

Université de Montréal

**Mise à jour de la Base de Données Topographiques du Québec à l'aide  
d'images à très haute résolution spatiale et du progiciel Sigma<sup>0</sup> :**  
**Le cas des voies de communication.**

Par

Jean Bélanger

Département de Géographie

Faculté des arts et sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures  
en vue de l'obtention du grade de M.sc.  
en Géographie

Décembre 2011

© Jean Bélanger, 2011

Université de Montréal  
Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé :

**Mise à jour de la Base de Données Topographiques du Québec à l'aide d'images à très  
haute résolution spatiale et du progiciel Sigma<sup>0</sup> :**  
**Le cas des voies de communication.**

Présenté par :  
Jean Bélanger

A été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

M. Claude Marois, PhD, Président-rapporteur  
M. François Cavayas, PhD, Directeur de recherche  
M. Robert Fiset, PhD, Examineur externe

## Résumé

Le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF) a mandaté la compagnie de géomatique SYNETIX inc. de Montréal et le laboratoire de télédétection de l'Université de Montréal dans le but de développer une application dédiée à la détection automatique et la mise à jour du réseau routier des cartes topographiques à l'échelle 1 : 20 000 à partir de l'imagerie optique à haute résolution spatiale. Le MRNF recherche ainsi des approches d'optimisation et de réduction des coûts des mises à jour cartographiques. À cette fin, les mandataires ont entrepris l'adaptation du progiciel SIGMA<sup>0</sup> qu'ils avaient conjointement développé pour la mise à jour cartographique à partir d'images satellitales de résolution d'environ 5 mètres. Le produit dérivé de SIGMA<sup>0</sup> fut un module nommé SIGMA-ROUTES dont le principe de détection des routes repose sur le balayage d'un filtre le long des vecteurs routiers de la cartographie existante. Les réponses du filtre sur des images couleurs à très haute résolution d'une grande complexité radiométrique (photographies aériennes) conduisent à l'assignation d'étiquettes selon l'état intact, suspect, disparu ou nouveau aux segments routiers repérés.

L'objectif général de ce projet est d'évaluer la justesse de l'assignation des statuts ou états en quantifiant le rendement sur la base des distances totales détectées en conformité avec la référence ainsi qu'en procédant à une analyse spatiale des incohérences. La séquence des essais cible d'abord l'effet de la résolution sur le taux de conformité et dans un second temps, les gains escomptés par une succession de traitements de rehaussement destinée à rendre ces images plus propices à l'extraction du réseau routier. La démarche globale implique d'abord la caractérisation d'un site d'essai dans la région de Sherbrooke comportant 40 km de routes de diverses catégories allant du sentier boisé au large collecteur sur une superficie de 2,8 km<sup>2</sup>. Une carte de vérité terrain des voies de communication nous a permis d'établir des données de référence issues d'une détection visuelle à laquelle sont confrontés les résultats de détection de SIGMA-ROUTES.

Nos résultats confirment que la complexité radiométrique des images à haute résolution en milieu urbain bénéficie des prétraitements telles que la segmentation et la compensation d'histogramme uniformisant les surfaces routières. On constate aussi que les performances présentent une hypersensibilité aux variations de résolution alors que le passage entre nos trois résolutions (84, 168 et 210 cm) altère le taux de détection de pratiquement 15% sur les distances totales en concordance avec la référence et segmente spatialement de longs vecteurs intacts en plusieurs portions alternant entre les statuts intact, suspect et disparu. La détection des routes existantes en conformité avec la référence a atteint 78% avec notre plus efficace combinaison de résolution et de prétraitements d'images. Des problèmes chroniques de détection ont été repérés dont la présence de plusieurs segments sans assignation et ignorés du processus. Il y a aussi une surestimation de fausses détections assignées suspectes alors qu'elles devraient être identifiées intactes. Nous estimons, sur la base des mesures linéaires et des analyses spatiales des détections que l'assignation du statut intact devrait atteindre 90% de conformité avec la référence après divers ajustements à l'algorithme.

La détection des nouvelles routes fut un échec sans égard à la résolution ou au rehaussement d'image. La recherche des nouveaux segments qui s'appuie sur le repérage de points potentiels de début de nouvelles routes en connexion avec les routes existantes génère un emballement de fausses détections navigant entre les entités non-routières. En lien avec ces incohérences, nous avons isolé de nombreuses fausses détections de nouvelles routes générées parallèlement aux routes préalablement assignées intactes. Finalement, nous suggérons une procédure mettant à profit certaines images rehaussées tout en intégrant l'intervention humaine à quelques phases charnières du processus.

**Mots-clés :** Détection automatique du réseau routier, imagerie optique à haute résolution spatiale, mise à jour cartographique, rehaussement d'images.

## **Abstract**

In order to optimize and reduce the cost of road map updating, the Ministry of Natural Resources and Wildlife is considering exploiting high definition color aerial photography within a global automatic detection process. In that regard, Montreal based SYNETIX Inc, teamed with the University of Montreal Remote Sensing Laboratory (UMRSL) in the development of an application indented for the automatic detection of road networks on complex radiometric high definition imagery.

This application named SIGMA-ROUTES is a derived module of a software called SIGMA<sup>0</sup> earlier developed by the UMRSL for optic and radar imagery of 5 to 10 meter resolution. SIGMA-ROUTES road detections relies on a map guided filtering process that enables the filter to be driven along previously known road vectors and tagged them as intact, suspect or lost depending on the filtering responses. As for the new segments updating, the process first implies a detection of potential starting points for new roads within the filtering corridor of previously known road to which they should be connected. In that respect, it is a very challenging task to emulate the human visual filtering process and further distinguish potential starting points of new roads on complex radiometric high definition imagery.

In this research, we intend to evaluate the application's efficiency in terms of total linear distances of detected roads as well as the spatial location of inconsistencies on a 2.8 km<sup>2</sup> test site containing 40 km of various road categories in a semi-urban environment. As specific objectives, we first intend to establish the impact of different resolutions of the input imagery and secondly establish the potential gains of enhanced images (segmented and others) in a preemptive approach of better matching the image property with the detection parameters. These results have been compared to a ground truth reference obtained by a conventional visual detection process on the bases of total linear distances and spatial location of detection.

The best results with the most efficient combination of resolution and pre-processing have shown a 78% intact detection in accordance to the ground truth reference when applied to a segmented resample image. The impact of image resolution is clearly noted as a change from 84 cm to 210 cm resolution altered the total detected distances of intact roads of around 15%. We also found many roads segments ignored by the process and without detection status although they were directly linked to intact neighbours. By revising the algorithm and optimizing the image pre-processing, we estimate a 90% intact detection performance can be reached.

The new segment detection is non conclusive as it generates an uncontrolled networks of false detections throughout other entities in the images. Related to these false detections of new roads, we were able to identify numerous cases of new road detections parallel to previously assigned intact road segments. We conclude with a proposed procedure that involves enhanced images as input combined with human interventions at critical level in order to optimize the final product.

**Keywords** : Map updating, high definition color aerial photography, automatic detection of road networks, enhanced images.

# Table des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	iii
Remerciements.....	xv
Introduction.....	1
CHAPITRE 1 : Mise à jour des cartes du réseau routier à partir d’images de télédétection : problématique et résultats antérieurs.....	4
1.1 Introduction.....	4
1.2 Les approches d’extraction automatique du réseau routier.....	5
1.2.1 Images de résolution relativement haute à moyenne.....	8
1.2.2 Images de résolution très haute à haute.....	10
1.3 Les approches de mise à jour automatisée du réseau routier.....	18
CHAPITRE 2 : SIGMA-ROUTES : Problématique d’adaptation aux images à très haute résolution.....	21
2.1 SIGMA-ROUTES : mode de fonctionnement.....	21
2.1.1 Appariement carte et image.....	23
2.1.2 Révision.....	27
2.1.2 Détection des nouveaux segments.....	29
2.1.3 Sommaire des paramètres à définir.....	29
2.2 Adaptation aux images optiques à très haute résolution.....	33
2.2.1 Utilisation des images multi-composantes.....	33
2.2.2 Le filtre de détection des linéaments.....	35
2.2.3 Les décalages spatiaux et la classification des segments.....	37

CHAPITRE 3 : Approche méthodologique .....	44
3.1 Démarche méthodologique : description générale .....	44
3.2 Choix du site à l'étude .....	46
3.2.1 Autres utilisations du sol .....	49
3.2.2 Voies de communication .....	50
3.2.3 Contenu du site et résolution spatiale .....	51
3.3 Confection d'une carte de vérité terrain (référence et attentes) .....	53
3.3.1 Cas Intacts (36,4 km) .....	56
3.3.2 Cas perdus ou disparus (1,8 km) .....	56
3.3.3 Doute ou suspect (0,7 km) .....	57
3.4 Étalonage du filtre de détection des linéaments .....	58
3.4.1 Validation de la représentativité de ces valeurs sur des segments témoins .....	61
3.5 Protocole expérimental .....	63
3.5.1 Séquence des essais .....	63
3.5.2 Prétraitements ou rehaussements d'images .....	67
3.5.3 Prétraitements : description et attentes .....	67
3.5.4 Prétraitements : Analyse des variations de seuil par critère .....	71
CHAPITRE 4 : Effet de la résolution spatiale .....	76
4.1 Introduction .....	76
4.2 Volet de mesures linéaires détectées .....	78
4.3 Volet de la localisation spatiale .....	81
4.3.1 Critère de moyenne .....	87
4.3.2 Fausse détection par proximité .....	88
4.3.3 Critère de l'écart-type .....	89



4.4 Analyse spatiale sur segments témoins .....	90
4.4.1 Segment A-B, distance de 188 mètres .....	90
4.4.2 Segment C-D, distance de 194 mètres .....	91
4.4.3 Sommaire des tendances pour les trois résolutions.....	95
4.5 Combinaison simultanée des critères de moyenne et d'écart-type .....	99
4.5.1 Volet de mesures linéaires détectées.....	100
4.5.2 Volet de la localisation spatiale.....	100
4.6 Appréciation globale et recommandations.....	105
4.6.1 Sommaire du rendement des critères et impact de la résolution.....	105
4.6.2 Proposition de révision du processus de détection.....	107
 CHAPITRE 5 : Effets des traitements d'images.....	 110
5.1 Plan d'essais .....	110
5.1.1 Sommaire des traitements et attentes .....	113
5.1.2 Établissement des paramètres de traitement .....	114
5.2 Résultats et analyses.....	114
5.2.1 Analyse des mesures linéaires détectées .....	114
5.2.2 Analyse de la localisation spatiale .....	119
5.3 Localisation spatiale : erreurs de détection en bordure d'image.....	128
5.4 Test de parcours du filtre par essai sur la cartographie de référence .....	131
5.4.1 Établissement des paramètres de traitement .....	131
5.4.2 Analyse des mesures linéaires détectées.....	134
5.4.3 Analyse de la localisation spatiale .....	135
5.4.4 Analyse de la localisation spatiale : Fausses détections en bordure de l'image .....	135
5.4.5 Analyse de la localisation spatiale : Segments sans assignation.....	138
5.4.6 Analyse de la localisation spatiale : Fausses détection par proximité .....	138

CHAPITRE 6 : Résultats expérimentaux : sommaire et discussion .....	141
6.1 Sommaire d'analyse sur l'image non rehaussée à différentes résolutions .....	141
6.1.1 Taux de détection linéaires.....	142
6.1.2 Rendement par catégories de routes.....	144
6.1.3 Détection des nouvelles routes.....	145
6.2 Sommaire du rendement des traitements d'images.....	148
6.2.1 Traitement de segmentation .....	149
6.2.2 Traitement par compensation d'histogramme.....	151
6.2.3 Traitement par rehaussement des limites et harmonisation des teintes.....	151
6.2.4 Traitement par substitution des teintes et masque d'extraction .....	152
6.2.5 Problèmes de détection confirmés par le test sur une image de la référence cartographique.....	152
6.3 Recommandations .....	154
6.3.1 Principales phases de la procédure et données de base.....	156
6.3.2 Traitements d'images .....	156
6.3.3 Paramètres de détection.....	157
6.3.4 Validation et édition assistées par un opérateur.....	157
6.3.5 Traitement particulier pour les nouvelles routes.....	159
CONCLUSION.....	160
Bibliographie.....	162
ANNEXE 1 : Couverture aérienne et limites du feuillet 21E05-200-0201 .....	i
ANNEXE 2 : Indicatifs du MRNF de codification des voies de communication .....	iii
ANNEXE 3 : Description et illustration des processus associés aux prétraitements .....	iiiv

## Liste des tableaux

### Chapitre 2 :

Tableau II.1 : Sommaire des paramètres à définir dans SIGMA-ROUTE .....	30
---	----

### Chapitre 3:

Tableau III.1- Pourcentage de couverture relative sur le site test .....	49
Tableau III.2 : Caractéristiques géométriques et radiométriques des entités routières affectant la détection .....	50
Tableau III.3 : Terminologie des catégories des voies de communication du 1/20K .....	51
Tableau III.4 : Quantification des vecteurs de voies de communication sur le site .....	51
Tableau III.5 : Résultats de l'application des cinq filtres selon les deux critères .....	60
Tableau III.6 : Valeur pondérée des seuils à partir des mesures sur positions témoins .....	62
Tableau III.7 : Grille d'essais planifiés .....	64
Tableau III.8 : Résultats comparatifs des variations de seuils selon les traitements de rehaussement .....	74
Tableau III.9 : Établissement des seuils optimaux pour les images rehaussées .....	75

### Chapitre 4:

Tableau IV.1: Paramètres de traitement .....	77
Tableau IV.2 : Comparaison du rendement de détection entre les critères de moyenne et d'écart-type sur image à différentes résolutions .....	80
Tableau IV.3 : Analyse de l'efficacité des critères sur les routes étroites et larges .....	86
Tableau IV.4 : Impact spécifiquement des résolutions sur ces vecteurs témoins .....	95
Tableau IV.5 : Application du filtre à 130 mètres sur segment témoin A-B aux résolutions de 168 et 210 cm .....	98
Tableau IV.6 : Combinaison de moyenne ou écart-type sur image sans traitement .....	99

Chapitre 5:

Tableau V.1 : Plan d'essais sur images rehaussées.....	110
Tableau V.2: Paramètres de traitements selon les différents traitements de rehaussement	115
Tableau V.3 (1 <sup>re</sup> partie) : Comparaison du rendement de détection en fonction des traitements de rehaussement .....	117
Tableau V.3 (2 <sup>e</sup> partie) : Comparaison du rendement de détection en fonction des traitements de rehaussement .....	118
Tableau V.4 : Changement du statut disparu ou suspect à intact suite aux divers prétraitements.....	119
Tableau V.5 : Gains/pertes de résultats sur les deux critères après le rehaussement des limites.....	126
Tableau V.6 : Détermination des seuils sur la cartographie routière format matriciel .....	133
Tableau V.7 : Combinaison de moyenne ou écart-type sur cartographie 20K raster .....	134

Chapitre 6:

Tableau VI.1 : Dimension d'empreinte sur photo aérienne ou largeur d'une berline type	143
Tableau VI.2 : Comparaison du rendement de détection en fonction de la résolution .....	142
Tableau VI.3 : Comparaison du rendement de détection en fonction des traitements d'images .....	150

## Liste des figures

### Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Chaussée avec ombrage et voisinage variable en secteur résidentiel.....	17
--	----

### Chapitre 2:

Figure 2.1 : Fonctionnement de SIGMA-ROUTES.....	22
Figure 2.2 : Procédure d'appariement carte-image.....	23
Figure 2.3 : Création de la base de données topologique.....	24
Figure 2.4 : Filtre de détection à trois régions .....	26
Figure 2.5 : Niveaux de gris d'une image panchromatique (ensemble du visible) autour d'une route .....	26
Figure 2.6: Zone de recherche pour l'appariement carte – image.....	28
Figure 2.7. Interface graphique de Sigma <sup>0</sup> .....	31
Figure 2.8 : Variation d'hétérogénéité des pixels entre routes et bordures sur images à haute résolution.....	34
Figure 2.9 : Remplacement du filtre 3 fois 1/3 de la version originale par le filtre 1 fois 1/5 et 2 fois 2/5.....	36
Figure 2.10 : Retraçage des anciennes routes, détection des routes existantes et seuils de classement .....	39
Figure 2.11 : Paramètre de décalage parallèle inadéquat.....	41
Figure 2.12 : Séquence de détection des nouvelles routes.....	42
Figure 2.13 : Interface d'état de progression de la détection .....	43

### Chapitre 3:

Figure 3.1A – Découpage du site test sur le territoire.....	47
Figure 3.1B – Découpage du site test sur le territoire avec localisation relative sur photographie.....	48

Figure 3.2 : Contenu du site test selon les indicatifs de description .....	52
Figure 3.3 : Vecteurs de la cartographie 1/20K segmentés par détection visuelle/manuelle	53
Figure 3.4 : Assignation à la catégorie INTACT des vecteurs 1/20k par interprétation de l'opérateur .....	54
Figure 3.5 : Données de références obtenues par extraction visuelle/manuelle .....	55
Figure 3.6 : Segment de référence suspect par extraction visuelle/manuelle .....	57
Figure 3.7 : Localisation de cinq filtres sur différentes catégories de routes et de contextes de bordures (image sans traitement, 84 cm) .....	59
Figure 3.8 : Séquence de la méthode globale.....	64
Figure 3.9 : Séquence détaillée des essais.....	65
Figure 3.10 : Prétraitements de rehaussements des voies de communication.....	68
Figure 3.11 : Localisation ciblée des portions d'un filtre pour analyse des variations selon les traitements.....	73

#### Chapitre 4:

Figure 4.1 : Résolution de 168 cm et critère d'écart-type, fausse détection de nouveaux segments.....	82
Figure 4.2 : Répartition spatiale des reconnaissances intactes selon les critères de $\mu$ et $\sigma$ sur image sans rehaussement à 84 cm.....	83
Figure 4.3 : Répartition spatiale des reconnaissances intactes selon les critères de $\mu$ et $\sigma$ sur image sans rehaussement à 168 cm.....	84
Figure 4.4 : Répartition spatiale des reconnaissances intactes selon les critères de $\mu$ et $\sigma$ sur image sans rehaussement à 210 cm.....	85
Figure 4.5 : Fausse détection intacte par proximité sur l'image a 84 cm.....	89
Figure 4.6 : Reconnaissance sur segments témoins-résolution 84 cm.....	92
Figure 4.7 : Reconnaissance sur segments témoins -résolution 168 cm.....	93
Figure 4.8 : Reconnaissance sur segments témoins -résolution 210 cm.....	94
Figure 4.9 : Variation de l'assignation intacte selon les critères et la résolution.....	96

Figure 4.10 : Détection intacte par rapport aux références de vecteurs intactes.....	101
Figure 4.11 : Détection accrue suite aux itérations avec combinaison de critères.....	102
Figure 4.12 : Cas particulier des voies ferrées .....	103
Figure 4.13 : Segments sans assignation de statut (identification non exhaustive) .....	104
Figure 4.14 : Organigramme de procédure suggéré avec règles de connectivité.....	108
Figure 4.15 : Simulation sur le segment témoin CD du troisième niveau d'assignation basé sur la connectivité .....	109

### Chapitre 5:

Figure 5.1 : Bloc d'essais visant à mesurer l'effet des traitements de rehaussement .....	112
Figure 5.2 : Comparaison de l'image sans traitement, segmentée et résultante du masque d'extraction .....	113
Figure 5.3 : Changement du statut disparu et suspect à intact suite à la segmentation d'image.....	121
Figure 5.4 : Changement du statut disparu ou suspect à intact suite à la compensation d'histogramme.....	122
Figure 5.5 : Changement du statut disparu ou suspect à intact suite au rehaussement des limites et harmonisation des teintes .....	123
Figure 5.6 : Changement du statut disparu ou suspect à intact suite à la substitution de teintes et l'extraction par masque.....	124
Figure 5.7 : Filtre sur une rue locale et sur une artère plus large pour estimation des gains .....	125
Figure 5.8 : .....	129
Erreur de détection en bordure, le filtre n'excède pas le cadre de l'image.....	129
Figure 5.9 : Problème de détection sur les bordures d'images .....	130
Figure 5.10 : Essai en cours dans la séquence détaillée des essais .....	132
Figure 5.11 : Particularités de détection sur la cartographie matricielle de référence .....	136
Figure 5.12 : Cas particulier des fausses détections en bordures d'image.....	137

Figure 5.13 : Possibilité de double détection intacte et nouvelle route..... 139

Figure 5.14 : Possibilité de double détection intacte et nouvelle route..... 140

Chapitre 6:

Figure 6.1 : Fausses détections de nouveaux segments ..... 147

Figure 6.2 : Comparaison de la double détection parallèle sur la cartographie de référence et  
sur l'image à 168 cm..... 148

Figure 6.3 : Segments non parcourus par le filtre de détection..... 153

Figure 6.4 : Procédure de détection automatisée avec intervention humaine spécifique... 155



## **Remerciements**

Sincères remerciements à mon directeur, Dr. Cavayas pour l'excellent support technique et académique. Une mention particulière à ma conjointe pour sa patience et son encouragement.

## Introduction

Au Québec, le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF) est chargé de la compilation et le maintien à jour des cartes topographiques à l'échelle 1 : 20 000. Ces cartes sont disponibles actuellement sous format numérique et les éléments planimétriques et altimétriques (hydrographie, voies de communication, cadre bâti, boisés, courbes de niveau, etc.) représentés en des couches vectorielles séparées dans la Base de Données Topographiques du Québec (BDTQ). Le processus de mise à jour fait appel à la détection visuelle d'information à partir de sources géomatiques diverses. Il est complété, selon les besoins, par une collecte directe au terrain de nouvelles données.

