GNSS.

Cependant, il existe de nombreux processus et instruments permettant de géoréférencer des objets, notamment avec les systèmes GNSS, offrant des précisions absolues pouvant varier de plusieurs mètres à moins d'un centimètre. L'obtention d'une information de géoréférencement d'un objet n'implique pas que sa position est déterminée avec une précision élevée, même (et surtout) s'il a été positionné par GNSS.

2.5.3 Géodonnées vectorielles

Les géodonnées vectorielles sont constituées de points, de lignes ou polygones (qui relie des points), ou de polygones (ensemble de lignes fermées). Elles sont souvent accompagnées de données attributaires donnant des renseignements sur chaque objet géométrique.

Exemples dans le domaine routier :

- courbe de niveau : polygones avec attribut contenant l'altitude
- axe de route : polygones avec attributs selon la base de données MISTRA
- section de route auscultée : surface avec attributs statistiques sur la fissuration

Exemples de formats de fichiers :

- dwg et dxf, du logiciel Autocad de la société Autodesk, mais sans attributs
- shp (shape), de la suite de logiciels ArcGIS de la société ESRI
- tab, du logiciel MapInfo
- kml, de la société Google

2.5.4 Géodonnées raster

Les géodonnées raster sont des grilles de cellules, appelées pixels, orientées selon les axes de coordonnées est-ouest et nord-sud. La taille (normalement carrée) de chaque pixel est constante dans toute la donnée et est déterminée selon ses dimensions géographiques. Il s'agit de la « résolution » de cette donnée (§ 2.2.5). Elle peut être d'ordre millimétrique (exemple : relevés de revêtements routiers), d'ordre décimétrique (exemple : image aérienne de l'Office fédéral de topographie swisstopo), ou de plusieurs mètres pour une image satellitaire. Plus la taille d'un pixel est petite, plus on y lira des détails fins. La position géographique de la grille est définie dans un système de coordonnées. Une grille peut être superposée à d'autres géodonnées.

Chaque pixel contient une valeur (souvent numérique). Il peut s'agir, par exemple, d'une altitude. Dans ce cas, la géodonnée est un modèle numérique de surface (MNS). Mais il peut aussi s'agir d'une quantité, de fissures par exemple, ou autres statistiques sur l'état de surface d'un revêtement.

La géodonnées raster peut être composée de différents canaux (ou couches) qui se superposent. Chaque canal contenant une valeur par pixel, on interprétera la superposition de ces valeurs. Par exemple, une image en couleur est composée de trois canaux, chacun contenant une valeur de chaque couleur primaire, rouge, vert et bleu. Et lorsqu'elle est projetée dans un système de coordonnées elle est appelée « orthophoto ».

Parmi les formats de géodonnées raster les plus courants, on peut citer:

- GeoTIFF
- JPEG 2000

- Esri Grid
- ECW

2.6 La méthode ARRPA

2.6.1 ARRPA en bref

La méthode ARRPA englobe toutes les composantes d'un processus d'acquisition de données de surfaces routières, de leur modélisation tridimensionnelle, de l'extraction des dégradations, de leurs statistiques et de leur évolution temporelle, le tout dans des formats de données géolocalisées et parfaitement échangeables entre tous les logiciels de CAO, de SIG et de BIM. C'est cette technique qui est exploitée et évaluée dans ce projet de recherche.

L'acquisition des données des surfaces routières avec ARRPA est basée uniquement sur le principe de la photogrammétrie (§ 2.3), donc avec des appareils photo comme capteurs, sans aucun complément avec des systèmes laser ou autre. Étant initialement destinée aux milieux urbains, où la disponibilité des constellations de satellites de positionnement (GNSS) sont entravées par les constructions bordant les axes routiers, ARRPA fonctionne sans antenne GNSS précise, ni plateforme inertielle, mais uniquement avec des points de calage au sol offrant une parfaite coïncidence géométrique du résultat avec d'autres infrastructures (mensuration officielle, accès latéraux, cadastre des conduites, etc.), tout en assurant avec exactitude les valeurs des pentes longitudinales et des dévers.

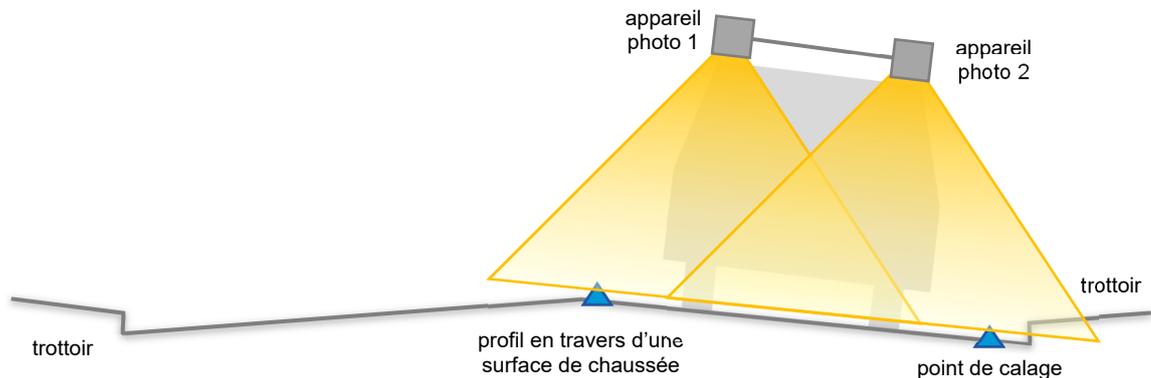


Figure 13 : Configuration du système ARRPA

L'une des spécificités d'ARRPA est de commencer par modéliser intégralement la surface routière à l'aide d'un modèle numérique de surface (MNS) et d'une orthophoto, le tout à une précision (§ 2.2.3) géographique centimétrique et une résolution (§ 2.2.5) millimétrique. Le MNS et l'orthophoto étant générés à partir des données provenant du même groupe de capteurs (appareils photo), ces géodonnées de base sont parfaitement concordantes géographiquement ce qui permet de les combiner pour en extraire les dégradations.

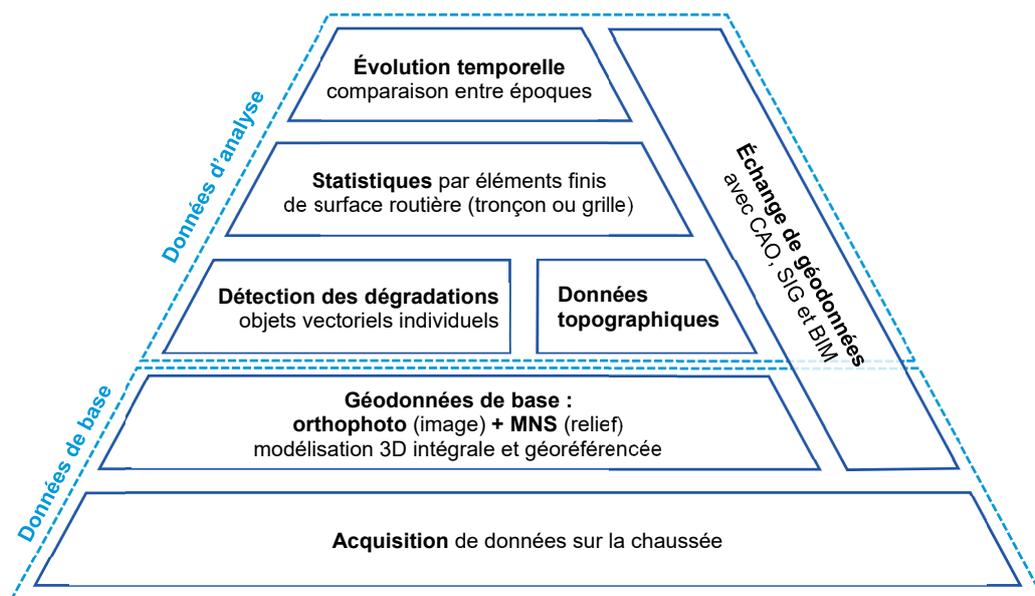


Figure 14 : Pyramide des résultats d'ARRPA

Ultérieurement, ces géodonnées de base peuvent être exploitées pour d'autres besoins, tels que des relevés topographiques, de preuves à futur, de constats de dégâts, etc. Elles constituent une réelle mémoire de l'état du revêtement à un temps donné. Leur exploitation peut être partielle dans un premier temps, puis approfondie si nécessaire dans un futur proche ou lointain.

Tab. 12 Résolution et précision de la méthode ARRPA

	Modèle numérique de surface (MNS)	Orthophoto
Résolution (niveau de détail) valeurs les plus fines, pouvant être dégradées pour minimiser les temps de calculs et alléger le volume de données livrées	planimétrique* : 2 à 3 mm altimétrique : < 1 mm	1 mm
Précision du géoréférencement (écart-type, erreur-moyenne)	$1\sigma \leq \pm 0.01$ m	$1\sigma \leq \pm 0.01$ m

* moyennant un temps de calcul nettement plus long, cette résolution peut atteindre 1 mm

2.6.2 Quelques points de détail sur le traitement des données avec ARRPA

La phase de production des données de base (MNS et orthophoto) est réalisée à l'aide de l'un des logiciels de photogrammétrie les plus connus du marché actuel (*Agisoft Metashape*). Celui-ci présente les avantages d'offrir des paramètres détaillés sur la reconnaissance d'objets communs entre les images, d'être automatisable à l'aide du langage de programmation *Python* et d'être suffisamment flexible pour une combinaison d'images provenant de diverses caméras.

La phase de détection des dégradations s'opère principalement sur le modèle numérique de surface (MNS). Dans le cas de la détection des fissures, l'orthophoto est aussi exploitée afin de détecter des fissures étroites ne présentant pas une aspérité suffisamment prononcée dans le relief de la chaussée ou plus particulièrement des fissures colmatées ayant une surface parfaitement lisse.

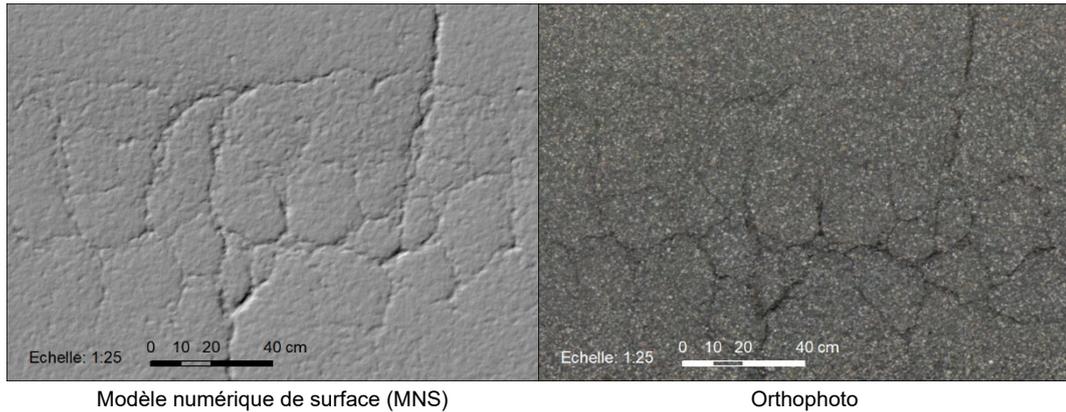


Figure 15 : Modèle numérique de surface et orthophoto de fissures de faïençage, Charles-Naine, mai 2018

Afin de rassembler les capacités de traitement raster, puis de statistiques et de cartographie, le tout automatisable à l'aide d'un langage facile d'accès (*Python*), la détection des dégradations est opérée à l'aide du logiciel de système d'information géographique (SIG) commercialisé par la société ESRI : *ArcGIS*. Tous les algorithmes, basés sur les principes de la télédétection, ont été développés par l'auteur de la méthode ARRPA. Les concepts de ces algorithmes ne sont cependant pas dépendants d'un logiciel et pourraient être développés sur d'autres plateformes, notamment des systèmes *Open Source*, tel que *QGIS* et son extension de traitement raster *GRASS*.



Figure 16 : Étapes principales du processus de détection des dégradations

Les données raster subissent initialement une phase préparatoire comprenant une adaptation à la résolution (taille du pixel) des dégradations recherchées (ré-échantillonnage), un lissage (filtre gaussien), ou la suppression du bruit (atténuation de la signalisation horizontale et de gravillons blancs provoquant une fausse détection de fissures dans l'orthophoto).

Ensuite, la phase de détection des dégradations en tant que telle est fondée dans sa grande majorité sur l'usage de filtres de convolution. Par exemple, les arrêtes franches des nids de poule et des pelades sont détectées à l'aide du filtre de Sobel :

$$\begin{array}{ccc}
 -1 & 0 & 1 \\
 -2 & 0 & 2 \\
 -1 & 0 & 1
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 1 & 2 & 1 \\
 0 & 0 & 0 \\
 -1 & -2 & -1
 \end{array}$$

Figure 17 : Noyaux de convolution du filtre de Sobel

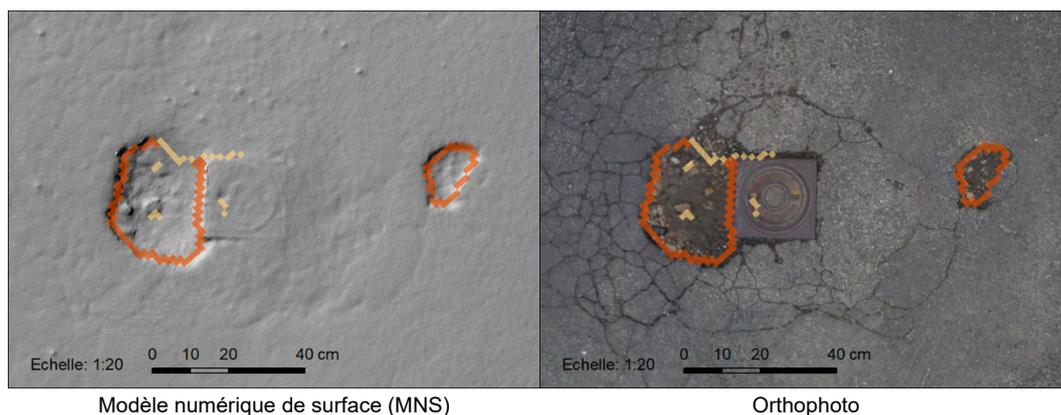


Figure 18 : Détection d'arrêtes franches provoquées par des nids de poule, Stavay-Mollondin, mai 2018

Une fois un dégât détecté, il doit être classé dans la bonne catégorie.

Les pelades sont ainsi distinguées des nids de poule en fonction de la rugosité de la texture de leur surface. Une texture relativement régulière, correspondant à la couche de fond, est classée comme pelade. Une texture irrégulière, correspondant à de la grave, est classée comme nids de poule.

Quant aux fissures de faïençage, elles sont distinguées des autres fissures en fonction de leur densité. Cette même forte densité de fissures permet de définir une surface de faïençage (et non plus seulement des objets linéaires correspondant à des fissures).

Afin de pouvoir utiliser les outils d'intersections de couches typiques dans le domaine des SIG pour établir les statistiques, les dégâts, détectés sous formes de pixels individuels dans un format raster (§ 2.5.4), doivent être vectorisés, c'est-à-dire transcrits sous forme de données vectorielles (§ 2.5.3). Une donnée vectorielle est soit un point (sans dimension, ex. : un gravillon perdu), soit une polyligne (ex. : une fissure), soit une surface (ex. : une pelade). Cette étape emploie simplement les fonctions disponibles dans l'outil de SIG utilisé. Elle permet cependant l'emploi de filtre de valeur géométrique minimale (ex. : une fissure d'une longueur inférieure à un seuil défini par l'opérateur n'est pas prise en compte.).

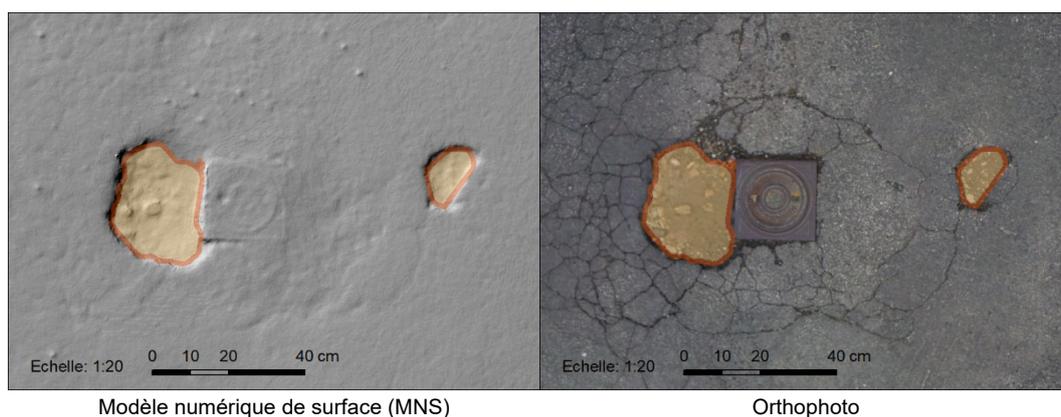


Figure 19 : Vectorisation de nids de poule sous forme de surfaces, Stavay-Mollondin, mai 2018

Afin de s'assurer de la fiabilité du résultat, un bref contrôle manuel permet de valider les seuils de détection, de leur apporter une légère correction, ou d'éditer brièvement les objets vectoriels non conformes à la réalité.

Chaque site analysé peut être découpé en différentes surfaces (sections). Pour chacune de ces surfaces, des quantités et proportions de dégâts sont établies par recouplement (superposition) en utilisant les fonctions de base des outils de SIG.

Cependant, le choix de la forme du découpage dépend des intentions de l'opérateur ou du client et implique un travail manuel. Dès lors, il paraît intéressant de proposer des statistiques sous la forme d'une grille régulière (raster), entièrement automatisable, permettant de mettre en évidence une répartition des dégâts indépendamment d'un choix de découpage arbitraire. Pour toutes les analyses du présent projet, la taille de la grille a été définie à 0.5 mètre, cette dimension s'accordant bien à la taille relativement réduite de nos tronçons d'essai.

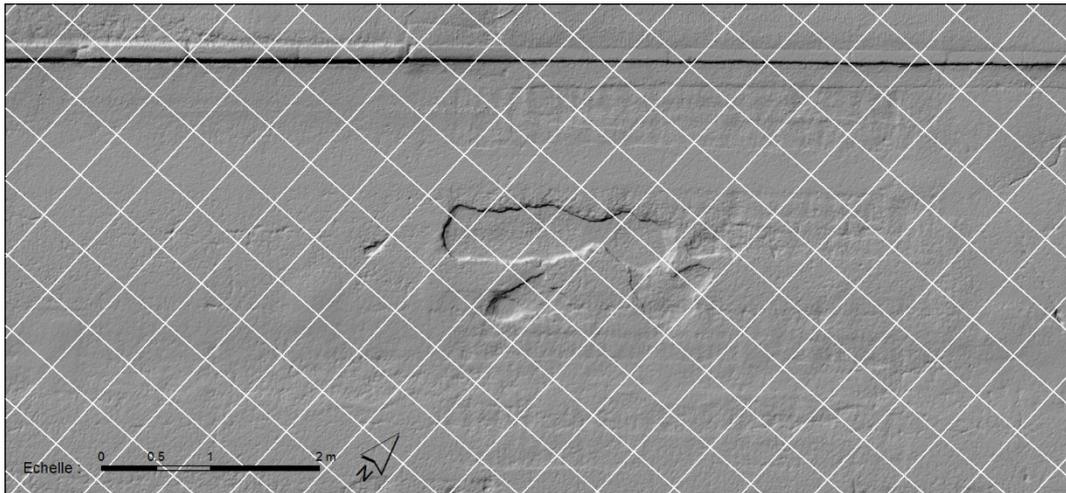


Figure 20 : Helvétie (état 1, 29.03.2019) : statistiques par grille (50 cm)

Cette phase de statistiques, utilisant des fonctions disponibles sur les outils du marché des logiciels de SIG, est facilement adaptable aux besoins des professionnels de la route. Les valeurs actuellement disponibles et présentées dans les résultats de ce projet sont le fruit d'échanges entre des professionnels de l'entretien routier et de l'auteur du système ARRPA. Elles peuvent être étendues selon des besoins particuliers.

2.7 Les apports de la géomatique

Une approche de l'auscultation de la surface routière basée sur la photogrammétrie, et de manière plus générale intégrant les compétences apportées par le domaine de la géomatique, telle qu'ARRPA (§ 2.6), offre les plus-values suivantes:

- résultats délivrables dans des formats de géodonnées interopérables (interchangeables) (§ 2.7.1)
- usage des systèmes d'information géographique (SIG) (§ 2.7.2)
- géolocalisation précise (§ 2.7.3)
- modélisation tridimensionnelle et imagée intégrale de la chaussée à usages multiples (§ 2.7.4)

2.7.1 L'interopérabilité

Historiquement parlant, les professionnels de la géomatique ont pour principe de ne jamais travailler pour leurs propres besoins mais toujours pour répondre à ceux d'autres spécialistes. C'est pourquoi ils ont pour habitude de concevoir des produits dans des formats de données numériques aisément échangeables. Une donnée géographique

créée par un professionnel de la géomatique est de facto faite pour être échangée, si possible indépendamment du système informatique utilisé par son destinataire. La consultation et l'exploitation des géodonnées ne sont pas conditionnées par un système développé et fourni par le mandataire, mais parfaitement libre d'accès pour le mandant et ses partenaires. On parle ici du principe de l'«interopérabilité».

Dans le cas de la méthode utilisée dans ce projet (ARRPA), les données raster (§ 2.5.4) sont transmises au format GeoTIFF et les géodonnées vectorielles (§ 2.5.3) au format shape (ou dwg, mais donc sans attribut). Elles peuvent être consultées et exploitées à l'aide de n'importe quel logiciel (commercial ou libre) ou depuis un géoportail (environnement de consultation cartographique en ligne) et transférées entre divers professionnels de l'entretien routier sans aucune restriction.

2.7.2 Les outils SIG

Les systèmes d'information géographique (SIG, *geographic information system - GIS*) sont des ensembles d'outils informatiques permettant de définir, collecter, gérer, échanger, diffuser et mettre à jour des géodonnées vectorielles ou raster (§ 2.5.3 et § 2.5.4), 2D ou 3D.

Ces outils permettent par exemple de:

- différencier la représentation graphique d'objets (ou afficher des étiquettes textuelles) en fonction de leurs valeurs attributaires (exemple: indice I1 d'un axe routier) ou géométrique.
- générer des requêtes (sélections) sur les valeurs attributaires des objets ou sur leur géométrie (exemple: longueur de fissure).
- superposer des géodonnées de diverses provenances ou diverses époques temporelles.
- gérer l'interaction entre différentes géodonnées superposées (exemple: calculer la longueur de fissures par section de route).
- appliquer des traitements d'image et de télédétection à des données raster.
- automatiser des processus à l'aide de langages de programmation ouverts (exemple : *Python*).
- diffuser des données (mise en page pour impression, géoportails).

Parmi les logiciels les plus connus du marché actuel dans ce domaine, on peut citer ArcGIS de la société ESRI, MapInfo, QGIS (open source), et FME de la société Safe.

Du fait que des données soient conçues dans un environnement de SIG, elles pourront aussi être exploitées dans un environnement de conception assistée par ordinateur (CAO, exemples de logiciels : AutoCAD, cadwork) mais dégradées par la perte des informations attributaires, ou de *Building Information Modeling* (BIM).

2.7.3 La géolocalisation précise

Un relevé photogrammétrique, correctement géoréférencé (§ 2.5.2) à l'aide de points de calage (§ 2.2.4), fournit un tapis de données parfaitement callé dans un système de coordonnées tant en planimétrie (position géographique) qu'en altimétrie. Les données issues de différents passages du véhicule d'acquisition, sur des voies de circulation voisines (parallèles ou en sens inverse) se rejoignent parfaitement, sans superposition ni lacune. Les pentes et dévers sont clairement définis et exploitables.

Se présente ainsi la possibilité de superposer ces données de surface de chaussée avec d'autres géodonnées dont la qualité du géoréférencement est bien documentée et d'analyser l'interaction entre des couches de données de provenances différentes. Il peut s'agir par exemple de la mensuration officielle (cadastre foncier), de la signalisation verticale ou horizontale, des conduites souterraines, de l'éclairage public, etc.

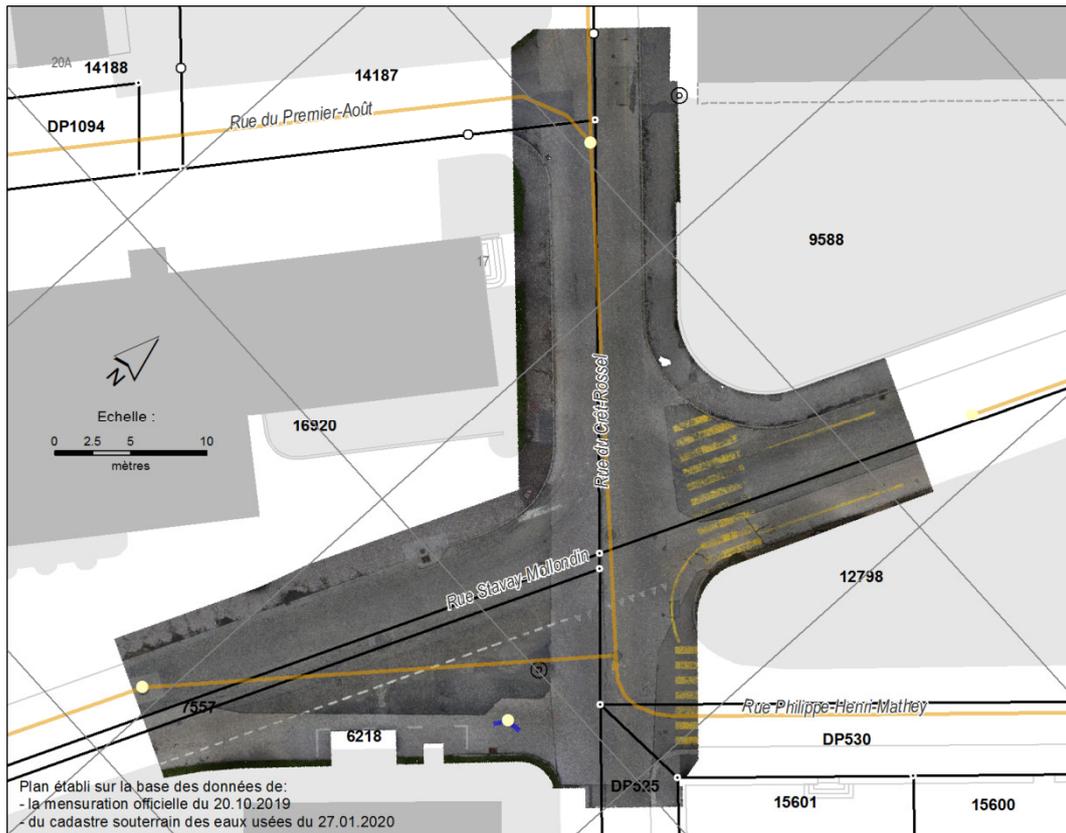


Figure 21 : Orthophoto de l'état 0 (30.05.2018) du tronçon Stavay-Mollondin à laquelle ont été superposés les biens-fonds (parcelles) et le cadastre souterrain des eaux usées.

L'exemple de superposition des données du cadastre souterrain des eaux usées de la Ville de La Chaux-de-Fonds avec le relevé du tronçon Stavay-Mollondin (Figure 21) montre d'ailleurs que deux couvercles de chambres, visibles dans l'orthophoto, situés au-dessus des conduites connues, ne sont pas répertoriés dans la base de données. Seule une géolocalisation précise permet ce genre de constat.

Le chapitre 5 montre qu'il est possible d'analyser la présence de dégradations et leur évolution à l'aide d'une grille régulière calée sur le système de coordonnées. Chaque cellule de la grille recense une quantité de dégradations situées sur sa surface (dans ce projet de 0.5 x 0.5 m) (Figure 22). Ensuite, les valeurs des grilles de deux époques de mesures, ayant une même définition géographique (coordonnées identiques), peuvent être comparées afin de mettre en évidence l'évolution des dégradations (Figure 23). Mais pour cela, il faut aussi que les dégradations des deux époques soient correctement superposées aux mêmes cellules de la grille, donc suffisamment bien géolocalisées.

