

**Classification automatique de la durabilité du marquage
longitudinal des routes sous la responsabilité du
ministère des Transports par vision artificielle**

Projet R831.1

RAPPORT FINAL

Denis Laurendeau, Ph.D., ing.

Université Laval

Réalisé pour le compte du ministère des Transports

Décembre 2020

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports et a été financée par la Direction générale de la gestion des actifs routiers et de l'innovation.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports.

SOMMAIRE

Ce rapport présente les travaux effectués dans le cadre du contrat intitulé « *Classification automatique de la durabilité du marquage longitudinal des routes sous la responsabilité du ministère des Transports par vision artificielle* » (Projet de recherche R831.1).

Les éléments abordés dans le rapport portent sur :

1. Le montage proposé pour l'acquisition des données sur le marquage longitudinal
 - a. Matériel d'acquisition des données et montage mécanique.
 - b. Suspension pour le montage mécanique.
 - c. Conditions d'acquisition des images avec le système.
2. Les algorithmes d'analyse du marquage longitudinal pour la détection des lignes.
3. La performance de l'approche de détection des lignes simples.
4. La classification de la qualité du marquage longitudinal en cinq catégories.
5. La conclusion

SYNTHÈSE DE CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

L'évaluation de la qualité du marquage longitudinal des routes sous la juridiction du ministère par la vision artificielle est une tâche difficile à cause de plusieurs facteurs dont : la grande diversité des types de marquages, la grande diversité des conditions environnementales (accotement, entourant les routes sur lesquelles est appliqué le marquage, les conditions d'éclairage, les conditions météorologiques et la vitesse du véhicule.

Le rapport présente une première approche de solution pour l'estimation de la qualité du marquage qui atteint des bonnes performances de repérage des lignes dans plusieurs conditions. Ceci dit, la difficulté du problème a eu comme conséquence que les travaux n'ont pu aborder la mesure du marquage restant. Une recommandation serait de poursuivre les travaux afin de pouvoir compléter le système d'évaluation, car des solutions prometteuses sont envisageables.

Introduction

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	12
2. MONTAGE PROPOSÉ POUR L'ACQUISITION DES DONNÉES SUR LE MARQUAGE LONGITUDINAL	13
2.1.Matériel d'acquisition des données et montage mécanique.....	13
2.2.Suspension pour le montage mécanique.....	19
2.3.Recommandations pour la collecte des données.....	20
3. ALGORITHMES D'ANALYSE DU MARQUAGE LONGITUDINAL POUR LA DÉTECTION DES LIGNES	20
3.1.Calibrage géométrique du système de caméras.....	21
3.2.Algorithmes de prétraitement des images pour le repérage des lignes de marquage longitudinal.....	24
3.3.Algorithmes de détection des lignes de marquage dans les images redressées par l'homographie	26
3.3.1. Traitements sur les images complètes.....	27
3.3.2. Analyse des zones d'image correspondant aux pics de corrélation sélectionnés	36
4. PERFORMANCE DE L'APPROCHE DE DÉTECTION DES LIGNES SIMPLES.....	50
5. CLASSIFICATION DE LA QUALITÉ DU MARQUAGE LONGITUDINAL EN CINQ CATÉGORIES.....	56
6. CONCLUSION	56
RÉFÉRENCES	57
ANNEXE A	58
ANNEXE B	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Lentilles montées sur les caméras de la Figure 1 (a) et cadence d'acquisition de chaque caméra.....	14
Tableau 2 Nombre de lignes minimal et maximal pour chaque type de ligne	52
Tableau 3 Liste des classes d'usure des lignes de peinture	54

LISTE DES FIGURES

Figure 1 (a) Montage des 5 caméras, du GPS et de l'ordinateur de bord sur le véhicule. (b) Champs de vue observés sur la chaussée par les caméras 1 et 2. (c) Vues des caméras d'observation des zones de lignes 1-2 (cercles bleus) et 3-4 (cercles rouges) sur le véhicule et en gros plan pour chaque côté du véhicule (Toyota Prius). 16

Figure 2 (a) Route nationale avec une voie dans chaque direction : toutes les lignes (traits rouges) sont visibles en une seule passe dans une voie et dans une direction. (b) Route nationale avec deux voies dans chaque direction : quatre lignes sont visibles (traits en rouge). Un passage dans chaque direction est nécessaire. Dans ce cas, des lignes seront visibles dans les deux passages. (c) Route nationale avec terre-plein avec une voie dans chaque direction : dépendant de la configuration du terre-plein, il se peut que toutes les lignes soient visibles (traits en rouge) en une seule passe et une seule direction ou que seul un sous-ensemble de celles-ci le soit (caractère « ? » en rouge), auquel cas il faut effectuer une passe dans l'autre direction. 17

Figure 3 Différents modèles de suspensions qui ont été étudiés pour l'amortissement des vibrations. (a) Suspension à câbles. (b) Mécanisme à parallélogramme avec amortisseur. (c) Amortissement à butées. 19

Figure 4 (a) Modèle de sténopé de la caméra. (b) Cible de calibrage géométrique. 23

Figure 5 Exemple de redressement des images. (a) Image recueillies avec la caméra 3 (haut) et la caméra 4 (bas). (b) Redressement et fusion des images de (a). 26

Figure 6 (a) Image RGB (gauche) et les trois composantes HSV. (b) Échantillon d'une ligne de marquage jaune. (c) Histogramme de distribution statistiques H-S. (d) Image de marquage jaune. (e) Probabilité de chaque pixel des lignes jaunes basée sur la distribution de (c). (f) Masque résultant du seuillage de (e). (g) Application du masque de (f) sur (d) identifiant les pixels les plus susceptibles d'appartenir à la ligne de marquage jaune. 28

Figure 7 (a) Noyau de cross-corrélation avec un bande blanche (modélisant la ligne de marquage) de hauteur H_B et une bande noire de hauteur $H_B/2$ au-dessus et en-dessous de la bande blanche. La hauteur totale du noyau est H_M . Les trois bandes ont une largeur L_O . (b) Image de la chaussée (gris clair) de largeur L_O et de hauteur H_O . Cette image est préparée pour la cross-corrélation en lui ajoutant une bande de hauteur H_M et de largeur L_O en haut et en bas. Ces bandes supérieures et inférieures sont construites en répétant respectivement la ligne la plus haute et la ligne la plus basse de l'image de la chaussée. 29

Figure 8 (a) Image de la chaussée recueillie par la caméra 4 (haut). Détection de la ligne (bas). (b) Résultat de la cross-corrélation normalisée du noyau de la Figure 7 (a) avec l'image (courbe en rouge). La dérivée de la corrélation est montrée en bleu. Le maximum de corrélation est à la ligne 456 de l'image.... 30

Figure 9 Cas simples de traitement des données brutes résultant de la cross-corrélation. (a) Ligne présente dans l'image. (b) Zone de chaussée sans ligne. (c) Zone de chaussée sans ligne, mais avec une crevasse à un endroit où une ligne pourrait potentiellement être présente. 32

Figure 10 Estimation de la proéminence de pics sur une courbe de cross-corrélation. 33

Figure 11 Cas difficile causé par la présence de l'ombre de la voiture projetée sur la chaussée et qui cause la cross-corrélation à produire des pics et des vallées tels que la proéminence des pics est considérée comme assez grande pour correspondre à des lignes de marquage. 35

Figure 12 Exemple d'une route contenant une ligne de peinture blanche. Le pic de corrélation repéré par la ligne pointillée verte (id 1) a été validé et correspond bien à la ligne de peinture. Les lignes pointillées rouges ont été correspondent aux pics de corrélation éliminés à cette étape de traitement. Ces deux pics ont été générés par le bas-côté (id 0) et l'ombre de la voiture (id 2). L'image a été tournée de 90° vers la gauche de telle sorte que la partie la plus à gauche correspond la partie la plus éloignée de la voiture. La ligne de peinture blanche est celle qui sépare la voie droite du bas-côté de la route..... 37

Figure 13 Résultats des traitements de la zone de la ligne de peinture blanche de l'image de la Figure 12. (a) Masque binaire fusionné obtenu par seuillage d'Otsu. (b) Le seul contour et son rectangle orienté extrait du masque binaire (a). (c) Histogramme de la zone de l'image avec le seuil trouvé indiqué par la ligne pointillée rouge. 37

Figure 14 Résultats des traitements de la zone du bas-côté de la route dans l'image de la Figure 12. (a) Masque binaire fusionné obtenu par seuillage d'Otsu. (b) Contours et rectangles orientés extraits du masque binaire (a). (c) Histogramme de la zone de l'image avec le seuil trouvé indiqué par la ligne pointillée rouge. 38

Figure 15 Résultats des traitements de la zone de l'ombre de la voiture dans l'image de la Figure 12. (a) Masque binaire fusionné obtenu par seuillage d'Otsu. (b) Contours et rectangles orientés extraits du masque binaire (a). (c) Histogramme de la zone de l'image avec le seuil trouvé indiqué par la ligne pointillée rouge. 39

Figure 16 Exemple d'une partie de route contenant deux lignes de peinture blanche usée, une flèche et une bordure de trottoir. Les pics de corrélation repérés par les lignes pointillées vertes (id 6, position 6633) et bleus (id 1, position 3371) ont été validés et correspondent aux lignes de peinture. Les lignes pointillées rouges correspondent aux pics de corrélation générés par la bordure de trottoir (id 0, position 2214) et la flèche (id 5, position 5381). 39

Figure 17 Résultats des traitements de la ligne blanche partiellement usée dans l'image de la Figure 16. (a) Masque binaire fusionné obtenu par seuillage d'Otsu. (b) Contours et rectangles orientés extraits du masque binaire (a). (c) Histogramme de la zone de l'image avec le seuil de 106 indiqué par la ligne pointillée rouge. 40

Figure 18 Résultats des traitements de la ligne blanche fortement usée dans l'image de la Figure 16. (a) Masque binaire fusionné contenant beaucoup de petites régions (points) trop petits pour être analysés. (b) Contours et rectangles orientés entourant les deux régions d'avant-plan analysées. (c) Histogramme de la zone de l'image avec le seuil de 135 indiqué par la ligne pointillée rouge. . 41

Figure 19 Résultats des traitements de la bordure de trottoir dans l'image de la Figure 16. (a) Masque binaire fusionné. (b) Contours et rectangles orientés. Le gros rectangle rouge ayant une coupe verticale de 287 mm est celui ayant permis de déduire que cette zone ne correspond pas à une ligne de peinture valide. (c) Histogramme de la zone de l'image avec indication du seuil d'Otsu d'illuminance de 94 par la ligne pointillée rouge. 41

Figure 20 Résultats des traitements de la flèche de peinture. (a) Masque binaire fusionné. (b) Contours et rectangles orientés. Les deux gros rectangles rouges ayant une coupe verticale de 228 et de 230 mm ont permis de déduire que cette zone ne correspond pas à une ligne de peinture valide. (c) Histogramme de la zone de l'image avec indication du seuil d'Otsu d'illuminance calculée de 140..... 42

Figure 21 Exemple d'une partie de la route contenant des marquages en relief sur le bas-côté. Deux pics de corrélation ont été sélectionnés. Le pic d'id 2 (ligne pointillée verte) se trouvant à la position 6323 correspond à une ligne de peinture validée par les traitements. Le pic d'id 0 (ligne pointillée rouge) se trouvant à la position 5557 correspond à une zone de marquage en relief (avertisseurs) en bordure de la route a été correctement éliminé par les traitements. 43

Figure 22 Détail de la zone de marquage en relief du bord de la route. (a) Masque binaire fusionné. (b) Contours et rectangles orientés. Trois rectangles rouges ont permis de déduire que cette zone ne correspond pas à une ligne de peinture valide. (c) Histogramme de la zone de l'image avec indication du seuil d'Otsu d'illuminance de 78..... 43

Figure 23 Détails sur la fusion du masque binaire du marquage en relief. (a) Image en niveaux de gris. (b) Masque binaire calculé à partir du seuil d'illuminance de 78. (c) Masque binaire fusionné. (d) Contours et rectangles orientés. Les rectangles rouges à coins arrondis des figures (b) et (c) indiquent les régions d'avant-plan éliminées grâce à la fusion du masque binaire. Les deux cercles verts mettent en évidence une région de la zone où des points d'avant-plan qui étaient séparés dans la figure (b) ont été fusionnés à l'une des six régions principales dans la figure (c)..... 44

Figure 24 Lignes non détectées à cause d'une forme irrégulière ou d'une largeur trop grande. (a) et (b) Lignes blanches constituées de deux bandes étroites dont l'une est beaucoup plus usée ou plus fine que l'autre. (c) et (d) Lignes blanches trop large..... 46

Figure 25 Lignes non détectées à cause d'un marquage au sol. (a) Lignes blanches correctement détectées (indiqué par les deux lignes pointillées vertes) avec marquage au sol proche, mais n'étant pas en contact avec elles. (b) Mêmes lignes qu'en (a) quelques dizaines de centimètres de route plus loin. Le marquage touche maintenant les deux lignes et empêche leur bonne détection (indiqué par les deux lignes pointillées rouge). (c) Marquage d'arrêt touchant une des deux lignes. (d) Voiture blanche aillant le même effet qu'un marquage au sol. (e) Un point collé à la ligne blanche du haut (id 2). (f) Premier pointillé d'une voie de sortie collé sur la ligne du bas-côté. 47

Figure 26 Lignes non détectées à cause de leur position, inclinaison ou éclairage. (a) Ligne blanche collée à la bordure du bas de l'image (contre la voiture). (b) Ligne blanche trop inclinée. (c) Ligne blanche effacée et cachée dans l'ombre de la voiture (à peine visible à l'œil nu) 48

Figure 27 Fausses lignes détectées dans le bas-côté. La ligne #3 bleue de la figure (a) et la ligne #0 bleue de la figure (b) indiquent chacune un objet brillant détecté comme une ligne de peinture sur le bas-côté. La ligne #3 verte de la figure (c) indique une bande plus lumineuse sur un rail de sécurité vu comme une ligne de peinture. 49

Figure 28 Site d'acquisition des séquences vidéo ayant servi à l'analyse statistique présentée dans cette section. 51

Figure 29 Exemple d'une image de transition contenant une ligne simple proche (id 3 en vert), une ligne simple incomplète (id 0 en bleu), un autre véhicule et l'ombre projetée de la voiture. 52

Figure 30 (a) Route de type « sp » contenant une ligne simple complète et une double dont la ligne proche est incomplète (ou partiellement effacée). (b) Les

lignes détectées ont été dessinées en bleu pour la simple (id 0), en vert et cyan pour la double (ids 1 et 2). 53

Figure 31 (a) Route de type « ip » contenant une ligne simple incomplète et une double dont la ligne proche est incomplète ou partiellement effacée. (b) Les lignes détectées ont été dessinées en bleu pour la simple (id 0) et en vert pour la ligne double proche (id 1)..... 54

Figure 32 Performance du système de détection de lignes pour la portion de 30 km inspectée sur la Route-des-Rivières..... 55

1. INTRODUCTION

Ce rapport d'étape 4 présente la configuration complète du montage et la description des algorithmes d'analyse du marquage longitudinal pour le contrat intitulé « *Classification automatique de la durabilité du marquage longitudinal des routes sous la responsabilité du ministère des Transports par vision artificielle* » (Projet de recherche R831.1).

L'objectif du projet est d'explorer la possibilité d'utiliser la vision artificielle pour effectuer la classification du marquage longitudinal des routes. Sur chaque kilomètre de marquage longitudinal exploré, le système devrait être en mesure de classer la qualité du marquage en 5 classes allant d'une classe comprenant le marquage neuf jusqu'à une classe où le marquage est usé au point de ne plus être visible par endroits. La classification n'a pas à être accomplie en temps réel. Par contre, l'acquisition des données sur le marquage doit l'être, ne doit entraver ni la circulation ni la sécurité des usagers de la route et doit exiger le moins de passages possibles sur chaque route. C'est un problème difficile à cause des conditions environnementales dans lesquelles les images doivent être recueillies.

Tel que décrit à la Section 2.3 ci-dessous, la collecte des données n'exige aucune mesure particulière car les séquences vidéo sur le marquage longitudinal peuvent être enregistrées dans des conditions normales de circulation car le véhicule sur lequel est installé le montage peut rouler sur la voie sans escorte à la vitesse prescrite par le code de la route. En fait, dans la configuration du système et selon ses paramètres de fonctionnement, le véhicule peut rouler à une vitesse allant jusqu'à 120 km/h sans poser de problème sur la qualité des données sur le marquage. Comme la limite de vitesse maximum sur les autoroutes est de 100 km/h, le système possède encore une marge sur ses limites de fonctionnement.

Les éléments abordés dans le rapport portent sur :

1. Le montage proposé pour l'acquisition des données sur le marquage longitudinal
 - a. Matériel d'acquisition des données et montage mécanique.
 - b. Suspension pour le montage mécanique.
 - c. Conditions d'acquisition des images avec le système.
2. Les algorithmes d'analyse du marquage longitudinal pour la détection des lignes.
3. La performance de l'approche de détection des lignes simples.
4. La classification de la qualité du marquage longitudinal en cinq catégories.
5. La conclusion.

2. MONTAGE PROPOSÉ POUR L'ACQUISITION DES DONNÉES SUR LE MARQUAGE LONGITUDINAL

Cette section présente les équipements retenus pour l'acquisition des données sur le marquage longitudinal ainsi que la configuration de ceux-ci sur le véhicule.

2.1. Matériel d'acquisition des données et montage mécanique

La solution retenue pour la classification automatique du marquage longitudinal repose sur l'exploitation de la vision artificielle utilisant des caméras vidéos observant les lignes de marquage au sol. Pour tenir compte des multiples configurations de lignes de marquage longitudinal décrites dans le document [MTQ2019], plusieurs caméras sont nécessaires pour observer simultanément plusieurs lignes (simples, doubles ou pointillées) en un seul passage du véhicule sur une voie (dans une direction) et sans perturber la circulation ni mettre en danger la sécurité des usagers de la route. Les caméras sont connectées à un ordinateur embarqué qui stocke les données pour un traitement ultérieur en différé.

