

**DÉVELOPPEMENT DE LOGICIELS DE
THERMOGRAPHIE INFRAROUGE VISANT À
AMÉLIORER LE CONTRÔLE DE LA QUALITÉ DE LA
POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX**

par

Martin Vézina

Mémoire présenté au Département d'informatique
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

**FACULTÉ DES SCIENCES
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE**

Sherbrooke, Québec, Canada, 22 décembre 2014

Le 22 décembre 2014

le jury a accepté le mémoire de Monsieur Martin Vézina dans sa version finale.

Membres du jury

Professeur Djemel Ziou
Directeur de recherche
Département d'informatique

Martin Lavoie
Membre externe
Ministère des Transports du Québec

Professeur Jamal Eddine Rhazi
Membre interne
Département de génie civil

Professeur François Dubeau
Président-rapporteur
Département de mathématiques

Sommaire

Les fissures et les nids-de-poule sont des défauts très présents sur les routes du réseau routier québécois. Un bon contrôle de la qualité lors de la pose de l'enrobé bitumineux permet de diminuer les risques d'apparition de ces défauts. Le ministère des Transports du Québec (MTQ) utilise la thermographie infrarouge afin de détecter les zones non conformes, soit celles qui deviendront des nids-de-poule ou des fissures. Des variations thermiques sur l'image infrarouge permettent la détection de ces zones. Toutefois, les logiciels utilisés par le MTQ ne sont pas appropriés pour détecter les zones non conformes. Ce mémoire présente deux méthodes de détection automatique des zones non conformes. La première permet l'analyse des images prises par une caméra thermique alors que la seconde permet d'analyser en continu les données provenant d'un scanner infrarouge. Ces deux méthodes utilisent des techniques de segmentation afin de détecter les zones non conformes. Elles permettent l'analyse automatique des données sans qu'aucune intervention humaine ne soit nécessaire.

Mots-clés: thermographie ; infrarouge ; segmentation ; détection de coins ; détection de contours ; temps réel.

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Djemel Ziou, pour avoir accepté de collaborer à ce projet ainsi que pour son suivi et son encadrement tout au long de cette maîtrise. Je remercie aussi Martin Lavoie, mon superviseur au ministère des Transports, pour m'avoir fait découvrir ce projet et pour sa confiance. Merci à mes collègues du MOIVRE pour le partage d'idées et toutes ces discussions autant scientifiques qu'amicales. Merci à Ismail Boujelben pour sa contribution au projet. Merci à ma famille pour son soutien et ses encouragements durant mes études. Merci également à mes amis pour les activités et les moments de détente en dehors des études. Finalement, merci à Valérie pour m'avoir supporté, encouragé et épaulé tout au long de cette aventure.

Abréviations

IR Infrarouge

STL Ségrégation Thermique Longitudinale

MTQ Ministère des Transports du Québec

Table des matières

Sommaire	i
Remerciements	ii
Abréviations	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	vi
Introduction	1
1 Image infrarouge	3
1.1 L'infrarouge et la radiation infrarouge	4
1.2 Modèle de formation de l'image infrarouge	10
1.3 Les applications de l'infrarouge	13
1.4 Détection des caractéristiques	16
1.4.1 Détection de contours	16
1.4.2 Détecteur de coins	18
1.4.3 Transformée de Hough	21
1.5 Objectifs du mémoire	23
2 Système de détection des défauts de pose de l'enrobé bitumineux	25
2.1 Les zones non conformes	26
2.2 Méthode d'analyse actuelle	29
2.3 Système de détection automatique	30

TABLE DES MATIÈRES

2.4	Détecteur de zones froides et de zones chaudes	32
2.5	Détecteur de la zone de pavage	34
2.5.1	Identification de la région de pavage	34
2.5.2	Détection de coins	35
2.5.3	Séparation de la zone de pavage	46
2.6	Détecteur de ségrégations thermiques longitudinales	52
3	Système de détection des défauts de pose de l'enrobé bitumineux par l'acquisition de données en continu	58
3.1	Détection des zones chaudes/froides	60
3.2	Détection de ségrégations thermiques longitudinales	63
4	Résultats	70
4.1	Validation du système de détection des défauts de pose de l'enrobé bitumineux	71
4.1.1	Le système	71
4.1.2	Les données	71
4.1.3	Méthodologie	72
4.1.4	Résultats obtenus	75
4.2	Validation du système de détection des défauts de pose de l'enrobé bitumineux par l'acquisition de données en continu	85
4.2.1	Le système	85
4.2.2	Les données	85
4.2.3	Méthodologie	85
4.2.4	Résultats obtenus	86
	Conclusion	91

Liste des figures

1.1	Spectre électromagnétique	4
1.2	Sir Frederic William Herschel	5
1.3	Relation entre la température, l'énergie émise et la longueur d'onde	9
1.4	Transfert d'énergie infrarouge entre deux surfaces	10
1.5	Résultat d'une fusion entre une image réelle et une image infrarouge	14
1.6	Courbe gaussienne ayant une moyenne et un écart-type égal à 1	17
1.7	Coins trouvés avec Harris	20
1.8	Cercle osculateur	21
1.9	Représentation des paramètres ρ et θ d'une droite	22
1.10	Transformée de Hough	22
2.1	Zone froide	27
2.2	Zone chaude	28
2.3	Ségrégation thermique longitudinale	28
2.4	Architecture du système de détection automatique	30
2.5	Contours délimitant deux R-voies	37
2.6	Contour de la route coloré selon la courbure	38
2.7	Coins obtenus en utilisant la courbure	39
2.8	Contour final en utilisant la courbure	39
2.9	Coins trouvés en utilisant Harris	41
2.10	Zone de pavage coupée sur une STL	42
2.11	Module du gradient de l'image infrarouge	46
2.12	Graphe créé à partir du pixel S	49
2.13	Contour de la zone de pavage avant et après le retrécissement	51

LISTE DES FIGURES

2.14	Profil d'une STL	53
2.15	Recherche des STL	55
2.16	Frontière statistique permettant d'éliminer certaines STL	57
3.1	Scanneur infrarouge	60
3.2	Bruit présent sur le profil de températures	61
3.3	Classification des pixels en segments	62
3.4	Situation possible lors de la mise à jour des zones froides	63
3.5	STL avant et après l'application du filtre médian	64
3.6	Application du filtre gaussien à droite	66
3.7	Zone froide détectée en tant que STL	67
4.1	Différentes images utilisées pour effectuer les tests	73
4.2	Mauvaise détection de la zone de pavage	76
4.3	Erreur commise lors de la détection de la zone de pavage	77
4.4	Mauvaise séparation où une partie de la zone d'intérêt est ignorée	79
4.5	Image sur laquelle le finisseur n'est pas visible	80
4.6	Image avec un faux positif	81
4.7	STL détectée par l'analyse manuelle, mais pas par le système	82
4.8	Erreurs de détection de STL	83
4.9	Zones froides détectées dans la mauvaise R-voies	84
4.10	Zone froide détectée par le scanneur	87
4.11	Être humain présent sur l'enrobé et détecté comme zone froide	88
4.12	STL rejetée par le système	88
4.13	STL ayant un mauvais point de départ	90

Introduction

Le réseau routier québécois nécessite un entretien constant afin d'assurer la qualité de celui-ci. Or, il n'est pas rare de voir des fissures et des nids-de-poule sur les routes québécoises. En plus d'être inconfortables pour les usagers du réseau, ces défauts constituent un risque d'accident s'ils prennent trop d'envergure. Afin de diminuer l'apparition des défauts, il est nécessaire de réaliser un bon contrôle de la qualité. En effet, les nids-de-poule et les fissures se développent dans les régions les plus faibles de l'enrobé. Détecter ces zones de faiblesse permet aux opérateurs d'apporter des ajustements aux procédures de travail et ainsi contribue à diminuer la fréquence d'apparition de ces zones. Il en découle un réseau routier plus durable et de meilleure qualité. Lors de sa pose, l'enrobé bitumineux devrait avoir une densité similaire sur toute sa surface. Or, il est possible que certaines zones de l'enrobé bitumineux aient une densité différente du reste de l'enrobé. Ces zones représentent les zones de faiblesse. Elles peuvent être causées, par exemple, par une mauvaise opération des équipements ou par le refroidissement de l'enrobé lors du transport en camion. Pour un être humain regardant directement l'enrobé bitumineux, les zones de faiblesse peuvent ne pas être visibles. Ainsi, il est nécessaire de se poser la question suivante : comment déceler efficacement les zones de faiblesse sur l'enrobé bitumineux lors de l'épandage de celui-ci ? La plupart des objets, en plus d'émettre de l'énergie dans le domaine visible, émettent leur énergie dans des longueurs d'onde invisibles par l'oeil humain. La caméra thermique capte les rayonnements infrarouges d'une scène. À partir de ceux-ci, il est possible de déduire la température des objets de la scène. Bien que d'allure uniforme dans le domaine visible, des zones distinctes peuvent apparaître dans l'image infrarouge de l'enrobé bitumineux. Ces zones ont une densité différente du reste de l'enrobé et correspondent aux zones de faiblesse. Ainsi, la thermographie infrarouge est utilisée

INTRODUCTION

depuis 2008 par le Ministère des Transports du Québec (MTQ) afin d'assurer un bon contrôle de la qualité lors de la mise en oeuvre des enrobés. Toutefois, il n'existe, à notre connaissance, aucun outil automatique pour la détection des zones de faiblesse dans l'image infrarouge. L'utilisation d'un logiciel visant la détection des zones de faiblesse permettrait de diminuer les erreurs humaines et le temps d'analyse requis. Afin d'améliorer l'efficacité de son contrôle de la qualité, le MTQ nous a chargés de développer un tel logiciel pour détecter tous les types de zones de faiblesse répertoriés qui intéressent le MTQ. Ces zones sont au nombre de trois : les zones froides, les zones chaudes et les ségrégations thermiques longitudinales. Le MTQ travaille avec deux types de capteurs infrarouges : la caméra infrarouge et le scanneur infrarouge. La caméra infrarouge est utilisée par un opérateur et elle capte les températures de la scène entière à un moment donné. Le scanneur acquiert les données de température en continu.

Afin de permettre une détection automatique des zones de faiblesse, deux systèmes informatiques de détection ont été développés. Le premier permet l'analyse des images prises par une caméra infrarouge alors que le second permet l'analyse en continu des données acquises par le scanneur. Le présent mémoire a pour but de présenter ces deux systèmes. Le premier chapitre traitera de l'infrarouge et de ses applications. Le second chapitre détaillera le système développé pour l'anticipation des nids-de-poule et des fissures sur une image infrarouge. Le troisième chapitre traitera du système d'anticipation en continu. Enfin, le quatrième chapitre exposera les résultats obtenus et les perspectives.

Chapitre 1

L'image infrarouge

L'humain arrive à interpréter l'environnement grâce à l'utilisation de ses sens. Un sens très utilisé pour analyser notre environnement et naviguer dans celui-ci est la vue. Il est possible de voir grâce à nos yeux que nous pouvons considérer comme étant des capteurs hautement spécialisés. En effet, ces capteurs parviennent à capter l'énergie d'une mince bande du spectre électromagnétique. Cette énergie est transformée en un signal électrique qui peut être interprété par notre cerveau. Cette énergie interprétée par nos yeux est appelée lumière visible et est comprise dans la bande visible du spectre lumineux. Cette bande représente une très petite partie du spectre lumineux avec des longueurs d'onde allant de 390 nm jusqu'à 780 nm. Le spectre lumineux est représenté sur la Figure 1.1. Nous pouvons voir que le spectre est composé de plusieurs autres énergies, dont la plupart apportent différentes informations sur les objets qui nous entourent. N'étant pas captées par l'œil humain, ces énergies sont invisibles. Par exemple, l'énergie ayant une longueur d'onde beaucoup plus élevée que l'énergie visible est utilisée pour transmettre les signaux de radio et de télévision. À une plus courte longueur d'onde, les rayons X sont utilisés pour voir au travers de certains objets. Ils sont, entre autres, utilisés dans le domaine médical afin de visualiser des fractures par exemple. Bien qu'invisibles pour l'œil humain, ces ondes peuvent être captées et interprétées grâce à l'utilisation d'appareils appropriés. Dans le présent document, la région du spectre électromagnétique qui est étudiée se situe entre les

1.1. L'INFRAROUGE ET LA RADIATION INFRAROUGE

ondes radio et la bande visible. Il s'agit de l'énergie infrarouge.

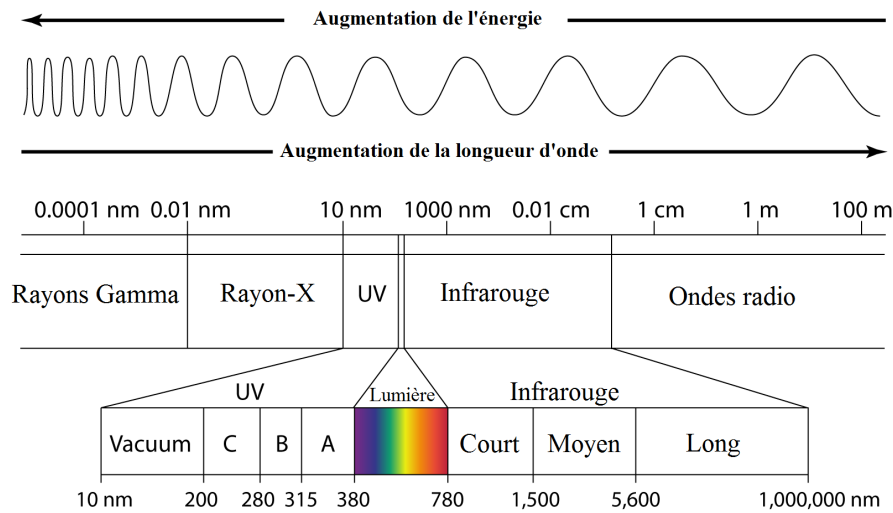


Figure 1.1 – Spectre électromagnétique. Source : [24]

1.1 L'infrarouge et la radiation infrarouge

La fréquence du rayonnement infrarouge est inférieure à celle du rayonnement visible. C'est cette caractéristique qui lui vaut son nom : infrarouge. En effet, infra est un mot latin qui signifie en dessous de. Ainsi, infrarouge signifie en dessous du rouge. Par contre, la longueur d'onde étant inversement proportionnelle à la fréquence, celle du rayonnement infrarouge est donc supérieure à celle de la lumière visible. Les longueurs d'onde du spectre infrarouge varient de 700 nm à 1 000 000 nm. Le spectre infrarouge peut être divisé en trois catégories [54] :

1. l'infrarouge court (de 0.78 μm à 1.5 μm) ;
2. l'infrarouge moyen (de 1.5 μm à 5.6 μm) ;
3. l'infrarouge long (de 5.6 μm à 1000 μm).

1.1. L'INFRAROUGE ET LA RADIATION INFRAROUGE



Figure 1.2 – Sir Frederic William Herschel observant la température du rayonnement infrarouge. Source : [8]

L'énergie infrarouge a été observée pour la première fois en 1800 par Sir Frederic William Herschel. Ce dernier a voulu mesurer la température de chaque couleur du spectre visible. Pour ce faire, il a recréé l'expérience du prisme réalisé par Newton. Dans cette expérience, il a décomposé la lumière blanche en la faisant passer au travers d'un prisme. Sir Herschel a mesuré la température de chaque couleur en utilisant un thermomètre. Il a remarqué que la température augmentait lorsqu'il déplaçait le thermomètre du violet vers le rouge, le rouge ayant la température la plus élevée. Il tenta ensuite de placer le thermomètre juste après la région rouge. Il fut surpris de constater que cette région avait la température la plus élevée. La température de cette région est celle de l'énergie infrarouge.

1.1. L'INFRAROUGE ET LA RADIATION INFRAROUGE

Il existe deux approches permettant d'interagir avec l'énergie infrarouge : l'approche active et l'approche passive [38]. Avec l'approche passive, l'énergie infrarouge émise par des objets qui sont naturellement à une température différente de la température ambiante est captée. Par exemple, une caméra permettant d'obtenir la température d'un objet dans une scène utilise l'approche passive. Avec l'approche active, un stimulus externe est utilisé pour générer des différences de température qui n'auraient pas été présentes autrement. Un système composé d'un émetteur infrarouge et d'un récepteur infrarouge utilise l'approche active. Un tel système peut être utilisé, par exemple, pour les systèmes de sécurité [60]. Ce que va capter un capteur infrarouge correspond aux variations d'intensité dans l'énergie transmise ayant une longueur d'onde correspondant à la région infrarouge du spectre électromagnétique. Il est possible de visualiser ces variations en les représentant comme une image à niveaux de gris.

L'infrarouge est une région intéressante du spectre électromagnétique. En effet, les objets ayant une température proche de la température ambiante émettent une grande partie de leur énergie dans le spectre infrarouge. Ainsi, un capteur infrarouge devrait être en mesure de détecter les différences de température entre les objets ayant une température proche de celle du corps humain. Il devrait également être en mesure de détecter tout objet émettant ou reflétant de la chaleur et ayant une température différente de son environnement. Aussi, puisque les radiations infrarouges sont émises par des objets chauds, il est possible de capter celles-ci de jour comme de nuit. On appellera caméra thermique une caméra captant l'énergie infrarouge. Ce nom lui vient de la capacité de certaines caméras infrarouges à se servir de l'énergie infrarouge pour obtenir la température des objets dans une scène. Toutefois, comme l'énergie captée par un capteur infrarouge ne peut pas être traduite directement en une mesure de température précise, la caméra thermique exécute une série d'algorithmes. Ces algorithmes permettent une lecture précise de la température et dépendent de l'émissivité de l'objet et de la température de fond. Ces données doivent être fournies par l'utilisateur de la caméra.

Tout objet dont la température est supérieure au zéro absolu émet de l'énergie. Si l'objet a une température supérieure à la température environnante, alors il émettra dans l'environnement davantage d'énergie qu'il va en recevoir de celui-ci. Un objet

1.1. L'INFRAROUGE ET LA RADIATION INFRAROUGE

ayant une température avoisinant les 300 K émettra la plus grande partie de son énergie dans la partie infrarouge du spectre électromagnétique. Cette énergie peut être perçue par l'être humain en tant que chaleur. Aussi, si un objet est chauffé, sa couleur variera au fur et à mesure que sa température augmentera. À partir de cette observation, il est possible d'affirmer que les fréquences auxquelles un objet émet des radiations sont liées à la chaleur de cet objet. En effet, en 1896, Wilhelm Wien a remarqué que la longueur d'onde correspondant au maximum de radiation est inversement proportionnelle à la température de l'objet. La loi de Wien permet de trouver la longueur d'onde maximale émise par un objet à une température donnée [20] :

$$\lambda_{max} = \frac{w}{T} \quad (1.1)$$

où T est la température de l'objet en degré Kelvin et w est la constante de Wien. Cette dernière est obtenue par :

$$w = \frac{hc}{4.9651k} \quad (1.2)$$

où h est la constante de Plank, k est la constante de Boltzmann et c est la vitesse de lumière. Sa valeur est de 2.898×10^{-3} . En calculant avec (1.1) la longueur d'onde maximale d'un objet ayant une température de 300°K , on trouve que celle-ci est de $9.7 \mu\text{m}$. Comme attendu, elle se situe dans la région infrarouge du spectre. Toutefois, il est important de noter que la quantité d'énergie émise ne dépend pas seulement de sa température, mais aussi du matériel de l'objet ainsi que de la nature de sa surface.

Afin d'être en mesure de quantifier le rayonnement émis par un objet, il est nécessaire de définir un point de référence. En infrarouge, le point de référence est associé au corps noir. À notre connaissance, le terme corps noir a été utilisé pour la première fois dans les travaux de Gustav Kirchhoff en 1860. Kirchhoff définit le corps noir comme un objet absorbant la totalité des rayons incidents sans en réfléchir ou en transmettre aucun [28]. Ainsi, un corps noir est un objet dont son spectre électromagnétique dépend uniquement de sa température. Il s'agit d'un émetteur idéal, c'est-à-dire qu'il émet autant ou plus d'énergie que tout autre objet à la même température. Il s'agit aussi d'un absorbeur idéal, c'est-à-dire qu'il absorbe la totalité de

1.1. L'INFRAROUGE ET LA RADIATION INFRAROUGE

l'énergie électromagnétique qu'il reçoit incluant la lumière visible. En raison de sa capacité à absorber la lumière visible, l'objet devrait nous apparaître comme étant noir, d'où son nom.

Dans la réalité, il est difficile de trouver un corps noir. Par contre, certains matériaux s'en rapprochent beaucoup. Un objet ayant des propriétés très similaires est une boîte construite avec un matériel isotherme. Un petit trou doit être percé sur l'une de ses parois. Le trou permet à l'objet de laisser échapper de l'énergie.

Dans son texte, Kirchhoff montre que le ratio de l'énergie émise par un objet par rapport à l'énergie émise par un corps noir, W/W_b , est une propriété de l'objet et de son revêtement. Cette propriété est définie comme étant l'émissivité, ϵ , d'un objet. Aussi, le ratio de l'énergie absorbée par un corps sur l'énergie incidente à ce corps est appelé absorptivité, α . L'absorptivité d'un corps est constante pour un corps à une longueur d'onde et à une température donnée. Si le corps est opaque, alors son émissivité est égale à son absorptivité. Un corps pour lequel l'émissivité reste constante pour toute longueur d'onde est appelé un corps gris. À l'inverse, un corps dont l'émissivité varie est appelé un corps spectral, un radiateur sélectif ou un corps coloré.

En 1879, Joseph Stefan remarque que la quantité de radiations émises par un objet est proportionnelle à la surface du corps et à sa température élevée à la puissance quatre. En 1884, cette observation est confirmée par Ludwig Boltzmann. Il en découle la loi de Stephan-Boltzmann :

$$W(T) = \sigma AT^4 \tag{1.3}$$

dans laquelle σ est la constante de Stephan-Boltzmann égale à 5.672×10^{-12} , A est la surface de l'objet et T est la température de l'objet en degré Kelvin.

Toutefois, pour observer la manière dont varie l'émissivité avec la longueur d'onde, il est nécessaire de considérer la loi de Planck [9]. Cette dernière permet d'obtenir la quantité d'énergie W émise par un corps noir en fonction de la longueur d'onde λ de l'énergie émise par un corps étant à une température T . La loi de Planck est définie ainsi :

1.1. L'INFRAROUGE ET LA RADIATION INFRAROUGE

$$W_\lambda(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1} \text{ watts/cm}^3 \quad (1.4)$$

avec h , la constante de Planck, c , la vitesse de la lumière et k la constante de Boltzmann. Il est possible d'écrire cette loi de manière plus concise :

$$W_\lambda(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(\frac{c_2}{\lambda T}) - 1} \text{ watts/cm}^3 \quad (1.5)$$

où c_1 et c_2 sont connues comme étant respectivement les première et seconde constantes de la radiation.

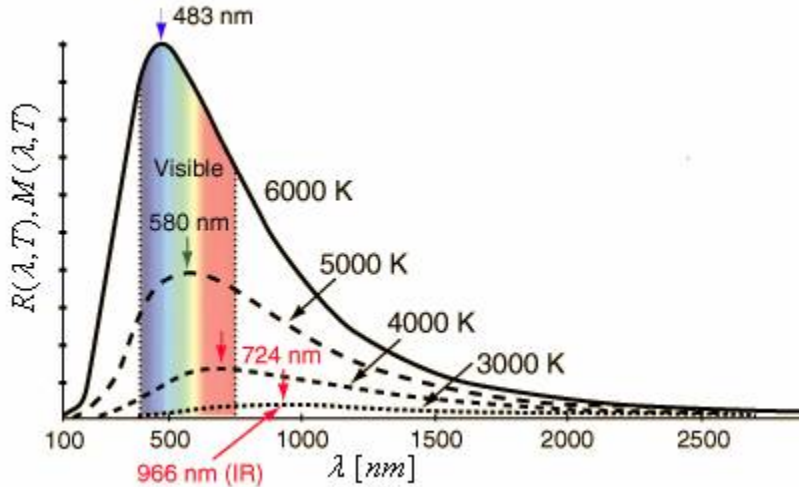


Figure 1.3 – Graphique affichant l'émissivité d'un corps noir par rapport à la longueur d'onde pour différentes températures. Source : [9]

Sur le graphique 1.3, la relation entre la température, l'énergie émise et la longueur d'onde peut être visualisée. R représente la quantité d'énergie émise par un corps noir et M correspond à son émissivité. Il peut être intéressant d'intégrer (1.4) par rapport à λ de 0 à l'infini. Le résultat de cette intégrale est :

$$W(T) = \frac{2\pi^3 k^4}{15c^2 h^3} T^4 \quad (1.6)$$

On remarque que cette dernière équation est en réalité une version modifiée de (1.3) pour une unité de surface.

1.2. MODÈLE DE FORMATION DE L'IMAGE INFRAROUGE

Connaître la quantité d'énergie infrarouge émise par un objet n'est pas suffisant pour parvenir à créer un capteur d'image infrarouge. Pour ce faire, il est nécessaire de comprendre comment fonctionne le transfert d'énergie d'un objet vers un autre objet. C'est cette énergie qui sera captée par le capteur d'une caméra infrarouge.

1.2 Modèle de formation de l'image infrarouge

La Figure 1.4 contient deux surfaces, S_1 et S_2 , entre lesquelles un échange d'énergie infrarouge se produit. Sur ces surfaces, deux régions infiniment petites, dS_1 et dS_2 sont mises en évidence. Le segment joignant le point central de dS_1 au point central de dS_2 a une longueur r . Ce segment forme un angle θ_1 avec la normale à S_1 et un angle θ_2 avec la normale à S_2 . Les explications qui suivent seront basées sur cette figure.

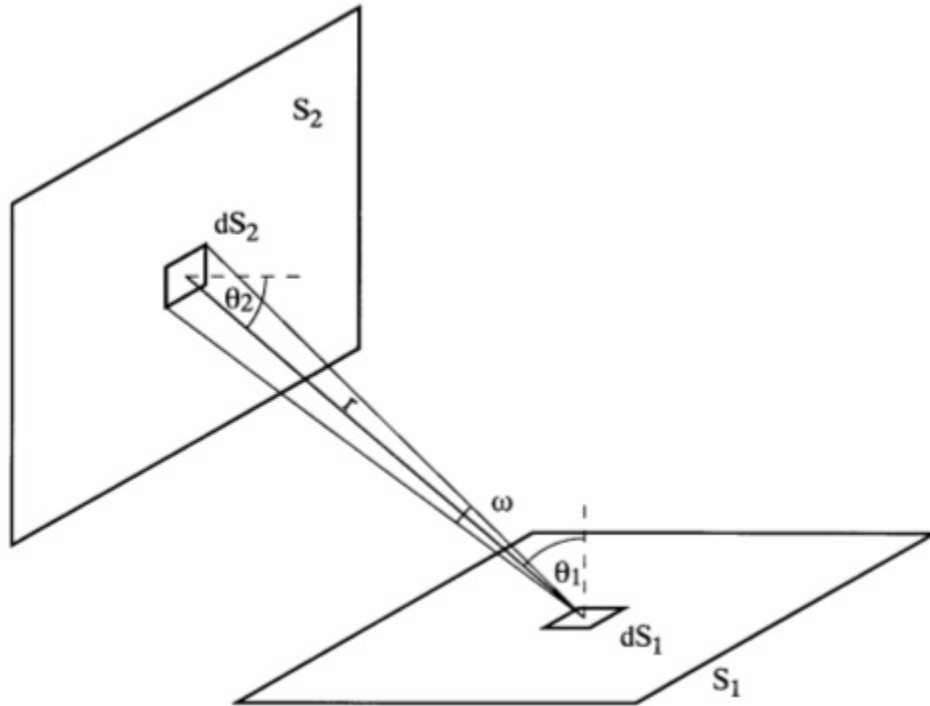


Figure 1.4 – Transfert d'énergie infrarouge entre deux surfaces. Source : [14]

Une notion importante dans la théorie du transfert d'énergie est celle de facteur

1.2. MODÈLE DE FORMATION DE L'IMAGE INFRAROUGE

de forme. Un facteur de forme exprime la proportion d'énergie quittant une surface S_1 et qui atteint une surface S_2 [5]. Un facteur de forme dont l'énergie va de S_1 vers S_2 sera noté $F_{S_1 \Rightarrow S_2}$. Une des propriétés du facteur de forme est la réciprocité. En effet, $F_{S_1 \Rightarrow S_2} = F_{S_2 \Rightarrow S_1}$. Considérons les surfaces dS_1 et dS_2 , des régions infiniment petites sur S_1 et S_2 respectivement. Le facteur de forme pour ces surfaces infiniment petites est donné par :

$$F_{dS_1 \Rightarrow dS_2} = \frac{\cos(\theta_1) \cos(\theta_2)}{r^2} dS_2. \quad (1.7)$$

Pour évaluer l'énergie quittant S_1 et atteignant S_2 , il faut intégrer par rapport à S_2 . Ainsi, l'équation devient :

$$F_{S_1 \Rightarrow S_2} = \int_{S_2} \frac{\cos(\theta_1) \cos(\theta_2)}{r^2} dS_2. \quad (1.8)$$

Sur la Figure 1.4, en partant du point central de la région dS_1 , la surface dS_2 sous-tend un angle solide $d\omega_2$. Par définition, un angle solide est la superficie d'une surface par rapport au carré du rayon. Ainsi, $d\omega_2$ est donné par :

$$d\omega_2 = \frac{dS_2 \cos(\theta_2)}{r^2} \quad (1.9)$$

En utilisant la loi de Stephan-Boltzmann (1.3), il est possible de calculer l'énergie émise par dS_1 et perçue par dS_2 . Toutefois, les surfaces S_1 et S_2 n'étant pas des corps noirs, il est nécessaire de prendre en compte l'émissivité ϵ des surfaces. Pour se faire, il suffit de multiplier (1.3) par l'émissivité. Ainsi, l'énergie perçue par dS_2 émise par dS_1 est donnée par :

$$dW_1 = \epsilon_1 \sigma T_1^4 \cos(\theta_1) dS_1 d\omega_2 \quad (1.10)$$

En remplaçant $d\omega_2$ dans l'équation, on obtient :

$$dW_1 = \frac{\epsilon_1 \sigma T_1^4}{r^2} \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) dS_1 dS_2 \quad (1.11)$$

On remarque que les équations précédentes permettent seulement de calculer l'énergie émise et captée par dS_1 et dS_2 respectivement. Or, dS_1 et dS_2 sont des surfaces infiniment petites. Afin d'obtenir l'énergie émise par la surface totale, soit

1.2. MODÈLE DE FORMATION DE L'IMAGE INFRAROUGE

S_1 , il est nécessaire d'intégrer (1.11) sur S_2 . On obtient :

$$W_1 = \epsilon_1 \sigma T_1^4 dS_1 \int_{S_2} \frac{\cos(\theta_1) \cos(\theta_2)}{r^2} dS_2 \quad (1.12)$$

Cette intégrale correspond exactement à l'équation d'un facteur de forme décrit précédemment. Il est donc possible de simplifier l'équation :

$$W_1 = \epsilon_1 \sigma T_1^4 dS_1 F_{S_2 \Rightarrow S_1} \quad (1.13)$$

En tenant pour acquis que les surfaces sont opaques et donc que leur émissivité est égale à leur absorptivité, alors l'énergie totale émise par S_1 et perçue par S_2 est donnée par :

$$W_{12} = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma T_1^4 \int_{S_1} F_{S_2 \Rightarrow S_1} dS_1 \quad (1.14)$$

Un procédé similaire peut être effectué pour calculer W_{21} , l'énergie totale émise par S_2 et perçue par S_1 .