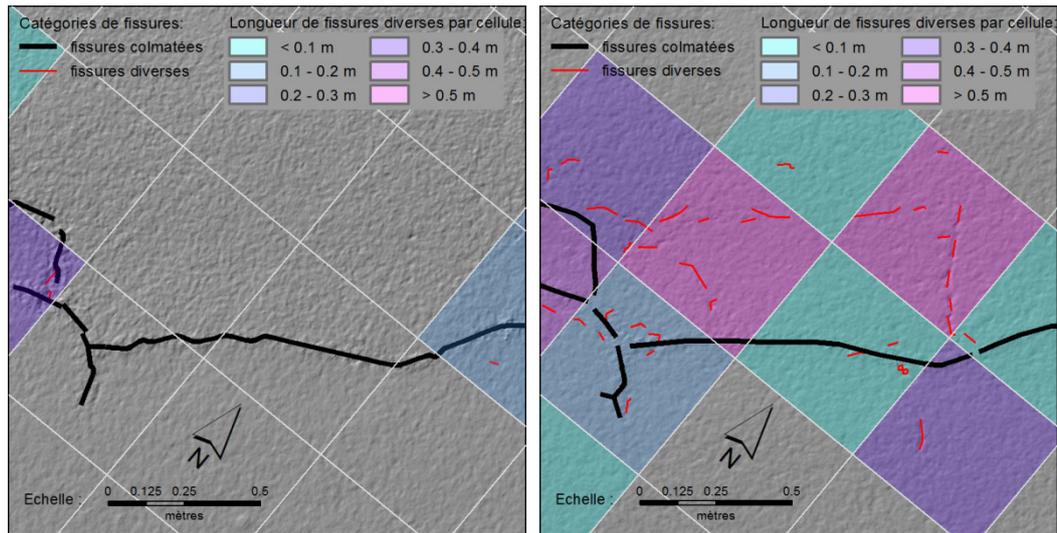


Figure 22 : Apparition de fissures sur le tronçon Charles-Naine entre l'état 0.5 (12.10.2018) à gauche et l'état 1 (29.03.2019) à droite, avec la grille de statistique de longueur de fissures par 0.25 m².

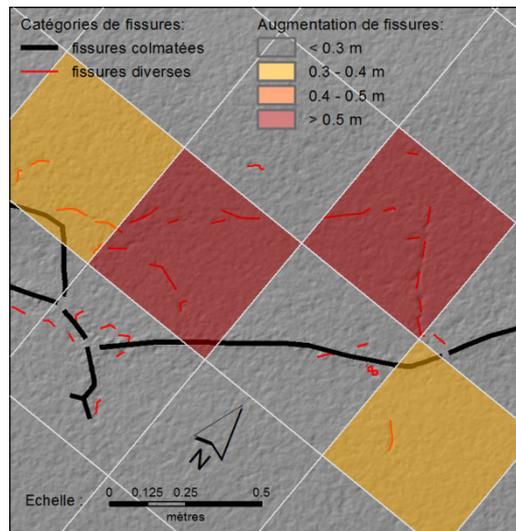


Figure 23 : Nouvelles fissures sur le tronçon Charles-Naine mises en évidence avec la grille d'évolution entre deux époques (soustraction état 1 – état 0.5).

Autre exemple encore plus fin : le suivi de l'orniérage d'arrêts de bus. Chaque pixel d'une taille de 2 cm (et non plus de 50 cm) enregistre la profondeur de la déformation à son emplacement, lors d'un état initial (état 0) (Figure 24) puis une année plus tard (état 1) (Figure 25). Or c'est seulement si chacun de ces pixels de 2 cm sont parfaitement positionnés, sur la même coordonnée (Figure 27), qu'il est possible de calculer la différence entre le pixel de l'état 0 et celui de l'état 1 (Figure 26) pour déterminer l'évolution de la déformation.

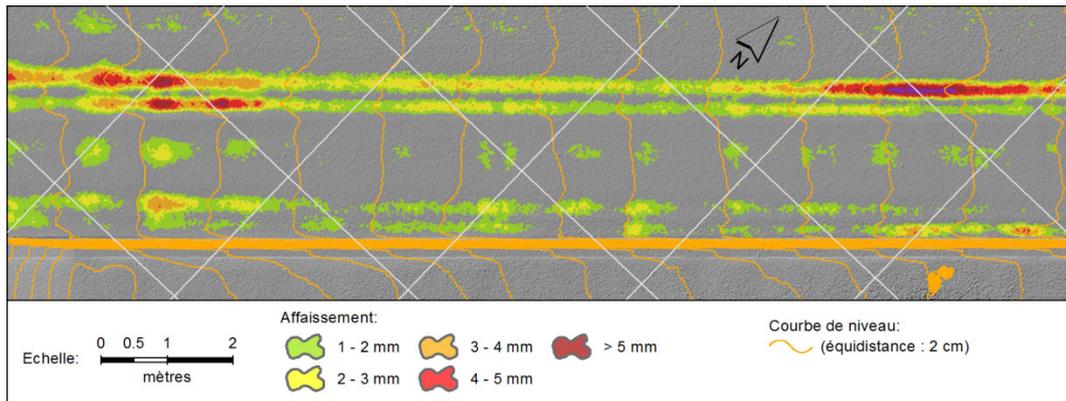


Figure 24 : Relevé d'ornières de l'arrêt de bus de la Place de la Gare de La Chaux-de-Fonds, état 0 (22.06.2016) (source: Ville de La Chaux-de-Fonds, Service géomatique).

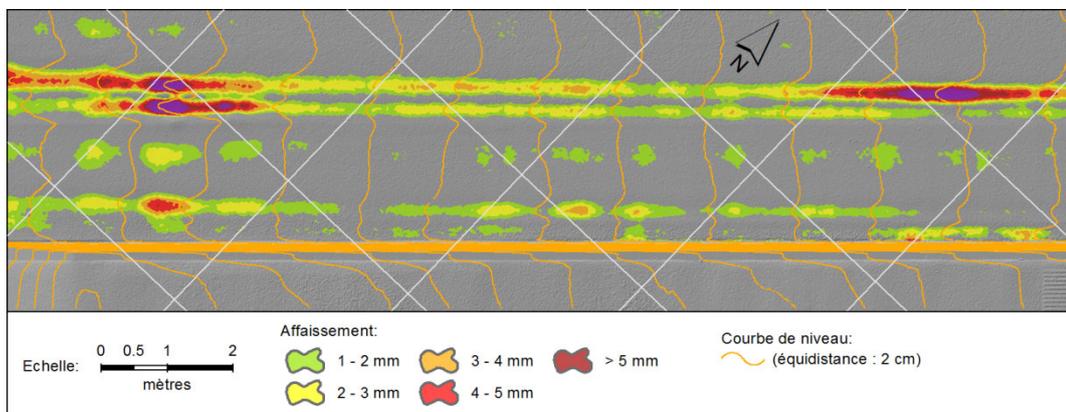


Figure 25 : Relevé d'ornières de l'arrêt de bus de la Place de la Gare de La Chaux-de-Fonds, état 1 (20.06.2017) (source: Ville de La Chaux-de-Fonds, Service géomatique).

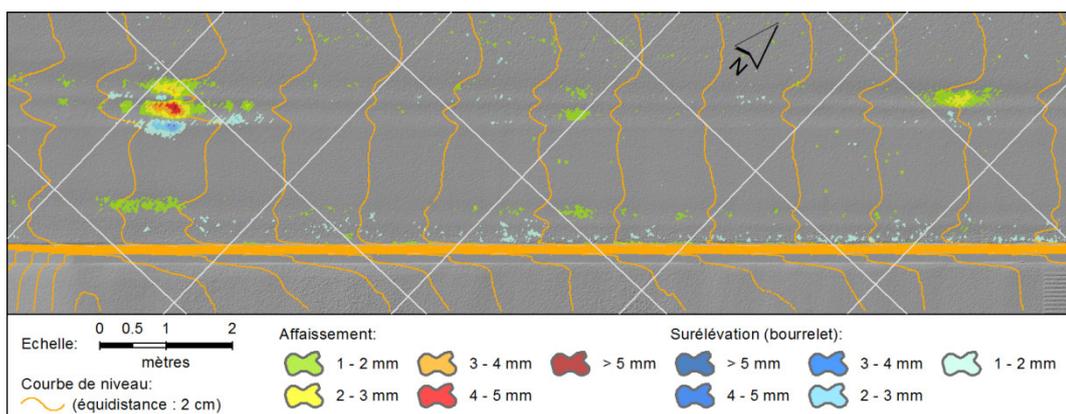


Figure 26 : Évolution de l'ornière de l'arrêt de bus de la Place de la Gare de La Chaux-de-Fonds (différence entre état 0 et état 1) (source: Ville de La Chaux-de-Fonds, Service géomatique).

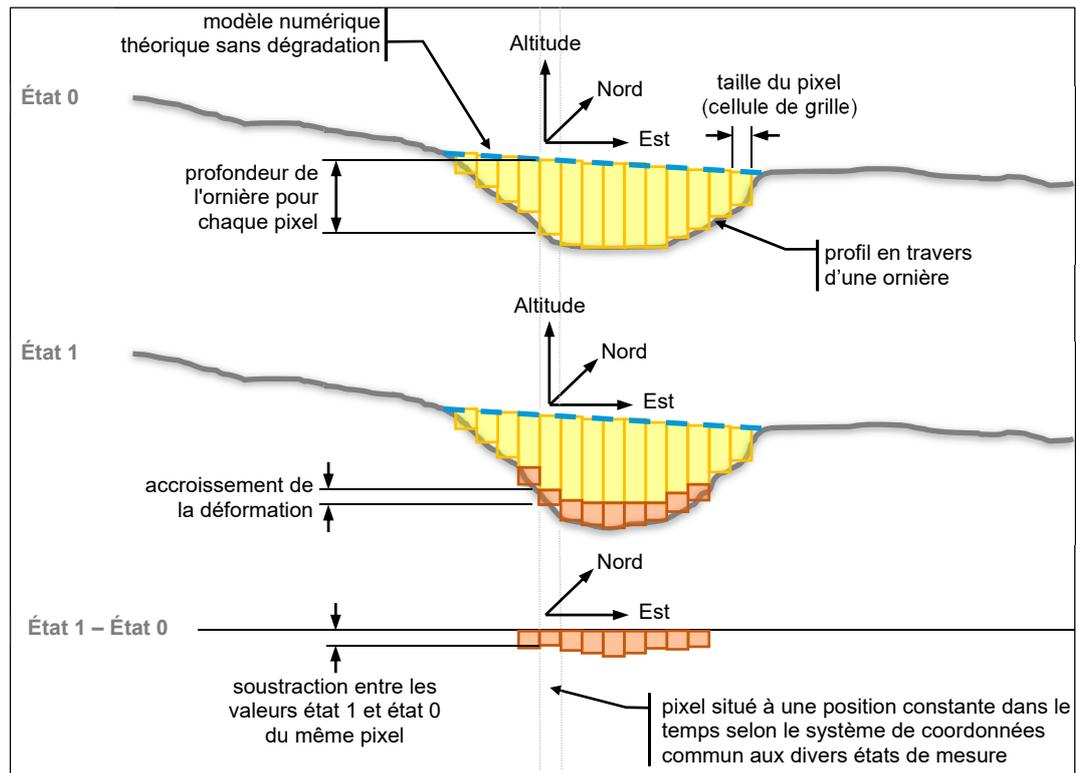


Figure 27 : Calcul de l'évolution d'une déformation entre deux états de mesure à partir d'un géoréférencement précis des géodonnées de chaque état.

Et c'est la connaissance de l'ornière à une résolution continue (modélisation intégrale, § 2.7.4) sur l'ensemble de la surface de l'arrêt de bus qui permet de mettre en évidence un enfoncement localisé à la position des roues des bus à l'arrêt, et non pas sur l'ensemble des bandes de roulement. Un échantillonnage par profils en travers ne permettrait pas de détecter un tel phénomène.

2.7.4 La modélisation intégrale

La photogrammétrie est basée sur la modélisation tridimensionnelle générée à partir d'au moins deux images et permet de connaître non seulement la position d'un objet mais aussi sa couleur. On obtient donc par défaut ces deux informations qui coïncident parfaitement car elles sont issues du même capteur, évitant la problématique de la calibration entre différents types de capteurs.

La modélisation complète, qui plus est parfaitement géolocalisée, et de plus dans un format de données numérique lisible par tous, fait de la capture de la surface d'une chaussée une mémoire intégrale de son état à un instant t .

Cette modélisation peut être exploitée (ou simplement conservée pour usage ultérieur) en tout temps, par n'importe qui, indépendamment du processus avec lequel elle a été acquise (mandataire, équipement de capture et de calcul). Plusieurs années après un relevé, il est possible de consulter et exploiter cette donnée, par exemple pour des aspects qui n'étaient pas recherchés au moment-même du relevé, afin de les comparer à un état ultérieur.

Avec un processus basé sur une méthode conventionnelle et normée tel que décrit dans [1], le résultat géométrique est une polygline, située de manière indicative plus ou moins à l'axe de la chaussée, découpée par exemple tous les 50 mètres ou d'un carrefour à l'autre, à laquelle des valeurs d'indices ont été attribuées (Figure 28). Il s'agit de la seule géodonnée mise à disposition du mandataire. Avec une telle information, il n'est pas possible de revenir en arrière, de consulter la donnée originale ayant servi à déterminer

l'indice (route observée par un seul opérateur de terrain). Il n'existe aucun moyen de conserver la géométrie des dégradations pour en réévaluer leur appréciation ultérieurement. Elle a par contre l'avantage de pouvoir synthétiser l'état de l'entier d'un réseau.

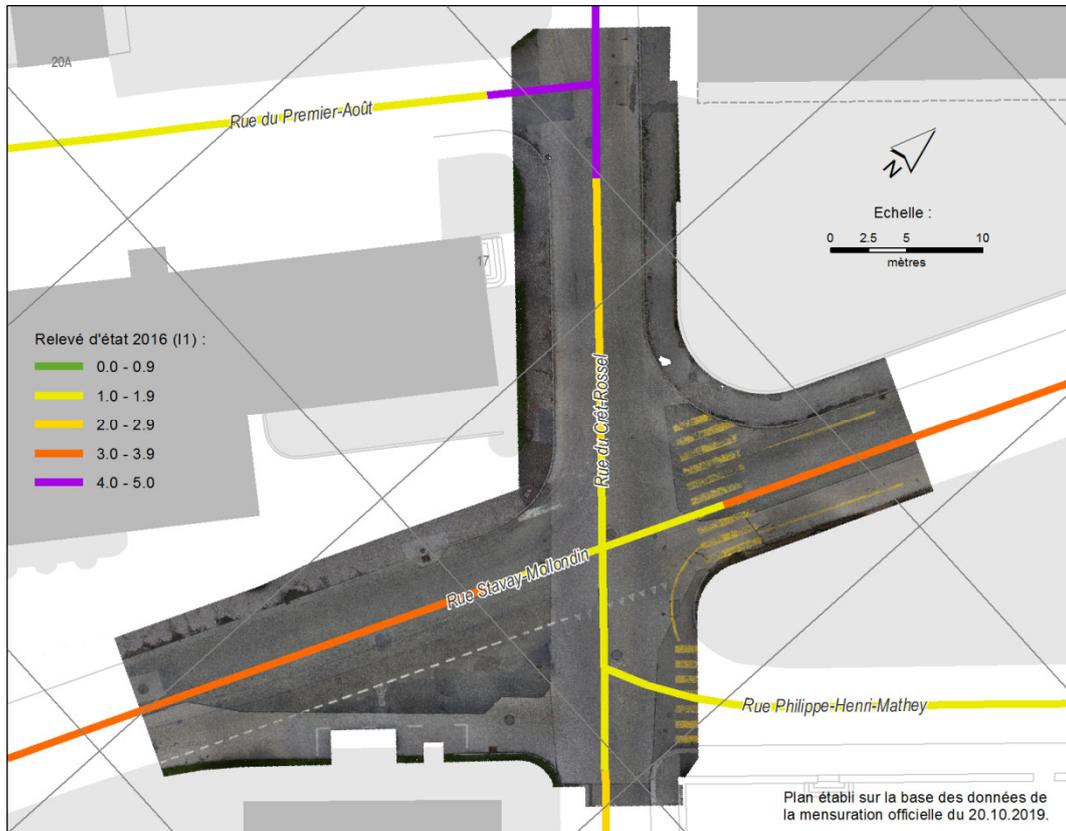


Figure 28 : Comparaison entre le relevé d'état visuel 2016 du réseau routier complet de la Ville de La Chaux-de-Fonds et l'orthophoto de l'état 0 (30.05.2018) du tronçon Stavay-Mollondin.

La modélisation intégrale d'une chaussée remplace, et même surpasse largement un relevé géométrique (topographique), point par point (accompagné de lignes de structure) et sans image, obtenu à l'aide d'un tachéomètre (théodolite, station totale). Ainsi, lorsqu'une mesure d'entretien est déclenchée à partir de l'analyse d'un relevé photogrammétrique, ces données peuvent directement être introduites dans un logiciel de conception routière. Avec un tel niveau de détail, il est possible d'analyser par exemple les défauts impactant l'écoulement des eaux de surface (gouilles), ou l'état des infrastructures (Figure 29). Il n'est plus nécessaire de mandater un spécialiste de la géomatique pour opérer un relevé géométrique complémentaire et de nombreuses informations peuvent être collectées à partir des données numériques sans observation in situ. Un relevé photogrammétrique est donc un outil à usages et échelles multiples.



Figure 29 : Analyse de l'écoulement des eaux de surface et de l'état des infrastructures pour un projet d'entretien ou de réfection (Stavay-Mollondin, état 0, 30.05.2018).

2.8 Durée des calculs

La photogrammétrie appliquée avec des outils conventionnels (appareils photographiques et logiciels du marché) a le défaut d'impliquer des longs temps de calculs. Le *Tab. 13* illustre l'ordre de grandeur des durées de calculs nécessaires à l'obtention des géodonnées de base pour des tronçons tels que ceux auscultés dans ce projet. Quant aux ordres de grandeur des temps de traitement pour chaque dégradation qui suivent la production des géodonnées de base, ils sont mentionnés à titre indicatif dans les chapitres spécifiques à chaque dégradation (§ 5).

Tab. 13 : Temps de post-traitement moyen des images acquises sur la chaussée jusqu'à l'obtention des géodonnées de base (modèle numérique de surface et orthophoto) pour des tronçons courts et sans complexité similaires à ceux du présent projet.

Étapes de travail	Description	Durée
Calcul automatique	Configuration informatique utilisée : disque SSD, RAM 64 Go, processeur Intel Xeon, carte graphique GeForce GTX 1080	env. 20-30 heures en plusieurs étapes séparées par des interventions manuelles, presque le double en cas de calcul du NMS à la résolution de 1 mm pour la perte de gravillons (durée très variable selon la taille de la surface auscultée)
Tâches manuelles	Tri des images acquises sur le terrain, géolocalisation des images (aérotriangulation), contrôle et suivi des calculs, dessin du périmètre du tronçon ausculté	env. 1.5 à 2 jours, en plusieurs interventions entre les processus automatisés

Cependant, l'évolution constante des capacités informatiques laisse espérer que ces temps de calcul tendent à diminuer. Pour illustrer les possibilités d'évolution, notons qu'au début des développements d'ARRPA (automne 2014), il n'était pas possible de calculer un modèle numérique de surface (MNS) d'une chaussée à une résolution de 1 mm (mais seulement au mieux 3 mm). Or, en 2019, en voulant s'assurer une résolution maximale pour la détection de la perte de gravillons, il a été constaté que les capacités informatiques actuelles permettent d'atteindre la résolution de 1 mm (avec une augmentation de la durée du calcul).

Des développements futurs d'outils spécifiques à l'auscultation routière, tant du point de vue des capteurs embarqués (caméra, laser) que des logiciels, raccourciront les temps de calculs.

2.9 Coûts

2.9.1 Généralités

Le coût d'un relevé d'état de surface par une technologie numérique, quelle qu'elle soit, est dicté par de nombreux paramètres tels que les développements informatiques, les capteurs et leurs accessoires, les outils informatiques de calcul, de stockage et de diffusion des données, ainsi que de la main d'œuvre.

La précision du géoréférencement des données acquises influence largement le coût du résultat final. Cette précision doit être définie dès le début du processus et dépendra du besoin final d'utiliser les données uniquement pour avoir une idée générale de l'état d'un vaste réseau routier (basse précision), ou si ces données seront réutilisées pour des travaux ultérieurs (précision absolue centimétrique, y compris pour les dévers). Les coûts liés à la précision sont influencés par :

- les capteurs de géolocalisation, principalement des plateformes inertielles (*IMU*)
- le nombre et la précision des points de calage (*GCP*) mesurés manuellement sur le terrain puis identifiés à l'écran
- les contrôles et autres opérations manuelles

2.9.2 Le cas d'ARRPA

À la demande de la commission de suivi du projet, ce chapitre décrit l'ordre de grandeur des coûts d'une méthodologie issue de la géomatique et basée sur la photogrammétrie, telle qu'ARRPA.

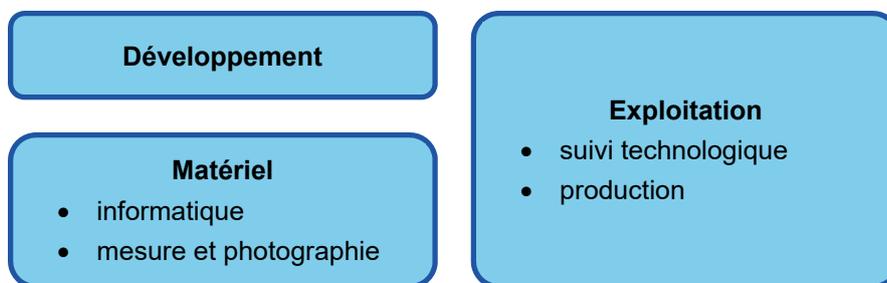


Figure 30 : Répartition des coûts d'une méthode de type ARRPA

Premièrement, les coûts de mise en place d'une telle solution doivent tenir compte de :

- ressources humaines pour le développement et la mise en service
- logiciels de topométrie, de SIG (§ 2.7.2), de photogrammétrie et d'échange de données
- ordinateur de calcul de haute capacité
- matériel photographique
- véhicule avec structure de fixation du matériel photographique
- équipement de mesures tachéométriques pour la détermination des points de calage

Une bonne partie de ces éléments est déjà en possession des structures travaillant dans le domaine de la géomatique et n'a pas besoin d'être acquise en sus pour le relevé photogramétrique d'une chaussée.

Pour l'exploitation courante d'un système tel qu'ARRPA, il faut tenir compte de :

- ressources humaines pour le suivi continu des composants technologiques
- maintenance annuelle des logiciels
- renouvellement des équipements photographique (usure)
- hébergement des données numériques
- ressources humaines pour chaque relevé

La quantité de travail à fournir pour chaque relevé concerne les tâches suivantes :

- la planification du relevé
- le relevé tachéométrique des points de calage
- le relevé photographique
- le calcul des géodonnées de base (modèle numérique de surface et orthophoto)
- la détection des dégradations, leurs statistiques et leur comparaison temporelle
- la livraison et la diffusion des résultats

Le temps de travail et le coût pour chaque relevé peut être influencé par :

- la distance à parcourir pour se rendre sur le site à ausculter
- le type de chaussée auscultée : il est beaucoup plus simple de traiter une route interurbaine régulière qu'un tronçon urbain comportant de nombreux obstacles à la circulation
- le dispositif de sécurité permettant au véhicule d'acquisition de se déplacer à vitesse réduite sur la chaussée (pas nécessaire en milieu urbain, mais inévitable sur une route à grande vitesse)
- le nombre de types de dégradations recherchées
- le mode de livraison (plan papier, géodonnées numériques, géoportail, formation et accompagnement du mandataire, etc.)
- l'organisation opérant le système (commerciale ou service public, disponibilité et rentabilité des équipements pour d'autres besoins, investissement pour le développement continu de la solution, formation des opérateurs, tarif horaire appliqué, répartition des tâches entre diverses structures, etc.)

Pour donner un chiffre indicatif, on arrive à un ordre de grandeur de CHF 10'000.- pour 1 km de route avec les critères suivants :

- route interurbaine de deux voies de circulation (une dans chaque sens)
- située à environ une heure de route du bureau du mandataire
- dispositif de sécurité à la charge du mandant si jugé nécessaire
- balayage de la chaussée à la charge du mandant si jugé nécessaire
- auscultation de toutes les dégradations décrites dans ce dossier, plus les déformations (ornières)
- livraison de toutes les géodonnées au format numérique, sans mise en page ni formation des mandataires
- opéré par un service public non astreint à des frais de développement initiaux ni d'investissement dans le développement continu

Un tel relevé basé sur une géométrie précise englobe le relevé géométrique et ses coûts. En d'autres termes, il s'agit à la fois d'un relevé d'état de surface et d'un relevé géométrique (§ 2.7.4), ce dernier pouvant répondre à divers autres besoins. Pour pouvoir comparer ce montant à d'autres méthodes, il faudrait le mettre en parallèle avec celui d'un relevé topographique opéré par un bureau d'ingénieurs géomètres n'offrant ni le modèle numérique de surface ni l'orthophoto, mais uniquement un semis de points accompagné de lignes de structures.

3 Méthodologie

3.1 Fil rouge

Dès 2014, le système ARPPA (§ 2.6) a connu ses premiers développements à La Chaux-de-Fonds en collaboration avec la HEIG-VD (Institut d'ingénierie du territoire – insit). La ville étant intéressée à posséder son propre système d'acquisition, elle s'est dotée en 2017 d'un véhicule dédié, des caméras et des équipements informatiques indispensables au bon déroulement de la collecte de données et de leurs traitements. C'est donc assez naturellement que nous avons souhaité profiter de cet environnement pour évaluer plus en détail les capacités de détection du système ARPPA. Le Service technique de La Chaux-de-Fonds a accepté de collaborer et est devenu le partenaire institutionnel de notre projet de recherche.

Dès 2015, ARPPA sait détecter et quantifier les défauts de planéité [15]. Or, les défauts de planéité sont déjà largement couverts par d'autres techniques d'auscultation présentes sur le marché. C'est donc pour aller plus loin que le présent projet se focalise sur des dégradations de type fissure et perte de matière dont les algorithmes de détection ont été développés à la HEIG-VD entre 2016 et début 2018.

La première étape de ce projet consiste à parcourir le réseau routier de La Chaux-de-Fonds à la recherche de secteurs fortement dégradés pouvant servir de tronçons d'essai. D'entente avec le Service technique de la ville, nous retenons finalement quatre tronçons d'essai (§ 3.5), chacun étant caractérisé par une dégradation type à un stade bien marqué, c'est-à-dire des fissures, de la perte de gravillons ou des nids de poule. Sur ces tronçons, il est convenu d'effectuer ni travaux de maintenance, ni petites réparations pendant au moins deux ans.

Une première campagne de collecte de données a lieu en mai 2018 (état 0), à la suite de quoi nous possédons des orthophotos et un modèle numérique de surface pour chaque tronçon d'essai à partir desquels les dégradations sont cartographiées et quantifiées.

La deuxième campagne de collecte de données a lieu en mars 2019 (état 1). Pour notre projet, La Chaux-de-Fonds a l'avantage d'être située à 1'000 m d'altitude, avec des hivers rigoureux, une fonte des neiges tardive et des procédés chimiques et mécaniques de déneigement. Nous nous attendons à observer une évolution rapide des dégradations entre la fin du premier et la fin du second hiver. De la sorte, la collecte des données sur deux années consécutives doit nous permettre de quantifier une vitesse de dégradation et, par la même occasion, valider les bénéfices du géoréférencement de précision centimétrique.