Tel que montré à la Figure 1 (a), le montage retenu pour le système compte 5 caméras vidéos de marque DALSA Genie Nano C1920 Color. Deux caméras, identifiées par 1 et 2, sont montées d'un côté du véhicule et observent chacune une zone de lignes¹ alors que deux autres caméras, identifiées par 3 et 4, observent deux zones de lignes de l'autre côté du véhicule. La Figure 1 (c) montre l'installation des caméras sur le véhicule (Toyota Prius) ayant servi à la collecte des données dans le cadre du contrat. Les zones de lignes observées par ces quatre caméras peuvent contenir du marquage simple, double ou pointillé². La dernière caméra, identifiée par 5 sur la Figure 1 (a), observe la route à l'avant du véhicule³. Elle ne sert pas à l'évaluation du marquage, mais est utile pour documenter les séances de collecte de données et, pour un utilisateur, pour repérer quel segment de route est à l'étude. Comme le véhicule peut se déplacer à grande vitesse (jusqu'à 100 km/h), cette configuration à 4 caméras d'observation des zones de marquage est proposée pour assurer une bonne résolution lors de l'observation des lignes et de l'estimation de la classe du marquage restant. Le choix des lentilles montées sur les caméras est aussi crucial pour atteindre une bonne qualité de classification du marquage. Les

¹ Par "zone de lignes" on entend une partie de la chaussée où une ou plusieurs lignes (p. ex. dans le cas du marquage double) peuvent être présentes.

² La couleur des lignes peut être blanc ou jaune.

³ Le véhicule qui a été utilisé pour faire les tests dans le cadre du contrat est une Toyota Prius. Il est évidemment possible d'utiliser un autre type de véhicule. Les caméras et autres équipements sont montés sur un cadre qui est lui-même installé sur le toit du véhicule.

caractéristiques des caméras et des lentilles utilisées par le système sont fournies au Tableau 1.

Les lentilles des caméras 1 et 3 ont une focale plus grande afin que l'image de la ligne éloignée de la voiture ait une taille comparable à celles des caméras 2 et 4, qui observent les lignes plus proches, pour assurer une meilleure uniformité dans la classification de la qualité du marquage. Tel que montré à la Figure 1 (b), les champs de vision des caméras 1 et 2 sont en recouvrement partiel et, par conséquent, observent la même région de la chaussée⁴. Un recouvrement semblable est aussi présent pour les caméras 3 et 4. Ce recouvrement est important pour les raisons décrites à la Section 2.

Tableau 1 Lentilles montées sur les caméras de la Figure 1 (a) et cadence d'acquisition de chaque caméra.

Caméra	Lentille (focale en mm)	Cadence (images/sec)	Résolution
1,3	<i>KOWA LM16HC – 16 mm</i>	17 ⁵	1920 x 1200 (12 bits/pixel)
2,4	<i>KOWA LM8HC – 8 mm</i>	17	1920 x 1200 (12 bits/pixel)
5	<i>KOWA LM6HC – 6 mm</i>	17	1920 x 1200 (12 bits/pixel)

Pour que l'estimation de la classe du marquage soit valide, il est important de calibrer les caméras 1-2-3-4 avant une campagne de collecte de données. Un guide de calibrage a été rédigé et est livré au ministère en même temps que ce rapport [COM2020a]. Un manuel de référence expliquant plus en détails la procédure de calibrage et les différents paramètres à prendre en compte est aussi livré avec le présent rapport [COM2020b]. La Section 2 fournit des informations additionnelles sur le calibrage des caméras.

Dans la configuration retenue, quand le véhicule circule dans une direction sur une voie, le système est en mesure de voir 4 zones de lignes. Par conséquent, on peut, entre autres, rencontrer des situations comme celles montrées sur la Figure 2.

- 1- Route nationale avec une voie dans chaque direction : toutes les lignes peuvent être observées en un seul passage dans une seule direction (Figure 2 (a)) ;
- 2- Route nationale avec deux voies dans chaque direction (Figure 2 b) : 4 zones de lignes peuvent être observées lors d'un passage dans la voie

⁴ Cette partie commune n'inclut pas nécessairement une ligne de marquage.

⁵ À une cadence de 17 images/sec, les caméras sont synchronisées par matériel. Si une synchronisation matérielle n'est pas nécessaire, une cadence de 20 images/sec est possible. Cependant, à cause des traitements menant aux résultats montrés à la Figure 5, la synchronisation matérielle doit absolument être utilisée.

de gauche dans une direction. Il est par conséquent nécessaire d'effectuer un passage dans la direction opposée pour observer les zones de lignes qui ne l'ont pas été au premier passage.

- 3- Route nationale avec une voie dans chaque direction et terre-plein de séparation (Figure 2 c) : dépendant de la configuration du terre-plein (largeur, etc.), les lignes peuvent être toutes visibles ou seulement certaines d'entre elles peuvent l'être, ce qui exige qu'un second passage soit effectué pour couvrir l'ensemble des zones de lignes.

D'autres configurations sont évidemment possibles, notamment pour les autoroutes à 2-3 voies dans chaque direction. L'important est que l'utilisateur soit au courant que le système peut observer un maximum de 4 zones de lignes à la fois, chaque zone pouvant contenir une ou deux lignes, afin de planifier la campagne de collecte des données sur le réseau routier.

Évidemment, si un véhicule se déplace dans une voie voisine à la même vitesse que le véhicule de capture de données et obstrue le champ de vision d'une ou plusieurs caméras (surtout les caméras 1 et 3), le marquage sera invisible tant que l'obstruction persiste. L'utilisateur du système doit par conséquent moduler sa conduite en fonction des conditions de circulation. Il est bien sûr conseillé de procéder aux séances de collecte de données en dehors des périodes de pointe de trafic.

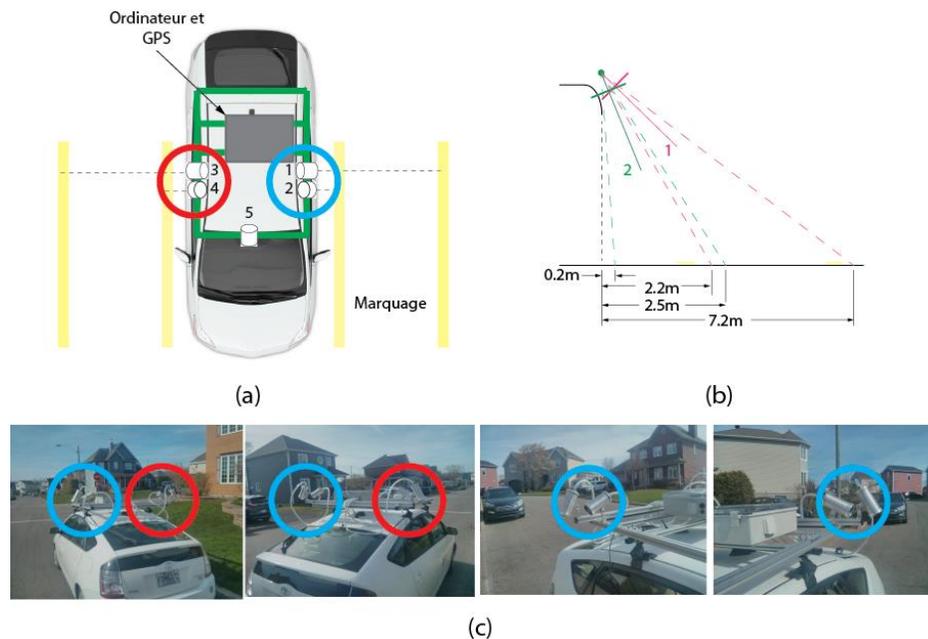


Figure 1 (a) Montage des 5 caméras, du GPS et de l'ordinateur de bord sur le véhicule. (b) Champs de vue observés sur la chaussée par les caméras 1 et 2. (c) Vues des caméras d'observation des zones de lignes 1-2 (cercles bleus) et 3-4 (cercles rouges) sur le véhicule et en gros plan pour chaque côté du véhicule (Toyota Prius).

Les cinq caméras sont connectées à un ordinateur de bord NEOUSYS Nuvo-7108 VTC (i7 Génération 8)⁶ avec 32 Go de mémoire centrale, un disque SSD de 500 Go et 2 disques SSD de 4 To. Le disque de 500 Go contient le système d'exploitation (Windows 10) et sert à stocker les données GPS recueillies par un appareil GPS-15712 de SparkFun Electronics. Les deux disques de 4 To servent à stocker les séquences vidéos recueillies par les 5 caméras. Le capteur GPS permet de localiser le véhicule dans l'environnement et, grâce aux données géo-localisées du MTQ, de savoir quel type de marquage est présent sur chaque segment de route. Ainsi, lors de l'étape d'analyse du marquage effectuée en traitement différé, il est possible de fournir aux algorithmes de vision artificielle l'information sur le type de marquage (simple, double, pointillé, couleur de peinture) à rechercher dans les images des caméras, ce qui facilite le repérage des lignes, surtout dans le cas du marquage usé.

⁶ Le modèle diffère de celui qui avait été initialement retenu dans les rapports précédents. La raison est que, pour un prix identique au précédent modèle, le modèle recommandé dans ce rapport est plus performant et que l'accès au disque système de 500 Go est aussi plus rapide. La vitesse d'accès aux disques de 4 To demeure cependant inchangée.

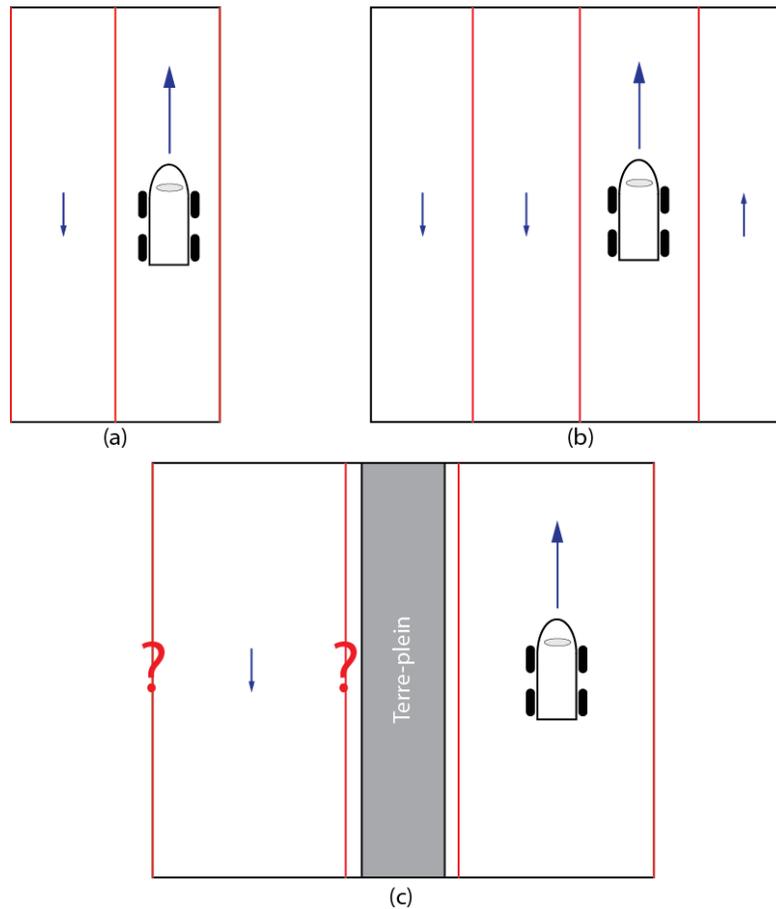


Figure 2 (a) Route nationale avec une voie dans chaque direction : toutes les lignes (traits rouges) sont visibles en une seule passe dans une voie et dans une direction. (b) Route nationale avec deux voies dans chaque direction : quatre lignes sont visibles (traits en rouge). Un passage dans chaque direction est nécessaire. Dans ce cas, des lignes seront visibles dans les deux passages. (c) Route nationale avec terre-plein avec une voie dans chaque direction : dépendant de la configuration du terre-plein, il se peut que toutes les lignes soient visibles (traits en rouge) en une seule passe et une seule direction ou que seul un sous-ensemble de celles-ci le soit (caractère « ? » en rouge), auquel cas il faut effectuer une passe dans l'autre direction.

Il est pertinent de mentionner que, lorsque les caméras sont synchronisées par matériel, ce qui est la configuration recommandée pour le système, la cadence d'acquisition est réglée à 17 images/sec, ce qui permet d'atteindre une vitesse du véhicule de 120 km/h sans qu'il y ait interruption d'observation du marquage⁷.

⁷ i.e. pour une ligne continue, par exemple, chaque partie de la ligne aura été vue dans au moins une image et toute la longueur de la ligne aura donc été observée. La vitesse maximum de 120 km/h du véhicule a été calculée pour la cadence de 17 images/sec. Comme la limite de vitesse

Les caméras, l'ordinateur de bord et l'unité GPS sont montées sur un cadre métallique léger lui-même attaché à une base de support à skis. Ce montage ne dépasse pas les limites du véhicule (voir Figure 1 (c)). Par conséquent, une fois le système installé solidement sur le toit, il ne représente pas un danger pour les autres usagers de la route car il n'entrave pas le passage des autres véhicules⁸ pas plus que celui des piétons et des bicyclettes. L'installation peut se faire en environ 40 minutes soit 10 minutes pour installer le montage sur le toit de la voiture (2 personnes⁹) et 30 minutes pour sécuriser l'installation, brancher les composantes et mettre le système en marche (1 personne).

Sur le plan de l'alimentation du système, le PC NEOUSYS Nuvo-7108 VTC accepte un voltage entre 9 v et 32 v, ce qui fait qu'il est alimenté directement par la batterie 12 v du véhicule via le port d'allume-cigarette. D'autre part, les cinq caméras et l'unité GPS sont alimentées directement par le PC NEOUSYS Nuvo-7108 VTC¹⁰.

Par conséquent, le système d'acquisition de données est d'installation simple tant sur le plan mécanique que sur le plan électrique.

Comme remarque finale sur le système d'acquisition, mentionnons qu'il est sensiblement le même que celui décrit dans le rapport [LAU2020] portant sur un contrat ayant fait l'objet d'un autre projet visant à proposer un système pour l'évaluation de la qualité du marquage sur les bancs d'homologation. Les éléments communs entre les deux systèmes sont les suivants :

1. Ordinateur NEOUSYS 7108 VTC ;
2. Caméras DALSA Genie Nano C1920 Color ;
3. Système GPS GPS-15712 de SparkFun Electronics ;
4. Cadre métallique et armature de fixation des équipements sur le toit du véhicule.

Les seules différences entre les deux systèmes sont les suivantes :

1. Les lentilles installées sur les caméras ne sont pas les mêmes car les contraintes de prises de vue sont différentes ;
2. Le positionnement des caméras sur le cadre de support est différent pour satisfaire les besoins propres aux deux applications.

sur les autoroutes du Québec est de 100 km/h, il est garanti, s'il n'y a pas d'occlusion du champ de vision de la caméra, que le système sera toujours en mesure d'observer le marquage sans discontinuités, c'est-à-dire sans que des segments de ligne continus n'aient pas été vus par le système.

⁸ Autos, motos, camions, camions semi-remorque.

⁹ Sans être très lourd, le montage, par sa taille, requiert la participation de deux personnes pour l'installation sur le toit.

¹⁰ Les caméras GigE DALSA Genie Nano C1920 Color sont alimentées via le câble réseau en mode PoE (Power over Ethernet). L'unité GPS est alimentée par le port USB auquel elle est branchée.

3. Le système pour l'évaluation du marquage longitudinal comprend une caméra additionnelle.

2.2. Suspension pour le montage mécanique

Comme le véhicule peut se déplacer à grande vitesse sur une route pouvant être endommagée par endroits et que le véhicule génère lui-même des vibrations, il est pertinent de limiter celles-ci pendant l'acquisition des séquences vidéos pour conserver un champ de vision relativement stable pour les caméras 1-2-3-4, éviter que les images soient floues¹¹ et ne pas affecter le calibrage des caméras.

Quelques modèles de suspension passive ont été discutés dans les rapports précédents dont, notamment, une suspension basée sur des câbles (Figure 3 (a)), un système de suspension à parallélogramme avec amortisseur (Figure 3 (b)) et un montage à butées amortissantes (Figure 3 (c)).

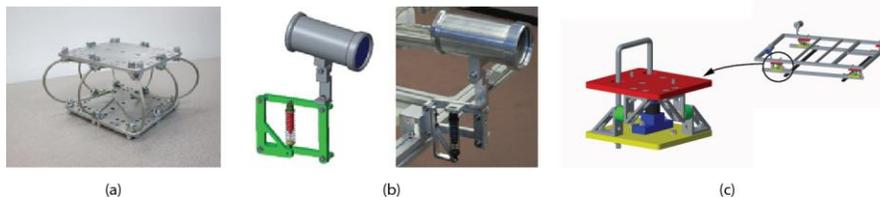


Figure 3 Différents modèles de suspensions qui ont été étudiés pour l'amortissement des vibrations. (a) Suspension à câbles. (b) Mécanisme à parallélogramme avec amortisseur. (c) Amortissement à butées.

Les essais n'ont pas été concluants pour les suspensions à câbles et à parallélogramme. La suspension à butées amortissantes a été installée sur le support et permet de filtrer les vibrations selon les trois axes. Des expériences plus approfondies n'ont pu être faites faute de pouvoir accéder à la voiture pendant la période de fermeture du campus universitaire en réaction à la pandémie¹².