En utilisant la propriété de réciprocité des facteurs de formes expliquée précédemment, il est facile d'obtenir, à partir de W_{12} et W_{21} , l'équation permettant le calcul de l'énergie totale échangée entre les deux surfaces :

$$W = \epsilon_1 \epsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \int_{S_1} F_{S_2 \Rightarrow S_1} dS_1 \quad (1.15)$$

Il est important de noter que l'intégrale sur la surface S_2 présente dans (1.12), peut être évaluée explicitement seulement pour des surfaces dont la géométrie est simple. Il serait difficile d'évaluer explicitement cette intégrale si la surface contenait, par exemple, des concavités. Dans un tel cas, il est nécessaire de prendre en considération les transferts d'énergie présents entre plusieurs points de la même surface. Des informations supplémentaires sur la manière d'évaluer le transfert d'énergie pour des surfaces complexes sont données dans [14]. Aussi, lors du transfert d'énergie d'un objet vers un autre objet, l'énergie doit traverser un certain milieu. La plupart du temps, ce milieu est l'atmosphère. Parfois, le rayonnement émis par un objet va se heurter aux molécules présentes dans l'atmosphère et sera réfléchi ou absorbé. Ces rayons n'atteindront donc jamais le second objet. Ainsi, la quantité d'énergie qui

1.3. LES APPLICATIONS DE L'INFRAROUGE

parviendra à atteindre l'objet en sera forcément atténuée. Les principales molécules présentes dans l'atmosphère et responsables de l'atténuation du rayonnement sont la vapeur d'eau et le CO_2 . La déviation des rayons dépend de la grosseur des particules ainsi que de la longueur d'onde des rayons. Plus la longueur d'onde est grande, plus la probabilité que le rayon atteigne l'objet est grande. Certaines longueurs d'onde sont efficacement bloquées par l'atmosphère. Ainsi, seules certaines gammes de longueurs d'onde parviennent à atteindre un autre objet. Les longueurs pour lesquelles l'atmosphère présente une transmissibilité élevée sont les longueurs d'onde allant de $3\ \mu\text{m}$ à $5\ \mu\text{m}$ et les longueurs d'onde allant de $8\ \mu\text{m}$ à $14\ \mu\text{m}$. Les capteurs infrarouges opèrent donc dans ces gammes de longueurs d'onde.

Un capteur infrarouge va transformer l'énergie captée en un signal électrique. Ce signal doit être proportionnel au flux rayonné par l'objet. Il sera utilisé pour créer l'image en niveaux de gris. Il peut aussi être utilisé pour obtenir la température d'un objet. Notons que pour l'obtention précise de la température, il est nécessaire que le capteur soit calibré avec une source infrarouge de référence, soit un objet se rapprochant du corps noir. Une analyse de la manière dont fonctionne un capteur infrarouge peut-être trouvée dans [27].

1.3 Les applications de l'infrarouge

Grâce à ses caractéristiques, l'utilisation de l'imagerie infrarouge peut être bénéfique à plusieurs domaines. Entre autres, son coût peu élevé permet un accès facile à cette technologie et sa non-invasivité [11] fait d'elle un outil tout désigné pour l'application sur l'être humain. Aussi, sa capacité à être utilisée à tout moment de la journée, et ce indépendamment des changements de luminosité la rend intéressante pour les applications de sécurité. La section qui suit décrit plusieurs travaux utilisant l'imagerie infrarouge dans divers domaines.

Tout d'abord, parvenir à détecter facilement les armes portées par une personne est un atout majeur pour assurer la sécurité dans les endroits publics comme les aéroports. L'imagerie infrarouge est une technologie permettant la détection d'objets au travers des vêtements [59, 6]. Il existe plusieurs technologies permettant également la détection d'armes comme les rayons X ou les détecteurs de métal. Par contre, les

1.3. LES APPLICATIONS DE L'INFRAROUGE

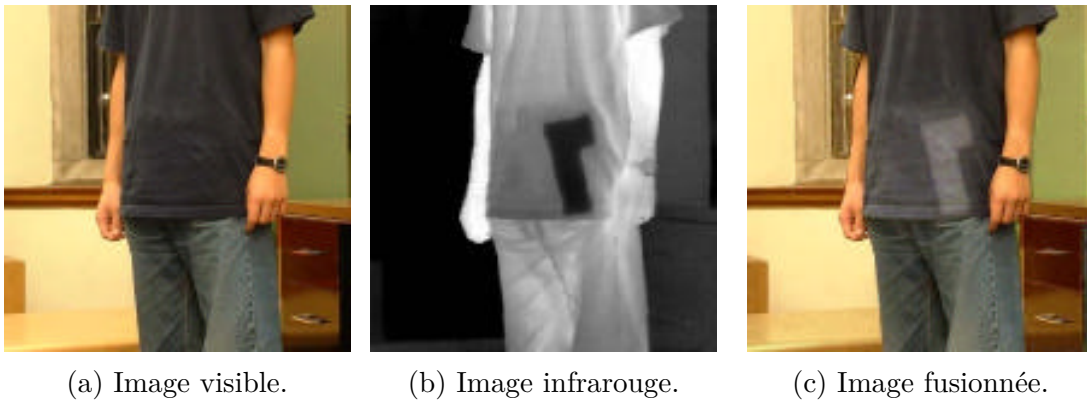


Figure 1.5 – Résultat d'une fusion. Source : [59].

détecteurs à rayons X puissants ne sont pas appropriés pour une utilisation sur un être humain en raison de leur invasivité et de leurs effets secondaires sur la santé [6]. Aussi, il existe des armes qui ne sont pas en métal. Pour de telles armes, les détecteurs de métal ne fonctionnent donc pas. Les capteurs infrarouges sont une bonne alternative puisque la température d'une arme est souvent différente de celle du corps humain. Elle est donc visible sur l'image infrarouge même si l'arme est dissimulée. Par contre, certaines informations ne sont pas présentes sur les images infrarouges. L'image visible, bien que ne permettant pas la détection d'armes dissimulées, apporte des informations supplémentaires, souvent nécessaires, lors de la détection d'arme. Par exemple, elle permet d'obtenir le visage des personnes. Afin de simplifier le travail de l'opérateur, il serait préférable d'utiliser une seule image contenant l'information importante des deux images sources. Dans ce cas particulier, les images sources sont une image infrarouge et une image visible. La combinaison de deux images en une image s'appelle la fusion d'images. Dans [59], les auteurs proposent une méthode de fusion entre l'image visible et l'image infrarouge permettant visualiser facilement les armes portées par une personne. Un exemple de résultat obtenu peut être vu sur la Figure 1.5.

Dans [6], une méthode permettant la détection automatique des armes dans une image infrarouge est proposée. Un survol des méthodes de détection d'armes actuelles utilisant des capteurs d'images passifs est fait dans [40]. Les capteurs étudiés sont les capteurs à ondes millimétriques passifs et les capteurs infrarouges.

1.3. LES APPLICATIONS DE L'INFRAROUGE

L'imagerie infrarouge, en plus de permettre la détection d'arme, pourrait également être utilisée pour détecter et prévenir certains problèmes de santé. Plusieurs travaux visent à confirmer l'utilité de l'imagerie infrarouge dans le domaine médical. Par exemple, dans [22], les auteurs s'intéressent à l'utilité de la thermographie infrarouge pour la détection et la prévention des blessures sportives.

L'imagerie infrarouge pourrait aussi être utilisée pour calculer l'excitation émotionnelle d'une personne tel qu'expliqué dans [41].

Pour les applications de surveillance, la détection automatique des piétons peut faciliter le travail de l'opérateur. En utilisant une caméra produisant des images à partir du spectre visible, il est difficile de détecter les piétons ou autres objets dans des conditions de faible luminosité. Ainsi, les endroits peu éclairés ou les zones d'ombres peuvent nuire au processus de détection. Les caméras infrarouges captent les radiations infrarouges émises par les objets et ne sont donc pas affectées par les variations dans l'intensité lumineuse. Il existe plusieurs travaux utilisant la technologie infrarouge pour la détection de piétons dont [61, 3, 62, 31, 13].

L'imagerie infrarouge a aussi son utilité dans le domaine du bâtiment. En effet, elle peut être utilisée pour détecter les endroits par lesquels un bâtiment perd de la chaleur comme dans [39]. Elle permet également la détection de moisissures dans les murs tel qu'expliqué dans [30, 36]. Dans [23], une méthode est proposée pour combiner automatiquement les images infrarouges des façades d'un bâtiment afin de les appliquer comme texture à un modèle 3D prédéfini représentant le bâtiment.

Dans [53], la thermographie infrarouge est utilisée pour prédire l'apparition de tremblement de terre plusieurs jours avant qu'ils ne surviennent. Elle est également utilisée pour le contrôle de la qualité de la nourriture tel qu'expliqué dans [17].

La thermographie infrarouge a été utilisée dans beaucoup d'autres applications. Par exemple, elle a été utilisée pour des enquêtes agricoles [43], pour l'analyse des explosions et du feu [50], pour la location de corps dans les bâtiments écroulés [57] et pour la détection des causes d'infertilité chez les hommes [16].

1.4. DÉTECTION DES CARACTÉRISTIQUES

1.4 Détection des caractéristiques

Dans cette section, nous présentons les bases des algorithmes de traitement d'images que nous avons utilisés dans notre projet. Dans la section 3.2, la différence de Gaussiennes a été utilisée comme algorithme de détection de contours afin de détecter les bordures des ségrégations thermiques longitudinales (STL). Les STL ainsi que les autres types de zones non conformes sont définies dans la section 2.1. L'algorithme de détection de coins de Harris a été utilisé dans la section 2.5.2 afin d'améliorer la détection de la zone de pavage. Dans cette même section et avec ce même objectif, la méthode HK2005 permettant d'estimer la courbure en un point d'une courbe a été utilisée. Finalement, la transformée de Hough est utilisée dans la section 2.6 pour la détection des STL. Cette section a pour but d'expliquer ces algorithmes.

1.4.1 Détection de contours

Sur une image, les contours sont représentés par des changements brusques dans la fonction de l'intensité [46]. Ces changements correspondent aux maxima positifs et aux minima négatifs de la dérivée de premier ordre et donc, aux zéros de la dérivée de second ordre. En 2D, la dérivée première correspond au gradient. Ce dernier est défini comme étant le vecteur $(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})^T$ avec $\frac{\partial}{\partial x}$, le gradient dans la direction des x et $\frac{\partial}{\partial y}$, le gradient dans la direction des y . Sa direction et son module sont donnés respectivement par :

$$\theta = \arctan\left(\frac{\partial}{\partial x} / \frac{\partial}{\partial y}\right) \quad \text{et} \quad |\vec{grad}| = \sqrt{\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y}\right)^2} \quad (1.16)$$

La direction du gradient en un point de contour est toujours perpendiculaire à celle du contour. Le gradient est donc utilisé dans plusieurs algorithmes de détection de contours [56]. Le Laplacien et la seconde dérivée dans la direction du gradient sont des opérateurs de second ordre utilisés pour détecter les contours [63]. Ceux-ci sont définis respectivement par :

1.4. DÉTECTION DES CARACTÉRISTIQUES

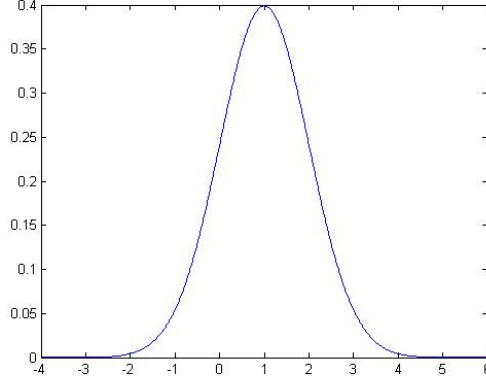


Figure 1.6 – Courbe gaussienne ayant une moyenne et un écart-type égal à 1.

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad \text{et} \quad \frac{\partial^2}{\partial \vec{n}^2} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} \cos^2(\theta) + \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} \sin(\theta) \cos(\theta) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \sin^2(\theta) \quad (1.17)$$

où \vec{n} est la direction du gradient. L'opérateur du Laplacien est linéaire et invariant à la rotation alors que la seconde dérivée dans la direction du gradient ne l'est pas [63]. Le lecteur intéressé trouvera la description des détecteurs de contours dans [63, 46, 37, 44, 45].

Dans la section 3.2, la différence de Gaussiennes est utilisée afin de détecter les contours. Tel que démontré dans [10], la différence de Gaussiennes est une approximation du Laplacien de Gaussiennes. Il s'agit donc d'un détecteur de second ordre. Le lissage d'une image par une Gaussienne permet de réduire le bruit. Par contre, il en résulte une image qui est plus floue. Ainsi, le lissage d'une image par une différence de Gaussiennes peut se résumer comme la différence entre une version floue d'une image et une version moins floue de cette même image. La différence de Gaussiennes peut donc être considérée comme un filtre passe-bande puisqu'elle laisse seulement passer une certaine plage de fréquences. La différence de Gaussiennes est donnée par :

$$f(x; \sigma_1, \sigma_2) = G(x; \sigma_1) - G(x; \sigma_2) \quad (1.18)$$

avec σ_1 l'écart-type de la première Gaussienne, σ_2 l'écart-type de la seconde Gaus-

1.4. DÉTECTION DES CARACTÉRISTIQUES

sienne et $\sigma_1 > \sigma_2$. En une dimension, l'équation d'une Gaussienne est donnée par :

$$G(x; \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1.19)$$

avec σ l'écart-type de la Gaussienne. Graphiquement, une Gaussienne a l'allure d'une cloche comme illustré sur la Figure 1.6. La modification de l'écart-type fait varier le rayon de la cloche ; plus il est grand, plus la cloche sera large.

En pratique, le lissage d'une image par une Gaussienne s'effectue par la convolution d'un masque gaussien avec l'image. Afin de réduire le crénelage, la dimension du masque doit être suffisamment grande pour comporter la majorité des pixels couverts par la Gaussienne. En utilisant un masque de dimension 4σ , 95.44 % de l'information contenue sous la courbe est considérée. Les coefficients du masque sont ensuite calculés en utilisant l'équation (1.19) puis sont normalisés. Pour détecter les contours, l'image est convoluée avec la différence des deux masques gaussiens. Ensuite, les passages par zéro sont localisés dans l'image résultante de la convolution.

1.4.2 Détecteur de coins

Dans cette section, deux méthodes de détection de coins seront expliquées. La première permet la détection de coins sur une image alors que la seconde détecte les coins sur une courbe.

Le gradient peut également être utilisé pour détecter les coins. Un coin correspond à l'intersection de deux contours. Il s'agit donc d'un point dont la valeur absolue de la dérivée par rapport à x et la valeur absolue de la dérivée par rapport à y sont élevés. Un des algorithmes de détection de coins est le détecteur de Harris [19]. Un coin au point (u, v) maximise la quantité suivante :

$$E(u, v) = \sum_{x,y} w(x, y) [I(x + u, y + v) - I(x, y)]^2 \quad (1.20)$$

où $w(x, y)$ est un masque gaussien ou une fonction porte centrée sur le pixel (x, y) . En effectuant le développement de Taylor de (1.20), l'équation suivante est obtenue :

1.4. DÉTECTION DES CARACTÉRISTIQUES

$$E(u, v) \approx \begin{bmatrix} u & v \end{bmatrix} M \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

où

$$M = \sum_{x,y} w(x, y) \begin{bmatrix} I_x I_x & I_x I_y \\ I_x I_y & I_y I_y \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Dans cette dernière équation, I_x et I_y sont les dérivées partielles d'ordre un de l'image en x et en y respectivement. À partir de la matrice M , une mesure de la courbure du coin est définie par :

$$R(x, y) = \det(M) - k * (\text{trace}(M))^2 \quad (1.23)$$

où k est une constante. Les pixels dont la mesure de courbure est supérieure à un seuil sont considérés comme étant des coins. Une explication complète de l'algorithme est donnée dans [19]. En appliquant le détecteur de Harris à l'image décrite dans la Figure 1.7a, les coins indiqués en vert sur la Figure 1.7b sont obtenus. Le détecteur de Harris est utilisé dans la section 2.5.2 du mémoire.

Parmi les autres méthodes de détections de coins, on retrouve, par exemple, le détecteur de Noble [47] qui améliore le détecteur de Harris en proposant une autre mesure de courbure ou le détecteur de Susan [52] dont la méthode repose sur un masque circulaire. Le lecteur intéressé trouvera dans [56, 35] une comparaison de plusieurs détecteurs de coins.

1.4. DÉTECTION DES CARACTÉRISTIQUES



(a) Image en niveaux de gris

(b) Coins, en vert, trouvés avec le détecteur de Harris

Figure 1.7 – Coins trouvés avec le détecteur de Harris

Un coin peut également être défini comme étant un point de courbure élevée sur une courbe [21]. Connaissant les pixels formant la courbe, il est possible de calculer la courbure en chaque point de cette dernière. Les explications de plusieurs méthodes permettant le calcul de la courbure sont données dans [7, 58, 21]. Dans la section 2.5.2, la méthode HL2005 (telle qu'elle est nommée dans [21]) est utilisée. Cette méthode est basée sur le cercle osculateur. Elle permet d'estimer la courbure du i^e point, p_i , de la courbe à l'aide du rayon du cercle osculateur passant par ce point. Le cercle osculateur est celui qui épouse le mieux la courbe au point p_i . Il est calculé en utilisant trois points : p_{i-k} , p_i et p_{i+k} avec k le pas d'échantillonnage de la courbe. Il est également possible d'utiliser un pas d'échantillonnage adaptatif permettant de tenir compte de l'allure de la courbe. Une méthode permettant le calcul d'un pas d'échantillonnage adaptatif est expliquée dans les chapitres 9 et 10 de [29]. Le cercle osculateur de centre O est celui obtenu en déplaçant p_{i-k} et p_{i+k} pour qu'ils soient infiniment proches de p_i (voir Figure 1.8). Il existe un unique cercle osculateur en chaque point de la courbe. C'est pourquoi il représente une bonne estimation de la courbure. L'algorithme HK2005 utilise la propriété géométrique stipulant que trois points non colinéaires définissent un cercle unique pour estimer le rayon du cercle osculateur. Ainsi, le centre estimé du cercle osculateur est donné par l'intersection des bissectrices formées par p_{i-k}, p_i et p_i, p_{i+k} . La courbure c au point p_i est l'inverse

1.4. DÉTECTION DES CARACTÉRISTIQUES

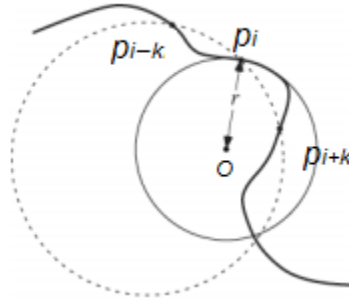


Figure 1.8 – Le cercle pointillé passant par p_{i-k} , p_i et p_{i+k} devient le cercle osculateur de centre O en rapprochant p_{i-k} et p_{i+k} de p_i . Source : [21]

du rayon r du cercle osculateur :

$$c = \frac{1}{r}$$

1.4.3 Transformée de Hough

Dans la section 2.6, la transformée de Hough est utilisée afin de détecter les droites dans une image binaire [1]. Pour l'expliquer, considérons l'équation suivante de la droite :

$$x \cos \theta + y \sin \theta + \rho = 0 \tag{1.24}$$

La représentation graphique de la droite est donnée dans la Figure 1.9. Une des idées de la transformée de Hough est de représenter la droite dans l'espace (ρ, θ) , appelé espace de Hough. À un point (x, y) de la droite correspond une sinusöide dans l'espace de Hough. Les sinusöides des points colinéaires se rencontrent en un point appelé point d'accumulation. La localisation d'une droite revient alors à former l'espace de Hough et à localiser les coordonnées du point d'accumulation. Dans [1], une explication complète ainsi qu'une évaluation de la transformée de Hough sont données. Sur la Figure 1.10b, l'espace de Hough associé à l'image binaire 1.10a est illustré. Les deux droites correspondant aux deux points d'accumulation dans l'espace de Hough où le plus grand nombre de sinusöides s'intersectent sont illustrées sur la Figure 1.10c.

1.4. DÉTECTION DES CARACTÉRISTIQUES

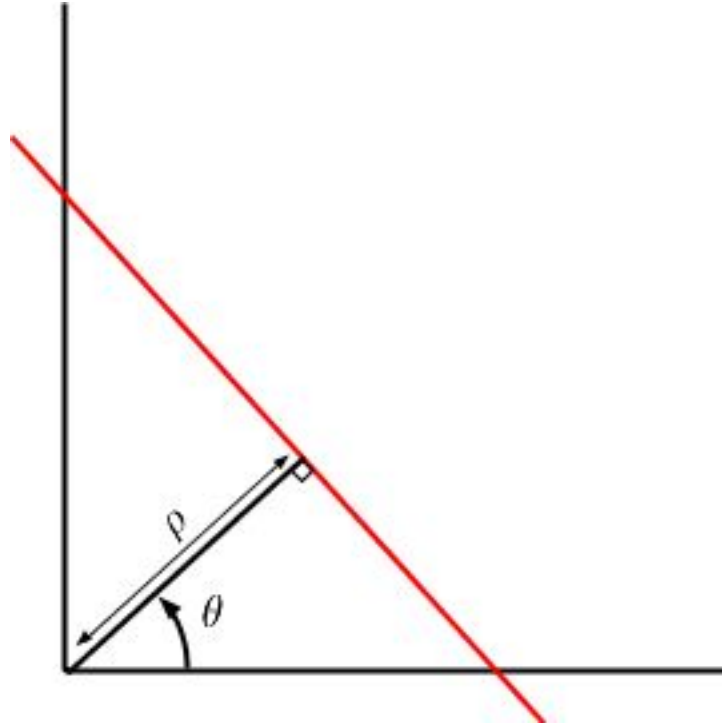


Figure 1.9 – Représentation des paramètres ρ et θ d'une droite

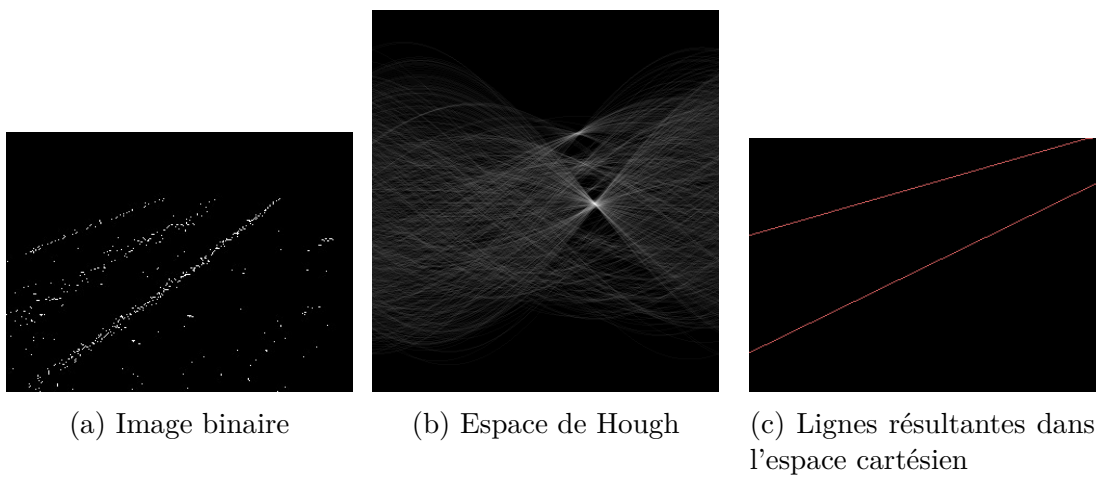


Figure 1.10 – Transformée de Hough

1.5. OBJECTIFS DU MÉMOIRE

Notons que la transformée de Hough peut être adaptée pour détecter d'autres formes géométriques, notamment des cercles et des ellipses [2]. Un des problèmes de la transformée de Hough est sa complexité algorithmique qui, pour une image de dimension $N \times N$, est $O(N^2 \times \theta_{max})$ où θ_{max} représente le nombre d'angles utilisé pour la discrétisation de l'espace θ . Il existe des variations à la transformée de Hough permettant de réduire la complexité algorithmique. Par exemple, dans [48], les auteurs proposent d'utiliser la direction du gradient afin d'estimer le paramètre θ . Ainsi, seule une petite portion des lignes passant par un point (x, y) a besoin d'être convertie en coordonnées polaires. Il en résulte une sinusoïde incomplète dans l'espace de Hough. Dans [18], plutôt que de considérer chaque pixel de l'image individuellement, des paires de pixels sont choisies aléatoirement. Seules les droites passant par les deux pixels d'une paire sont représentées dans l'espace de Hough.

1.5 Objectifs du mémoire

La thermographie infrarouge peut également être appliquée au contrôle de la qualité lors de la pose de l'enrobé bitumineux. En effet, grâce à cette technologie, il est possible de visualiser les zones d'hétérogénéité présentes sur l'enrobé bitumineux lors de son épandage. Une zone d'hétérogénéité est non souhaitée, car elle représente un défaut qui risque de se répercuter sous forme d'une fissure, d'un arrachement et éventuellement même, d'un nid-de-poule. La détection de ces zones lors de la pose de l'enrobé permet d'ajuster les équipements afin de les éliminer ou d'en diminuer la présence. Sur l'image infrarouge, les zones de faiblesse sont visibles en raison des variations de température présentes entre celles-ci et le reste de l'enrobé bitumineux. L'imagerie infrarouge est de plus en plus utilisée sur les chantiers pour faciliter et améliorer le contrôle de la qualité.