Un fort accent est mis sur les questions de fidélité et de justesse de la collecte et du traitement des données. Dans le but d'évaluer l'exactitude des résultats ARPPA, nous avons procédé aux contrôles suivants :

- Parallèlement à la collecte automatique de données, nous effectuons des relevés visuels détaillés selon SN 40 925b [1]. Leur exploitation par type de dégradation pourrait venir étayer les grandeurs statistiques obtenues avec ARPPA.
- Nous entreprenons des mesures de terrain par comptage et métrage à la fin de la campagne 2019. Les résultats sont comparés avec le relevé automatique.
- Le paramétrage de l'algorithme étant préalablement effectué sur les tronçons d'essai caractéristiques, ces mêmes paramètres sont testés sur tous les tronçons pour apporter la preuve positive ou négative de la présence ou de l'absence d'une dégradation donnée.
- La répétabilité est estimée par des relevés doubles (même opérateur, même tronçon, mêmes date et heure).

Pour finir, nous faisons appel à une spécialiste du management de l'entretien (ERTEC, Laure Chastan) pour faire des propositions concrètes à la Commission de suivi en vue d'améliorer ou moderniser la SN 40 925b [1] (proposer des alternatives aux indices), mais aussi en ce qui concerne l'utilisation de nos résultats dans un exemple de planification stratégique.

3.2 Détection des fissures et faïençage

Qu'est-ce qu'une fissure ? D'après un rapport AIPCR [9], elle a une longueur minimale de 15 cm et une ouverture minimale de 1 mm. Ce rapport fournit également une définition des fissures transversales et longitudinales. Une fissure en rive est une fissure longitudinale située à moins de 25 cm du bord de la route.

Qu'est-ce qu'un faïençage ? D'après [9], c'est un réseau de fissures se présentant sous la forme d'une grille avec au moins trois mailles dans chaque direction. Le diamètre des mailles est inférieur à 30 cm. Si ce diamètre est supérieur à 30 cm, les fissures sont considérées comme étant distinctes.

La détection ARPPA porte sur les fissures (indépendamment de l'angle qu'elles forment avec l'axe de la chaussée), les fissures colmatées et le faïençage. Ce dernier est perçu comme une zone à très forte densité de fissures. Avec la méthode ARPPA, le seuil de détection d'une fissure équivaut à une ouverture de fissure de 2 à 3 mm. Les amorces et les pointes de fissure ne sont pas détectées. En revanche l'évolution de la fissure (l'allongement ou la ramification) peut être suivie d'année en année et une vitesse de fissuration peut ainsi être calculée. Notons que cette vitesse n'est pas nécessairement positive car une fissure peut se refermer, momentanément ou durablement, grâce à la viscosité du liant. Mais en règle générale, une dégradation, quelle qu'elle soit, a fortement tendance à s'aggraver.

On ne cherchera pas à coder l'algorithme afin qu'il détermine un niveau de sévérité basé sur l'ouverture de la fissure. On ne cherchera pas non plus à distinguer les fissures selon l'angle qu'elles forment avec l'axe de la route. Ce sont des choses tout à fait possibles mais demandent des développements supplémentaires qui ne sont pas prévus ici.

En pratique de gestion de l'entretien, une information sur le caractère traversant ou non traversant d'une fissure serait particulièrement utile. À l'heure actuelle, à notre connaissance, seul le véhicule MESAS développé par la BAST [19] serait en capacité de renseigner ce point précis grâce au géoradar fixé sur son châssis.

La valeur attribuée à une fissure ou à une fissure colmatée est sa longueur, celle attribuée à un faïençage est la surface de la zone faïencée, cette dernière étant repérée et délimitée numériquement par l'introduction d'un seuil de concentration particulièrement élevée de fissures.

3.3 Détection de la perte de gravillons

Des gravillons isolés sont éjectés de la surface sous l'impact des pneus chaînés, de fortes aspirations ou en raison de sollicitations aiguës en cisaillement. La cohésion entre le grain et le mastic bitumineux a tendance à diminuer avec le vieillissement du liant ou le désenrobage progressif dû à l'action de l'eau. Le désenrobage est plus marqué en présence de grains calcaires dont l'affinité avec le bitume non modifié aux polymères est faible. La perte de gravillons est un processus évolutif qui, à partir d'un certain seuil de gravité, a tendance à accélérer. C'est pour cette raison qu'il est important de suivre son évolution et de la stopper avant l'apparition de petits nids de poule.

Si la perte de gravillons est due à la présence, dans le mélange bitumineux, de grains inappropriés, en l'occurrence des grains dont l'affinité avec le bitume est faible ou des grains friables, la dégradation se limitera à l'éjection de ces grains. Si, au contraire, la perte de gravillons est due à une diminution progressive de l'élasticité du liant, le processus s'étendra à toute la surface de roulement.

3.4 Détection des nids de poule et pelades

D'après [9], un nid de poule est un trou dont l'aire est supérieure à 50 mm sur 50 mm. Une base granulaire devrait être présente au fond du trou ce qui revient à dire qu'un nid de poule, contrairement à une pelade, traverse la pleine épaisseur des couches hydrocarbonées.

3.5 Choix des tronçons d'essai

3.5.1 Charles-Naine

Tab. 14 Carte d'identité du tronçon Charles-Naine

Couche de base :	2010, AC EME C2, épaisseur 9 cm
Couche de roulement :	2011, AC MR 8, épaisseur 3 cm
Charge de trafic :	zone de rencontre entre centres commerciaux, arrêt de bus, poids lourd de livraison des centres commerciaux
Longueur :	95 m
Indice d'état I1 2016 :	1.3
Dégradations à ausculter :	fissures, faïençage
Géodonnées disponibles :	images de fissures sur la couche de base, avril 2011

Le tronçon Charles-Naine présente des fissures transversales prononcées, quelques fissures de joint autour des réparations et du faïençage dans des ornières naissantes à l'endroit de l'arrêt de bus. (Voir plan d'ensemble en annexe I.)



Figure 31 : Rue Charles-Naine (29.11.2017)

3.5.2 Commerce

Tab. 15 Carte d'identité du tronçon Commerce

Type de revêtement :	enrobé monocouche AC 16 N, épaisseur 7 cm
Année de pose :	2012
Charge de trafic :	route de quartier peu fréquentée, pas de poids lourds, 30 km/h
Longueur :	130 m
Indice d'état I1 2016 :	0.6
Dégradations à ausculter :	perte de gravillons
Géodonnées disponibles :	-

Le revêtement monocouche de la rue du Commerce, posé en 2012, a montré très rapidement un problème de perte de gravillons. Une fraction anormalement élevée des granulats est d'origine calcaire. Ceux-ci ont tendance à se désagréger sous l'effet des cycles de gel-dégel. (Voir plan d'ensemble en annexe I.)



Figure 32 : Rue du Commerce (30.05.2018)

3.5.3 Helvétie

Tab. 16 Carte d'identité du tronçon Helvétie

Type de revêtement :	réparations multiples avec enrobé à froid / à chaud
Année de pose :	pas d'intervention connue ces 20 dernières années
Charge de trafic :	route de transition assez fréquentée, avec poids lourds
Longueur :	240 m
Indice d'état I1 2016 :	2.5
Dégradations à ausculter :	pelades, nids de poule
Géodonnées disponibles :	relevés ARRPA : décembre 2014, avril 2015

La pose du revêtement initial de la rue de l'Helvétie remonte à plus de 20 ans. Elle est particulièrement déformée (ornières) et sa couche de roulement s'use tellement, qu'il est nécessaire de colmater les pelades et nids de poule parfois plusieurs fois par hiver. C'est donc sur ce type de dégradations que le projet s'est focalisé.

Précédemment, au vu de sa dégradation rapide et de sa facilité d'accès, ce tronçon avait été choisi dès l'automne 2014 pour les travaux de développement de la méthode ARPPA. Étant donné que les relevés du présent projet, en 2018 et 2019, ont révélé une évolution marquante du revêtement, il n'a pas été jugé nécessaire d'exploiter les données historiques de 2014 et 2015. (Voir plan d'ensemble en annexe I.)

Comme prévu, ce tronçon a fait l'objet d'une réfection complète durant l'été 2019.



Figure 33 : Rue de l'Helvétie (03.02.2015)

3.5.4 Stavay-Mollondin

Tab. 17 Carte d'identité du tronçon Stavay-Mollondin

Type de revêtement :	aucune information à disposition
Année de pose :	aucune information à disposition
Charge de trafic :	route de quartier, arrêt de bus
Longueur :	90 m
Indice d'état I1 2016 :	1.4 et 2.5
Dégradations à ausculter :	perte de gravillons, pelades, nids de poule
Géodonnées	-

Le carrefour entre les rues Stavay-Mollondin et Crêt-Rossel est fait de divers revêtements dont l'origine assez ancienne n'est pas documentée. L'un des revêtements, fabriqué avec un granulat calcaire, présente une forte tendance à la perte de grains et au désenrobage. Un des autres revêtements, un enduit superficiel, se dégrade régulièrement par apparition de nids de poule. (Voir plan d'ensemble en annexe I.)



Figure 34 : Le carrefour entre les rues Stavay-Mollondin et Crêt-Rossel (06.12.2017)

3.6 Dégradations types par tronçon d'essai

Dans un premier temps, l'accent est mis sur la spécificité de chaque tronçon d'essai et on y recherche uniquement la dégradation pour laquelle il a été choisi. Cette répartition est indiquée au Tab. 5.

Tab. 18 Types de dégradation recherchés par tronçon d'essai.

Tronçon d'essai	Fissures et faïençage	Perte de gravillons	Pelades et nids de poule
Charles-Naine			
Commerce			
Helvétie			
Stavay-Mollondin			

Dans un deuxième temps, l'algorithme et les paramètres de détection d'une dégradation en particulier seront testés sur tous les autres tronçons.

3.7 Validation de la méthode

3.7.1 Auscultations croisées et pistes de référence: exemples du Québec et de l'Allemagne

Idéalement, le maître d'ouvrage devrait organiser une auscultation croisée sur un même tronçon d'essai afin de comparer la capacité de détection et les marges d'erreur des systèmes concurrents.

Au Québec, le Ministère des transports organise des essais de validation des systèmes automatisés de mesure de la fissuration sur un tronçon avec fissuration artificielle (simulée par sciage de la chaussée ; le nombre, la longueur et l'ouverture de fissure étant des

paramètres contrôlés) ou sur sections de 1 km de route en service (de plus amples précisions sont fournies dans l'annexe II). Il a partagé son expérience en la matière dans un rapport AIPCR [9]. Le but est de vérifier que les capteurs fonctionnent de façon satisfaisante du point de vue de leur résolution et sensibilité. Une distinction est faite entre les technologies de collecte et de traitement. La surface de la route est divisée en cellules. La méthode consiste à enregistrer la présence ou l'absence de fissures dans chacune des cellules. C'est ainsi que l'on détermine l'étendue de la fissuration. La gravité de la fissure est déterminée en fonction de son ouverture ; le test de validation prévoit 4 catégories de sévérité qui sont 2 mm, 3 mm, 5 mm et 8 mm. Dans ce même rapport AIPCR [9], le Comité technique responsable de sa rédaction a tenu à proposer des critères de performance pour la détection et le biais et une classification des appareils.

Dans une autre publication [10], la Direction du laboratoire des chaussées du Québec fixe ses exigences pour la validation périodiques des véhicules d'auscultation, qui en début de saison doivent tous effectuer une série de passages sur des sites de référence. Les critères évalués sont le confort au roulement, l'orniérage et la fissuration.

En Allemagne, la ZTV ZEB-StB [11] est un document contractuel dans lequel est décrit la procédure de contrôle de la collecte de données. Ce contrôle se déroule sous la responsabilité du mandataire (Eigenüberwachung), qui est tenu de mesurer sa répétabilité sur un tronçon de 2 km. Si le résultat se situe en dehors de la marge de tolérance, le mandant est en droit d'organiser un essai croisé avec d'autres véhicules d'auscultation.

Toujours en Allemagne, la Bundesanstalt für Strassenwesen (BASt) a construit sur une superficie de 25000 m², à l'intersection des autoroutes A3 et A4 (Köln-Ost), un site de démonstration, d'expérimentation et de pistes de référence appelé duraBASt (www.durabast.de) [20]. Les différentes pistes de référence servent à assurer la qualité du rendu des véhicules d'auscultation automatique. Depuis leur inauguration en 2017, elles ont permis d'établir de nouveaux critères d'homologation de ces véhicules et de ce fait, participent à une amélioration globale des relevés des dégradations et de la planification de l'entretien qui en découle. Actuellement, le site compte cinq pistes de référence. Elles couvrent la planéité longitudinale, la planéité transversale, l'adhérence, les défauts de surface (Substanzmerkmale) et la texture.

Dans le cadre du relevé d'état et appréciation de l'état des routes fédérales (Zustandserfassung und -bewertung ZEB), le relevé des défauts de surface n'est pas automatisé. À partir d'images haute résolution de la chaussée, le travail de détection se fera à l'écran via des masques de saisie. Les opérateurs saisisent les fissures, les réparations (tacons), les pertes de matériau (pelade, nid de poule), les joints ouverts ainsi que le ressuage du liant. La perte de gravillons en soi n'est pas saisie. Toutefois si cette perte est importante, en l'occurrence sur une étendue de plus de 3 cm, elle entre dans la catégorie perte de matériau et sera relevée.

La piste de référence « Substanzmerkmale » comprend des fissures artificielles d'ouverture variable. Ces fissures sont des reproductions d'après moulage en plastique de fissures réelles. Elle comprend aussi une série de damiers (Prüftafeln mit Prüfmuster). Les damiers servent à contrôler la qualité des images via un logiciel d'analyse spécialement développé à cet effet. En pratique, la qualité des images doit être telle que l'opérateur puisse repérer toutes les fissures d'ouverture égale ou supérieure à 1 mm. Cette même valeur seuil de 1 mm sera à l'avenir le critère d'homologation de tout système d'auscultation automatique.

La piste de référence « texture » comprend des planches de différentes profondeurs de texture ainsi que des surfaces profilées en acier inox de forme triangulaire, rectangulaire ou trapézoïdale pour étalonner les profilomètres laser. Elle ne comprend pas de dégradation de type perte de gravillons.

Du reste, le site est à la disposition des pays membres du FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories) pour des projets de recherche en matière de

construction et de maintenance des infrastructures routière ou pour des coopérations bilatérales entre pays de l'Union européenne.

3.7.2 Les mesures de terrain

L'auscultation croisée n'étant pas réalisable dans le cadre du présent projet, une comparaison des mesures automatiques avec des relevés visuels est le moyen le plus adéquat pour tenter de valider les grandeurs calculées par ARRPA.

Il serait vain de vouloir comparer l'indice I_1 avec un résultat d'auscultation automatique tout simplement parce que le premier résulte d'un relevé approximatif et subjectif tandis que le second fournit des grandeurs objectives. La comparaison pourrait cependant être tentée en utilisant non pas l'appréciation globale I_1 mais le relevé détaillé des étendues et des gravités pour chaque type de dégradation.

Une autre méthode visuelle de terrain consiste à procéder à des mesures systématiques des dégradations. La longueur des fissures présentes sur les tronçons d'essai est relevée à la roulette. Le nombre de trous imputables à une perte de granulat est compté à l'unité près sur des planches de 1x1 m. Les nids de poule sont comptés et leur surface est mesurée. Cette méthode, bien que fastidieuse, est sûre et incontestable. Elle sert de base pour la mise au point des seuillages et le choix des paramètres de détection « universels ».

4 Exploitation des résultats d'ARRPA

4.1 Quantifier les fissures

La gravité de la fissuration est mesurée en additionnant les fissures colmatées et non colmatées. Cette gravité est exprimée de différentes manières, à savoir :

- Unité de longueur par unité de surface [m/m^2] ;
- Unité de longueur par section [$m/section$] ;
- Unité de longueur par cellule de grille [$m/cellule$] ;
- Unité binaire (présence ou absence) par cellule de grille [0/cellule] ou [1/cellule].

La section de chaussée est de longueur variable. En Allemagne, elle est définie dans [11] et prend la valeur 100 m hors localité et 20 m à l'intérieur des localités. En Suisse, la base de données routière de la Confédération MISTRA présente le plus souvent l'état de la chaussée par sections de 50 m sur routes cantonales et 100 m sur autoroutes.

La grille recouvre entièrement la surface d'auscultation et est composée de cellules carrées dont la dimension des côtés est choisie au préalable, typiquement 50 ou 100 cm. L'orientation de la grille est donnée par les axes cardinaux nord/sud et est/ouest. Elle est indépendante de l'axe de la chaussée.

Dans chacun des cas, la lecture graphique de la gravité sera facilitée par un code couleur.

Dans [11], il est demandé d'exprimer l'étendue, sans faire de distinction entre les trois types de dégradation, le faïençage, les agglomérats de fissures ainsi que les fissures isolées en pourcentage de surface affectée. Ailleurs, dans [1], la norme propose trois niveaux de gravité. La description des niveaux est à la fois qualitative, parce qu'il faut estimer une densité, et quantitative, parce qu'il faut mesurer l'ouverture des fissures. Le niveau est considéré comme faible (S1) si cette ouverture est inférieure à 2 mm ; moyen (S2) si l'ouverture est comprise entre 2 et 10 mm et grave (S3) lorsque les ouvertures sont supérieures à 10 mm.

Dans le cadre de ce projet, le traitement des données ne s'attache pas à classer les fissures en fonction de leur ouverture, même si les données collectées le permettraient moyennant un développement à imaginer.

4.2 Quantifier le faïençage

Lorsqu'un groupe de fissures forme un entrelacs serré, celui-ci est considéré comme une unique dégradation dont on cherche à déterminer l'étendue. Par conséquent, la gravité du faïençage est exprimée en densité de surface, à savoir :

- Unité de surface par unité de surface [m^2/m^2] ou [%] ;
- Unité de surface par section [$m^2/section$] ;
- Unité de surface par cellule de grille [$m^2/cellule$] ;
- Unité binaire (présence ou absence) par cellule de grille [0/cellule] ou [1/cellule].

Dans [1], la norme propose trois niveaux de gravité. La description des niveaux est à la fois qualitative, parce qu'il faut estimer l'état du maillage et des cassures, et quantitative, parce qu'il faut mesurer la profondeur des flaches. Le niveau est considéré comme faible (S1) si le maillage est fin et si la profondeur des flaches est inférieure à 15 mm ; moyen (S2) si des cassures apparaissent et si la profondeur des flaches est comprise entre 15 et 25 mm et grave (S3) si le revêtement est incontestablement découpé en plaques et si les flaches sont supérieurs à 25 mm.

Une précision est apportée dans [1] quant à la relation entre l'épaisseur de la couche, la profondeur des fissures et la dimension caractéristique du maillage. Des mailles de 30 cm et plus signifient que très probablement les fissures traversent les couches de base jusqu'à la fondation. Des mailles fines indiquent que l'épaisseur totale des couches hydrocarbonées est faible ou que les fissures sont contenues dans l'épaisseur de la couche de roulement.

4.3 Quantifier la perte de gravillons

Lorsque de gros grains isolés se détachent de la surface de roulement, ce phénomène est mesurable car la place laissée vacante se distingue de la rugosité intrinsèque du revêtement. La gravité de la perte de gravillons est exprimée en nombre moyen de grains manquants par unité de surface, à savoir :

- Nombre x par unité de surface dans une section [x/m^2] ;
- Nombre x par cellule de grille [$x/cellule$] ou [x/m^2].

Dans chacun des cas, la lecture graphique de la gravité sera facilitée par un code couleur.

La perte de gravillons ne fait pas partie des critères servant à établir la valeur résiduelle d'une route selon [11].

Dans [1], la norme propose trois niveaux de gravité. La description des niveaux est uniquement qualitative. Le niveau est considéré comme faible (S1) si « quelques gravillons » se sont détachés de la surface ; moyen (S2) si on observe un « aspect vérolé » et grave (S3) si on observe l'apparition de « nombreux petits nids de poule ».

4.4 Quantifier les nids de poule et pelades

Les nids de poules sont généralement la conséquence du faïençage profond avec flache ou du stade avancé de perte de gravillons. Le trou est convexe et atteint la fondation non liée.

Les pelades sont généralement dues à une mauvaise liaison entre la couche de roulement et son support et provoquées par des sollicitations en cisaillement (freinage, accélération). Le fond de la pelade est constitué par la couche support. La pelade ne s'étend pas en profondeur mais horizontalement.

La gravité des nids de poule est exprimée en nombre, en surface totale ou en surface moyenne, à savoir :

- Nombre x par section [$x/section$] ;
- Surface totale par section [$m^2/section$] ;
- Surface moyenne des nids de poule [m^2/nid] ;
- Unité binaire (présence ou absence) par cellule de grille [$0/cellule$] ou [$1/cellule$].

La gravité des pelades est exprimée en surface, à savoir :

- Surface totale par section [$m^2/section$] ;
- Surface par unité de surface [m^2/m^2] ou [%] ;
- Surface par unité de grille [$m^2/cellule$] ;
- Unité binaire (présence ou absence) par cellule de grille [$0/cellule$] ou [$1/cellule$].

Dans chacun des cas, la lecture graphique de la gravité sera facilitée par un code couleur.

Dans [11], les dégradations de types nids de poule et pelades sont rassemblées sous le vocable « Ausbrüche » et quantifiées en pourcentage de surface affectée.

Dans [1], la norme, comme à son habitude, propose trois niveaux de gravité. La description des niveaux est quantitative.

Nids de poule

Le niveau est considéré comme faible (S1) si le diamètre de « quelques trous isolés et de faible profondeur » est inférieur à 10 cm ; moyen (S2) si le diamètre est compris entre 10 et 30 cm et la profondeur des trous reste inférieure à 40 mm ; grave (S3) si le diamètre est supérieur à 30 cm et la profondeur supérieure à 40 mm.

Pelades

Le niveau est considéré comme faible (S1) si le diamètre de « pelades isolées » est inférieur à 10 cm ; moyen (S2) si le diamètre est compris entre 10 et 30 cm ; grave (S3) si « les pelades se rejoignent » et le diamètre est supérieur à 30 cm.

4.5 Volume de matière perdue

La commission de suivi du projet s'est interrogée sur la capacité d'une approche telle qu'ARRPA à déterminer le volume d'une dégradation en particulier ou d'une combinaison de dégradations. Cette possibilité existe grâce à la connaissance très fine du relief de la route. À l'exception des bourrelets, les dégradations produisent des écarts concaves par rapport à la surface lissée neuve. Le processus mathématique pour déterminer le volume de ces concavités est assez simple [14] [15]:

1. Détection de cavités, cuvettes et autres interstices dans le modèle numérique de surface (toutes dégradations confondues de quelques millimètres à quelques centimètres).
2. Éviction de ces concavités.
3. Détermination d'un modèle numérique de surface lissé, sans concavité (surface théorique de la chaussée neuve).
4. Soustraction entre le modèle lissé et le modèle de la surface réelle.

Cette première étape met en évidence les concavités et leur variation de profondeur (Figure 35).

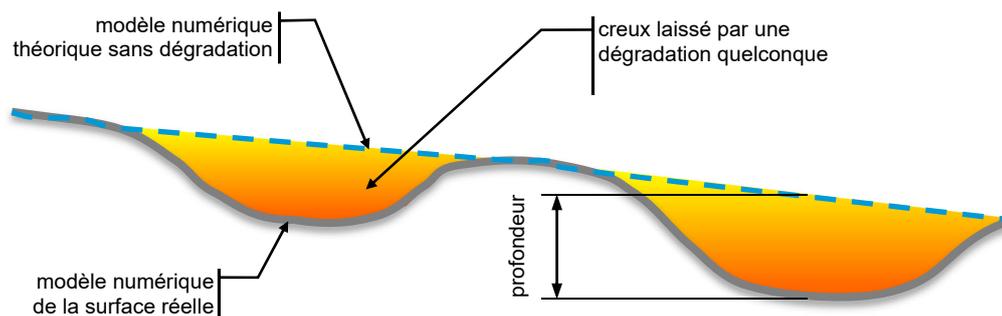


Figure 35 : Profil d'une surface de chaussée ; différence (soustraction) entre le modèle numérique de la surface réelle avec dégradation et de la surface théorique sans dégradation

Théoriquement, le volume obtenu englobe tous les types de dégradation (perte de matière, fissuration, déformation permanente). La Figure 36 présente une vue d'ensemble d'une combinaison pertes de gravillons et fissures usées, c'est-à-dire des défauts de taille restreinte (sélectionnés en fonction de leurs petites longueurs d'onde spatiales). Les

dégradations de grandes tailles (grandes pelades et grands nids de poule) et les déformations (ornières, flaches) ne sont pas prises en compte dans l'exemple ci-dessous. Ce choix de restreindre ou pas, du fait que la surface est parfaitement déterminée, ne change rien au niveau de la difficulté des calculs. D'autres algorithmes pourraient être développés pour ne cibler qu'un seul type de dégradation, les pertes de gravillons par exemple.

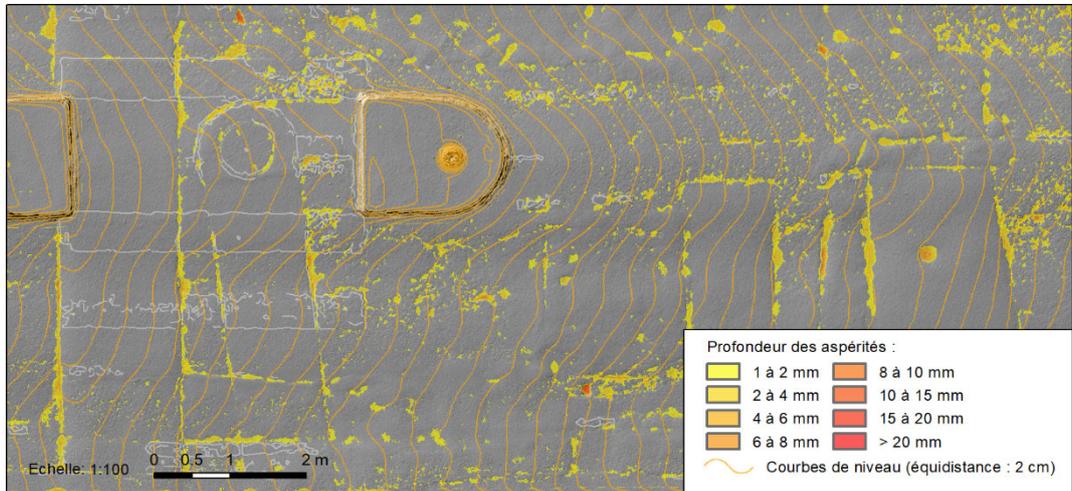


Figure 36 : Représentation des concavités selon leurs profondeurs (Helvétie, état 1, 29.03.2019)

À partir de cette donnée, on a extrait le volume total de concavités en dm^3 par section ou par grille.

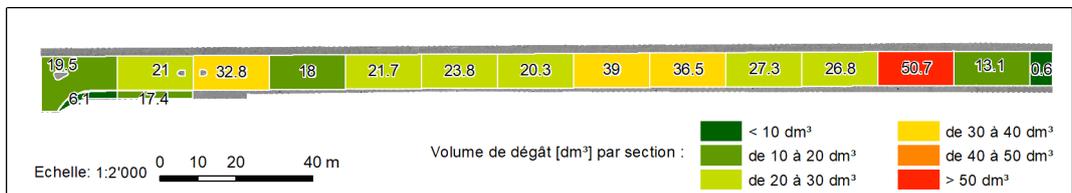


Figure 37 : Statistique de volume de dégât par section (Helvétie, état 1, 29.03.2019)

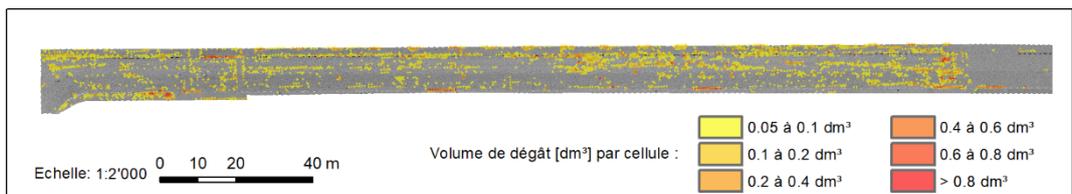


Figure 38 : Statistique de volume de dégât par grille (Helvétie, état 1, 29.03.2019)

5 Résultats par type de dégradation

5.1 Fissures et faïençage

5.1.1 Principe de la détection des fissures et du faïençage

Le système ARPPA recherche à la fois des aspérités linéaires dans le modèle numérique de surface (MNS) (*Figure 39*) et des lignes sombres dans l'orthophoto (*Figure 40*). Ces deux données étant parfaitement superposées géographiquement, les résultats de la détection dans chacune d'elles sont ensuite additionnés. Il en résulte une géodonnée vectorielle des fissures sous la forme de polygones (*Figure 41*).