¹¹ La cadence d'acquisition et le temps d'intégration des caméras ont été choisis pour limiter le flou dans les images pouvant résulter de ce déplacement tout en permettant une vitesse du véhicule qui respecte le code de la route et n'entrave pas la circulation. Les vibrations causées par une chaussée inégale ou endommagée sont à des fréquences élevées et imprévisibles, ce qui rend difficile de les éliminer complètement.

¹² Mentionnons que le Laboratoire de Vision et Systèmes Numériques possède un autre montage très similaire à celui décrit dans ce rapport. Des tests de vibration sur la suspension pourront être effectués sur ce montage et les résultats transmis au MTQ lorsqu'ils seront disponibles.

2.3. Recommandations pour la collecte des données

Le système fonctionnera de manière optimale si les conditions suivantes sont respectées lors des séances de collecte des données :

1. **Conditions météorologiques :**
 - 1.1. La collecte devrait se faire par beau temps (ensoleillé ou couvert, mais sans pluie) ;
2. **Conditions de la chaussée :**
 - 2.1. La chaussée devrait être sèche lors de l'acquisition des séquences vidéo ;
3. **Déplacement du véhicule :**
 - 3.1. Essayer de rester dans la même voie pour la collecte de la séquence vidéo de la section de route d'intérêt. Lors d'un changement de voie, des segments de ligne seront perdus lorsque le véhicule passera sur les lignes ;
 - 3.2. Essayer de conserver une trajectoire régulière dans la voie sans trop de louvoiement latéral de manière *i)* à ne pas rouler sur les lignes et *ii)* d'empêcher que la zone de lignes observée par la caméra 1 ou la caméra 2 sorte du champ de vision ;
 - 3.3. Essayer de rouler à vitesse constante en respectant les limites de vitesse imposées sur le segment de route d'intérêt ;
 - 3.4. Éviter de rouler à la même vitesse qu'un véhicule dans la voie adjacente sur de longues périodes¹³ pour éviter l'obstruction du champ de vision des caméras 1 et / ou 3 ;
 - 3.5. Essayer de procéder à la collecte des données en dehors des périodes de pointe de trafic. Le respect de cette recommandation permet de respecter plus facilement les recommandations 3.1, 3.3 et 3.4.

3. ALGORITHMES D'ANALYSE DU MARQUAGE LONGITUDINAL POUR LA DÉTECTION DES LIGNES

Cette section présente une étape préalable à la classification du marquage longitudinal, soit le calibrage des caméras. Est ensuite présentée la procédure à suivre pour procéder à l'acquisition des séquences vidéos du marquage. Les

¹³ Sur une route nationale à deux voies de circulation, il est impossible d'éviter le croisement d'autres véhicules. Cependant, ce croisement ne dure qu'une fraction de seconde et seules quelques images seront perdues.

algorithmes de traitement hors ligne des séquences vidéos pour la détection des lignes sont décrits en détail.

3.1. Calibrage géométrique du système de caméras

Le calibrage géométrique des caméras est essentiel à plusieurs opérations de traitement d'images, notamment celles menant aux résultats montrés à la Figure 5 et qui sont discutés plus loin. De plus, le calibrage géométrique permet de réduire significativement le nombre de seuils dans les traitements, ce qui favorise la robustesse de la méthode de classification. C'est pour ces raisons que le calibrage géométrique des caméras est implanté dans le système.

Pour le système de vision présenté dans ce rapport, un modèle de caméra de style sténopé (« pinhole ») comme celui de la Figure 4 (a) est adopté. Ce modèle permet, par projection de perspective, de calculer les coordonnées de l'image d'un point objet dont les coordonnées sont connues dans le repère monde (repère dans lequel se trouvent les points sur le marquage par exemple).

L'équation de projection de perspective sur un sténopé gouvernant la formation des images est donnée à l'Eq. (1), où $\underline{\tilde{p}}$ est le point image et $\underline{\tilde{P}}_w$ est le point objet¹⁴.

$$\underline{\tilde{p}} = \underline{\tilde{K}} \left[\underline{R}' \quad -\underline{R}'t \right] \underline{\tilde{P}}_w \quad (1)$$

La matrice $\underline{\tilde{K}}$, de dimensions 3 x 3 de l'Éq. (2), est appelée matrice des *paramètres intrinsèques*. Ces paramètres décrivent les propriétés internes de la caméra (i.e. les propriétés qui ne changent pas en fonction de la position et de l'orientation de la caméra dans l'espace) et sont constants tant que l'ajustement du foyer de la lentille n'est pas modifié.

$$\underline{\tilde{K}} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

¹⁴ Quand une variable est surmontée du symbole « ~ », cela signifie qu'elle est exprimée en coordonnées homogènes. Une lettre soulignée une fois représente un vecteur et une lettre soulignée deux fois représente une matrice.

La matrice $\begin{bmatrix} \underline{\underline{R}}' & -\underline{\underline{R}}' \underline{\underline{t}} \end{bmatrix}$, de dimensions 3 x 4, représente pour sa part la matrice des *paramètres extrinsèques* de la caméra. Les paramètres extrinsèques décrivent la position et l'orientation de la caméra dans le repère monde. La matrice $\underline{\underline{R}}'$ représente la rotation des axes du repère monde dans le repère de la caméra. Le vecteur $\underline{\underline{R}}' \underline{\underline{t}}$ représente pour sa part la position de l'origine du repère monde dans le repère de la caméra. Six autres paramètres servent à modéliser la distorsion radiale causée par la lentille, mais hors de l'Éq. (1). Trois paramètres modélisent la distorsion radiale ($\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$) et deux modélisent la distorsion tangentielle (τ_1, τ_2). Pour les lentilles utilisées dans le système, la distorsion radiale est nettement plus importante que la distorsion tangentielle.

Avant tout traitement des images, la distorsion est corrigée pour s'assurer que l'image représente bien la scène observée. La distorsion radiale est modélisée par l'Éq. (3) et la distorsion tangentielle par l'Éq. (4) avec $r^2 = x_{dist}^2 + y_{dist}^2$.

$$\begin{aligned} x &= x_{dist} \left(1 + \kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6 \right) \\ y &= y_{dist} \left(1 + \kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6 \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} x &= x_{dist} + \left[2\tau_1 x_{dist} y_{dist} + \left(r^2 + 2x_{dist}^2 \right) \right] \\ y &= y_{dist} + \left[\tau_1 \left(r^2 + 2y_{dist}^2 \right) + 2\tau_2 x_{dist} y_{dist} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

La distorsion totale est la somme des distorsions radiale et tangentielle. Le calibrage géométrique de la caméra consiste à estimer les paramètres des matrices $\underline{\underline{K}}$ et $\begin{bmatrix} \underline{\underline{R}}' & -\underline{\underline{R}}' \underline{\underline{t}} \end{bmatrix}$ de même que $\kappa_0, \kappa_1, \kappa_3, \tau_0, \tau_1$ en utilisant une cible de calibrage comme celle montrée à la Figure 4 (b).

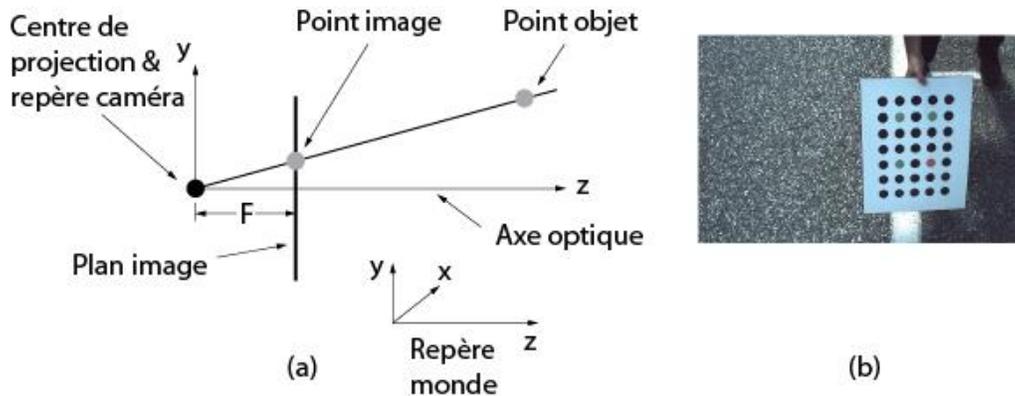


Figure 4 (a) Modèle de sténopé de la caméra. (b) Cible de calibrage géométrique.

Pour calibrer la caméra, il faut faire l'acquisition d'images de la cible à partir de plusieurs points de vue (au moins 20) et de fournir ces images à un algorithme d'optimisation non-linéaire qui fournit en sortie les paramètres intrinsèques, extrinsèques et de distorsion radiale [ZHAN00]. Il est important, pour des raisons qui seront expliquées à la Section 3.2, qu'une partie des images soient communes entre les caméras 1 et 2. Il en va de même pour les caméras 2 et 3.

La procédure de calibrage décrite ci-dessus est effectuée pour les caméras 1, 2, 3 et 4. Les paramètres de calibrage sont sauvegardés dans un fichier. Par ailleurs, comme la caméra 5 n'est pas utilisée pour la classification, elle n'a pas à être calibrée.

Il est pertinent d'ajouter deux points importants sur le calibrage des caméras. Premièrement, une fois les caméras installées sur le véhicule dans la configuration montrée à la Figure 1 (a), elles peuvent être calibrées au garage avant la collecte des données. Deuxièmement, le calibrage effectué au garage est valide si les caméras ne sont pas déplacées en cours de collecte et si le foyer des lentilles n'est pas modifié.

Le document [COM2020a] décrit la procédure à suivre pour le calibrage des caméras du système et le document [COM2020b] explique en détail l'outil de calibrage et en présente les paramètres et fonctionnalités. Ces documents sont aussi fournis au MTQ avec le présent rapport. Mentionnons que l'outil de calibrage de [COM2020b] a été conçu pour qu'un utilisateur non familier avec le calibrage soit en mesure d'accomplir cette tâche facilement. Ainsi, lors de l'acquisition des images, l'outil guide l'utilisateur pour que celles-ci soient les meilleures possible et soient en nombre suffisant pour assurer une bonne précision des mesures. L'outil prévient également l'utilisateur en cas d'erreur ou de fonctionnement sous-optimal et l'invite à reprendre l'étape en cours. L'outil permet les deux types de calibrage nécessaires au fonctionnement du système : calibrage caméra – caméra et calibrage caméra – cible. Le calibrage caméra –

caméra est utile pour reconstruire une image redressée de la route comme si elle était vue de dessus (plutôt que de côté via les caméras 1-2 ou 3-4). L'utilité de ce redressement est discutée à la Section 3.2. Le calibrage caméra – cible est nécessaire pour estimer la position des caméras 1-2-3-4 par rapport au plan de la route¹⁵, ce qui est aussi nécessaire aux prétraitements décrits à la Section 3.2.

3.2. Algorithmes de prétraitement des images pour le repérage des lignes de marquage longitudinal

Une première étape de prétraitement consiste à convertir les séquences vidéo en images de format JPEG. Chaque image ainsi obtenue est traitée individuellement pour le repérage des lignes sur la chaussée.

Ensuite, pour que la classification de la qualité du marquage soit uniforme peu importe les lignes qui sont observées (i.e. les lignes observées par les caméras 1 et 3 ou 2 et 4), il importe de travailler dans les unités d'ingénierie (i.e. en mm ou cm). En effet, même si les focales des lentilles sont différentes pour les caméras 1 et 2, la ligne observée par la caméra 1 est plus éloignée que celle de la ligne observée par la caméra 2 et, par conséquent, occupe une aire plus petite sur le plan image (i.e. il y a moins de pixels pour représenter cette ligne). Travailler en unités de pixels compliquerait considérablement le traitement des images pour la détection des lignes et pourrait aussi causer un biais dans l'estimation de la qualité du marquage. Un moyen d'éviter ce biais est d'exploiter une homographie entre le plan image et le plan de la route. Dans le présent projet, tel que mentionné précédemment, l'hypothèse est faite que la route peut être assimilée à un plan et que les points sur celle-ci ont leur coordonnée z nulle.

Si on remplace $\begin{bmatrix} \underline{R}' & -\underline{R}'t \end{bmatrix}$ de l'Éq. (1) par $\underline{\tilde{M}}$ et qu'on considère que la coordonnée z de $\underline{\tilde{P}}_w$ est nulle, on obtient l'Éq. (5).

$$\underline{\tilde{P}} = \underline{\tilde{M}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

¹⁵ En réalité, la cible de calibrage est plane, mais la route n'est pas parfaitement plane. Cependant, pour les fins d'analyse du marquage, l'approximation est valide.

La multiplication par la valeur $z = 0$ de $\underline{\tilde{P}}_w$ annule la troisième colonne de $\underline{\tilde{M}}$ qui devient une matrice carrée 3×3 qu'on renomme $\underline{\tilde{M}'}$. Cette matrice $\underline{\tilde{M}'}$ peut être inversée, ce qui fait qu'on peut écrire l'Éq. (6).

$$\underline{\tilde{P}}_w = \underline{\tilde{M}'}^{-1} \underline{\tilde{p}} \quad (6)$$

Ainsi, $\underline{\tilde{M}'}^{-1}$ représente une homographie qui permet de transformer les points dans une image de marquage (image $\underline{\tilde{p}}$) en points sur la chaussée dont les coordonnées sont $[x_w \quad y_w]^t$. Ces derniers sont exprimés en unités d'ingénierie (mm) et sont par conséquent à l'échelle réelle. Ce résultat est important car, quelle que soit la taille de l'image d'une ligne sur le plan image de la caméra (p. ex. caméra 1 ou caméra 3), cette ligne aura la taille réelle d'une ligne de marquage (120 mm) sur l'image redressée par l'homographie¹⁶. Ceci a l'avantage de faciliter la tâche des algorithmes de repérage des lignes et réduit considérablement le nombre de seuils qui doivent être ajustés. Cet avantage découle directement du calibrage géométrique des caméras qui permet, entre autre, d'estimer la taille d'un pixel sur la chaussée.

La Figure 5 montre un exemple de redressement d'images par homographie pour des images recueillies au même moment à la droite du véhicule par la caméra 4 et la caméra 3. Le véhicule roulait alors à une vitesse de 104 km/h. L'image du haut de la Figure 5 (a) a été recueillie par la caméra 3 et celle du bas par la caméra 4. L'image de la Figure 5 (b) est le résultat du redressement et de la fusion des images de (a) et (b) qui donne l'impression que la chaussée a été observée d'un point de vue perpendiculaire à celle-ci. C'est sur ces images redressées que les traitements sont effectués pour repérer les lignes de marquage.

Une vidéo disponible à l'adresse (<https://vision.gel.ulaval.ca/~sylvain\mtq\2020-05-18,14-10-01,StichingDroite.mp4>) montre le résultat du redressement des images recueillies pour une minute de trajet du véhicule.

¹⁶ Après le redressement, un pixel équivaut à 1 mm.

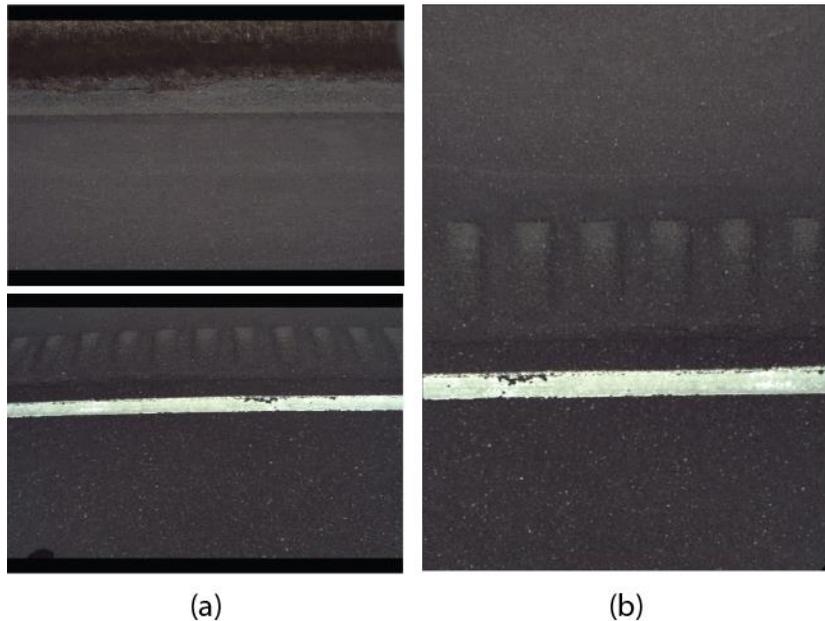


Figure 5 Exemple de redressement des images. (a) Image recueillies avec la caméra 3 (haut) et la caméra 4 (bas). (b) Redressement et fusion des images de (a).

3.3. Algorithmes de détection des lignes de marquage dans les images redressées par l'homographie

La détection des lignes de marquage sur les images redressées par l'homographie s'effectue en deux étapes principales :

- 1- Traitements sur l'image complète comprenant une cross-corrélation normalisée pour identifier des zones de l'image pouvant contenir un marquage ;
- 2- Analyse de chaque zone de l'image identifiée à la première étape principale pour confirmer (ou infirmer) la présence d'une ligne de peinture.

Ces étapes sont longues et exigeantes en temps de calcul, mais le traitement de plusieurs images est parallélisé et exploite tous les cœurs de l'ordinateur. À titre d'exemple, en n'utilisant qu'un seul cœur d'un ordinateur portable haut de gamme, il a fallu 10 h 34 min pour traiter les 62 000 images recueillies sur un tronçon de route de 30 km. En utilisant ses quatre cœurs, le temps de traitement s'est réduit à 3 h 44 min¹⁷. En utilisant un ordinateur de bureau performant muni

¹⁷ En utilisant les quatre cœurs (huit thread) du portable, le temps de traitement a été réduit d'un facteur proche de 3.

d'un CPU « Intel Core I 9 » à 8 cœurs, le temps de traitement est passé à 2 h 39 min. Il est à noter que dans tous ces tests, les images étaient stockées sur le disque SSD local, mais le temps de traitement est dû principalement aux calculs et la performance ne chute que d'environ 5 minutes lorsque les images sont stockées sur un disque réseau¹⁸.