Le MRNF souhaite optimiser le processus de mise à jour en ce qui a trait aux voies de communication, plus spécifiquement le réseau routier, en introduisant un certain niveau d'automatisme tout en bénéficiant des avantages potentiels de l'imagerie optique à haute et très haute résolution spatiale. Ces images dont la résolution favorise la fidélité de restitution sont fréquemment disponibles sur le territoire et la périphérie des grands centres urbains. Ce sont, pour la plupart, des photographies aériennes (noir et blanc ou couleur) acquises à des échelles 1 :40 000 et plus grandes numérisées et orthorectifiées. Selon l'échelle d'acquisition, la résolution spatiale du pixel au sol varie de 1m à environ 16 cm. De concert avec une procédure d'extraction automatisée, le MRNF entrevoit une réduction potentielle des délais et coûts de mise à jour.

C'est dans ce contexte que le MRNF a mandaté en 2009 la compagnie en géomatique SYNETIX inc. de Montréal et le laboratoire de télédétection de l'Université de Montréal afin d'étudier la possibilité d'automatisation du processus de mise à jour du réseau routier en se servant du progiciel SIGMA<sup>0</sup> et des images à très haute résolution. Le progiciel Sigma<sup>0</sup> est une série d'algorithmes de traitement d'images et des données à référence spatiale intégrés dans des modules informatiques spécialement conçus pour la mise à jour des cartes à des échelles moyennes (1/20 000 ou plus petites) en se servant d'images satellitales optiques et radar de résolution relativement haute (environ 5m).

Ce progiciel fut développé par le laboratoire de télédétection de l'Université de Montréal en collaboration avec la compagnie SYNETIX lors des projets en R&D avec l'Agence spatiale canadienne et le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec. Les divers modules du progiciel sont adaptés à la mise à jour des cartes d'occupation du sol, des cartes forestières et des certaines couches planimétriques des cartes topographiques telles la couche du réseau routier et celle du cadre bâti. L'élément commun de tous ces modules est l'utilisation de la carte à mettre à jour comme un guide pour analyser les images de télédétection à la recherche des changements dans le paysage examiné. Les travaux de recherche qui ont mené à la conception et la mise en opération de Sigma<sup>0</sup> sont décrits dans une série d'articles, mémoires de maîtrise, thèses de doctorat et rapports publiés depuis une vingtaine d'années par le laboratoire de télédétection. Particulièrement pour les cartes du réseau routier d'intérêt dans cette recherche, nous pouvons citer Maillard et Cavayas (1989), Fiset et Cavayas (1997), Fiset et al. (1998) et Synetix (2007). C'est dans le cadre de ce mandat du MRNF que notre recherche s'inscrit.

Le module SIGMA-ROUTES du progiciel SIGMA<sup>0</sup> dédié à la mise à jour des cartes du réseau routier traite les routes comme des linéaments, leur largeur ne dépassant pas les 2 à 3 pixels sur les images satellitales de résolution relativement haute. Or, sur les images à haute et à très haute résolution les routes se manifestent comme des régions de plusieurs pixels de large. Est-ce que l'algorithme de détection des routes utilisé dans SIGMA-ROUTES est encore valable moyennant certains réajustements de ses paramètres d'application? Sinon, quelle devrait être sa nouvelle structure? Ce sont les questions principales de notre projet de recherche. Pour y répondre nous avons fixé deux objectifs spécifiques. Le premier objectif vise à l'élaboration d'une séquence de traitements préliminaires permettant de rendre les images à très haute résolution plus propices à l'extraction du réseau routier.

En effet, tel que mis en évidence par nombre d'études récentes avec des images à des résolutions fines (métrique et sub-métrique), l'extraction automatique du réseau routier est facilitée si les images ont subi certains traitements préliminaires qui homogénéisent d'une certaine manière la radiométrie des différents objets visibles sur ces images incluant les surfaces de route. D'autres études parlent de l'existence d'une résolution spatiale optimale pour l'extraction du réseau routier. Il est donc important d'étudier l'impact des traitements préliminaires ainsi que de valider l'hypothèse de l'existence d'une résolution spatiale optimale pour l'extraction du réseau routier. Le second objectif vise, par le biais d'une série d'essais sur les images prétraitées ou non, à élaborer la structure appropriée de l'algorithme pour la détection des routes et la mise à jour des cartes à partir d'images à très haute résolution.

Ce mémoire est constitué de six chapitres. Le premier traite de la problématique et du potentiel de la mise à jour cartographique automatisée à partir d'images optiques. Une revue de littérature s'y intègre à titre d'appui documentaire. Le second chapitre présente en détail le fonctionnement du module SIGMA-ROUTES et discute de la problématique de son adaptation à des images à très haute résolution à la lumière des éléments dégagés au chapitre précédent. Le chapitre trois traite du cadre de cette recherche incluant les données de référence, le choix du site d'expérimentation, la description des traitements d'images et le protocole d'essais. Les quatrième et cinquième chapitres constituent le volet expérimental avec les résultats d'essais et les analyses associées. Le sixième chapitre, discussion et conclusion, est une synthèse des résultats et analyses dans le contexte de l'objectif principal de notre recherche.

# **CHAPITRE 1 : Mise à jour des cartes du réseau routier à partir d'images de télédétection : problématique et résultats antérieurs**

## **1.1 Introduction**

La mise à jour d'une carte implique deux opérations principales: la révision de son contenu ainsi que la détection des éléments qui ont apparu dans le territoire depuis le dernier inventaire. Dans le cas du réseau routier, la révision du contenu implique la détection des changements tels les routes abandonnées, la modification de la géométrie d'un segment routier, le changement du type de revêtement (ex. de terre battue à asphalte). Les nouveaux segments de route doivent aussi être détectés et leur géométrie et attributs décrits dans la base de données.

Peu d'études antérieures ont examiné le potentiel de l'imagerie de télédétection pour fournir le support nécessaire à une automatisation des deux opérations, révision et détection des nouveaux segments de route. La plupart des études publiées jusqu'à présent sont orientées vers l'extraction automatique de l'ensemble du réseau routier visible sur différents types d'images (optiques ou radar). Dans le but d'expliquer la philosophie d'approche du progiciel SIGMA-ROUTES (chapitre 2), une brève revue de ces études est présentée sous les volets de l'extraction globale ainsi que dans un contexte de mise à jour cartographique. Nous ne mentionnerons que les études avec des images optiques, le médium principal de notre recherche.

## 1.2 Les approches d'extraction automatique du réseau routier

Les premières études dédiées à l'extraction automatique du réseau routier des images optiques remontent aux années 1970 (e.g. Bajcsy et Tavecchi, 1976). Depuis une littérature volumineuse sur ce sujet s'est formée mais les approches sont demeurées passablement les mêmes. Ainsi dans la majorité des cas, l'extraction du réseau routier est considérée comme un processus à plusieurs étapes. Lors de la première étape, des opérateurs locaux sont appliqués sur les images afin d'extraire des pixels dont la radiométrie satisfait un modèle prédéfini (implicitement ou explicitement) de ce qu'est une route sur l'image analysée. Viennent par la suite des opérateurs spatiaux qui examinent les pixels détectés dans une séquence de validation et de consolidation des éléments détectés. Certains opérateurs procèdent ainsi à la formation des chaînes de pixels ayant des caractéristiques géométriques attendues d'un segment de route alors que d'autres éliminent les pixels n'appartenant pas au réseau routier. Les derniers opérateurs ont pour tâche d'unir des chaînes de pixels adjacentes retenues jusqu'à ce que l'image du réseau entier soit formée.

Il est évident que la qualité de l'opérateur appliqué à la première étape conditionnera en grande partie l'exactitude et l'exhaustivité du réseau finalement extrait des images. Cette qualité est appréciée sur la base du degré de fragmentation des segments de route détectés, du nombre des segments non détectés (omissions) ainsi que du nombre des « faux » segments détectés (commissions). Plus la fragmentation et le nombre d'omissions/commissions sont élevés, beaucoup plus complexes seront les opérations subséquentes et moins probant le résultat final (Wiedemann et Hinz, 1999; Deschênes *et al.* 2004). Cette généralisation des approches se concrétise par d'ingénieuses procédures reposant sur quelques concepts fondamentaux qui ont fait l'objet d'une publication de Mena (2003). L'auteur y présente une classification des principales approches de détection des routes à partir de plusieurs types de capteurs.

Nous y ciblons quatre concepts applicables sur les images optiques qui ont inspiré plusieurs chercheurs et générés diverses variantes adaptées à la haute résolution. Un des premiers fondements mise sur la poursuite de la détection (*road tracking*) à partir de "points germes" (*seed points*) identifiés manuellement ou automatiquement. Les critères de poursuite sont essentiellement géométriques et radiométriques avec comme objectif le repérage de structures linéaires sur la base d'analyses des profils perpendiculaires à une direction. On y cite les travaux de Rustoné et Airault (1997) sur des photographies aériennes et plus récemment ceux de Yoon et al. (2002) sur des images IKONOS.

Une deuxième grande classe d'approches mise sur un processus débutant par la détermination de régions propices à la présence de routes qui feront ensuite l'objet d'un ciblage morphologique visant à éliminer les bruits spectraux dont les caractéristiques sont similaires aux revêtements routiers. La première phase de repérage des régions potentielles repose sur des techniques de classification (supervisées ou non), de filtrage ou de segmentation basée sur la texture d'image. L'auteur fait une référence particulière aux travaux de Faber et Forstner (1999) sur un processus de segmentation adapté aux images multispectrales à haute résolution en milieu urbain. La seconde phase de ciblage morphologique met à profit une combinaison de règles mathématiques et géométriques pour discerner les entités linéaires dans les régions potentielles précédemment ciblées. On y cite les travaux de Katartzis et al. (2001) en matière de distinction des éléments linéaires sur des photographies aériennes.

Une troisième classe d'approches table sur des algorithmes de "programmation dynamique". Ce processus dont les premières citations datent de Fischler et al. (1981) semble avoir acquis une certaine maturité suite aux travaux de Gruen et Li (1997). Les chercheurs Dal Poz et Agouris (2000) ainsi que Dal Poz et Vale (2003) ont entrepris d'adapter ces principes pour l'extraction sur les images à moyenne et haute résolution.

Ce dernier article résume bien le concept original dont les principales phases seront décrites au paragraphe suivant afin de mettre en évidence la sophistication du processus. La programmation dynamique débute avec des points germes (*seed points*) habituellement saisis manuellement par un opérateur. L'algorithme de programmation dynamique établit alors un lien entre un point origine ( $P_x$ ), celui qui le précède ( $P_{x-1}$ ) et le suivant ( $P_{x+1}$ ) sur la base d'une fonction de "mérite". Cette fonction intègre des paramètres radiométriques et géométriques tels que les valeurs de pixels, l'uniformité et les variations sur certaines distances. S'initie alors un processus itératif déplaçant le point  $P_x$  pour ensuite créer deux nouveaux points aux centres des alignements émanant de ce dernier. Le processus itératif reprend son analyse dite de mérite jusqu'à ce qu'une succession de positions propose une reconstruction des routes répondant à des critères de proximité, de colinéarité et autres aspects. Nous reviendrons sur les résultats des travaux de Dal Poz et Vale (2003) à la section 1.2.2 qui présente quelques exemples avec des images à haute résolution. Parmi les autres chercheurs qui ont développé des variantes de cette approche, Mena (2003) cite Amini et al. (1990) ainsi que Stoica et al. (2000).

Une quatrième classe d'approches est liée à des outils nommés "serpents" (*snakes* ou *active contour models*). Ce concept introduit par Kass et al. (1988) dans un article intitulé "*Snakes: Active contour models*" a suscité de nombreuses variantes et combinaisons avec d'autres approches. Cet outil de modélisation effectue une recherche de tracés guidée par une fonction minimisant le concept d'énergie locale dans différentes directions. Les règles d'interprétation locales d'un serpent permettent de détecter les bordures d'un objet en progressant d'un contour ou d'une ligne approximative sur l'image. Mena (2003) cite à ce sujet une publication de Laptev et al. (2000) proposant une variante pour l'extraction sur des photographies aériennes à différentes échelles en exploitant leurs informations complémentaires respectives. Signe de son importance, l'approche multi-échelles et multi-résolutions constitue pratiquement une catégorie d'approches dans la publication de Mena (2003).



On retient la notion de complémentarité des résolutions alors qu'une approche de détection efficace pour des routes étroites sur des images à haute résolution s'avère performante pour des autoroutes sur des images à moindre résolution. L'auteur y cite l'importante contribution de Mayer et al. (1997, 1998) et de Mayer et Steger (1998).

La généralisation de ces grandes classes d'approches fait référence aux concepts globaux cités au début de la section 1.2 soient l'intervention successive d'opérateurs locaux appliqués sur les images et d'opérateurs spatiaux complétant le processus. Ainsi, les opérateurs locaux, dits de bas niveaux liés aux traitements d'images (segmentation, filtres morphologiques etc.), sont appliqués sur ces images afin d'extraire des pixels potentiels de route sur l'image analysée. Les opérateurs spatiaux, dits de hauts niveaux sont d'avantage liés à l'examen des pixels détectés afin de reconstruire les segments de routes (programmation dynamique, serpents). Les opérateurs de bas niveau sont adaptés aux types d'images (panchromatique, multispectrale, hyperspectrale) utilisé ainsi qu'à leur résolution spatiale. Nous les examinerons avec plus de détails en fonction de la résolution des images utilisées en mettant l'accent sur les méthodes de détection des routes sur des images à haute et très haute résolution utilisées dans cette étude.

### **1.2.1 Images de résolution relativement haute à moyenne**

Pour des images à résolution relativement haute à moyenne (entre 5 m et 30 m) où les routes ont une largeur équivalente et même inférieure au pixel de l'image, des opérateurs du type filtre de détection d'arêtes/lignes sont appliqués sur des images monochromes (panchromatiques ou une seule bande d'une image multispectrale). Les filtres sont du type déterministe dont les poids sont habituellement définis en supposant (implicitement) un profil radiométrique transversal d'un segment de route typique (ex. pointe, baril, etc.). Le détecteur de lignes de Duda est un exemple classique dans Fischler et

al.(1981). D'autres détecteurs proposés incluent la ligne de passage par zéro et les filtres morphologiques. Des filtres statistiques sont aussi proposés mais dans la majorité des cas, ils sont appliqués à des images radar pour tenir compte du bruit de chatoiement (Adair et Guindon, 1990; Tupin et al.,1998). Des techniques classificatoires comme les réseaux de neurones ont été aussi suivies surtout avec des images multispectrales (Fiset et Cavayas, 1997). En général, toutes ces études ont abouti à des résultats contradictoires et il n'y a pas jusqu'à présent une procédure de détection généralisable peu importe le type d'image ou la scène analysée. Ceci est explicable notamment par le fait que le contraste entre la surface de la route et son voisinage immédiat est l'élément clé pour la détection d'une route. Or ce contraste peut être très variable. À titre d'exemple une route asphaltée traversant un boisé peut être imperceptible même visuellement sur une image panchromatique du satellite IRS (résolution d'environ 5 m; Armenakis et Savopol, 1998).

En règle générale le réseau routier détecté se caractérise par une forte fragmentation, particulièrement en milieu urbanisé, « surtaxant » ainsi les opérations subséquentes du raccordement des segments pour la formation du réseau final. Ceci amène certains auteurs à conclure que pour améliorer l'extraction du réseau routier à partir de ce type d'images, il faut introduire une information externe à l'image pour guider d'une certaine manière l'application des opérateurs locaux. Cette information peut prendre différentes formes comme : 1) des règles de production décrivant les caractéristiques des routes ou des cartes indiquant les utilisations du sol dans la région d'étude (Van Cleynenbreugel, 1990) et 2) des pixels "germes" des segments de routes introduits manuellement par un opérateur ou extraits d'une base de données existante (German et Jedynak, 1996; Fiset et al., 1998).

### 1.2.2 Images de résolution très haute à haute

Dans le cas des images de très haute à haute résolution (plus fine que 5 m), la quasi-totalité des routes se présentent comme des régions et non plus comme des linéaments comme c'était le cas précédemment. Leurs caractéristiques géométriques commencent à devenir l'élément clé pour leur différenciation des autres objets du paysage. En effet, les routes ont des caractéristiques géométriques uniques, elles sont des régions allongées (plus longues que larges) avec des bordures parallèles. Ainsi, le plus souvent, un opérateur de segmentation d'images en régions précédé d'un certain filtrage de lissage des valeurs radiométriques est appliqué dans un premier temps. Les segments obtenus sont alors étudiés pour leur radiométrie mais surtout avec des opérateurs spatiaux pour pouvoir caractériser leur géométrie (degré d'élongation, parallélisme des contours, etc.) (Sae-Ui, 2003; Long et Zhao, 2005). L'efficacité de détection des routes repose donc en grande partie sur la qualité de la segmentation initiale des images.

Plusieurs méthodes de segmentation sont proposées incluant : 1) Dans le cas des images monochromes : le simple seuillage des valeurs numériques (Shi et Zhu, 2002) ou des classificateurs spatiaux (Long et Zhao, 2005) et 2) Dans le cas des images multispectrales, différents classificateurs dirigés ou non dirigés (Gao et Wu, 2003; Yan et Zhao, 2003; Mena et Malpica, 2005; Zhang, 2006; Zhang et Couloigner, 2006; Mohammadzadeh et al., 2002). Des approches structurales plutôt que classificatoires sont suivies par d'autres chercheurs afin de repérer les segments de route sur les images. À titre d'exemple : (1) Shackelford et Davis (2003) isolent sur des images multispectrales les pixels non couverts de végétation et cherchent d'une façon itérative à établir si ces pixels font partie d'un segment linéaire dont la longueur minimale est prédéfinie par l'opérateur; (2) Li et al. (2003) appliquent sur une image panchromatique un opérateur de détection d'arêtes suivi d'un opérateur de détection d'alignements de pixels d'arête pour former une première « esquisse » du réseau routier; 3) Deschênes et al. (2004) proposent une méthode

d'extraction de linéaments sur les images suivie d'une technique de reconnaissance des jonctions entre linéaments détectés ainsi que des points terminaux des segments linéaires pour pouvoir former l'image finale du réseau routier.

Nous décrirons par la suite quatre études récentes (Petéri et Ranchin, 2003-2004; Yan et Zhao, 2003; Mokhtarzade, Valadan Zoej et al., 2008; Dal Poz et Vale, 2003) avec un peu plus de détail afin de montrer la diversité des procédures employées et la complexité de la tâche d'extraction automatique des routes à partir des images à haute et très haute résolution. La majorité de ces études traitent des images IKONOS et QUICKBIRD d'une résolution de l'ordre du mètre et font appel à une séquence d'opérations en deux temps débutant avec une détection préliminaire du réseau routier dont le résultat guidera une détection plus fine. L'étude de Dal Poz et Vale (2003) est basée sur des photographies aériennes de résolutions variant de 2 à 0,5 mètres.

La séquence en deux temps de Petéri et Ranchin (2003-2004) débute par l'extraction d'un "graphe topologique" des routes. Ils préconisent d'abord un filtrage de lissage afin de faciliter la détection des intersections ou nœuds en réduisant l'effet des bruits locaux de la haute résolution. Les images IKONOS prétraitées feront ensuite l'objet d'une analyse sectorielle de la variabilité radiométrique pour détecter des segments linéaires et des intersections potentielles. Les auteurs proposent aussi d'utiliser la cartographie existante comme seconde option à cette première phase. L'essentiel de leurs travaux ont cependant porté sur le deuxième volet de la détection soit l'application d'un module de reconstruction des routes en tant qu'entités surfaciques plutôt que linéaires. Tel que mentionné, dans cette classe de résolution, la largeur d'une route locale type excède fréquemment une dizaine de pixels alors que plusieurs approches de détection furent élaborées avec des images à résolution moyenne lorsque ces routes ne comptaient qu'un ou deux pixels de largeur. Les auteurs proposent alors d'appliquer un serpent double pour la détection en parallèle des deux bordures qui délimitent les routes.

Cette adaptation du concept original de serpent se distingue par l'ajout d'un critère d'énergie équivalente d'une bordure à l'autre pour une même section de route. C'est ainsi que les auteurs affirment assurer un parallélisme entre deux bordures et non pas entre une bordure et une limite de toiture par exemple. Aussi novateur que semble ce principe, il est confronté à la grande variété radiométrique des pixels de voitures, d'ombres et autres détails maintenant distinctifs. Ces derniers génèrent des tracés irréguliers et ont tendance à bloquer ou coincer les serpents dans certaines zones de concentration d'énergie des pixels. Pour contourner ce problème, il est évocateur de constater que les auteurs appliquent le module de reconstruction sur une image rééchantillonnée à une résolution plus grossière. Une séquence itérative d'une résolution plus grossière vers la résolution originale permet la convergence de la détection et réduit l'effet des "bruits géométriques" propres à la haute résolution. Ils nomment cette approche la MRA pour "*Multi-Resolution Analysis*".

Dans l'article de Mokhtarzade et al. (2008) le processus en deux temps mis à l'essai comprend d'abord la détection des routes par classification d'images, suivi d'une procédure de vectorisation des routes. Elle débute avec un traitement destiné à filtrer l'image et faire une meilleure distinction entre les pixels de routes et ceux des autres couvertures de surface. La détection des routes est en fait une segmentation d'images résultant de l'application d'un réseau de neurones qui utilise les informations spectrales et les textures de pixels. Le tout débute par l'entraînement d'un réseau de neurones sur des zones de routes tests. Pour ces sites, on établit une relation entre différents paramètres spectraux et texturaux afin de définir des critères ou seuils de détection. C'est ainsi qu'une combinaison d'informations spectrales sur les canaux RGB et de paramètres texturaux, dont l'énergie, l'entropie, le contraste et l'homogénéité, cible les voies de communication. Le résultat de cette détection nommée "*road raster map*" est une image binaire avec assignation d'une valeur de 1 pour les pixels de routes et de 0 pour les autres entités.