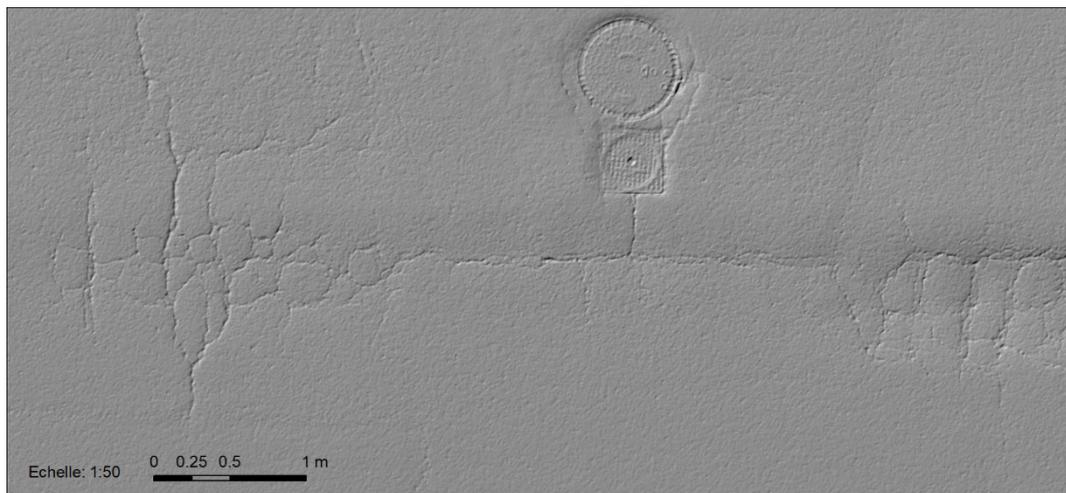


Figure 39 : Charles-Naine, état 0 (30.05.2018) : faïençage, fissures longitudinales et transversales, visibles dans le modèle numérique de surface (MNS)



Figure 40 : Charles-Naine, état 0 (30.05.2018) : faïençage, fissures longitudinales et transversales, visibles dans l'orthophoto

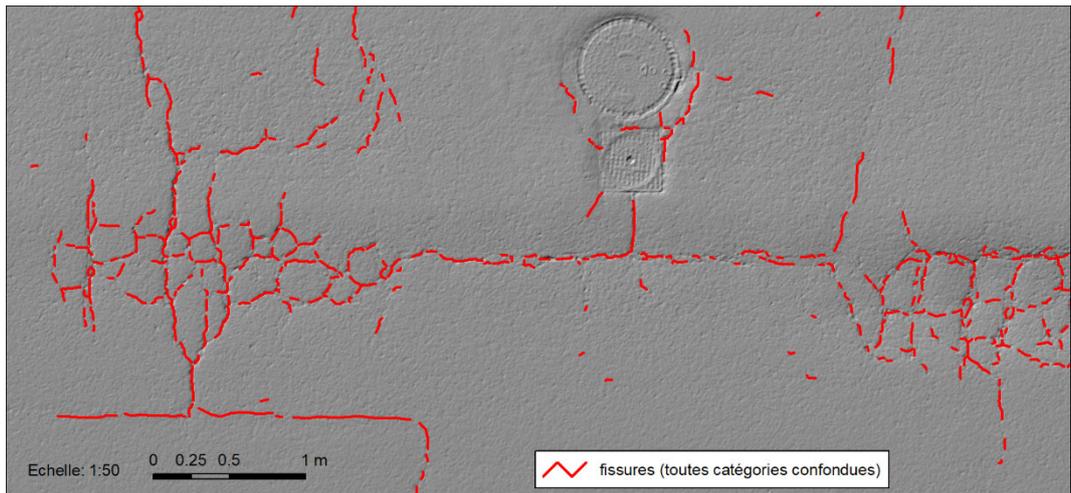


Figure 41 : Charles-Naine, état 0 (30.05.2018) : phénomènes de fissuration

À partir d'une certaine densité de fissures détectées, une surface de faïençage est définie autour d'elles. Les fissures qui se trouvent à l'intérieur des surfaces de faïençage sont classées comme étant des « fissures de faïençage ». La catégorie « fissures diverses » est attribuée au solde des fissures (Figure 42).

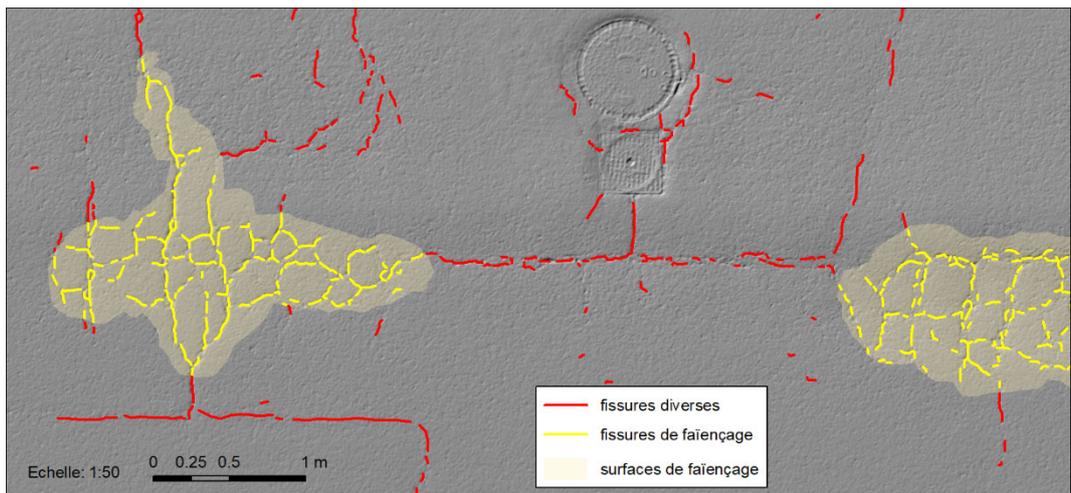


Figure 42 : Charles-Naine, état 0 (30.05.2018) : distinction entre fissures diverses et fissures de faïençage



Figure 43 : Charles-Naine, état intermédiaire 0.5 (12.10.2018) : fissures et faïençages colmatés à la lance thermique

Le système ARRPA recherche finalement dans l'orthophoto (Figure 43) les fissures colmatées à la lance thermique qui sont à leur tour vectorisées sous forme de polygones.

En résumé, ARRPA détecte et vectorise les objets de fissuration suivants (Figure 44) :

- fissures diverses (longitudinales, transversales, et autres)
- fissures de faïençage
- fissures colmatées
- surface de faïençage

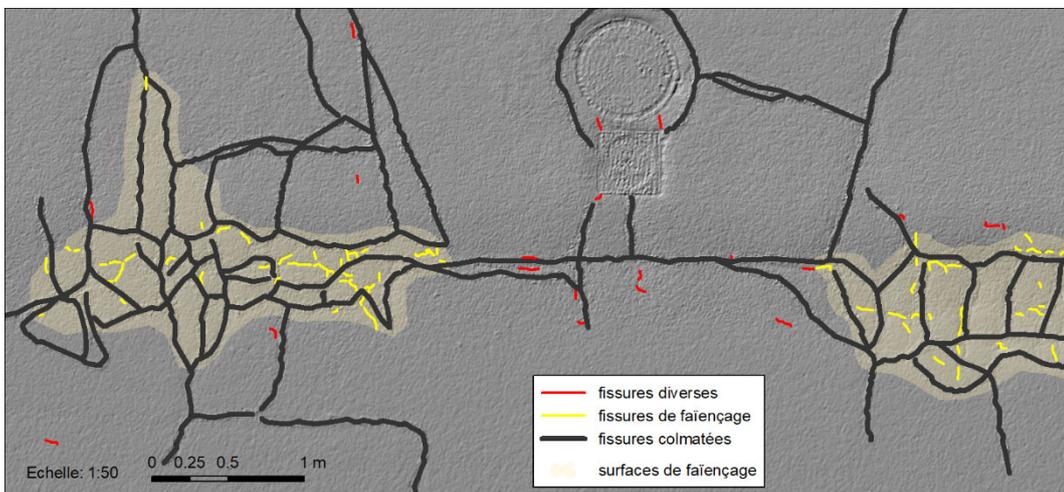


Figure 44 : Charles-Naine, état intermédiaire 0.5 (12.10.2018) : numérisation des fissures colmatées à la lance thermique

5.1.2 Statistiques

Du moment que les objets détectés sont enregistrés sous forme de géodonnées, il est possible d'extraire des statistiques sur toutes les formes de fissure, ainsi que sur les surfaces de faïençage du tronçon d'essai à l'étude (Figure 45).

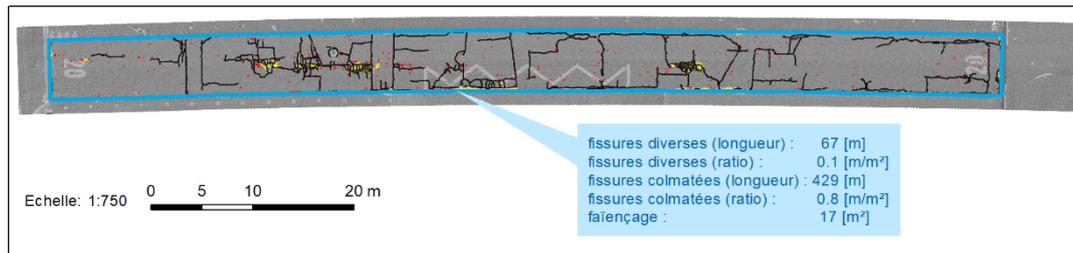


Figure 45 : Charles-Naine, état 1 (29.03.2019) : statistiques sur la fissuration

À cette information générale vient s'ajouter une statistique par grille qui facilite la visualisation de la répartition des fissures. La représentation de ces statistiques par grille peut prendre la forme d'une coloration uniforme de chaque cellule affectée par une dégradation (cellule rouge ; *Figure 46*), ou montrer une variation graduelle de couleur selon la sévérité de la dégradation (cellule jaune, orange ou rouge ; *Figure 47*).

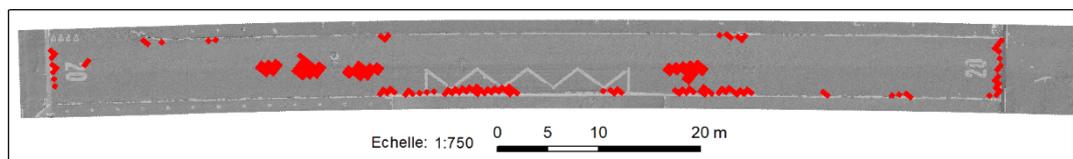


Figure 46 : Charles-Naine, état 1 (29.03.2019) : faïençage : statistiques par grille, valeur unique

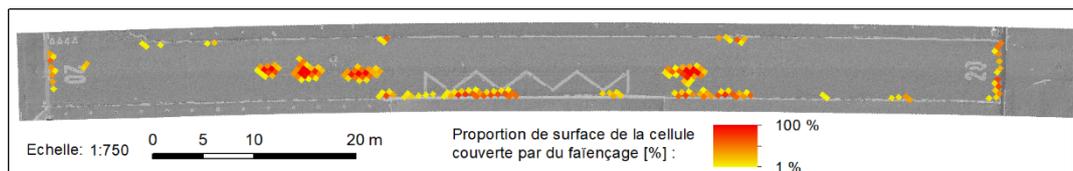


Figure 47 : Charles-Naine, état 1 (29.03.2019) : faïençage : statistiques par grille, valeur graduelle

5.1.3 Facteurs influençant la qualité de la détection et contrôles

Le système de détection des fissures s'adapte assez bien à la variation des types de revêtements, à la luminosité et exclut une part importante des artéfacts dus aux marquages routiers. Néanmoins, les seuils statistiques de sélection des fissures dans le MNS et dans l'orthophoto doivent être observés avec attention par l'opérateur et être, le cas échéant, adaptés après un premier calcul automatique.

À la suite de cette première étape, le résultat recalculé est encore une fois analysé afin d'éliminer manuellement les erreurs résiduelles provoquées par des facteurs environnementaux. Certaines solutions pourraient être apportées pour minimiser ces cas particuliers (Tab. 19).

Tab. 19 Facteurs affectant la détection automatique des fissures

Géodonnées de base concernées	Causes	Solutions
Objets linéaires très foncés dans l'orthophoto	Les trous et reliefs des grilles de collecte des eaux de surface et couvercles de chambres sont faussement détectés comme étant des fissures.	suppression manuelle ou utilisation d'un masque à partir d'une base de données des objets en question
	Les ombres d'objets linéaires (branches d'arbres, signalisation verticale) sont faussement détectés comme étant des fissures colmatées.	relevé par météo nuageuse (absence d'ombre) ou ajout d'un éclairage additionnel
	Les craquelures de peinture des passages pour piétons sont faussement détectées comme étant des fissures.	suppression manuelle
	forte humidité résiduelle et déchets	relevé par temps sec et après nettoyage de la chaussée
Trous linéaires dans le modèle numérique de surface	gravillonnage et déchets fissures colmatées par du sable	nettoyage de la chaussée

5.1.4 Résultats des relevés sur l'ensemble des tronçons

Après que l'accent a été mis sur la détection des fissures sur le tronçon Charles-Naine, les fissures ont aussi été détectées sur les autres tronçons auscultés.

Tab. 20 Synthèse des résultats de la détection de fissures

Tronçon		Charles-Naine	Commerce	Helvétie	Stavay-Mollondin
État de mesure		1	0	1	0
Date		29.03.2019	30.05.2018	29.03.2019	30.05.2018
Surface auscultée [m ²]		563	539	2'489	997
Fissures diverses	longueur de fissures [m]	65	2	491	215
	proportion de fissures par surface [m/m ²]	0.12	0.00	0.20	0.22
Fissures colmatées	longueur de fissures [m]	427	0	342	81
	proportion de fissures par surface [m/m ²]	0.76	0.00	0.14	0.08
Faïençage	surface de faïençage [m ²]	17	0	39	73

proportion de surface faïencée [%]	3.0	0.0	1.6	7.0
------------------------------------	-----	-----	-----	-----

Les calculs opérés sur tous les tronçons, dont les types de revêtement sont assez variés, ont montré le besoin d'adapter légèrement les seuils statistiques de détection des fissures, mais au final, n'ont révélé aucun problème de fausse détection ou d'oublis.

5.1.5 Répétabilité des mesures

Afin de tester la fidélité du système dans sa capacité à détecter des fissures, la production des géodonnées de base et la détection des fissures a été réalisée à double, à partir de deux jeux d'images différents acquis le même jour, sur le relevé de l'état 1 (29.03.2019) du tronçon d'essai Charles-Naine.

Tab. 21 Répétabilité de la détection des fissures (état 1 ; deux mesures du 29.03.2019)

Tronçon		Charles-Naine		Moyenne	Écart à la moyenne	Écart relatif
Lot d'images		1 ^{er} jeu d'images	2 ^{ème} jeu d'images			
Surface auscultée [m ²]		563	563			
Fissures diverses	longueur de fissures [m]	67.1	63.4	65.3	1.9	2.9 %
Fissures colmatées	longueur de fissures [m]	429.3	424.1	426.7	2.6	0.6 %
Faïençage	surface de faïençage [m ²]	16.7	18.1	17.4	0.7	4.0 %

5.1.6 Mise en perspective avec un relevé manuel

En septembre 2019, le tronçon d'essai de Charles-Naine a fait l'objet d'un relevé manuel de la fissuration. Des quantités métriques ont été déterminées à l'aide d'une roulette. Le *Tab. 22* présente la comparaison avec le système ARRPA.

Tab. 22 Relevé de fissures manuel et avec ARRPA sur le tronçon Charles-Naine

Tronçon		Charles-Naine	Charles-Naine	Différence	Proportion
Type de relevé		Manuel (roulette)	ARRPA		
Date		10.09.2019	29.03.2019		
Fissures diverses	longueur de fissures [m]	86	65	- 21	+25 [%]
Fissures colmatées	longueur de fissures [m]	460	427	- 33	+7 [%]
Faïençage	surface de faïençage [m ²]	9	17	+ 8	-50 [%]

L'ensemble des résultats sera commenté aux chapitres 7.4, 7.5 et 7.6.

5.1.7 Évolution temporelle

Les statistiques, par section ou par grille, permettent de comparer les quantités de dégradations entre deux états et de calculer l'évolution entre les temps t et $t+1$. Ce faisant, il est même possible de directement mettre en évidence où se situent les variations. C'est grâce à cette opération qu'il a été possible de mettre en évidence des fissures apparues durant l'hiver 2018-2019 sur le tronçon Charles-Naine.

Notons au passage que malgré une présentation détaillée du présent projet de recherche au voyer-chef de la Ville de La Chaux-de-Fonds, et donc une entente sur le fait que les quatre tronçons d'essai du projet ne devaient faire l'objet d'aucun entretien entre les deux états de mesures (printemps 2018 – printemps 2019), des cantonniers du Service des Espaces Publics (voirie) ont pratiqué un colmatage de fissures à la lance thermique en juin 2018, donc après le relevé de l'état 0 du 30 mai 2018. Afin de pouvoir comparer l'évolution de ce tronçon durant l'hiver 2018-2019, un relevé supplémentaire d'état intermédiaire a été réalisé en octobre 2018 (état 0.5). C'est ce relevé qui a été pris en compte comme état initial pour évaluer l'évolution temporelle de la fissuration de ce tronçon.

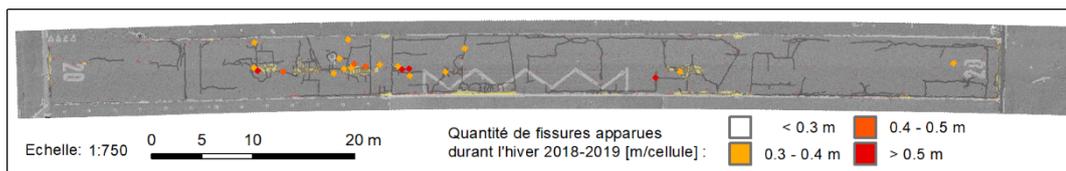


Figure 48 : Charles-Naine, apparition de nouvelles fissures entre l'état intermédiaire 0.5 (12.10.2018) et l'état 1 (29.03.2019)



Figure 49 : Charles-Naine, état intermédiaire 0.5 (12.10.2018) : présence uniquement de fissures colmatées

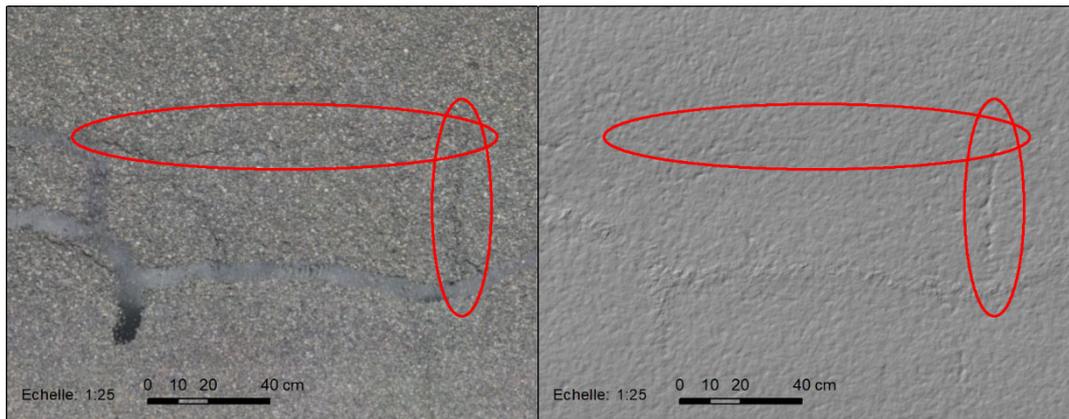


Figure 50 : Charles-Naine, état 1 (29.03.2019) : apparition d'une nouvelle fissure

5.1.8 Durée du processus de détection avec ARRPA

Les valeurs moyennes des temps de calculs pour les tronçons d'essai de cette étude sont présentées dans le *Tab. 23*.

Tab. 23 Durée de calcul de la détection des fissures

Étapes de travail	Description	Durée
Calcul automatique	Configuration informatique utilisée : disque SSD, RAM 64 Go, processeur Intel Xeon, carte graphique GeForce GTX 1080	3 à 12 heures selon la surface du tronçon, à répéter en cas de correction des seuils de détection
Tâches manuelles	contrôle des seuils de détection, corrections manuelles	¼ - ½ jour

5.1.9 Corrélation faïençage / flache / ornière

La méthode ARRPA est dotée d'une fonction de détection et de quantification des déformations permanentes qui a été appliquée au tronçon d'essai Charles-Naine. À la *Figure 51*, la zone de faïençage à droite de l'image est superposée à une ornière manifeste, tandis que celle de gauche ne l'est pas ou pas encore.

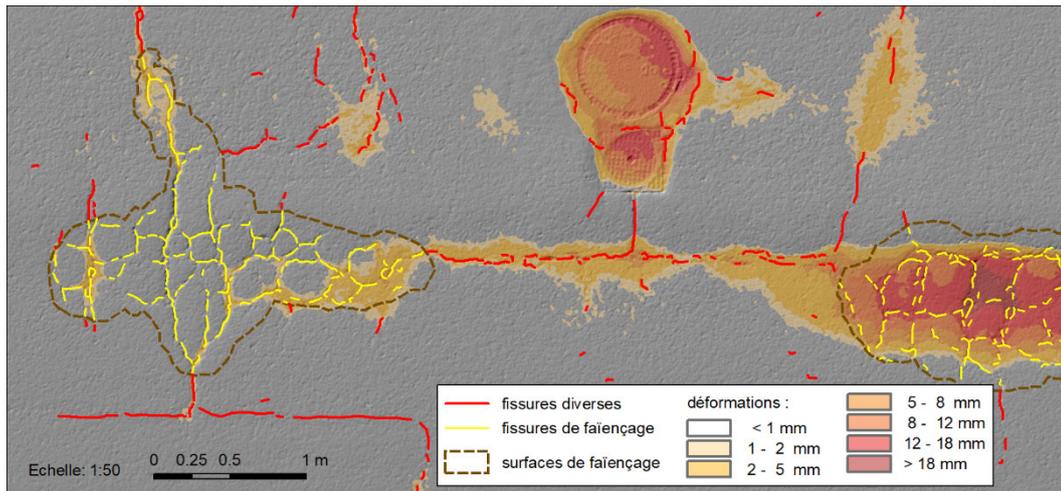


Figure 51 : Charles-Naine, état 0 (30.05.2018) : phénomènes de fissuration et de faïençage en combinaison ou non avec des zones de déformation permanente

5.1.10 Observation d'une remontée de fissure

Au printemps 2011, le Service technique de la Ville de La Chaux-de-Fonds s'était inquiété de voir apparaître des fissures transversales sur la couche de base (AC EME) posée une année plus tôt sur le tronçon Charles-Naine. Avant de réaliser la pose de la couche de roulement, le Service technique avait demandé au Service géomatique de la Ville de réaliser un relevé de ces fissures à l'aide de sa station totale (théodolite, *Trimble VX*) capable de prendre des photographies puis d'en générer des orthophotos. Ce procédé ne permettant d'avoir qu'une vue limitée à une portion de la surface (zone visible depuis l'emplacement de la station totale), six petites orthophotos, ciblées sur les fissures transversales, avaient été réalisées.

Grace à ce relevé datant de 2011, une comparaison entre la position des fissures de la couche de base à celle de la couche de roulement mesurée en 2018, a été exploitée. Pour chaque fissure transversale de la couche de base, une paire de fissures est apparue sur la couche de roulement, disposées de part et d'autre de la fissure d'origine.

Ce phénomène pourrait avoir été provoqué par la pose d'un treillis dans le but d'éviter la remontée de l'ancienne fissure. Les archives du Service technique ne sont pas suffisamment complètes pour confirmer cette hypothèse.

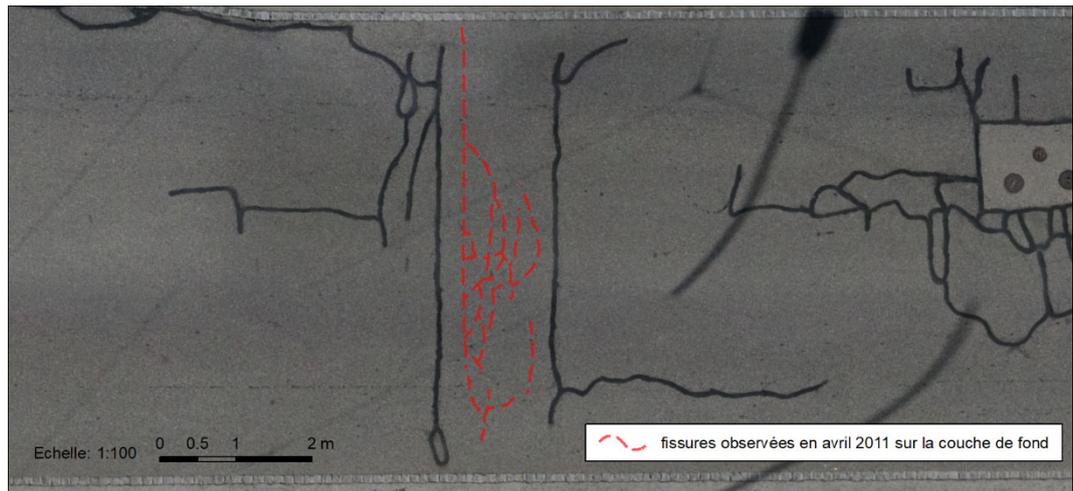


Figure 52 : Charles-Naine : fissures relevées sur la couche de fond en avril 2011 superposées à l'orthophoto du relevé d'état intermédiaire 0.5 (12.10.2018)

Quoi qu'il en soit, cette anecdote permet de montrer l'utilité d'acquérir des géodonnées même si elles ne sont pas exploitées dans l'immédiat.

5.2 Perte de gravillons

5.2.1 Principe de la détection de la perte de gravillons

Géométriquement parlant, la perte de grains se matérialise par des trous, généralement de formes circulaires, laissés soit par l'empreinte d'un gravillon qui s'est entièrement détaché de l'enrobé, soit par des fragments de gravillons brisés.



Figure 53: Détail de perte de gravillons, Commerce (27.08.2019)

Le système ARRPA détecte et quantifie le nombre de ces trous à partir du modèle numérique de surface. Pour cette opération, la résolution par défaut de 2 à 3 [mm] s'avère insuffisante. Il est nécessaire de travailler à une résolution de 1 [mm]. Afin de ne pas dépendre du type de revêtement et même des variations de revêtements sur un même tronçon ausculté, le système établit une statistique de la texture sur une surface très

localisée (quelques centimètres carrés). Les plus grandes aberrations déduites de cette statistique sont considérées comme étant des trous laissés par des gravillons détachés.