3.3.1. Traitements sur les images complètes

Ces traitements visent à analyser les images complètes pour y repérer les zones où une ligne de marquage pourrait être présente et identifier leur position sur la chaussée.

Étape 1 : production d'une image en niveaux de gris

Chaque image JPEG couleur est convertie de l'espace RGB¹⁹ vers l'espace HSV²⁰. La raison justifiant cette étape est que l'espace de couleur RGB, généralement utile à la *visualisation* des images, est peu adapté au *traitement* des couleurs. La *teinte* (H), représente la couleur (p. ex. le rouge) telle que nous la percevons. Pour sa part, la *saturation* est une indication de la pureté de la teinte (p. ex. le rose est une couleur rouge peu saturée). Finalement, *l'illuminance*²¹ (V) représente le niveau d'intensité d'un pixel (p. ex. les pixels « sombres » ou « clairs »).

La Figure 6 montre le résultat de la conversion pour du marquage blanc et jaune. Pour l'image RGB d'une ligne de marquage blanc (Figure 6 (a) à gauche), on constate que l'essentiel de l'information utile réside dans la composante d'illuminance V car les composantes de saturation (S) et de teinte (H) contiennent peu d'éléments susceptibles de caractériser la ligne. Ceci est relativement simple à comprendre parce que le blanc est une « couleur » de très faible saturation et qui contient toutes les teintes (i.e. mélange de toutes les couleurs).

Il en va autrement pour le marquage de couleur jaune. La Figure 6 (b) montre une région d'intérêt sur l'image RGB d'une ligne jaune. L'histogramme représentant la probabilité d'appartenance des pixels de (b) à une combinaison de H et S est montré en (c). On remarque que les plus grandes valeurs de probabilité sont concentrées dans la partie de l'histogramme correspondant à la teinte jaune (H ~ 35) assez saturée (S ~ 60). L'image de la Figure 6 (e) est un masque contenant la probabilité de chaque pixel de (d) alors que (f) est l'image (e) seuillée pour ne garder que les valeurs de probabilité les plus grandes. L'image de (g) est le résultat de l'application du masque (f) sur (d). On remarque

¹⁸ Le temps de traitement est de 2 h 45 min lorsque les images sont stockées sur un disque de serveur sur le réseau. La vitesse du réseau utilisé pour les tests est de 1 Gbps.

¹⁹ RGB : Red-Green-Blue.

²⁰ HSV : Hue-Saturation-Value.

²¹ Aussi appelée « valeur ».

que les pixels ayant une probabilité élevée appartiennent effectivement à la ligne de marquage jaune.

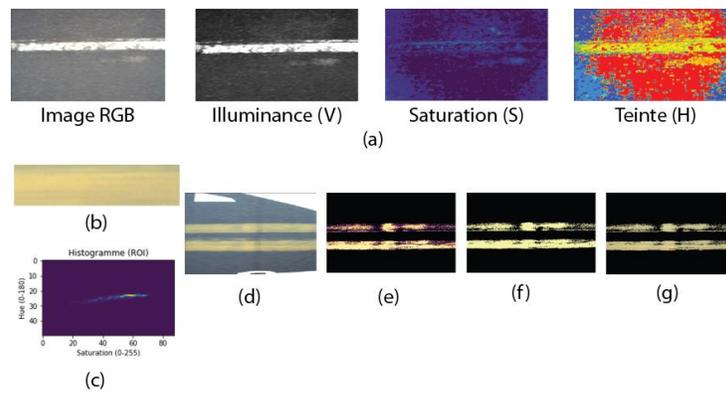


Figure 6 (a) Image RGB (gauche) et les trois composantes HSV. (b) Échantillon d'une ligne de marquage jaune. (c) Histogramme de distribution statistiques H-S. (d) Image de marquage jaune. (e) Probabilité de chaque pixel des lignes jaunes basée sur la distribution de (c). (f) Masque résultant du seuillage de (e). (g) Application du masque de (f) sur (d) identifiant les pixels les plus susceptibles d'appartenir à la ligne de marquage jaune.

La plupart des expériences rapportées dans les sections qui suivent traitent du cas de lignes de marquage blanc car elles sont plus difficiles à repérer que les lignes de marquage jaune, la raison étant que la saturation et la teinte ne peuvent être utilisées et que la seule information disponible est l'illuminance V.

Étape 2 : calcul de la cross-corrélation normalisée sur l'image du marquage

L'approche retenue pour repérer les lignes repose sur une opération de *cross-corrélation normalisée* entre un gabarit²² de ligne et l'image. L'image de la chaussée a une largeur L_O et une hauteur H_O . Selon la méthode d'acquisition décrite précédemment, les lignes traversent généralement les images à l'horizontale. Un gabarit, aussi appelé *noyau de cross-corrélation*, respectant les dimensions prescrites pour une ligne est défini tel que montré à la Figure 7 (a). Le noyau est composé d'une bande blanche de largeur de $L_B = L_O$ et de hauteur H_B , modélisant la ligne de marquage blanc, encadrée de deux bandes noires de hauteur $H_B/2$ et de largeur L_B . Le noyau a donc les dimensions $H_M = 2 H_B$ et $L_M = L_B = L_O$ (voir Figure 7 (b)).

Pour sa part, l'image de la chaussée est préparée pour la cross-corrélation en lui ajoutant une bande de largeur L_O et de hauteur H_M au-dessus de la ligne la plus haute et en dessous de la ligne la plus basse (voir Figure 7 (b)). Le contenu de la ligne la plus haute est recopié dans la zone de hauteur H_M du haut et le

²² « template » en anglais.

contenu de la ligne la plus basse l'est dans la zone de hauteur H_M du bas. L'image résultante a donc une largeur L_O et une hauteur $H_O + 2 H_M$. Le but de cette opération est de s'assurer que la cross-corrélation du noyau avec l'image s'effectue sur une image complète et n'est pas tronquée par les bords (du haut et du bas) de l'image. Une approche apparemment plus simple aurait consisté à laisser tomber les parties de hauteur H_M du haut et du bas de l'image dans la corrélation. Cependant, comme les lignes observées par les caméras 2 et 4 sont souvent très près des bords de l'image, cela aurait pu compromettre les résultats de la corrélation en ne prenant pas la voie complète en considération²³. Ce risque est toutefois réduit par le choix des focales des lentilles et le redressement des images.

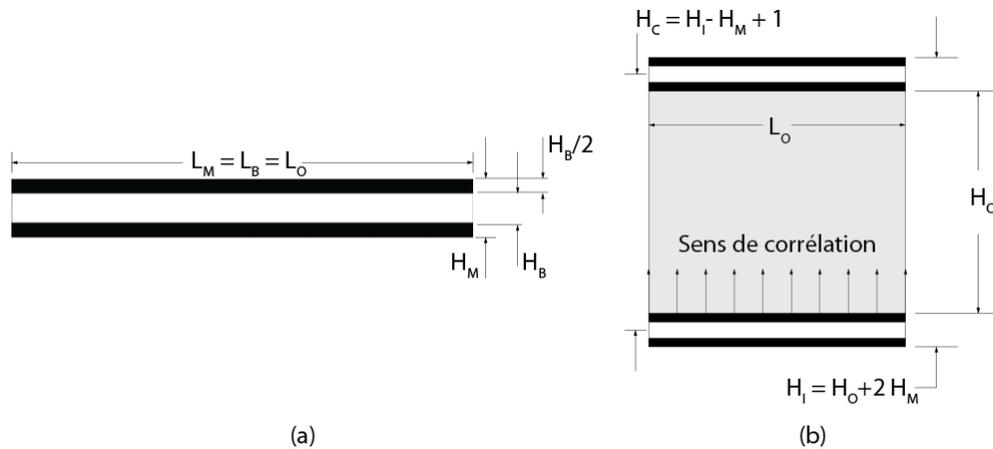


Figure 7 (a) Noyau de cross-corrélation avec un bande blanche (modélisant la ligne de marquage) de hauteur H_B et une bande noire de hauteur $H_B/2$ au-dessus et en-dessous de la bande blanche. La hauteur totale du noyau est H_M . Les trois bandes ont une largeur L_O . (b) Image de la chaussée (gris clair) de largeur L_O et de hauteur H_O . Cette image est préparée pour la cross-corrélation en lui ajoutant une bande de hauteur H_M et de largeur L_O en haut et en bas. Ces bandes supérieures et inférieures sont construites en répétant respectivement la ligne la plus haute et la ligne la plus basse de l'image de la chaussée.

Suivant la préparation de l'image, le noyau est balayé sur l'image selon l'Éq. 7 qui donne la valeur de la corrélation normalisée pour la ligne « i ». L'image de cross-corrélation a les dimensions $L_C = L_O$ en largeur et $H_C = H_O + H_M + 1$. En fait, cette image est en réalité un vecteur²⁴ de valeurs car, tel que mentionné ci-dessus, le noyau ayant la même largeur que l'image, on obtient une seule valeur de corrélation par ligne de l'image (voir Figure 7 (b)).

²³ La ligne de peinture peut être très proche du bord, mais elle ne doit pas le toucher, car, pour le haut et bas de l'image, la ligne la plus au bord est dupliquée pour générer la bande supplémentaire et doit donc correspondre à l'arrière-plan (le bitume).

²⁴ Plutôt qu'une matrice.

$$Corr(i) = \frac{\sum_{k=0}^{w_g} \sum_{j=0}^L T(k, j) E(i - \frac{w_g}{2} + k, j)}{\sqrt{\sum_{k=0}^{w_g} \sum_{j=0}^L T(k, j)^2 \sum_{k=0}^{w_g} \sum_{j=0}^L E(i - \frac{w_g}{2} + k, j)^2}} \quad (7)$$

Une fois le vecteur de corrélation calculé avec l'Éq. 7, les $H_M/2$ premiers et derniers éléments sont retirés pour ne pas prendre en compte les valeurs de corrélation obtenues pour les zones ajoutées au-dessus et au-dessous de l'image car elles contiennent des répétitions de la ligne du haut et de la ligne du bas de l'image originale.

Le vecteur de cross-corrélation obtenu est lissé avec un filtre de Savitsky-Golay (*savgo*) avec une fenêtre de 51 pixels et des polynômes d'ordre 1, ce qui permet d'éliminer des irrégularités [SAV1964]. La valeur de corrélation à chaque ligne de l'image est une indication du niveau de ressemblance de celle-ci avec le gabarit. La corrélation atteint son maximum quand le gabarit est parfaitement superposé à la ligne. Quand la ligne correspond à du marquage neuf, la corrélation est élevée (près de 1). La valeur de corrélation diminue quand le marquage est usé, mais demeure quand même plus élevée que lorsqu'il n'y a aucune ligne. Cette approche d'évaluation du marquage restant est similaire à celle exploitée pour l'analyse des bancs d'homologation décrite à la référence [LAU2020].

La Figure 8 (b) montre le résultat de la cross-corrélation filtrée avec le filtre *savgo* pour l'image du haut de la Figure 8 (a). La corrélation est la courbe en rouge alors que la courbe en bleu est sa dérivée. La ligne pointillée rouge du bas de la Figure 8 (a) illustre une détection correcte de la présence d'une ligne.

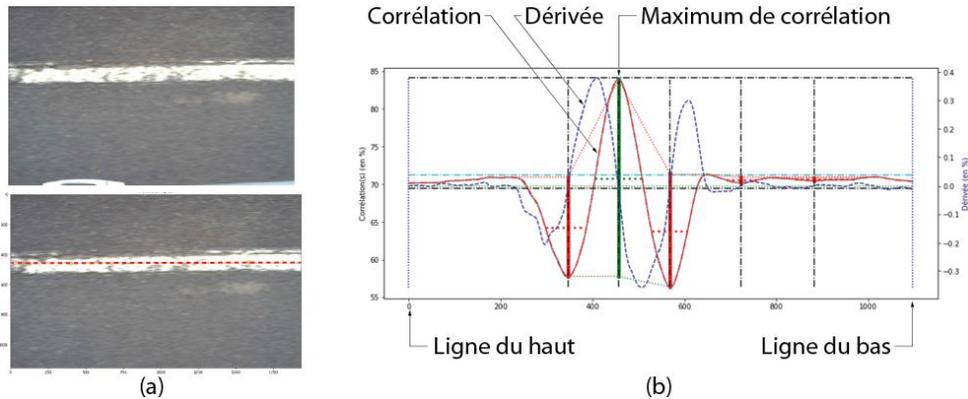


Figure 8 (a) Image de la chaussée recueillie par la caméra 4 (haut). Détection de la ligne (bas). (b) Résultat de la cross-corrélation normalisée du noyau de la Figure

7 (a) avec l'image (courbe en rouge). La dérivée de la corrélation est montrée en bleu. Le maximum de corrélation est à la ligne 456 de l'image.

Les informations importantes sur les propriétés de la courbe de cross-corrélation (pics, vallées, valeur modale) sont extraites pour chaque image. Ce sont les données brutes qui sont ensuite analysées pour repérer la position de chaque pic de corrélation correspondant à une zone pouvant contenir une ligne de marquage complète ou partiellement effacée. L'**Étape 3** ci-dessous présente l'approche retenue pour tirer ces conclusions. L'Annexe 1 donne un exemple de fichier JSON contenant les résultats sommaires²⁵ de l'analyse. Ce fichier contient la liste des positions des pics de corrélation présélectionnés. Il contient aussi les indexes des pics ayant été associés à une ligne de peinture.

Étape 3 : analyse des données brutes résultant du calcul de la cross-corrélation de l'**Étape 2**

Analyse de base des pics de corrélation

Dans un grand nombre de cas, notamment lorsqu'une ligne est visible ou absente sans que des conditions particulières perturbent le contenu de l'image, le repérage d'une ligne (ou son absence) est relativement aisé et seule une analyse simple des données brutes est suffisante pour arriver à une conclusion. La Figure 9 montre trois cas simples : (a) ligne présente, (b) absence de ligne et (c) absence de ligne avec crevasse dans la chaussée.

²⁵ Pour optimiser la taille des données, les résultats sommaires ne contiennent que la présélection de pics obtenue à partir des données brutes. Pour permettre une analyse en profondeur de cas particuliers, il est aussi possible de générer un fichier JSON contenant les données détaillées avec tous les résultats intermédiaires de la corrélation.

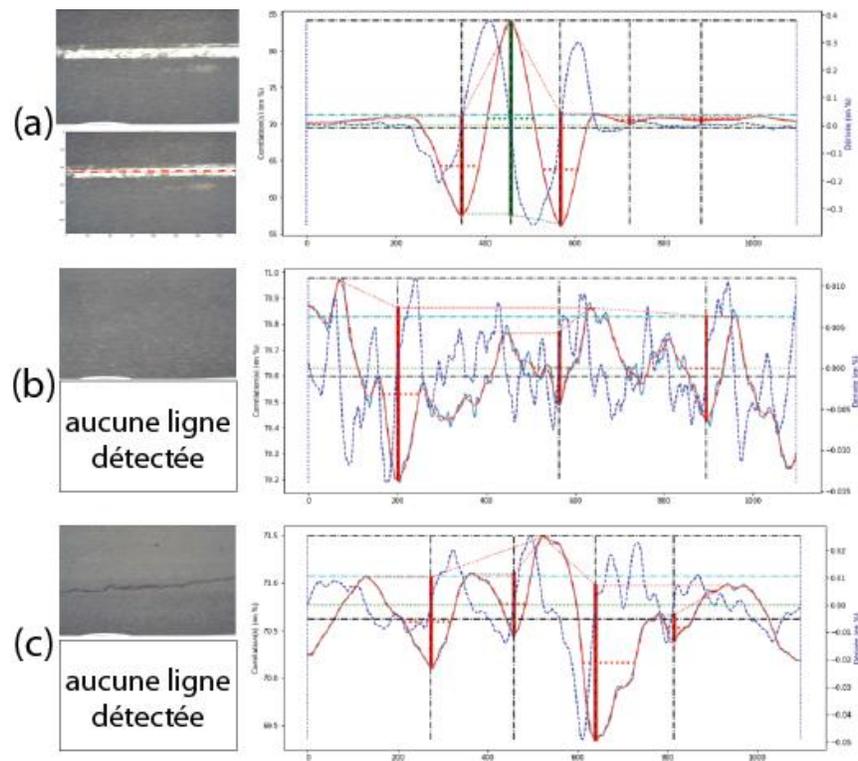


Figure 9 Cas simples de traitement des données brutes résultant de la cross-corrélation. (a) Ligne présente dans l'image. (b) Zone de chaussée sans ligne. (c) Zone de chaussée sans ligne, mais avec une crevasse à un endroit où une ligne pourrait potentiellement être présente.

Dans ces cas simples, une analyse de la *proéminence* des pics de la courbe de cross-corrélation est suffisante pour identifier la ligne de l'image où la ligne se trouve ou pour conclure à l'absence de ligne. Tel qu'illustré à la Figure 10, la proéminence d'un pic considère la hauteur d'un maximum, mais aussi comment ce pic ressort par rapport aux vallées qui l'entourent.

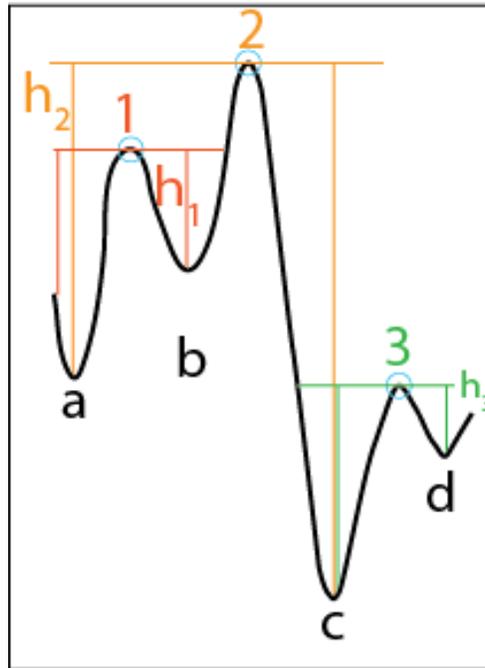


Figure 10 Estimation de la proéminence de pics sur une courbe de cross-corrélation.