Toutefois, les zones de faiblesse doivent être détectées de manière manuelle en utilisant des outils d'analyse non parfaitement adaptés. Il n'existe, à notre connaissance, aucun système permettant la détection automatique de ces zones. Un tel système permettrait de faciliter le travail des opérateurs et diminuer les risques d'erreur lors de l'interprétation des images infrarouges. Deux systèmes ont donc été développés afin d'automatiser le processus d'analyse. Le premier exécute l'analyse automatique

1.5. OBJECTIFS DU MÉMOIRE

d'images infrarouges prises par une caméra thermique. Le second permet l'analyse en continu des données acquises par un scanner infrarouge. Ce mémoire a pour objectif de décrire ces deux systèmes. Toutefois, les zones de faiblesse doivent être détectées de manière manuelle en utilisant des outils d'analyse non parfaitement adaptés. Il n'existe, à notre connaissance, aucun système permettant la détection automatique de ces zones. Un tel système permettrait de faciliter le travail des opérateurs et diminuer les risques d'erreur lors de l'interprétation des images infrarouges. Deux systèmes ont donc été développés afin d'automatiser le processus d'analyse. Le premier exécute l'analyse automatique d'images infrarouges prises par une caméra thermique. Le second permet l'analyse en continu des données acquises par un scanner infrarouge. Ce mémoire a pour objectif de décrire ces deux systèmes.

Chapitre 2

Systeme d'anticipation des nids-de-poule et des fissures

Afin d'assurer un bon contrôle de la qualité, des images sont acquises à l'aide d'une caméra thermique. Le responsable de l'acquisition doit être positionné derrière le finisseur sur le côté de l'enrobé bitumineux. Il est nécessaire que l'enrobé étendu par le finisseur occupe la majeure partie de l'image. Ces images sont ensuite analysées directement sur le chantier afin de déterminer si l'enrobé comporte des zones plus faibles. Afin d'éviter la présence de ce type de zones et ainsi assurer une meilleure durabilité du revêtement bitumineux, il est nécessaire que celui-ci ait une densité homogène sur toute sa surface. Les zones non homogènes représentent un point faible sur la chaussée et risquent d'entraîner la dégradation prématurée de la chaussée. Il a été prouvé qu'une surface non homogène suggère la présence de défauts sur le tapis d'enrobé [32]. Ces défauts se traduisent par des nids-de-poule ou des fissures. Ils peuvent avoir plusieurs causes [12] dont les principales sont :

- la mauvaise opération du finisseur ;
- le déversement d'enrobé non-uniforme du camion au finisseur ;
- l'arrêt du finisseur.

En effet, lors de l'épandage de l'enrobé bitumineux, des morceaux d'enrobé plus grossiers peuvent être concentrés au centre du finisseur. Il en découle une variation dans la densité de l'enrobé. Ces variations de densité peuvent être réduites en ap-

2.1. LES ZONES NON CONFORMES

portant des ajustements au finisseur. Aussi, lors du transport de l'enrobé en camion, l'enrobé à la surface refroidit. Si l'enrobé est transféré directement dans le finisseur, alors l'enrobé ayant refroidi n'aura pas la même densité que l'enrobé encore chaud. Il est possible de corriger ce problème en utilisant un véhicule de transfert. Ce véhicule sert d'intermédiaire entre le finisseur et le camion contenant l'enrobé. Lorsque l'enrobé est transféré dans ce véhicule, il est mélangé. Ce mélange permet d'assurer une meilleure uniformité de la température pour l'ensemble de l'enrobé bitumineux. Enfin, il est possible que le finisseur doive arrêter lorsqu'il attend un camion par exemple. Lorsque cela survient, l'enrobé bitumineux refroidit. Ainsi, lorsque le finisseur se remet en mouvement, des zones froides apparaissent sur le tapis d'enrobé. La détection des défauts permet non seulement de connaître les emplacements où la chaussée risque de se dégrader prématurément, mais aussi de prendre des décisions en ce qui concerne le réglage des finisseurs, le transport de l'enrobé, le chargement des camions, le malaxage de l'enrobé, *etc.*, et de prendre des précautions supplémentaires afin d'améliorer l'uniformité de la pose. Ces zones sont difficiles à discerner par l'œil humain lorsque l'enrobé bitumineux est observé dans le domaine visible. Par contre, sur l'image infrarouge, une variation de température notable est visible entre les zones non conformes et le reste de l'enrobé. Il est donc beaucoup plus facile d'y détecter ces zones. Sur cette dernière, les variations dans l'homogénéité consistent en des variations dans la température. Les zones non homogènes qui préoccupent le MTQ sont les zones froides, les zones chaudes et les ségrégations thermiques longitudinales.

2.1 Les zones non conformes

Une zone froide est une zone dont la température est inférieure à un certain seuil. En dessous de ce seuil, la compacité n'est généralement pas conforme [34]. Avec le temps, les zones froides deviennent souvent des nids-de-poule. Comme expliqué précédemment, elles sont dues, entre autres, au refroidissement de l'enrobé lors du transport en camion et aux arrêts du finisseur. Un exemple de zone froide est visible sur la Figure 2.1. Sur cette figure, la zone froide est encadrée par le rectangle blanc. Les pixels froids apparaissent en noir sur l'image. Notons que les images infrarouges sont des images en niveau de gris. Une image en niveau de gris est une image donc chaque

2.1. LES ZONES NON CONFORMES

pixel est stocké dans un seul canal. Ainsi, seule l'information d'intensité est disponible pour un pixel. Toutefois, plusieurs images présentées dans ce mémoire ont été colorées en associant chaque température à une couleur. Ceci permet de mieux distinguer les températures froides des températures chaudes. Sur les images présentées, l'échelle de température va du bleu au rouge.

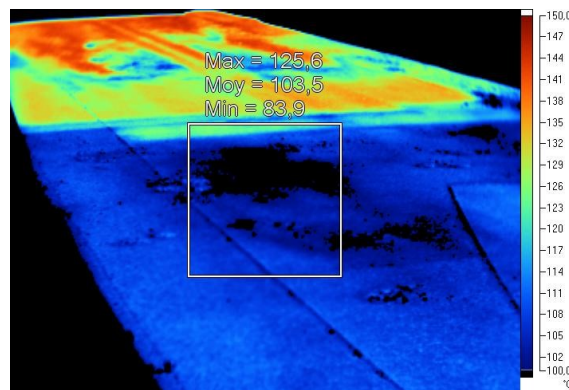


Figure 2.1 – Zone froide visible sur l'image infrarouge de l'enrobé bitumineux.

À l'inverse d'une zone froide, une zone est dite chaude si sa température est supérieure à un certain seuil. Ce seuil correspond à la température maximale de malaxage que recommande le fournisseur de bitume. La présence d'une telle zone peut témoigner d'une surchauffe de l'enrobé, ce qui constitue un risque que le bitume s'oxyde. Ainsi, une zone chaude apparaît lorsque l'enrobé est chauffé plus que nécessaire. Si un tel phénomène se produit, les propriétés du bitume seront modifiées et l'enrobé se fragilisera plus rapidement. Ces zones sont souvent visibles directement à l'arrière du finisseur. Un exemple d'une telle zone peut être vu sur la Figure 2.2. Sur cette image, les pixels chauds apparaissent en blanc.

Une ségrégation thermique longitudinale (STL) est une région rectiligne ayant, sur toute sa longueur, une température inférieure à la température de l'enrobé de chaque côté de celle-ci. Contrairement aux zones froides, les minima d'une STL ne doivent pas être inférieurs à un certain seuil. Les minima doivent suivre un axe rectiligne. Il est nécessaire qu'un écart de température suffisamment grand soit présent entre les minima et les maxima situés de part et d'autre de l'axe. Des répercussions réelles de ces traînées thermiques ont été constatées dans des cas dont l'écart de température était globalement supérieur à un certain seuil. Les STL se retrouvent

2.1. LES ZONES NON CONFORMES

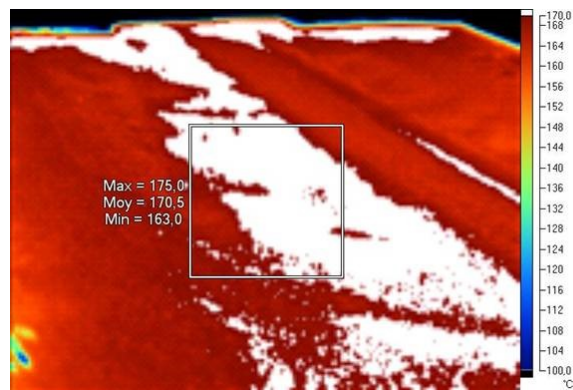


Figure 2.2 – Zone chaude présente à l’arrière du finisseur. La zone correspond à la partie blanche sur l’image.

généralement au centre du finisseur, mais elles peuvent apparaître selon d’autres axes. Ces dernières se traduisent souvent par des fissures longitudinales sur la chaussée. Elles sont généralement causées par une mauvaise opération du finisseur. Une STL est visible sur la Figure 2.3. Les profils blancs placés sur l’axe de la trainée et l’enrobé adjacent de part et d’autre.

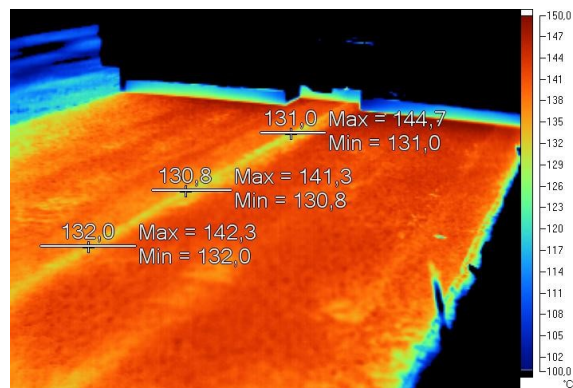


Figure 2.3 – STL visible sur l’image infrarouge.

2.2 Méthode d'analyse actuelle

Afin d'assurer un bon contrôle de la qualité, le MTQ analyse les images infrarouges directement sur le chantier en utilisant les logiciels fournis par les fabricants de caméras. Si des défauts sont détectés, alors des sommes monétaires peuvent être retenues par le MTQ pour chaque non-conformité. Toutefois, comme les caméras peuvent être utilisées dans une grande variété de domaines (bâtiments, sécurité, électrique, etc.), les logiciels inclus ne sont pas adaptés à la vérification de l'homogénéité de pose des enrobés. La personne responsable d'analyser l'image doit tracer un rectangle qui englobe une zone qui lui semble non conforme. En fonction des températures maximale et minimale, cette personne juge s'il s'agit d'une zone froide, chaude ou conforme. La détection d'une STL s'effectue à l'aide de profils transversaux. Le programme fourni avec la caméra permet d'obtenir les températures maximale et minimale présentes sous ceux-ci. Trois profils doivent être utilisés pour chaque STL visible. Un profil est centré sur chaque tiers de la possible STL. Une fois les profils tracés, l'utilisateur doit trouver manuellement la position du minimum indiqué par le profil. Si pour chacun des trois profils, le minimum est sur l'axe de la STL hypothétique et que la différence entre le maximum et le minimum est supérieure à un seuil défini par le MTQ, alors l'utilisateur confirme la présence d'une STL. La Figure 2.3 a été analysée en utilisant cette méthode. Les trois profils transversaux y sont visibles. On remarque aussi la croix, environ au centre de la STL, placée manuellement sur chaque profil qui représente la position du minimum.

La méthode actuelle permet la détection des non-conformités en regard de l'homogénéité de pose. Par contre, puisque chaque image doit être soigneusement analysée afin de comparer toutes les valeurs mesurées aux critères de températures, la méthode manuelle peut être longue. De plus, dans un faible pourcentage des cas, il arrive que des révisions d'analyses soient nécessaires principalement à cause de la perception ou de la présentation des résultats. En effet, les fausses couleurs utilisées pour représenter les températures peuvent faire en sorte que certaines zones ne soient pas traitées ou bien identifiées, car elles ne sont pas suffisamment discriminées par l'œil humain. De plus, l'opérateur de la caméra n'est soumis à aucun examen de la vue. Il est donc possible qu'il ait une mauvaise vision ou une anomalie de la vision comme

2.3. SYSTÈME DE DÉTECTION AUTOMATIQUE

le daltonisme. Si tel est le cas, il est probable qu'il interprète l'image différemment qu'un opérateur n'ayant aucun problème de vision. Enfin, les caméras utilisées par le MTQ sont effectives pour des températures pouvant aller jusqu'à 250 °C. Ainsi, elles permettent d'acquérir précisément la température de l'enrobé et ce, peu importe la température extérieure. En bref, des outils d'analyse plutôt limités et d'autres manipulations humaines sont utilisés pour identifier les non-conformités sur les images.

2.3 Système de détection automatique

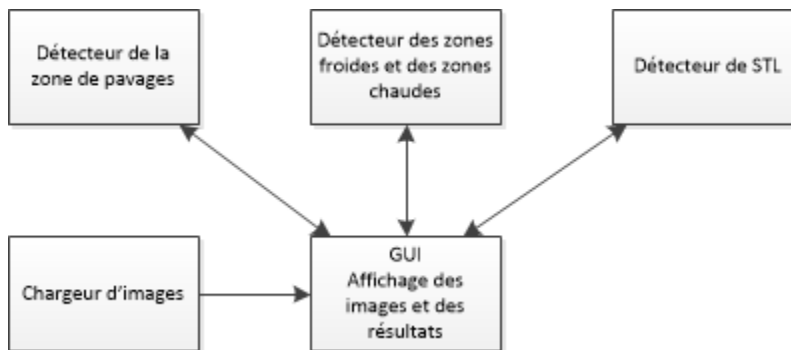


Figure 2.4 – Architecture du système d'anticipation automatique.

Afin de remédier aux principales faiblesses de la méthode manuelle, un système de détection automatique a été développé. Lors du développement du système, plusieurs contraintes ont été prises en compte :

- le système doit pouvoir analyser une image dans un temps raisonnable ;
- la répétabilité des résultats doit être assurée ;
- la justesse des résultats ;
- la facilité d'utilisation.

Une des problématiques de l'analyse manuelle est le temps qu'elle nécessite. Il est donc désirable que l'analyse automatique réduise considérablement le temps d'analyse requis par l'opérateur. Puisqu'une somme monétaire peut être retenue suite à la détection d'une non-conformité, il est nécessaire que le système puisse assurer la répétabilité des résultats. Ceci implique que, pour une même image, les zones non conformes détectées devraient toujours être les mêmes. Pour la même raison, les

2.3. SYSTÈME DE DÉTECTION AUTOMATIQUE

résultats trouvés doivent être similaires à ceux d'une analyse manuelle. Il est important que le système ne détecte pas une zone non conforme alors qu'elle devrait être conforme (faux positif). Enfin, en plus d'améliorer la précision de l'analyse, le système a pour but de simplifier le travail de l'opérateur. Ainsi, une interface graphique a été développée. Elle sert d'intermédiaire entre l'utilisateur et le logiciel d'analyse. Afin de simplifier l'utilisation, les manipulations requises sont minimales. L'utilisateur peut ouvrir une image et sauvegarder le résultat de l'analyse. Dès l'ouverture d'une image, l'analyse de celle-ci est aussitôt lancée. Dès qu'une étape d'analyse est terminée, les résultats sont transmis à l'interface graphique qui affiche les résultats à l'utilisateur. Le logiciel d'analyse est composé d'un ensemble de programmes d'analyse : les analyseurs. Le schéma d'architecture du système est représenté sur la Figure 2.4. Chaque analyseur est responsable de détecter un certain type de zone. La détection des zones de faiblesse est effectuée à partir des données de température obtenues par une caméra infrarouge. Chaque pixel de l'image étant considéré, l'analyse automatique est donc beaucoup plus précise que l'analyse manuelle. Comme l'objectif des analyseurs est la détection de zones, ils seront fréquemment appelés détecteurs. Le problème à résoudre par chaque détecteur peut être vu comme un problème de segmentation d'image. En effet, la segmentation d'image est une opération dont l'objectif est de regrouper entre eux les pixels répondant à certains critères. Elle peut être utilisée pour la détection de forêts sur des images aériennes [15], la détection de visages [25], la localisation des tumeurs [42], la soustraction de fond [49], *etc.* Pour le problème présent, des critères permettant la détection de chaque type de zone non conforme ont été définis. Ils sont utilisés par les analyseurs. Trois analyseurs ont été développés :

- le détecteur de zones froides et de zones chaudes ;
- le détecteur de la zone de pavage ;
- le détecteur de STL.

Dans le premier, les zones froides et les zones chaudes présentes sur la zone de pavage sont détectées par une opération de seuillage. Le détecteur de zone de pavage permet la détection de la zone d'intérêt sur l'image. Il s'agit de la zone dans laquelle la recherche de zones froides, zones chaudes et de STL doit être effectuée. Elle est définie à la section 2.5. Enfin, il y a le détecteur de STL qui recherche les STL dans la zone de pavage. Chaque détecteur procède en deux étapes : la recherche de

2.4. DÉTECTEUR DE ZONES FROIDES ET DE ZONES CHAUDES

zones, puis la validation des zones trouvées. Il peut s'agir de zones de faiblesse ou de la zone de pavage. Ces étapes s'effectuent selon les critères définis par le MTQ. Cependant, il aurait été possible de déterminer automatiquement ces critères à l'aide d'apprentissage numérique. Le logiciel d'analyse débute toujours par l'exécution du détecteur de la zone de pavage. En effet, la détection des zones froides, des zones chaudes et des STL nécessite de connaître la zone de pavage. Autrement, il serait possible de trouver des défauts sur des régions de l'image qui ne devrait pas être analysées. Une fois la zone de pavage détectée, les détections des zones non conformes peuvent être effectuées de manière parallèle.

Les prochaines sections visent à expliquer le fonctionnement de chacun des analyseurs.

2.4 Détecteur de zones froides et de zones chaudes

Comme décrit précédemment, une zone froide est une zone présente sur la zone de pavage et ayant une température inférieure à un certain seuil. De manière similaire, une zone chaude est une zone dont la température est supérieure à un certain seuil. Comme la seule différence entre une zone chaude et une zone froide est la comparaison à un seuil, une opération de seuillage peut être utilisée pour leur détection. Pour la détection de zones froides, la condition de seuillage est satisfaite si la température du pixel est inférieure à τ_1 . Pour les zones chaudes, elle est satisfaite si la température est supérieure à τ_2 . Ces seuils sont fixés par le MTQ. Cependant, il serait possible de les déterminer par apprentissage numérique. Pour se faire, les pixels des zones de pavage d'une collection d'images pourraient être groupés en trois classes en utilisant un algorithme de partitionnement des données tel que l'algorithme des K-Moyennes [26]. Les températures moyennes de la classe la plus froide et de la classe la plus chaude pourraient représenter les seuils chauds et froids. Notons qu'un nombre suffisamment élevé de zones froides et de zones chaudes doit être présent sur les images de la banque d'images. Autrement, les seuils trouvés ne seront pas représentatifs. L'opération de seuillage permet une détection efficace des zones chaudes et froides présentes sur l'enrobé bitumineux. Par contre, certaines zones détectées sont trop petites pour être considérées. Ainsi, les zones dont le nombre de pixels est inférieur à un seuil seront

2.4. DÉTECTEUR DE ZONES FROIDES ET DE ZONES CHAUDES

éliminées.

L'opération de seuillage permet de regrouper entre eux les pixels dont la température est supérieure ou inférieure à un seuil τ . Cette comparaison sera appelée condition de seuillage dans le reste du texte. L'opération de seuillage peut être appliquée sur une image entière ou seulement sur les pixels compris dans une zone. Sur l'image, une zone est un ensemble de pixels connexes. Pour effectuer la détection, les pixels sont répartis en deux classes : *accepté* ou *rejeté*. Les pixels sont attribuées aux classes de la manière suivante :

$$C = \begin{cases} \textit{accepté} & \text{si Condition}(\tau) \\ \textit{rejeté} & \text{autrement} \end{cases}$$

dans laquelle C est la classe associée au pixel et $\text{Condition}(\tau)$ est une fonction appliquant la condition de seuillage τ .

La décision étant prise pour chaque pixel, le seuillage est sensible au bruit. Par contre, les tests effectués ont permis de valider que les zones détectées sont suffisamment précises sans effectuer préalablement un lissage de l'image. Aussi, les zones recherchées devant contenir un nombre minimal de pixels, les zones isolées causées par le bruit seront éliminées. À l'aide de ces données de classification, une ou plusieurs zones sont créées en utilisant un algorithme de remplissage. Il s'agit d'un algorithme itératif parcourant un ensemble de pixels connexes. Les pixels sont conservés s'ils appartiennent à la même classe que le pixel courant.

Ainsi, des zones sont créées en groupant ensemble les pixels dont la classe est *accepté*. Finalement, le contour de chaque zone est détecté. Le contour est utilisé, entre autres, par l'algorithme de division de la zone de pavage expliqué plus loin. Le contour d'une zone est trouvé en suivant la bordure de celle-ci. Il est nécessaire d'utiliser comme point de départ un point qui est à l'extérieur de la zone. Par exemple, il est possible d'utiliser le pixel de la zone ayant les plus petites coordonnées en x et en y . Ceci assure que le contour trouvé ne sera pas celui d'un trou dans la zone. Pour trouver le contour, il s'agit de suivre la bordure de la zone en tournant à droite dès que cela est possible. S'il est impossible de tourner à droite, la même direction est conservée. S'il est impossible d'avancer dans cette direction, il faut alors tourner à gauche. La détection se termine lorsqu'on retombe sur le pixel de départ. Notons

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

que cet algorithme permet seulement la détection du contour extérieur. Par exemple, si une zone contient un trou, le contour du trou ne sera pas trouvé. Toutefois, on suppose que les zones trouvées ne contiennent aucun trou.

2.5 Détecteur de la zone de pavage

La zone de pavage est définie comme étant l'enrobé bitumineux étendu par un finisseur et occupant la majeure partie de l'image. Dans le présent document, le terme R-voie sera utilisé pour définir la portion d'enrobé bitumineux étendu par un finisseur. Il est possible que plusieurs R-voies soient visibles sur une image. Puisque l'image est centrée sur la R-voie du finisseur d'intérêt, les R-voies occupant un espace moindre sur l'image doivent donc être éliminées.

Les prochaines sections détailleront les algorithmes testés pour détecter la zone de pavage. Trois critères ont été utilisés pour guider la conception des algorithmes :

1. la zone est constituée seulement des parties de l'image correspondant à l'enrobé bitumineux ;
2. la zone contient tous les défauts contenus dans l'enrobé étendu par le finisseur ;
3. la zone contient une seule R-voie.

Pour chacun des algorithmes présentés, ces trois critères seront évalués.

2.5.1 Identification de la région de pavage

L'enrobé bitumineux a une température élevée lorsqu'il est étendu. Il en résulte une grande différence de températures entre ce dernier et le fond. Ici, le terme fond sera utilisé pour représenter tout élément de l'image dont la différence de température avec l'enrobé bitumineux est élevée. Il peut s'agir, par exemple, de la terre environnante ou d'un être humain. Étant donné cette différence, il est facile d'éliminer la majorité des pixels ne faisant pas partie de l'enrobé bitumineux. Un seuil permettant de séparer les pixels appartenant au fond de ceux faisant partie de l'enrobé bitumineux doit être déterminé. Ensuite, une opération de seuillage comme celle décrite précédemment peut être utilisée pour trouver toutes les zones dont la température est supérieure au seuil.

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

Puisque l'enrobé bitumineux devrait occuper la majeure partie de l'image, seule la plus grande zone trouvée est conservée. Par contre, il est possible que cette zone contienne des trous, c'est-à-dire que la température de certains pixels à l'intérieur de la zone est en dessous du seuil. L'algorithme de remplissage décrit dans la section précédente les a donc ignorés. Ces trous n'étant pas désirables, il est nécessaire de les éliminer. Une partie de ces trous peuvent correspondre à des zones froides. Une zone froide pouvant occuper une grande partie de la zone de pavage, un lissage préalable de l'image ne serait pas suffisant pour éliminer les trous. Ainsi, pour boucher les trous dans la zone, l'algorithme de remplissage décrit plus haut est relancé. Par contre, plutôt que d'effectuer le remplissage en se basant sur la classe d'un pixel, le contour de la zone sera utilisé. Ainsi, un point sera traité seulement s'il ne fait pas partie du contour.

La méthode par seuillage fonctionne parfaitement pour une image contenant une seule R-voie. Par contre, si l'image contient plusieurs R-voies, celles-ci seront toutes incluses dans la zone de pavage résultante. Ceci implique que des défauts pourront être détectés sur des parties non pertinentes de l'image. L'utilisation de cette méthode seule n'est donc pas adéquate pour la détection de la zone de pavage.

2.5.2 Détection de coins

Tel qu'expliqué dans la section 2.5.1, le seuillage permet une bonne délimitation de la zone contenant l'enrobé bitumineux, mais ne parvient pas à faire la distinction entre les R-voies. Les prochains algorithmes qui seront proposés utilisent la zone trouvée par seuillage comme point de départ. Connaissant cette zone, le problème devient l'identification de la sous-zone représentant la zone de pavage. Ce problème peut être divisé en plusieurs sous-problèmes :

1. détection des points de coupure possibles ;
2. sélection des meilleurs points de coupure ;
3. coupure de la zone.

Les deux prochaines sections sont consacrées à deux méthodes de détection de points où une coupure serait possible. La première se base sur la géométrie du contour

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

externe de la zone. La seconde utilise les variations de température à l'intérieur de la zone pour déterminer les points. La dernière section explique l'algorithme utilisé pour effectuer la séparation.

Détection de coins par la courbure

La première méthode testée pour déterminer les points de coupure se base sur le contour géométrique de la zone. Habituellement, le finisseur est visible dans le haut de l'image. Ce dernier étant beaucoup plus froid que l'enrobé bitumineux, il n'est pas inclus dans la zone. Par contre, le contour de la zone longe le finisseur et forme donc au moins un coin aux extrémités du finisseur. Ce phénomène peut être constaté sur la Figure 2.5. Sur cette figure, deux R-voies sont visibles. Celle qui doit être détectée est celle de gauche (en rouge), soit la plus grande des deux. Le finisseur est visible en bleu pâle dans le haut de l'image. Dans cette figure, il y a des coins de part et d'autre du finisseur. Cependant, seul le coin formé à l'endroit où se rencontrent les deux R-voies est intéressant. Sur l'image, il est indiqué par une flèche. Il représente l'endroit où la coupure devrait être effectuée.

Si un coin est considéré comme étant un point sur un arc ou une courbe et ayant une courbure élevée, alors les coins présents sur le contour peuvent être déterminés. Pour ce faire, il est nécessaire de calculer la courbure du contour. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser la méthode HL2005. Des détails sur cette méthode sont disponibles dans la section 1.4. Sur la Figure 2.6, la courbure obtenue peut être visualisée. L'image est affichée en niveaux de gris afin que les couleurs du contour soient facilement visibles. Lorsque le contour est rectiligne, sa couleur tend vers le bleu pâle. Cette couleur indique une faible courbure. Plus sa courbure sera élevée, plus la couleur tendra vers le rouge. Une courbure élevée peut être constatée près de la jonction des deux R-voies, soit à l'endroit où il est nécessaire de couper la zone.

Un point est considéré comme un coin si sa courbure est supérieure à un seuil α . En utilisant cette méthode, il est possible que plusieurs coins soient détectés très près l'un de l'autre dans une région de la courbe où la courbure est élevée alors qu'un seul coin devrait être présent. Ce problème peut être évité en définissant une distance minimale entre chaque coin. Ainsi, si un coin est trop près d'un coin déjà existant, alors il sera éliminé. Pour chaque coin trouvé, une tentative de séparation

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

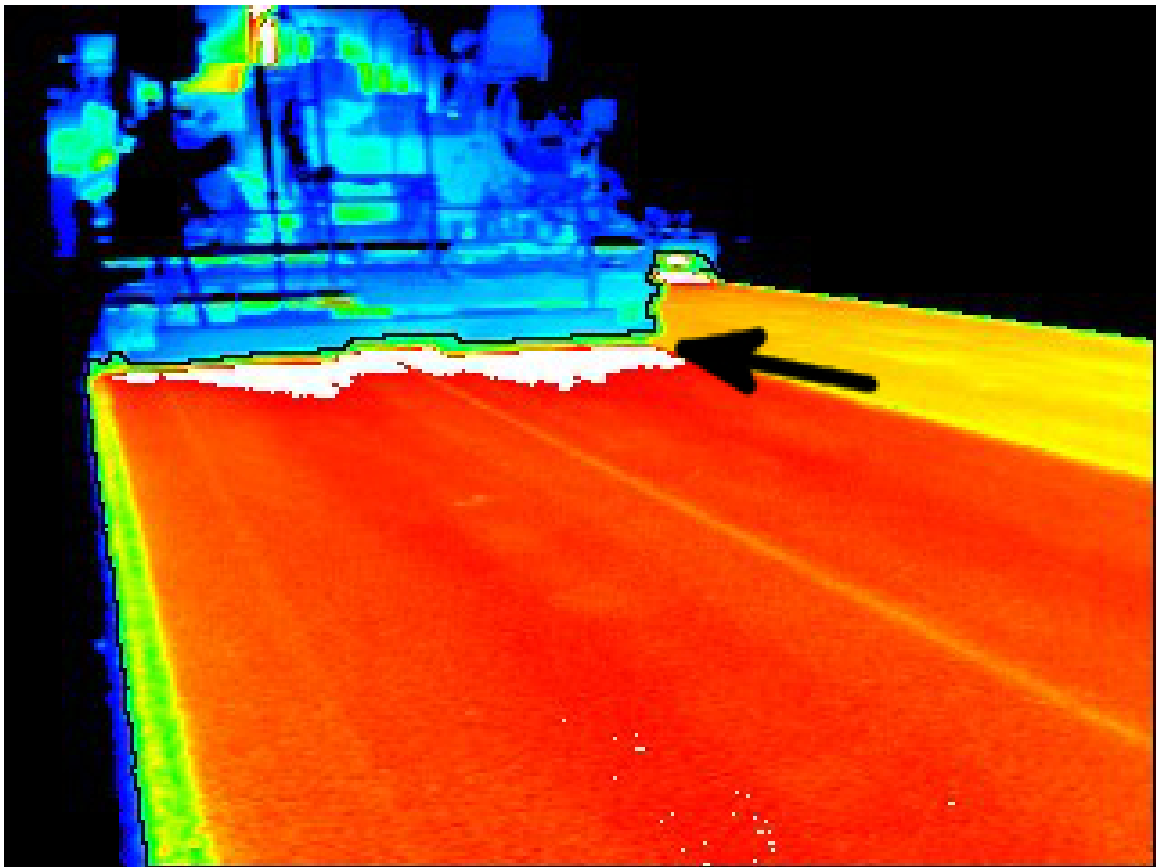


Figure 2.5 – Image contenant deux R-voies. Le finisseur est visible en bleu dans le haut de l'image. Le contour en noir forme un angle proche de 90 degrés à l'endroit indiquer par une flèche. Il s'agit de l'endroit où la zone devrait être séparée.