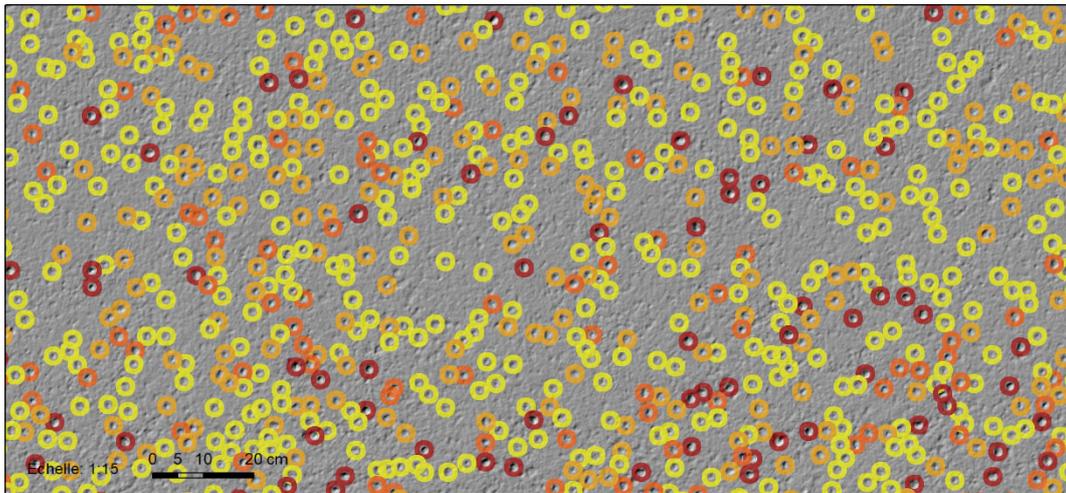


Figure 54 : Détection de gravillons perdus, coloration en fonction de leur profondeur, Commerce, état 2 (10.07.2019)

5.2.2 Statistiques

Les statistiques permettent, par exemple, de quantifier le nombre de gravillons perdus par section. Mais ces sections pouvant varier en surface selon la manière dont elles ont été définies, le nombre de gravillons perdus par section n'est pas très utile pour analyser cette dégradation. Il est plus utile de quantifier le nombre de gravillons perdus par unité de surface [gravillons/m²].

Dans le cas de la rue du Commerce, des sections ont été découpées arbitrairement tous les 20 mètres le long du tronçon, puis coupées en deux dans le sens de l'axe de la chaussée (une seule voie de circulation) (Figure 55).

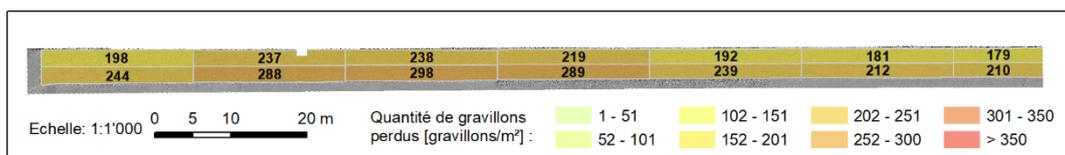


Figure 55 : Commerce (état 0, 30.05.2018) : statistiques par section [gravillons/m²]

Mais cette répartition arbitraire n'a pas permis de mettre en évidence un phénomène particulier de la répartition de la perte de gravillons. C'est seulement à l'aide de la statistique par grille qu'a été mise en lumière une plus forte densité de gravillons perdus dans les bandes de roulement (Figure 56).

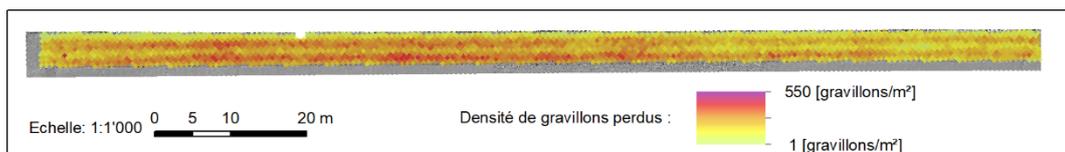


Figure 56 : Commerce (état 0, 30.05.2018) : statistiques par grille [gravillons/m²]

Le tronçon Stavay-Mollondin est un carrefour composé de différents types de revêtements présentant des niveaux de dégradation par perte de gravillons très variables. Sur ce tronçon, les sections ont été délimitées manuellement en fonction de chaque revêtement.

Ainsi, les variations de la densité de gravillons perdus peuvent être attribuées à une qualité particulière de revêtement.

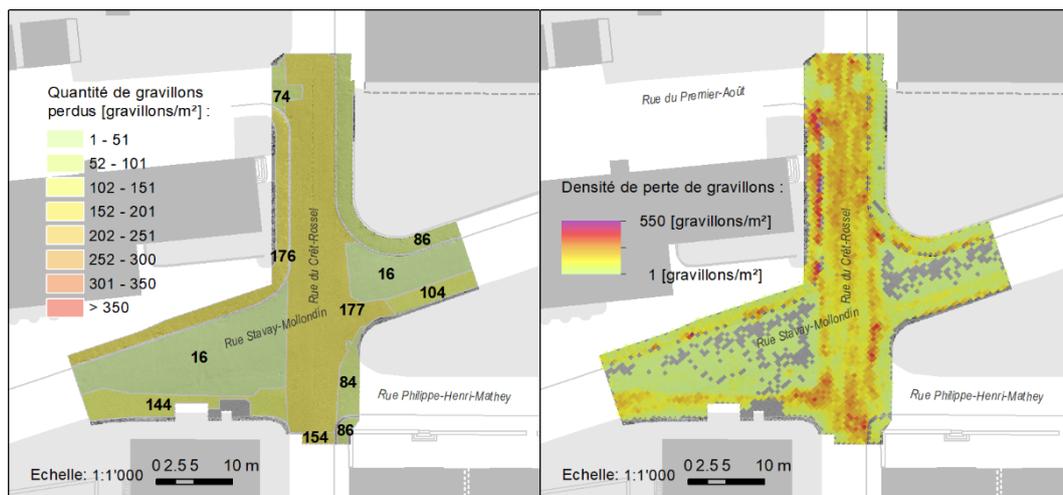


Figure 57 : Stavy-Mollondin (état 0, 30.05.2018) : statistiques par sections et par grille

5.2.3 Résultats des relevés sur l'ensemble des tronçons

Bien que ce projet se soit concentré sur la perte de gravillons sur les tronçons Commerce et Stavy-Mollondin, cette dégradation a aussi été auscultée sur les deux autres tronçons.

Tab. 24 Synthèse de la détection de la perte de gravillons

Tronçon	Charles-Naine	Commerce	Helvétie	Stavy-Mollondin
État de mesure	0	2	1	0
Date	30.05.2018	10.07.2019	29.03.2019	30.05.2018
Total de surface auscultée [m ²]	563	539	2'489	997
Densité de gravillons perdus [gravillons/m ²]	74	293	59	110*

* densité moyenne de la totalité du croisement

Les chiffres présentés dans Tab. 24 ont été calculés avec exactement les mêmes paramètres (seuils de détection) sur les quatre tronçons. Les résultats obtenus montrent de la cohérence avec ce qui est observé in situ.

5.2.4 Contrôle de pertinence et répétabilité des mesures

Afin de vérifier la pertinence des quantités de gravillons perdus détectés par le système ARRPA, deux opérations de dénombrement manuel des trous visibles sur le terrain ont été réalisées.

Quatre périmètres d'une surface de 1 x 1 [m], identifiés par les lettres A à D, ont été délimités sur le tronçon de la rue du Commerce. Ils ont été matérialisés au sol par un pourtour à la craie ainsi qu'avec des clous d'arpentage dans leurs angles afin d'assurer la pérennité de leur marquage.

Sur chacun de ces périmètres, le nombre de trous laissés par des gravillons détachés a été dénombré manuellement à l'aide de fèves (Figure 58). Puis un relevé avec le système

ARRPA a permis de cartographier l'emplacement de ces quatre périmètres et de relever la position de chaque fève représentant des gravillons perdus.



Figure 58 : 2ème dénombrement manuel de perte de gravillons, Commerce (27.08.2019)

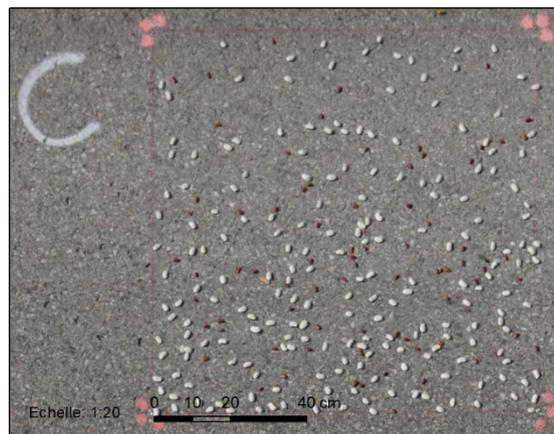


Figure 59 : Orthophoto du périmètre C, 2^{ème} dénombrement manuel de perte de gravillons, Commerce (27.08.2019)

Lors d'un premier comptage manuel, seuls les trous de tailles importantes ont été pris en compte (grosses fèves blanches). Les petits trous laissés par de petits gravillons détachés ou cassés n'ont pas été comptabilisés. Même accroupis autour d'un carré de 1 x 1 mètre, une part de subjectivité intervenait dans le choix des éléments à prendre en compte.

Lors des calculs, il s'est rapidement avéré qu'ARRPA est capable de détecter des pertes de grains plus petits (env. Ø 5-6 mm) que ceux qui avaient été repérés à l'aide des grosses fèves blanches.

Dans le but d'affiner ce contrôle, une deuxième opération de comptage manuel a été effectuée. Cette fois, les trous comptés ont été classés en deux catégories. Une première, marquée avec de grosses fèves blanches, a servi à quantifier les trous clairement associés à la perte complète d'un gros grain, alors que la seconde, marquée avec des petites fèves rouges, a permis de repérer de plus petits trous, plus difficilement identifiables comme étant des empreintes de gravillons détachés ou cassés. Une fois encore, le choix opéré pour chacun de ces trous a été empreint de subjectivité.

D'ailleurs, la disparité du nombre de trous comptabilisés entre les deux relevés, espacés d'à peine plus d'un mois, présentée dans le *Tab. 25*, montre à quel point il n'est pas évident de définir, même sur le terrain, ce qui est une perte de gravillon.

Tab. 25 Relevés manuels de perte de gravillons

Carré 1x1 [m]	Taille des trous	A	B	C	D
1 ^{er} décompte manuel (10.07.2019)	très grands trous	100	115	66	139
2 ^{ème} décompte manuel (27.08.2019)	grands et très grands trous	128	215	209	231
	petits trous	164	133	77	98
	total	292	348	286	329
Différence entre les relevés manuels	différence du nombre de grands et très grands trous	28	100	143	92

Chaque relevé ARRPA ayant été opéré au moins à double (deux acquisitions d'images réalisées le même jour), le processus complet, de la production du modèle numérique de terrain à la détection de la perte de grains, a, lui aussi, été calculé à double pour le relevé du tronçon de la rue du Commerce du 10 juillet 2019 (état 2). Les résultats obtenus automatiquement ont été comparés au nombre total de trous relevés lors du 2^{ème} relevé manuel (*Tab. 26*). Les écarts de l'ordre de grandeur de $\pm 10\%$ peuvent être considérés comme étant acceptables en comparaison à la difficulté de définir plus précisément, même lors d'un relevé manuel, quels sont les trous qui doivent être pris en compte.

Tab. 26 Comparaison entre relevés manuel et automatique de la perte de gravillons

Carré 1x1 [m]	Détail	A	B	C	D
2 ^{ème} décompte manuel (27.08.2019)	total	292	348	286	329
Relevé ARRPA (10.07.2019)	1 ^{er} jeu d'images	260	304	272	368
	2 ^{ème} jeu d'images	272	300	253	360
	moyennes des deux jeux d'images	266	302	263	364
	écarts à la moyenne entre les deux jeux d'images, en nombre de gravillons	6	2	10	4
	écarts à la moyenne entre les deux jeux d'images, en [%]	2	1	4	1
différences entre le relevé manuel et le relevé ARRPA	nombre de gravillons	26	46	24	-35
	[%]	9	13	8	11

L'ensemble des résultats sera commenté au chapitre 7.7.

5.2.5 Facteurs influençant la qualité de la détection

Initialement, tous les relevés ARRPA de l'état 1, des quatre tronçons d'essai, ont été réalisés le plus tôt possible à la fin de l'hiver 2019, en l'occurrence le 29 mars. Or, à cette

époque de l'année, les revêtements sont recouverts de poussière et de petits cailloux qui se sont accumulés tout au long de l'hiver. Souvent, au courant du printemps, de fortes pluies parviennent à laver naturellement la surface des chaussées.



Figure 60 : Trous colmatés par de petits granulats, Commerce, 01.05.2019

Pour la détection automatique de perte de gravillons, ce phénomène est contraignant et peut, le cas échéant, considérablement fausser le résultat. Lorsque du sable et même de petits granulats viennent se nicher dans les trous (*Figure 60*), ceux-ci ne peuvent pas être correctement détectés. Cela a pour conséquence de diminuer, parfois drastiquement, les valeurs statistiques calculées.



Figure 61 : Commerce, état 0, 30.05.2018 : trous de gravillons détachés bien identifiables



Figure 62 : Commerce, état 1, 29.03.2019 : trous de gravillons détachés colmatés par des granulats

Ainsi, par exemple, le nombre de gravillons perdus détectés lors du relevé de l'état 1 (29.03.2019) du tronçon Commerce (Figure 63) montrait la moitié de perte par rapport au relevé de l'état 0 (30.05.2018) du même tronçon (Figure 55).

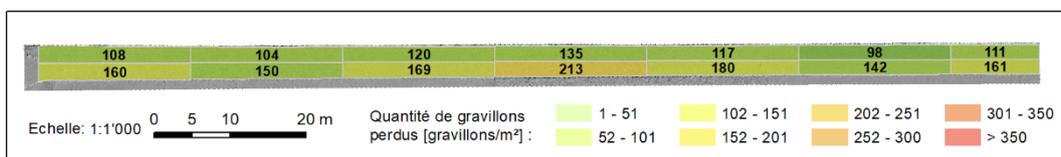


Figure 63 : Commerce (état 1, 29.03.2019) : statistiques par section [gravillons/m²]

Un relevé de contrôle (état 1.5), réalisé le 1^{er} mai 2019, a montré exactement le même résultat.

Par contre, un nouveau relevé (état 2), réalisé le 10 juillet 2019 après au moins une période de fortes pluies, a présenté un résultat nettement plus cohérent (Figure 64).

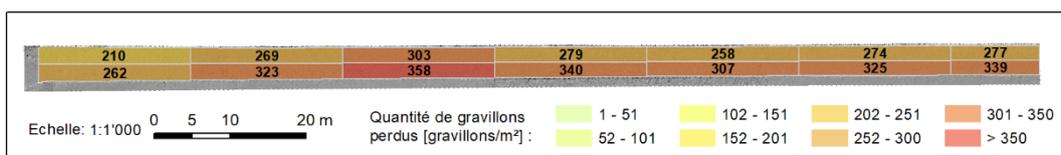


Figure 64 : Commerce (état 2, 10.07.2019) : statistiques par section [gravillons/m²]

De plus, avant ce relevé ARRPA du 10 juillet 2019, une moitié du tronçon a été nettoyée à la brosse afin de constater une éventuelle différence par rapport à la deuxième moitié restée sans nettoyage mécanique (seulement nettoyée naturellement par la pluie).

Le résultat de cette comparaison ne montre aucune différence notable entre la moitié nettoyée et la moitié sans nettoyage au travers des calculs de détection automatique. A ce stade de nos connaissances, seul le nettoyage naturel par les fortes pluies semble avoir une influence sur la « propreté » de la surface. Un nettoyage à la brosse est toutefois recommandable si un relevé devait avoir lieu à la fin de l'hiver lorsque les trous sont susceptibles de loger du matériau non lié.

5.2.6 Évolution temporelle

La comparaison (différence, soustraction) entre les statistiques par grille de deux états de mesure permet de mettre en évidence l'évolution de la dégradation. Dans le cas du tronçon

Commerce, force est de constater que l'aggravation de l'arrachement des grains s'est principalement produite dans les bandes de roulement (*Figure 65*).

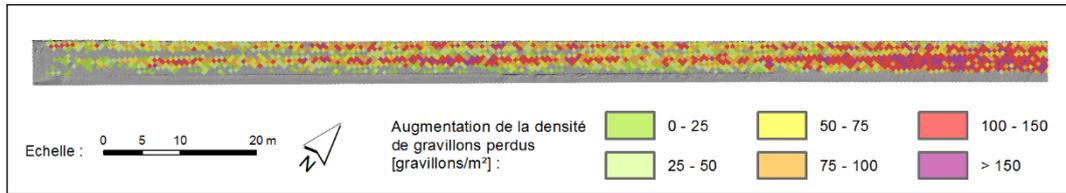


Figure 65 : Commerce : évolution entre état 0 (30.05.2018) et état 2 (10.07.2019), statistique par grille

Une fois ce constat général effectué, on observera les données en détail, par exemple en se focalisant sur les cellules de grille où la différence quantitative met en évidence une forte aggravation annuelle (*Figure 66*).

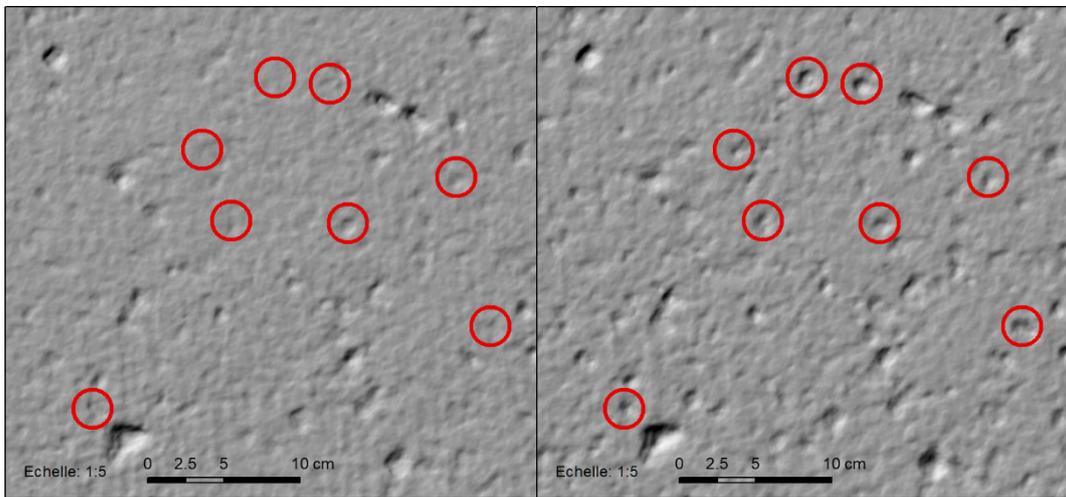


Figure 66 : Apparition de nouveaux gravillons perdus, Commerce, à gauche état 0 (30.05.2018), à droite état 2 (10.07.2019)

5.2.7 Durée du processus de détection avec ARPPA

Les valeurs moyennes des temps de calculs pour les tronçons d'essai de cette étude sont présentées dans le *Tab. 27*.

Tab. 27 Durée de calcul de la détection de la perte de gravillons

Étapes de travail	Description	Durée
Calcul automatique	Configuration informatique utilisée : disque SSD, RAM 64 Go, processeur Intel Xeon, carte graphique GeForce GTX 1080	6 à 12 heures selon la surface de chacun des 4 tronçons auscultés
Tâches manuelles	contrôle et suivi des calculs	1 heure

5.3 Pelades et nids de poule

5.3.1 Principe de la détection des pelades et des nids de poule

Le système ARRPA détecte les pelades et nids de poule à partir de leurs arrêtes dans le modèle numérique de surface (MNS). Celles-ci sont initialement définies comme étant des polygones fermés, qui sont ensuite converties en objets surfaciques. Les objets ainsi détectés sont ensuite classés en fonction de la texture de leur surface dans les catégories « pelades » ou « nids de poule » (*Figure 18* et *Figure 19*).

5.3.2 Cas concret de la rue de l'Helvétie

Du fait que sa couche de roulement est particulièrement fragile, le tronçon de la rue de l'Helvétie a répondu aux attentes de ce projet en présentant une progression bien marquée de sa dégradation type. Ce tronçon ayant été réparé seulement quelques jours avant le relevé ARRPA de l'état 0 (04.06.2018), il ne présentait plus aucune dégradation type à ce moment-là (*Figure 11* et *Figure 12*). Par contre, moins d'une année plus tard, le relevé de l'état 1 du 29.03.2019 montre l'apparition de pelades, notamment à l'endroit d'un ancien marquage de passage pour piétons.



Figure 67 : Helvétie, orthophoto état 1 (29.03.2019) : apparition de pelades

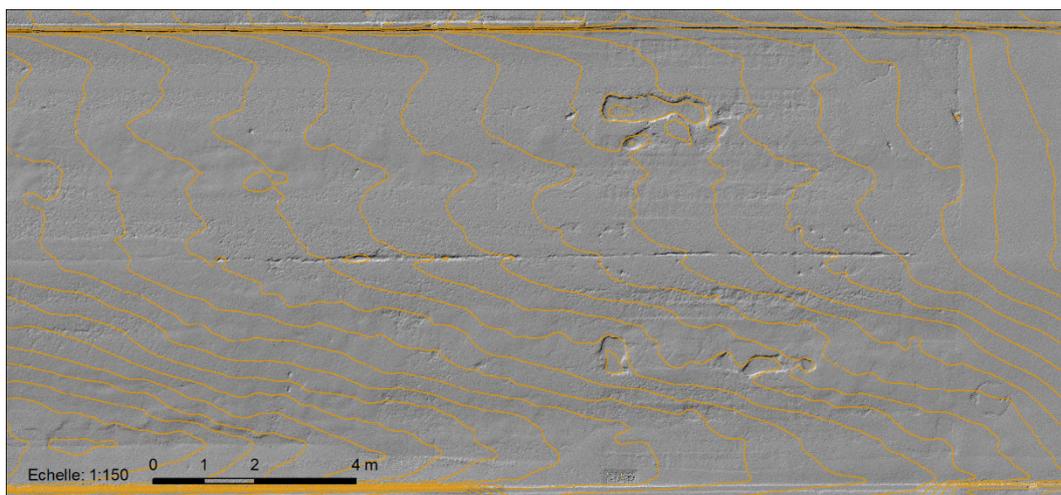


Figure 68 : Helvétie, MNS état 1 (29.03.2019) : apparition de pelades

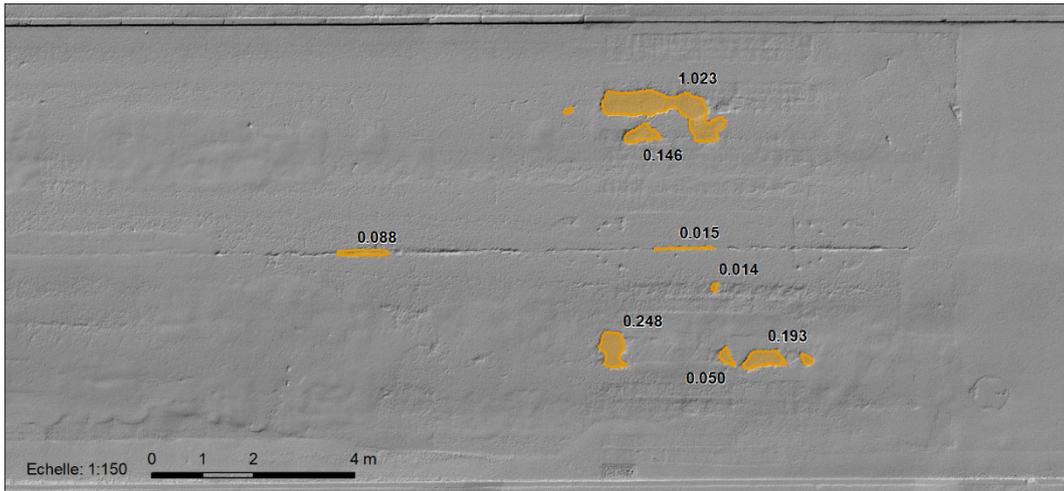


Figure 69 : Pelades en forme de polygones vectoriels avec affichage de leur surface [m²]

5.3.3 Statistiques

À l'aide des statistiques par section, on calcule le total de surface de pelades par section (Figure 70). Mais étant donné que les surfaces des sections ne sont pas elles-mêmes constantes (par exemple, si leur longueur a été fixée, la largeur de la chaussée peut être variable), il peut paraître opportun de déterminer la proportion [%] de surface de pelade par rapport à la surface totale de la section (Figure 71). L'analyste s'aidera de ces deux valeurs au choix.

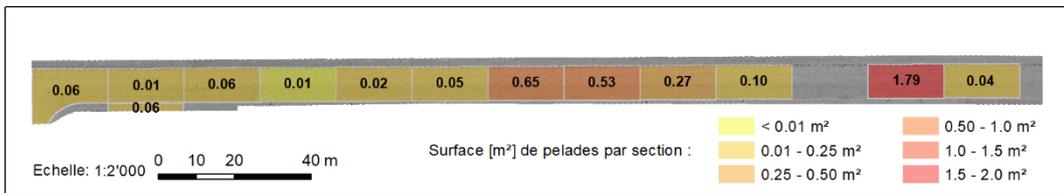


Figure 70 : Surface [m²] de pelade par section de 20 m

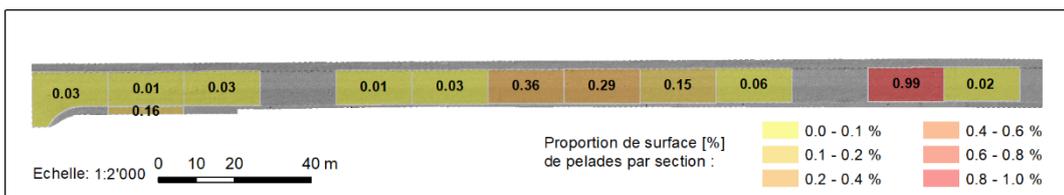


Figure 71 : Proportion [%] de pelade par section de 20 m

La statistique par grille sera utilisée pour mettre en évidence les cellules en contact avec une pelade (Figure 72).

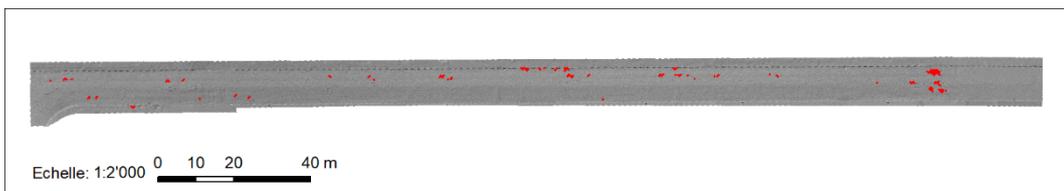


Figure 72 : Statistique binaire par grille : présence ou absence de pelade

Mais cette information ne comporte aucune indication de l'ampleur du dégât. Si une pelade de 0.10 m² est présente dans une cellule de la grille, celle-ci s'affichera en rouge sans mentionner que la pelade y est minime. Pour remédier à cet inconvénient, on représentera la grille en fonction de la surface de pelade [m²] par cellule de grille ou en fonction de la proportion de cellule couverte par une surface de type pelade [%] (Figure 73).

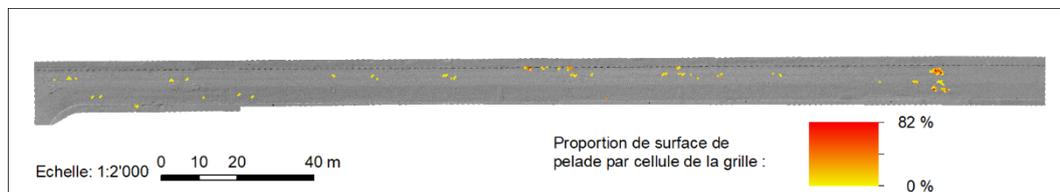


Figure 73 : Statistique par grille : graduation selon la proportion de surface de pelade

5.3.4 Facteurs influençant la qualité de la détection et contrôles

Au vu de la grande taille des objets à détecter en comparaison de la finesse des géodonnées de base à disposition, ces objets sont faciles à détecter et il n'existe pas de paramètre de calcul à contrôler. Cependant, le calcul étant basé sur la détection des arrêtes, un bref contrôle manuel s'impose pour les situations où la couche de surface serait particulièrement mince et ne générerait pas d'arrête franche de deux ou trois centimètres.