L'équation pour la proéminence est donnée par l'Éq. 8.

$$P_{pic} = \min\{h_i\}_{h_i \in \{bordsures\ ou\ vallées\}} \quad (8)$$

Pour le pic 1, on cherche la hauteur C_1 de celui-ci. On trace ensuite une ligne horizontale partant du pic et allant à l'élément de la courbe le plus à gauche et le plus à droite du pic. Pour le pic 1, l'élément le plus à gauche est la bordure gauche de la courbe (à gauche de la vallée « a ») et l'élément le plus à droite est l'intersection avec la courbe à gauche du pic 2. Il faut ensuite chercher les deux vallées les plus basses, l'une entre le pic et l'élément le plus à gauche et l'autre entre le pic et l'élément le plus à droite. $P_{pic\ 1}$ est la plus petite de ces deux hauteurs. La hauteur de la vallée « b » par rapport à cette ligne est h_1 . Celle de la vallée « a » est h_2 . Comme h_1 est plus petite que h_2 , on obtient $P_{pic\ 1} = h_1$. Pour le pic 2, la "vallée" la plus basse de gauche est « a » de hauteur h_2 et la vallée la plus basse de droite est au point « c ». La vallée au point « a » étant plus haute que celle du « c », c'est sa valeur h_2 qui donne la proéminence $P_{pic\ 2} = h_2$ avec l'Éq. 8. Pour le pic 3, on choisit entre la hauteur de « c » et « d » et c'est donc la valeur h_3 qui donne la proéminence.

Le seuil minimum de proéminence pour pic est choisi à 3%²⁶. Pour l'image de la Figure 9 (a), le pic à l'abscisse 456 (colonne 456 de l'image) a une proéminence de 26.2% et les vallées les plus proches à gauche et à droite sont aux abscisses 347 et 568 respectivement. Ce pic ayant la proéminence la plus grande par rapport aux autres pics sur la courbe de cross-corrélation, il est retenu comme correspondant à la position d'une ligne de marquage, ce qui est bien le cas.

Dans le cas simple d'une absence de ligne pour une portion de la chaussée relativement uniforme comme à la Figure 9 (b), le pic ayant la plus grande proéminence, qui est de 0.5%, ne passe pas le test et le système conclut à l'absence de ligne.

Finalement, un cas plus difficile d'absence de ligne est montré à la Figure 9 (c). La présence d'une crevasse sur la chaussée représente une zone d'illuminance plus faible que le reste de l'image, ce qui influence la cross-corrélation. Cependant, le pic ayant la proéminence la plus importante ne passe pas le test puisque celle-ci n'est que de 1% et le système conclut correctement qu'il y a absence de ligne.

Analyse détaillée des pics de corrélation : traitement des cas de projection de l'ombre de la voiture sans la présence de ligne

Les conditions d'acquisition des séquences vidéo pouvant difficilement être contrôlées, plusieurs cas difficiles ont été observés, notamment à cause de la présence de l'ombre de la voiture dans les images qui a pour effet de compliquer la courbe de cross-corrélation, ce qui peut mener à des faux positifs (ligne détectée alors qu'il n'y a pas de ligne) ou à des faux négatifs (ligne non détectée alors qu'une ligne est présente). La Figure 11 montre un tel cas de deux fausses détections pour une image observée par la caméra 4.

²⁶ La proéminence d'un pic dans une courbe est la différence entre deux points de la courbe. Son unité est donc celle de l'axe des ordonnées de la courbe. La proéminence des pics de nos courbes de corrélation est donc en pourcent.

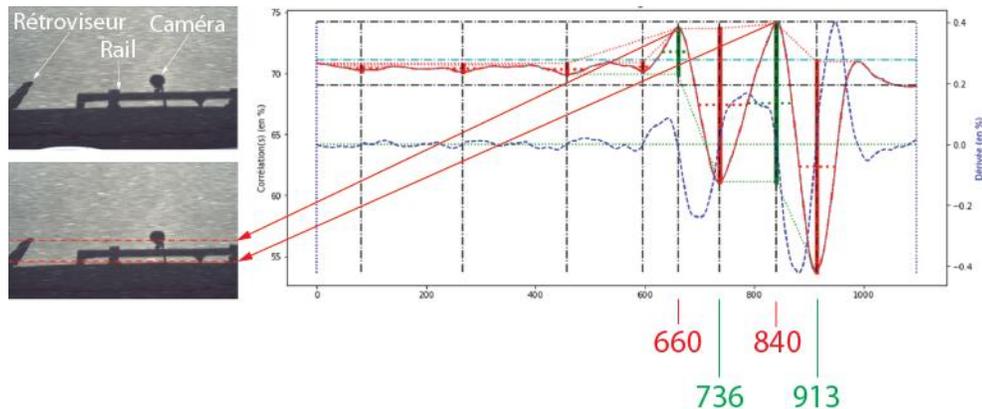


Figure 11 Cas difficile causé par la présence de l'ombre de la voiture projetée sur la chaussée et qui cause la cross-corrélation à produire des pics et des vallées tels que la proéminence des pics est considérée comme assez grande pour correspondre à des lignes de marquage.

Dans ce cas, on observe la présence de deux *vallées* importantes aux abscisses 736 et 913 et de deux *pics* aux abscisses 660 et 840. La première vallée est causée par la diminution de la cross-corrélation lors du passage du noyau sur la partie de l'image correspondant à l'ombre du rail sur le toit, ce qui résulte en une valeur de proéminence supérieure à 3% et porte à conclure à la présence d'une ligne. La vallée importante à l'abscisse 913 résulte d'une faible cross-corrélation causée par l'ombre du toit du véhicule. Cette vallée fait en sorte que le pic à 840, causé par la partie claire de l'image entre le rail et le toit qui augmente la valeur de la cross-corrélation, a une valeur de proéminence de 12.9% et laisse croire à la présence d'une ligne. Bien qu'une telle configuration de la voiture par rapport à la route peut sembler fortuite et pourrait potentiellement être négligée parce qu'elle n'affecte qu'un petit nombre d'images, une analyse détaillée sur un tronçon de 30 km de route (voir Section 4) a montré qu'il en est autrement. Des pics de corrélation peuvent aussi être générés par une bordure de trottoir, un rail de sécurité, la texture du bas-côté de la route un autre véhicule²⁷ ou des marquages au sol²⁸. Des traitements additionnels sont nécessaires pour éliminer ces fausses détections de lignes en ajoutant des traitements visant à les repérer et les éliminer.

²⁷ Un camion, une voiture, une moto ou même un vélo peut éventuellement créer des pics dans la courbe de corrélation.

²⁸ Par exemple : flèche, ligne d'arrêt ou losange de voie prioritaire.

3.3.2. Analyse des zones d'image correspondant aux pics de corrélation sélectionnés

La chaîne des traitements effectués pour valider la présence d'une ligne de peinture dans la zone d'un pic de corrélation présélectionné à l'étape précédente est la suivante :

1. Extraction dans l'image d'une bande suffisamment large pour contenir une ligne de peinture avec le bitume l'entourant. Cette zone a été définie à deux fois la taille du modèle de ligne idéal²⁹.
2. Seuillage de l'image filtrée avec l'algorithme d'Otsu [OTS1979]. Le résultat est une image binaire dans laquelle les régions de l'avant-plan³⁰ (comme la ligne de peinture) apparaissent en blanc et le reste de l'image (comme le bitume) en noir.
3. Application d'une opération morphologique composée de trois dilations suivies de trois érosions avec un élément structurant carré de 3 x 3 pour fusionner les régions proches de l'avant-plan. Ce traitement est une variante de l'algorithme de fermeture (*closing*)³¹.
4. Détection des contours des régions de l'avant-plan avec l'algorithme « findContours » de la librairie OpenCV.
5. Élimination des régions ayant une superficie trop petite pour être significatives.
6. Approximation des contours des régions restantes pour les simplifier et adoucir leur forme.
7. Analyse de la hauteur de chaque contour pour en identifier au moins un³² ne pouvant pas faire partie d'une ligne peinture valide :
 - a. La boîte enveloppante³³ d'un contour ne doit pas dépasser la hauteur maximum³⁴ ;
 - b. Le rectangle orienté de superficie minimale contenant le contour doit avoir une coupe verticale inférieure à la hauteur maximum.

Analyse détaillée : ombre du toit de la voiture et vue du bas-côté

La Figure 12 montre une section de la route dont les zones correspondant aux pics de corrélation présélectionnés³⁵ ont été extraites et analysées

²⁹ La largeur de la ligne idéale a été fixée à 150 mm dans le gabarit. La bande de l'image extraite a donc une largeur de 300 mm

³⁰ Une région de l'avant-plan « blob » en anglais, est un groupe de pixels blancs en contact.

³¹ Une fermeture est définie comme une dilatation suivie d'une érosion. Dans le cas présent, nous préférons effectuer trois dilations avec un petit élément structurant et faire suivre cette opération par trois érosions exploitant le même élément structurant.

³² La zone correspondant à un pic est considérée comme contenant une ligne de peinture valide si toutes les régions d'avant-plan de son masque binaire sont valides.

³³ La boîte enveloppante est le rectangle horizontal le plus petit contenant le contour.

³⁴ Le maximum a été fixé à 1.5 fois la taille d'une ligne idéale, soit 225 mm (1.5 x 150 mm).

³⁵ Les pics de corrélation présélectionnés ont une proéminence supérieure à 3%, leur hauteur est supérieure d'au moins 1% de la valeur modale de la fonction de distribution de la courbe de corrélation. Leurs deux vallées ont une hauteur relative proche (ratio inférieur à 2.5).

automatiquement par les traitements décrits précédemment. Chacune de ces zones est décrite en détail ci-dessous.

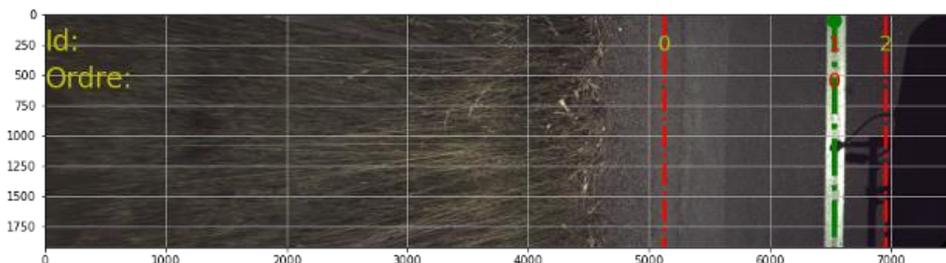


Figure 12 Exemple d'une route contenant une ligne de peinture blanche. Le pic de corrélation repéré par la ligne pointillée verte (id 1) a été validé et correspond bien à la ligne de peinture. Les lignes pointillées rouges ont été correspondent aux pics de corrélation éliminés à cette étape de traitement. Ces deux pics ont été générés par le bas-côté (id 0) et l'ombre de la voiture (id 2). L'image a été tournée de 90° vers la gauche de telle sorte que la partie la plus à gauche correspond la partie la plus éloignée de la voiture. La ligne de peinture blanche est celle qui sépare la voie droite du bas-côté de la route.

La zone de la ligne de peinture blanche (id 1 dans la Figure 12) extraite sur une bande de 300 mm autour de la position 6532 et indiquée par la ligne pointillée verte est montrée dans la Figure 13. En (b), on observe les résultats des traitements décrits ci-dessus. Aucun contour n'est en rouge, ce qui indique que la ligne de peinture a été détectée. Le plus gros contour est contenu dans un rectangle orienté ayant une coupe verticale de 168 mm, ce qui est bien inférieur à la hauteur maximum de 225 mm. La Figure 13 (c) montre l'histogramme des niveaux de gris de cette zone d'image avec le seuil estimé à une illuminance de 135. L'image seuillée puis fusionnée est montrée à la Figure 13 (a).

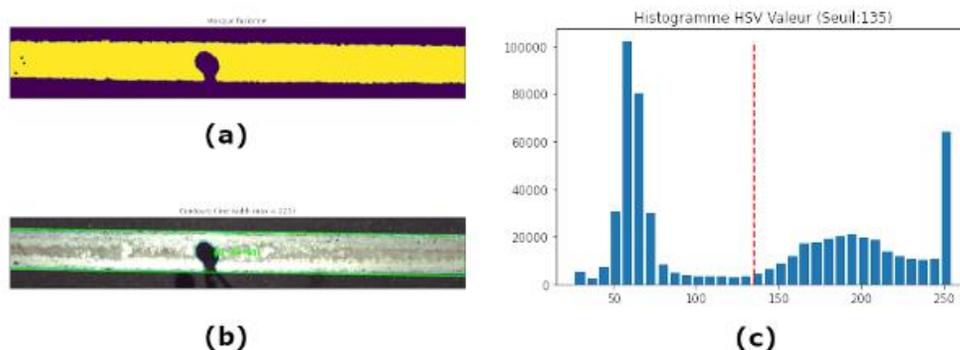


Figure 13 Résultats des traitements de la zone de la ligne de peinture blanche de l'image de la Figure 12. (a) Masque binaire fusionné obtenu par seuillage d'Otsu. (b) Le seul contour et son rectangle orienté extrait du masque binaire (a). (c)

Histogramme de la zone de l'image avec le seuil trouvé indiqué par la ligne pointillée rouge.

La bande de 300 mm du bas-côté (id 0 dans Figure 12) extraite autour de la position 5125 est montrée dans la Figure 14. En (b), on observe les résultats des traitements. Un gros contour rouge enveloppant pratiquement tout l'avant-plan indique qu'elle ne contient pas de ligne de peinture valide. La hauteur de sa boîte enveloppante est de 300 mm, ce qui est bien au-dessus de la limite de 225 mm décrite précédemment. La Figure 14 (c) montre l'histogramme des niveaux de gris de cette zone d'image avec le seuil estimé à une illuminance de 135. L'image seuillée et fusionnée est montrée à la Figure 14 (a).

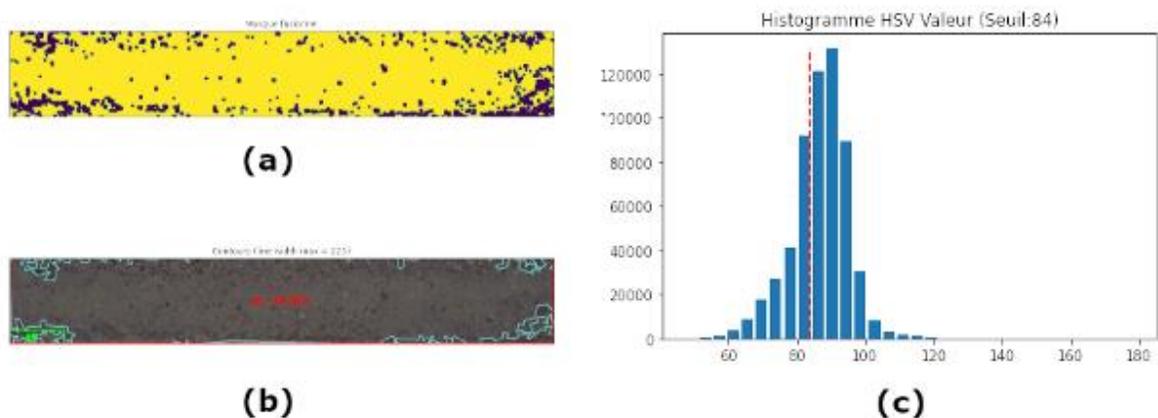


Figure 14 Résultats des traitements de la zone du bas-côté de la route dans l'image de la Figure 12. (a) Masque binaire fusionné obtenu par seuillage d'Otsu. (b) Contours et rectangles orientés extraits du masque binaire (a). (c) Histogramme de la zone de l'image avec le seuil trouvé indiqué par la ligne pointillée rouge.

La bande de 300 mm (id 2 dans la Figure 12) correspondant à l'ombre du toit de la voiture extraite autour de la position 6948 est montrée dans la Figure 15. En (b), on observe les résultats des traitements. Plusieurs contours rouges, dont un gros enveloppant pratiquement toute la partie droite de la zone indique qu'il n'y a pas de ligne de peinture valide. La hauteur de la boîte enveloppante du gros contour invalide est de 300 mm, et celle de la coupe verticale du rectangle orienté du plus petit contour invalide est de 229 mm. La Figure 15 (c) montre l'histogramme des niveaux de gris de cette zone d'image. Le masque seuillé puis fusionné est montré à la Figure 15 (a). On peut constater dans cette figure que toute cette zone est sombre, car elle est entièrement constituée de bitume. Le seuillage d'Otsu permettant de séparer les régions d'ombre de de celles ensoleillées a donc une faible illuminance de 42. Ceci souligne l'intérêt de

calculer ce seuil sur la zone la plus précise (petite) possible autour des pics sélectionnés.