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

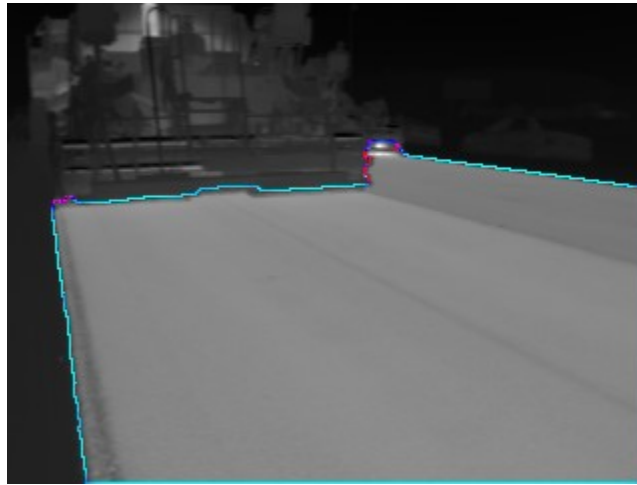


Figure 2.6 – Contour coloré en fonction de la courbure. Plus la couleur tend vers le rouge, plus la courbure est élevée.

sera effectuée. On considère que toutes les séparations possibles sont valides. Comme il est possible de le constater sur la Figure 2.7, la plupart des coins trouvés sont près de l'intersection des deux R-voies. L'utilisation d'un de ces points comme point de départ pour la séparation devrait permettre de trouver la zone de pavage voulue. Seule la séparation résultant en la plus grande zone de pavage sera conservée. Notons que les autres coins trouvés correspondent aux extrémités supérieures gauche et droite du contour. Il devrait être impossible d'effectuer une séparation à partir de ces coins. L'algorithme de séparation est expliqué en détail dans la section 2.5.3.

L'utilisation de cette méthode permet de détecter efficacement les coins du finisseur. Notons que le coin du finisseur est parfois à l'extérieur de l'image. Lorsque cette situation se présente, le coin de séparation voulu se trouvera sur la bordure gauche ou droite de l'image. Comme ces coins ne seront pas visibles sur le contour, il est impossible de les détecter en utilisant l'algorithme de détection de coins par la courbure. Il est possible de remédier à ce problème en ajoutant manuellement des coins sur les bordures de l'image. Sur la Figure 2.8 on peut voir le contour résultant obtenu en utilisant la méthode de la courbure.

Le MTQ demande à ce que la base du finisseur soit toujours visible sur image infrarouge de l'enrobé bitumineux. Par contre, il peut arriver que la portion visible

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

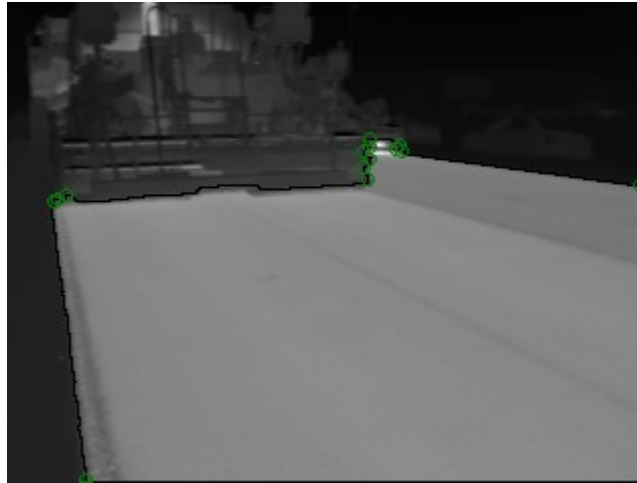


Figure 2.7 – Coins obtenus (en vert) en utilisant la méthode HK2005 pour détecter les coins.

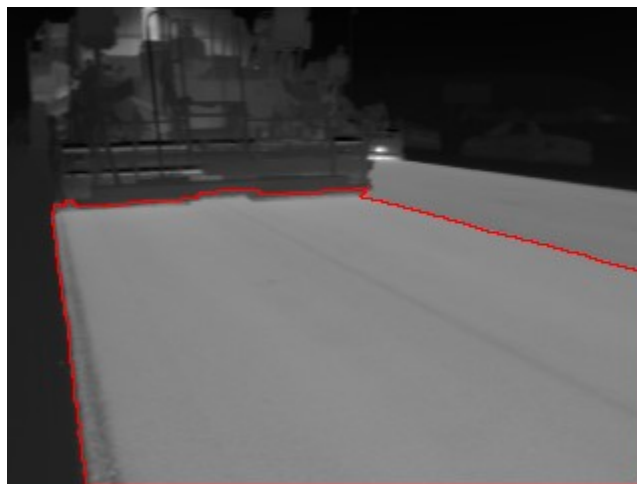


Figure 2.8 – Contour final obtenu (en rouge) en utilisant la méthode de courbure.

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

du finisseur soit assez minime et que le coin ne soit pas visible sur le contour. Dans un tel cas, il est impossible de détecter le coin de séparation en utilisant la courbure. Afin de remédier à ce problème, il est nécessaire d'utiliser une technique de détection de coins ne reposant pas sur la courbure du contour.

Détection de coins avec Harris

Plutôt que d'utiliser le contour de la zone pour trouver le point de séparation, il est possible d'utiliser les caractéristiques contenues dans la zone. Un contour dans une image peut être défini par une variation brusque des valeurs des pixels [46]. Mathématiquement, la variation entre les pixels est donnée par la dérivée de premier ordre. Les points de contour sont associés aux extremums de cette dérivée. Notons que ces extremums correspondent aux zéros de la dérivée de second ordre. Sur les images infrarouges de l'enrobé bitumineux, de telles variations sont présentes entre l'enrobé et le fond. On constate également une grande variation entre chaque R-voie présente. La détection de coins sur ces contours devrait donc permettre de détecter le coin de séparation, et ce même si le finisseur n'est pas visible. Le détecteur de Harris a été utilisé afin de détecter les coins. Ce dernier est expliqué dans la section 1.4. Les coins trouvés avec Harris sont visibles sur la Figure 2.9a. Plus la quantité de coins trouvés est élevée, plus le risque d'utiliser un coin erroné pour faire la séparation est grand. Il est donc nécessaire de réduire le nombre de coins trouvés. Comme l'objectif est de diviser la zone trouvée par seuillage, il est logique de conserver seulement les coins étant à proximité du contour externe de la zone. Ainsi, un coin est conservé si et seulement si la distance entre ce coin et le point de contour le plus près est inférieur à un seuil. Les coins restants peuvent être visionnés sur la Figure 2.9b. Tel que pour la méthode de détection de coins par la courbure, il est possible qu'un des coins du finisseur se trouve à l'extérieur de l'image. Comme le détecteur de Harris ne parviendra pas à trouver ce coin, des coins sont ajoutés manuellement sur les bordures verticales de l'image.

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

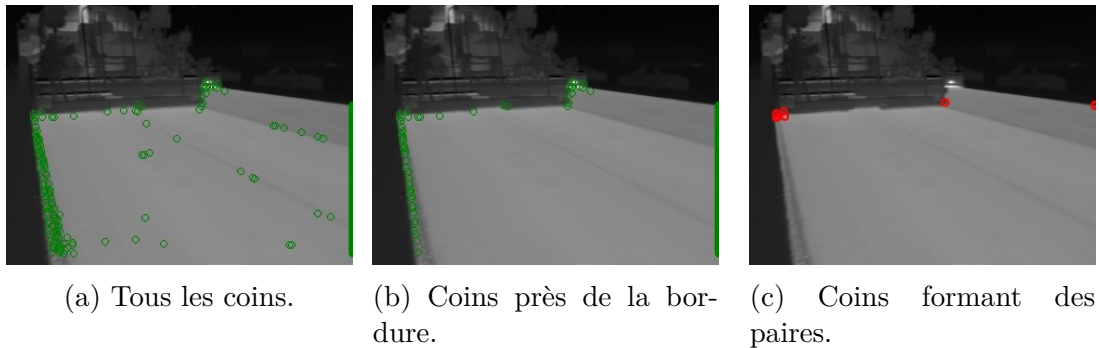


Figure 2.9 – Coins trouvés en utilisant Harris.

Sélection des coins d'intérêts

Il est facile de constater qu'un coin est présent à l'endroit où la coupure doit être effectuée. On constate également que d'autres coins ont été détectés le long de la bordure. Pour diviser la zone, il est possible d'utiliser une méthode semblable à celle proposée dans la section 2.5.2, c'est-à-dire effectuer toutes les coupures possibles et conserver seulement la zone avec l'aire maximale. Cette méthode permet d'arriver à de bons résultats puisqu'il est, la plupart de temps, impossible d'effectuer une coupure sur les coins non désirables et donc, ils n'influencent pas le résultat final. Par contre, il arrive qu'une coupure soit possible sur un de ces coins. Si ceci survient, il y a de fortes chances que la zone de pavage résultante soit erronée. Par exemple, sur la Figure 2.10, la zone de pavage est coupée en son centre. Ce phénomène s'explique par la présence d'une STL au centre de la chaussée. Les STL et la frontière entre deux R-voies ont plusieurs caractéristiques communes. Le lecteur peut se référer à la section 2.6 pour les caractéristiques de la STL. Ces caractéristiques sont celles qui sont utilisées pour effectuer la division. C'est pourquoi il arrive qu'une division survienne à un emplacement indésirable. L'algorithme détaillé pour la division de la zone est donné dans la section 2.5.3. Lorsqu'une telle division survient, la détection des défauts sur l'enrobé bitumineux en sera affectée. Par exemple, il sera impossible de détecter une STL puisque la division a été effectuée sur celle-ci. De la même manière, il est possible que des zones froides, par exemple, ne soient pas détectées puisqu'elles ne sont plus dans la zone de pavage finale. Il est donc important qu'une telle division ne survienne pas. Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir une méthode permettant la

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

sélection des coins de divisions appropriés. Plusieurs caractéristiques représentant une zone de pavage peuvent être utilisées pour effectuer cette sélection :



Figure 2.10 – Zone de pavage coupée sur une STL.

- l’aire de la zone de pavage ;
- le périmètre de la zone de pavage ;
- la largeur moyenne de la zone de pavage ;
- la valeur du module du gradient près des coins ;
- la possibilité d’effectuer la division en un coin ;
- *etc.*

Normalement, la zone de pavage peut être délimitée par deux coins, soit le coin supérieur gauche et le coin supérieur droit. Trouver ces deux coins permet d’effectuer une division de la zone valide. Ainsi, plutôt que de tester chaque coin individuellement, les coins sont analysés en paires. Les paires possibles sont déterminées selon trois règles :

1. seuls les coins situés dans la partie supérieure de la zone peuvent faire partie d’une paire ;
2. $dist(C_1, C_2) > seuil_1$;
3. $Abs(y_2 - y_1) > seuil_2$;

avec C_1 et C_2 , deux coins de coordonnées (x_1, y_1) et (x_2, y_2) respectivement et $seuil_1$ et $seuil_2$, deux seuils déterminés par le MTQ.

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

Comme on suppose le finisseur dans le haut de l'image, la règle 1 vise à former des paires à partir des coins situés en bordure du finisseur. Ensuite, l'utilisation de la règle 2 permet d'éviter la détection d'une zone de pavage de grandeur irréaliste. En effet, la zone de pavage devant occuper une grande partie de l'image, la distance entre les coins de la paire la définissant doit être suffisamment grande. Finalement, la règle 3 permet de considérer la distance verticale. Il est possible d'émettre cette condition en supposant que la base du finisseur devrait être horizontale. En effet, lorsque la photo est prise, il est normal que le finisseur ne soit pas complètement horizontal, mais l'angle qu'il commet avec l'axe horizontal devrait être suffisamment petit pour qu'on puisse affirmer que la variation verticale soit petite. La zone de pavage ne pouvant être représentée que par une paire de coins, il est nécessaire de l'identifier parmi les paires possibles. Pour ce faire, des paires de coins sont éliminées en deux phases. Dans la première, une paire de coins est éliminée si elle répond aux deux règles suivantes :

1. pour chaque coin de la paire, aucun chemin de division n'est trouvé ;
2. si un seul chemin est trouvé, alors le coin pour lequel aucun chemin n'a été trouvé doit correspondre à un coin supérieur gauche ou à un coin supérieur droit de la zone.

L'objectif étant de diviser la zone, les paires dont aucun des deux coins ne peut diviser la zone peuvent être éliminées. La règle 1 permet cette élimination. Aussi, si un seul des deux coins de la paire peut effectuer une division, le second coin devrait marquer un des coins supérieurs gauche ou droit de la R-voie. On dira qu'un coin est un coin supérieur gauche ou un coin supérieur droit si :

- le coin est sur la bordure de l'image ;
- les pixels voisins font partie du fond dans deux directions (haut, bas, gauche ou droit) et correspondent à l'enrobé bitumineux dans les deux autres directions.

Par exemple, supposons un coin qui est le coin supérieur gauche de la zone. Les pixels à gauche et en haut de ce coin devraient faire partie du fond. À l'opposé, les pixels à droite de ce point devraient représenter l'enrobé. En résumé, les paires conservées peuvent être composées soit de deux coins à partir desquelles une division peut être effectuée, soit d'un coin où une division est possible et d'un coin supérieur gauche ou droit de la zone. Après la première phase d'élimination des paires, les coins restants peuvent être visualisés sur la Figure [2.9c](#).

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

La deuxième phase d'élimination permet d'obtenir la zone de pavage finale. Pour ce faire, la zone résultante de chaque paire de coins restante est générée. Soit Z , l'ensemble des zones générées. Chaque zone dans Z est validée selon trois règles :

- l'aire de la zone est suffisamment grande ;
- il s'agit de la plus grande zone dans Z ;
- la zone n'a pas été générée en coupant sur une STL.

L'aire minimale permet de s'assurer que la zone de pavage résultante n'est pas trop petite. Ensuite, seule la plus grande est conservée, car cela minimise le risque que la zone retenue soit divisée sur l'axe d'une STL plutôt que sur la jonction de deux R-voies. Advenant le cas où toutes les paires sont éliminées, alors la zone de pavage initiale est conservée comme étant la zone de pavage finale. Cela signifie qu'une seule R-voie était présente sur l'image et donc que la zone obtenue par seuillage représentait déjà la zone de pavage voulue. On constate que l'algorithme proposé favorise la division, c'est-à-dire qu'une division sera forcément exécutée si elle est possible. Ce comportement est souhaitable lorsque les images comportent plusieurs R-voies. Par contre, si l'image comporte une seule R-voie, une division non désirable de la zone peut survenir. Prenons, par exemple, une image ayant une seule R-voie sur laquelle une STL est bien définie en son centre. Sur cette image, l'algorithme va trouver une possibilité de division sur la STL. Comme les divisions sont favorisées, alors la zone résultante sera divisée sur la STL. La troisième règle a pour but d'éviter ce type de division.

Pour ce faire, il faut déterminer s'il est préférable de conserver la zone résultante après la division ou la zone initiale. Afin d'effectuer la discrimination entre la zone initiale et la zone divisée, il est nécessaire d'émettre plusieurs hypothèses. Tout d'abord, le module du gradient dans la région définie par le finisseur est supérieur à un seuil ϵ . Le module du gradient de la majorité des pixels à l'intérieur d'une R-voie est inférieur à ce seuil. Aussi, tous les coins présents sur cette bordure supérieure doivent être sur un même axe.

Soit C_1 et C_2 , les deux coins utilisés pour diviser la route. Soit A , une droite passant par C_1 et C_2 . S'il existe, sur A , un autre coin C_3 tel que

$$\text{dist}(C_1, C_3) \vee \text{dist}(C_2, C_3) > \text{dist}(C_1, C_2)$$

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

où $dist$ est une fonction de distance entre deux points, alors ce coin représente potentiellement un meilleur coin de la zone de pavage.

Soit

$$C = \begin{cases} C_1 & \text{si } dist(C_1, C_3) < dist(C_2, C_3), \\ C_2 & \text{autrement,} \end{cases}$$

le coin, C_1 ou C_2 , le plus près de C_3 . C_3 est alors un meilleur candidat que C si et seulement si une division est possible à C et que le module du gradient moyen entre C et C_3 est supérieur à ϵ .

Si un tel cas se produit, alors la zone divisée est rejetée et la zone d'origine est utilisée comme zone de pavage. Le principe derrière cette méthode est simple. Si le module du gradient reste supérieur à ϵ pour la majorité des points entre C et C_3 , alors le point C_3 devrait se situer sur le finisseur. Comme on pose l'hypothèse que C_1 et C_2 sont sur le finisseur, l'existence du point C_3 également sur le finisseur implique qu'un des deux coins sélectionnés effectue une division au centre de la route. En effet, une division ne devrait jamais être effectuée sur un coin se trouvant sur le finisseur. Autrement, si le module du gradient entre C et C_3 est en moyenne inférieur à ϵ , alors le point C_3 est probablement situé sur le contour de l'autre R-voie. En effet, un module du gradient peu élevé signifie que les points se trouvent soit dans le fond, soit dans une R-voie. Or, ceci implique qu'il faut quitter la zone délimitée par la base du finisseur et donc que C_3 ne délimite pas la zone de pavage voulue.

Comme décrit précédemment, des coins sont manuellement ajoutés en bordure. Ces coins permettent d'effectuer la division lorsqu'un des coins supérieurs de la zone de pavage n'est pas visible sur l'image. Les étapes précédentes permettent la détection de la zone de pavage en se basant sur les coins présents sur le contour supérieur. Ces coins n'y sont donc pas considérés. Une fois la zone de pavage obtenue avec les étapes décrites précédemment, les divisions possibles à ces coins artificiels sont effectuées. Ici, l'hypothèse que toutes les divisions sont valides est émise. La zone résultante est la zone de pavage qui est utilisée pour détecter les zones froides, les zones chaudes et les STL.

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

2.5.3 Séparation de la zone de pavage

Une fois qu'un coin possible pour la division de la zone de pavage est trouvé, une tentative de division est effectuée. Il est important que le chemin effectué par cette division suive l'intersection entre deux R-voies. Deux caractéristiques sont observables sur les images comportant plusieurs R-voies. La première est que l'ensemble des points sur l'intersection des deux R-voies soit disposé de manière linéaire. La deuxième est que le module du gradient soit toujours élevé aux points d'intersection des deux R-voies. Sur la Figure 2.11, le module du gradient d'une image infrarouge de l'enrobé bitumineux est affiché.



Figure 2.11 – Module du gradient d'une image infrarouge de l'enrobé bitumineux. Deux axes pouvant permettre une séparation y sont indiqués par des flèches rouges.

Afin de bien distinguer les pixels ayant un grand module du gradient, les pixels ayant un module du gradient supérieur à ϵ sont affichés en blanc alors que les autres sont affichés en noir. Les caractéristiques mentionnées précédemment y sont visibles. Deux lignes blanches sur lesquelles il devrait être possible d'effectuer une division sont visibles. Ces dernières sont identifiées par des flèches sur l'image. Celle de gauche est une STL. Finalement, il serait important qu'aucune coupure ne soit effectuée sur celle-ci. Les algorithmes décrits précédemment ont pour objectif de sélectionner les meilleurs coins pour effectuer la séparation afin que ce type de situation ne survienne pas. Par contre, la méthode de séparation devrait être en mesure d'effectuer une division sur chacun de ces deux axes étant donné le point de départ correspondant.

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

Afin d'identifier le chemin optimal, nous proposons de représenter les déplacements possibles par un graphe. Sur ce graphe, les pixels de l'image ayant un module de gradient supérieur à ϵ correspondent à un nœud. Chaque nœud est connecté aux nœuds représentant les pixels voisins. Toutefois, en utilisant les voisins immédiats, il est possible qu'il n'existe aucun chemin possible. Par exemple, sur la Figure 2.11, la ligne blanche désignée par la flèche de gauche est discontinue, c'est-à-dire qu'il est impossible d'atteindre tous les points blancs de la ligne sans passer par au moins un point noir. Si seuls les voisins immédiats sont utilisés, alors aucun chemin ne pourra être trouvé. Ainsi, il est préférable de connecter entre eux tous les nœuds étant dans un rayon prédéfini. En plus de créer un nœud pour chaque pixel ayant un module du gradient élevé, un nœud est créé pour chaque point de contour. Ces nœuds sont des nœuds terminaux, c'est-à-dire qu'ils marquent la fin d'un chemin. Enfin, afin d'être en mesure de sélectionner le meilleur chemin, il faut pouvoir quantifier le gain, g , de chaque nœud. Étant donné que la division doit être effectuée sur les pixels ayant un module du gradient élevé, il est logique de choisir un chemin passant par les pixels ayant le plus grand module de gradient possible. Ainsi, la fonction de gain $g(x)$ utilisée pour un nœud x est la suivante :

$$g(x) = \|\nabla f(x)\| \quad (2.1)$$

où $\nabla f(x)$ représente la valeur du gradient du pixel associé au nœud x . La recherche du chemin pourrait ensuite s'effectuer en parcourant le graphe en choisissant toujours le nœud ayant le plus grand gain. Le chemin se termine lorsqu'un nœud terminal est atteint. Toutefois, cet algorithme est susceptible de sélectionner un mauvais nœud et donc de trouver un mauvais chemin. Par exemple, sur la Figure 2.11, la bordure entre la zone de pavage et le finisseur a également un module de gradient supérieur à ϵ . Il est donc possible que le chemin trouvé suive cette bordure. Le point d'arrivée du chemin n'étant pas connu, il est difficile de valider le chemin trouvé. Toutefois, en posant certaines hypothèses, il est possible d'émettre des conditions de validité. Tout d'abord, les normes du MTQ imposent que la base du finisseur soit toujours présente dans le haut de l'image. Ainsi, l'hypothèse que le point d'arrivée est toujours plus bas que le point de départ est émise. Aussi, le chemin devrait parcourir une distance minimale. Soit A et B les points de départ et d'arrivée respectivement du

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

chemin trouvé. Le point A est de coordonnées x_1, y_1 et le point B de coordonnées x_2, y_2 . Aussi, soit $minVertDist$ et $minLength$ la distance verticale minimale entre le point d'arrivée et le point de départ et la longueur minimale du chemin. À partir des hypothèses précédentes, les conditions suivantes peuvent être formulées :

1. $dist(A, B) \geq minLength$;
2. $(y_2 - y_1) \geq minVertDist$;
3. Le chemin trouvé doit être linéaire ;

où $dist$ est une fonction de distance entre deux points. Pour vérifier la linéarité du chemin, la droite de régression représentant l'ensemble des points du chemin est calculée. Ensuite, la distance de chaque point par rapport à la droite est calculée. Afin d'être linéaire, il faut que la moyenne des distances soit inférieure à un seuil. Si le chemin trouvé ne satisfait pas à ces trois contraintes, alors il est invalide. Advenant le cas où le chemin trouvé est invalide, l'algorithme de recherche de chemin peut faire marche arrière afin de trouver un autre chemin. Notons qu'il est toutefois nécessaire de mémoriser les nœuds déjà visités. Ceux-ci ne doivent pas être visités de nouveau. Ceci permet d'éviter d'emprunter deux fois le même chemin. L'algorithme peut également faire marche arrière s'il est dans une impasse, c'est-à-dire s'il choisit un nœud non terminal à partir duquel aucune destination n'est possible. Toutefois, même avec ces contraintes, il est possible qu'un chemin invalide soit conservé. Afin d'éviter cela, il serait préférable de diriger l'algorithme vers son objectif. Pour ce faire, les nœuds du graphe doivent être connectés différemment. En supposant que le chemin optimal est descendant et ne remonte jamais vers le haut de l'image, le graphe sera orienté. Soit r , la distance maximale entre deux nœuds et n_1 et n_2 deux nœuds du graphe de coordonnées x_1, y_1 et x_2, y_2 respectivement. Une connexion allant de n_1 vers n_2 peut être établie si et seulement si :

1. $dist(n_1, n_2) \leq r$;
2. $y_2 - y_1 \geq 0$.

Notons que si $y_2 > y_1$, alors il est possible de passer de n_1 à n_2 , mais pas le contraire. Sur la Figure 2.12b, le résultat d'un graphe créé à partir d'un pixel S est donné. L'arrangement des pixels dans l'image est illustré dans la Figure 2.12a. Toutefois,

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

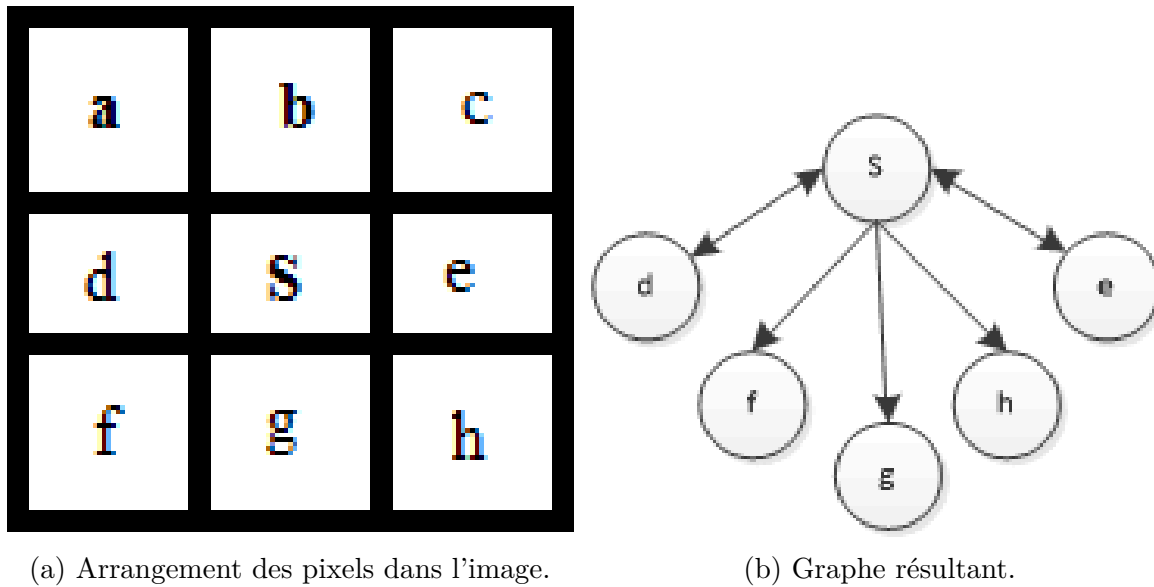


Figure 2.12 – Graphe créé à partir du pixel S.

bien que ce nouveau graphe ne permet que des mouvements latéraux ou descendants, il est toujours possible d'avoir un chemin longeant le finisseur. Ainsi, plutôt qu'utiliser la fonction de gain g pour sélectionner un nœud, l'algorithme pourrait sélectionner le nœud le plus prêt du nœud d'arriver. Pour la plupart des problèmes, le gain pour passer d'un nœud du graphe quelconque à un nœud d'arrivée peut-être estimé, mais pas déterminé exactement. Une fonction calculant un tel gain est dite une fonction heuristique [51]. Tel qu'expliqué précédemment, le point d'arrivée est inconnu. Ainsi, il est difficile de déterminer une telle fonction. Toutefois, en utilisant les hypothèses énoncées précédemment, il est possible de définir une fonction h visant à augmenter les chances de sélectionner un nœud dans la direction du nœud d'arrivée voulu. Cette fonction peut être définie ainsi :

$$h(x) = \begin{cases} \alpha & \text{si } y > y', \\ 1 & \text{autrement,} \end{cases} \quad (2.2)$$

avec $\alpha > 1$, y étant la coordonnée verticale du nœud x et y' étant la coordonnée verticale d'un nœud parent à x . Cette fonction accorde davantage d'importance aux nœuds descendants qu'aux nœuds latéraux. Ce faisant, le chemin trouvé à davantage

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

de chances de correspondre à celui recherché plutôt que de longer le finisseur. Afin de tenir compte du gradient, les fonctions g et h peuvent être combinées en une fonction f :

$$f(x) = g(x) \times h(x) \quad (2.3)$$

En résumé, un nouveau nœud est sélectionné à chaque itération. Pour le sélectionner, la fonction f est évaluée pour chaque candidat possible. Le nœud maximisant f est ensuite ajouté au chemin. Advenant le cas d'une impasse ou d'un chemin invalide, l'algorithme fait marche arrière et recherche d'autres chemins possibles.