Dans le cas du tronçon d'essai Helvétie, les fissures de joint s'étant particulièrement élargies, elles sont détectées en tant que pelades (Figure 69). Ces objets peuvent être supprimés durant un contrôle manuel ou supprimés automatiquement en introduisant dans l'algorithme une condition de surface minimale en-dessous de laquelle un objet détecté n'est pas une dégradation de type pelade.

5.3.5 Résultats des relevés sur l'ensemble des tronçons

Après avoir développé la détection de nids de poule et de pelades sur les tronçons témoins Helvétie et Stavay-Mollondin, les mêmes paramètres ont été appliqués aux deux autres tronçons. Ceux-ci étant exempts de ce type de dégradation, cela a permis d'apporter la preuve négative qu'aucune fausse dégradation n'était détectée par ARRPA.

Tab. 28 Synthèse des résultats de la détection des pelades et nids de poule

Tronçon		Charles-Naine	Commerce	Helvétie	Stavay-Mollondin
État de mesure		1	1	1	1
Date		29.03.2019	29.03.2019	29.03.2019	29.03.2019
Surface auscultée [m ²]		563	539	2'489	997
Pelades	surface de pelade [m ²]	0.0	0.0	3.7	1.1
	proportion de surface de pelade [%]	0.0	0.0	0.1	0.1
Nids de poule	surface de nids de poule [m ²]	0.0	0.0	2.7	2.8
	quantité de nids de poule [ndp]	0	0	2	15
	surface moyenne des nids de poule [m ²]	0.0	0.0	1.3	0.2

L'ensemble des résultats sera commenté au Chapitre 7.

5.3.6 Évolution temporelle

L'évolution des nids de poule est plus intéressante à observer sur le tronçon Stavay-Mollondin que sur le tronçon Helvétie.

À l'aide des statistiques par grille (*Figure 74*), nous avons constaté que certains nids de poule ont disparus entre les deux états de mesure. Une nouvelle fois, des réparations ont été effectuées par les cantonniers de la Ville de La Chaux-de-Fonds, et ce malgré toutes nos demandes (en haut lieu) de non intervention pour les besoins du projet. Tout porte à croire que les habitudes des cantonniers ne souffrent d'aucune exception.

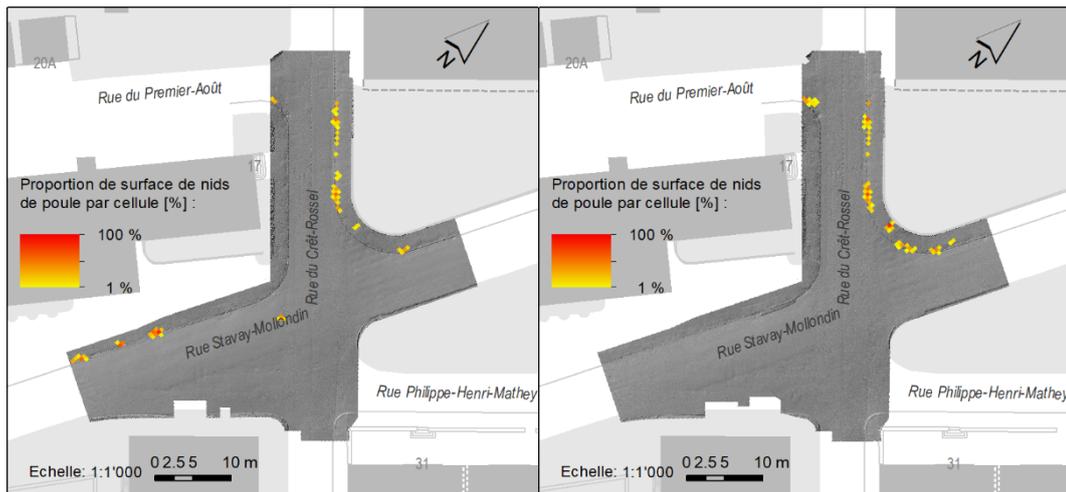


Figure 74 : Stavay-Mollondin : statistiques par grille des nids de poule, état 0 (30.05.2018) à gauche, état 1 (29.03.2019) à droite

Néanmoins, on calculera l'accroissement entre les états 0 et 1 des surfaces de nids de poule à l'aide des statistiques par grille (*Figure 75*). Une fois cette information connue, le détail de chaque cas d'agrandissement de nids de poule (*Figure 76* et *Figure 77*) renseigne la cinétique du processus, qu'il serait intéressant de suivre sur une plus longue période.

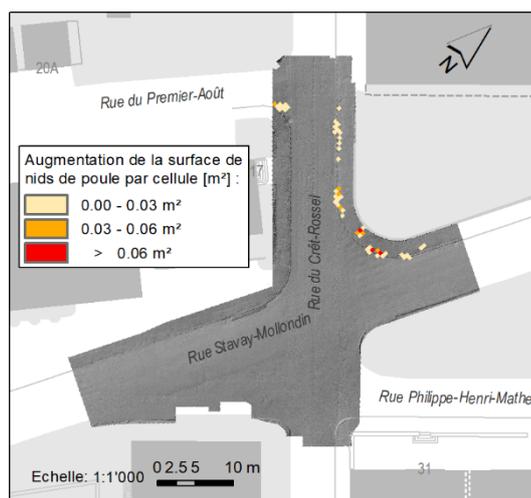


Figure 75 : Stavay-Mollondin : statistiques par grille : accroissement des surfaces de nids de poule entre état 0 (30.05.2018) et état 1 (29.03.2019)

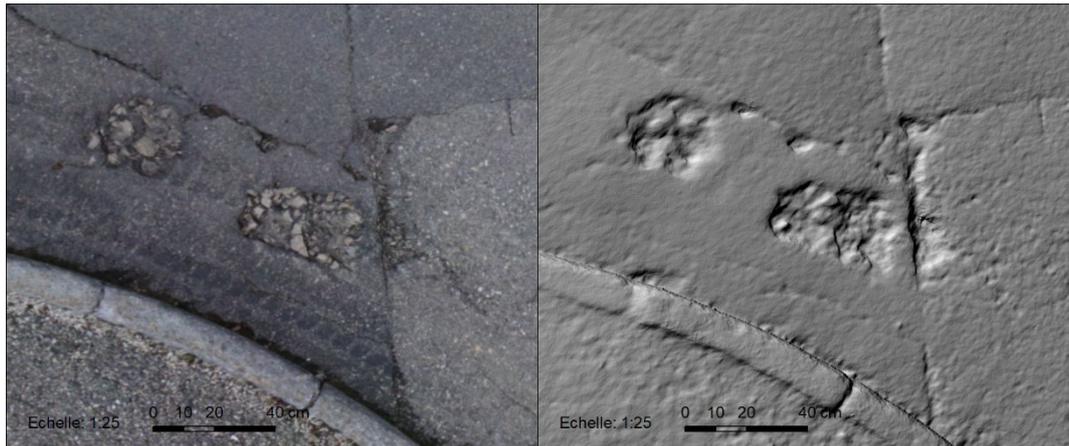


Figure 76 : Stavay-Mollondin, état 0 (30.05.2018) : nids de poule d'origine

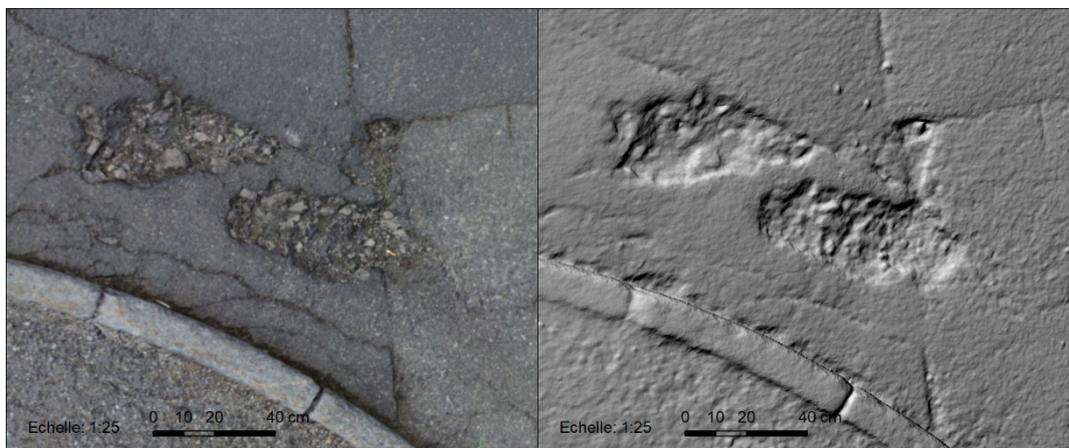


Figure 77 : Stavay-Mollondin, état 1, (29.03.2019) : nids de poule plus étendus

5.3.7 Durée du processus de détection avec ARRPA

Les valeurs moyennes des temps de calculs pour les tronçons d'essai de cette étude sont présentées dans le *Tab. 29*.

Tab. 29 *Durée de calcul de la détection des pelades et nids de poule*

Étapes de travail	Description	Durée
Calcul automatique	Configuration informatique utilisée : disque SSD, RAM 64 Go, processeur Intel Xeon, carte graphique GeForce GTX 1080	env. 2 heures
Tâche manuelle	bref contrôle visuel	1 heure

6 Relevés visuels

6.1 Relevés visuels I_1

La méthode de relevé visuel appliquée est celle décrite dans la norme VSS 40 925b [1]. Les quatre tronçons ont été relevés par trois différents observateurs : un employé du Service technique de la Ville de La Chaux-de-Fonds, Michel Acquadro pour le projet et Laure Chastan pour ERTEC.

Tab. 30 Indice I_1 de relevé d'état visuel

Tronçon d'essai	Relevé visuel 2016	Relevé projet 2018	Relevé projet 2019	Relevé ERTEC 2019
Stavay-Mollondin	1.4 - 2.5	1.6	1.6	2.6
Charles-Naine	1.3	2.1	2.1	1.8
Helvétie	2.5	2.0	2.0	-
Commerce	0.6	1.8	1.8	0.6

Ce résultat d'ensemble est difficile à interpréter tant les indices I_1 diffèrent en fonction des observateurs et aussi à cause des réparations de fissures et nids de poule survenues entre 2016 et 2019. Le colmatage des fissures n'améliore pas la valeur d'état du critère « fissure ». Les nids de poule n'influencent que très peu la résultante I_1 car cette dégradation est ponctuelle et ne demande qu'une réparation locale et non le renouvellement de tout un secteur d'entretien.

Partant de là, la grande dispersion des résultats est bien réelle et ne peut être mise sur le compte des quelques pontages de fissure et rebouchages de nid de poule. Une statistique grossière sur 4 relevés, 3 opérateurs et sur une période de 4 ans, aboutit à un écart à la moyenne de 30% pour le carrefour Stavay-Mollondin, de 27% pour le tronçon Charles-Naine et de 50% pour le tronçon Commerce. Remarquons que pour ce dernier, le moins reproductible, le relevé ne porte que sur une seule dégradation à savoir, la perte de gravillons.

6.2 Le relevé détaillé

Le 27 août 2019, un relevé détaillé visuel des dégradations a été réalisé selon la norme VSS 40 925b [1] sur trois des quatre tronçons (la rue de l'Helvétie était en travaux). La gravité et l'étendue de chaque dégradation est déterminée (Tab.1, VSS 40 925b [1]) et de ce relevé détaillé résultent des données qui sont transformées en valeurs (indices) pour les groupes principaux de dégradation. Il s'agit alors d'évaluer dans leur ensemble les différentes caractéristiques de chaque groupe (surface glissante, dégradations du revêtement, déformations du revêtement, dégradations structurelles, réparations). La norme précise que lorsque les dégradations rencontrées sont de gravités et d'étendues différentes pour un même groupe de dégradations, la plus grave devra alors être considérée pour l'évaluation du groupe (dans des circonstances particulières, il est également possible de choisir des classes plus basses).

6.2.1 Rue du Commerce

Tab. 31 Relevé détaillé de la Rue du Commerce

Groupes Principaux	Gravité	Etendue	Indice
Types de dégradations			
Dégradations du revêtement	1	3	0.6
Perte de gravillons	1	3	
I1			0.6

La perte de gravillons observée à l'œil nu n'est pas jugée grave. Il s'agit de départs de grains isolés de la monocouche en AC 16 N, le mastic filler-bitume n'est quant à lui pas altéré et ne laisse pas présager des risques de nids de poule. Aucune autre dégradation sur ce revêtement n'est observée. Un entretien à ce stade serait prématuré d'autant plus que l'âge du revêtement a déjà 7 ans et que cette rue est peu sollicitée par des poids-lourds. Il faudra envisager dans 5 à 10 ans, selon la vitesse d'évolution, de protéger cette couche en posant une sur-épaisseur. La méthode ARRPA a l'avantage de détecter les trous créés par les grains qui se sont détachés de manière précise et quantitative, ce qui permettrait d'établir une vitesse de dégradation par des relevés à plusieurs états, ce que l'œil n'est pas capable de faire.

6.2.2 Avenue Charles-Naine

Tab. 32 Relevé détaillé de l'Avenue Charles-Naine

Groupes Principaux	Gravité	Étendue	Indice
Types de dégradations			
Dégradations du revêtement	1	3	0.6
Usure	1	3	
Fissures diverses	1	3	
Déformations de revêtement	2	1	0.4
Ornières	2	1	
Dégradations structurelles	2	1	0.6
Faïençage	2	1	
Réparations	1	2	0.2
Fissures pontées	1	2	
I1			1.8

Ce tronçon comporte de nombreuses dégradations, des fissures diverses et de l'usure généralisée, des ornières dans lesquelles apparaissent du faïençage et du faïençage dans les bords dû à leur faiblesse. Les réparations (fissures pontées) ont un état correct. Les dégradations prises de manière individuelle ne sont pas alarmantes mais leur combinaison doit alarmer le gestionnaire. De plus, il faut prendre en considération l'environnement (passage de bus et trafic poids-lourds des centres commerciaux avoisinants), l'évolution du faïençage et des affaissements pourrait ainsi être rapide du fait des fortes sollicitations. Le pontage des fissures venant d'être réalisé, un entretien ne semble pas nécessaire dans l'immédiat. Il faudra probablement intervenir dans 5 ans et des investigations supplémentaires seront nécessaires pour affiner l'entretien approprié.

A l'œil nu, nous avons détecté des nuances dans les dégradations observées, qui ne ressortent pas de manière différenciée dans les résultats obtenus par la méthode ARRPA.

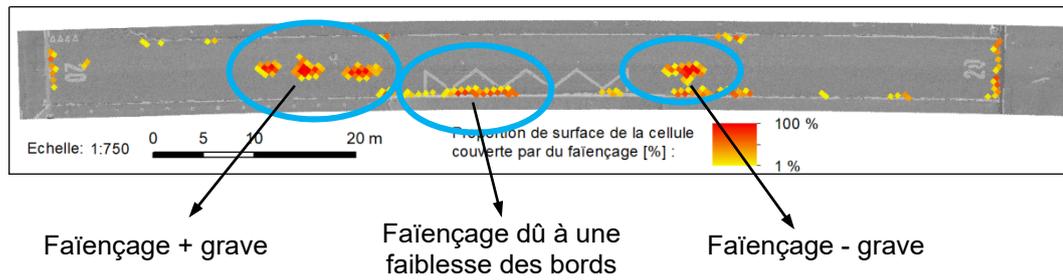


Figure 78 : Charles-Naine, interprétation différente entre relevé à l'œil nu et relevé ARRPA



Figure 79 : Charles-Naine, relevé détaillé (27.08.2019) : Faïençage plus grave



Figure 80 : Charles-Naine, relevé détaillé (27.08.2019) : Faïençage dû à une faiblesse des bords



Figure 81 : Charles-Naine, relevé détaillé (27.08.2019) : Faiénçage moins grave

6.2.3 Carrefour Stavey-Mollondin

Tab. 33 Relevé détaillé du carrefour Stavey-Mollondin (hors trottoirs)

Groupes Principaux	Gravité	Etendue	Indice
Types de dégradations			
Surface glissante	2	3	1.2
Polissage	2	3	
Dégradations du revêtement	2	2	0.8
Usure	2	2	
Perte de gravillons	2	2	
Nids de poule	1	1	
Fissures de joint	3	1	
Déformations du revêtement	1	2	0.4
Ornières	1	2	
Réparations	1	2	0.2
Fissures pontées	1	2	
I1			2.6

Ce carrefour composé de différents revêtements, soit du béton bitumineux et de l'enduit superficiel, comporte de nombreuses dégradations comme du polissage et de l'usure généralisée. On note aussi un peu d'orniérage et la présence de fissures très ouvertes non encore pontées. La perte de gravillons est surtout localisée sur la Rue du Crêt-Rossel et les bords Sud de la Rue Stavey-Mollondin. Ce sont des gros grains qui partent mais dont la gravité est modérée.



Figure 82 : Stavay-Mollondin, relevé détaillé (27.08.2019) : gros grains qui partent de gravité modérée

Dans l'immédiat, il conviendrait de ponter les fissures ouvertes et profondes et de reprendre les trottoirs (non inclus dans le relevé détaillé) qui sont en très mauvais états (nids de poule).



Figure 83 : Stavay-Mollondin, relevé détaillé (27.08.2019) : Fissure ouverte et profonde à ponter



Figure 84 : Stavay-Mollondin, relevé détaillé (27.08.2019) : Trottoirs à reprendre

Le plus gênant ici est surtout l'aspect patchwork qui peut poser un problème de visibilité pour l'usager de la route et donc poser des problèmes sécuritaires. Reprendre le carrefour en entier serait par contre prématuré pour une ville comme la Chaux-de-Fonds, ville située à 1'000m d'altitude et sollicitée par des hivers rudes, car de très nombreuses rues sont dans un état similaire. Il est important d'intégrer une vision locale dans la gestion de l'entretien. La réfection complète ainsi que l'aménagement du carrefour seront à prévoir d'ici une dizaine d'années.

7 Interprétation des résultats

7.1 Apport de la géomatique

Cette recherche a permis de mettre en avant les apports des outils issus du domaine de la géomatique, qu'ils soient directement exploités par ARRPA ou non. Parmi ces apports, citons les fonctionnalités offertes par les logiciels de systèmes d'information géographique (SIG) qui permettent de superposer les données de diverses provenances et d'échanger ces données entre différents acteurs (interopérabilité). Les données géographiques numériques (géodonnées), notamment, sont enregistrées dans des formats reconnus par les logiciels du marché (ou libres) et sont échangées entre divers acteurs de l'environnement routier. Il en va de même avec les données de base (image et relief) standardisées. Grâce à la standardisation, on peut différencier l'acquisition de ces données de leur analyse, ces deux étapes pouvant être réalisées par des acteurs distincts. Le géoréférencement fin est également un apport de la géomatique. Il facilite la superposition des données du revêtement à d'autres géodonnées de l'environnement routier (conduites, signalisation, cadastre foncier, etc.) et il facilite leur utilisation pour de multiples usages autres que le relevé d'état.

7.2 Précision du géoréférencement

Grâce à un géoréférencement très précis, de l'ordre du centimètre, ARRPA peut se prévaloir d'être parmi les systèmes les plus performants en la matière. Cette caractéristique ouvre la voie à plusieurs fonctionnalités uniques et intéressantes. Parmi elles, citons la possibilité de collecter des images sur de vastes surfaces circulées telles que tarmacs aéroportuaires, sans que des discontinuités gênantes, de l'ordre du mètre, apparaissent entre les différentes bandes auscultées. Le résultat est homogène, chaque image étant parfaitement appariée à ses voisines. Cette même remarque s'applique, dans une moindre mesure, à une chaussée à plusieurs voies, où aucun décalage entre les voies ne vient brouiller l'image de l'ensemble. Une grande précision du géoréférencement est également un immense avantage lorsque l'étude consiste à suivre l'évolution dans le temps des dégradations, que cette vitesse de dégradation soit exprimée en terme de nombre de cellules affectées ou de quantité absolue d'un type de dégradation (surface, longueur, nombre, etc). Les grilles étant indépendantes d'un relevé à l'autre, c'est aussi grâce à la précision au cm près que ces grilles sont superposables et donc exploitables pour un suivi fin dans le temps.

7.3 Résolution de la méthode ARRPA

La résolution de la méthode ARRPA se situe au même niveau que celle atteinte par les systèmes laser + caméra linéaire les plus récents. L'orthophoto a une résolution de 1 mm, tandis que le relief (MNS) a une résolution variable comprise entre 1 et 3 mm, selon la direction considérée (verticale ou planimétrique) et selon le temps de calcul que l'on souhaite lui consacrer. Comparées à la technologie développée chez Pavemetrics (*Tab. 10*), ces valeurs sont suffisantes à la détection correcte des fissures d'ouverture égale ou supérieure à 2 mm. Il reste que l'œil humain est capable de mieux faire et que, par conséquent, la longueur totale de fissures détectées par un système automatique sera toujours plus ou moins sous-évaluée par rapport à la vraie valeur. Ces systèmes automatiques sont fidèles mais ne sont pas justes. Partant de ce constat, il conviendrait d'adapter et la norme VSS 40925 et les seuils de déclenchement d'une mesure d'entretien.

Théoriquement, cette résolution est également suffisante pour détecter les pertes de gravillons de revêtements fins tels que les SDA 4.

7.4 Détection des fissures

Pour une détection des fissures reproductibles entre plusieurs systèmes automatiques, il conviendrait tout d'abord de définir les contours d'une fissure jugée détectable sans dépasser un certain taux d'erreur. Selon l'AIPCR [9], celle-ci aurait une longueur minimale de 15 cm et une ouverture d'au moins 1 mm. Nous avons vu que, au regard des techniques actuelles, cette définition n'est pas réaliste. À moins de 2 mm d'ouverture, le taux d'erreur est élevé (voir Annexe II). C'est d'ailleurs là la raison pour laquelle, à l'heure actuelle, sur les autoroutes allemandes, aucun véhicule n'a été homologué pour de l'auscultation automatique des fissures. Il semblerait aussi que la détection de l'orientation des fissures ne soit pas chose aisée. Les systèmes automatiques ne sont pas non plus capables de faire la distinction qualitative entre les fissures longitudinales, les fissures de joint, les fissures transversales et les fissures diverses telles que décrites dans [1]. En revanche, en combinant la fissure avec le profil transversal de la route, les systèmes automatiques devraient reconnaître les fissures d'épaulement (+ affaissement) et les fissures dues au gel (+ soulèvement).

Nous avons montré qu'ARRPA détecte un ensemble de fissures, sans distinction de direction et d'origine, ainsi que les fissures colmatées. Lorsque le revêtement n'est pas fissuré (tronçon Commerce), ARRPA est exact et ne confond pas des artefacts avec des fissures. Ailleurs, sur les trois autres tronçons, le résultat de la détection des fissures est cohérent avec les observations in situ. Le tronçon Charles-Naine a fait l'objet d'une analyse plus poussée avec une estimation de la répétabilité entre deux mesures successives et la comparaison entre un relevé des longueurs à la roulette et une mesure automatique. Avec seulement 3 % d'écart entre deux mesures successives ($65.3 \text{ m} \pm 1.9 \text{ m}$), on peut considérer que la répétabilité de la méthode est très satisfaisante.

En revanche, le résultat de la comparaison montre qu'ARRPA ne détecte que 75 % des fissures (Tab. 22). Cet écart entre les deux méthodes peut avoir deux origines. Lors du relevé manuel, l'opérateur de la roulette a perçu les fissures ou les prolongations de fissures ayant une ouverture de moins de 2 mm, l'œil humain étant plus perspicace qu'un système de détection automatique. D'autre part, la détection des fissures par ARRPA engendre de régulières et petites interruptions (voir Figure 42) dues à des imperfections. Ces interruptions n'étant pas comptabilisées dans la longueur totale, la longueur vraie sera toujours un peu plus élevée. Mis ensemble, ces deux aspects peuvent expliquer la différence observée entre les deux méthodes.

Du point de vue du traitement des données, c'est la détection des fissures qui demande le plus de travail humain de contrôle des seuils et de suppression manuelle d'artefacts (Tab. 19 et Tab. 23) comparé aux autres types de dégradations.

7.5 Détection des fissures colmatées

Les fissures colmatées à la lance thermique sont facilement détectables automatiquement par ARRPA et peuvent difficilement échapper au contrôle à l'écran sur l'orthophoto. Avec moins de 1 % d'écart entre deux mesures successives ($426.7 \text{ m} \pm 2.6 \text{ m}$), on peut considérer que la répétabilité de la méthode est excellente. L'écart de 7 % constaté entre le relevé ARRPA et le relevé manuel à la roulette est faible. Il peut s'expliquer par la difficulté du relevé à la roulette en raison des nombreuses discontinuités et de la finesse du maillage. Il est probable que la valeur ARRPA soit plus juste que la valeur du relevé manuel.

7.6 Détection du faïençage

Le tronçon Charles-Naine a fait l'objet d'une analyse plus poussée avec une estimation de la répétabilité entre deux mesures successives. Avec 4 % d'écart entre deux mesures successives ($17.4 \text{ m}^2 \pm 0.7 \text{ m}^2$), on peut considérer que la répétabilité de la méthode est très satisfaisante.

Notons que pour estimer la reproductibilité entre plusieurs systèmes automatiques, il conviendrait tout d'abord de définir le faïençage. Selon l'AIPCR [9], sa caractéristique principale serait une dimension de maille inférieure à 30 cm. L'algorithme actuellement employé par ARRPA ne tient pas compte de la dimension des mailles. Il se base uniquement sur la densité des fissures.

La comparaison entre un relevé des mailles à la roulette (9 m²) et une mesure automatique (17 m²) montre qu'ARRPA a surestimé la surface de faïençage de 50 %. Sur ce tronçon, des réseaux de fissures apparaissent autour des grilles de collecte des eaux de surface ainsi que le long des dalles en pierre qui marquent le début et la fin de la zone 20 km/h (*Figure 36*). ARRPA, se basant sur la densité de fissures pour déterminer une surface de faïençage, a classé ces fissures comme appartenant à du faïençage. Au contraire, pour chacun de ces cas particuliers, le relevé manuel a classé ces phénomènes dans les fissures diverses. Cette discordance explique en partie la plus grande surface de faïençage relevée par la mesure automatique. Nous en déduisons que l'analyse d'image est d'autant plus juste qu'elle est alimentée par un nombre suffisant d'informations non-équivoques. Du reste, la difficulté à estimer la surface d'un objet plan non géométrique aura également contribué à cette discordance.

7.7 Détection de la perte de gravillons

Le tronçon Commerce a fait l'objet d'une analyse plus poussée avec une estimation de la répétabilité entre deux mesures successives sur quatre petites surfaces de test de 1 m² chacune. Les écarts sont compris entre 1 et 4 %, ce qui correspond à $\pm 3 \dots 12$ grains sur 300 par m². Ces chiffres montrent que la répétabilité de la méthode est très satisfaisante.

Deux comptages manuels du nombre de trous laissés par des gravillons perdus ont été réalisés sur ces mêmes quatre petites surfaces. Au cours du premier, nous n'avons relevé que les trous de grande dimension, c'est-à-dire ceux qui correspondent à la perte d'un grain de 16 mm. Ce faisant, nous avons constaté que ces très grands trous ne représentent qu'un tiers des trous détectés par ARRPA. S'en est suivi un deuxième comptage, plus fin, incluant jusqu'aux trous de 4 mm. Ce comptage plus détaillé a montré que (1) son résultat dépend de fines variations d'interprétation entre opérateurs et (2) que sa différence avec ARRPA est de l'ordre de 10 % (*Tab. 26*). Dans l'ensemble, nous pouvons considérer que l'auscultation automatique des gravillons perdus est fidèle et juste.

En comparant la densité de gravillons perdus (*Tab. 24*) des tronçons Commerce et Stavay-Mollondin avec le relevé visuel détaillé du chapitre 6.2, nous constatons que la note gravité 1 est attribuée à une densité de 293 gravillons/m² et la note gravité 2 à une densité de 150 gravillons/m². Cet exemple illustre le profond changement qu'apporte l'auscultation automatique au niveau de la perception de la dégradation.