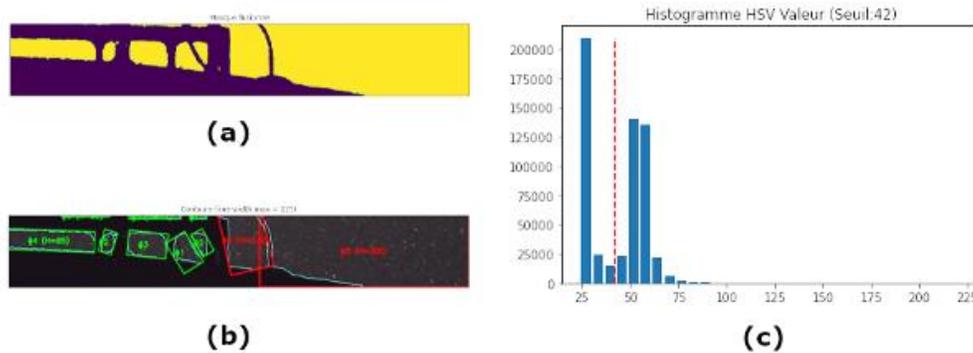


Figure 15 Résultats des traitements de la zone de l'ombre de la voiture dans l'image de la Figure 12. (a) Masque binaire fusionné obtenu par seuillage d'Otsu. (b) Contours et rectangles orientés extraits du masque binaire (a). (c) Histogramme de la zone de l'image avec le seuil trouvé indiqué par la ligne pointillée rouge.

Analyse détaillée : marquage d'une flèche au sol et vue d'une bordure de trottoir

La Figure 16 montre une section de la route dont les zones correspondant aux pics de corrélation présélectionnés sont une bordure de trottoir et une flèche de peinture invalide, ainsi que deux lignes de peinture blanche usée. Chacune de ces zones est décrite en détail ci-dessous.

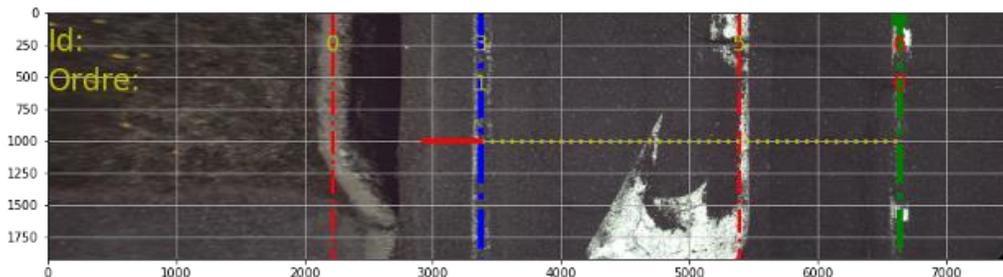


Figure 16 Exemple d'une partie de route contenant deux lignes de peinture blanche usée, une flèche et une bordure de trottoir. Les pics de corrélation repérés par les lignes pointillées vertes (id 6, position 6633) et bleus (id 1, position 3371) ont été validés et correspondent aux lignes de peinture. Les lignes pointillées rouges correspondent aux pics de corrélation générés par la bordure de trottoir (id 0, position 2214) et la flèche (id 5, position 5381).

Les traitements de la ligne de peinture blanche id 3 se trouvant à la position 3371 sont représentés dans la Figure 17. En (a), le masque binaire de cette ligne relativement usée et est formé de nombreuses régions séparées. La Figure 17 (b) montre que chacune d'elles est entourée d'un rectangle orienté de superficie minimale vert. Comme aucun rectangle n'est en rouge (ils ont tous une hauteur inférieure à la limite de 225 mm), la ligne est correctement détectée.

Il est intéressant de noter que l'un des rectangles orientés³⁶ est incliné de presque 45° à cause de la forme irrégulière de la région d'avant-plan qu'il contient. L'inclinaison du rectangle augmente beaucoup la hauteur de sa coupe verticale qui atteint dans ce cas 234 mm et dépasse la limite maximum de 225 mm. Ce rectangle n'est cependant pas éliminé, car la hauteur de sa boîte enveloppante³⁷ de 176 mm est inférieure à cette limite maximum. Les deux boîtes sont utilisées pour la validation d'une région de l'avant-plan, car le rectangle orienté représente généralement mieux la forme d'une région de ligne large lorsqu'elle est légèrement inclinée³⁸, tandis que la boîte enveloppante à une coupe verticale parfois plus précise pour certaines régions d'avant-plan usées encadrées par un rectangle orienté très incliné.

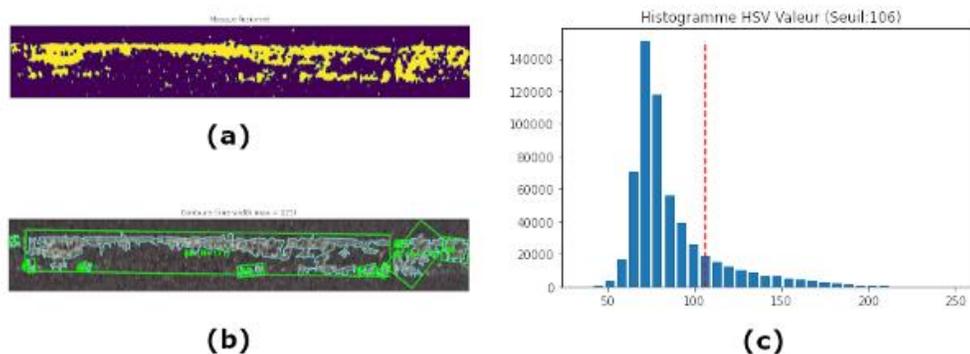


Figure 17 Résultats des traitements de la ligne blanche partiellement usée dans l'image de la Figure 16. (a) Masque binaire fusionné obtenu par seuillage d'Otsu. (b) Contours et rectangles orientés extraits du masque binaire (a). (c) Histogramme de la zone de l'image avec le seuil de 106 indiqué par la ligne pointillée rouge.

³⁶ Le rectangle orienté à 45° est le #8 de la Figure 17. C'est le deuxième en partant de la droite de l'image.

³⁷ La boîte enveloppante d'une région a toujours une superficie supérieure ou égal à celle du rectangle orienté, car ce dernier est tourné pour la minimiser.

³⁸ La région d'avant-plan #9 de la Figure 17 est entourée par un rectangle orienté très large d'une hauteur de coupe verticale de 171 mm. C'est la forme qui représente le mieux la ligne de peinture originale. En comparaison, sa boîte enveloppante d'une hauteur de 178 mm encadre moins bien cette région.

Les traitements de la ligne de peinture blanche presque effacée sont représentés dans la Figure 18. En (a), le masque binaire fusionné montre que le reste de la ligne est constitué de dizaines de points d'avant-plan épars et de deux régions plus grosses aux extrémités. Dans la Figure 18 (b), les points n'ayant pas une surface suffisante pour être pris en compte, seules les deux plus grosses régions d'avant-plan sont analysées.

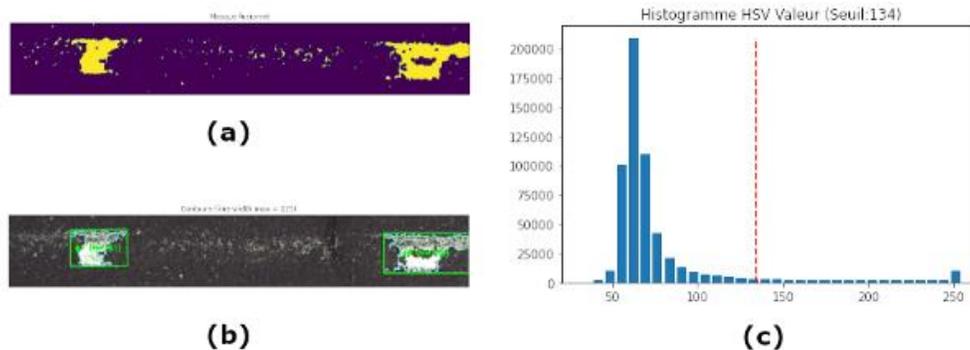


Figure 18 Résultats des traitements de la ligne blanche fortement utilisée dans l'image de la Figure 16. (a) Masque binaire fusionné contenant beaucoup de petites régions (points) trop petits pour être analysés. (b) Contours et rectangles orientés entourant les deux régions d'avant-plan analysées. (c) Histogramme de la zone de l'image avec le seuil de 135 indiqué par la ligne pointillée rouge.

Les traitements de la bordure de trottoir sont représentés dans la Figure 19. La bordure est irrégulière et plus large qu'une ligne de peinture, ceci donne généralement quelques des zones plus hautes que la limite maximum de 225 mm.

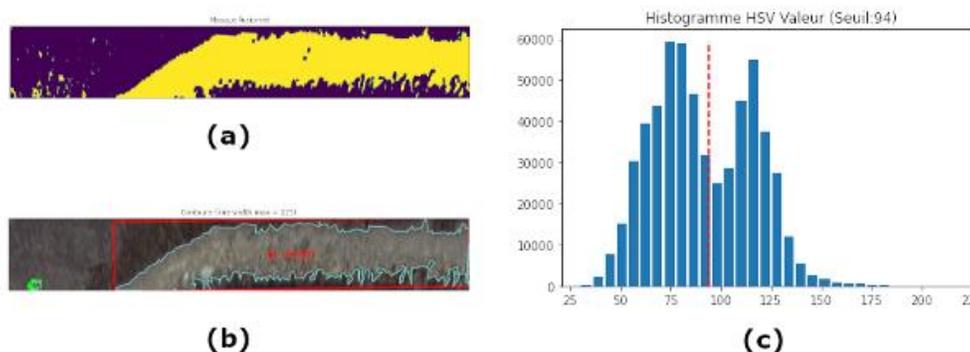


Figure 19 Résultats des traitements de la bordure de trottoir dans l'image de la Figure 16. (a) Masque binaire fusionné. (b) Contours et rectangles orientés. Le gros rectangle rouge ayant une coupe verticale de 287 mm est celui ayant permis

de déduire que cette zone ne correspond pas à une ligne de peinture valide. (c) Histogramme de la zone de l'image avec indication du seuil d'Otsu d'illuminance de 94 par la ligne pointillée rouge.

Les traitements de la flèche de peinture sont représentés dans la Figure 20. Il est possible de constater dans le masque binaire de la Figure 20 (a) que, comme pour beaucoup d'autre éléments se trouvant sur et autour des routes³⁹, les marquages au sol contiennent des régions d'avant-plan plus large qu'une ligne de peinture régulière. Les deux rectangles orientés rouges de la Figure 20 (b) ont permis d'éliminer cette région des lignes de peinture valides.

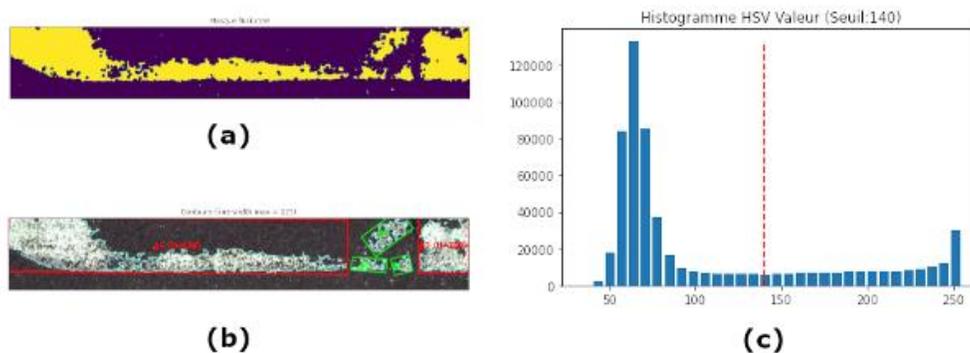


Figure 20 Résultats des traitements de la flèche de peinture. (a) Masque binaire fusionné. (b) Contours et rectangles orientés. Les deux gros rectangles rouges ayant une coupe verticale de 228 et de 230 mm ont permis de déduire que cette zone ne correspond pas à une ligne de peinture valide. (c) Histogramme de la zone de l'image avec indication du seuil d'Otsu d'illuminance calculée de 140.

Analyse détaillée : marquage en relief du bas-côté

La Figure 21 contient une bande de marquage en relief sur le bas-côté de la route ainsi qu'une ligne de peinture. Elle a été correctement détectée et son cas ne sera pas analysé ici, car il l'a déjà été précédemment. Le marquage en relief est un exemple intéressant pour montrer l'intérêt de la fusion du masque binaire. Bien que ne contenant pas de peinture brillante, cette bande sombre creusée dans le bitume a quand même généré un pic de corrélation suffisamment important pour être sélectionné.

³⁹ Des bordures de trottoir, rails de sécurité, bas-côtés ou autres véhicules par exemple.

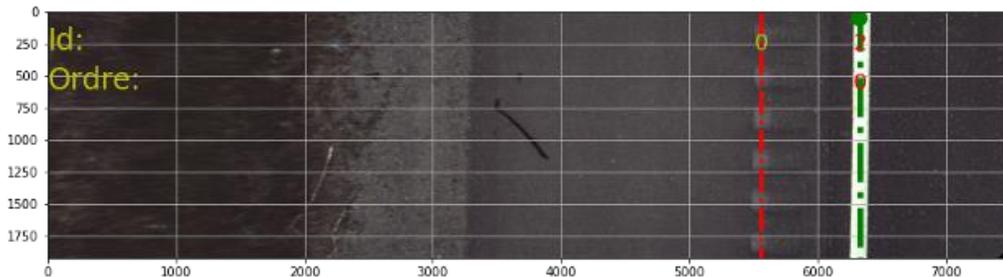


Figure 21 Exemple d'une partie de la route contenant des marquages en relief sur le bas-côté. Deux pics de corrélation ont été sélectionnés. Le pic d'id 2 (ligne pointillée verte) se trouvant à la position 6323 correspond à une ligne de peinture validée par les traitements. Le pic d'id 0 (ligne pointillée rouge) se trouvant à la position 5557 correspond à une zone de marquage en relief (avertisseurs) en bordure de la route a été correctement éliminé par les traitements.

La Figure 22 montre le détail du traitement. Le seuillage d'Otsu indiqué dans l'histogramme de la Figure 22 (c) a fourni la petite valeur 78 d'illuminance. La Figure 22 (a) montre le masque binaire fusionné où les trous et d'autres points tels que des graviers plus brillants, ont été grossièrement mis en évidence à cause du faible contraste de cette image sombre. La Figure 22 (b) met en évidence les trois blocs qui, grâce à la fusion, sont devenus suffisamment haut pour être rejetés.

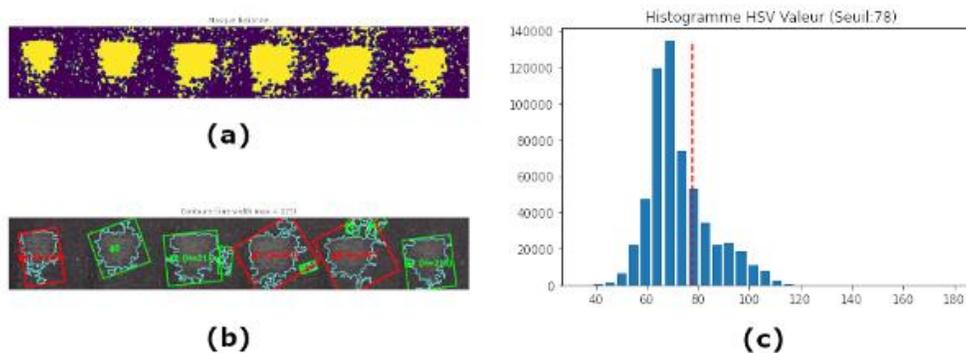


Figure 22 Détail de la zone de marquage en relief du bord de la route. (a) Masque binaire fusionné. (b) Contours et rectangles orientés. Trois rectangles rouges ont permis de déduire que cette zone ne correspond pas à une ligne de peinture valide. (c) Histogramme de la zone de l'image avec indication du seuil d'Otsu d'illuminance de 78.

La Figure 23 montre en gros plan l'effet de la fusion sur cette bande de la route. On peut voir dans la Figure 23 (a) en niveau de gris que la ligne de trous ayant générée le pic de corrélation est à peine plus lumineuse que le reste du bitume.

Les trous sont aussi plus large qu'une ligne de peinture régulière. Dans le masque binaire non fusionné de la Figure 23 (b), on constate que la partie principale de chaque trou est formée généralement un gros blob, et que le reste du trou ressort sous la forme d'une constellation de plus petites tâches (points) autour. Sans la fusion aucun blob n'aurait été suffisamment haut pour indiquer à l'algorithme que cette bande de trous n'est pas une ligne de peinture. Le cercle vert de la Figure 23 (c) montre une zone où les points satellites ont été fusionnés à la région d'avant-plan principale. Ceci a permis à trois des six régions d'avant-plan principales de l'image de devenir suffisamment importante pour invalider la bande.

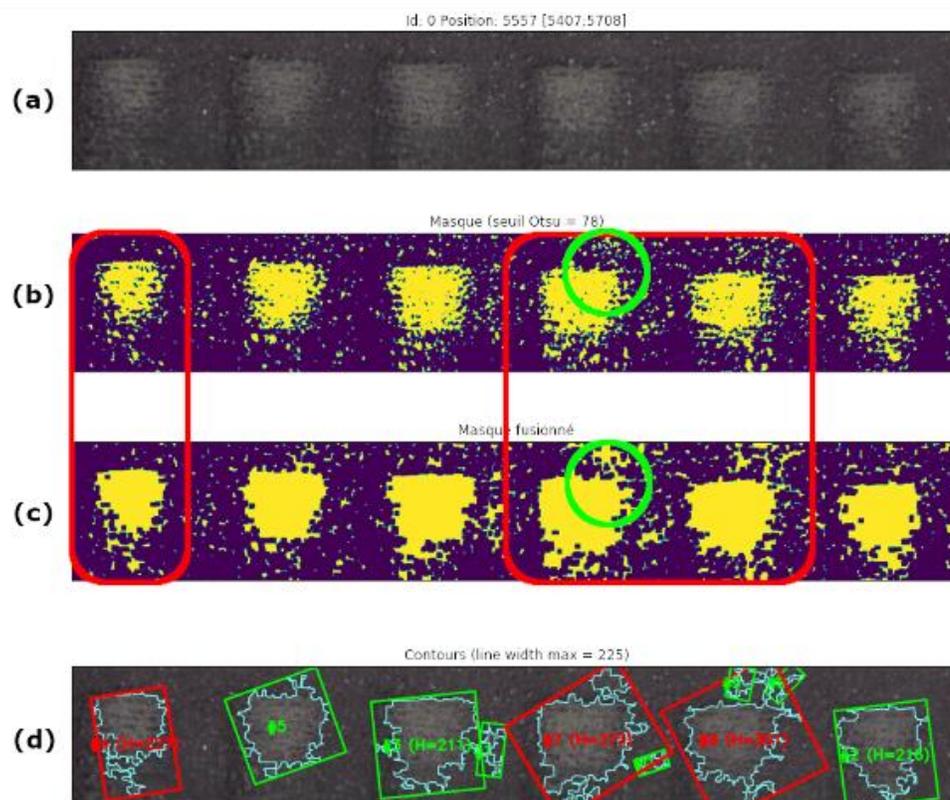


Figure 23 Détails sur la fusion du masque binaire du marquage en relief. (a) Image en niveaux de gris. (b) Masque binaire calculé à partir du seuil d'illuminance de 78. (c) Masque binaire fusionné. (d) Contours et rectangles orientés. Les rectangles rouges à coins arrondis des figures (b) et (c) indiquent les régions d'avant-plan éliminées grâce à la fusion du masque binaire. Les deux cercles verts mettent en évidence une région de la zone où des points d'avant-plan qui étaient séparés dans la figure (b) ont été fusionnés à l'une des six régions principales dans la figure (c).