Cette image relègue en toile de fond les entités ne faisant pas partie du réseau routier dans le but d'optimiser la seconde phase de vectorisation. Elle débute par l'application d'un classificateur non dirigé (*K-means Clustering*) segmentant l'image traitée (*road raster map*) par petites grappes (*clusters*). Les centroïdes de ces grappes sont extraits à titre des pixels de centre de routes et d'intersections nommés "*Key point identifiers*". Des segments linéaires joignent les "*Key point identifiers*" afin de définir les vecteurs finaux des routes détectées. Les résultats d'essais sont validés à partir d'une carte de vérité terrain établie par interprétation visuelle des images. Sur deux sites tests, ils ont respectivement obtenu une concordance de 88% et 84%.

La publication de Yan et Zhao (2003) suscite notre intérêt de par son approche établie sur certaines particularités des pixels facilitant la distinction des surfaces asphaltées. La procédure est aussi en deux phases, la première générant des "segments de routes candidats" qui seront affinés dans une seconde phase. La première étape introduit un élément nouveau soit la segmentation d'image à partir des canaux IHS (Intensité, Hue ou teinte et Saturation). Les auteurs sont d'avis que l'identification des surfaces asphaltées est plus efficace par combinaison distinctive sur les canaux IHS que les RGB. C'est en fonction de ce critère de détection qu'une première image binaire de "points candidats des routes" est générée. Sur cette dernière, les pixels candidats de routes ont une valeur de 1 et les autres (non routiers) de 0. Cette image de détection préliminaire est révisée par une approche de voisinage permettant de corriger l'assignation de plusieurs pixels de routes en fausse détection. Pour ce faire, un pixel de valeur 1 doit présenter une configuration de voisinage conforme à certaines règles pour maintenir sa valeur de 1. Dans le cas contraire, il sera réassigné à 0 et le processus itératif reprendra pour produire une image plus discriminante de la morphologie des voies de communication en tant que vecteurs-corridors.

Cette image nommée "segments de routes candidats", constituera la donnée source de la deuxième étape. Il est à noter que ces segments sont des entités de surfaces. La deuxième étape vise à passer d'une entité surfacique à des segments étroits d'axes de centre des routes principales. Le processus exploite avec beaucoup de nuances les pseudo-bordures des segments surfaciques de routes candidats pour interpoler des pixels centraux et établir des connexions de longs segments linéaires bien encadrés entre les bordures des routes. Lors de cette seconde phase, on note que la linéarisation met à profit le canal d'intensité dans le trio IHS. Comme ce fut le cas pour la première phase, ce canal est jugé le plus efficace à exploiter pour faire face au défi des voies de communications ayant une largeur de plusieurs pixels. Ce produit fera finalement l'objet d'un filtrage morphologique par applications successives de dilatation et d'érosion pour bien définir les segments de routes. Les résultats d'essais sur un site test ont une concordance de 81.2% sur la base comparative d'une carte établie par interprétation visuelle.

L'article de Dal Poz et Vale (2003) met à profit le principe de la programmation dynamique à titre d'opérateur spatial de haut niveau sur deux classes de résolutions. Ils appliqueront leurs travaux sur deux portions de photographies aériennes pour lesquelles une route rurale moyenne est constituée respectivement de 5 et de 15 pixels (résolutions de l'ordre de 2 et 0,7 mètres). La prémisse de leur recherche est que l'approche de la programmation dynamique a fait ses preuves sur des images pour lesquelles une route moyenne comporte de 1 à 3 pixels, soit des résolutions de 10 à 3 mètres. Ils ont ainsi développés une variante adaptée à la haute résolution qui présente les routes non plus à titre d'entités linéaires mais en tant que bandes ou surfaces étroites et linéaires délimitées par des bordures. La programmation dynamique telle que décrite à la section 1.2 sur les approches d'extraction est un processus itératif reposant sur des points origines de routes introduits par un opérateur. Les ajustements de positions et la génération de points supplémentaires sont dirigés par un critère résultant d'une fonction dite de "mérite".

Les chercheurs ont donc misés sur une modification de cette fonction afin de repérer les lignes de centre de ces routes-corridors suite à une détection préalable des bordures. Les points origines ou "pixels germes" (*seeds*) sont extraits d'une base de données existante et insérés sur l'image par le biais d'un fichier texte de coordonnées (fichier ASCII). La première image test (résolution de 2 m) d'une couverture de 1 km<sup>2</sup> comporte 5 pixels germes pour 2 km de route. La seconde image test (résolution de 0,7 m) d'une couverture de 0,3 km<sup>2</sup> comporte 8 pixels germes pour 1 km de route. Ces points origines sont stratégiquement localisés aux intersections et aux transitions entre segments linéaires et curvilignes.

L'ajout de programmation à la fonction de mérite citée à la section 1.2 implique que chaque pixel germe  $P_x$  générera des pixels  $P'_x$  et  $P''_x$  dans l'axe de profil transversal de la route identifiant potentiellement les bordures. Le processus itératif tentera plusieurs ajustements séquentiels de ces bordures tout en créant d'autres pixels intermédiaires qui raffineront la définition des bordures. Une fois ces bordures adéquatement définies, l'algorithme en déduira le tracé de la ligne centrale du corridor routier. On constate une similitude de principe avec l'approche de Yan et Zhao (2003) citée précédemment mais alors que ces derniers ont d'abord généré des images de "segments surfaciques de routes candidats" pour interpoler des pixels centraux, Dal Poz et Vale (2003) exploitent une fonction de mérite pour repérer les pixels de bordures et ensuite revenir au centre des voies de communications. Les résultats sont évalués selon les écarts planimétriques mesurés entre les lignes de centre détectées avec l'outil et les lignes de centres tracées manuellement par un opérateur. On cite 0,5 et 0,7 pixels d'écart respectivement sur la première et seconde image test. Ces résultats furent aussi qualifiés de robustes puisque les perturbations des bordures en raison d'ombrages, d'arbres ou autres cas n'ont pas trop altérés le tracé des lignes centrales.



Dal Poz et Vale (2003) prennent partie dès le début de l'article pour les approches semi-automatiques qui offrent un meilleur rendement lorsque comparées aux approches entièrement automatiques dont les performances sur les images à haute résolution ne sont pas probantes à ce jour. Après avoir élaboré sur les approches et quelques résultats publiés, nous tenterons, à la prochaine section, de résumer les problèmes de base et limitations perçues.

### **1.2.2.1 Les problèmes de base**

Tel que régulièrement souligné, la grande variabilité radiométrique des surfaces de route constitue un défi majeur à surmonter lors des analyses des images à haute et très haute résolution. Ceci est dû à plusieurs facteurs comme l'âge du revêtement, son usure, la présence des véhicules, les ombrages projetés par les bâtiments ou les arbres au moment d'acquisition d'image, etc. Souvent des filtres de lissage sont appliqués avant l'analyse pour réduire cette variabilité radiométrique, au risque cependant de rendre floues les démarcations entre les routes et leur environnement immédiat. D'autres auteurs évoquent la possibilité de dégrader la résolution spatiale originale jusqu'à ce qu'on atteigne une radiométrie plus stable de la surface de la route qui favoriserait la détection efficace du réseau routier. La finesse de la résolution peut être un atout mais y a-t-il une limite à partir de laquelle la variabilité radiométrique sur une chaussée confondra les seuils de détection? La figure 1.1 illustre certains cas sur un même secteur à différentes résolutions.

À titre d'exemple Benjamin et Gaydos (1990) affirment que cette résolution optimale se situerait à quelques 3 m. Comme support à leurs analyses, ils utilisent des photographies fausses couleurs d'un quartier résidentiel numérisées à différentes résolutions (de 1 m à 5 m).



Figure 1.1 : Chaussée avec ombrage et voisinage variable en secteur résidentiel.

Pour la segmentation, ils utilisent une procédure de classification non dirigée. Cependant, lorsqu'ils essaient leur méthodologie à d'autres contextes, des résultats peu concluants sont obtenus. C'est donc un point important à examiner dans notre étude. Le problème de l'efficacité de détection des routes selon le contexte ainsi que l'hétérogénéité radiométrique des surfaces de routes amènent plusieurs auteurs à conclure que la détection efficace du réseau routier sur des images de cette classe de résolution passe, comme avec les images à résolution relativement haute, par l'introduction d'une information externe. Cette information peut prendre différentes formes : 1) un modèle descriptif du réseau routier (Hinz *et al.*, 2001); 2) une carte de la couverture du sol (contexte) (Hinz *et al.*, 2001); 3) des pixels "germes" des segments de route introduits manuellement par un opérateur ou extraits d'une base de données existante (Klang, 1998 ; Price, 1999; Keaton et Brokish, 2002), et 4) la hauteur des objets (Zhang, 2004).

L'utilisation d'informations externes soulève aussi des questionnements. À titre d'exemple, dans la publication de Dal Poz et Vale (2003) précédemment citée, on compte jusqu'à 8 pixels germes pour 1 km de route sur une image en milieu rural. Comment ces résultats se transposeraient-ils en milieu urbain? Combien de pixels germes seront requis et dans quelle mesure est-ce un gain significatif par rapport à une détection manuelle?

### 1.3 Les approches de mise à jour automatisée du réseau routier

Tel que mentionné, peu d'études posent le problème de mise à jour automatisée du réseau routier à l'aide d'images optiques. Nous ne citerons que les travaux du laboratoire de télédétection de l'Université de Montréal en révisant les études qui sont à la base du module SIGMA-ROUTES. Les premiers travaux d'envergure exploitant des images SPOT panchromatiques d'une résolution de 10 m débutèrent avec la publication des résultats de recherche de Maillard et Cavayas en 1989. D'autres publications de Fiset et collaborateurs (1997,1998) donnèrent suite aux travaux de 1989 en optimisant l'algorithme de détection pour des images en milieu urbain dense.

Les travaux de Maillard et Cavayas (1989) traitaient de l'extraction automatisée des routes sur images SPOT panchromatiques pour la mise à jour des cartes à moyenne échelle telle que le 1/50K. La résolution de 10 m de ces images fut d'un intérêt particulier puisqu'elle est du même ordre de grandeur que la précision de la cartographie visée. Au-delà de la détection elle-même, les auteurs ouvraient la porte à la distinction des matériaux de la route (asphalte, gravier) selon un principe de classification des pixels. Le processus en quatre temps s'appuie sur la cartographie existante pour guider la détection des nouveaux segments de route, la révision du réseau routier existant n'étant pas prise en considération. Ce processus débute par une segmentation topologique du réseau routier transformé du format vectoriel en format raster. Il en résulte des vecteurs entre des nœuds constitués d'intersections ou autres positions particulières des routes. La seconde phase consiste à faire un arrimage spatial entre ces vecteurs topologiques et les pixels de l'image SPOT. Cette combinaison vecteurs-image se fait par le déplacement d'un filtre de détection le long des tracés ou vecteurs préalablement définis. En même temps que le réseau existant est localisé sur l'image des hypothèses sont générées quant à des éventuelles jonctions avec des nouveaux segments de route.

La dernière étape recherche des nouvelles routes à partir de pixels potentiels identifiés en se servant du même principe de détection des linéaments que dans l'étape précédente. Les résultats dans une zone rurale furent satisfaisants mais l'algorithme employé dans une zone plus urbaine a révélé ses limites quant à la distinction entre les routes et autres entités adjacentes de réflectivité similaire à celle des surfaces de route.

Fiset et collaborateurs (1997,1998) ont repris les essais avec le même type d'images dans l'objectif de raffiner l'algorithme avec des règles d'interprétation locales et de généralisation spatiale. La problématique principale du processus original résidait dans la justesse de l'arrimage vecteur-image. Elle est liée, entre autres, à l'imprécision de la cartographie qui fait l'objet d'une généralisation de ces vecteurs projetant certains d'entre eux à quelques pixels de la réalité terrain. L'incertitude de détection et d'assignation des pixels d'intersection de la cartographie de référence entachera ainsi la mise en coïncidence globale vecteur-image. Le déplacement du filtre le long de ces vecteurs plus ou moins distants de la réalité terrain engendre de nombreuses fausses détections. Les auteurs ont mis à l'essai deux approches, l'une visant l'optimisation de l'assignation des pixels d'intersections et la seconde en utilisant tous les pixels de chaque vecteur considéré comme un tout. Dans le premier cas, une fenêtre de pixels est centrée sur l'intersection et le potentiel de chaque pixel de cette fenêtre est évalué afin de déterminer lequel correspond vraisemblablement au nœud. Une fois les nœuds assignés, les vecteurs sont ajustés entre ces positions en appliquant, au besoin, quelques distorsions géométriques (contraction, étirement, rotation). L'approche impliquant séquentiellement chaque vecteur centre la fenêtre de pixels sur le premier pixel du vecteur et analyse la variabilité radiométrique de l'ensemble des pixels du vecteur. C'est en déplaçant le premier pixel potentiel dans la fenêtre que la position optimale du vecteur est assignée sur l'image.

Ce processus a été repensé et raffiné davantage lors du développement du module de SIGMA<sup>0</sup>, appelé SIGMA-ROUTES dédié à la fois à la révision du réseau existant qu'à la détection des nouveaux segments de route (Synetix, 2007). Ce module a été mis au point en utilisant des cartes topographiques au 1 :20 000 et des images optiques et radar à résolution relativement haute (environ 5 m). Les essais présentés dans cette étude reposent sur ce module. La description plus détaillée de ce module ainsi que la problématique de son adaptation à des images à très haute résolution sont présentées au chapitre 2.

## **CHAPITRE 2 : SIGMA-ROUTES : Problématique d'adaptation aux images à très haute résolution**

Ce chapitre a pour but de présenter le progiciel SIGMA-ROUTES tel que conçu pour la mise à jour des cartes du réseau routier à partir d'images satellitales à résolution relativement haute ainsi que la problématique de son adaptation à des images optiques à très haute résolution.

### **2.1 SIGMA-ROUTES : mode de fonctionnement**

La figure 2.1 montre le mode de fonctionnement du progiciel. Dans un premier temps, il y a appariement de la carte du réseau routier à mettre à jour avec l'image satellitale. Cet appariement permet d'accomplir deux tâches : la révision du réseau existant ainsi que la génération des hypothèses quant aux jonctions éventuelles entre le réseau existant et des nouveaux segments de route. La révision mène à la classification de chacun des segments du réseau existant dans trois catégories : intact, modifié et disparu.

Dans un deuxième temps, toutes les jonctions éventuelles constituent les points d'initialisation d'une procédure de suivi de routes afin de détecter les nouveaux segments de route. Chaque nouveau segment détecté est à son tour examiné pour des jonctions éventuelles avec d'autres nouveaux segments qui ne sont pas nécessairement connectés au réseau existant et la procédure de recherche des nouveaux segments est réitérée jusqu'à ce que toutes les jonctions éventuelles soient examinées. Le progiciel a été appliqué avec des images radar du satellite RADARSAT-1 (mode fin, espacement inter-pixel 6,25 m) ainsi que des images panchromatiques du satellite SPOT-5 (résolution spatiale 5m) pour mettre à jour la couche vectorielle « voies des communications » des cartes topographiques au 1/20000 du Québec (Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune).

Ces opérations sont examinées avec plus de détails dans les sections qui suivent en mettant l'accent sur l'application avec des images optiques.

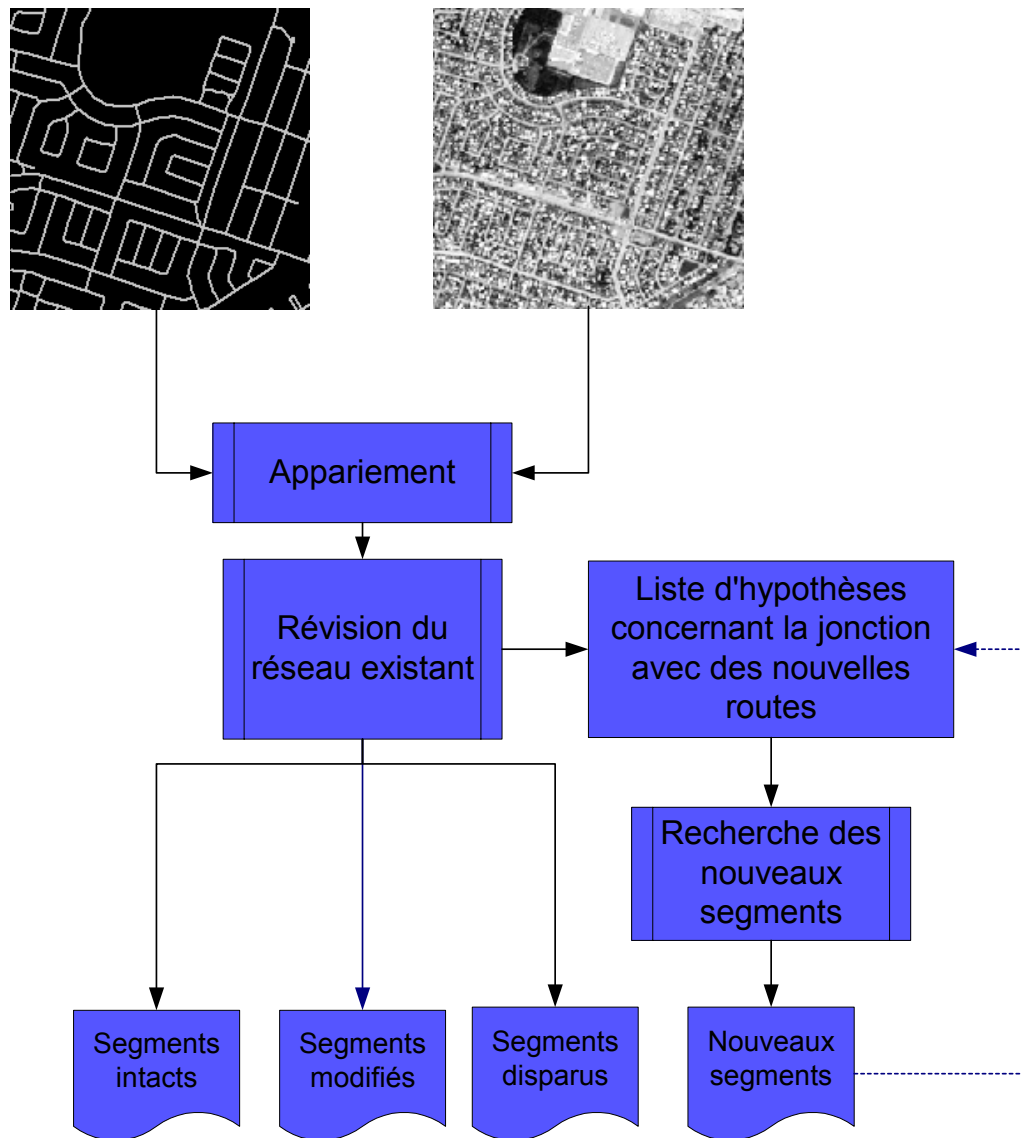


Figure 2.1 : Fonctionnement de SIGMA-ROUTES

### 2.1.1 Appariement carte et image

La couche vectorielle décrivant le réseau routier nécessite une série de prétraitements pour lui donner une forme convenable à l'opération de l'appariement carte-image. La procédure utilisée est schématisée à la figure 2.2. Plus particulièrement, elle comprend : (a) la conversion vectorielle - matricielle et la création d'une image binaire; b) le passage d'un filtre pour la reconnaissance des « nœuds » de chaque segment; ces derniers peuvent être des points de jonction avec les autres segments du réseau ou la bordure de l'image (Maillard et Cavayas, 1989); c) l'assignation d'un identificateur unique à chaque segment; d) l'assignation du code de Freeman à tout pixel par segment; et e) la création d'une base de données topologiques décrivant les caractéristiques de chaque segment (nœuds et codes de Freeman). Comme nous le verrons par la suite, le code de Freeman sert à la définition de la direction locale d'un segment. La figure 2.3 montre schématiquement les opérations pour la création de la base topographique/topologique (nommée BDT).