Les cas des enrobés semi-denses (SDA) n'a malheureusement pas été étudié dans le cadre de ce projet. Il se pourrait qu'ARRPA et les autres techniques automatiques confondent les pores affleurants à des gravillons perdus (tant que le revêtement est neuf et non colmaté). Donc, si une mesure de référence à l'état 0 indique déjà une perte de gravillons, le suivi de l'évolution pourrait être contrarié car la perte de gravillons réelle serait noyée dans un bruit de fond élevé. Du reste, le colmatage viendrait boucher les pores initialement interprétés comme des gravillons perdus et accentuerait la difficulté d'analyser les résultats sur le long terme. Le ACMR 8 du tronçon Charles-Naine a reçu la note gravité 0 tandis qu'ARRPA a détecté 74 gravillons/m². Il convient ici de se poser la question de la justesse de ce nombre au regard de la précédente remarque sur les SDA. Un comptage manuel a été envisagé mais abandonné en raison de la charge de trafic et du passage cadencé des bus, car une fermeture de la route aurait été nécessaire.

Du point de vue de l'objectivité, l'auscultation automatique de la perte de gravillons est certainement meilleure que le relevé visuel mais il faut s'attendre à des artefacts en présence d'enrobés poreux. Une étude plus spécifique avec une série de revêtements SDA

et ACMR doit être entreprise avant de se lancer dans la détection à grande échelle de la perte de gravillons sur ce type de surface.

7.8 Détection des nids de poule et pelades

Tout au long du projet, la détection des nids de poule et des pelades a été contrariée par des réparations inopinées en dépit d'un accord passé avec le Service des espaces publics (voirie). Ce zèle des cantonniers nous a empêchés de suivre de manière satisfaisante l'évolution dans le temps de ces dégradations.

ARRPA a été en mesure de différencier automatiquement les pelades des nids de poule. Ce type de dégradation n'a été observé que sur les tronçons Helvétie et Stavay-Mollondin.

7.9 Utilisation des grandeurs objectives proposées en relation avec la norme VSS 40925

La quantité actuelle de données du présent mandat est trop faible et ne permet pas d'établir une relation précise avec la norme VSS 40925 ou d'en tirer une interprétation ou un lien direct avec la gestion d'entretien des chaussées.

Pour utiliser les grandeurs objectives obtenues par la méthode ARRPA ou toute autre méthode d'auscultation automatique, il conviendrait de réaliser une base de données importante en réalisant des mesures sur différents types d'enrobés (continus, discontinus, diamètres de grains différents, divers âges) et sur des tronçons présentant un type et/ou une combinaison de dégradations de gravité différente et/ou sur des tronçons en présence de sollicitations différentes. Puis, il serait intéressant de coupler ces données à une gestion pratique et concrète des entretiens. Cela permettrait d'affiner les seuils de détection utiles de la méthode automatique, par type ou combinaison de dégradations.

Tout comme avec les indices proposés par la norme VSS 40925, les grandeurs objectives pourraient également permettre de définir des seuils de degrés différents. Par exemple, un seuil d'alerte et un seuil déclencheur ou critique par type de dégradation seraient fixés. Le seuil d'alerte doit alerter et rendre attentif le gestionnaire sur l'existence d'un besoin formel d'intervention future tandis que le seuil critique/déclencheur impose de facto un entretien dans les meilleurs délais. Cette analyse par seuil est à élaborer et approfondir par type de dégradation (*Figure 85*) mais également par combinaison de dégradations (*Figure 86*). D'autres facteurs devraient ensuite entrer en ligne de compte dans la détermination des seuils d'entretien, par exemple le type de routes, la charge de trafic, la localité (exigences locales), l'altitude, l'âge des revêtements, la vitesse d'évolution des dégradations, la présence de patchwork, la glissance etc.

Gestion d'entretien	Détermination de seuils par dégradation	Perte de gravillons	Fissures	Faïençage	Nids de poule Pelades	Autres dégradations [...]
Pas d'intervention	Seuil acceptable	Gravité 1	Gravité 1	Gravité 1	Gravité 1	Gravité 1
Intervention à moyen ou long terme	Seuil alarmant	Gravité 2	Gravité 2	Gravité 2	Gravité 2	Gravité 2
Intervention à court terme	Seuil critique	Gravité 3	Gravité 3	Gravité 3	Gravité 3	Gravité 3

Figure 85 : Présentation schématique du concept de seuils par type de dégradation ; chaque seuil de gravité est indiqué en unité de surface ou grille ; pour la perte de gravillons, par exemple, nous pourrions avoir Gravité 1 < 50 gravillons/m², Gravité 2 < 200 gravillons/m² et Gravité 3 > 200 gravillons/m².

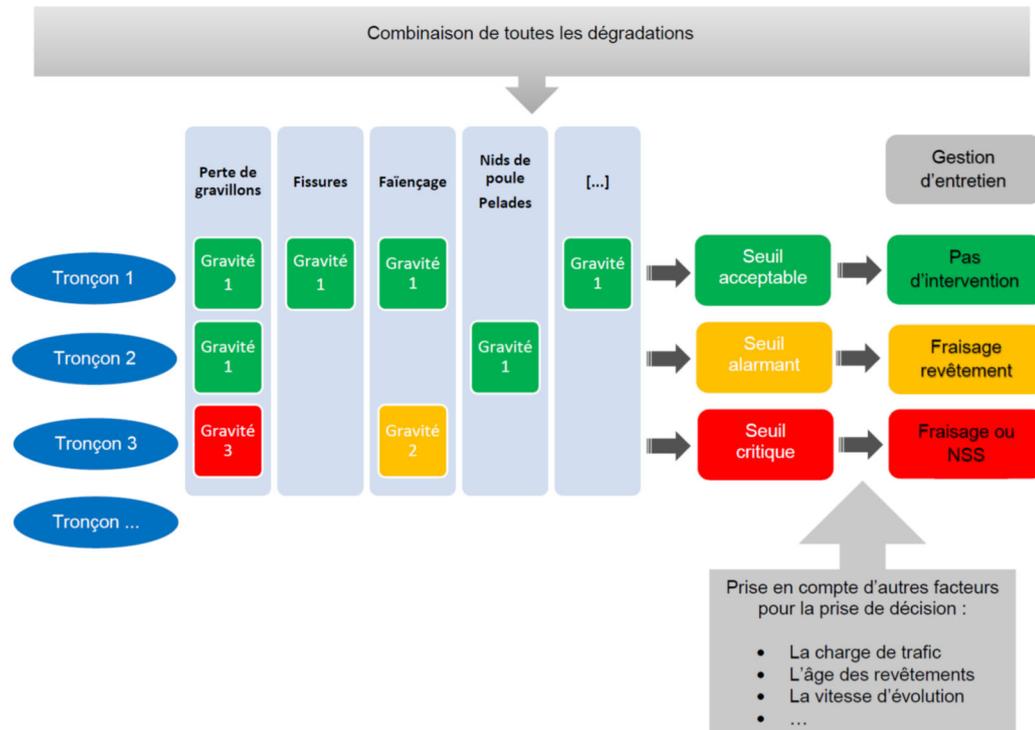


Figure 86 : Présentation schématique du concept de seuils par combinaison de dégradations ; chaque seuil de gravité est indiqué en unité de surface ou grille ; les gravités seront pondérées selon le type de dégradation ; la détection d'un nid de poule, par exemple, est une source d'alarme ; la gestion de l'entretien tiendra compte de facteurs subsidiaires pour étayer une décision.

7.10 Champs d'application différenciés

Cette recherche a décrit et testé les possibilités d'ARRPA qui, contrairement à d'autres, est une approche de l'auscultation de la surface des revêtements issue du domaine de la géomatique, et plus spécifiquement de la photogrammétrie.

Cette méthode présente des avantages qui sont un niveau de détail élevé, une géolocalisation précise (§ 2.7.3) et l'interopérabilité de ses données (§ 2.7.1). Elle a aussi des inconvénients qui sont principalement sa vitesse d'acquisition limitée à 15 km/h et de longs temps de calculs (inhérents à son type de capteur, sa haute résolution et sa précision). Dans sa configuration technique actuelle, son champ d'application est limité à des tronçons de longueur restreinte (d'une centaine de mètres à un ou deux kilomètres).

À l'inverse, les outils embarqués issus du domaine routier (§ 1.2) servent à obtenir efficacement une vue d'ensemble d'un réseau entier de plusieurs centaines de kilomètres en mettant en évidence les secteurs fortement dégradés (selon un découpage de plusieurs dizaines de mètres de long).

C'est une fois que ces secteurs sont identifiés qu'une méthode telle qu'ARRPA est mobilisée efficacement pour ausculter précisément et en détail les dégradations et leur évolution. Parmi ces objets routiers de petites tailles, citons les cas particuliers des routes urbaines (dont l'état varie sur de courtes distances et où les systèmes embarqués à haut

rendement sont restreints par le manque de satellites de positionnement), des planches d'essais, des arrêts de bus, des preuves à futur, des tronçons devant faire l'objet d'une réfection impactant sa géométrie, des ponts, etc. ARRPA n'est donc pas adaptée à une approche de réseau mais à de l'auscultation minutieuse d'ouvrages ou d'échantillons de réseau pour ajustement, recherche de cause et calibration. De la sorte, chaque outil est exploité à l'échelle à laquelle il est le plus performant et approprié.

7.11 Perspectives de développement

Quel que soit le domaine d'où sont issues les méthodes d'auscultation routières, celles-ci dépendent des développements de leurs multiples composants qui progressent constamment. Nous pouvons évoquer brièvement ceux qui influenceront très probablement l'auscultation routière :

- Le développement de *capteurs dédiés* à l'auscultation routière (en remplacement des appareils photo grand public utilisés par ARRPA) accélérera les vitesses d'acquisition sur route.
- Les développements des *composants informatiques* (exemples : ordinateur quantique, matériaux multiferroïques [6]) permettront de diminuer les temps de calculs.
- Des *développements mathématiques* tels que dans [17] devraient permettre de s'affranchir, ou du moins de minimiser, l'intervention humaine dans le choix des seuils de détection des dégradations.
- *L'intelligence artificielle* (AI) appliquée aux processus de détection dans les géodonnées (exemple: société Picterra, www.picterra.ch) améliorera les taux de détection des dégradations.
- *Quantifier un « patchwork »* : à partir du moment où les géodonnées de relief (MNS) et d'image (orthophoto) sont parfaitement superposées, comme c'est le cas des produits ARRPA, la technique de la classification supervisée est applicable et le développement d'un algorithme de distinction de différents types de revêtements (selon leur intensité de gris, rugosité, etc) est envisageable. Un tel algorithme suffirait à définir si le tronçon ausculté est de couleur et texture homogène ou s'il est composé d'une mosaïque de revêtements (réparations multiples, *patchwork*).

D'un point de vue organisationnel, les apports suivants pourraient optimiser la collecte des données et donc faciliter l'analyse de l'état des revêtements et les mesures d'entretien :

- L'interopérabilité des géodonnées (§ 2.7.1) permettrait désormais une *répartition des étapes de calculs entre les différents acteurs*, chacun opérant le processus pour lequel il est le plus performant.
- *L'amélioration du dialogue entre les divers spécialistes* tant des équipements (capteurs, géomatique, etc.) que du domaine routier, permettrait de bénéficier des compétences de chacun.
- *Typologie de la fissure* : proposition de réduire le nombre de types de fissure pour être mieux en phase avec les possibilités actuelles de l'auscultation automatique.
- *Réviser les définitions des dégradations* en tenant compte des capacités de détection automatique par les nouvelles technologies, indépendamment du système utilisé, comme déjà évoqué dans [18] (*Sommaire, p. III*).
- *Établir un banc d'essai national* pour homologuer les prestataires d'auscultation automatique : il conviendrait que l'OFROU suive l'exemple du ministère des transports du Québec ou de la BAST et mette en place un système d'évaluation de la fidélité des mesures. Ce processus faciliterait la définition des dégradations mesurables commune entre les différentes technologies actuelles.

8 Conclusions

Ce projet a démontré que l'auscultation photogrammétrique fonctionne de manière très satisfaisante. La résolution de détection d'ARRPA est semblable à celle obtenue avec les meilleurs couples laser + caméra linéaire du marché. Elle permet de détecter des fissures avec une ouverture de l'ordre de 2 mm et des trous laissés par des gravillons perdus de l'ordre de 4 mm.

Ce projet a également démontré que l'auscultation photogrammétrique n'est pas une méthode « bon marché » ce qui vient contredire une hypothèse formulée au départ.

Le grand avantage d'ARRPA réside dans sa précision géographique de l'ordre du centimètre, une valeur qui surpasse de loin les possibilités des systèmes laser du marché. Grâce à cette précision centimétrique, une route à plusieurs voies est vue comme une surface continue, des auscultations successives permettent de suivre une dégradation particulière « à la loupe », les données sont parfaitement superposables avec des informations provenant d'autres sources géoréférencées (SIG).

Le découpage de surface proposé est une grille dont chaque cellule mesure 50x50 cm et qui est orientée suivant les points cardinaux. Les grandeurs objectives proposées en relation avec cette grille sont des [m/cellule] pour les fissures, [m²/cellule] pour le faïençage, [gravillons/cellule] pour la perte de gravillons. Une unité binaire [0/cellule] et [1/cellule] est une autre forme possible de présentation, simple d'interprétation, pour signaler la présence de fissures ou nids de poules. Contrairement aux statistiques par segments de route, la grille offre une vue plus détaillée d'où peuvent émerger des éléments d'interprétation.

Au stade actuel de son développement technologique, ARRPA convient très bien à des auscultations de petits tronçons de route. Parmi les cas les plus en vue, citons, l'examen des causes et la compréhension d'un phénomène de dégradation inattendu, le soutien à la recherche appliquée, l'observation d'une cinétique de dégradation ou le relevé d'une rue située dans un environnement exigu et complexe.

La faible vitesse d'auscultation d'ARRPA (15 km/h) dans sa configuration technique actuelle est un réel handicap. Avec une volonté d'industrialisation et dans un environnement technologique propice, notamment en présence de compétences multiples en imagerie et topométrie, l'auscultation par photogrammétrie peut évoluer vers un système de collecte de données plus rapide.

Remerciements

Nous adressons nos plus vifs remerciements à Madame Josianne Ouellette, responsable du Secteur statistique et traitement de données de la Direction des chaussées, Ministère des transports, Québec, Canada. Madame Ouellette a eu la gentillesse de partager ses connaissances et la longue expérience de la Direction des chaussées en matière d'auscultation à haut rendement, notamment avec les systèmes LCMS-1 et LCMS-2.

Nos plus vifs remerciements vont également à Madame Claudia Podolski et Monsieur Børge Wasser, respectivement responsables du véhicule d'auscultation MESAS et de la section GS4 « Oberflächeneigenschaften, Bewertung und Erhaltung von Strassen » au sein de la BAST. Ils ont pris soin de répondre très aimablement à toutes nos questions sur l'actualité en matière d'auscultation du réseau des routes fédérales allemandes.

Nous tenons également à remercier Yvan Ramel et Laure Chastan (ERTEC) pour leur contribution sur les questions de gestion de l'entretien. Nous souhaitons que leurs propositions puissent être développées au cours des prochaines années.

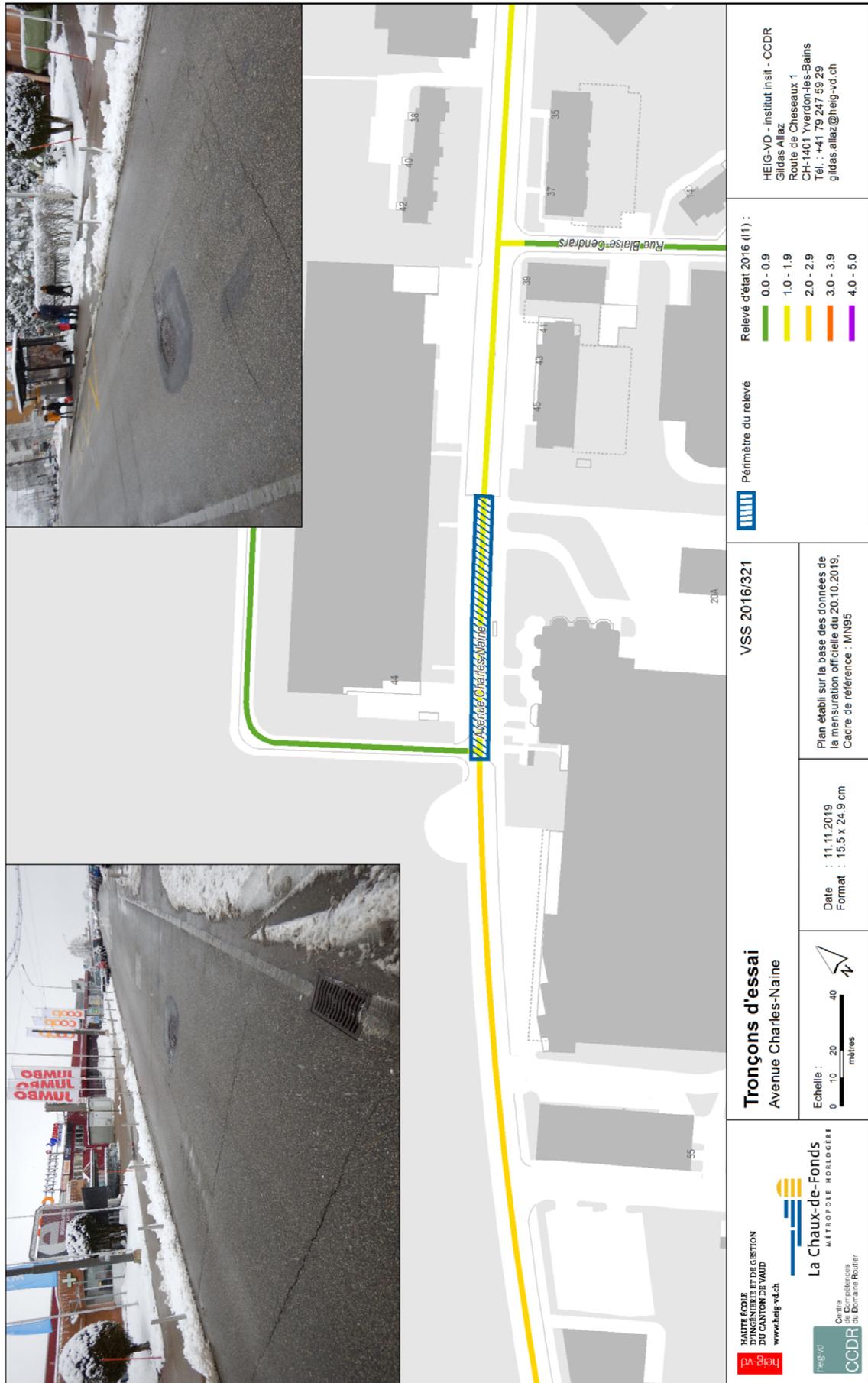
En terminant, nous exprimons notre gratitude aux membres de la Commission de suivi pour leurs conseils éclairés, à l'association faïtière VSS qui a soutenu notre projet et à l'OFROU pour son apport financier.

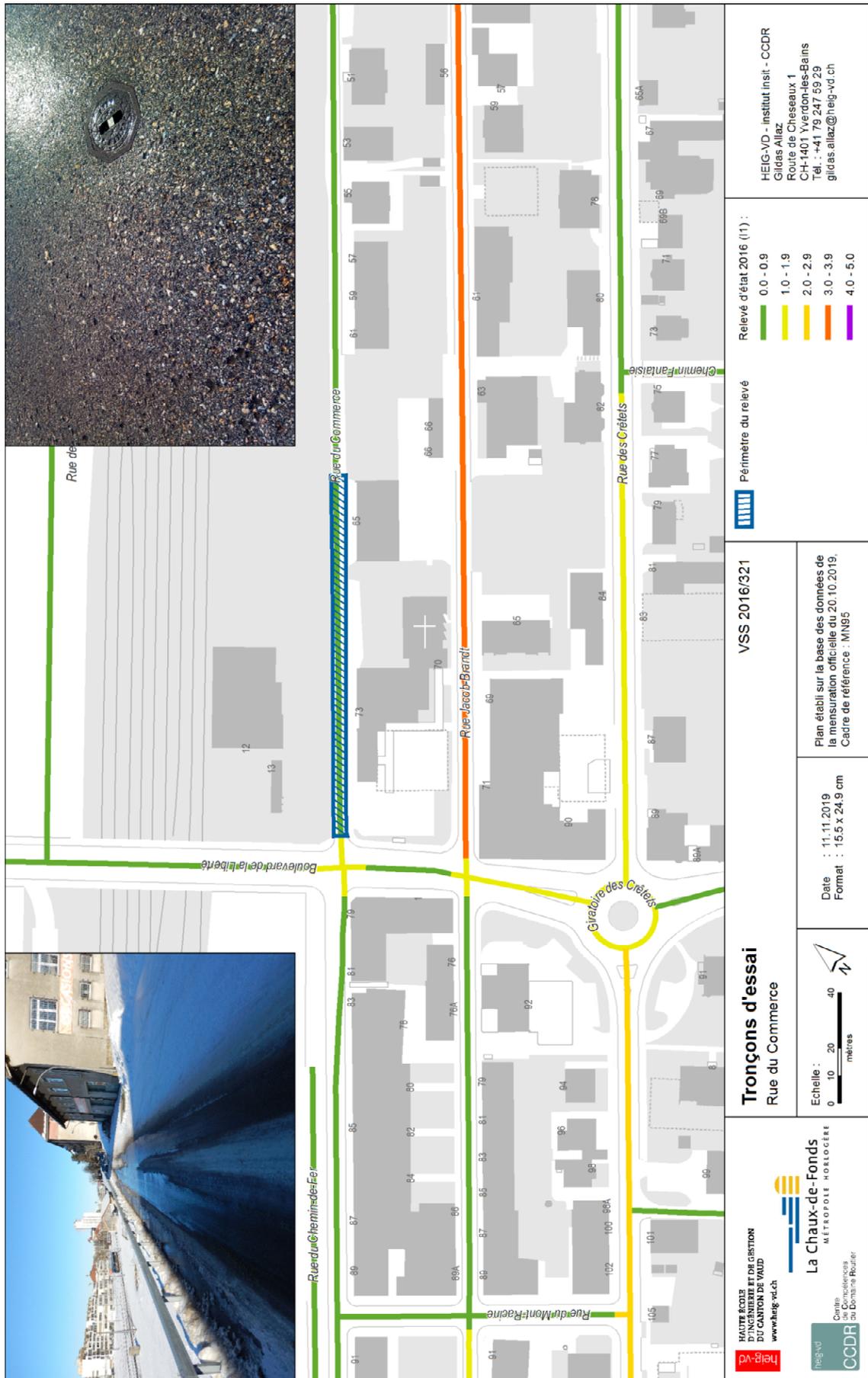
Annexes

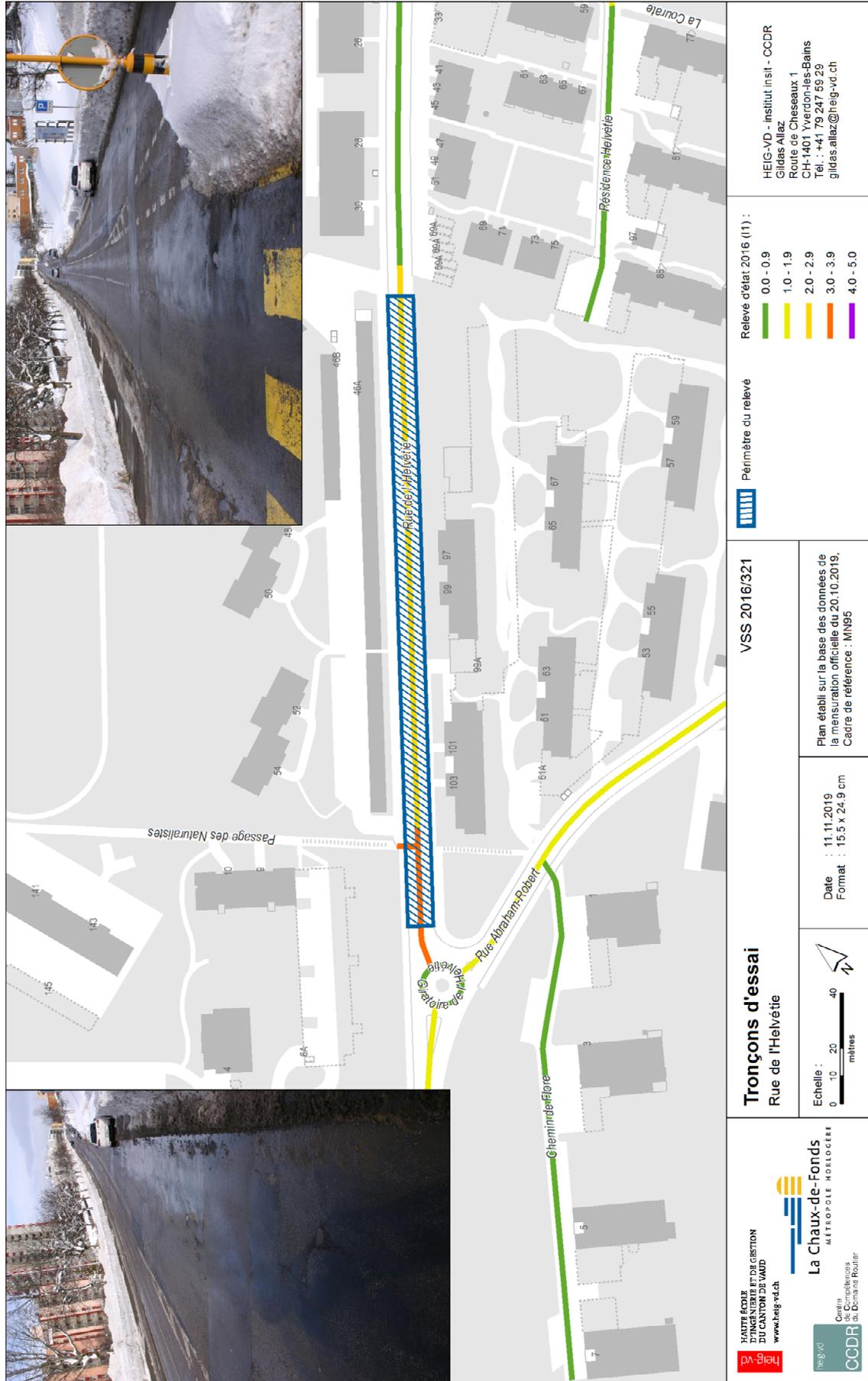
I	Plans détaillés des tronçons d'essai	101
II	Utilisation du LCMS par le Ministère des transports du Québec.....	107
III	Complément informatif sur l'usage de drones	111
III.1	Introduction.....	111
III.2	Problématiques communes à tout type de drone	111
III.3	Problématiques spécifiques à chaque type de drone	111
III.4	Conclusions.....	113
III.5	Littérature	113

I Plans détaillés des tronçons d'essai







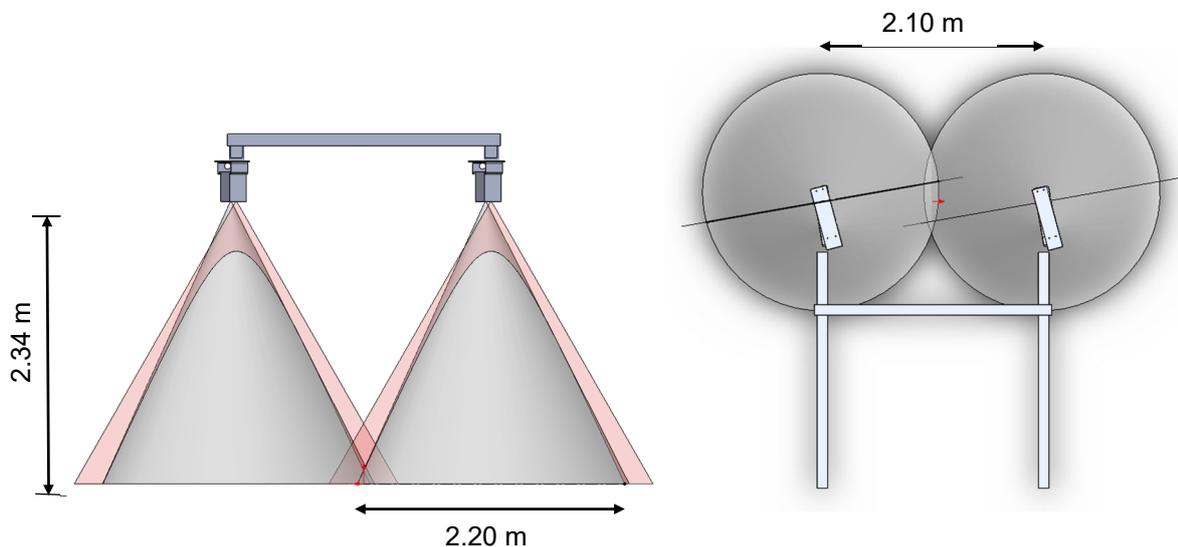


II Utilisation du LCMS par le Ministère des transports du Québec

Cette Annexe II a été rédigée par Madame Josianne Ouellette, responsable du Secteur statistique et traitement de données à la Direction des chaussées

Ce document présente l'utilisation du LCMS par le ministère des Transports du Québec pour mesurer la fissuration sur son réseau routier et assurer la qualité des résultats automatiques.