Exemples d'erreur de détection

Les images suivantes sont des exemples où au moins une ligne n'a pas été correctement détectée par l'algorithme.

Les images de la Figure 24 contiennent des lignes non détectées à cause de leur forme irrégulière. Il est important de noter que ce sont des exceptions et que la plupart des lignes de ce type sont bien détectées.

En (a) et (b) la ligne blanche est formée de deux bandes étroites dont l'une est plus usée (a) ou plus fine (b) que l'autre. On constate qu'aucune ligne rouge correspondant à la position d'un pic de corrélation valide n'est dessinée au-dessus des lignes de peinture, car leur pic a été éliminé par l'algorithme⁴⁰. Le pic de corrélation des lignes de peinture blanche des figures (c) et (d) a bien été validé. Les lignes de peinture ont été éliminées à l'étape d'analyse du masque binaire de leur zone, car il contient au moins une région de l'avant-plan dont la hauteur de la coupe verticale dépasse la taille maximale⁴¹.

⁴⁰ L'algorithme élimine les pics dont la profondeur des deux vallées par rapport à la valeur modale est trop différente. Dans ce cas, la bande usée et la bande fine de chaque ligne ont générées une vallée moins profonde que la bande plus consistante.

⁴¹ Ceci pourrait s'expliquer car la ligne semble plus large que la normale et l'ombre projetée sur la zone l'a assombrie ce qui a probablement légèrement baissé le seuil d'Otsu, ce qui a augmenté un peu la taille de quelques régions de l'avant-plan.

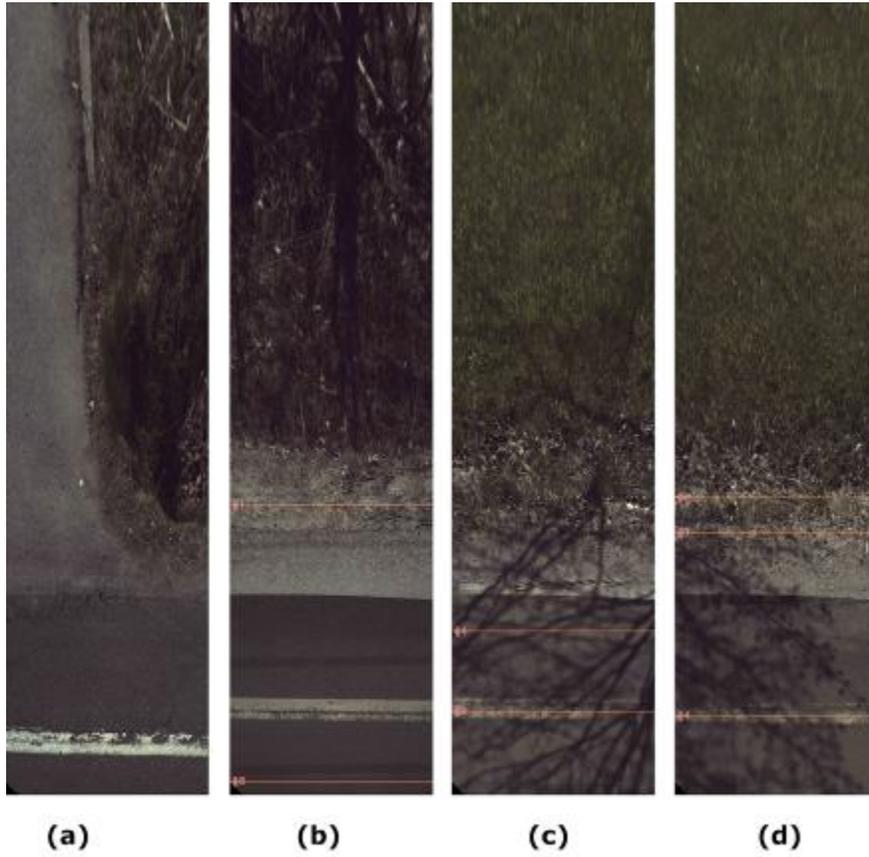


Figure 24 Lignes non détectées à cause d'une forme irrégulière ou d'une largeur trop grande. (a) et (b) Lignes blanches constituées de deux bandes étroites dont l'une est beaucoup plus usée ou plus fine que l'autre. (c) et (d) Lignes blanches trop large.

La Figure 25 contient des exemples de lignes de peinture éliminées à cause d'un marquage au sol⁴².

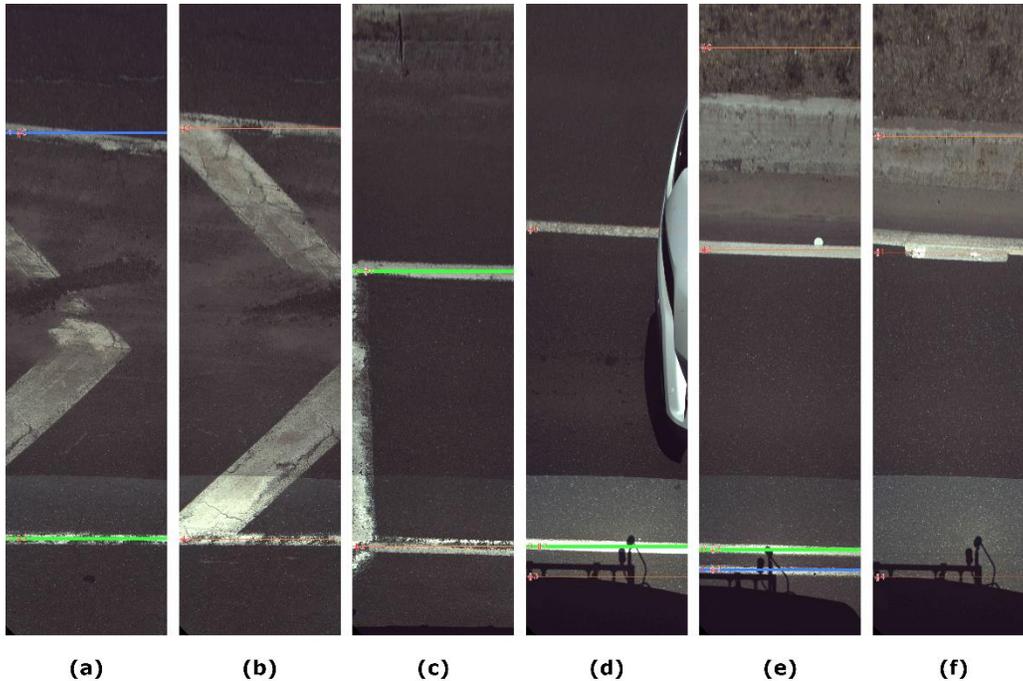


Figure 25 Lignes non détectées à cause d'un marquage au sol. (a) Lignes blanches correctement détectées (indiqué par les deux lignes pointillées vertes) avec marquage au sol proche, mais n'étant pas en contact avec elles. (b) Mêmes lignes qu'en (a) quelques dizaines de centimètres de route plus loin. Le marquage touche maintenant les deux lignes et empêche leur bonne détection (indiqué par les deux lignes pointillées rouge). (c) Marquage d'arrêt touchant une des deux lignes. (d) Voiture blanche aillant le même effet qu'un marquage au sol. (e) Un point collé à la ligne blanche du haut (id 2). (f) Premier pointillé d'une voie de sortie collé sur la ligne du bas-côté.

Dans la Figure 25 (a) les deux lignes de peinture sont correctement détectées et le marquage au sol est bien éliminé. Dans la figure (b), prise quelques dizaines de centimètres plus loin, on voit une région de la route où le marquage au sol élimine la ligne en la touchant. La figure (c) est un autre exemple de ce genre pour une ligne d'arrêt. La figure (d) montre une voiture blanche dont la peinture se confond avec la ligne de peinture blanche. Ceci a eu le même effet qu'un marquage au sol. La figure (e) contient une ligne de peinture ne recouvre pas complètement un point de marquage⁴³. C'est un cas rare, mais ces points sont identifiables et pourraient être éliminés des masques d'avant-plan dans les

⁴² Ces images ne concernent qu'une très petite partie de l'ensemble de toutes les images, elles influencent donc peu l'évaluation globale de la ligne.

⁴³ Ce point est le repère de positionnement indiquant où peindre la ligne.

algorithmes de traitements. La figure (f) est un autre cas rare⁴⁴ d'un petit marquage collé à la ligne.

La Figure 26 contient des exemples de lignes de peinture non détectées à cause de leur position dans l'image.



Figure 26 Lignes non détectées à cause de leur position, inclinaison ou éclairage. (a) Ligne blanche collée à la bordure du bas de l'image (contre la voiture). (b) Ligne blanche trop inclinée. (c) Ligne blanche effacée et cachée dans l'ombre de la voiture (à peine visible à l'œil nu) ⁴⁵.

La ligne de peinture blanche de la Figure 26 (a) n'a pas généré de pic de corrélation car elle touche la bordure du bas de l'image. Dans cet exemple, le conducteur du véhicule de prise de vues a probablement cherché à contourner un obstacle en déportant Prius contre la ligne de peinture. Cette situation devrait donc être exceptionnelle. Dans la figure (b), le pic de corrélation n'a pas été

⁴⁴ Cet exemple c'est produit au niveau du premier pointillé qui était collé sur la ligne de peinture blanche du bas-côté.

⁴⁵ Elle se trouve à mi-chemin entre la fine ligne rouge #2 et le bas de l'image. Seul un petit bout de quelques centimètres de peinture sort de l'ombre sur la droite de l'image.

généralisé à cause de l'inclinaison de la ligne. C'est un cas normal, mais rare. Cela se produit par exemple lorsque le véhicule tourne pour changer de voie. Dans la figure (c), la ligne blanche est trop effacée et cachée par l'ombre de la voiture pour générer un pic de corrélation.

La Figure 27 contient des exemples de fausses lignes détectées dans le bas-côté de la route.

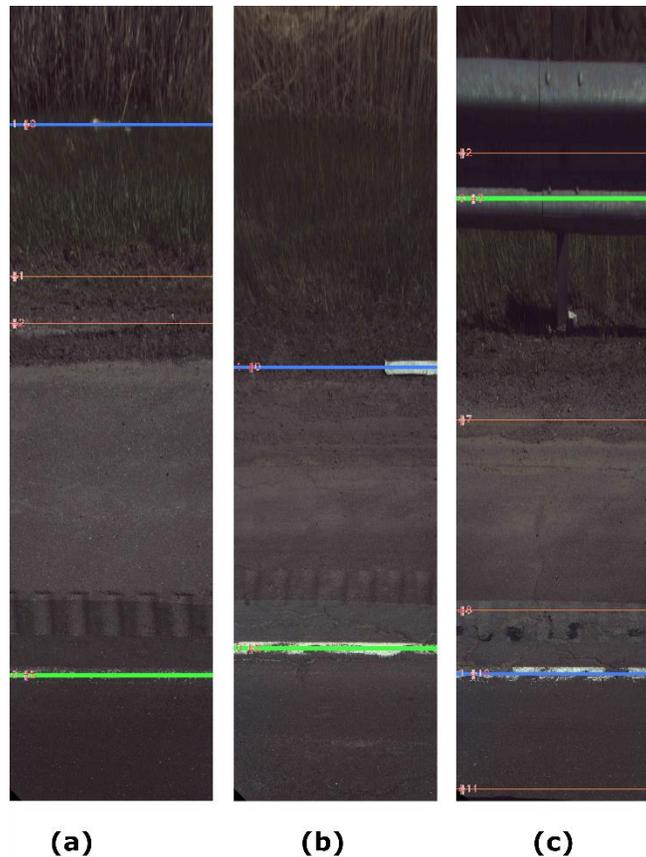


Figure 27 Fausses lignes détectées dans le bas-côté. La ligne #3 bleue de la figure (a) et la ligne #0 bleue de la figure (b) indiquent chacune un objet brillant détecté comme une ligne de peinture sur le bas-côté. La ligne #3 verte de la figure (c) indique une bande plus lumineuse sur un rail de sécurité vu comme une ligne de peinture.

Dans la Figure 27 (a) un petit objet a généré un pic de corrélation valide, car il est très brillant et contrasté par rapport à la couleur sombre de l'herbe haute du bas-côté. Sa petite taille⁴⁶ fait que l'algorithme l'a pris pour une tache de peinture. Elle sera cependant bien trop petite être considérée comme valide à

⁴⁶ La hauteur de la tâche est inférieure à la limite maximum définie à 225 mm (1.5 * 150 mm).

l'étape d'évaluation de qualité⁴⁷. Même chose pour la figure (b) où une planche est détectée. Dans ces figures (a) et (b), la route ne contient qu'une seule vraie ligne de peinture valide associée au pic de plus forte proéminence (la ligne #0 verte dans les deux images). Ceci fait que la bonne ligne sera facilement prise en compte à l'étape d'évaluation et que la fausse détection sera donc éliminée. Dans la figure (c) une bande brillante du rail de sécurité est prise pour une ligne de peinture valide. Elle correspond au pic le plus proéminent de l'image et c'est donc cette partie de rail que l'algorithme actuel prendra pour une ligne de peinture valide et qui sera évaluée à l'étape suivante. Il y a probablement possibilité d'améliorer l'algorithme pour repérer et éliminer ces fausses détections.

Autres cas

La difficulté du problème ne nous a pas permis d'effectuer des lignes pointillées. Ceci dit, d'après ce qu'il nous a été permis d'observer dans les développements décrits dans ce rapport, ces cas sont très similaires au cas des lignes simples continues car la principale difficulté réside dans la décision devant être prise quant à la présence ou non de lignes dans des conditions d'éclairage quelconques.

Tel que mentionné précédemment (Section 2, Figure 6), les lignes de couleur jaune sont plus facile à détecter car il est possible de prendre en compte les informations de teinte et de saturation.

4. PERFORMANCE DE L'APPROCHE DE DÉTECTION DES LIGNES SIMPLÉS

L'approche algorithmique décrite ci-dessus pour repérer la présence ou l'absence de lignes simples de marquage longitudinal a été évaluée sur une portion de chaussée d'environ 30 km formant un polygone (Route Marie-Victorin (132 ouest), Route Lagueux (171 sud) et Route-des-Rivières (116 est)) sur la rive sud de Québec (Figure 28). La vitesse d'acquisition de la séquence vidéo variait entre 0 et 90 km/h pour respecter la signalisation routière. Des séquences ont été recueillies le 31 mai 2019, le 19 septembre 2019 et le 18 mai 2020. Les conditions d'éclairage étaient variables (ensoleillé avec passages nuageux) et la chaussée était sèche. Ce parcours comprend des zones où l'ombre de parties boisées est projetée sur la chaussée, ce qui rend le repérage des lignes plus difficile, mais qui recrée des conditions susceptibles d'être rencontrées dans plusieurs régions du Québec.

⁴⁷ Elle aurait été évaluée de classe 5 tel qu'indiqué dans le Tableau 3 page 40.



Figure 28 Site d'acquisition des séquences vidéo ayant servi à l'analyse statistique présentée dans cette section.

Sur la portion de route étudiée, la séquence du 18 mai 2020 contenait 67,754 images⁴⁸ qui ont été analysées manuellement par deux personnes de l'équipe pour identifier le contenu des images. Les informations de chaque image de transition ont été inscrites dans un fichier JSON. Chaque entrée de ce fichier contient une clé unique⁴⁹ identifiant l'image, le type⁵⁰ de lignes qu'elle contient et un état⁵¹ indiquant les autres éléments présents sur la route et des

⁴⁸ Les données du 31 mai 2019 et du 19 septembre 2019 ont aussi été analysées manuellement, mais les résultats rapportés dans cette section sont ceux de la campagne de collecte de données du 18 mai 2020.

⁴⁹ La clé unique d'une image est l'horodatage précis à la milliseconde et contenu dans son nom de fichier. Son format est « HH-MM-SS-mmm ».

⁵⁰ Les types de lignes sont indiqués par les codes suivants : « » aucune; « s » simple; « i » simple incomplète; « d » double; « p » double dont proche incomplète; « l » double dont loin incomplète; « t » double toute incomplète (les deux lignes).

⁵¹ Les états de la ligne ou de l'image sont indiqués par les codes suivant : « m » marquage au sol; « o » ombre sur la route; « r » information remarquable (grille, poteau ou panneau par exemple); « x » xrejeté (image invalide); « b » pour bordure d'image tronquée; « » pour rien à signaler; « e » pour ligne effacée (grattée); « c » cônes; « i » inclinée; « d » doublon (voiture arrêtée); « f » fin ou

informations générales. L'Annexe 2 donne un extrait du fichier JSON contenant les transitions. Ce fichier permet ensuite de générer, à l'aide d'un code python, le fichier JSON de classification de chacune des 67,754 images.