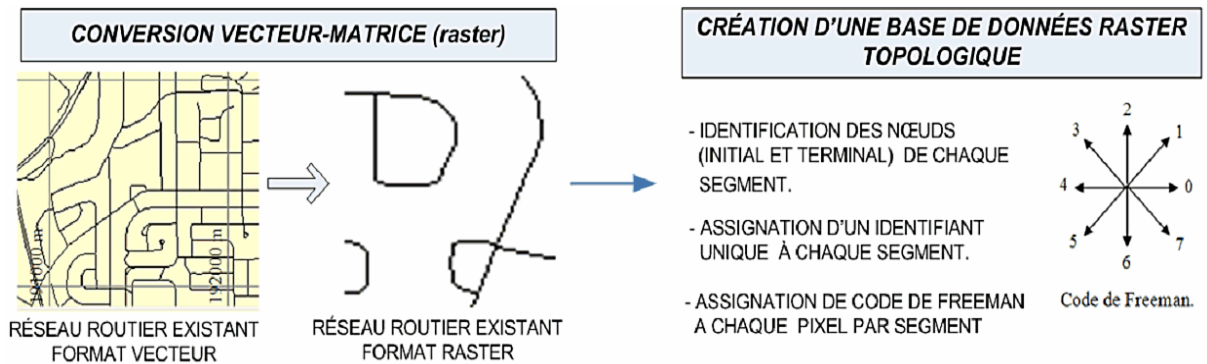


Figure 2.2 : Procédure d'appariement carte-image



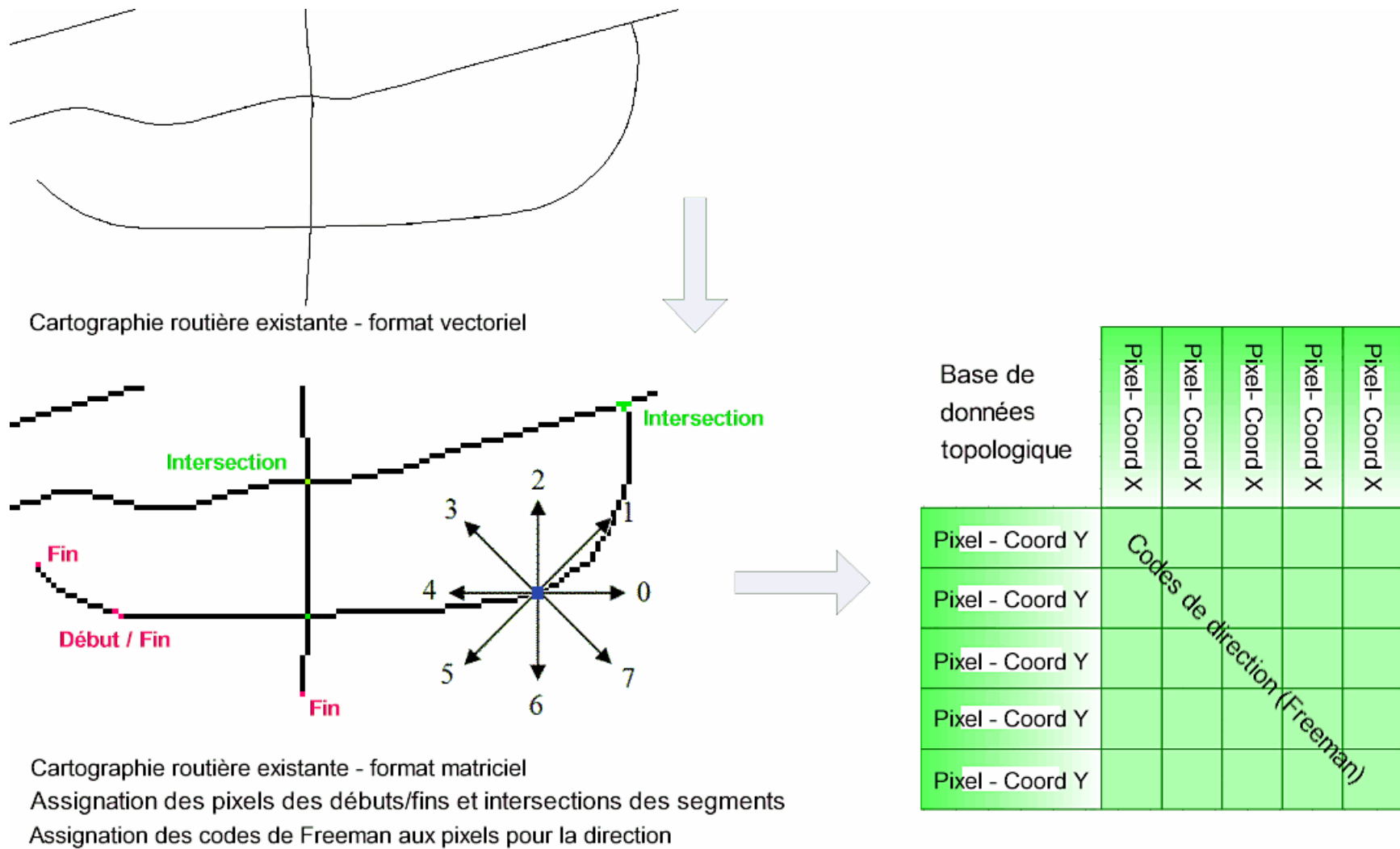


Figure 2.3 : Création de la base de données topologique

L'appariement du réseau avec l'image est nécessaire car, comme il a été observé (Maillard et Cavayas, 1989; Fiset et Cavayas, 1997), il y a toujours des décalages locaux entre l'axe de la route établi par la couche vectorielle et l'axe de la route visuellement identifiable sur les images. Ces décalages sont attribuables aux erreurs résiduelles de l'orthorectification des images ainsi qu'aux erreurs des levés photogrammétriques servant à la confection des cartes topographiques. L'opération d'appariement utilise un filtre statistique de détection des linéaments. Ce filtre développé initialement pour les images radar par Tupin et al. (1998) a été adapté aussi à la bande panchromatique de SPOT-5 dans le cas de SIGMA-ROUTES.

Le filtre de détection des linéaments est constitué d'une fenêtre de taille variable  $N \times M$  divisée en trois régions distinctes (figure 2.4). En pivotant le filtre, il est possible de détecter des linéaments orientés dans diverses directions (lignes, colonnes,  $45^\circ$  ou  $135^\circ$ ). La moyenne des valeurs des pixels de l'image dans chaque région est alors calculée et une valeur est assignée au pixel central de la région du centre comme suit :

$$r = \min(r_{12}, r_{13})$$

$r_{12}$  (région du centre vs bordure 2) &  $r_{13}$  (région du centre vs bordure 3)

Où

$$r_{i,j} = 1 - \min\left(\frac{\mu_i}{\mu_j}, \frac{\mu_j}{\mu_i}\right)$$

Avec  $\mu_i$  et  $\mu_j$  étant les moyennes des pixels des deux régions comparées.

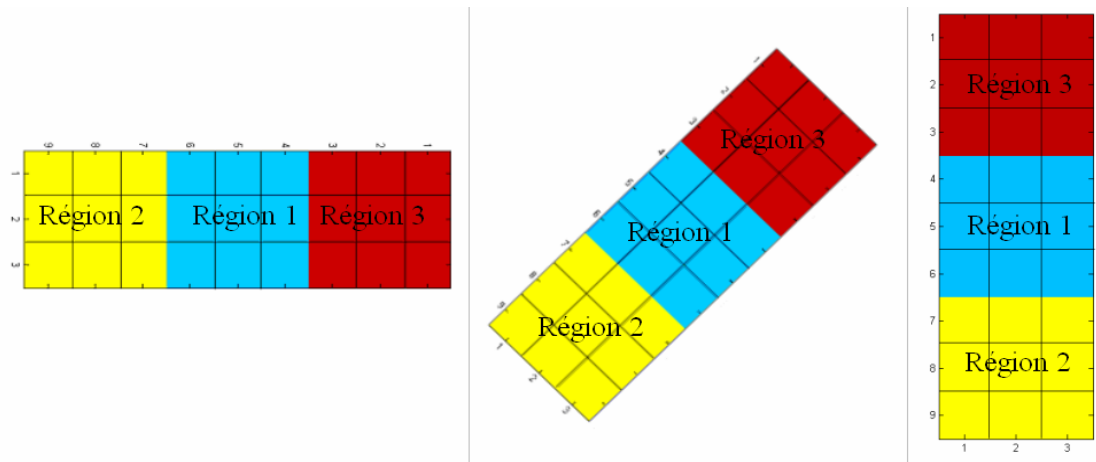


Figure 2.4 : Filtre de détection à trois régions.

Dans le cas de la bande panchromatique de SPOT-5, comprenant l'ensemble du visible, la réflectance des routes pavées est habituellement plus forte que celle de leur environnement (figure 2.5). On s'attend donc que lorsque la région du centre comprend une route sa moyenne soit supérieure aux moyennes des deux autres régions et ainsi la valeur calculée du filtre tendra vers l'unité. Dans le cas où les moyennes des régions du filtre sont proches, la valeur du filtre tendra vers zéro. Un seuil est introduit par l'utilisateur pour signaler à partir de quelle valeur du filtre, un linéament est considéré présent (par ex. 0,75)

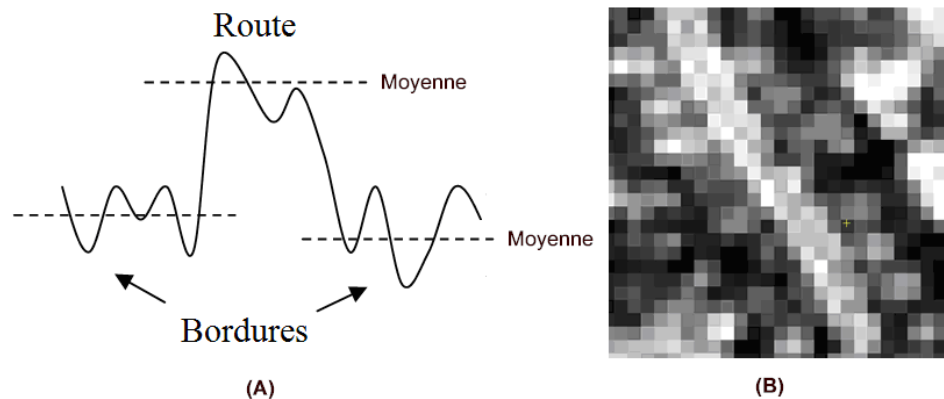


Figure 2.5 : Niveaux de gris d'une image panchromatique (ensemble du visible) autour d'une route. (a) représentation schématique d'un profil transversal, (b) image réelle

Dans la version actuelle de SIGMA-ROUTES un test d'homogénéité fut ajouté afin de minimiser les risques de détection des linéaments autres que les routes. Ce test fait appel aux écarts-types des valeurs des pixels dans les trois régions et se base sur le fait que les pixels d'une route (à résolution spatiale moyenne) présentent en principe une plus grande homogénéité que les pixels en bordure d'une route. Ce test prend la même forme que le test de la moyenne en remplaçant les valeurs moyennes par les écarts-types. Une autre valeur seuil doit être introduite pour confirmer la présence d'un linéament selon le critère de l'écart-type. L'utilisateur peut choisir un des deux critères ou la combinaison des deux. La procédure peut s'appliquer en simultané sur plusieurs composantes image (par ex. bandes spectrales d'une image multispectrale). Un score du filtre est alors calculé par composante image. L'utilisateur peut choisir de prendre en compte l'ensemble des résultats en utilisant les opérateurs logiques OU ou ET. Avec l'opérateur logique OU, il suffit qu'un des scores satisfasse le critère de détection pour qu'un pixel soit considéré comme faisant partie d'un linéament. La sélection de l'opérateur logique ET implique que tous les scores (sur les deux critères) devront être satisfaits pour la même assignation.

### **2.1.2 Révision**

L'algorithme examine l'image en déplaçant le filtre sur chacun des pixels d'un segment quelconque de la BDT. Le filtre est tenu perpendiculaire à la direction locale du segment au pixel examiné connue par le code de Freeman. Afin de tenir compte des décalages éventuels entre segments des routes et l'image, le filtre peut être décalée jusqu'à une certaine distance spécifiée par l'utilisateur (décalage perpendiculaire; figure 2.6b) de part et d'autre du segment. Le pixel central du filtre où le score est maximisé est considéré comme le pixel correspondant au pixel examiné du segment. Tel que mentionné, ce score maximum doit être toujours supérieur au seuil prédéfini, sinon la détection est déclarée nulle.

Le pourcentage de pixels du segment dont l'appariement avec l'image est confirmé est alors évalué. Si ce pourcentage dépasse un seuil (disons 70%) le segment est déclaré « intact ». Si par contre un faible pourcentage est seulement détecté (disons inférieur à 20%) le segment est déclaré « disparu ». Finalement, si le pourcentage se situe entre ces deux seuils (dans notre exemple 20% et 70%) le segment est déclaré « modifié » (suspect). Les segments modifiés de grande longueur sont ré-examinés portion par portion afin de localiser, éventuellement, la portion modifiée. Les segments reconnus comme intacts ou partiellement modifiés sont ré-examinés afin de vérifier si l'image contient des nouveaux segments qui se joindraient à eux. Le filtre s'applique alors de part et d'autre du segment cette fois-ci parallèlement ( $\pm 45^\circ$ ) à la direction locale avec un certain décalage (Décalage parallèle; figure 2.6b). Les scores du filtre sont alors calculés selon ces différentes positions. Tous les pixels centraux du filtre dont le score dépasse le seuil prédéfini sont alors retenus comme des points pour initier la recherche des nouveaux segments.

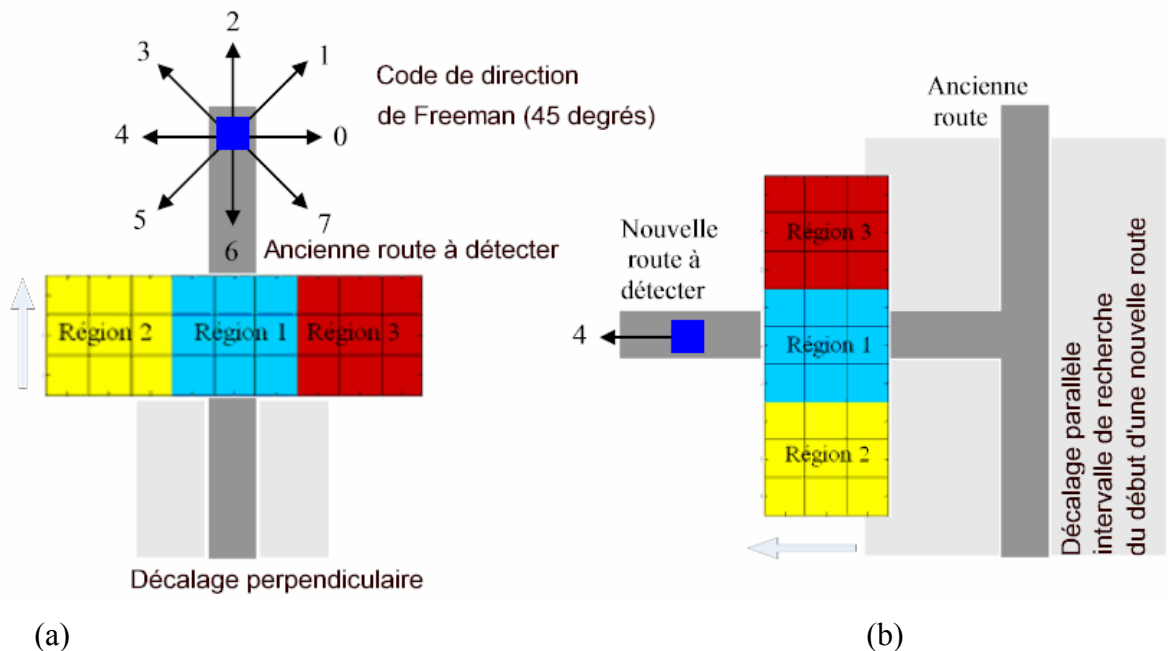


Figure 2.6: Zone de recherche pour l'appariement carte – image (a); génération des hypothèses quant à la jonction d'un nouveau segment avec le réseau existant (b).

### 2.1.2 Détection des nouveaux segments

Tel que mentionné, chaque pixel détecté comme une jonction éventuelle avec le réseau existant constitue un point de départ pour la recherche des nouveaux segments de route. Le filtre est appliqué au pixel suivant dans la direction de Freeman du premier point. Si le score dépasse le seuil prédéfini, la recherche se poursuit au prochain pixel toujours dans la direction du code de Freeman du pixel précédent et ainsi de suite. Si aucun avancement n'est possible, l'algorithme peut faire un saut de quelques pixels (saut maximum accepté) au cas où le segment serait partiellement invisible en raison, par exemple, des ombrages projetés par les arbres ou même du feuillage des arbres, etc. Si on ne trouve rien après un certain nombre de pixels la recherche s'arrête pour ce segment. Un autre pixel de jonction potentiel est alors localisé et une nouvelle poursuite d'un nouveau segment éventuel s'amorce. Ce concept tout comme celui des décalages parallèles et perpendiculaires est directement liés à la résolution d'image et nous illustrerons et quantifierons son adaptation aux images à haute résolution à la section 2.2.

### 2.1.3 Sommaire des paramètres à définir

SIGMA-ROUTES propose des valeurs par défaut des seuils et des distances de déplacement mentionnés précédemment. Ces valeurs sont calculées tenant compte de la résolution de l'image ainsi que de ses caractéristiques radiométriques (moyennes, écart types). Ces dernières sont spécifiées en examinant un échantillon des images à analyser. Le tableau II.1 récapitule les paramètres à définir ainsi que leur méthode de calcul. L'origine des termes fixes de distances (5, 10, 25 et 50 m) sera expliquée aux sections 2.2.2 et 2.2.3.

Paramètre	Valeur par défaut
Longueur du filtre	$\text{Longueur} = 3 \text{ pixels} + \left( \frac{50 \text{ m}}{\text{résolution} \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} \right)$
Largeur du filtre	$\text{Largeur} = 1 \text{ pixel} + \left( \frac{10 \text{ m}}{\text{résolution} \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} \right)$
Décalage perpendiculaire	$D_1 = 2 \text{ pixels} + \sqrt{\frac{5 \text{ m}}{\text{résolution} \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)}}$
Décalage parallèle	$D_2 = 5 \text{ pixels} + \left( \frac{25 \text{ m}}{\text{résolution} \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} \right)$
“Saut” permis pour la poursuite des nouveaux segments	<p>20 m &lt; S &lt; 30 m milieux urbains</p> <p>S &lt; 100 m milieux ruraux</p>

Tableau II.1 : Sommaire des paramètres à définir dans SIGMA-ROUTES

### 2.1.4 Implantation informatique

Les algorithmes de SIGMA-ROUTES sont programmés en langage C. Une interface graphique (figure 2.7) permet de sélectionner le type d'image à analyser et saisir les valeurs des paramètres d'application des algorithmes (tableau II.1). Toutes les données de base sont contenues dans un fichier en format \*.pix (GEOMATICA de PCI). Une fenêtre « info » (figure 2.7) permet de lire les informations sur les canaux du fichier \*.pix contenant les couches image(s) et la carte rasterisée des anciennes routes ainsi que les vecteurs de la BDTQ représentant les éléments linéaires à ne pas considérer lors de l'application de SIGMA-ROUTES. Ceci est nécessaire pour les images radar où les routes ont une brillance similaire aux éléments du réseau hydrographique.

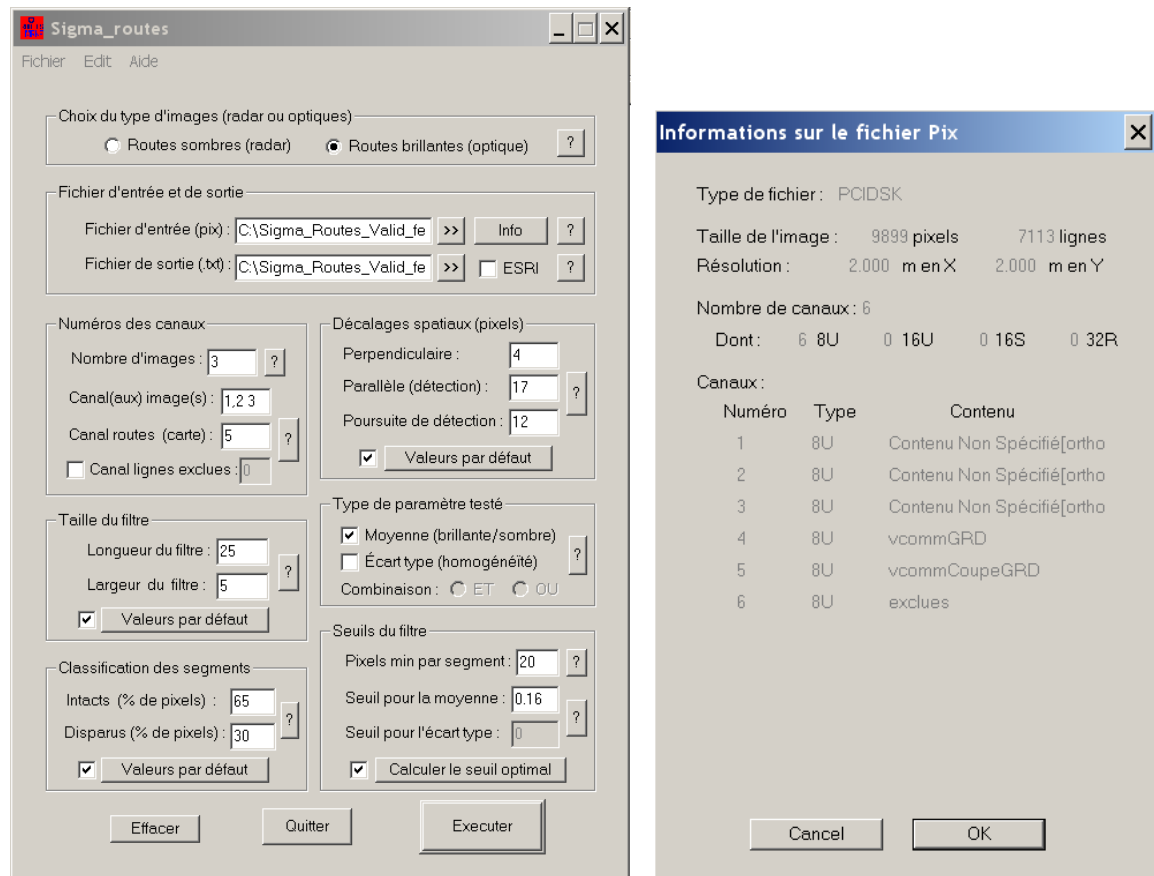


Figure 2.7. Interface graphique de Sigma<sup>0</sup> : (a) fenêtre principale de saisie des paramètres de l'algorithme; (b) fenêtre d'affichage des informations sur le fichier « .pix » utilisé.

La saisie des intrants concerne les informations suivantes :

- **Choix du type d'images (radar ou optique)** : la différence entre les deux cas réside dans la nature de la signature radiométrique recherchée. Dans le cas des images radar, le filtre détecte les pixels sombres (faible rugosité des routes) entourés de pixels brillants (arbres, bâtis, ...). Dans le cas des images optiques, le filtre détecte les pixels brillants (asphalte) bordés de pixels sombres (végétation, bâtis, ...).



- **Le fichier d'entrée (.pix)** : Il doit contenir la carte des routes existantes rasterisée, les lignes à exclure (optionnel) et les images radar ou optiques (au minimum une seule image et au maximum 14).

- **Fichier de sortie** : les vecteurs de sortie (résultats) sont stockés dans des fichiers texte dans un format lisible par la fonction VREAD de PCI ou par ESRI. Les suffixes Intacts\_, Suspects\_, Disparus, et Nouveaux\_ seront rajoutés au nom de fichier .txt indiqué ici.

- **Nombre d'images utilisées pour la détection** : le maximum étant de 14 images.

- **Numéros des canaux** : tels qu'indiqués dans le fichier pix. La touche 'Info' sert à afficher cette information.