Le ministère des Transports du Québec ausculte annuellement plus de 18 500 km de routes, ce qui représente le 2/3 de son réseau routier. Les capteurs LCMS sont installés sur un véhicule à une hauteur de 2,34 m du sol. La figure ci-dessous présente la configuration géométrique des capteurs sur le véhicule. Cette configuration permet de balayer la chaussée sur une largeur de 4,3 m.



Avant, pendant et après le traitement automatique de la fissuration, plusieurs étapes de vérification sont en place afin d'assurer l'exactitude des résultats mesurés.

Pour le LCMS, ces étapes se déclinent de la manière suivante :

1. **Étalonnage et alignement des capteurs sur un banc optique à chaque année.**
2. **Qualification du profil transversal.** Cette étape consiste à comparer le profil transversal des capteurs à celui d'un équipement de référence développé par le Ministère. Un article de notre groupe de recherche et développement est en attente de publication à ce sujet.
3. **Validation de la librairie de traitement de données (dll) et ajustement de paramètres spécifiques.** Lors de la réception d'une dll, la fissuration de relevés antérieurs est calculée. Les résultats de la nouvelle et de l'ancienne dll sont comparés. Certains paramètres de la librairie de traitement sont modifiés pour que les résultats automatiques de la fissuration répondent au besoin de gestion des chaussées du Ministère.
En 2018 et 2019, les données de fissuration ont été traitées à l'aide de la librairie de traitement 4.36.4.0.

4. **Piste de traits de scie.** Il s'agit d'un site de 380 mètres sur lequel 173 fissures ont été simulées à l'aide d'une scie. Les traits de scie ont différentes longueurs (1800 mm, 3000 mm, 3600 mm, 5000 mm et 8000 mm), ouvertures (entre 1 mm et 5 mm) et orientations (longitudinale — dans le même sens que la route ; transversale — perpendiculaire à la route; diagonale). Cette piste permet de déterminer l'aptitude du LCMS à fournir des résultats exacts dans des conditions contrôlées. La piste doit être nettoyée avant que le véhicule fasse les relevés. Une fissure pourrait ne pas être détectée automatiquement, car elle est obstruée par de la saleté.

L'analyse des résultats fissure par fissure est difficile à réaliser automatiquement puisque certaines fissures sont détectées sur plusieurs fichiers bruts (*.fis) en raison de la conception de la piste (dans une courbe), de la précision de la localisation (± 1 m) et du délai entre le déclenchement du relevé et le début l'acquisition des données.

Cette analyse est réalisée périodiquement de manière qualitative. Les critères évalués sont la détection (présence ou non de la fissure), la classification de la fissure (longitudinale ou transversale) et le niveau de sévérité basée sur l'ouverture des fissures.

Lors de la dernière évaluation, en 2014, à l'aide de la librairie de traitement 3.4.14.1, les résultats suivants avaient été observés :

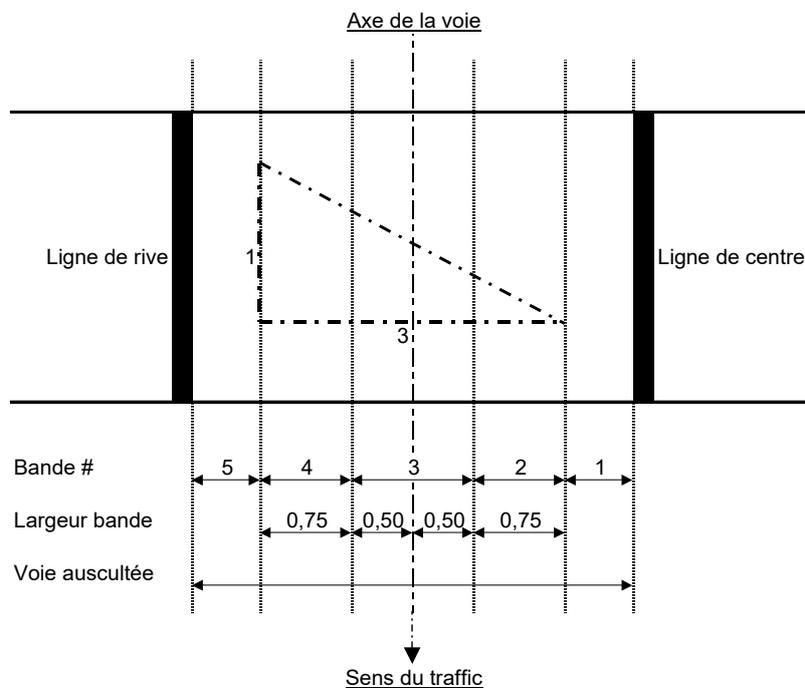
- Détection des fissures longitudinales ou diagonales de 3 mm ou plus.
 - 87 % des fissures sont détectées sur plus de 75 % de la longueur
 - 7,6 % des fissures sont détectées partiellement, c'est-à-dire entre 25 % et 75 % de la longueur
 - 80 % de ces fissures se trouvent dans les bandes aux extrémités (1 et 5)
 - 5,4 % des fissures ne sont pas détectées, c'est-à-dire sur moins de 25 % de la longueur
 - 85 % de ces fissures se trouvent dans les bandes aux extrémités (1 et 5)
 - Détection des fissures longitudinales ou diagonales de 2 mm ou moins.
 - 8 % des fissures de 2 mm ou moins sont détectées complètement
 - 17,4 % des fissures de 2 mm ou moins sont détectées partiellement
 - 30 % des fissures non détectées se trouvent aux extrémités (bandes 1 et 5)
 - Détection pour les fissures transversales
 - 20 % des longueurs de fissures transversales sont détectées ou détectées partiellement. L'ouverture des fissures transversales est plus faible que pour les fissures longitudinales et diagonales (aucune fissure de plus de 4 mm). La détection des fissures transversales est meilleure avec la librairie de traitement 4.36.4.0.
 - Évaluation de la sévérité des fissures
 - La sévérité des fissures est bien évaluée 88 % du temps lorsque les fissures sont bien détectées
 - Lorsque la sévérité n'est pas bien évaluée, 55 % des erreurs de sévérité surviennent dans les bandes 1 et 5.
5. **Validation des résultats automatique de la fissuration.** Cette étape permet de quantifier l'exactitude de la mesure automatique de la fissuration. L'exactitude évalue la justesse (biais) et la précision (répétabilité) avec laquelle la donnée mesurée représente correctement la caractéristique à étudier.

Pour ce faire, le Ministère sélectionne 5 à 8 pistes de 1 kilomètre présentant diverses conditions d'état de la chaussée. Au début de la saison, le véhicule d'auscultation réalise 10 passages sur chacune des pistes à l'aide d'au moins 3 paires de capteurs LCMS différents.

La valeur de référence est établie à partir de 3 passages parmi les 10. La référence est calculée à tous les 100 m de chaque piste à partir de la valeur médiane des 9 passages (3 paires de capteurs x 3 passages).

Cinq passages sont utilisés pour évaluer l'exactitude des résultats de fissuration.

De façon à simplifier la classification des fissures, la chaussée auscultée est divisée en 5 bandes de roulement selon la convention de l'AASHTO. La numérotation des bandes commence de gauche à droite dans le sens de la circulation. Les deux bandes localisées en sentiers de roues sont numérotées 2 et 4 et les trois autres bandes sont numérotées 1, 3 et 5. Le tout est centré transversalement sur la voie auscultée telle que montrée dans la figure ci-après.



Les sentiers de roues (bandes 2 et 4) ont 0,75 m de largeur chacun et la bande 3 a 1 m de largeur. Les bandes 1 et 5 ont des largeurs variables selon la largeur de la voie auscultée.

Le concept des bandes de roulement ne s'applique pas pour les fissures transversales.

Les exigences à respecter sont établies par bande de roulement, type de fissures et niveau de sévérité pour les longueurs de chaussées affectées par la fissuration :

Pour les fissures longitudinales dans les bandes 2, 3 et 4 :

- L'écart moyen entre la longueur de fissures longitudinales ou diagonales dans les bandes 2, 3 et 4 et la valeur de référence (biais) doit être compris entre $\pm 1,5$ m.
- 80 % des 100 m, doit avoir un écart absolu inférieur à 5 m/100 m.
- 97,5 % des 100 m, doit avoir un écart absolu inférieur à 10 m/100 m.

Pour les fissures transversales, l'écart admissible est de ± 1 fissure par 100 m.

Pour chaque niveau de sévérité

- L'écart moyen entre la longueur de fissures longitudinales, diagonales ou transversales et la valeur de référence (biais) doit être compris entre $\pm 3,0$ m.
- 75 % des 100 m, doit avoir un écart absolu inférieur à 5 m/100 m.
- 90 % des 100 m, doit avoir un écart absolu inférieur à 10 m/100 m.

Ces critères ont été établis il y a 3 ans. Les résultats obtenus avec la librairie de traitement des données actuelles 4.36.4.0 rencontrent facilement ces critères. Ceux-ci doivent être ajustés en fonction des améliorations apportées aux capteurs et aux librairies de traitement des données.

6. **Validation des données réseau.** Cette étape permet d'assurer une cohérence entre les résultats obtenus et les résultats antérieurs. Les graphiques du taux de fissuration permettent de repérer les écarts entre 2 relevés. Les images des relevés et des résultats de la fissuration permettent d'expliquer les causes. Par exemple, est-ce que des travaux peuvent expliquer une amélioration de l'état de la chaussée ?

Est-ce que la présence de saleté sur la chaussée ou sur la lentille du capteur peut expliquer une dégradation de l'état de la chaussée ?

Est-ce que les relevés ont été réalisés dans des conditions optimales (température extérieure supérieure à 10 °C, chaussée sèche, marquage présent sur la chaussée et non dégradé) ?

Est-ce que la librairie de traitement des données a bien interprété les paramètres (détection du marquage, drop-off, etc.) ?

Les graphiques de toutes les routes auscultées dans une année sont analysés. Les cas problématiques sont invalidés. Les données rejetées ne sont pas versées dans le système ministériel de gestion des chaussées.

III Complément informatif sur l'usage de drones

III.1 Introduction

Les capteurs (ici appareils photo) peuvent être embarqués sur divers supports, l'unique objectif étant de répondre aux critères géométriques, pratiques et financiers caractéristiques de l'objet à mesurer. Parmi ces supports, il y a les drones, qui peuvent être classés en **deux grandes catégories**:

- Les **ailes** permettent de simuler le vol d'un avion mais à plus petite échelle. Pour couvrir une zone déterminée, elles travaillent en effectuant des allers-retours (lignes de vol) préprogrammés dans un logiciel de planification de vol.
- Les **multicoptères** offrent une plus grande plage de mouvements possibles (verticaux et horizontaux) et donc une plus grande flexibilité. Leur autonomie au niveau de leur batterie est cependant particulièrement restreinte.



Drone sous forme d'une aile
(modèle eBee de la société senseFly)



Drone sous forme d'un multicoptère
(modèle albris de la société senseFly)

III.2 Problématiques communes à tout type de drone

Tout véhicule situé sur un revêtement routier, en mouvement ou à l'arrêt, en **obstrue sa vue depuis le ciel**. Avec un drone, il n'est pas possible de gérer le trafic et d'acquérir des images sans véhicule sur la chaussée, contrairement à une acquisition à partir d'un véhicule se déplaçant à l'intérieur-même du trafic.

La législation suisse interdit le vol de tout type de drone à **moins de 5 km d'un aéroport** sans autorisation préalable (map.geo.admin.ch : Zones restreintes aux modèles réduits d'aéronefs et aux drones, Office fédéral de l'aviation civile, OFAC). Cette démarche complique particulièrement une intervention. Nous pouvons citer l'exemple de l'aéroport des Eplatures, situé en périphérie de La Chaux-de-Fonds, qui par sa proximité réduit fortement la liberté de lancer un drone au-dessus de la ville.

III.3 Problématiques spécifiques à chaque type de drone

Les **ailes** sont faites pour voler régulièrement, sans avoir à éviter des obstacles, afin de tapisser une zone par des images à une hauteur d'environ 150 m en dessus du sol. Elles ne peuvent embarquer que des objets extrêmement légers, tels que des appareils photo compacts aux caractéristiques optiques assez rudimentaires, même si celles-ci sont en constante augmentation (<https://www.sensefly.com/drones/accessories.html>). Ces capteurs permettent actuellement d'atteindre, au mieux, une résolution (taille de chaque pixel sur le sol) d'environ 2 à 4 cm, encore insuffisante pour identifier des dégradations telles que des fissures.



Une fissure dans une orthophoto générée à une résolution de 1 mm par le système ARRPA.



La même portion de revêtement, à la même échelle, dans une orthophoto à une résolution de 5 cm.

Finalement, une aile peut prendre son envol dans un espace assez restreint, mais a besoin d'une aire d'atterrissage conséquente, de la dimension d'un champ ou d'un terrain de sport, qui génère une contrainte supplémentaire à son usage. Par ailleurs, son autonomie en vol est de l'ordre de 45 minutes.

Les **multicoptères** sont beaucoup plus maniables qu'une aile et permettent de voler beaucoup plus près du sol, et donc théoriquement à l'intérieur-même d'une rue, plus bas que la hauteur des bâtiments avoisinant. Certains d'entre eux permettent de transporter une charge utile un peu supérieure à une aile. Cependant, l'autonomie de leur batterie se limite actuellement à 25-30 minutes.

Ils peuvent être télécommandés **manuellement**. Or une acquisition d'images pour un traitement photogrammétrique demande une grande régularité dans la disposition et l'orientation des images dans les trois dimensions. Stabiliser manuellement un drone à une hauteur fixe de quelques mètres au-dessus d'une chaussée est presque impossible, tout autant que conserver une direction horizontale stable à une vitesse constante. Un essai récent qui nous a été rapporté, a même démontré cette impossibilité en raison des turbulences provoquées par des véhicules en mouvement sur la chaussée.

Un vol avec ce type de drone peut aussi être préconfiguré puis géré par un système d'**autopilote**. Mais celui-ci nécessite une réception **GNSS** (GPS et autres constellations de satellites de positionnement) de précision professionnelle (quelques centimètres) qui engendre des coûts élevés lors de l'achat du drone ainsi que d'un abonnement à ce type de service. Une précision métrique, gratuite, telle que sur un smartphone, ne permettrait pas de stabiliser régulièrement un drone à seulement quelques mètres au-dessus d'une chaussée. De plus, quel que soit la technique de mesure GNSS, une telle configuration demanderait une connaissance préalable de la déclivité d'une chaussée afin de saisir la variation de l'altitude du drone (la hauteur en dessus du sol devant rester constante). Et finalement, un relevé en zone urbaine, où la disponibilité des satellites de positionnement est restreinte par le tissu bâti, serait impossible.

Quel que soit leur mode de maniement, ce type de drone volant à très basse altitude au-dessus d'une chaussée serait contraint de contourner un certain nombre d'**obstacles** tels que des arbres, des candélabres ou des câbles électriques.

III.4 Conclusions

L'usage de drone pour l'acquisition d'images d'une chaussée à usage photogrammétrique n'est actuellement pas envisageable en raison de contraintes législatives ou techniques, sans oublier les coûts encore élevés de cette technologie.

Il est infiniment plus simple (géométriquement et pratiquement) et meilleur marché de fixer des appareils photo sur un véhicule se déplaçant sur la chaussée à ausculter.

III.5 Littérature

Gandor, F., Rehak, M., Skaloud, J., *Planificateur de missions photogrammétriques pour drones ultra-légers (Micro Aerial Vehicle MAV)*, Géomatique suisse, septembre 2015

Huber, F., *Drohnen im Praxiseinsatz*, Géomatique Suisse, septembre 2014

Jusot, Y., Berthenet, N., *Drones objets volants ou objets connectés ?*, Géomatique suisse, septembre 2016

Matti, E., Nebiker, S., Deuber, M., *Effiziente hochaufgelöste 3D-Erfassung und Medellierung des Schaffhauser Munots*, Géomatique Suisse, septembre 2014

Musy, J., *Etude sur l'utilisation des orthomosaïques dans la mise à jour périodique du canton de Neuchâtel*, Géomatique suisse, février 2016

senseFly, fournisseur de drones, Cheseaux-sur-Lausanne, www.sensefly.com

Skaloud, J., Rehak, M., Clausen, P., *Ein Mikroflugzeug zur genaueun Kartierung ohne Passpunkte am Boden*, Géomatique Suisse, septembre 2014

Zwicky, A., *vAIRmessung in der Schällibaum AG*, Géomatique Suisse, septembre 2014

Glossaire

Terme	Signification
GPS	Global Positioning System
CEN	Comité Européen de Normalisation
VSS	Association suisse des professionnels de la route et des transports
ARRPA	Auscultation de revêtements routiers par photogrammétrie automatisée
SN	Norme Suisse
MNS	Modèle numérique de surface
SIG	Système d'information géographique
BIM	Building Information Model
CAO	Conception assistée par ordinateur
HEIG-VD	Haute école d'ingénierie et de gestion du canton de Vaud
LCMS	Laser crack measurement system
BASt	Bundesanstalt für Strassenwesen
FEHRL	Forum of European National Highway Research Laboratories
MESAS	Multifunktionales Erfassungssystem zur Substanzbewertung und zum Aufbau von Strassen

Bibliographie

Normes

- [1] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS, « **Gestion de l'entretien des chaussées (GEC) ; Relevé d'état et appréciation en valeur d'indice** » + « **Annexe** », VSS 40 925b, mars 2019.
- [2] Association suisse des professionnels de la route et des transports VSS, « **Gestion de l'entretien des chaussées (GEC) ; Relevé d'état visuel : indices individuels** », VSS 40 926, mars 2019.

Documentation

- [3] Direction de la Gestion des Infrastructures, « **Système d'inspection des chaussées de l'Administration portuaire de Montréal** », *Présentation, décembre 2015*.
- [4] J. Vallet et P. Schaer, « **Des nuages sur la route** », Tracé, janvier 2016.
- [5] P. Schear, J. Vallet, « **Trajectory adjustment of mobile laser scan data in GPS denied environments** », The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XL-3/W4, 2016.
- [6] N. Spaldin, « **Multiferroics : Past, present, and future** », MRS Bulletin, Volume 42, May 2017.
- [7] A. Kersting, P. Friess, « **Post-mission quality assurance procedure for survey-grade mobile mapping systems** », The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XLI-B1, 2016.
- [8] J. Burkhard, S. Nebiker et H. Eugster, « **Stereo** », Géomatique Suisse, 2011.
- [9] Association mondiale de la route AIPCR (2012), « **Evaluation de la performance des équipements automatisés de mesure de la fissuration des chaussées** ». Rapport 2012R10FR publié par le Comité technique CT 4.2.
- [10] Direction du laboratoire des chaussées, « **Assurance de la qualité des données recueillies par le véhicule de mesure de l'état des chaussées** ». Bulletin d'information technique, vol. 22, n°1, Québec, mars 2017.
- [11] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (2006), « **Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Strassen; ZTV ZEB-StB** », FGSV-Nr. 489, FGSV Verlag, 2006.
- [12] J. Albertz et M. Wiggengagen, « **Guide for photogrammetry and remote sensing** », Wichmann, 2009.
- [13] M. Gavilan, D. Balcones, et al., « **Adaptive road crack detection system by pavement classification** », Sensors, 2011.
- [14] G. Allaz et M. Kasser, « **Auscultation de l'état de surface de revêtements routiers par photogrammétrie automatisée** », Géomatique Suisse, N°1, 2016.
- [15] G. Allaz, M. Kasser et F. Laferrière, « **Auscultation de revêtements routiers par photogrammétrie** », Route et trafic, N°6, 2016.
- [16] Direction du laboratoire des chaussées, « **Véhicule d'auscultation des chaussées** ». Bulletin d'information technique, vol. 16, n°2, Québec, mai 2011.
- [17] Petr Dokládál, « **Statistical Threshold Selection for Path Openings to Detect Cracks** » International Symposium on Mathematical Morphology and Its Applications to Signal and Image Processing, ISSM 2017, May 2017, Fontainebleau, France. pp.369-380.
- [18] Bundesamt für Strassen ASTRA, « **Schadenkatalog für Strassenbeläge** », Forschungsproject VSS 13/88 auf Antrag des Schweizerische Verband der Strassen und Verkehrsfachleute (VSS), 1992
- [19] Bundesanstalt für Strassenwesen, « **MESAS Multifunktionales Erfassungssystem zur Substanzbewertung und zum Aufbau von Strassen** », 2018.
- [20] BASt spezial, « **Sonderausgabe duraBAS: Demonstrations-, Untersuchungs- und Referenzareal der Bundesanstalt für Strassenwesen** », 2017.
-

Clôture du projet

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Version du 09.10.201

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le : 21.05.2020

Données de base

Projet N° : VSS 2016/321

Titre du projet : Orthophotos et modèles numériques de surface pour quantifier les dégradations des revêtements routiers

Echéance effective :

Textes :

Résumé des résultats du projet :

Ce projet a établi que l'auscultation photogrammétrique fonctionne de manière très satisfaisante. La résolution est semblable à celle obtenue avec les meilleurs couples laser + caméra linéaire du marché. Elle permet de détecter des fissures avec une ouverture de l'ordre de 2 mm et des trous laissés par des gravillons perdus de l'ordre de 4 mm. Un relevé visuel détecte 25% de fissures en plus que le relevé automatique en raison de la présence de fissures d'ouverture inférieure à 2 mm. Un relevé par comptage de trous dans la chaussée détecte 10% de perte de gravillons en plus ou en moins que le relevé automatique. Ce projet a également illustré que l'auscultation photogrammétrique n'est pas une méthode «bon marché»; ce qui vient contredire une hypothèse formulée au départ. Les nombreuses étapes de contrôle manuel, surtout en ce qui concerne la détection des fissures, rend la méthode coûteuse malgré un investissement initial faible.

Le grand avantage du système étudié réside dans sa précision géographique de l'ordre du centimètre, une valeur qui surpasse de loin les possibilités des systèmes à haut rendement du marché. Grâce à cette précision centimétrique, une vaste surface peut être auscultée sans discontinuité entre les bandes de passage, des mesures successives permettent de suivre une dégradation particulière «à la loupe», les données sont parfaitement superposables avec des informations provenant d'autres sources géoréférencées (SIG).

Le découpage de surface proposé est une grille dont chaque cellule mesure 50x50 cm et qui est orientée suivant les points cardinaux. Les grandeurs objectives proposées en relation avec cette grille sont des [m/cellule] pour les fissures, [m²/cellule] pour le faïençage, [gravillons/cellule] pour la perte de gravillons. Une unité binaire [0/cellule] et [1/cellule] est une autre forme possible de présentation, simple d'interprétation, pour signaler la présence de fissures ou nids de poules. Contrairement aux statistiques par segments de route, la grille offre une vue plus détaillée d'où peuvent émerger des éléments d'interprétation.

Au stade actuel de son développement technologique, la photogrammétrie convient très bien à des auscultations de petits tronçons de route.



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 :

Le travail a permis de démontrer la capacité du système d'auscultation photogrammétrique à correctement détecter les pertes de gravillons, les fissures et les nids de poule; ainsi que différencier les fissures colmatées et le faïençage; et enfin différencier les pelades des nids de poule.

Le travail a permis de proposer des grandeurs quantitatives absolues pour chaque dégradation auscultée; les grandeurs proposées le sont selon deux échelles de statistique: par section de route ou par grille.

L'exactitude des résultats a été analysée par des comptages manuels et des mesures de répétabilité.

Le dernier objectif qui consistait à identifier les grandeurs les plus adaptées à la gestion de l'entretien n'a pas été atteint en raison d'une trop faible quantité de résultats exploitables.

Déductions et recommandations :

Avec une vitesse d'auscultation de seulement 15 km/h, le système photogrammétrique n'est pas configuré pour se fondre dans le trafic. Rechercher les moyens d'augmenter cette vitesse à au moins 60 km/h paraît indispensable.

La haute précision de la géolocalisation des pixels enregistrés est un atout pour suivre en détail l'état d'une route et pour fournir, par la même occasion, une modélisation intégrale de cette même route (relevé géométrique).

Les auscultations menées avec des véhicules à grand rendement et celles menées avec le système photogrammétrique se révèlent complémentaires; le premier détecte les secteurs critiques du réseau, le second examine en particulier le secteur critique.

S'assurer de la justesse du relevé des fissures est problématique en l'absence d'un banc d'essai.

Celui-ci devrait être accessible à tous les prestataires de service pour les vérifications qualitatives de la collecte et du traitement des données et l'homologation des véhicules.

Publications :

Chef/cheffe de projet :

Nom : Beltzung

Prénom : Françoise

Service, entreprise, institut : HEIG-VD/Centre de Compétences du Domaine Routier

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 :

Une importante partie du projet porte sur la description de la méthode de relevé photogrammétrique développée à la HEIG-VD. Cette description souligne les avantages de la méthode concernant la géolocalisation des images, qui permet une superposition fiable des résultats de relevés successifs. Le système n'a été testé que sur des sections de route relativement courtes, en milieu urbain et sur des chaussées très dégradées. Le relevé des données ne peut s'effectuer qu'à faible vitesse (de l'ordre de 15 km/h). Le système de détection automatique a été testé sur les dégradations superficielles : les fissures, le faïençage, la perte de gravillon et les nids de poule et pelade. Des grandeurs permettant une quantification de ces différentes dégradations ont été proposées. La détection automatisée des dégradations nécessite encore une assistance manuelle conséquente. A titre d'exemple, le système ne permet de détecter que les fissures ayant une ouverture supérieure à 2 mm. Les coûts actuels pour l'utilisation de la méthode étudiée sont encore relativement élevés.

Mise en oeuvre :

Dans son état actuel, la méthode de relevé étudiée n'est pas prête pour une utilisation à l'échelle d'un réseau en raison de la faible vitesse de relevé et du besoin de traitement manuel des résultats. Elle permet en revanche des études détaillées sur des secteurs limités. Les indicateurs proposés pour la quantification des dégradations n'ayant été testés que sur un nombre restreint de chaussées fortement dégradées, il n'est pas possible de juger de leur efficacité pour une intégration dans des méthodes de planification de l'entretien des chaussées. Ces indicateurs constituent néanmoins des propositions pouvant contribuer à une définition moins arbitraire des dégradations de surfaces des chaussées.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

Il est nécessaire de poursuivre des recherches sur les méthodes d'exploitation des relevés 3D pour la définition de grandeurs permettant de caractériser les dégradations de surface. Ces recherches doivent être focalisées plus sur l'exploitation des données issues des modèles 3D que sur la technique utilisée pour obtenir ces modèles.

Influence sur les normes :

Moyennant des travaux de validation, il est envisageable d'utiliser certaines des grandeurs proposées pour quantifier les dégradations de surface lors d'une révision de la norme VSS 40925

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Perret

Prénom : Jacques

Service, entreprise, institut : Nibuxs sarl

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