Le chemin trouvé avec l'algorithme décrit précédemment permet de diviser la zone en deux parties. La division s'effectue en construisant le contour de ces deux zones. Connaissant l'ensemble des points de contour de la zone avant division, C_1 , et l'ensemble des points composant le chemin de division, C_{div} , dont le point de départ est P_d et le point d'arrivée est P_a , les contours des deux zones peuvent être déduits. Pour cela, il est nécessaire que $P_d \in C_1$ et que $P_a \in C_1$. Toutefois, un coin trouvé avec Harris ne sera pas nécessairement compris dans C_1 . Ainsi, il est possible qu'il faille connecter P_d au point de contour le plus proche. Puisque le point d'arrivée du chemin de division doit être un point de contour, alors $P_a \in C_1$. Le contour C_1 peut être divisé en deux ; la première partie, $demiContour_1$, comporte les points allant de P_d à P_a et la seconde, $demiContour_2$, les points allant de P_a à P_d . Les deux contours résultants de la division sont donnés par :

1. $C_{d1} = demiContour_1 \cup C_{div}$;
2. $C_{d2} = demiContour_2 \cup C_{div}$;

avec C_{d1} et C_{d2} les points des deux contours résultants. Ces deux contours délimitent deux zones de pavage possibles. Il faut sélectionner laquelle sera sélectionnée comme étant la zone de pavage. La zone de pavage étant censée occuper la plus grande partie de l'image, il est logique de sélectionner la zone ayant le plus grand périmètre. C'est cette solution qui est utilisée par la méthode de détection de coins par la courbure (section 2.5.2). Par contre, comme décrit dans la section sur la détection de coin avec Harris, deux coins sont utilisés pour délimiter la zone de pavage. Ainsi, lorsque les coins sont détectés avec cette méthode, la zone contenant ces deux coins devrait être

2.5. DÉTECTEUR DE LA ZONE DE PAVAGE

sélectionnée. Une fois le contour final trouvé, les pixels appartenant à la zone sont trouvés en utilisant un algorithme de remplissage.

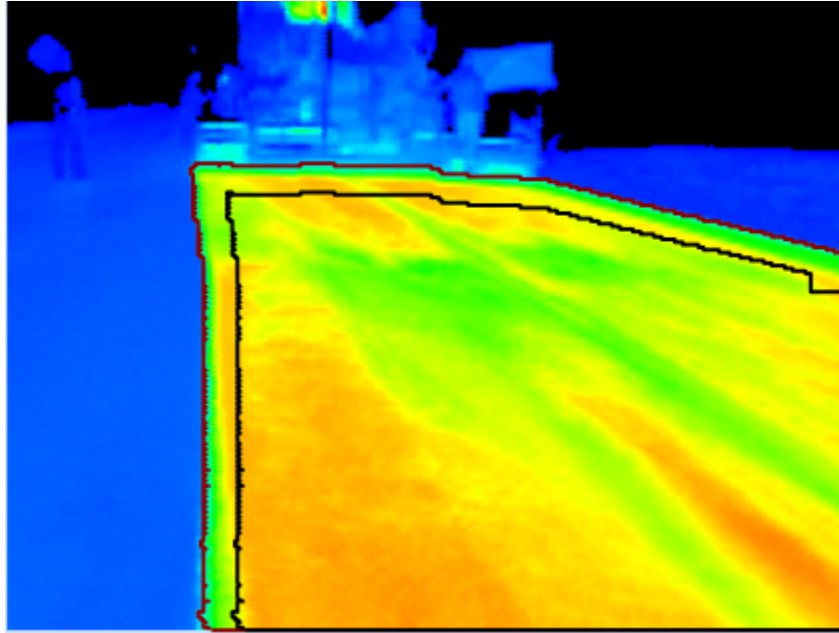


Figure 2.13 – Contour de la zone de pavage avant (rouge) et après (noir) le retrécissement.

Il arrive que certaines zones de faiblesse soient détectées en bordure de la zone de pavage. L'enrobé composant les bordures de la zone de pavage peut ne pas avoir la même densité que le reste de l'enrobé de la zone de pavage. Ceci s'explique par la présence possible d'objets non désirables provenant de l'environnement. En raison de cette différence, le MTQ n'est pas intéressé à ce que le système détecte les zones de faiblesse se trouvant en bordure. Afin d'éviter leur détection, la zone de pavage est réduite d'un certain pourcentage. Pour se faire, la distance entre les pixels et le point de contour le plus près est calculée. Si le point de contour utilisé est en contact avec le fond et que la distance est inférieure à un seuil, alors le pixel est éliminé. Les pixels se situant près de la bordure de l'image sont conservés, car on considère que la zone de pavage se poursuit au delà de l'image. Une fois l'élimination des pixels effectuée, le contour de la zone est recalculé. Sur la Figure 2.13, le contour original est visible en rouge et le contour après rétrécissement est visible en noir. On constate que les

2.6. DÉTECTEUR DE SÉGRÉGATIONS THERMIQUES LONGITUDINALES

pixels près de la bordure droite n'ont pas été éliminés, car le contour le plus près se trouve en bordure de l'image.

2.6 Détecteur de ségrégations thermiques longitudinales

Les STL ont plusieurs caractéristiques qui peuvent être utilisées pour effectuer leur détection. Tout d'abord, les points constituant une STL sont des minima locaux. Ensuite, les minima constituant une STL sont disposés de manière linéaire. Finalement, la différence de température entre un minimum sur la STL et les maxima à gauche et à droite doit être supérieure à un seuil. Les caractéristiques de la STL sont illustrées sur la Figure 2.14. À partir de ces caractéristiques, nous avons développé un algorithme de détection des STL s'effectuant en trois étapes :

1. détecter les minima locaux ;
2. rechercher des lignes dans l'image des minima locaux ;
3. valider si les lignes correspondent à l'axe d'une STL.

Chaque minimum local de l'image est un point pouvant faire partie d'une STL. Pour déterminer si un pixel donné est un minimum, il est comparé avec les pixels avoisinants. Soit une fenêtre de dimension $n \times 1$ et une fenêtre de dimension $1 \times n$. Ces deux fenêtres sont centrées sur le pixel. Si la température du pixel est inférieure ou égale à la température de l'ensemble des pixels compris dans ces fenêtres, alors le pixel est un minimum. Cette opération est répétée pour tous les pixels de la zone de pavage. Notons que le bruit présent dans l'image peut influencer la détection des minima. Il peut être souhaitable de réduire préalablement le bruit sur l'image à l'aide, par exemple, d'un filtrage gaussien. Toutefois, sur les images testées, le bruit n'a pas affecté la détection des STL. Les minima peuvent être représentés à l'aide d'une image binaire. Celle-ci est de la dimension de l'image infrarouge et, sur cette dernière, un pixel a la valeur 1 s'il s'agit d'un minimum et la valeur 0 autrement. Sur la Figure 2.15b, on constate que les minima trouvés correspondent aux axes plus froids présents sur l'image d'entrée 2.15a.

2.6. DÉTECTEUR DE SÉGRÉGATIONS THERMIQUES LONGITUDINALES

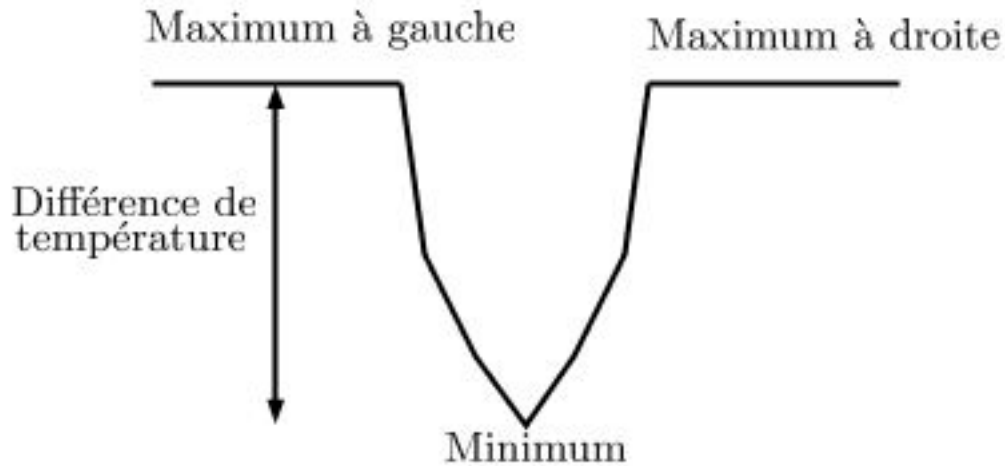


Figure 2.14 – Profil d’une STL.

La deuxième étape consiste à détecter les STL probables. Celles-ci étant formées par des minima ayant une tendance linéaire, il suffit de rechercher des lignes dans l’image des minima. Pour ce faire, un algorithme de détection de droites peut être utilisé. La transformée de Hough a été utilisée pour résoudre ce problème. Celle-ci est expliquée dans la section 1.4. Sur la Figure 2.15c, les droites trouvées à partir des minima de la Figure 2.15b sont visibles.

Finalement, il faut valider si, oui ou non, les lignes trouvées par Hough correspondent bel et bien aux axes des STL. Pour ce faire, chaque point présent sur la droite et étant à l’intérieur de la zone de pavage est validé. Pour déterminer l’appartenance potentielle d’un pixel à une STL, il faut déterminer son profil de température. Soit x , le pixel à valider et s , un segment de longueur n perpendiculaire à la droite et centré sur x . Le profil de température de x consiste en l’ensemble des températures des pixels présents sous le segment s . Le pixel x appartient potentiellement à une STL si son profil de température est semblable à celui du profil cible illustré sur la Figure 2.14. Un profil de température est dit semblable au profil cible s’il répond aux règles suivantes :

1. $posMax_{gauche} < x < posMax_{droite}$;

2.6. DÉTECTEUR DE SÉGRÉGATIONS THERMIQUES LONGITUDINALES

2. $Abs(pos_{min} - x) < s_1$;
3. $Abs(max_{gauche} - max_{droite}) < s_2$;
4. $Min(max_{gauche}, max_{droite}) - min > s_3$;

où max_{gauche} est la température maximale dans le profil de température s se situant à gauche de x , $posMax_{gauche}$ est sa position dans le profil de température, max_{droite} est la température maximale se situant à droite de x et $posMax_{droite}$ est sa position dans le profil. Similairement, min est la température minimale du profil de température et pos_{min} est sa position. Les variables s_1 , s_2 et s_3 sont des seuils qui ont été fixés par le MTQ. Aussi, Abs est une fonction permettant d'obtenir la valeur absolue et Min est une fonction retournant la valeur minimum.

Ces règles permettent de vérifier si un profil a les caractéristiques d'une STL. La première permet de savoir si le minimum est situé entre les deux températures maximales. La seconde règle vérifie que la distance du minimum par rapport à la droite est suffisamment petite. Ceci permet de vérifier si le minimum se situe environ au centre du profil tel qu'il est illustré sur la Figure 2.14. Sur cette même figure, les températures maximales sont égales. Afin que le profil STL soit semblable à celui de cette figure, il est donc nécessaire que la température maximale à gauche et la température maximale à droite soient similaires. C'est ce que permet de vérifier la troisième règle. Enfin, selon la définition d'une STL, la différence entre la température maximale du profil et la température minimale doit être suffisamment grande. La dernière règle sert à valider cette contrainte. Toutefois, il arrive que cette différence soit inférieure à s_3 pour une grande partie des profils de températures composant une potentielle STL, mais très près de celui-ci. Dans un tel cas, la STL sera éliminée alors qu'elle est potentiellement intéressante pour le MTQ. Pour éviter ce problème, un seuil $s_4 < s_3$ a été défini. La quatrième règle sera donc évaluée à deux reprises : une fois en utilisant s_3 et une fois en utilisant s_4 .

Ces règles sont ensuite utilisées pour répartir les profils de températures en trois classes :

- valide ;
- accepté ;
- invalide.

2.6. DÉTECTEUR DE SÉGRÉGATIONS THERMIQUES LONGITUDINALES

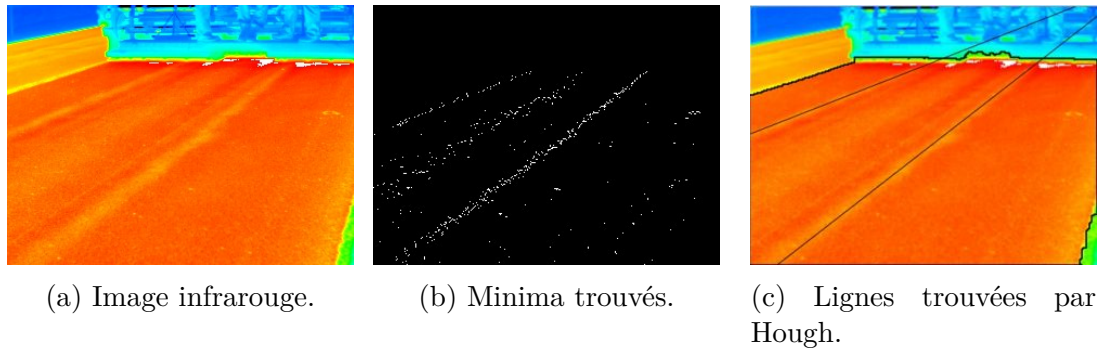


Figure 2.15 – Recherche des STL.

Un profil est dit invalide s'il ne respecte pas les règles 1, 2 ou 3. Si le profil respecte ces trois règles, alors il sera valide si la différence calculée pour la règle 4 est supérieure à s_3 , accepté si elle est supérieure à s_4 et invalide autrement. Pour le reste du chapitre, le terme S-différence désignera la différence de la règle 4.

Une fois les classes des profils de températures déterminées, elles peuvent être utilisées pour trouver le premier point et le dernier point de la STL potentielle. En effet, il est logique d'utiliser le premier et le dernier profil de température ayant la classe valide comme premier point et dernier point de la STL. Toutefois, il est possible que le premier (ou dernier) profil valide soit un profil isolé ; c'est-à-dire que ses profils voisins sont invalides. Un tel profil ne devrait donc pas être choisi comme premier point. Ainsi, pour déterminer le premier point, il est préférable de vérifier la classe des profils de températures suivants. S'ils sont valides, alors le profil constitue probablement un bon choix pour le premier point. À l'inverse, pour le dernier point, la classe des profils précédents peut être vérifiée. Connaissant les bornes de la potentielle STL, celle-ci peut maintenant être validée. Pour ce faire, certaines variables doivent être définies. Soit n , le nombre total de profils de températures dans la zone de pavage et l , la longueur de la STL potentielle. La longueur correspond au nombre de profils de températures entre le premier et le dernier point de la STL potentielle. Soit n_1 , le nombre minimal de profils valides requis et n_2 , le nombre minimal de profils acceptés requis. Ces deux seuils sont définis comme étant un pourcentage de l avec $n_1 > n_2$. Les pourcentages sont déterminés par le MTQ. Soit v , le nombre de profils valides, et a le nombre de profils acceptés entre le premier point et le dernier point. En utilisant

2.6. DÉTECTEUR DE SÉGRÉGATIONS THERMIQUES LONGITUDINALES

ces variables, un autre ensemble de règles a été défini :

1. $v \geq n_1$;
2. $a \geq n_2$;
3. $l > \text{longueurMinimale}$;
4. $l > np$;

où *longueurMinimale* est la longueur minimale que peut avoir une STL et $0 \leq p \leq 1$. Ces deux valeurs sont déterminées par le MTQ.

Ces règles permettent de déterminer si une STL potentielle doit être éliminée. Si la STL potentielle ne répond pas à l'un de ces critères, alors elle est rejetée. Les deux premières règles permettent de vérifier que la S-différence de la majorité des profils de la STL est suffisamment grande. La troisième permet d'éliminer les STL qui sont trop courtes. Enfin, les STL qui intéressent le MTQ doivent traverser une grande partie de la zone de pavage. Ainsi, les premiers et derniers points d'une STL doivent être suffisamment proches d'un point de contour de la zone de pavage. C'est ce que permet de valider la dernière règle.

En plus de ces contraintes, la moyenne (μ) et le coefficient de variation (CV) calculés sur l'ensemble des S-différences d'une STL potentielle peuvent être utilisés pour éliminer certaines STL. Le CV est défini par $\frac{\sigma}{\mu}$ où σ est l'écart-type. Comme illustré sur le graphique 2.16, une frontière peut être créée en utilisant deux paires de coordonnées composées d'une moyenne et du CV. Il a été démontré expérimentalement que si le point (μ, CV) d'une STL potentielle se trouve au-dessus de cette frontière, alors la STL potentielle ne répond probablement pas aux critères du MTQ et est donc rejetée.

Finalement, il est possible qu'une section de la STL comporte une majorité de profils invalides, mais que les profils du reste de la STL soient valides. Dans un tel cas, la STL peut être retenue. Or, ce n'est pas désirable de retenir une STL si elle n'est pas uniforme. Ainsi, afin de remédier à ce problème, la STL est divisée en plusieurs segments de longueurs égales. Chaque segment est ensuite validé en utilisant les règles décrites précédemment. Notons que les règles servant à valider la longueur de la STL ne doivent pas être appliquées sur les segments, mais sur la STL potentielle complète seulement. Si un des segments est rejeté, alors la STL complète est rejetée. Ceci

2.6. DÉTECTEUR DE SÉGRÉGATIONS THERMIQUES LONGITUDINALES

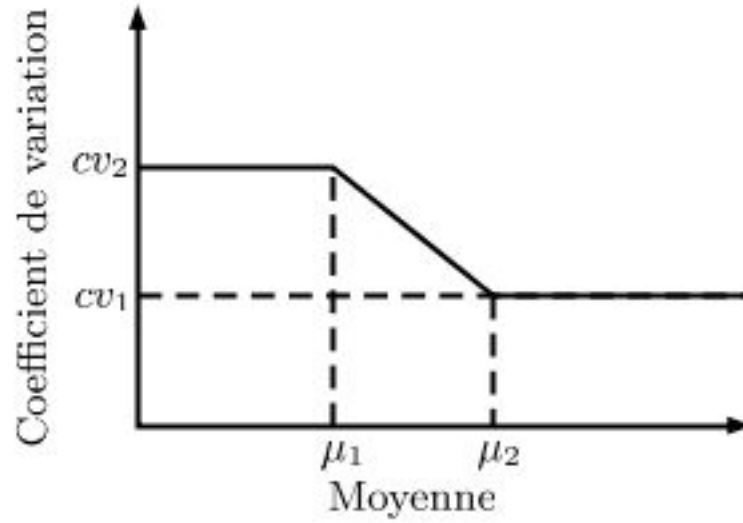


Figure 2.16 – Frontière statistique permettant d'éliminer certaines STL.

permet d'assurer la continuité de la STL sur toute sa longueur. Si tous les tests sont réussis, alors la STL est considérée comme valide.

Chapitre 3

Systeme d'anticipation des nids-de-poule et des fissures par l'acquisition de données en continu

Afin d'automatiser davantage le processus de détection des zones froides, chaudes et STL, le MTQ a développé dans les années 2009 et 2010 un système de thermographie infrarouge automatisé [33]. Ce système consiste en un scanner infrarouge monté à l'arrière du finisseur, un encodeur de distance et un système de localisation (GPS). Le scanner devant être monté sur le finisseur et le finisseur appartenant à l'entrepreneur, le MTQ ne peut pas installer un scanner sur chaque finisseur. Toutefois, il permet aux entrepreneurs qui le désirent d'effectuer leur propre contrôle de la qualité. Il permet aussi aux entrepreneurs de constater en temps réels l'effet des ajustements du finisseur. Le scanner est configuré pour capter une ligne de données de température (appelée profil de températures) à chaque 20 mm. Les températures acquises correspondent à des points longitudinaux sur l'enrobé bitumineux espacés d'environ 9 mm [33]. Le scanner est illustré à la Figure 3.1. Afin de bien visualiser le champ d'action du scanner, un triangle orange a été ajouté sur cette dernière figure. Chaque profil de températures contient les données correspondant à l'enrobé bitumineux illustré par la bande jaune. Les profils de températures acquis par le scanner peuvent être visualisés grâce à un logiciel développé par le MTQ. Le logiciel avertit l'utilisateur (à

l'aide d'un code de couleur appelé alarme) lorsqu'une ligne de température contient une donnée de température trop basse ou trop haute ou si une variation de température trop grande est détectée. Toutefois, la génération d'alarmes ne tient pas compte des lignes précédentes et des lignes futures. Ainsi, beaucoup d'alarmes surviennent alors qu'aucun défaut n'est présent. Les zones non conformes pouvant être présentes sur la surface de l'enrobé sont expliquées en détail dans le chapitre 2. L'opérateur peut procéder à des ajustements du finisseur en fonction de l'analyse qu'il fait des données affichées. Par contre, aucun algorithme permettant la détection automatique des STL et des zones froides/chaudes n'est présent dans le logiciel. Ainsi, la tâche de l'opérateur est complexifiée par le grand nombre d'alarmes. Beaucoup de jugement est nécessaire pour interpréter la tendance des mesures. Notons également qu'il existe un second logiciel développé par le MTQ permettant de lire les données acquises, mais ce dernier ne permet qu'une analyse a posteriori et limite donc l'avantage de la thermographie en continue.

Afin de remédier à ce problème, nous avons développé des algorithmes qui ont été intégrés au logiciel de thermographie en continue du MTQ. Étant donné la nature du scanner, seuls les profils déjà acquis sont connus. Ainsi, à chaque instant, seul un sous ensemble des données est disponible. Lors de l'acquisition d'un nouveau profil, des pixels faisant possiblement partie d'une zone non conforme peuvent être détectés. Toutefois, il est difficile d'affirmer qu'un défaut est présent à partir d'un seul profil de températures. La stratégie utilisée consiste à émettre des hypothèses concernant la présence d'une non-conformité. Au fur et à mesure que les profils deviennent disponibles, il est possible de confirmer ou d'infirmer ces hypothèses. Ainsi, les algorithmes développés prédisent l'apparition de zones non conformes. Dès qu'un nouveau profil de températures est acquis, les hypothèses sont mises à jour. Aussi, le scanner est conçu et paramétré de manière à ce que les températures acquises appartiennent à la R-voie à analyser. Ceci implique que la zone de pavage est déjà connue. Il est cependant possible que les données en bordure n'appartiennent pas à l'enrobé bitumineux. Pour éviter de traiter ces pixels, un certain nombre de pixels sont retirés à chaque extrémité du profil de températures. Puisque la surface couverte par le scanner ainsi que la largeur de la surface de l'enrobé sont connues, la quantité de pixels à retirer peut être facilement déduite. Le chapitre suivant décrit les algorithmes développés

3.1. DÉTECTION DES ZONES CHAUDES/FROIDES



Figure 3.1 – Scanneur infrarouge. Source : [33]

pour l'analyse des zones froides, des zones chaudes et des STL.

3.1 Détection des zones chaudes/froides

Étant donné la grande similarité entre l'algorithme de détection de zones froides et l'algorithme de détection de zones chaudes, seul celui permettant la détection de zones froides sera expliqué. Des explications sur les différences entre les deux algorithmes seront données au besoin. Les zones froides sont composées d'un ensemble de pixels voisins dont la température est inférieure à un seuil froid donné. Sur un profil de températures, une quantité de bruit non négligeable est présente (voir Figure 3.2). En raison de ce bruit, il est possible qu'un pixel ait une température supérieure au seuil froid, même s'il s'agit en réalité d'un point froid. Afin d'éviter ce genre de confusion, il est nécessaire de filtrer le profil de températures. Une opération de filtrage consiste à effectuer une opération sur le voisinage d'un pixel. Il peut s'agir d'une opération dont la valeur de sortie est influencée par chaque pixel du voisinage comme la moyenne

3.1. DÉTECTION DES ZONES CHAUDES/FROIDES

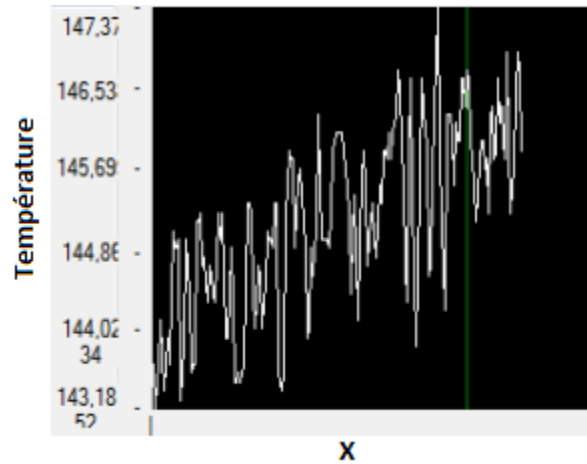


Figure 3.2 – Bruit présent sur le profil de températures. Source [4]

par exemple. Autrement, une opération pourrait retourner le minimum du voisinage. C'est cette dernière opération qui est utilisée pour filtrer le profil de températures. Le filtre utilisé pour effectuer une telle opération porte le nom de filtre minimum ou filtre d'érosion [55]. L'utilisation d'un tel filtre permet de propager le froid. Comme expliqué précédemment, un pixel froid peut sembler conforme en raison du bruit. Il en résulte des trous dans les régions froides. L'utilisation du filtre minimum permet de remplir ces trous. Pour la détection de zone chaude, l'opération inverse est effectuée, c'est-à-dire que l'opération retourne la valeur maximale du voisinage.

Pour le traitement du profil de températures, un filtre de taille $k = (2N + 1)$ est défini. Soit x , la position du pixel sur lequel le filtre est centré. L'ensemble F des pixels présents dans le filtre est défini par $F(x) = \{f(x + l), -\frac{k}{2} \leq l \leq \frac{k}{2}\}$ où f est la valeur d'un pixel à la position l . La valeur retenue est donnée par $\min(F)$, c'est-à-dire $R(x) = \min_x(F(x))$.

Une fois ce prétraitement effectué, le profil peut être analysé. L'analyse se décompose en trois étapes :

1. classification des pixels sur le profil ;
2. génération d'hypothèses et/ou mise à jour des hypothèses existantes ;
3. vérification des hypothèses.

3.1. DÉTECTION DES ZONES CHAUDES/FROIDES

La classification des pixels consiste à assigner une classe à chaque pixel en fonction de sa température. Un pixel peut être assigné à l'une des deux classes suivantes : pixel froid ou pixel conforme. Ces informations sont conservées en mémoire sous forme de segments. Un segment est un ensemble de pixels voisins appartenant à la même classe. Il est défini par une coordonnée de départ et une coordonnée d'arrivée. Un exemple de classification des pixels d'un profil de températures est donné dans la Figure 3.3. Les segments bleus sont formés des pixels froids et le segment vert contient le pixel conforme. Le segment rouge contient des pixels chauds. Étant donné que le lissage du profil de température a été effectué pour améliorer la détection de zones froides, ces pixels seront considérés comme étant conformes. Pour la détection de zones chaudes, le lissage avec un filtre d'ordre maximum doit être effectué. Ce seront alors les pixels froids qui seront considérés comme étant conformes.