- **Taille du filtre 3 régions** : la longueur du filtre doit correspondre à un peu plus de 3 fois la largeur de la route pour contenir la route (dans la région centrale du filtre) et les bordures (les deux régions extérieures du filtre). Le bouton 'Valeurs par défaut' propose des valeurs en fonction de la résolution lue sur le fichier (.pix) d'entrée.

- **Pourcentages des pixels détectés permettant de classer les segments** : 'Intacts (%)' est le pourcentage de pixels au-delà duquel un segment sera classé comme étant 'Intact'. 'Disparus (%)' est le pourcentage de pixels en deçà duquel un segment est classé 'Disparu'. Entre les deux pourcentages, le segment est classé 'Suspect'.

- **Pixels minimum par segment** : c'est la longueur minimale (en pixels) pour laquelle un nouveau segment détecté sera retenu. Cette condition permet de diminuer les fausses alarmes.

- *Décalages  $D_1$ ,  $D_2$  et  $S$*  : des valeurs par défaut calculées en fonction de la résolution sont proposées.

- *Seuils de détection* : les seuils (moyenne et/ou écart-type) pour lesquels la région centrale du filtre trois régions est considérée comme une portion de route.

- *Nom de fichier de sortie* : les préfixes explicites « Intacts\_ », « Disparus\_ », « Suspects\_ » ou « Nouveaux\_ » sont rajoutés au nom du fichier de sortie donné par l'utilisateur.

## 2.2 Adaptation aux images optiques à très haute résolution

Cette section est dédiée à la description des modifications éventuelles dans la structure et le fonctionnement de SIGMA-ROUTES pour permettre son application avec des images à très haute résolution.

### 2.2.1 Utilisation des images multi-composantes

Dans notre étude nous utiliserons des images multi-composantes, plus particulièrement des orthophotographies couleurs normales numériques d'une résolution de 21 cm (voir chapitre 3). Tel que mentionné, dans sa version actuelle SIGMA-ROUTES peut s'appliquer en parallèle sur différents canaux sans égards à leur type. Ainsi, une route non détectée sur une image en raison d'un faible contraste ou de toutes autres variations radiométriques pourra être détectée sur une autre. Cette approche de complémentarité entre les images peut s'avérer intéressante dans notre cas avec l'exploitation en parallèle des canaux RGB d'une photographie aérienne couleur d'origine ou après application des divers prétraitements d'images ce qui constitue un des principaux volets de cette étude.

SIGMA-ROUTES appliqué sur des images optiques présuppose que les surfaces de route sont plus réfléchissantes que leur environnement immédiat (fig. 2.5). La même tendance s'observe sur les différentes bandes d'une photo couleur, surtout dans les bandes bleue et rouge (fig.2.8). Cependant les photographies aériennes à haute résolution présentent une augmentation de l'hétérogénéité des valeurs de pixels entre les régions latérales et le centre des routes comparativement aux images à résolution un peu plus faible. Les espaces adjacents aux voies de communication sont généralement constitués d'infrastructures urbaines ou de divers types de végétation selon la nature du milieu. En milieu urbain, les toitures des bâtiments sont habituellement plus sombres que le revêtement de la route mais les écarts sont plus nuancés que sur les images à résolution relativement haute. Quant à la végétation, elle est peu réfléchissante dans le visible. Des modifications des paramètres d'application du filtre de détection de linéaments s'avèrent donc nécessaires pour tenir compte de ces particularités des photographies couleurs à très haute résolution. C'est le sujet de la prochaine section.

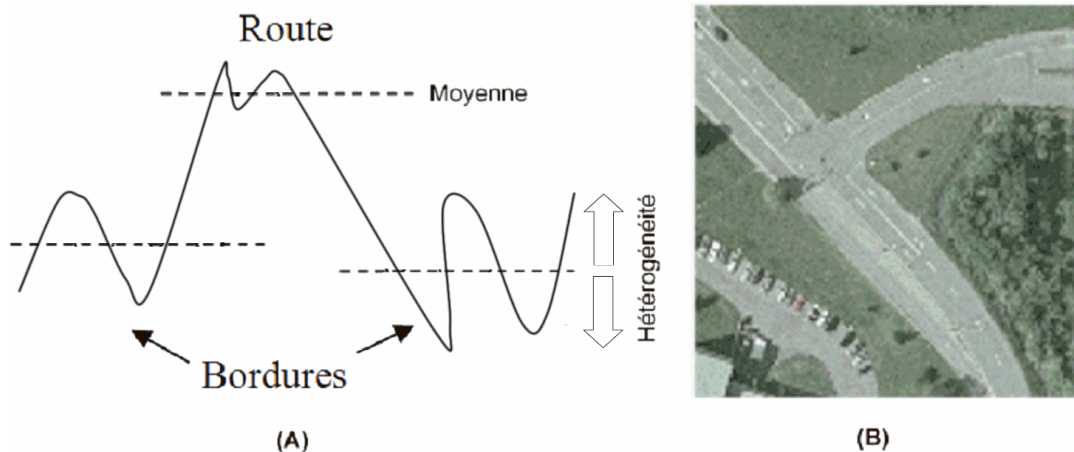
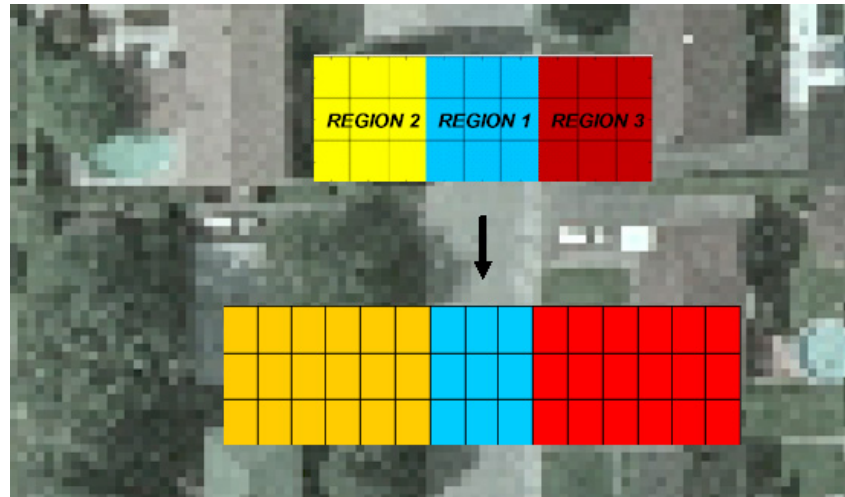


Figure 2.8 : Variation d'hétérogénéité des pixels entre routes et bordures sur images à haute résolution. (a) représentation schématique, (b) image réelle

### 2.2.2 Le filtre de détection des linéaments

La version originale de SIGMA-ROUTES utilise un filtre de trois régions de proportions égales soit 3 fois  $1/3$ . Compte tenu de la résolution des photographies, nous devons opter plutôt pour une partie centrale plus étroite et augmenter les régions latérales afin de maximiser les contrastes (critère de détection par la moyenne) et le degré d'hétérogénéité des portions latérales (critère de détection par l'écart-type). Une région centrale occupant 20% de la longueur du filtre et les bordures 40% chacune seraient appropriée (figure 2.9). La longueur totale de la fenêtre du filtre serait ainsi augmentée à cinq fois la longueur de la région centrale. Cette configuration de 1 fois  $1/5$  et 2 fois  $2/5$  devrait mieux exploiter l'homogénéité de la région centrale et l'hétérogénéité des bordures de routes sur des images à haute résolution.

La longueur du filtre doit être choisie de manière à ce que la dimension de la région centrale soit approximativement égale à la largeur de la route. C'est donc sur la base d'une route type de 10 m de largeur qu'est établie la longueur de référence de 50 mètres (5 X 10 mètres de largeur) pondérée en fonction de la résolution de l'image par les relations du tableau II.1 reprises à la figure 2.9. On note que la longueur totale du filtre passe de 30 m (3 X 10 m) à 50 m dans la version modifiée de l'application. Dans un contexte de résolution spatiale fine combinant des routes ayant une largeur variable, l'augmentation de la longueur du filtre permet de récupérer plus de pixels dans les régions latérales du filtre, ce qui augmente la chance d'obtenir une réponse élevée. C'est particulièrement le cas des chemins plus étroits qui devraient bénéficier de cette modification.



$$\text{Longueur} = 3 \text{ pixels} + \left( \frac{50 \text{ m}}{\text{résolution} \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} \right)$$

$$\text{Largeur} = 1 \text{ pixel} + \left( \frac{10 \text{ m}}{\text{résolution} \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} \right)$$

Figure 2.9 : Remplacement du filtre 3 fois 1/3 de la version originale par le filtre 1 fois 1/5 et 2 fois 2/5.

Les essais préliminaires ont démontrés cependant que même avec cet ajustement de la longueur du filtre que l'unique critère de la moyenne n'est pas suffisant. Le critère d'écart-type se présente en renfort et peut être utilisé seul et en combinaison avec la moyenne. Le critère d'écart-type pourrait être favorisé après certains traitements d'images qui uniformisent la région centrale par rapport aux bordures. Les essais du chapitre 5 quantifieront les gains de performances s'il y a lieu.

Selon ces critères, la réponse du filtre représentant le seuil de détection sera définie par :

Approche par moyenne : $\mu_i$ est la moyenne des pixels de la région $i$	$r_{ij} = 1 - (\mu_j / \mu_i)$	$r = \min (r_{12}, r_{13})$
Approche par l'écart-type : $\sigma_i$ est l'écart-type des pixels de la région $i$	$r_{ij} = 1 - (\sigma_i / \sigma_j)$	$r = \min (r_{12}, r_{13})$

### 2.2.3 Les décalages spatiaux et la classification des segments

Tel qu'indiqué au tableau II.1 les règles empiriques pour calculer le décalage perpendiculaire à la BDT (retraçage du réseau existant) et parallèle à la BDT (recherche de la jonction d'un nouveau segment de route) sont définies en termes de la résolution spatiale de l'image. Les paragraphes qui suivent illustrent avec des exemples tirés de nos données de base (chapitre 3) l'application de ces règles et leur adaptation dans le cas des images à très haute résolution. Dans ces exemples la résolution spatiale des images a été fixée à 84 cm.

#### 2.2.3.1 Révision

Le retraçage des anciennes routes et le repérage des segments disparus utilisent les pixels de la BDT pour guider l'application du filtre perpendiculairement à la direction locale de la route connue par le code de Freeman ( $\pm 45^\circ$ ). Tel que montré à la figure 2.10, le pixel de la route peut ne pas correspondre à la position de la BDT sur l'image. Un décalage du filtre perpendiculairement à la BDT favorise la correspondance du centre du filtre à la route dans l'image en fonction des imprécisions planimétriques de la BDT et de l'image.

Les exemples des figures 2.10 à 2.12 montrent que les décalages des vecteurs de la BDT par rapport à l'axe visuel de la route sont omniprésents. Ceci est explicable par le fait que les vecteurs ont été saisis par photogrammétrie à partir des photographies à l'échelle au 1 :40 000 et l'erreur planimétrique moyenne est fixée à 4 m selon les normes de la cartographie au 1 :20 000 . Ainsi, le décalage du filtre perpendiculairement à la BDT est absolument nécessaire pour pouvoir identifier la bonne position du réseau existant sur des images à très haute résolution. À titre d'exemple, sur la figure 2.10, on note que le vecteur en jaune de l'ancienne cartographie est partiellement décalé dans la région boisée de l'image. En appliquant l'intervalle de décalage préconisé (tableau II.1) avec la résolution de 84 cm/pixel, on obtient :

$$D_1 = 2 \text{ pixels} + \sqrt{\frac{5 \text{ m}}{\text{résolution} \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)}} = 2 \text{ pixels} + \sqrt{\frac{5 \text{ m}}{0,84 \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)}} = 4,4 \text{ pixels}$$

Dans l'interface de SIGMA-ROUTES la valeur de 4 pixels fut saisie. Ce décalage à gauche de l'axe de la BDT permettrait à la partie centrale du filtre de se repositionner dans l'étroit chemin. Cette formule de calcul permettant un balayage adéquat est maintenue dans notre étude. Dans ce contexte, si l'application du filtre ne donne pas de résultat, le pixel examiné est considéré inexistant (non reconnu ou disparu). Ainsi, pour classifier un segment à l'état d'intact ou disparu, il faut définir une limite en pourcentage de pixels reconnus. C'est ainsi que pour chaque segment de la *BDT* (entre chaque nœud initial et terminal), un rapport entre le nombre des pixels trouvés sur l'image et le nombre de pixels total de chaque segment est déterminé. Tel qu'illustré au bas de la figure 2.10, si ce rapport est inférieur à 30% (ou un autre seuil choisi), le segment a probablement disparu et est classé comme tel. S'il est supérieur à 70% (dans cet exemple), le segment est classé comme inchangé ou intact.

Entre les deux proportions, il y a doute de classement et les segments sont classés suspects. Les segments suspects dont la taille est supérieure à 20 pixels sont divisés en deux et traités de nouveau dans le but d'avoir un maximum de pixels classés intacts ou disparus (donc un minimum de pixels suspects).

**Décalages spatiaux (pixels)**

Perpendiculaire : 4

Parallèle (détection) : 20

Poursuite de détection : 20

Ancienne cartographie 1/20K avec imprécision planimétrique

**Routes Existantes (RE)**

DPG-RE : Décalage Perpendiculaire Gauche

DPD-RE : Décalage Perpendiculaire Droite

**Nouvelles Routes (NR)**

DPG-NR : Décalage Parallèle Gauche

DPD-NR : Décalage Parallèle Droite

**Classification des segments**

Intacts (% de pixels) : 70

Disparus (% de pixels) : 30

Valeurs par défaut

**Seuils de classement des segments**

Rapport en % entre le nombre des pixels trouvés sur l'image et le nombre de pixels total de chaque segment

Figure 2.10 : Retraçage des anciennes routes, détection des routes existantes et seuils de classement



### 2.2.3.2 Nouvelles routes

La détection de nouvelles routes à partir des anciennes débute par la recherche de points de départ potentiels. De ces derniers, s'initiera la poursuite de la recherche par un processus itératif illustré d'un exemple à la figure 2.12. L'algorithme cherche d'abord les premiers pixels des nouvelles routes en appliquant le filtre le long des routes de la *BDT* avec un certain décalage parallèle de part et d'autre à l'ancienne route et à  $\pm 45^\circ$ . On respecte ainsi une règle de détection qui stipule que les nouvelles routes sont connectées aux anciennes routes. Ce décalage parallèle devrait correspondre à environ deux à trois fois la largeur d'une route locale afin de généraliser son application aux différentes catégories de routes et de considérer l'incertitude de localisation des vecteurs cartographiques du 1/20K. Conséquemment, une largeur moyenne de routes de 10 mètres multipliée par 2,5 donne une référence de 25 mètres combinée à la résolution spatiale. Dans l'exemple de la figure 2.10 (résolution de 84 cm/pixel), une valeur de 35 pixels est suggérée à titre de décalage parallèle par la relation ci-dessous.

$$D_2 = 5 \text{ pixels} + \left( \frac{25 \text{ m}}{\text{résolution} \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} \right) = 5 \text{ pixels} + \left( \frac{25 \text{ m}}{0,84 \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} \right) \cong 35 \text{ pixels}$$

Nous avons volontairement saisi une valeur inférieure à 20 pixels afin d'illustrer à la figure 2.11 qu'une valeur inférieure ne seraient pas adaptée à l'incertitude de la cartographie de référence pour le repérage du point de départ potentiel de la nouvelle route. On constate visuellement sur la figure 2.11 que le décalage parallèle gauche (DPG) au niveau de la nouvelle route rejoint à peine le centre de la route existante. En contrepartie, une valeur trop forte, augmenterait sensiblement le risque de fausse détection de points de départ.

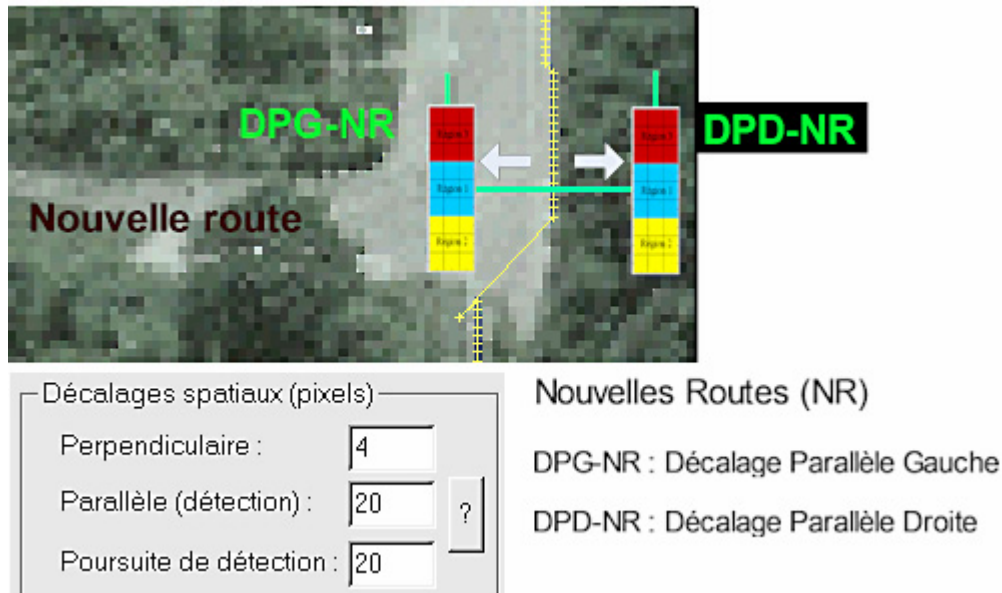
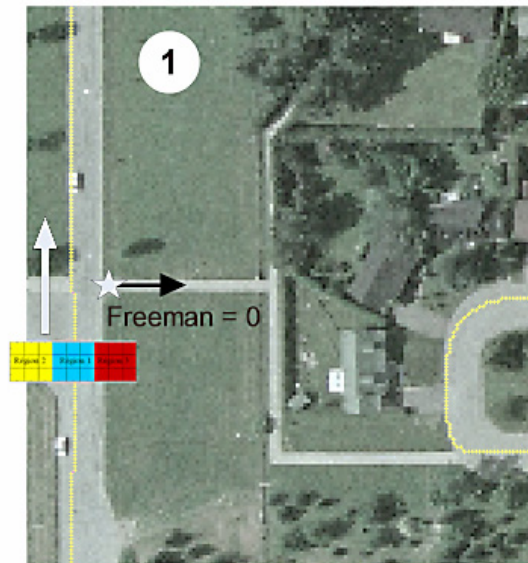
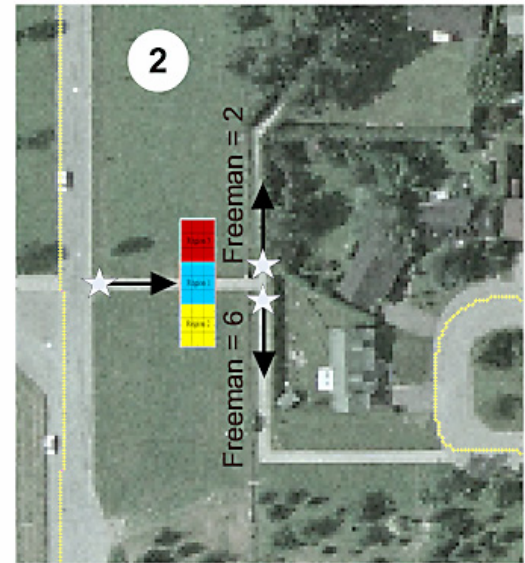


Figure 2.11 : Paramètre de décalage parallèle inadéquat.

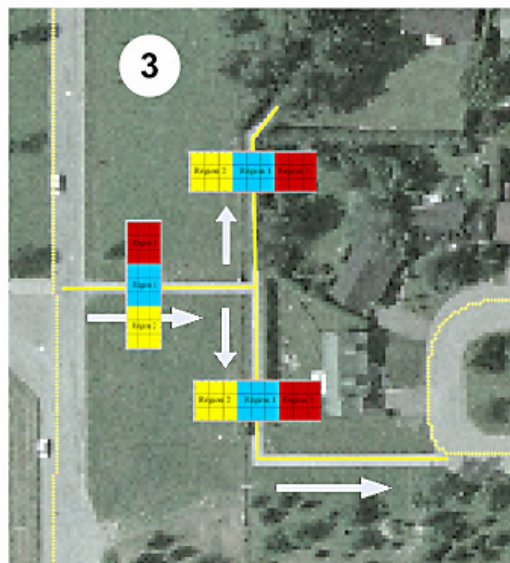
À la figure 2.12 phase 1, on illustre le cas de détection d'un point de départ potentiel et du code de Freeman associé pour la suite de la procédure de détection. La phase 2 de cet exemple poursuit la séquence en appliquant le filtre dans la direction indiquée par le code de Freeman tant que sa réponse est favorable. Dans le cas contraire, nous sommes possiblement en présence d'un tronçon de voie masqué et la recherche se poursuit quelques pixels plus loin. Le processus de recherche est interrompu après la non-détection (réponse du filtre inférieure au seuil) d'un certain nombre de pixels consécutifs. La valeur proposée pour cette distance est de l'ordre de 20 à 30 m. Dans le but de poursuivre et raffiner la détection, les deux étapes précédentes sont répétées en remplaçant l'image des pixels route de la *BDT* par ceux des nouveaux segments trouvés. Ainsi, un processus itératif est utilisé pour détecter le maximum des pixels qui répondent bien au filtre et qui sont connectés de manière plus ou moins perpendiculaire (code de Freeman  $\pm 1$ ) à la route.