Pour donner un exemple, l'entrée « ["14-43-06-922", "si", "av"] » du fichier JSON décrit l'image de la Figure 29. La clé unique "14-43-06-922" indique qu'elle a été prise à 14 h 43 m 6 s et 992 ms. Le type de ligne "si" indique qu'elle contient une ligne simple proche du véhicule « s » et une ligne simple incomplète une voie plus loin « i ». L'état de l'image "av" indique qu'il y a présence d'un autre véhicule « a » et que l'ombre de la voiture est projetée sur la chaussées « v ».

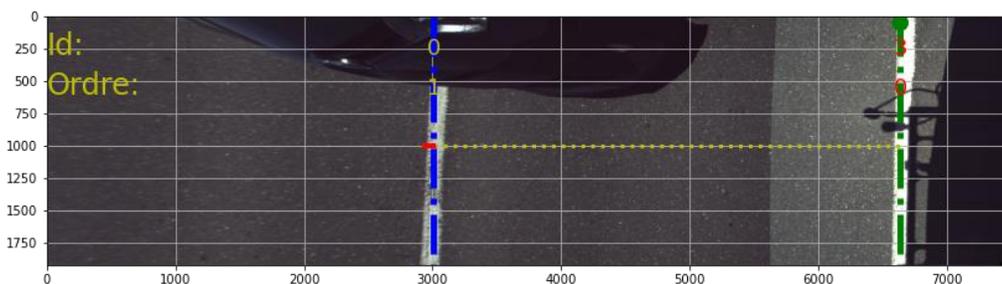


Figure 29 Exemple d'une image de transition contenant une ligne simple proche (id 3 en vert), une ligne simple incomplète (id 0 en bleu), un autre véhicule et l'ombre projetée de la voiture.

Les informations sur les types de ligne (aucune, simple, double, complète ou incomplète) permettent de connaître le nombre minimum et maximum de lignes présentes dans l'image. En comparant le résultat de l'analyse avec ces deux limites, il est possible d'estimer approximativement le nombre d'images où la quantité de lignes détectées est correcte (entre le minimum et le maximum), inférieure au minimum ou supérieure au maximum mesuré lors de la classification manuelle.

Le Tableau 2 décrit ces limites pour chaque type de ligne. Lorsqu'une route contient plusieurs lignes, les limites sont ajoutées. Un exemple est donné juste après.

Tableau 2 Nombre de lignes minimal et maximal pour chaque type de ligne

Type de ligne	Nombre minimum de lignes	Nombre maximum de lignes
---------------	--------------------------	--------------------------

début de ligne; « v » ombre de la voiture projetée sur la chaussée; « s » sillon ou crevasse; « a » autre véhicule.

« » - Aucune	0	0
« s » - Simple complète	1	1
« d » - Double 2 / 2 complète	2	2
« i » - Simple incomplète	0	1
« p » - Double 1 / 2 incomplète	1	2
« l » - Double 1 / 2 incomplète	1	2
« t » - Double 2 / 2 incomplètes	0	2

Exemples pour une route contenant une ligne simple et une ligne double

La route de la Figure 30 (a) a été classifiée avec le type « sp ». Elle contient une ligne simple complète et une ligne double dont la proche est incomplète la limite minimum est 2 (1 + 1) et la maximum 3 (1 + 2). On peut voir dans Figure 30 (b) que les algorithmes ont détecté les trois lignes. La détection est donc entre les limites [2, 3].

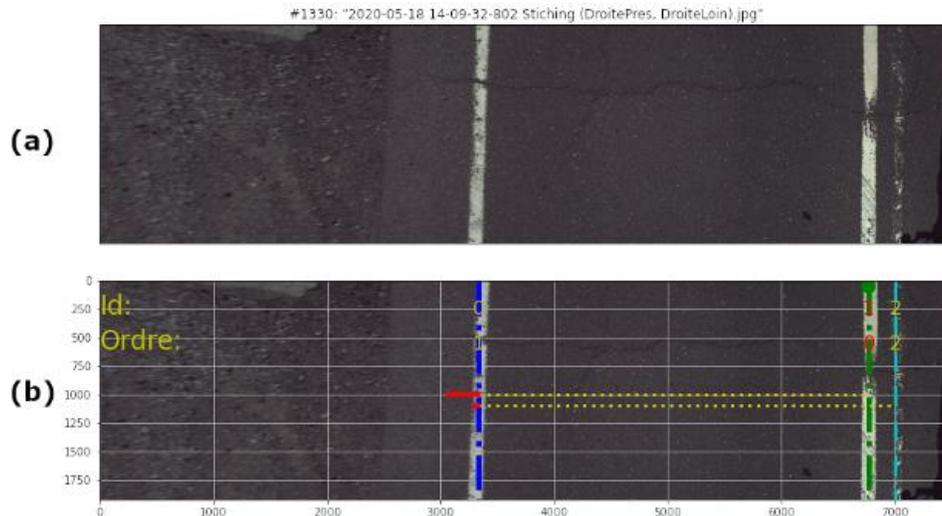


Figure 30 (a) Route de type « sp » contenant une ligne simple complète et une double dont la ligne proche est incomplète (ou partiellement effacée). (b) Les lignes détectées ont été dessinées en bleu pour la simple (id 0), en vert et cyan pour la double (ids 1 et 2).

La route de la Figure 31 (a) a été classifiée avec le type « ip ». Elle contient une ligne simple incomplète et une ligne double dont la proche est incomplète la limite minimum est 1 (0 + 1) et la maximum 3 (1 + 2). On peut voir dans Figure 31(b) que les algorithmes n'ont détecté que deux des trois lignes, la détection reste cependant toujours entre les limites [1, 3].

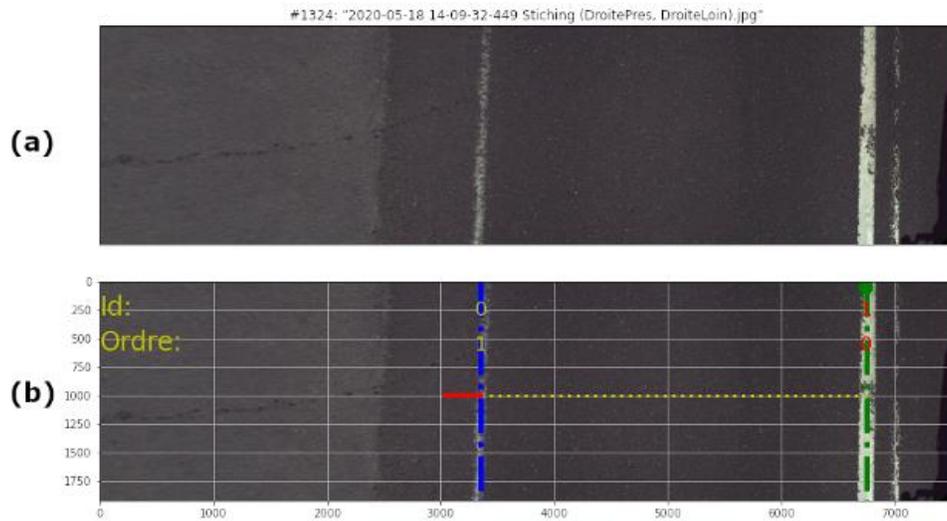


Figure 31 (a) Route de type « ip » contenant une ligne simple incomplète et une double dont la ligne proche est incomplète ou partiellement effacée. (b) Les lignes détectées ont été dessinées en bleu pour la simple (id 0) et en vert pour la ligne double proche (id 1).

Lorsqu'une ligne n'est pas détectée, elle est classée dans la catégorie 5 des lignes les plus usées (voir Tableau 1). Dans le cas de la Figure 30 et de la Figure 31, on constate que la ligne double proche est suffisamment effacée pour qu'elle soit aussi classée dans la catégorie 5 si détectée.

Tableau 3 Liste des classes d'usure des lignes de peinture

CLASSE	TAUX DE PRÉSENCE AU SOL (%)
1	96 à 100
2	75 à 95
3	50 à 74
4	15 à 49
5	0 à 14

En se basant sur les définitions précédentes et l'évaluation manuelle, nous sommes en mesure de présenter les statistiques montrées à la Figure 32.

Les colonnes « OK » concernent les images dont le nombre de lignes détectées est bien entre les limites minimum et maximum.

Les deux colonnes « Bas » concernent les images dont le nombre de lignes détectées est inférieur au minimum mesuré lors de la classification manuelle. Ceci ne peut arriver que si au moins une ligne de peinture valide n'a pas été correctement détectée. Tel qu'expliqué précédemment, la détection pourrait par exemple être perturbée par des zones d'ombres cachant partiellement une

ligne⁵², par un marquage au sol collé sur une ligne⁵³ ou lorsqu'une ligne de peinture est trop large⁵⁴.

Les colonnes « Haut » concernent les images dont le nombre de lignes détectées est supérieur au maximum mesuré lors de la classification manuelle. Ceci ne peut arriver que si au moins une zone de l'image est faussement prise pour une ligne de peinture valide. Une bordure de trottoir très fine et brillante pourrait par exemple être détectée par l'algorithme comme une ligne de peinture valide. Divers autres éléments se trouvant sur le bas-côté tels que des rails de sécurité ou de la végétation pourraient aussi créer de fausses détections.

La colonne « OK + Haut % » représente les images où un nombre de lignes détectées est supérieur ou égal au minimum mesuré lors de la classification manuelle. C'est donc un bon indicatif de la proportion d'images où toutes les lignes de peinture valides ont été détectées⁵⁵.

Résultats - Images stitchées acquises le 2020-05-18, batch 2020-10-13_2003

Largeur ligne 150 mm. Ratio hauteur max des blobs 1.50 (max = 225 mm)

	Total	Bas	Haut	OK	Bas %	Haut %	OK %	OK + Haut %
Toutes les lignes (-xi)	36899	470	2459	33970	1.3	6.7	92.1	98.7
Lignes avec cônes et autres ('xoimb')	34167	369	2235	31563	1.1	6.5	92.4	98.9
Ombres seulement ('o')	1889	57	171	1661	3.0	9.1	87.9	97.0
Lignes sans ombre voiture ('xv')	24000	716	1526	21758	3.0	6.4	90.7	97.0
Lignes avec ombre voiture seulement ('v')	13625	188	938	12499	1.4	6.9	91.7	98.6

Figure 32 Performance du système de détection de lignes pour la portion de 30 km inspectée sur la Route-des-Rivières.

La première ligne du tableau précédent indique que toutes les lignes de peinture valides ont probablement été détectées dans presque 99% de toutes les images. On peut aussi remarquer que presque 7% de celles-ci contiennent au moins une fausse détection en trop, mais cela ne pose généralement pas de problème, car une étude plus poussée des lignes détectées permet généralement de sélectionner les bonnes.

⁵² Notez que la plupart des lignes partiellement cachées par des zones d'ombre sont correctement détectées.

⁵³ Une bande de peinture marquant la ligne d'arrêt est un bon exemple de marquage au sol pouvant être collé sur la ligne de peinture.

⁵⁴ Une ligne de peinture au sol pourrait par exemple devenir trop large dans une zone de faible passage, lorsqu'une nouvelle ligne n'est pas parfaitement peinte au-dessus d'une ancienne peu usée.

⁵⁵ Bien qu'elle soit relativement fiable, la colonne « OK + Haut % » pourrait aussi contenir certains cas où au moins une fausse détection pourrait compenser une bonne ligne non détectée dans certaines images.

La troisième ligne du tableau concerne les images contenant des ombres projetées sur la chaussée⁵⁶. Il est plus difficile de détecter les lignes dans ces conditions et l'on peut ainsi voir une petite dégradation des statistiques. La proportion d'images correctes « Ok + Haut » passe de 99% à 97%, celle des images contenant des lignes non détectées passe de 1% à 3%, et celle des images contenant au moins une fausse ligne détectée passe de 7% à 9%.

5. CLASSIFICATION DE LA QUALITÉ DU MARQUAGE LONGITUDINAL EN CINQ CATÉGORIES

La difficulté du problème de détection des lignes ou de traitement des images avec l'absence de ligne a mobilisé tous les efforts de l'équipe de développement, ce qui n'a pas rendu possible le développement du module de classification de la qualité du marquage longitudinal.

Ceci dit, nous avançons avec confiance que l'approche basée sur la cross-corrélation implantée pour le système d'évaluation des bancs d'homologation [LAU2020] serait également applicable dans le cas présent. Comme le classement de la qualité du marquage longitudinal est moins exigeant sur le plan de la précision que l'évaluation de la durabilité de la peinture sur les bancs d'homologation, il suffirait selon nous d'améliorer la performance du système pour les cas de fausses détections décrits précédemment et de calibrer le système pour qu'il tienne compte des cinq classes de qualité.

6. CONCLUSION

Tel que mentionné précédemment, le problème de classification de la qualité du marquage longitudinal par la vision artificielle est un problème très difficile pour plusieurs raisons. Premièrement, les conditions d'observation du marquage ne sont pas contrôlées que ce soit pour l'éclairage, la vitesse du véhicule ou l'environnement physique dans lequel le véhicule évolue. Deuxièmement, le système doit être en mesure de prendre en compte une grande variété de configurations de marquage tout en limitant le nombre de passages requis pour une évaluation efficace.

La solution proposée pour le repérage des lignes (ou l'absence de lignes) atteint de très bonnes performances dans un grand nombre de cas, mais manque de robustesse dans des cas où la ligne de peinture est peinte en double, masquée par l'ombre de la voiture, ou lors de certaines fausses détections dans les bas-côtés. Il faudrait consacrer plus d'efforts pour améliorer les performances du

⁵⁶ L'ombre peut par exemple provenir d'arbres proches de la route ou d'un pont au-dessus.

système dans ces cas. Il conviendrait aussi d'effectuer des tests sur différentes configurations de marquage, ce qui n'a pu être fait. Nous croyons que l'approche de repérage de lignes serait performante dans ces différentes configurations car les informations de géolocalisation du véhicule pourraient être utilisées pour interroger la base de données du MTQ dans laquelle la configuration du marquage est stockée. L'utilisation de cette information ajouterait des informations qui pourraient être utilisées pour augmenter les performances du système tout en permettant de traiter les différentes configurations de marquage.

Finalement, le classement de la qualité du marquage dans 5 catégories n'a pu être complété, mais pourrait exploiter une approche exploitant la cross-corrélation. Cette approche a démontré son efficacité dans un autre projet.

RÉFÉRENCES

[COM2020a] COMTOIS, S. LAURENDEAU, D., « Procédure d'étalonnage des caméras pour l'analyse des bancs d'homologation et du marquage longitudinal », *Guide d'utilisation. Département de génie électrique et de génie informatique, Université Laval*, avril 2020, 8 p.

[COM2020b] COMTOIS, S., LAURENDEAU, D., « Outil de calibrage de caméras », *Manuel de référence pour le calibrage des caméras, Département de génie électrique et de génie informatique, Université Laval*, avril 2020, 23 p.

[LAU2020] LAURENDEAU, D., « Contrat de projet de recherche R832.1 Évaluation de la qualité des essais de peinture pour le marquage des routes - Rapport d'étape 4 (version du 15 mai 2020) », *Département de génie électrique et de génie informatique, Université Laval*, version du 15 mai 2020, 30 p.

[MTQ2019] MTQ, « Aide-mémoire – Marquage, Relevé de durabilité – Exemples pour le positionnement des lignes, » Juillet 2019

[OTS1979] OTSU, N., « A threshold selection method from gray-level histograms », *IEEE Trans. Sys., Man., Cyber.*, vol. 9, 1979, p. 62–66 (DOI 10.1109/TSMC.1979.4310076)

[SAV1964] SAVITZKY, A., GOLAY, M.J.E., « Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures », *Analytical Chemistry*, vol. 8, no. 36, 1964, p. 1627–1639

[ZHAN00] Zhang, Z., « A flexible new technique for camera calibration, », *IEEE Trans. On PAMI*, Vol. 22, No. 11, Nov. 2000, pp. 1330-1334, DOI 10.1109/34.888718

ANNEXE A

***EXEMPLE DE CONTENU D'UN FICHIER JSON CONTENANT LES
RÉSULTATS SOMMAIRES DE L'ANALYSE***

```
{  
  "id": 4259,  
  "nom": "2020-05-18 14-12-12-  
270 Sticking (DroitePres, DroiteLoin).jpg",  
  "correlation": null,  
  "car shadow blobs": null,  
  "extracted lines": {  
    "image key": "14-12-12-270",  
    "is_positif": true,  
    "peaks": [ 3896, 4248, 5551, 6653],  
    "valid peaks indexes": [3, 1, 0],  
    "valid lines indexes": [3],  
    "invalid lines indexes": [1, 0]  
  }  
}
```

ANNEXE B

***EXEMPLE DE CONTENU D'UN FICHER JSON CONTENANT LES
TRANSITIONS.***

CLASSIFICATION AUTOMATIQUE DE LA DURABILITÉ DU MARQUAGE LONGITUDINAL DES
ROUTES SOUS LA RESPONSABILITÉ DU MINISTÈRE DES TRANSPORTS PAR VISION
ARTIFICIELLE – PROJET R831.1

```
{  
  "columns": [  
    "Images key",  
    "Line type",  
    "Line state"  
  ],  
  "data": [  
    ["14-43-06-922", "si", "av"],  
    ["14-43-07-037", "s", "av"],  
    ["14-43-07-395", "si", "av"],  
    ["14-43-07-512", "ss", "v"],  
    ["14-43-09-684", "ss", "dv"],  
    ["14-43-13-625", "si", "av"],  
    ["14-43-13-689", "s", "av"]  
  ]  
}
```