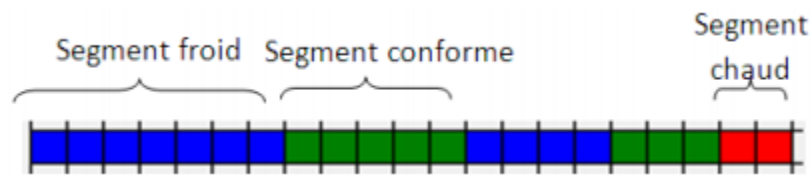


Figure 3.3 – Classification des pixels en segments. Source : [4]

Pour chacun des segments non conformes trouvés, l'hypothèse qu'une zone non conforme est présente peut être émise et une nouvelle zone froide est créée. Une zone froide consiste en un ensemble de segments froids connexes. Chaque hypothèse est donc associée à une zone froide. Ainsi, lorsque le texte fait référence aux segments d'une hypothèse, il fait référence aux segments de la zone froide qui lui est associée. Néanmoins, avant de créer de nouvelles hypothèses, il est nécessaire de vérifier si les segments trouvés peuvent être considérés comme faisant partie d'une hypothèse déjà existante. Pour ce faire, il suffit de regarder si les segments ont des pixels connexes avec le dernier segment ajouté à chaque hypothèse. Si c'est le cas, alors le segment est ajouté à l'hypothèse. Notons qu'il est possible que le segment ait des pixels connexes avec les segments de plus d'une hypothèse. Dans un tel cas, toutes les hypothèses concernées sont fusionnées en une seule hypothèse. Le segment est ensuite ajouté à cette dernière. Parmi les hypothèses existantes, certaines n'auront pas été mises à jour. Ceci signifie qu'aucun nouveau segment n'a été ajouté à la zone et cette der-

3.2. DÉTECTION DE SÉGRÉGATIONS THERMIQUES LONGITUDINALES

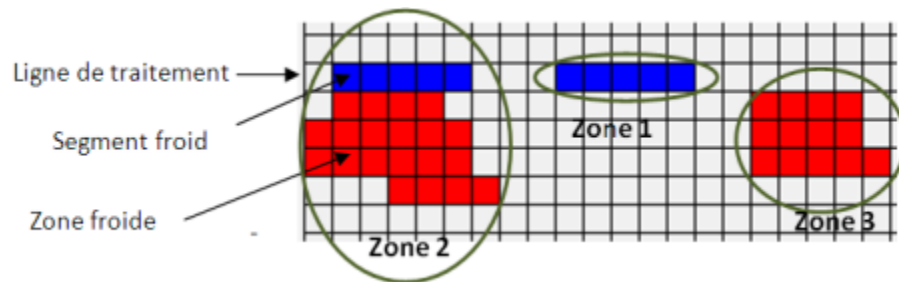


Figure 3.4 – Situation possible lors de la mise à jour des zones froides. [4]

nière est donc considérée comme une zone à retenir. Les segments froids du profil de températures courant n'ayant pas été fusionnés sont utilisés pour débiter de nouvelles hypothèses. En résumé, pour chaque segment froid d'un nouveau profil, trois situations sont possibles :

- création d'une nouvelle hypothèse (zone 1) ;
- mise à jour d'une hypothèse (zone 2) ;
- fin d'une hypothèse (zone 3).

La Figure 3.4 illustre ces trois situations. Sur celle-ci, les segments bleus sont les segments froids détectés sur le profil de températures courant. Les zones rouges correspondent aux hypothèses existantes. Dans le cas illustré sur l'image, l'hypothèse sera mise à jour en y ajoutant le segment de gauche. Pour le segment central, une nouvelle hypothèse sera créée. Enfin, puisque l'hypothèse de droite n'a pas été mise à jour, celle-ci est terminée. Lorsqu'aucun segment n'est ajouté à une hypothèse, il est nécessaire de confirmer ou d'infirmer cette dernière. La validité d'une zone froide est déterminée en fonction d'un seul critère, soit le nombre de pixels qu'elle contient. Ainsi, une hypothèse est confirmée dès que la zone qui lui est associée contient un nombre de pixels supérieur à un certain seuil.

3.2 Détection de ségrégations thermiques longitudinales

De manière similaire à la détection de zones froides et chaudes, la détection des STL s'effectue à partir des sections des profils de températures, appelés par la suite

3.2. DÉTECTION DE SÉGRÉGATIONS THERMIQUES LONGITUDINALES

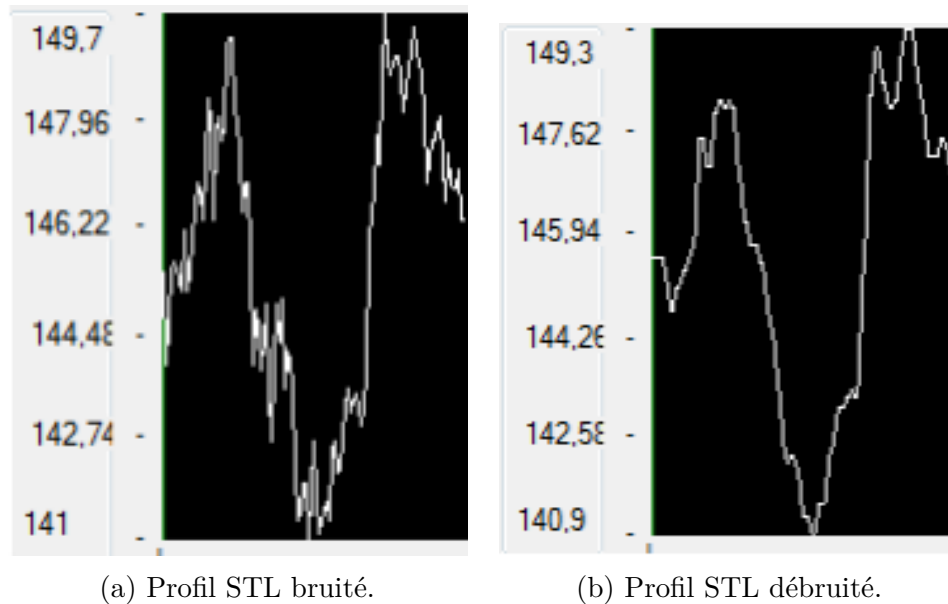


Figure 3.5 – STL avant et après l'application du filtre médian. Source [4]

profils STL. Ces sections sont ensuite combinées aux sections déjà trouvées afin de former une STL. La définition de la STL a été donnée dans la section 2.6. Les profils de températures acquis par le scanneur étant parallèles au finisseur, les STL devraient toujours être orientées dans la direction de mouvement du finisseur. Ainsi, si une STL passe par le profil de températures à analyser, il devrait être possible d'identifier un profil STL ; soit un minimum borné par deux maxima. Aussi, tel qu'exigé par la définition de la STL du MTQ, il est nécessaire qu'une différence de température minimale entre le minimum et le plus petit des deux maxima soit observée. Comme mentionné dans la section précédente, les profils de températures sont bruités. Les variations occasionnées par le bruit peuvent influencer sur la valeur des maxima et du minimum. Il en résulte une évaluation qui n'est pas représentative de la réalité. Afin de retirer les valeurs aberrantes causées par le bruit, un filtrage du profil de températures est nécessaire. L'utilisation d'un filtre médian permet l'élimination de ces valeurs comme illustré sur la Figure 3.5. Sur celle-ci, un profil STL avant et après filtrage peut-être vu. Le filtre médian permet de remplacer la valeur d'un pixel par la valeur médiane de l'ensemble des pixels de son voisinage. Il permet de réduire la fluctuation des températures. Suite à cette étape, les segments STL peuvent être détectés.

3.2. DÉTECTION DE SÉGRÉGATIONS THERMIQUES LONGITUDINALES

Dans la section 2.5.2, un contour a été défini comme une variation brusque entre les valeurs des pixels. Par cette définition, un profil STL peut être défini comme un point minimum cerné par deux contours. La détection de ces deux contours sur un profil de températures permettrait d'identifier rapidement les profils STL. Afin de détecter ces contours, nous proposons l'usage de la différence de Gaussiennes (DOG). Celle-ci est expliquée dans la section 1.4.

La DOG permet l'identification des contours sur le profil de températures. Deux contours successifs consistent en un profil STL probable. Toutefois, la présence de deux contours successifs n'étant pas une condition suffisante pour affirmer qu'un profil STL est présent, il est nécessaire d'analyser les pixels entre ces deux contours. En effet, il est nécessaire qu'un minimum soit présent entre les deux contours et que la température aux points de contours corresponde aux maxima. Comme illustré sur la Figure 3.5, l'un des contours correspond en une variation d'une température chaude vers une température froide. À l'inverse, le second contour variera d'une température froide vers une température chaude. Le premier contour est appelé contour gauche et le second contour droit. L'obtention des conditions précédentes permet de valider que le profil STL est formé de ces deux types de contours. Toutefois, plutôt que d'analyser les pixels entre chaque paire de points de contours possible, il serait préférable d'identifier directement le type d'un contour lors de sa détection, c'est-à-dire identifier s'il s'agit d'un contour gauche ou d'un contour droit. Ensuite, la détection de profil STL se résumerait à détecter un contour gauche et un contour droit successifs. Pour ce faire, nous proposons d'utiliser deux opérateurs basés sur la DOG : la DOG à droite et la DOG à gauche. Contrairement à la DOG, ces opérateurs travaillent seulement sur les pixels à droite ou à gauche du pixel d'entrée. Ainsi, il s'agit de faire la différence de deux demi-Gaussiennes. Sur la Figure 3.6, l'application d'un filtre gaussien à droite est illustré. Le filtre DOG à droite est créé en utilisant l'équation suivante :

$$f_{droite}(x, \sigma_1, \sigma_2) = \begin{cases} f(x, \sigma_1, \sigma_2) & \text{si } x > \frac{M}{2} \\ 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (3.1)$$

où x est la position dans le filtre et $x \in [0, 2M]$, f , donnée par (1.18) et M étant la taille du filtre utilisé. On remarque que la moitié gauche du filtre est composée de 0. Ils servent à éliminer l'effet de la moitié gauche de la Gaussienne. Le filtre

3.2. DÉTECTION DE SÉGRÉGATIONS THERMIQUES LONGITUDINALES

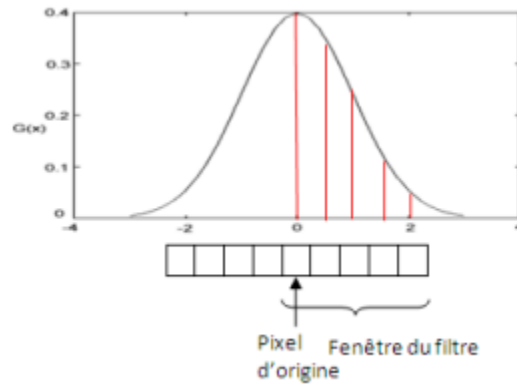


Figure 3.6 – Application du filtre gaussien à droite. Source [4]

f_{gauche} est créé de manière similaire. Toutefois, c'est la moitié droite du filtre qui est composée de 0. Les valeurs retournées par la convolution du filtre f_{droite} avec le profil de températures seront élevées lorsqu'un contour gauche sera présent. À l'inverse, le filtre f_{gauche} est utilisé pour détecter les contours droits. Notons que les filtres doivent être normalisés avant d'être convolués avec le profil de températures. Le filtre utilisé par la DOG étant large, il est peu affecté par les variations d'intensité entre deux pixels voisins. Ceci permet de bien détecter la variation progressive d'un maximum vers un minimum (ou l'inverse) qui se produit lorsqu'une STL est présente.

Une fois les points de contours trouvés sur le profil de températures, il est facile d'identifier les profils STL. Il suffit de parcourir le profil de températures et d'identifier les contours gauches et les contours droits. On dira qu'un pixel correspond à un contour gauche lorsque la valeur retournée par la convolution du filtre f_{droite} avec le profil de températures est supérieure à un seuil appelé $seuilContour$. De même, un contour droit est trouvé lorsque la valeur obtenue par convolution du filtre f_{gauche} avec le profil de températures est supérieure à $seuilContour$. Si une paire composée d'un contour gauche et d'un contour droit est détectée, alors un profil STL borné par le contour gauche et le contour droit est créé.

Lors de la création du profil STL, le minimum est trouvé. Celui-ci correspond au pixel situé entre le contour gauche et le contour droit ayant la plus petite température. Chaque profil trouvé est ensuite validé selon deux critères : sa largeur et sa différence de température entre le minimum et les maxima. Soit $Max_g = T(Contour_g)$

3.2. DÉTECTION DE SÉGRÉGATIONS THERMIQUES LONGITUDINALES

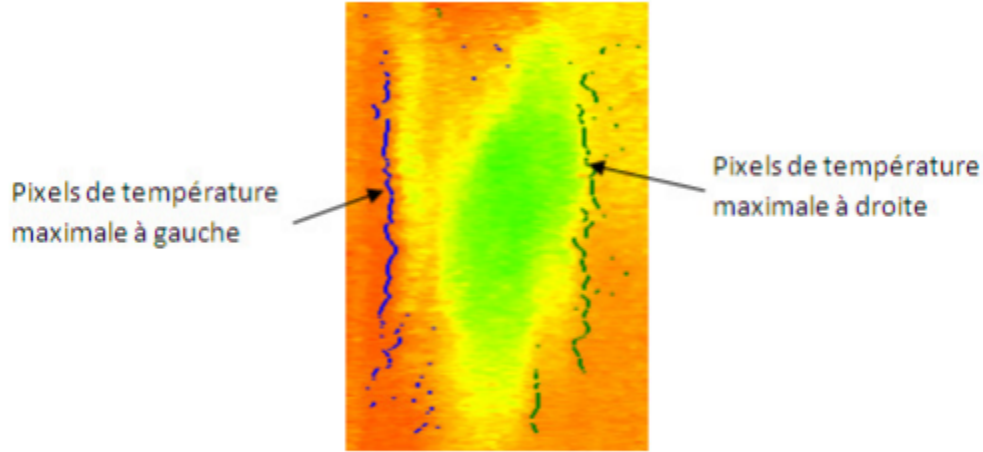


Figure 3.7 – Zone froide détectée en tant que STL. Elle est éliminée en raison de sa trop grande largeur. Source : [4]

et $Max_d = T(Contour_d)$ avec T une fonction retournant la valeur d'un pixel à une position donnée dans le profil de températures, $Contour_g$ et $Contour_d$ l'index du contour gauche et l'index du contour droit respectivement. Alors, un profil STL est valide si et seulement si les deux conditions suivantes sont respectées :

- $\min(Max_g, Max_d) - minimum > seuil_1$
- $seuil_2 < Contour_d - Contour_g < seuil_3$

La dernière condition permet de valider que le profil STL n'est ni trop large, ni trop étroit. Tel que visible sur la Figure 3.7, des zones froides peuvent avoir des caractéristiques similaires à une STL. Sur cette figure, le contour détecté avec la DOG à gauche est en bleu et celui avec la DOG à droite est en vert. Étant donné que les zones froides sont plus larges, on peut limiter la largeur de la STL pour éviter la confusion entre les deux.

De manière similaire à la détection de zones froides/chaudes, il est difficile d'affirmer qu'une STL est présente en se basant seulement sur un profil de températures. Ainsi, chaque fois qu'un nouveau segment STL sera détecté, une hypothèse sera générée ou mise à jour. Soit un profil STL borné par $[Contour_g, Contour_d]$ et une hypothèse dont les bornes approximatives sont $[a, b]$. Par borne d'une hypothèse, on fait référence aux bornes de la STL qu'elle représente. L'hypothèse est mise à jour

3.2. DÉTECTION DE SÉGRÉGATIONS THERMIQUES LONGITUDINALES

si $\frac{Contour_g + Contour_d}{2} \in [a, b]$. Dans ce cas, les bornes de l'hypothèse sont mises à jour comme étant la moyenne entre les bornes du profil STL et les bornes de l'hypothèse. Contrairement aux zones froides/chaudes, l'hypothèse d'une STL n'est pas automatiquement rejetée lorsqu'aucun profil STL n'y est ajouté. En effet, il est possible qu'une STL comporte certains profils qui sont invalides. La validité de l'hypothèse sera donc décidée en fonction d'un critère de continuité. Ce critère, appelé taux d'occupation, est défini par :

$$\tau = \frac{\text{Nombre de profils STL dans l'hypothèse}}{\text{Nombre de profils de températures couverts par l'hypothèse}} \quad (3.2)$$

Soit y , l'index du premier profil STL et $y + n$, l'index du dernier profil STL utilisé pour mettre à jour l'hypothèse. Parmi les n profils de températures, x sont des profils STL. Sur les $n - x$ profils restants, aucune caractéristique de la STL n'a été identifiée. Ainsi, dans l'équation 3.2, le numérateur est égal à x et le dénominateur à n . À chaque nouveau profil de températures, τ est réévalué pour chaque hypothèse. Si, pour une hypothèse, τ passe sous un seuil prédéterminé, alors celle-ci est considérée comme terminée. Une hypothèse vérifiée est confirmée ou infirmée en fonction de la longueur de la STL qu'elle représente.

Bien que les étapes précédentes sont suffisantes pour détecter la présence d'une STL, elles ne permettent pas d'obtenir le chemin emprunté par la STL. En effet, seules les bornes de la STL sont connues. Connaître le chemin pourrait être utile, par exemple, pour l'affichage de la STL. Il est possible d'estimer celui-ci en se basant sur les propriétés des STL. Plus particulièrement, le chemin doit passer par les minima des profils STL. Aussi, il doit être linéaire autant que possible. Ainsi, on cherche à minimiser la température sous le chemin ainsi que les changements de direction. Pour ce faire, une fonction de coût a été construite. Lors de la recherche d'un nouveau pixel à ajouter au chemin, le coût de chaque pixel possible est évalué. Le pixel ajouté au chemin sera celui ayant le coût le plus faible. La fonction de coût utilisée est la suivante :

$$\text{coût} = \alpha \Delta T + \beta \sin(\theta) + \lambda \frac{1}{\text{distance virage}} \quad (3.3)$$

où ΔT correspond à la différence de température entre le pixel évalué et la tempé-

3.2. DÉTECTION DE SÉGRÉGATIONS THERMIQUES LONGITUDINALES

rature minimum sur le profil STL courant. Ce terme permet de pénaliser les pixels dont la température est éloignée de celle du minimum. L'utilisation de l'angle θ permet de réduire les déplacements horizontaux. Pour un déplacement exclusivement vertical, l'angle θ est égal à zéro. La valeur de θ augmente avec l'augmentation du déplacement horizontal pénalisant ainsi ces déplacements. Il favorise le chemin vertical. On suppose que le finisseur se déplace dans la direction verticale. Enfin, *distance virage* correspond au nombre de profils de températures parcourus sans effectuer aucun changement de direction. Ce terme permet de réduire le nombre de changements d'orientation et favorise donc, comme l'angle, la linéarité. Les termes α , β et λ permettent de modifier l'influence de chaque critère. Ainsi, plus l'un de ces termes est élevé, plus le critère qui lui est associé a de l'importance lors du calcul du coût.

Chapitre 4

Résultats

Il est important que les systèmes développés dans ce mémoire soient testés dans des conditions réelles. En effet, ces systèmes sont développés dans l'optique qu'ils soient utilisés par le MTQ sur les chantiers. Or, en fonction des sorties des systèmes, le MTQ pourrait retenir une somme monétaire pour chaque non-conformité détectée. Pour cette raison, il est primordial que les logiciels détectent le moins de faux positifs possible. Dans le cas présent, un faux positif correspond à la détection d'une zone de faiblesse alors qu'elle ne l'est pas. À l'inverse, un faux négatif correspond à la non-détection d'une zone de faiblesse existante. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons implémenté les spécifications données par le MTQ et nous avons produit un logiciel ouvert. Ce dernier peut être paramétré par le MTQ afin de minimiser la détection de faux positifs et de faux négatifs.

Ce chapitre explique les tests qui ont été effectués afin de valider le bon fonctionnement des logiciels. Il est divisé en deux sections. La première se concentre sur les procédures de tests ainsi que les résultats obtenus en utilisant le système expliqué dans le chapitre 2. La seconde se concentre sur le système décrit au chapitre 3. Notons que ce second système est encore au stade de démo technique et qu'il n'est pas encore utilisé par le MTQ.

4.1 Validation du système de détection des défauts de pose de l'enrobé bitumineux

4.1.1 Le système

Le système décrit au chapitre 2 a été complètement développé dans le langage de programmation C sharp. Il a été testé sur un pentium 4 avec un processeur i5 à 3.30 GHz et 8 GB de mémoire vive.

4.1.2 Les données

Les images utilisées dans les tests proviennent d'une collection d'images du MTQ. Il s'agit d'images ayant été prises directement sur des chantiers lors de l'épandage de l'enrobé bitumineux. Elles proviennent de plusieurs modèles de caméras de deux fabricants distincts : Flir et Fluke. Ces deux marques de caméra infrarouge sont fréquemment utilisées par le MTQ. La collection utilisée comprend 345 images. Chaque image a une des quatre dimensions suivantes : 320 par 240, 160 par 120, 200 par 150 ou 240 par 180 pixels. L'utilisation d'images de différentes dimensions lors des tests permet de vérifier que le système s'adapte bien à différentes résolutions d'image. La collection d'images fournie est suffisamment variée pour pouvoir tester efficacement tous les algorithmes développés pour le système. Elle contient 164 images d'enrobé tiède et 181 images d'enrobé chaud. L'enrobé tiède étant plus froid, le seuil utilisé lors de la détection de zones froides est plus bas sur ce type d'enrobé. Aussi, le nombre de R-voies présentes sur une image varie d'une à trois. La Figure 4.1 présentent des exemples d'images qui ont été utilisées pour tester le système. Elle permet de constater la grande variation des prises de vue possibles entre les différentes images. Par exemple, les images 4.1b et 4.1c comportent chacune deux R-voies, mais les deux finisseurs ne sont bien visibles que sur la première image. Aussi, seules la base du finisseur et une petite portion de l'enrobé bitumineux sont visibles sur l'image 4.1e. Ces grandes variations sont dues aux différents points de vue utilisés lors de la prise des photos. Sur l'image 4.1f, il peut être intéressant de constater le changement d'intensité entre la partie supérieure et inférieure de l'image. Sur cette image, la partie inférieure de l'image est une zone froide. Ce phénomène apparaît habituellement lorsque le ca-

4.1. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX

mion qui déverse l'enrobé dans le finisseur est remplacé par un autre camion et qu'il y a un délai d'attente provoquant l'arrêt du finisseur.

La grande variation de prises de vue possibles entre les images constitue une problématique. Par exemple, une image étant prise de manière perpendiculaire à la chaussée peut être difficile à analyser pour le système. En effet, ceci peut nuire à l'algorithme de détection de zone de pavage ainsi qu'à l'algorithme de détection de STL qui considère les STL comme étant presque verticales. Aussi, il arrive que le finisseur ne soit presque pas visible sur l'image. La quasi-absence de finisseur sur l'image peut rendre difficile la détection de la zone de pavage. Parmi les images fournies, plusieurs comportent des zones non conformes à l'extérieur de la zone de pavage. Une mauvaise détection de la zone de pavage sur ces images se traduit généralement par un faux positif en sortie. Ce type de faux positif n'est pas nuisible puisque la personne responsable de l'analyse devrait constater que la zone non conforme n'est pas dans la zone de pavage. Elle ne devrait donc pas en tenir compte. Toutefois, afin d'assurer la crédibilité des résultats du logiciel, il serait préférable que ces zones ne soient pas détectées.

Le MTQ demande à ce que la base du finisseur soit présente sur l'image. Aussi, il exige que l'opérateur de la caméra soit situé derrière le finisseur en bordure de l'enrobé. Malgré tout, il arrive que la portion visible du finisseur soit minime comme illustré sur l'image 4.1f ou sur l'image 4.1a. Ces exigences diminuent le risque de rencontrer un des cas problématiques énoncés précédemment. Les images ne répondant pas à ces critères sont rejetées par le MTQ. Par contre, il peut être intéressant de voir si le système parvient à les analyser correctement.

4.1.3 Méthodologie

Afin de tester le système, nous avons d'abord analysé manuellement chacune des images avec la méthode décrite dans la section 2.2. En plus de détecter les zones non conformes, nous avons également identifié les endroits où devraient survenir les séparations des R-voies sur les images ayant plusieurs R-voies. Connaître l'emplacement des lignes de séparation permet de valider l'algorithme de segmentation de la zone de pavage. Ensuite, chaque image a été analysée par le système. Le système est

4.1. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX

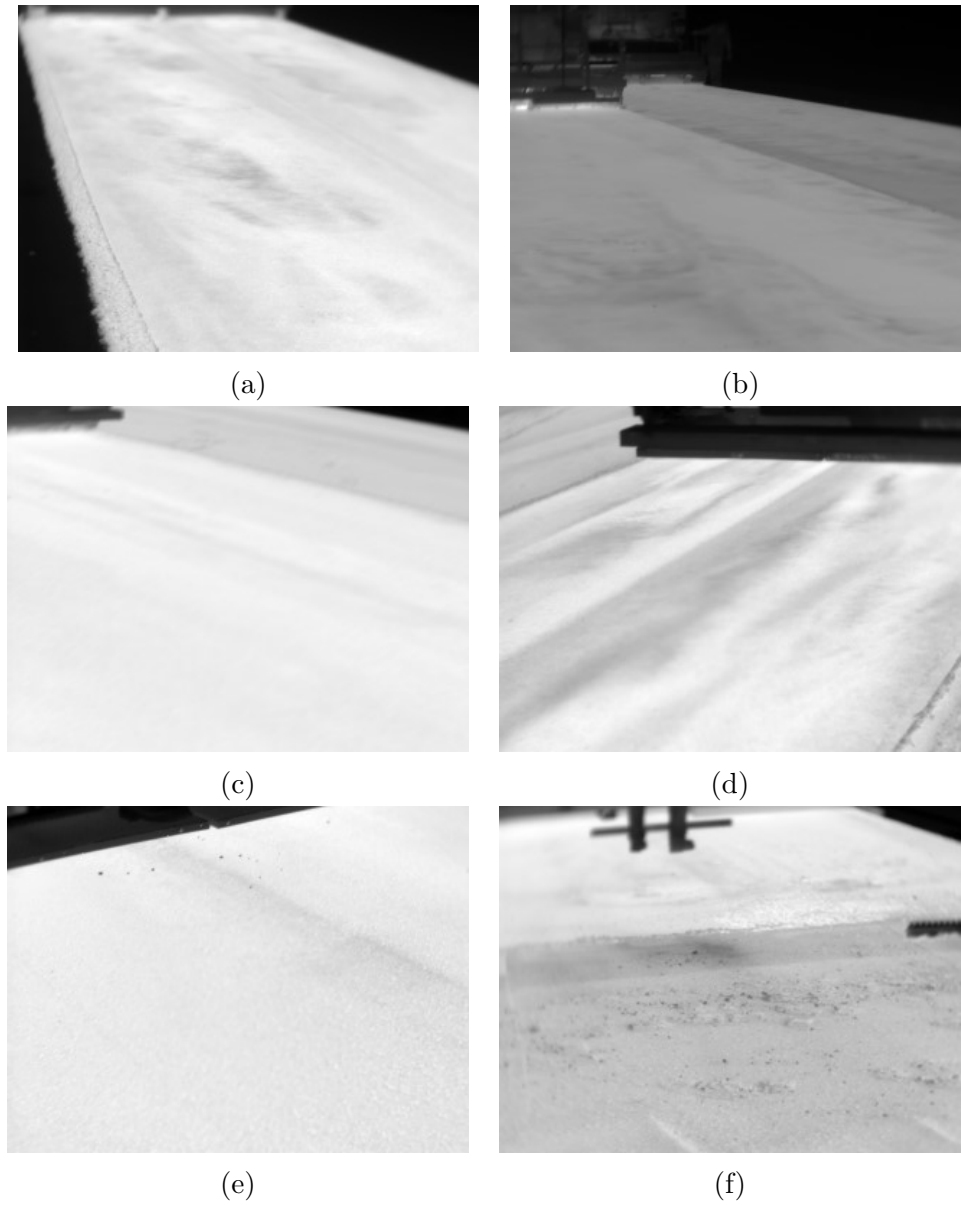


Figure 4.1 – Différentes images utilisées pour effectuer les tests.

4.1. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX

évalué en comparant les résultats obtenus par ce dernier avec les résultats de l'analyse manuelle. Les résultats de l'analyse manuelle sont considérés comme étant les résultats escomptés. Ainsi, une différence entre les résultats obtenus par le système et les résultats de l'analyse manuelle implique qu'une erreur a été commise par le système. Les erreurs pouvant être commises par le système sont les suivantes :

- détection d'une zone non conforme localisée à l'extérieur de la zone de pavage,
- détection d'une zone non conforme inexistante (faux positif),
- non-détection d'une zone non conforme (faux négatif).

La détection d'une zone non conforme à l'extérieur de la zone de pavage implique une mauvaise détection de cette dernière. En effet, cela signifie que les pixels de la zone de pavage proviennent de plusieurs R-voies ou que la mauvaise R-voie a été détectée. Les zones se trouvant à l'extérieur de la zone de pavage n'ont pas d'intérêt pour le MTQ et ne devraient donc pas être détectées. Ensuite, il est possible que le système détecte une zone non conforme alors que celle-ci est inexistante. Le MTQ pouvant retenir une somme monétaire lors de la détection d'une non-conformité, il est souhaitable que ce type d'erreur survienne le moins souvent possible. Enfin, un faux négatif survient lorsque le système ne parvient pas à détecter une zone non conforme existante. Toutefois, un faux négatif étant moins grave qu'un faux positif pour le MTQ, le système est paramétré afin de minimiser le nombre de faux positifs. Ce paramétrage a été effectué sur la base de trois années de tests en chantiers sur des milliers d'images par le MTQ. Ce faisant, le système détecte un moins grand nombre de zones non conformes et il risque donc d'atteindre un taux de faux négatif plus élevé.