Décalage parallèle p/r à la carto 20K  
Premier pixel de la nouvelle route ☆  
Code de direction associé (Freeman)



Filtre appliqué dans la direction  
du code de Freeman → 0  
Deux pixels de nouvelles routes



**ITÉRATION - VALIDATION**

Passage itératif du filtre en considérant la nouvelle route comme étant intégrée au réseau routier connu de la cartographie

Arrêt du processus après la non détection sur un certain nombre de pixels consécutifs

	Segment de route de la cartographie 1/20K
	Premier pixel détecté et code de direction Freeman = 0

Figure 2.12 : Séquence de détection des nouvelles routes

Afin d'éliminer les pixels isolés tels que ceux des bâtiments, seuls les segments ayant une longueur assez importante (par exemple, > 6 pixels en région urbaine et > 10 pixels en zone forestière) sont gardés. La figure 2.13 illustre un exemple de progression de la détection des points de départ potentiels. En conclusion, pour la recherche des nouvelles routes, les mêmes règles adaptées à la résolution de nos images ont été maintenues dans notre étude.

```

C:\ALL_DATA\Applications-programmes\Prog_geomatique\AlgoSigma0Routes\Sigma_R...

VERIFICATION DES ROUTES EXISTANTES

Verification des routes existantes. Segments traites : 0 sur 238
Verification des routes existantes. Segments traites : 100 sur 238
Verification des routes existantes. Segments traites : 200 sur 238

Re-examen des segments suspects, iteration #:1
Re-examen des segments suspects, iteration #:2
Re-examen des segments suspects, iteration #:3
Re-examen des segments suspects, iteration #:4

DETECTION DES NOUVELLES ROUTES

Recherche des premiers points potentiels des nouvelles routes, iteration# 1

Detection des nouvelles routes a partir des premiers points potentiels
Iteration # 1      Point potentiel # 0
Iteration # 1      Point potentiel # 1000
Iteration # 1      Point potentiel # 2000
Iteration # 1      Point potentiel # 3000

```

Figure 2.13 : Interface d'état de progression de la détection

## **CHAPITRE 3 : Approche méthodologique**

Ce chapitre a pour but de présenter la démarche méthodologique adoptée dans cette recherche. Cette démarche tient compte de l'état de l'art dans le domaine de l'imagerie optique à très haute résolution, tel que mentionné au chapitre 1 ainsi que de la problématique d'adaptation de SIGMA-ROUTES à ce type d'imagerie abordée au chapitre 2. Après avoir survolé les étapes de notre démarche nous allons décrire notre site à l'étude, les données utilisées ainsi que divers prétraitements visant la préparation de nos données en vue des analyses qui seront présentées aux chapitres 4 à 6.

### **3.1 Démarche méthodologique : description générale**

Nous avons opté pour la démarche suivante :

1. Choix du site à l'étude
2. Confection d'une carte de vérité terrain
3. Étalonnage des paramètres d'application du filtre de détection des linéaments
4. Définition du protocole expérimental
5. Application de SIGMA-ROUTES
6. Validation des résultats

Le MRNF a mis à notre disposition des orthophotographies numérisées couvrant l'ensemble du territoire compris dans le feuillet cartographique 21E05-200-201. Ce territoire couvert par une cinquantaine de photos à 21 cm de résolution comprend la Ville de Sherbrooke et ses environs à l'été 2006. Les détails sur cet ensemble de données sont présentés à la section 3.2 et dans l'Annexe 1. Compte tenu du volume de données, du nombre de tests que nous avons à effectuer et le temps disponible pour compléter notre mémoire nous n'avons choisi qu'une petite portion de ce territoire comme site d'expérimentation. Ce site ainsi que la justification de notre choix sont présentés à la section 3.2.6.

La deuxième étape de notre démarche comprenait la confection d'une carte décrivant la situation des voies de communication au moment de la prise de photos aériennes en indiquant la classe de chacun des éléments du réseau selon la nomenclature utilisée dans SIGMA-ROUTES : éléments intacts, disparus, suspects (doute) et nouveaux segments. Ceci a été effectué par interprétation visuelle de la photo couvrant notre site en comparaison avec la couche des voies de communication de la BDTQ. Cet exercice nous a aussi permis de mieux évaluer les résultats anticipés après l'application de SIGMA-ROUTES. La carte de vérité terrain ainsi que l'évaluation des résultats anticipés sont donnés dans la section 3.3.

La troisième étape vise à étalonner des paramètres d'application du filtre de détection des linéaments en fonction de l'étendue des signatures spectrales et des variantes engendrées par les traitements de rehaussement. Tel que mentionné au chapitre 2, SIGMA-ROUTES fut initialement testé avec des images RADAR où les voies de communication ont un comportement radiométrique similaire et la résolution des images est moyenne. Qu'en est-il dans notre cas avec les bandes spectrales d'une image couleur normale? Quel est le degré d'hétérogénéité des signatures spectrales des voies de communication? Pour répondre à ces questions nous avons choisi un échantillonnage de segments de différentes catégories de routes sur le site d'essai afin d'établir les paramètres d'application du filtre de détection des linéaments. Les résultats de cette analyse préparatoire sont décrits dans la section 3.4.

La quatrième étape, décrite à la section 3.5 vise à définir le protocole expérimental de notre recherche sur la base des connaissances du territoire acquises aux étapes précédentes. Les deux dernières étapes soient l'application et les validations font le sujet des chapitres 4 à 6.

### 3.2 Choix du site à l'étude

Tel que mentionné dans la section d'introduction de ce mémoire, le MRNF utilise les feuillets existants des cartes au 1/20 000 à titre de canevas de référence pour la mise à jour de ces derniers. Les données mise à notre disposition incluent la Ville de Sherbrooke (lat. 45°24' N / long. 71°53'O) et les régions environnantes sur une superficie globale de 360 km<sup>2</sup> soit approximativement celle du feuillet topographique 21E05-200-0201 à l'échelle 1/20 000. Près d'une centaine de photographies aériennes couleur à l'échelle de 1/15 000 couvrent le territoire avec un recouvrement longitudinal de 60% requis pour les travaux de photogrammétrie. Une photo sur deux dans la séquence d'acquisition a été scannée et orthorectifiée à une résolution spatiale de 21 cm. Les orthophotos numériques ainsi fournies par le MRNF ont un recouvrement longitudinal de 10%. Les figures de l'Annexe 1 montrent la disposition des photos disponibles à l'intérieur du feuillet cartographique. Le fichier de voies de communication du feuillet cartographique susmentionné (mis à jour par le MRNF en 2000) complète le jeu de données mises à notre disposition par le MRNF.

À titre de première intervention sur les données, nous avons procédé à l'harmonisation des référentiels cartographiques puisque les fichiers numériques des photographies sont en projection MTM zone 7 alors que la cartographie du réseau routier était en coordonnées géographiques (latitude, longitude). La génération des cadres de couverture aérienne et des identifiants de clichés superposés à la cartographie routière nous ont permis de cibler une zone de test pour la diversité des voies de communication ainsi que de la densité de ce réseau (figure 2, Annexe 1).

Le site test, présenté aux figures 3.1A et 3.1B, est localisé au coin nord-ouest de la photo aérienne 129-031. Avec une couverture de 8000 X 8000 pixels d'une résolution de 21 cm, il occupe ainsi une région de 1680 m par 1680 m pour une superficie totale de 2 822 400 m<sup>2</sup> ou 282,24 ha. La longueur totale des voies de communication est de 38,9 km

après découpage du secteur sur la cartographie au 1/20 000. La caractérisation de son contenu se distingue sous l'aspect ciblé des voies de communication et les autres utilisations du sol définies à la section 3.2.1.



Figure 3.1A – Découpage du site test sur le territoire



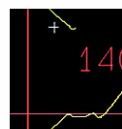


### COUVERTURE PHOTOGRAPHIQUE AVEC SITE TEST (RÉGION DE SHERBROOKE)

Projection Mercator Transverse Modifiée zone 7

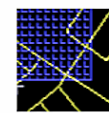


Réseau routier- carto 1/20K



Limites de couverture photographique

Identification des photos aériennes



Limites de la zone test

Figure 3.1B – Découpage du site test sur le territoire avec localisation relative sur photographie

### 3.2.1 Autres utilisations du sol

Un algorithme automatisé peut confondre un toit de bâtiment avec un court segment routier sur la base de sa signature radiométrique. C'est pourquoi l'application est dotée de critères de sélection décrits au chapitre 2. Dans l'objectif de bien calibrer ces paramètres et de valider leur juste application, il est important que le site test constitue une épreuve où l'algorithme de traitement devra se confronter à des entités variables présentes aussi bien dans un milieu urbain que rural ou industriel. Pour quantifier les entités non routières, nous avons procédé à une numérisation sommaire mais distinctive de polygones avec assignation de codes selon une classification de contenu. Le tableau III.1 présente les valeurs de superficies des polygones ainsi qu'un pourcentage de couverture relative représentatif de la diversité de contenu.

Type	Superficie (estimation)		% de couverture
	(m <sup>2</sup> )	(ha)	
Hydrographie	146 500	14,65	5,2
Boisés	417 200	41,72	14,8
Aires ouvertes végétales	431 900	43,19	15,3
Milieu résidentiel	1 124 200	112,42	39,8
Milieu industriel	702 600	70,26	24,9
<i>Total :</i>	<i>2 822 400</i>	<i>282,24</i>	<i>100,0</i>

Tableau III.1- Pourcentage de couverture relative sur le site test

On constate que les principales catégories y sont présentes avec la variabilité inhérente à chacune d'elles en termes de superficies et de nature de surface. C'est particulièrement le cas pour les milieux résidentiels et commerciaux dont les toitures et aires de stationnement ont des géométries et surfaces variées. À titre d'exemple, sur le site, la superficie des toitures va de 36 m<sup>2</sup> en milieu résidentiel à 20 600 m<sup>2</sup> dans le secteur industriel.

### 3.2.2 Voies de communication

Les entités routières telles que rues, boulevards, grandes artères et autoroutes présentent des caractéristiques géométriques et radiométriques diverses. De l'autoroute au chemin non-carrossable, il y a un lien indéniable avec le potentiel de détection. Les principales nuances qui apportent un défi de reconnaissance et d'extraction sont énumérées au tableau III.2.

Aspect	Caractéristiques	Exemples
Géométrie et formes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Largeur, longueur</li> <li>- Intersection, angle de connexion</li> <li>- Courbes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autoroute à double voie et entrée asphaltée de résidence</li> <li>- Terrain de stationnement</li> </ul>
Radiométrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Type de chaussée</li> <li>- Non-homogénéité des surfaces</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Asphalté, béton, gravier</li> <li>- Travaux de réfection locaux ou par tronçons.</li> </ul>

Tableau III.2 : Caractéristiques géométriques et radiométriques des entités routières affectant la détection

Les tableaux III.3 et III.4 énumèrent et quantifient par catégorie les types de voies de communication sur le site d'essais. La terminologie associée aux différentes catégories fait référence à une liste d'indicatifs ou de codification des voies de communication servant à des fins de structuration cartographique. L'annexe 2 contient une liste de ces indicatifs normalisés. La figure 3.2 présente une classification des vecteurs de voies de communication du 1/20 000 sur le site test. Nous ferons éventuellement référence à ces informations pour les attentes de reconnaissance automatique.

<b>Catégories</b>	<b>Indicatifs inclus</b>
Chemins	Chemins carrossables pavés ou non pavés, chemins non carrossables
Rues	Rues pavées et non pavées (résidentiel ou industriel sur ce site)
Routes locales	Routes locales pavées ou non pavées (artère locale sur le site)
Routes collectrices	Routes collectrices pavées ou non pavées (grands boulevards sur site)
Voies ferrées	Voies ferrées

Tableau III.3 : Terminologie des catégories des voies de communication du 1/20K

<b>Type</b>	<b>Distances (<math>\pm</math> 50 m) (km)</b>	<b>%</b>
Chemins	4,7	12,1
Rues	25,3	65,0
Routes locales	1,7	4,4
Routes collectrices	4,5	11,6
Voies ferrées	2,7	6,9
<i>Total :</i>	<i>38,9 km</i>	<i>100,0</i>

Tableau III.4 : Quantification des vecteurs de voies de communication sur le site

### 3.2.3 Contenu du site et résolution spatiale

Selon les informations du tableau III.3 et de la figure 3.2, l'application sera confrontée à la reconnaissance de petits segments de rues de moins de 40 m avec multiples intersections jusqu'à de larges voies rapides rectilignes. Les différentes résolutions spatiales de notre jeu de données affecteront la distinction des surfaces entre les voies pavées ou non, les aires de stationnements et autres entités. Les prétraitements d'images pourraient aussi avoir un rôle primordial afin d'accentuer les distinctions de valeurs de pixels sur les trois bandes.

## DESCRIPTION DU SITE TEST - PONDÉRATION DU CONTENU

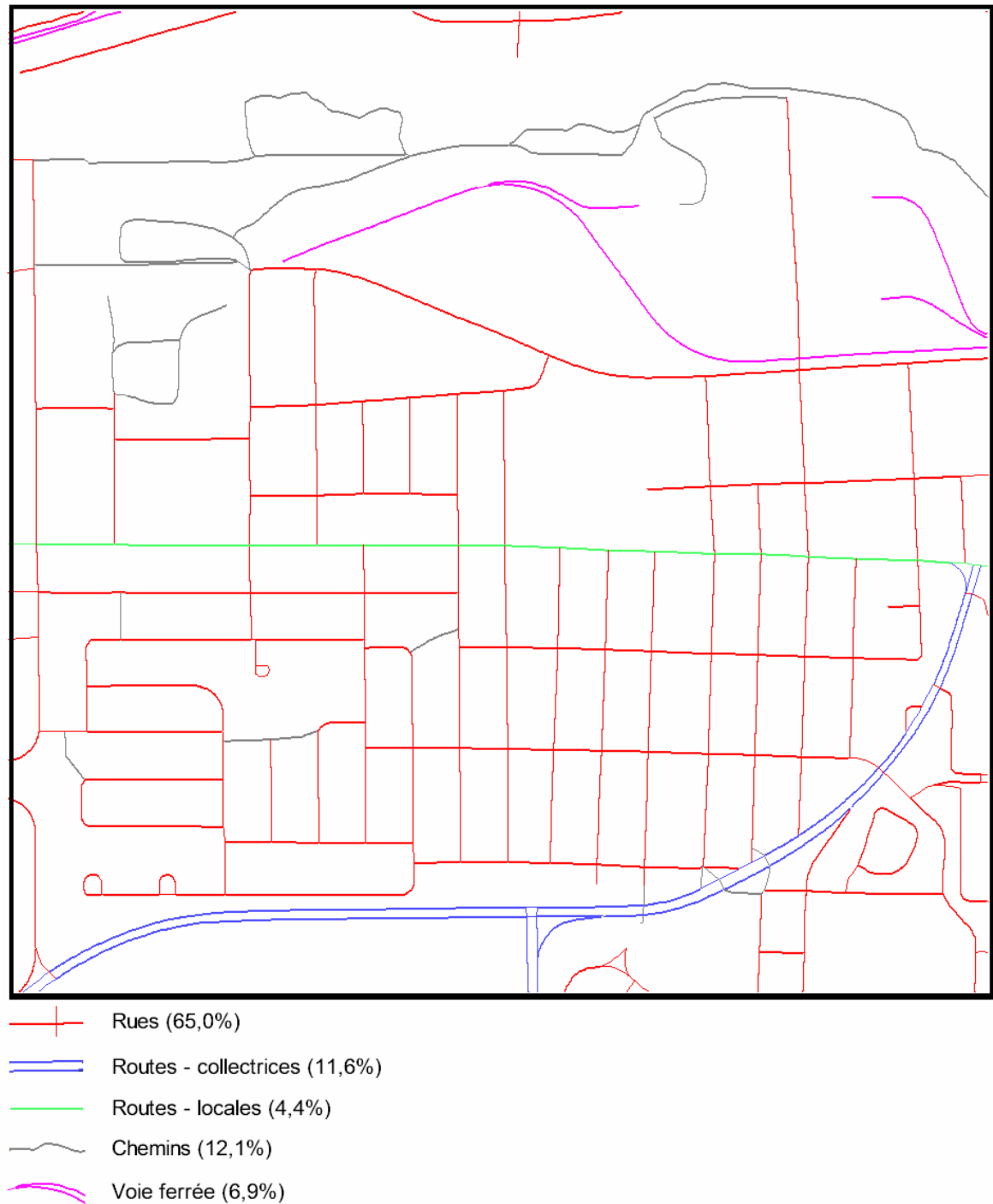


Figure 3.2 : Contenu du site test selon les indicatifs de description

### 3.3 Confection d'une carte de vérité terrain (référence et attentes)

L'évaluation du rendement de l'application implique une comparaison des résultats avec des données de référence. Ces dernières sont obtenues par extraction visuelle/manuelle en deux étapes. Les vecteurs du réseau routier du 1/20K sont d'abord segmentés en trois classes soient les segments intacts, les disparus et les cas suspects. Les nouveaux segments sont ensuite numérisés sur l'image du site test. La figure 3.3 présente quelques exemples.



Figure 3.3 : Vecteurs de la cartographie 1/20K segmentés par détection visuelle/manuelle.

Cette approche de détection visuelle sur photographies à haute résolution génère le produit cible. Bien que sujette aux erreurs d'omissions, la détection visuelle fait aussi appel aux capacités d'interprétation de l'opérateur sur des données partielles ou de cohérence géométrique imparfaite. La figure 3.4 illustre un tel cas.



Figure 3.4 : Assignment à la catégorie INTACT des vecteurs 1/20k par interprétation de l'opérateur

Dans cette dynamique d'interprétation simultanée d'images et de vecteurs imparfaits, on peut émettre des réserves quant aux limites des capacités d'extraction non assistées d'une application. En ce sens, l'approche semi-automatique préconisée par Dal Poz et Vale (2003), citée à la section 1.2.2, utilisait de nombreux points "germes" localisés stratégiquement par l'opérateur pour guider la détection. L'établissement des données de référence ne peut cependant pas reposer sur des estimations de limites de reconnaissance. Il faut une donnée de référence conforme à la production cartographique afin d'obtenir la juste mesure de l'efficacité de l'application ainsi que pour bien identifier les faiblesses.

Afin de bien cibler nos attentes de performances de l'application automatique, voici quelques lignes directrices ayant guidé l'approche de la collecte manuelle de référence. La figure 3.5 illustre les résultats cibles.

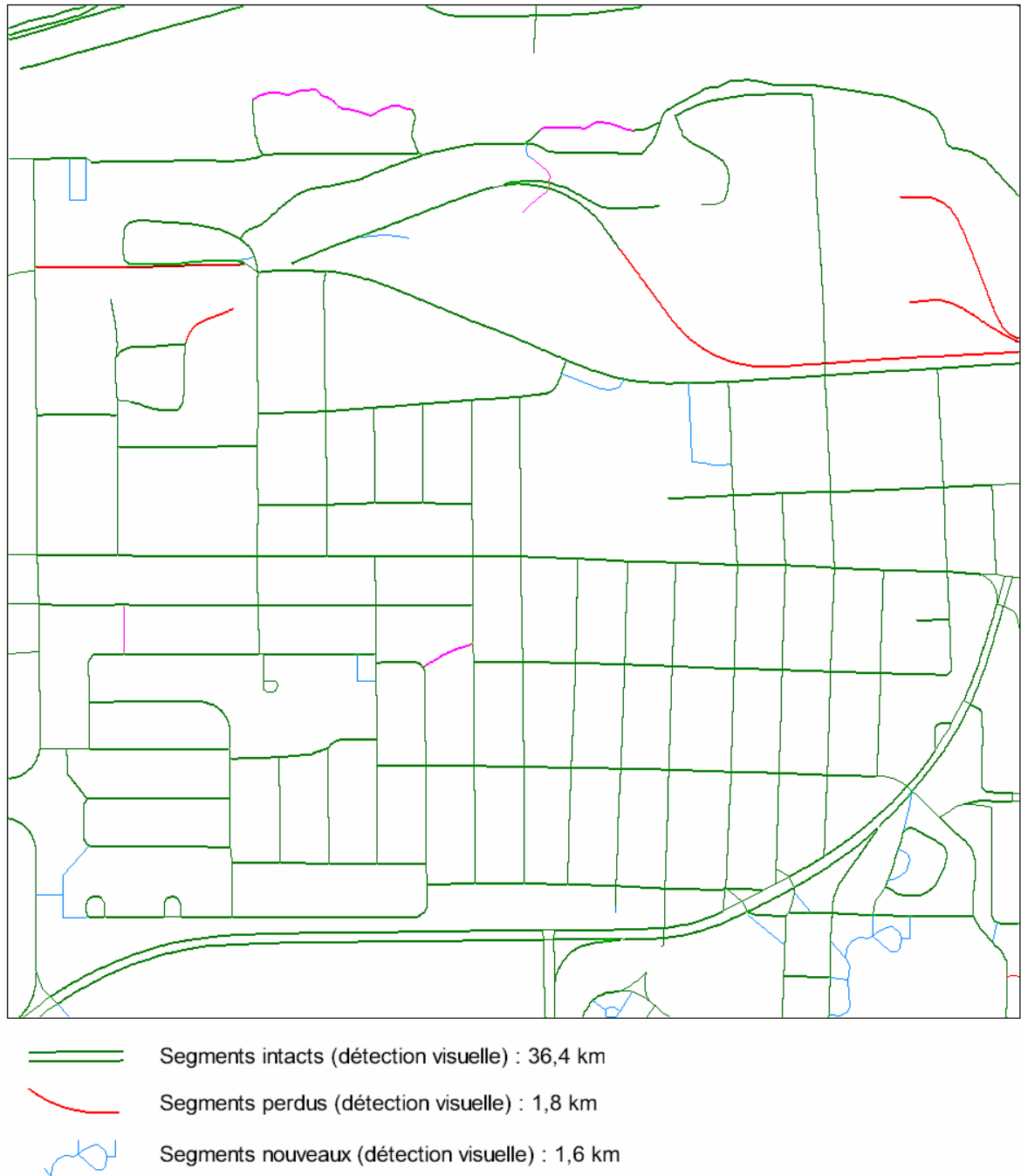


Figure 3.5 : Données de références obtenues par extraction visuelle/manuelle



### **3.3.1 Cas Intacts (36,4 km) :**

Dans le fichier de référence, les segments intacts sont constitués essentiellement des vecteurs qui cadrent sans ambiguïté visuelle dans le réseau de communication des photos. C'est le cas des rues, routes locales et collectrices qui constituent globalement 81% des voies de communication du site test (référence au tableau III.4). Conséquemment, un rendement de 80% serait très bon puisque les autres types de voies de communication tels que les chemins, pavés ou non (figure 3.2), sont plus étroits et fréquemment discontinus sur l'image. Les voies ferrées sont aussi peu distinctives. Il est à prévoir que certaines de ces entités soient classées comme étant perdues ou suspectes. Tel que mentionné à la section 2.2.3, l'application assignera l'étiquette intacte si le nombre de pixels de voies de communication reconnu sur une certaine distance est au-delà d'un pourcentage, ou seuil, fixé par l'utilisateur. Il y a donc possibilité d'adapter la sensibilité de reconnaissance au type d'occupation du sol.

### **3.3.2 Cas perdus ou disparus (1,8 km) :**

Au fichier de référence, les segments catégorisés perdus doivent l'être sans qu'un doute raisonnable ne persiste pour l'opérateur, sans quoi le segment sera classé suspect. Plusieurs voies ferrées et quelques chemins sont ainsi catégorisés comme perdus par la révision cartographique manuelle/visuelle. Il y a cependant des cas où l'opérateur repère des indices à proximité de l'ancienne cartographie et assigne une étiquette de doute (suspect). Compte tenu du caractère bien distinct des voies de communication, on peut s'attendre à un faible taux d'omissions mais un taux plus ou moins élevé de fausses détections. Ce dernier devrait être fortement tributaire des prétraitements d'images qui éliminent plusieurs ambiguïtés et les fausses détections associées. L'application assignera l'étiquette perdue ou disparue si le nombre de pixels de voies de communication reconnu par segment est inférieur au pourcentage minimum fixé par l'utilisateur.

### 3.3.3 Doute ou suspect (0,7 km) :

L'opérateur catégorisera comme suspect un segment qui présente, a priori, peu d'indices ou qui semble perdu mais dont la localisation par rapport à des segments voisins laisse entrevoir un doute. À titre d'exemple, citons la figure 3.6 présentant un segment de chemin en milieu boisé dont quelques tronçons sont identifiables. Dans un tel cas l'opérateur suspecte la poursuite du chemin mais ne peut définir la géométrie du tracé entre les tronçons catégorisés intacts.

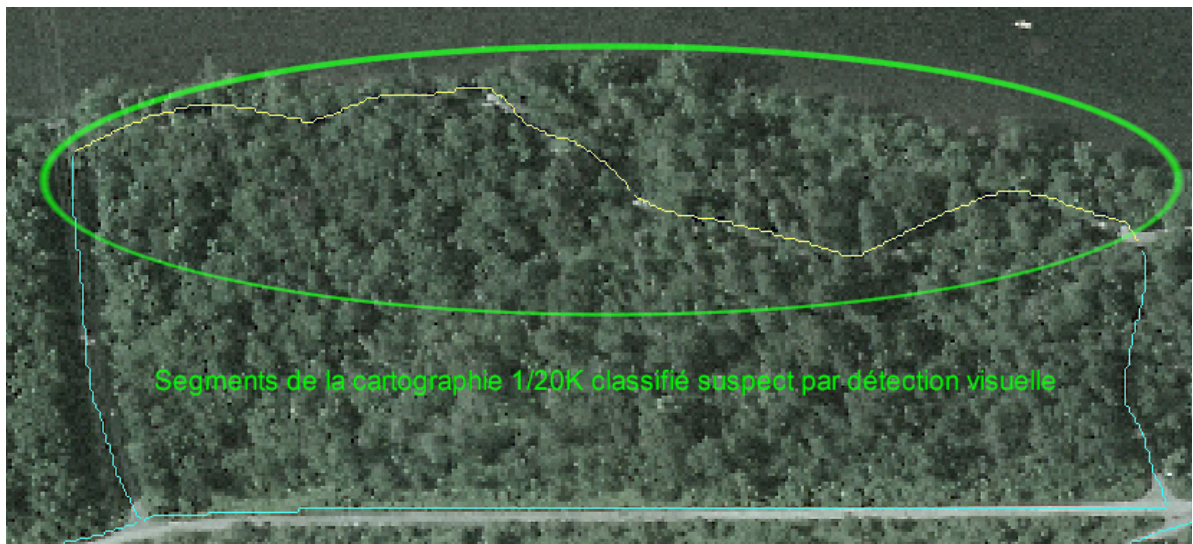


Figure 3.6 : Segment de référence suspect par extraction visuelle/manuelle

L'application assignera l'étiquette « suspect » si le nombre de pixels de voie de communication reconnus sur la distance d'un segment est entre le pourcentage minimum de détection et celui fixé pour les cas intacts. On peut s'attendre à un faible taux d'omissions mais un taux élevé de fausses détections. Comme pour les cas perdus, les prétraitements d'images devraient avoir une influence importante sur le taux de fausses détections.

### 3.4 Étalonage du filtre de détection des linéaments

La justesse de l'assignation s'associe à la détermination de ratios de détection dans les différentes portions de la fenêtre du filtre selon les deux principaux critères décrits à la section 2.2.1. L'utilisation de seuils trop élevés des ratios entre les bordures et la partie centrale du filtre réduit sensiblement les détections intactes tout en surestimant les détections suspectes et disparues. À l'inverse, des seuils trop bas ne sont pas suffisamment discriminants et font bondir le taux des fausses détections. Notre démarche d'étalonnage consiste à établir des seuils ponctuels sur différentes catégories de routes sur le secteur d'essai et d'établir une moyenne pondérée sur la base du % de répartition des différentes catégories (tableau III.4). Pour la première série d'essais sur l'image non rehaussée, ces seuils pondérés serviront de paramètres optimaux de détection des linéaments. Le protocole d'essais décrit à la section 3.5 fait aussi intervenir des images ayant subi divers traitements de rehaussements et en ce sens, nous procéderons à une analyse des variations des seuils selon les traitements pour une même localisation de filtre. Ces variations serviront de base lors de l'établissement des seuils pour les essais sur les images prétraitées au chapitre 6.

La figure 3.7 montre la localisation des cinq filtres témoins sur l'image à 84 cm de résolution sans rehaussement. Le filtre 1 s'applique sur une route locale d'une largeur 12 mètres en milieu industriel alors que les filtres 2 et 3 sont tous les deux le long de rues d'une largeur 10 mètres mais ayant des contenus fort différents. Le filtre 2 est en milieu industriel avec présence d'ombrage dans la portion centrale du filtre alors que le troisième reflète un quartier résidentiel typique. Le filtre 4 est caractéristique d'un étroit chemin d'une largeur 3 mètres en milieu boisé et le cinquième offre la perspective d'un collecteur d'une largeur 15 mètres avec d'autres voies à proximité. Le tableau III.5 présente les résultats de l'application des cinq filtres selon les deux critères.



Figure 3.7 : Localisation de cinq filtres sur différentes catégories de routes et de contextes de bordures (image sans traitement, 84 cm)

Tableau III.5 : Résultats de l'application des cinq filtres selon les deux critères.

Filtre témoin	Portion du filtre	Moyenne des valeurs de pixel				Écart-type des valeurs de pixel			
		Rouge	Vert	Bleu	$1 - \left( \frac{\mu_{bord}}{\mu_{centre}} \right)$ <i>Minimum</i>	Rouge	Vert	Bleu	$1 - \left( \frac{\sigma_{centre}}{\sigma_{bord}} \right)$ <i>Minimum</i>
Filtre 1	Bordure 1	131,331	143,460	130,240	0,13	23,296	21,309	23,536	0,47
	Centre	177,256	187,127	178,434		12,392	11,314	12,043	
	Bordure 2	153,169	162,630	154,505		23,191	23,122	23,212	
Filtre 2	Bordure 1	102,611	118,053	103,850	0,03	24,049	23,755	23,874	0,08*
	Centre	134,706	144,709	138,083		30,715	29,908	30,296	
	Bordure 2	130,512	139,824	129,612		27,809	25,540	27,838	
Filtre 3	Bordure 1	115,838	128,209	116,753	0,11	33,471	33,618	33,559	0,40
	Centre	164,005	173,749	165,206		16,627	15,305	16,874	
	Bordure 2	142,172	154,919	146,807		27,683	29,421	31,193	
Filtre 4	Bordure 1	73,014	88,673	74,353	0,30	24,190	27,810	24,806	0,30*
	Centre	111,608	126,806	112,485		39,958	40,015	41,629	
	Bordure 2	68,113	82,943	69,082		22,467	26,182	22,944	
Filtre 5	Bordure 1	99,193	113,035	99,441	0,04	22,898	23,453	22,294	0,38
	Centre	172,176	180,479	173,794		13,393	13,004	13,788	
	Bordure 2	162,591	173,158	163,350		24,858	23,774	26,977	

\* Inversion du ratio (centre/bordure) afin d'éviter les valeurs négatives.

### **3.4.1 Validation de la représentativité de ces valeurs sur des segments témoins**

Il est possible d'établir une moyenne pondérée pour chaque critère en fonction de la proportion des différentes catégories de routes indiqué au tableau III.4. Le tableau III.6 présente ces valeurs pondérées des seuils établies au tableau III.5.

SIGMA-ROUTE utilisera ces seuils mais ne décrètera l'assignation finale d'un segment qu'après l'avoir entièrement balayé. Tel qu'expliqué à la section 2.2.1, l'opérateur fixe un pourcentage de pixels du segment dont l'appariement avec l'image doit être atteint pour confirmer l'assignation. Il est donc intéressant d'extrapoler un scénario sur un segment de la figure 3.7 où l'on retrouve quelques échelles de distances horizontales. Considérons le segment témoin du filtre 2 d'une longueur d'environ 190 mètres avec un seuil de 60% pour la classe intacte et moins de 30% pour la classe disparue. Dans ce cas, bien que la position du filtre 2 soit sous les seuils de détection, il suffirait de 11 appariements de positions du filtre sur les 18 positions du segment pour que ce dernier soit assigné intact. Les essais au chapitre 4 témoigneront de la pertinence des résultats.

Catégories	% de couverture tableau III.4	Pondération	Valeur pondérée par catégorie	
			Critère de la moyenne	Critère d'écart-type
Chemins	12,1%	$\left(\frac{12,1}{93,1}\right) = 13\%$	$0,30 \times 13\% = 0,039$	$0,30 \times 13\% = 0,039$
Rues	65,0%	69,8%	$\left(\frac{0,03 + 0,11}{2}\right) \times 69,8\% = 0,049$	$\left(\frac{0,08 + 0,40}{2}\right) \times 69,8\% = 0,168$
Routes locales	4,4%	4,7%	$0,13 \times 4,7\% = 0,006$	$0,47 \times 4,7\% = 0,022$
Collecteurs	11,6%	12,5%	$0,04 \times 12,5\% = 0,005$	$0,38 \times 12,5\% = 0,048$
	Total : 93,1%	Total : 100 %	<b>Valeur pondérée sur le site (<math>\Sigma</math> valeur par catégorie)</b>	
			<b><math>r_{\min} : 0,099 \approx 0,100</math></b>	<b><math>r_{\min} : 0,277 \approx 0,280</math></b>

Tableau III.6 : Valeur pondérée des seuils à partir des mesures sur positions témoins

## 3.5 Protocole expérimental

Cette section est dédiée à la description de la séquence d'essais sur le site test en vue des résultats et analyses à venir aux chapitres 4 et 5. Nous y décrirons aussi les traitements d'images et leurs impacts potentiels sur la détection.

### 3.5.1 Séquence des essais

Le rendement général de l'application doit être établi sur un protocole structuré de variation des paramètres afin d'assurer la pertinence des résultats tout en limitant l'ampleur du banc d'essais. Deux principales avenues s'offraient, la première consistait à mesurer les variations de performances pour plusieurs combinaisons de paramètres tels que des seuils  $r_{\min}$  et % d'assignation. Cette approche est plus complexe à encadrer et l'analyse des résultats issus d'une variation simultanée multicritères laisse planer une incertitude sur les effets ciblés des prétraitements d'images ou sur le rendement spécifique des critères de détections.

La seconde option impliquait de fixer les principaux paramètres à des valeurs jugés optimales suite à l'étalonnage et appliquer le tout sur des images ayant subi différents traitements. Cette option fut adoptée afin de bien quantifier l'effet distinctif des deux principaux critères de détection (moyenne et écart-type) avec ou sans traitements de rehaussement. La figure 3.8 illustre le processus et la grille séquentielle des essais est présentée au tableau III.7. Elle est aussi représentée sous forme d'organigramme détaillé à la figure 3.9.



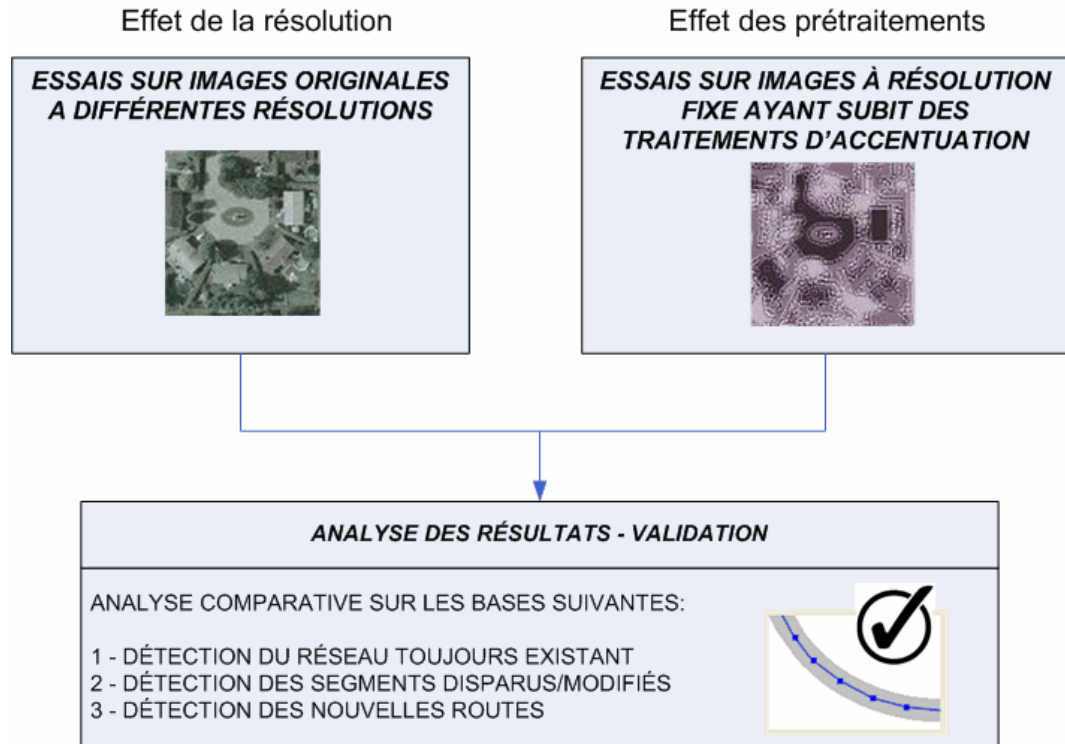


Figure 3.8 : Séquence de la méthode globale

<i>No</i>	<i>Images</i>	<i>Autres paramètres</i>
1 - 2	Sans traitement- 84 cm	Vérification de l'effet de la résolution sur le gain de performance des critères
3 - 4	Sans traitement- 168 cm	
5 - 6	Sans traitement- 210 cm	
7	Segmentée - 84 cm	Valider les gains successifs en termes de réduction des fausses détections.
8	Histogramme compensé – 84 cm	
9	Rehaussement des limites-84 cm	
10	Substitution des teintes-84 cm	
11	Sur les vecteurs cartographiques du 1/20K pixelisés	Test ultime de détection de sa propre référence.

Tableau III.7 : Grille d'essais planifiés

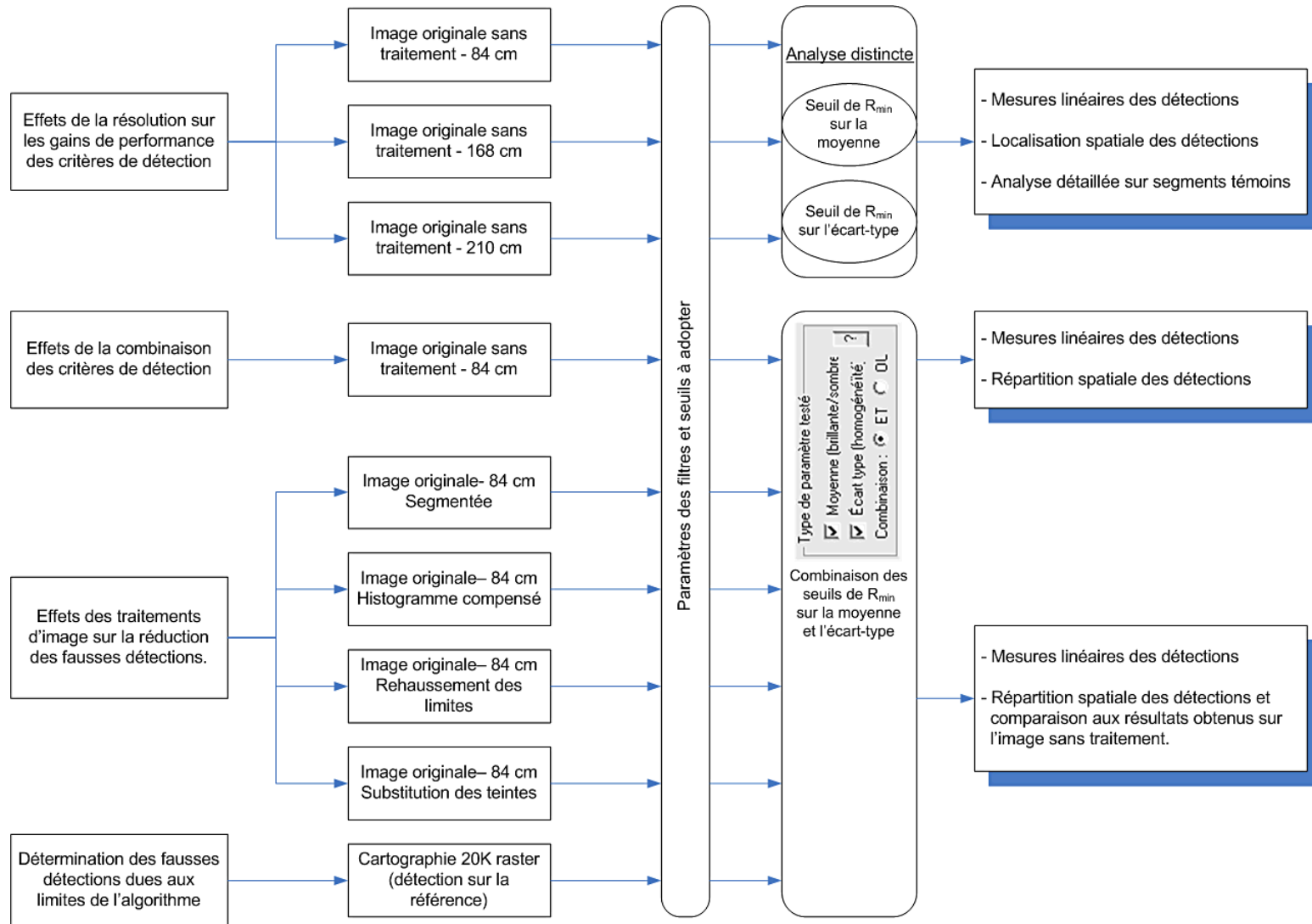


Figure 3.9 : Séquence détaillée des essais

Nous tenterons de discerner l'effet de la résolution et des traitements d'images sur les rendements de l'application. Nous rechercherons, en parallèle, une association entre les variations de performances par critère de la moyenne ou de l'écart-type selon les catégories de routes de la BDTQ. Ces essais devraient nous permettre de déceler des failles dans l'application de SIGMA-ROUTES sur des images à haute résolution et de proposer des changements qui s'imposent.

Pour obtenir des résultats comparables, il faut effectuer ces tests avec des critères de détection similaires et des seuils de classification légitimement attendus par l'utilisateur éventuel. Nous avons choisi un seuil de classification "intacte" si plus de 60% des pixels excèdent ou égalent le  $r_{min}$  calculé et saisi dans l'application. Si moins de 30% des pixels correspondent, nous en concluons que la route est "disparue". Entre ces deux balises, c'est un cas "suspect", il y a donc un doute sur l'existence actuelle de ce tronçon de route.

Les grilles d'analyses seront basées sur les mesures de distances totales de détection, les distances en fausse détection et les distances en omission. La distance en omission étant égale à la distance de référence soustraite de la distance détectée en concordance avec la référence. Les distances de référence dans les relations subséquentes, obtenues par extraction visuelle sur le site test, sont présentées à la section 3.3. Les règles de calcul sont les suivantes ;

$$\text{Dist. en omission} = \text{Dist. Réf} - (\text{Dist. totale détectée} - \text{Dist. en fausse détection})$$

$$\text{Dist. fausse détection} = \text{Dist. totale détectée} + (\text{Dist. en omission} - \text{Dist. Réf})$$

### 3.5.2 Prétraitements ou rehaussements d'images

Les prétraitements d'images offrent la possibilité d'accentuer les contrastes sur les voies de communications par rapport aux autres entités. Les phases de traitement sont synthétisées et illustrées à l'organigramme de la figure 3.10 et décrites à la section 3.5.3. Ces images peuvent être utilisées simultanément avec l'image originale si les traitements apportent un gain complémentaire plutôt qu'absolu. Il est aussi possible qu'un traitement globalement bénéfique altère une catégorie de voies de communication compte tenu de leurs caractéristiques radiométriques et géométriques. L'analyse radiométrique comparative d'une même position de filtre sur les différentes images traitées permettra d'estimer les variations et gains potentiels des critères par seuil de détection.