Tel que décrit précédemment, il est possible que la zone de pavage détectée soit erronée. Toutefois, le résultat de l'analyse obtenu peut être le bon, c'est-à-dire que les zones non conformes détectées correspondent à celles trouvées lors de l'analyse manuelle. Ceci peut se produire lorsque la zone de pavage détectée contient, par exemple, plusieurs R-voies. Si aucune zone non conforme n'est détectée sur les R-voies à l'extérieur de la zone d'intérêt, alors il est probable que le résultat obtenu soit le même que le résultat de l'analyse manuelle. Afin de tester l'efficacité de l'algorithme de détection de la zone de pavage, les zones de pavage détectées par le système sont validées à partir des lignes de séparation trouvées lors de l'analyse manuelle. Pour

4.1. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX

ce faire, le contour trouvé par le système a été superposé aux images. Si ce dernier passe par les lignes de séparation trouvées manuellement, alors il est valide. Il s'agit du contour cernant la plus grande des R-voies.

En plus des erreurs, d'autres critères de qualité peuvent être utilisés pour évaluer le système dont :

- les critères de performance,
- la portabilité du système,
- la robustesse du système,
- l'ergonomie informatique,
- etc.

Il existe plusieurs critères de performance pouvant être utilisés afin d'évaluer un système. Par exemple, pour le logiciel d'analyse d'image, le temps d'analyse d'une image ou la précision sur la localisation des zones pourraient être utilisés. La portabilité correspond à la capacité du système à pouvoir être adapté à d'autres environnements d'exécution. Le logiciel étant développé en C#, il est difficilement adaptable à d'autres environnements que l'environnement Windows. Les critères basés sur l'ergonomie informatique permettent d'évaluer l'interaction entre un usager et le système. Par exemple, l'utilité du système ou sa convivialité peuvent être évaluées. L'analyseur Thermo est présentement en essai sur plus de dix chantiers. Les retours des utilisateurs du système permettront d'évaluer le système selon ces deux derniers critères et permettront l'amélioration de celui-ci.

Dans ce mémoire, le système est évalué selon les critères suivants : la proportion d'erreurs commises et le temps d'analyse des images. D'autres critères tels que ceux discutés précédemment auraient pu être utilisés, mais le MTQ ne les juge pas prioritaires.

4.1.4 Résultats obtenus

Trouver la bonne zone de pavage est essentiel afin de diminuer le taux de faux positifs et le taux de faux négatifs. Lors de la détection de la zone de pavage, la zone résultante est erronée si elle comprend plus d'une R-voie ou si elle ne comprend pas la totalité de la R-voie d'intérêt. Dans le premier cas, la zone de pavage est trop

4.1. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX

grande et le risque de faux positifs est donc plus élevé. Dans le second cas, la zone de pavage est trop petite et le risque d'ignorer des zones non conformes est donc plus élevé. Comme les algorithmes de détection de zones froides, de zones chaudes et de STL sont influencés par la zone de pavage détectée, les résultats de détection de l'algorithme de détection de zone pavage sont d'abord présentés.

Le système est parvenu à trouver la bonne zone de pavage sur 309 images parmi les 345 testées. Il s'agit d'un taux de réussite d'environ 89.6%. Par contre, lorsque la zone de pavage détectée est erronée, il s'agit souvent d'une erreur négligeable. En effet, il arrive que plusieurs R-voie soient visibles sur l'image, mais qu'une d'entre elles soit très petite. Ce phénomène peut être vu sur la Figure 4.2. Sur cette dernière, le contour trouvé est en rouge. Il comprend la seconde R-voie visible en haut à gauche de l'image (en gris légèrement plus foncé). Vu la petite taille de cette R-voie, il est peu probable qu'elle contienne une non-conformité. Parmi les 36 zones de pavage erronées, 20 incluent une R-voie dont l'aire est négligeable.



Figure 4.2 – Mauvaise détection de la zone de pavage puisque la seconde R-voie (visible en haut à gauche) a été incluse dans la zone de pavage.

Parmi les 16 zones de pavage erronées restantes, 12 incluent une seconde R-voie dont l'aire n'est pas négligeable. Un exemple peut être vu sur la Figure 4.3. Sur cette image, le système n'a pas pu déterminer si la ligne de séparation entre les deux R-voie était une STL. Il a donc privilégié ne pas effectuer la division. Dans de telles situations, il est possible que le système détecte des non-conformités sur la mauvaise R-voie. Il

4.1. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX

peut être possible d'obtenir une bonne détection en modifiant les paramètres du système. La frontière pouvant être mince entre une bonne détection et une mauvaise détection, modifier les paramètres pourrait améliorer le résultat pour une image, par contre, ceci pourrait également entraîner une mauvaise détection sur des images qui ont été auparavant correctement analysées. Ainsi, chaque fois qu'un paramètre est modifié, il est nécessaire de tester le système de nouveau. Les paramètres actuels ont été choisis dans l'optique d'obtenir de bons résultats sur le plus grand nombre d'images possible et de minimiser les faux positifs.

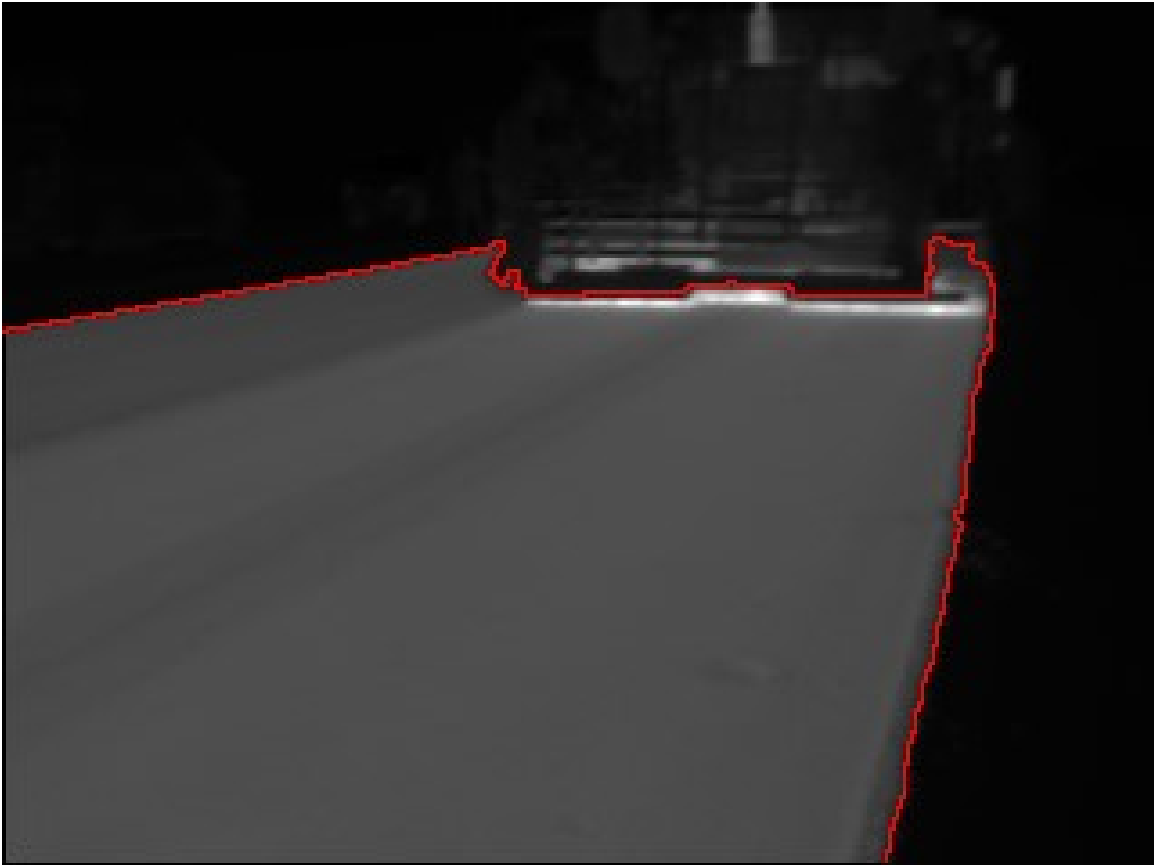


Figure 4.3 – Erreur commise lors de la détection de la zone de pavage.

Finalement, il est possible qu'une partie de la zone d'intérêt soit éliminée lors de la détection de la zone de pavage. C'est le cas des quatre zones de pavage erronées restantes. La zone de pavage résultante est mauvaise puisqu'elle ne contient

4.1. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX

possiblement pas toutes les non-conformités de la zone d'intérêt. Une telle situation s'accompagne souvent de faux négatifs. Un exemple peut être vu sur la Figure 4.4. Il s'agit d'une image d'enrobé tiède. Sur celle-ci, une grande zone froide est présente en bas à gauche. Elle n'a pas été incluse dans la zone de pavage. La température de cette zone froide est inférieure à celle du seuil utilisé pour déterminer si un pixel fait partie ou non de l'enrobé bitumineux (voir section 2.5). C'est pourquoi elle n'est pas incluse dans la zone de pavage. Ainsi, réduire la valeur du seuil pourrait permettre d'obtenir une bonne détection. Par contre, un seuil trop bas pourrait entraîner l'inclusion, dans la zone de pavage, d'objets ne faisant pas partie de l'enrobé bitumineux. Toutefois, l'algorithme pourrait également être amélioré en considérant que le bord la chaussée est une droite. Ceci permettrait de corriger la zone trouvée afin d'y inclure les zones froides en bordure.

Tel que mentionné précédemment, il est possible que le finisseur ne soit pas visible sur l'image. Dans un tel cas, la détection de la zone de pavage peut devenir très difficile. Un exemple d'une telle situation peut-être vu dans la Figure 4.5. Sur celle-ci, on constate que l'algorithme a effectué une séparation lors de la détection de la zone de pavage. Toutefois, le manque d'information sur l'image rend difficile la validation de la zone de pavage trouvée par l'algorithme. Il est possible que la division effectuée soit la bonne, par contre, il se pourrait qu'elle soit sur une STL. Ce type d'image devrait être rejeté par le MTQ. Notons qu'un expert n'ayant aucune connaissance de la scène lors de la capture de l'image aurait de la difficulté à déterminer s'il s'agit d'une STL ou d'une séparation entre deux R-voies.

Afin de tester les algorithmes de détection de zones froides, de zones chaudes et de STL, les images dont la bonne zone de pavage a été trouvée ont d'abord été utilisées. Les résultats utilisant la totalité des images seront ensuite présentés. Sur les 309 images ayant une zone de pavage bien circonscrite, 73 zones froides et une zone chaude ont été détectées par le système. Avec l'analyse manuelle, nous avons trouvé 70 zones froides et une zone chaude. Les zones trouvées manuellement correspondent aux zones trouvées par le système. Ainsi, aucune erreur n'a été commises lors de la détection des zones chaudes et trois erreurs ont été commises lors de la détection des zones froides. Il s'agit d'un taux de succès de 95.9% pour les zones froides et de 100% pour les zones chaudes. Les zones froides erronées qui ont été trouvées correspondent

4.1. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX



Figure 4.4 – Mauvaise séparation où une partie de la zone d'intérêt est ignorée.

4.1. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX

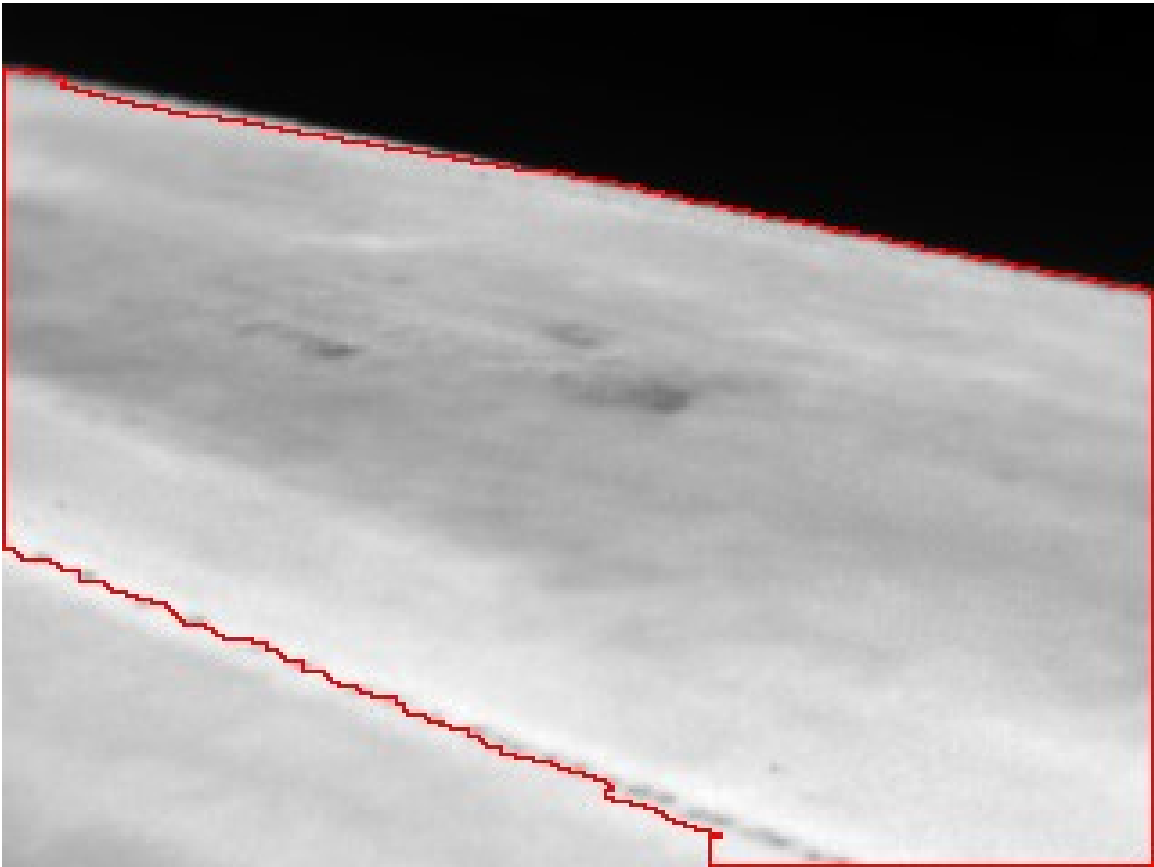


Figure 4.5 – Image sur laquelle le finisseur n'est pas visible.

4.1. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX

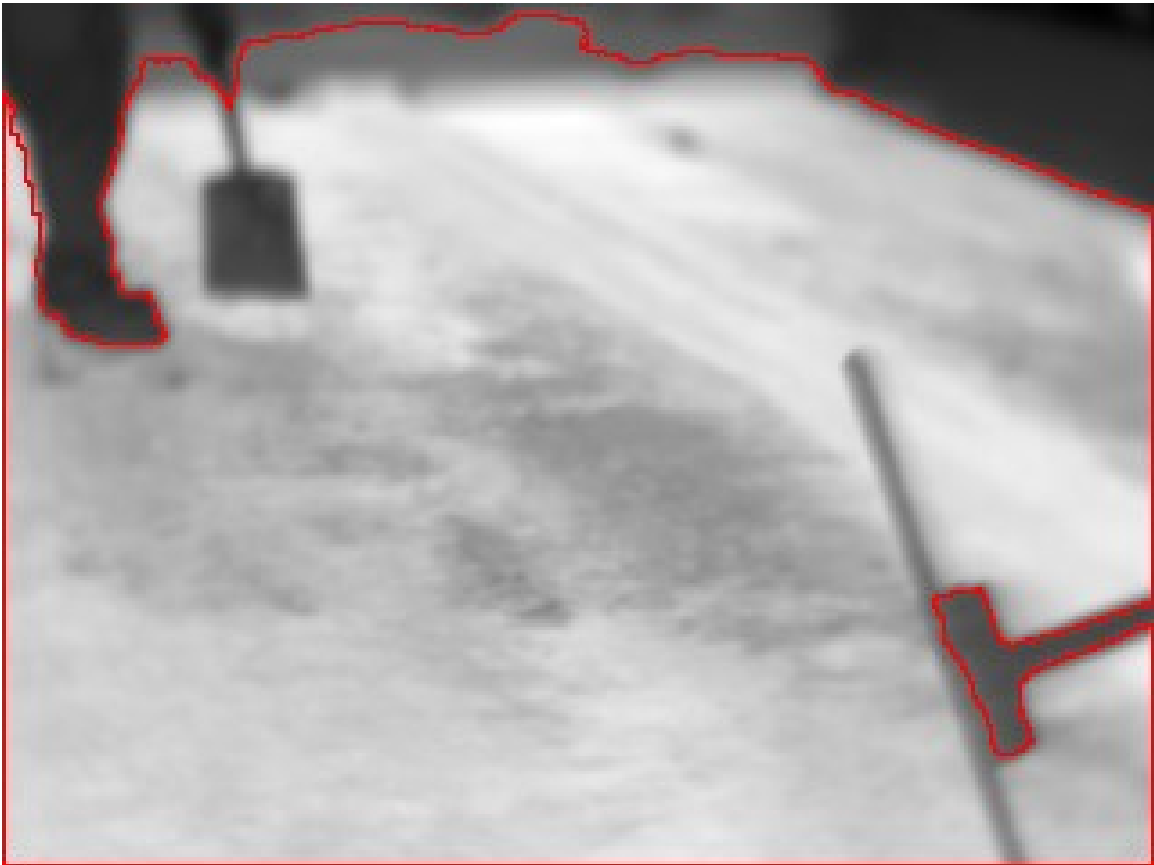


Figure 4.6 – Image avec un faux positif. Ici, la pointe de la pelle est détectée comme une zone froide.

à des objets froids sur la chaussée. Par exemple, sur la Figure 4.6, un être humain tenant une pelle est visible. On constate que la zone de pavage contourne la personne. Par contre, le bout de la pelle est inclus dans la zone. Celui-ci, étant froid, est détecté incorrectement comme étant une zone froide. Dans une telle situation, l'opérateur de la caméra serait en mesure de constater l'erreur et de considérer la validité de l'image.

Nous avons détecté 59 STL en utilisant l'analyse manuelle. Parmi ces 59 STL, 57 ont été détectées avec succès par le système, soit un taux de succès de 96.6%. Sur la Figure 4.7, un exemple d'image où une STL a été détectée par l'analyse manuelle, mais pas par le système peut être vue. La STL est indiquée dans l'image 4.7b par une ligne noire. Au total, les erreurs de détection de zones froides et de STL ont été commises sur 5 images.

4.1. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX

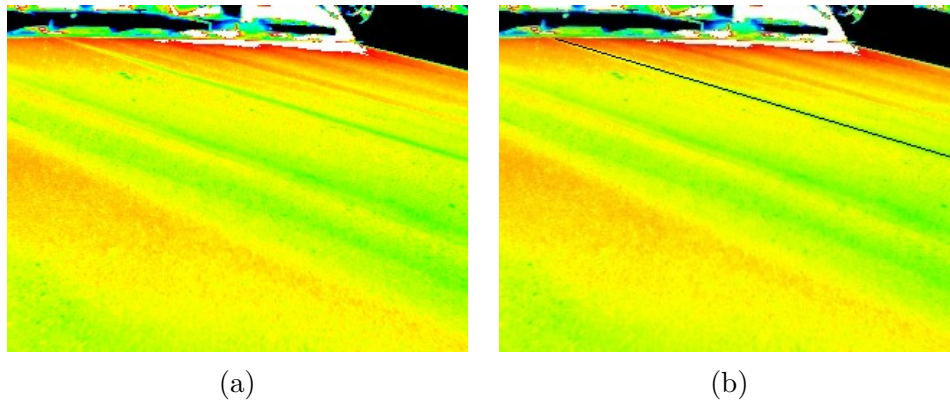
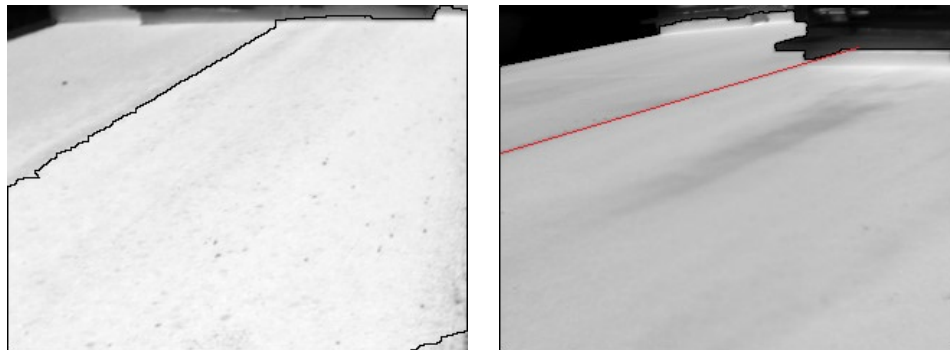


Figure 4.7 – STL détectée par l'analyse manuelle, mais pas par le système. La STL est tracée en noir sur l'image b.

Sur les 36 images dont la zone de pavage est erronée, sept zones froides et cinq STL ont été trouvées avec l'analyse manuelle. Aucune zone chaude n'a été détectée. Le système a détecté six STL et quatre zones froides. Quatre des cinq STL trouvées manuellement ont été trouvées par le système. La cinquième STL ne se trouve pas dans la zone de pavage conservée par le système. En effet, le système a effectué une division sur la STL comme illustré sur la Figure 4.8a. Dans cette figure, le contour trouvé est en noir. Le contour gauche correspond à une STL. De plus, le système a trouvé deux STL supplémentaires à la jonction de deux R-voies. Il s'agit de l'endroit où la zone de pavage aurait dû être séparée. Une telle situation peut être vue sur la Figure 4.8b où le contour est en noir et la STL trouvée en rouge. Les quatre zones froides trouvées par le système se situent dans la partie erronée de la zone de pavage. Elles correspondent donc à des faux positifs. Un exemple peut être vu sur la Figure 4.9. Sur celle-ci, les zones froides trouvées apparaissent en bleu. Les zones froides que nous avons trouvées avec l'analyse manuelle n'ont pas été trouvées par le système puisqu'il ne les a pas incluses dans la zone de pavage. Par exemple, sur la Figure 4.4, la partie ignorée à gauche de la zone de pavage est une zone froide. Au total, les résultats de neuf des 36 images diffèrent des résultats de l'analyse manuelle. Ainsi, 75.0% des images ayant mal détecté la zone de pavage ont bien été analysées.

Au total, sur les 345 images testées, 331 parviennent au bon verdict, soit un taux de réussite d'environ 96.0%. Le MTQ a également effectué des tests sur une banque

4.1. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX



(a) Mauvaise détection de la zone de pavage, car la R-voie a été séparée sur une STL. (b) STL détectée sur la jonction de deux R-voies.

Figure 4.8 – Erreurs de détection de STL dues à une mauvaise détection de la zone de pavage.

de plus de 3100 images provenant des chantiers. Il affirme que le système obtient le même résultat que l'expert du MTQ pour 98.0% des images.

Finalement, le temps d'analyse requis pour chaque image est important. En effet, s'il faut plus de temps pour l'analyse automatique qu'il en faut pour effectuer une analyse manuelle, alors l'intérêt du système en est diminué. Le système prend en moyenne 3.6 secondes par image. Évidemment, le temps d'analyse dépend grandement des dimensions de l'image. Pour les images 160x120, il faut en moyenne trois secondes pour l'analyse alors que pour les images 320x240 il faut en moyenne dix secondes. Le temps le plus long enregistré est d'environ 22 secondes. Il s'agit d'une image 320x240 pour laquelle beaucoup de paires de coins candidates permettant de délimiter la zone de pavage ont été trouvées. La plus grande partie du temps d'analyse sert à tester chacune des paires de coins et à sélectionner la meilleure paire possible. Bien que l'analyse ne soit pas instantanée, elle reste plus rapide qu'une analyse manuelle. En effet, il faut près de cinq minutes pour analyser manuellement une image. Néanmoins, le code pourrait certainement être optimisé afin diminuer le temps de calcul. Il pourrait également être intéressant d'implémenter certains algorithmes sur le processeur graphique (GPU). L'utilisation du GPU permettrait une parallélisation efficace des calculs les plus coûteux et permettrait probablement une analyse en temps réel. Le logiciel est actuellement en phase d'essais sur les chantiers. Les retours des

4.1. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX

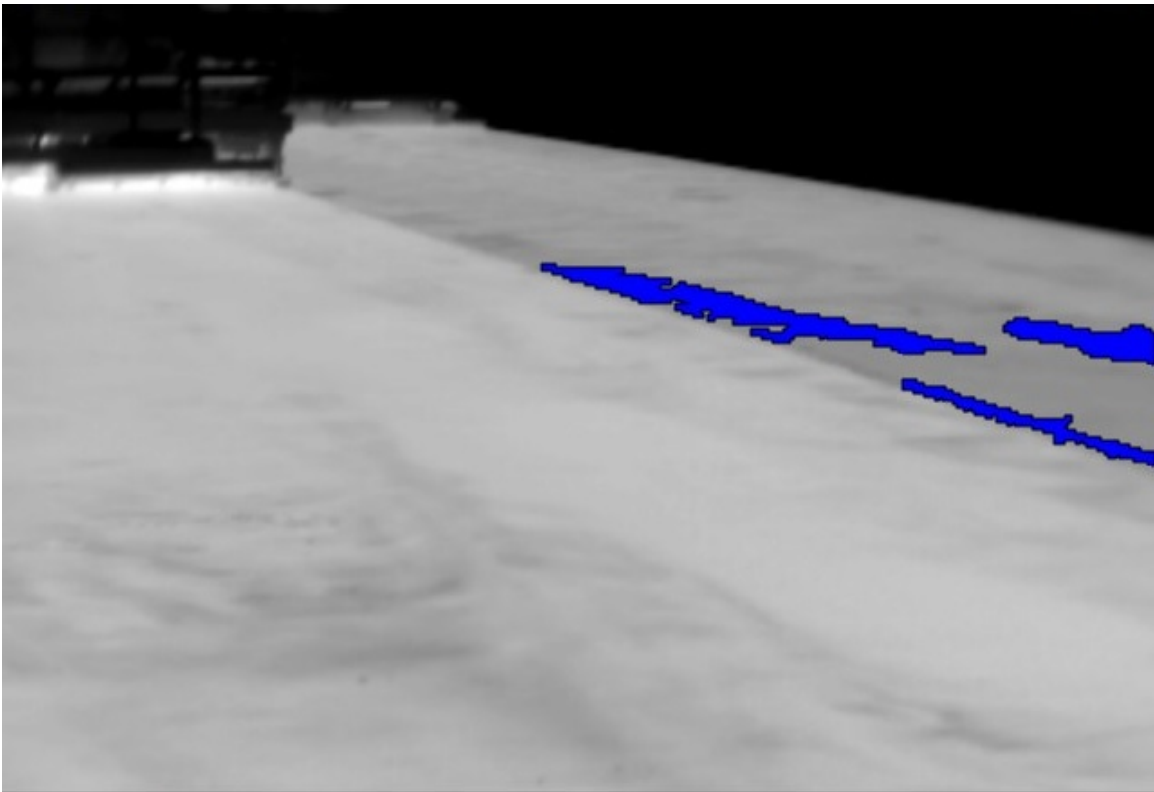


Figure 4.9 – Zones froides détectées dans la mauvaise R-voies.

4.2. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX PAR L'ACQUISITION DE DONNÉES EN CONTINU

utilisateurs vont permettre l'amélioration du système.

4.2 Validation du système de détection des défauts de pose de l'enrobé bitumineux par l'acquisition de données en continu

4.2.1 Le système

Les algorithmes développés ont été intégrés au système développé par le MTQ. Ce système étant codé en C sharp, les algorithmes expliqués dans le chapitre 3 ont été implémentés dans le même langage afin de faciliter l'intégration. Ce système a été testé sur un pentium 4 avec un processeur i5 à 3.30 GHz et 8 GB de mémoire vive.

4.2.2 Les données

Afin de tester le système d'anticipation en continu, trois fichiers de données ont été utilisés. Ces fichiers ont été fournis par le MTQ et correspondent à des données réelles acquises par un scanner sur le chantier. Dans les fichiers de données, chaque ligne correspond à un profil de températures et contient 652 données. Le premier fichier comporte 19335 profils de températures. Pour le scanner, ceci correspond à une distance parcourue d'environ 387 mètres. Le second fichier contient 24306 profils de températures et le dernier, 4422. Chaque fichier contient une scène différente.

4.2.3 Méthodologie

Afin de valider les résultats obtenus, nous avons analysé manuellement les fichiers de données avec une méthode similaire à celle décrite dans la section 2.2. Pour ce faire, un logiciel développé par le MTQ a été utilisé. Ce dernier comporte des outils permettant de connaître la température minimale, moyenne et maximale d'un segment de droite ou d'un rectangle. Ainsi, en positionnant un rectangle sur une zone potentiellement froide, on peut vérifier si la température moyenne est inférieure au seuil froid. Si c'est la cas, nous confirmons la présence d'une zone froide. Il est aussi

4.2. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX PAR L'ACQUISITION DE DONNÉES EN CONTINU

possible de tracer plusieurs segments sur les axes des STL possibles. Si le minimum est positionné sur l'axe et que la différence entre celui-ci et le maximum est supérieure à un seuil, alors on considère qu'il y a une STL. Les résultats obtenus avec l'analyse manuelle sont considérés comme les résultats escomptés. Ces résultats sont comparés aux résultats obtenus par le système d'anticipation. Le système est considéré comme ayant commis une erreur s'il n'obtient pas les résultats escomptés. Deux types d'erreurs qui intéressent le MTQ existent :

- détection d'une zone non conforme inexistante (faux positif),
- non-détection d'une zone non conforme (faux négatif).

Il s'agit des mêmes erreurs expliquées précédemment pour le premier système (section 2). Notons toutefois qu'il n'est plus possible de détecter une zone non conforme à l'extérieur de la zone de pavage. En effet, la zone couverte par le scanneur correspond à la zone d'intérêt.

En plus de tester l'efficacité du système à détecter les zones non conformes, il est nécessaire de s'assurer qu'il parvient à effectuer l'analyse en temps réel. Afin de répondre à cette contrainte, nous avons simulé le fonctionnement du scanneur. Pour ce faire, un profil de températures est récupéré dans le fichier à un intervalle de temps régulier. Cet intervalle a été sélectionné de telle sorte qu'il faut le même temps pour obtenir le profil de températures à partir du fichier qu'il en faut pour l'obtenir avec le scanneur. Ce profil est ensuite transféré au système. Afin de répondre à la contrainte de temps réel, le système doit terminer l'analyse du profil avant qu'un autre profil soit acquis.

4.2.4 Résultats obtenus

Lors de la simulation, le système est parvenu à analyser chaque profil de températures et à afficher les résultats en temps réel. En général, le système parvient aux mêmes résultats que l'analyse manuelle. Au total, 13 zones froides ont été détectées par l'analyse manuelle. Le système est parvenu à détecter ces 13 zones. Sur la Figure 4.10, une zone froide (en noir) détectée par le système peut être vue. Toutefois, il a également détecté cinq zones froides supplémentaires. Ces zones supplémentaires correspondent à des personnes traversant l'enrobé et ayant été captées par le

4.2. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX PAR L'ACQUISITION DE DONNÉES EN CONTINU

scanneur. Tel qu'expliqué précédemment, la température d'une personne étant beaucoup plus froide que l'enrobé, celle-ci est détectée comme étant une zone froide. Un exemple peut-être vu sur la Figure 4.11. Sur celle-ci, les zones froides sont en noir et correspondent à des personnes en mouvement. Étant donné que la température des personnes est moins élevée que celle d'une zone froide, il serait possible d'éviter leur détection en utilisant un seuil minimum. Ainsi, si la température moyenne de la zone est trop basse, alors celle-ci pourrait être éliminée. En bref, le système est parvenu à détecter les zones froides avec une précision de 0.72 et un rappel de 1. Ici, la précision correspond au nombre de zones froides pertinentes trouvées par rapport au nombre total de zones froides trouvées par le système. Le rappel correspond au nombre de zones froides correctement détectée par rapport au nombre total de zones froides présentes sur les images. Aucune zone chaude n'a été détectée ni par le système ni par l'analyse manuelle.

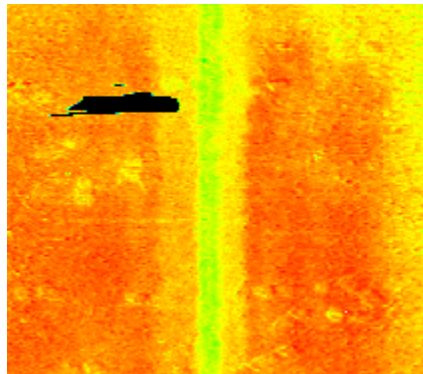


Figure 4.10 – Zone froide (en noir) détectée par le scanneur.

La plupart des STL trouvées par le système correspondent à celles trouvées dans l'analyse manuelle. Dans les trois fichiers confondus, un total de 20 STL ont été trouvées lors de l'analyse manuelle. Le système est parvenu à détecter 19 de ces STL. La seule STL n'ayant pas été trouvée peut être considérée comme un cas limite. En effet, les différences de températures calculées sont très proches du seuil. Aussi, en étudiant les différences le long de la STL, nous constatons la présence de plusieurs différences inférieures au seuil. Étant donné que la présence de cette STL est discutable, il est probablement préférable que le système ne l'ait pas trouvée. Elle est illustrée sur la Figure 4.12.

4.2. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX PAR L'ACQUISITION DE DONNÉES EN CONTINU

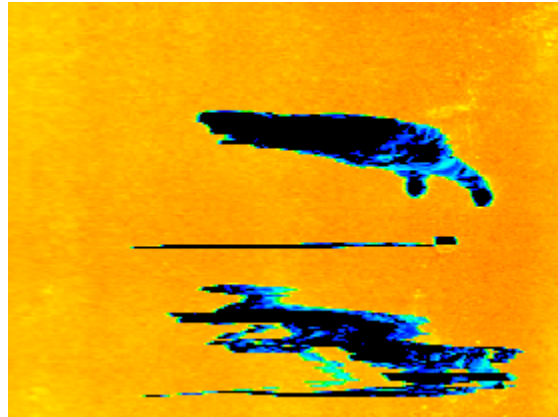


Figure 4.11 – Être humain présent sur l'enrobé et détecté comme zone froide.

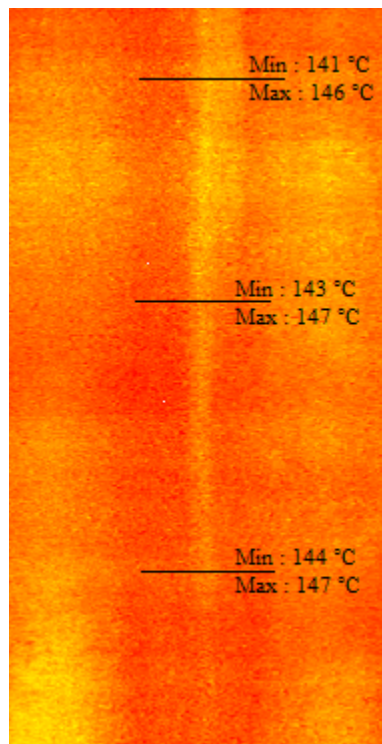


Figure 4.12 – STL rejetée par le système en raison des différences trop faibles entre les températures maximales et minimales. Sur l'image, les températures maximales et minimales de trois profils (en noir) sont illustrées.

4.2. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX PAR L'ACQUISITION DE DONNÉES EN CONTINU

Aussi, les points de départ et d'arrivée des STL trouvées par le système correspondent généralement à ceux trouvés lors de l'analyse manuelle. Toutefois, sur deux des 19 STL trouvées, le point de départ est incorrect. En effet, sur la Figure 4.13a, une des STL fautives peut être vue. Cette dernière apparaît en rouge sur l'image. Un déplacement horizontal non négligeable est clairement visible au début de la STL. Une fois l'axe de la STL atteint, la variation horizontale devient très minime. Le point choisi comme point de départ est toutefois un minimum et il est cerné par deux maxima. Ainsi, il pourrait très bien faire partie d'une STL. En raison de sa proximité avec la STL, il a été connecté à celle-ci et donc conservé. Cette erreur est due à la nature de la méthode proposée, c'est-à-dire la prédiction. Le même phénomène peut-être observé sur la Figure 4.13b. Il serait possible d'ajuster le point de départ en vérifiant la linéarité de la STL à chaque fois qu'un certain nombre de profils sont ajoutés. Enfin, il est important de noter qu'aucune STL non présente n'a été détectée dans les trois fichiers.

En bref, le système d'anticipation par scanner infrarouge permet la détection efficace des zones non conformes pouvant être présentes sur l'enrobé bitumineux. De plus, l'analyse est exécutée en temps réel, c'est-à-dire que chaque nouveau profil de températures est analysé complètement avant qu'un nouveau profil soit acquis. Il faut en moyenne 0.028 seconde pour analyser un profil alors qu'il y a 0.3 seconde entre l'acquisition de chaque profil. Les zones non conformes sont directement affichées à l'écran. L'opérateur peut ensuite ajuster les équipements afin d'éviter l'apparition d'autres de zones de faiblesse.

4.2. VALIDATION DU SYSTÈME DE DÉTECTION DES DÉFAUTS DE POSE DE L'ENROBÉ BITUMINEUX PAR L'ACQUISITION DE DONNÉES EN CONTINU

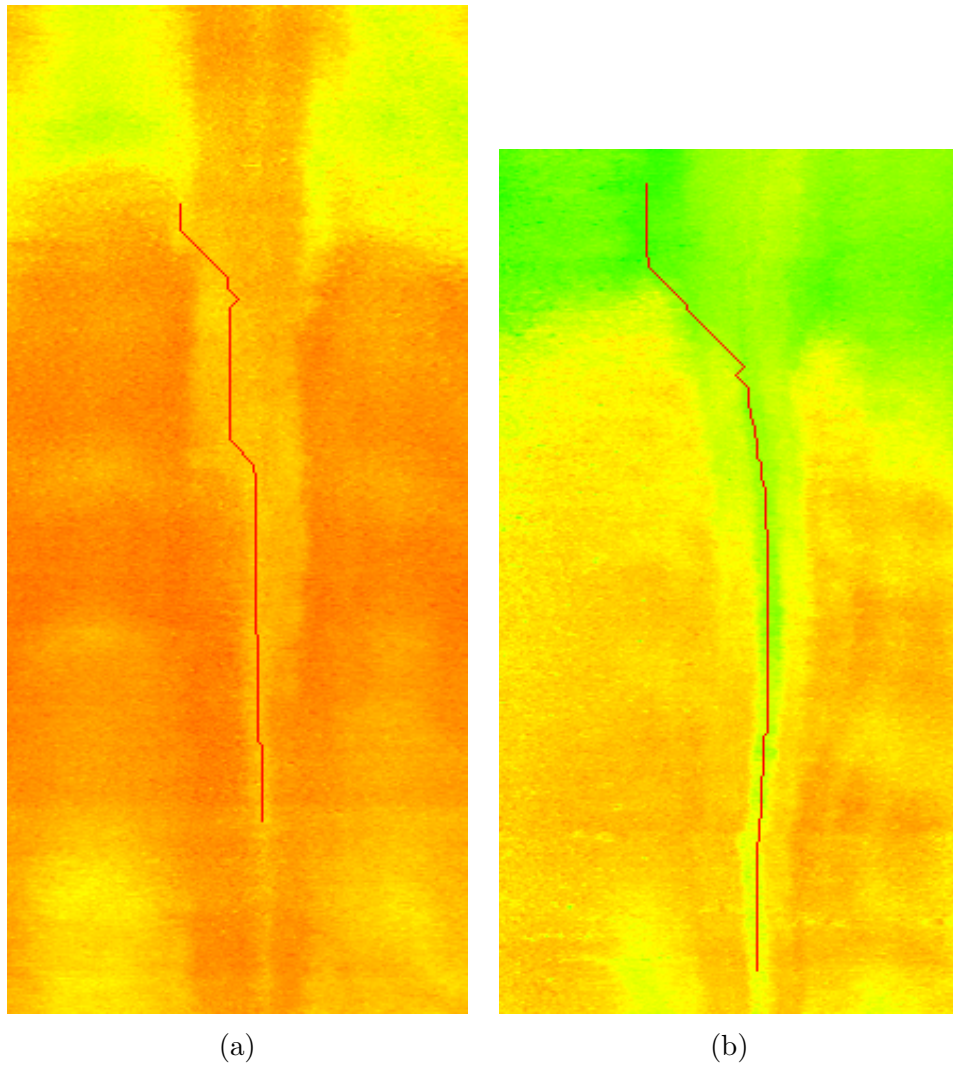


Figure 4.13 – STL ayant un mauvais point de départ. Les STL débutent dans le haut de l'image.

Conclusion

Ce mémoire présente deux systèmes permettant l'anticipation des nids-de-poule et des fissures lors de la pose de l'enrobé bitumineux. Ces systèmes permettent d'accroître la fiabilité du contrôle de la qualité tout en réalisant des économies substantielles. Ils ont pour objectif la détection automatique de trois types de non-conformités pouvant être présents sur l'enrobé bitumineux : les zones froides, les zones chaudes et les STL.

Le premier système concerne l'analyse des images infrarouges prises par une personne à l'aide d'une caméra thermique. La méthode d'analyse des images peut se décrire en trois étapes. Tout d'abord, la zone de pavage est détectée. Sa détection se base sur les variations de température présentes sur les bordures de celle-ci. Ces variations impliquent un module du gradient élevé qui peut être suivi afin de délimiter la zone de pavage. Ensuite, une recherche des zones froides et des zones chaudes est effectuée. Les pixels pouvant faire partie d'une zone froide ou chaude sont trouvés par une opération de seuillage sur la zone de pavage. Un algorithme de remplissage est utilisé pour créer les zones. Finalement, la détection des STL est effectuée. Elle consiste, en premier lieu, en la détection des minima locaux dans la zone de pavage. Ceux-ci sont ensuite utilisés pour déduire les STL probables. Chaque STL probable est ensuite validée par une série de critères définis par le MTQ.

Le second système utilise un scanner fixé à l'arrière du finisseur. Ce dernier permet d'acquérir les données de température de l'enrobé bitumineux en continu. Ces données sont traitées en temps réel par la méthode présentée dans ce mémoire. Tout d'abord, chaque nouvelle ligne de données est analysée afin de détecter la présence possible de zones froides ou de zones chaudes. Si des pixels froids ou chauds sont détectés, l'hypothèse qu'une zone non conforme soit présente est émise. À chaque

CONCLUSION

nouvelle ligne de données, les hypothèses sont mises à jour jusqu'à ce qu'il soit possible de les infirmer ou de les confirmer. Enfin, la présence possible d'une STL est également recherchée sur chaque ligne de données. Une méthode de filtrage basée sur la différence de Gaussiennes est utilisée pour détecter les bornes de la STL. Dès que les bornes sont détectées sur un profil, l'hypothèse qu'une STL est présente est émise. Comme les zones froides et chaudes, elle est confirmée ou infirmée lorsqu'un nombre de données suffisamment élevé a été acquis. La STL est tracée en suivant le chemin entre les bornes de la STL qui minimise une fonction de coût.

Les deux systèmes ont été validés en utilisant des données réelles fournies par le MTQ. Ceci a permis de constater que les deux systèmes parviennent à obtenir des résultats très semblables à ceux d'un expert. Toutefois, il arrive que les systèmes confondent les objets du fond comme étant une zone froide. Aussi, en de rares occasions, une zone de pavage erronée est détectée par le premier système sur les images d'enrobés tièdes. Ce système a été testé par le MTQ sur des milliers d'images avec une grande fiabilité. Il est actuellement en essai sur plus d'une dizaine de chantiers. Le second système a été testé en simulant le fonctionnement du scanneur. Il parvient à des résultats très près de ceux de l'expert. Par contre du raffinement est encore nécessaire afin de répondre aux besoins des utilisateurs. Ces besoins doivent être davantage définis à l'aide d'essais en chantiers.

En bref, il a été montré que les deux systèmes présentés parviennent à détecter les non-conformités de manière précise, efficace et automatique.

En guise de perspective, l'utilisation d'information 3D pourrait permettre de réduire les erreurs commises par le système. La connaissance *a priori* des paramètres de la caméra et de sa position ainsi que de la position du finisseur permettrait d'améliorer la précision du système. Il serait possible, par exemple, de corriger l'effet de perspective induit par la caméra. Une fois la perspective corrigée, les côtés gauche et droit de la route seraient parallèles et la détection de la zone de pavage en serait donc facilitée.

De plus, la connaissance de la dimension d'un élément de la scène permettrait d'obtenir des mesures précises sur les zones non conformes détectées. Par exemple, en connaissant la largeur de la base du finisseur, il serait possible de déterminer précisément l'aire d'une zone froide ou la longueur d'une STL. Pour ce faire, il suffirait

CONCLUSION

de détecter la base du finisseur sur l'image et de calculer sa dimension en terme de pixels. Il serait alors facile de calculer les dimensions de n'importe quel élément de la scène. L'utilisation du finisseur implique que la base de ce dernier doit toujours être visible entièrement sur l'image. Avoir les dimensions exactes des zones non conformes permettrait d'avoir des critères d'élimination plus précis. Par exemple, il serait possible d'éliminer les zones froides en se basant sur leur surface réelle plutôt que leur surface en nombre de pixels. Enfin, la connaissance de la largeur de finisseur devrait également correspondre à la largeur de la zone de pavage. Ainsi, la sélection de la bonne zone de pavage en serait grandement facilitée. En effet, seules les paires de coins dont la distance entre chaque coin est proche de la largeur du finisseur seraient conservées. Le risque d'erreur serait donc fortement réduit.

Bibliographie

- [1] D. ANTOLOVIC, *Review of the Hough Transform Method, With an Implementation of the Fast Hough Variant for Line Detection*, Rapport technique, Indiana University, 2008.
- [2] D. BALLARD, *Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes*, Pattern Recognition, 13 (1981), p. 111 – 122.
- [3] M. BERTOZZI, A. BROGGI ET AL, *Multi Stereo-Based Pedestrian Detection by Daylight and Far-Infrared Cameras*, Augmented Vision Perception in Infrared, R. Hammoud, éd., Advances in Pattern Recognition, Springer London, 2009, p. 371–401.
- [4] I. BOUJELBEN, *Contrôle de la pose des enrobés par un système de thermographie automatisée : Détection des zones non conformes*, Rapport technique, Ecole Polytechnique de Tunisie, 2013.
- [5] Y. ÇENGEL, *Heat Transfer : A Practical Approach*, McGraw-Hill series in mechanical engineering, McGraw-Hill, 2003.
- [6] S.-Y. CHO ET N.-P. TIN, *Using infrared imaging technology for concealed weapons detection and visualization*, IEEE TENCON Conference, 2010, p. 228–233.
- [7] D. COEURJOLLY, S. MIGUET ET L. TOUGNE, *Discrete Curvature Based on Osculating Circle Estimation*, Visual Form 2001, C. Arcelli, L. Cordella et G. di Baja, édés., Vol. 2059 de Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg, 2001, p. 303–312.
- [8] C. COSMOS, *Discovery of Infrared*. http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/ir_tutorial/discovery.html. Consulté le 02-04-2014.

BIBLIOGRAPHIE

- [9] COURSGRATUITS.NET, *Cours de thermodynamique : la loi de Planck*. <http://physique.coursgratuits.net/thermodynamique/loi-de-planck.php>, 2013. Consulté le 09-04-2014.
- [10] K. G. DERPANIS ET L. LYY, *Outline of the relationship between the difference-of-Gaussian and Laplacian-of-Gaussian*, Rapport technique, York University, 2006.
- [11] N. DIAKIDES ET J. BRONZINO, *Medical Infrared Imaging*, Taylor & Francis, 2007.
- [12] J. DON BROCK ET G. RENEGAR, *SEGREGATION : Causes and Cures*, Rapport technique T-117, Astec Industries, 2003.
- [13] B. FARDI, U. SCHUENERT ET G. WANIELIK, *Shape and motion-based pedestrian detection in infrared images : a multi sensor approach*, Proceedings. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 2005, p. 18–23.
- [14] P. FOULKES, *Towards Infrared Image Understanding*, University of Oxford, 1991.
- [15] S. E. FRANKLIN, R. H. WARING, R. W. MCCREIGHT, W. B. COHEN ET M. FIORELLA, *Aerial and satellite sensor detection and classification of western spruce budworm defoliation in a subalpine forest*, Canadian Journal of Remote Sensing, 21 (1995), p. 299–308.
- [16] L. M. GALLO, P. BÖSIGER, C. J. RAGETH ET D. STUCKI, *Quantitative infrared thermography to identify varicoceles as the cause of male infertility.*, Biomed Tech (Berl), 30 (1985), p. 284–90.
- [17] G. GINESU, D. GIUSTO, V. MARGNER ET P. MEINLSCHMIDT, *Detection of foreign bodies in food by thermal image processing*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 51 (2004), p. 480–490.
- [18] C. V. HARI, J. JOJISH, S. GOPI, V. P. FELIX ET J. AMUDHA, *Mid-Point Hough Transform : A Fast Line Detection Method*, IEEE India Conference, 2009, p. 1–4.
- [19] C. HARRIS ET M. STEPHENS, *A combined corner and edge detector*, Proc. of Fourth Alvey Vision Conference, 1988, p. 147–151.

BIBLIOGRAPHIE

- [20] M. A. HEALD, *Where is the “Wien peak”?*, American Journal of Physics, 71 (2003), p. 1322–1323.
- [21] S. HERMANN ET R. KLETTE, *Global curvature estimation for corner detection*, International Conference on Image and Vision Computing, 2005, p. 272–277.
- [22] C. HILDEBRANDT, C. RASCHNER ET K. AMMER, *An Overview of Recent Application of Medical Infrared Thermography in Sports Medicine in Austria*, Sensors, 10 (2010), p. 4700–4715.
- [23] L. HOEGNER ET U. STILLA, *Thermal leakage detection on building facades using infrared textures generated by mobile mapping*, Urban Remote Sensing Event, 2009, p. 1–6.
- [24] JABBERWOCK, *Demystifying Light – Part I : Let There Be Light!* <http://jabberwockreptiles.com/demystifying-light-part-i-let-there-be-light>, 2013. Consulté le 02-04-2014.
- [25] M. JIAN-WEI ET F. YU-HUA, *Face segmentation algorithm based on ASM*, IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, Vol. 4, 2009, p. 495–499.
- [26] T. KANUNGO, D. MOUNT, N. NETANYAHU, C. PIATKO, R. SILVERMAN ET A. WU, *An efficient k-means clustering algorithm : analysis and implementation*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 24 (2002), p. 881–892.
- [27] R. KEYES, *Optical and infrared detectors*, Topics in applied physics, Springer-Verlag, 1980.
- [28] G. KIRCHHOFF ET T. . FRANCIS, *On the Relation Between the Radiating and Absorbing Powers of Different Bodies for Light and Heat*, Taylor & Francis, 1860.
- [29] R. KLETTE ET A. ROSENFELD, *Digital geometry - geometric methods for digital picture analysis*, Morgan Kaufmann, 2004.
- [30] J. R. KOMINSKY, J. S. LUCKINO ET T. F. MARTIN, *Passive Infrared Thermography - A Qualitative Method for Detecting Moisture Anomalies in Building Envelopes*, Air And Waste Management Association-Publications, 2006.

BIBLIOGRAPHIE

- [31] P. KUMAR, A. MITTAL ET P. KUMAR, *Fusion of Thermal Infrared and Visible Spectrum Video for Robust Surveillance*, Computer Vision, Graphics and Image Processing, P. Kalra et S. Peleg, édés., Vol. 4338 de Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg, 2006, p. 528–539.
- [32] M. LAVOIE, *Utilisation de la thermographie pour la pose des enrobés*, Rapport technique, Transport Québec, 2005.
- [33] M. LAVOIE, *Experimentation de la thermographie automatisée au ministère des transports du Québec*, Proc. of The Fifty-sixth Annual CTAA, Vol. 56, 2011, p. 13–26.
- [34] M. LAVOIE ET G. TREMBLAY, *Contrôle de la qualité des enrobés par l'utilisation de l'imagerie infrarouge*, Actes des séminaires internationaux AIPCR, 2009.
- [35] J. LIU, A. JAKAS, A. AL-OBAIDI ET Y. LIU, *A comparative study of different corner detection methods*, IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2009, p. 509–514.
- [36] N. LUDWIG, V. REDAELLI, E. ROSINA ET F. AUGELLI, *Moisture detection in wood and plaster by {IR} thermography*, Infrared Physics & Technology, 46 (2004), p. 161 – 166.
- [37] R. MAINI ET H. AGGARWAL, *Study and Comparison of Various Image Edge Detection Techniques*, International Journal of Image Processing, 3 (2009), p. 1–11.
- [38] X. P. MALDAGUE, *Introduction to NDT by active infrared thermography*, Materials Evaluation, 60 (2002), p. 1060–1073.
- [39] J. MARTINEZ-DE DIOS ET A. OLLERO, *Automatic Detection of Windows Thermal Heat Losses in Buildings Using UAVs*, World Automation Congress, 2006, p. 1–6.
- [40] H. MEI CHEN, S. LEE, R. RAO, M.-A. SLAMANI ET P. VARSHNEY, *Imaging for concealed weapon detection : a tutorial overview of development in imaging sensors and processing*, IEEE Signal Processing Magazine, 22 (2005), p. 52–61.
- [41] A. MERLA ET G. ROMANI, *Thermal Signatures of Emotional Arousal : A Functional Infrared Imaging Study*, IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2007, p. 247–249.

BIBLIOGRAPHIE

- [42] N. MOON, E. BULLITT, K. LEEMPUT ET G. GERIG, *Automatic Brain and Tumor Segmentation*, Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, T. Dohi et R. Kikinis, édés., Vol. 2488 de Lecture Notes in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg, 2002, p. 372–379.
- [43] V. I. MYERS ET W. A. ALLEN, *Electrooptical Remote Sensing Methods as Nondestructive Testing and Measuring Techniques in Agriculture*, Appl. Opt., 7 (1968), p. 1819–1838.
- [44] E. NADERNEJAD, S. S. ET H. HASSANPOUR, *Edge Detection Techniques : Evaluations and Comparisons*, Applied Mathematical Sciences, 2 (2008), p. 1507 – 1520.
- [45] T. NGUYEN ET D. ZIOU, *Contextual and non-contextual performance evaluation of edge detectors*, Pattern Recognition Letters, 21 (2000), p. 805 – 816.
- [46] M. NIXON ET A. S. AGUADO, *Feature extraction & image processing*, Academic Press, 2008.
- [47] J. A. NOBLE, *Finding corners*, Image and Vision Computing Journal, 6 (1988), p. 121–128.
- [48] F. O’GORMAN ET M. CLOWES, *Finding picture edges through collinearity of feature points*, IEEE Transactions on Computers, C-25 (1976), p. 449–456.
- [49] M. PICCARDI, *Background subtraction techniques : a review*, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 4, 2004, p. 3099–3104 vol.4.
- [50] C. C. ROBERTS, JR., *The Application Of Infrared Thermography In Fire And Explosion Investigation*, Vol. 934, 1988, p. 2–9.
- [51] S. RUSSELL ET P. NORVIG, *Artificial Intelligence : A Modern Approach*, Prentice Hall series in artificial intelligence, Prentice Hall, 2010.
- [52] S. M. SMITH ET J. M. BRADY, *SUSAN - A New Approach to Low Level Image Processing*, International Journal of Computer Vision, 23 (1997), p. 45–78.
- [53] A. A. TRONIN, M. HAYAKAWA ET O. A. MOLCHANOV, *Thermal {IR} satellite data application for earthquake research in Japan and China*, Journal of Geodynamics, 33 (2002), p. 519 – 534.

BIBLIOGRAPHIE

- [54] UVED, *L'infrarouge*. <http://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/rayonnement/1-rayonnement-electromagnetique/1-6-infrarouge.html>, 2010. Consulté le 23-06-2014.
- [55] P. VERBEEK, H. VROOMAN ET L. VAN VLIET, *Low-level image processing by max-min filters*, Signal Processing, 15 (1988), p. 249 – 258.
- [56] W. WANG ET R. DONY, *Evaluation of image corner detectors for hardware implementation*, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Vol. 3, 2004, p. 1285–1288 Vol.3.
- [57] R. WATTON, *Infrared television : thermal imaging with the pyroelectric vidicon*, Physics in Technology, 11 (1980), p 62.
- [58] M. WORRING ET A. SMEULDERS, *Digital Curvature Estimation*, CVGIP : Image Understanding, 58 (1993), p. 366 – 382.
- [59] Z. XUE ET R. BLUM, *Concealed weapon detection using color image fusion*, Proceedings of the Sixth International Conference of Information Fusion, Vol. 1, 2003, p. 622–627.
- [60] R. M. ZAINUN, *Active Infrared Motion Detector For House Security System*, Mém. D.E.A., Universiti Malaysia Pahang, 2010.
- [61] L. ZHANG, B. WU ET R. NEVATIA, *Pedestrian Detection in Infrared Images based on Local Shape Features*, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007, p. 1–8.
- [62] T. T. ZIN, H. TAKAHASHI, T. TORIU ET H. HAMA, *Fusion of Infrared and Visible Images for Robust Person Detection*, Image Fusion, O. Ukimura, éd., InTech, 2011, p. 239–264.
- [63] D. ZIOU ET S. TABBONE, *Edge detection techniques - an overview*, International journal of Pattern Recognition And Image Analysis, 8 (1998), p. 537–559.