### 3.5.3 Prétraitements : description et attentes

Les attentes sont variables selon les types de traitements mais résumons la séquence de l'organigramme de la figure 3.10 en deux blocs soient la préparation de base (traitement 1) suivie des options d'accentuation (traitements 2 à 5) permettant une distinction plus franche selon les seuils d'assignation des statuts de détection. Les traitements 1 à 3 ont été réalisés à l'aide du logiciel de traitements d'images *CVIP Tools* alors que les traitements 4 à 5 furent produits avec l'application de vectorisation *RASTERVECT*. Le volet de la géoréférence des fichiers PIX fut géré avec les outils de *PCI ORTHO-ENGINE*. L'acronyme *CVIPtools* signifie "*Computer Vision and Image Processing tools*". Cette application est développée au laboratoire de traitements d'images de l'Université d'Edwardsville en Illinois sous la direction du Dr. Scott E Umbaugh. Accessible gratuitement sur Internet, cet outil est destiné aux étudiants et chercheurs dans le domaine de l'imagerie. Elle offre une multitude de fonctions regroupées sous les catégories : analyse, restauration, rehaussement, compression et divers utilitaires.

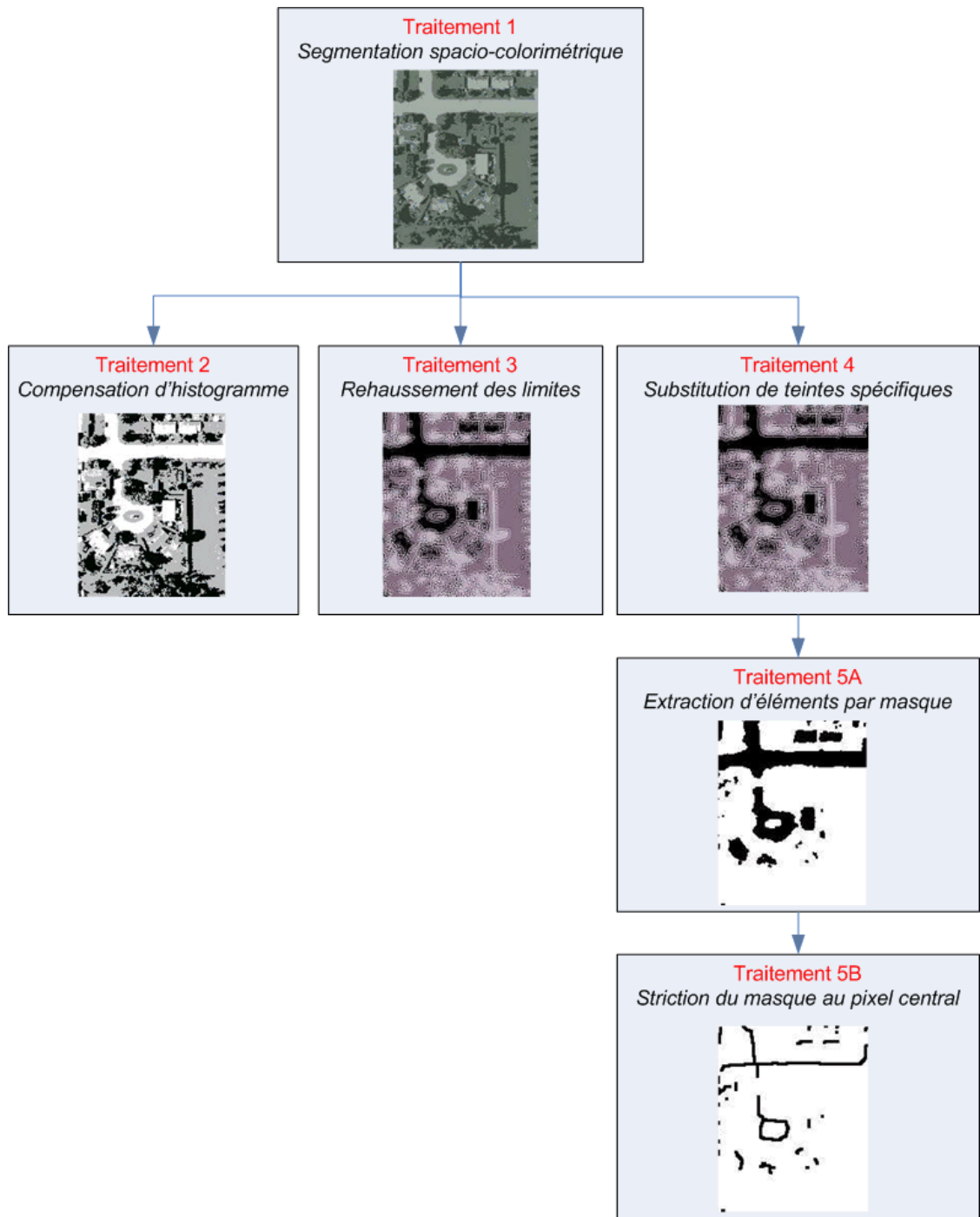


Figure 3.10 : Prétraitements de rehaussements des voies de communication

Une application complémentaire de reconnaissance et d'extraction des formes et des textures est aussi disponible lors de l'achat du livre de référence du Dr. Scott E Umbaugh intitulé "*Digital Image Processing and Analysis: Human and Computer Vision Applications with CVIPtools*". L'application *RASTERVECT* est un logiciel commercial de conversion vectorielle d'images multi-formats pour les fins de traitements subséquents dans des applications de dessin assisté par ordinateur (DAO) telle qu'AutoCAD ou divers logiciels de géomatique. L'annexe 3 présente quelques interfaces et décrit sommairement le protocole de certaines opérations effectuées dans *CVIPtools* spécifiquement dans le cadre de cette étude. Aux paragraphes suivants, nous tenterons d'établir un lien entre les traitements 1 à 5 et les attentes ou impacts potentiels sur les résultats de détection du réseau routier.

La préparation de base est constituée du ré-échantillonnage et d'une segmentation spatio-colorimétrique. La segmentation est une classification non supervisée des pixels basée sur les propriétés de connexité spatiale et d'homogénéité colorimétrique. Le protocole de traitement implique une phase de segmentation grossière qui prépare l'image pour une segmentation fine. La première phase assigne les pixels à des classes par établissement de seuils suite aux analyses distinctes des histogrammes sur les trois bandes RGB. Cette classification fait aussi appel à un filtre d'échelle spatiale (localisation et direction) pour l'assignation aux classes. La segmentation fine assigne les pixels non-classifiés aux classes les plus proches et attribue la valeur 255 (blanc) à ceux qui ne peuvent être classifiés selon un niveau de finesse choisi par l'utilisateur (annexe 3). Ce traitement permet la mise en évidence et l'homogénéisation des pixels de routes favorisant potentiellement les deux critères de détection. Ce premier bloc est un incontournable pour le 1<sup>er</sup> niveau de classification et de mise en évidence des principales entités sur l'image. Il s'inscrit dans le processus à titre de "nettoyage préliminaire" qui prépare le terrain pour le choix des traitements de rehaussement.

Plusieurs options sont disponibles et quelques-unes ont été testées afin d'établir une distinction plus franche entre les routes et les bordures selon les seuils d'assignation des statuts de détection. La compensation d'histogramme (option 2) aussi appelée égalisation d'histogramme consiste globalement à l'étalement des valeurs de pixels sur la base d'une analyse statistique qui la distingue de l'unique étirement d'histogramme. L'annexe 3 présente le protocole en 4 étapes qui redistribue statistiquement des valeurs de pixels entre les valeurs de 0 et 255 sur chaque bande RGB dans le cas d'images couleurs. On s'attend à ce que l'étalement soit plus accentué sur les bordures que pour la section centrale de la route compte tenu que ce rehaussement est appliqué sur l'image segmentée dont les revêtements de chaussés sont déjà plus homogènes. Les propriétés de l'image résultante devraient être plus favorables à l'application efficace du critère de détection d'écart-type qui s'en trouverait plus discriminant.

L'option 3, le rehaussement des limites par soustraction des éléments flous est une approche algébrique de traitement qui permet d'amplifier les écarts de moyennes entre la route et les bordures. Elle amplifie aussi les ratios du critère d'écart-type lors des tests avec l'algorithme modifié. Le protocole spécifiquement utilisé dans ce cas se nomme "*Edge enhancement by unsharp masking*" et procède à la soustraction sur l'image originale du contenu d'un masque des composantes à basses fréquences (flous, non clairement définies). Ce traitement met en évidence les limites des constituants les mieux définis dans un contexte où les autres zones de l'image sont brouillées. Au besoin, il est possible de passer une compensation d'histogramme pour accentuer les contrastes. L'image résultante présente certaines caractéristiques d'une image radar traitée pour la mise en évidence et l'homogénéisation des pixels de routes. Il faut donc sélectionner les paramètres d'extraction associés aux images radar dans SIGMA-ROUTES.

Si ces options s'avèrent insuffisantes, les options 4 et 5 de l'organigramme constituent l'ultime approche pour la distinction sur le critère des moyennes. Il y a cependant des risques de pertes d'informations, particulièrement à l'option 5. La procédure de traitement débute par la sélection d'un intervalle de valeurs de pixels qui seront substituées par une valeur unique (route noire sur l'exemple de la figure 3.10). Un masque d'extraction disposant d'une tolérance établie par l'utilisateur sera ensuite appliqué (annexe 3). Une séquence de filtration impliquant l'érosion, l'élimination des pixels isolés suivie d'une dilatation permet d'éliminer plusieurs entités non routières. Un algorithme de striction au pixel central permet une linéarisation des segments. Puisqu'il y a inversion des teintes, il nous faut adapter les paramètres d'extraction en conséquence. On s'attend à ce que le critère de moyenne soit le plus discriminant dans ce cas. L'image étant en format 1 bit (noir et blanc), les trois canaux auront un contenu identique.

#### **3.5.4 Prétraitements : Analyse des variations de seuil par critère**

Nous débutons en analysant l'image originale sans traitement de rehaussement mais seulement un ré-échantillonnage de 21 à 84 cm. Pour des fins de comparaison entre les différents traitements, l'analyse est effectuée sur la même portion en trois zones. La figure 3.11 montre la localisation ciblée et le contenu des portions d'un filtre pour l'analyse des variations selon les traitements. Le contenu du filtre est représentatif dans la mesure où les bordures ont une variabilité radiométrique typique d'une rue en secteur résidentiel qui constitue 65% des voies de communications de notre site d'essai. L'intérêt de ces exemples réside cependant davantage dans les variations des seuils entre les traitements plutôt que dans leurs valeurs absolues. Le tableau III.8 quantifie les variations de seuils selon les traitements de rehaussement.



La détermination des seuils effectifs à appliquer dans les essais sur les images prétraitées au chapitre 5 sera donc basée sur l'application de ces variations aux valeurs de  $r_{\min}$  optimale sur l'image sans rehaussement. Pour celles-ci, notre analyse par échantillonnage pondéré sur différentes catégories de route présenté au tableau III.6 suggérait des valeurs de  $r_{\min}$  de 0,10 pour le critère de moyenne et de 0,28 pour le critère d'écart-type. Quelques essais préliminaires avec des valeurs voisines de celles-ci nous ont conduits vers le choix globalement optimal pour l'ensemble du site. Nous opterons pour des  $r_{\min}$  de 0,15 pour le critère de moyenne et de 0,25 pour le critère d'écart-type. Le tableau III.9 détaille le processus d'établissement des  $r_{\min}$  effectifs.

Les variations observées au tableau III.9 sont-elles conformes aux attentes mentionnées à la section 3.5.3 et sont-elles un aperçu des gains potentiels à venir ? Les résultats détaillés des essais du chapitre 5 seront plus explicites mais il semblerait qu'à priori la segmentation d'image à la base des autres traitements ne favorise pas significativement un critère. Il en va tout autrement pour la combinaison de segmentation et de compensation d'histogramme qui, tel qu'attendu, apporte un gain important au critère d'écart-type en étalant le spectre radiométrique des bordures. Ce phénomène serait possiblement amplifié par la segmentation initiale qui a contribué à uniformiser la partie centrale du filtre. Au-delà de la compensation d'histogramme, ces résultats locaux sont quelque peu décevants à l'exception de la substitution des teintes et l'extraction par masque qui réduit considérablement les ambiguïtés en faveur de critère de la moyenne.

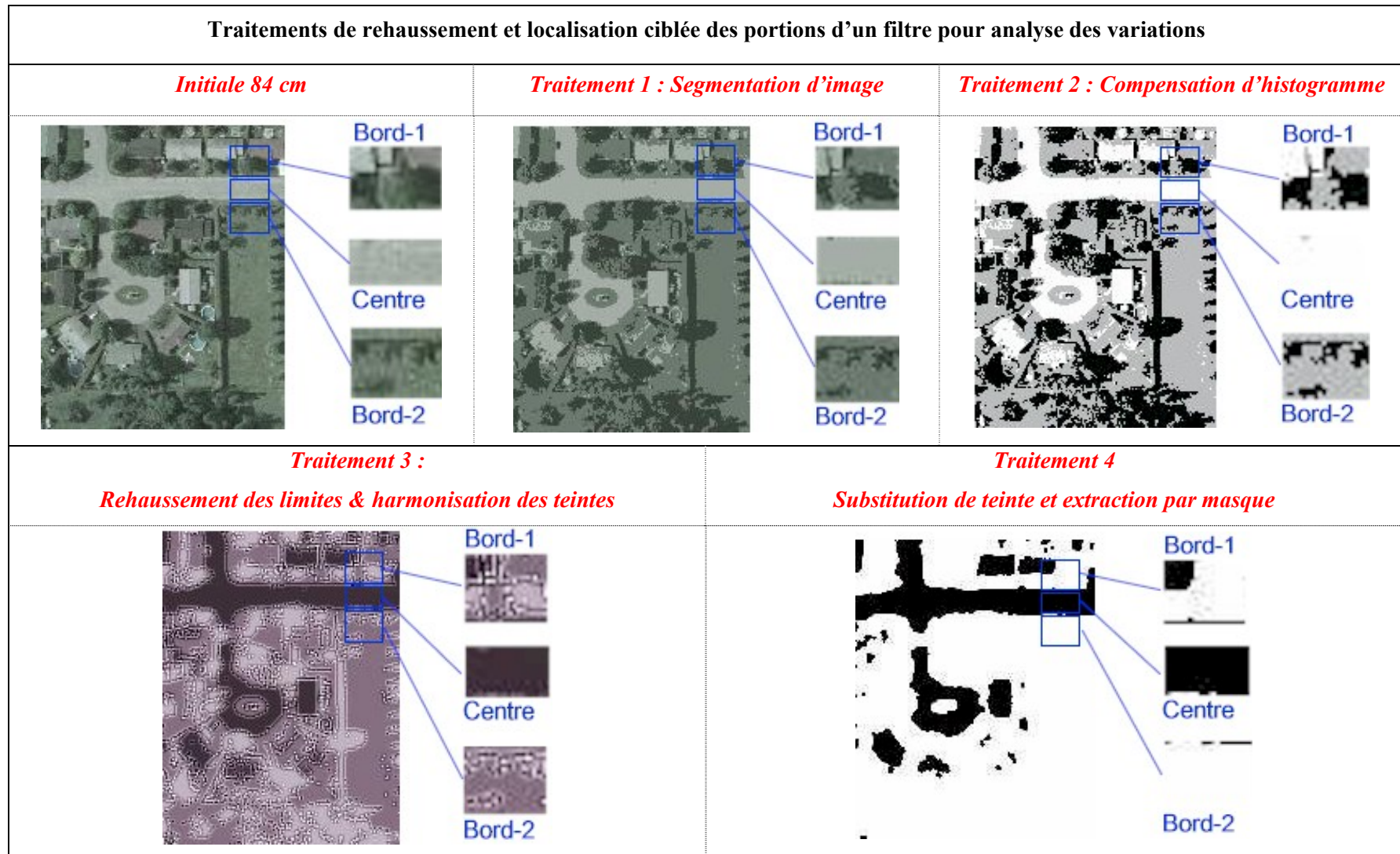


Figure 3.11 : Localisation ciblée des portions d'un filtre pour analyse des variations selon les traitements

Filtre témoin	Portion du filtre	Moyenne des valeurs de pixel				Écart-type des valeurs de pixel			
		Rouge	Vert	Bleu	$1 - \left( \frac{\mu_{bord}}{\mu_{centre}} \right)$ <i>Minimum</i>	Rouge	Vert	Bleu	$1 - \left( \frac{\sigma_{centre}}{\sigma_{bord}} \right)$ <i>Minimum</i>
Initiale	Bordure 1	102,134	113,013	103,084	0,34	40,750	40,345	41,789	0,64
	Centre	165,294	175,294	167,294		7,238	7,238	7,238	
	Bordure 2	100,860	115,766	100,755		19,991	20,101	20,268	
Trait. 1	Bordure 1	97,136	110,136	100,136	0,36	34,033	34,033	34,033	0,60
	Centre	163,128	172,213	165,331		8,253	8,055	8,247	
	Bordure 2	98,048	110,725	101,048		20,854	21,063	20,854	
Trait. 2	Bordure 1	131,963	134,282	133,685	0,44	100,814	99,775	100,579	0,93
	Centre	254,056	254,056	254,056		5,325	5,325	5,325	
	Bordure 2	139,738	141,397	142,656		78,032	78,119	78,180	
Trait. 3	Bordure 1	142,012	125,221	140,960	0,39	52,637	53,158	53,025	0,78
	Centre	64,031	47,987	57,974		7,405	7,237	8,017	
	Bordure 2	144,865	124,576	141,509		36,663	37,137	36,899	
Trait. 4	Bordure 1	203,587	203,587	203,587	0,98	95,699	95,699	95,699	0,26
	Centre	5,026	5,026	5,026		30,170	30,170	30,170	
	Bordure 2	246,067	246,067	246,067		41,038	41,038	41,038	

Tableau III.8 : Résultats comparatifs des variations de seuils selon les traitements de rehaussement

Variations des seuils par critère selon les traitements et détermination des seuils effectifs à appliquer dans les essais du chapitre 5 sur les images rehaussées				
Traitement	Moyenne des valeurs de pixel		Écart-type des valeurs de pixel	
	Seuil étalon *	Seuil effectif	Seuil étalon *	Seuil effectif
Initiale 84 cm	0,34	<b>0,15</b>	0,64	<b>0,25</b>
	↓ + 5,9 %		↓ - 6,3 %	
Traitement 1 Segmentation d'image	0,36	<b>0,16</b>	0,60	<b>0,23</b>
	↓ + 22,2 %		↓ + 55,0 %	
Traitement 2 Compensation d'histogramme	0,44	<b>0,20</b>	0,93	<b>0,36</b>
	↓ - 11,4 %		↓ - 16,1 %	
Traitement 3 Rehaussement des limites & harmonisation des teintes	0,39	<b>0,18</b>	0,78	<b>0,30</b>
	↓ + 151,3 %		↓ - 66,6 %	
Traitement 4 Substitution de teinte et extraction par masque	0,98	<b>0,45</b>	0,26	<b>0,10</b>

\* Seuil étalon pour analyse de variation

Tableau III.9 : Établissement des seuils optimaux pour les images rehaussées.

## CHAPITRE 4 : Effet de la résolution spatiale

Ce chapitre est dédié aux essais sur l'image originale afin de vérifier l'impact d'une dégradation de la résolution spatiale sur le gain de performance des critères de moyenne et d'écart-type. Tout au long des essais, nous ferons régulièrement des liens au chapitre 2 qui traite des principes de détection sous-jacents à l'application SIGMA-ROUTES.

### 4.1 Introduction

Pour effectuer nos essais, nous avons tout d'abord rééchantillonné l'image d'origine pour créer trois nouvelles images avec des résolutions de 84 cm, 168 cm et 210 cm. Ce rééchantillonnage s'est effectué en prenant la moyenne des valeurs dans chaque bande spectrale à l'intérieur des fenêtres de 4x4 pixels, 8x8 pixels et 10x10 pixels respectivement. Par nouvelle image, nous avons effectué deux passages de SIGMA-ROUTES, un premier en utilisant le filtre par la moyenne et un second avec le filtre par l'écart type.

Le tableau IV.1 établit les paramètres sélectionnés en référence aux descriptions des critères de taille du filtre et de décalages spatiaux à la section 2.2.2. Comme nous pouvons le constater, la taille du filtre, les décalages spatiaux ainsi que le nombre de pixels minimal pour continuer la recherche des nouveaux segments sont variables selon la résolution spatiale. À titre de rappel nous donnons un exemple de calcul avec la résolution de 84 cm :

Taille du filtre :

$$\text{Longueur} = 3 \text{ pixels} + \left( \frac{50 \text{ m}}{\text{résolution} \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} \right) = 3 \text{ pixels} + \left( \frac{50 \text{ m}}{0,84 \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} \right) = 62 \text{ pixels}$$

$$\text{Largeur} = 1 \text{ pixel} + \left( \frac{10 \text{ m}}{\text{résolution} \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} \right) = 1 \text{ pixel} + \left( \frac{10 \text{ m}}{0,84 \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} \right) = 13 \text{ pixels}$$

Décalages spatiaux :

$$D_{\text{PERPENDICULAIRE}} = 2 \text{ pixels} + \sqrt{\frac{5 \text{ m}}{\text{résolution} \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)}} = 2 \text{ pixels} + \sqrt{\frac{5 \text{ m}}{0,84 \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)}} \cong 5 \text{ pixels}$$

$$D_{\text{PARALLELE}} = 5 \text{ pixels} + \left( \frac{25 \text{ m}}{\text{résolution} \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} \right) = 5 \text{ pixels} + \left( \frac{25 \text{ m}}{0,84 \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} \right) \cong 35 \text{ pixels}$$

$$\text{Nombre de pixels minimal pour poursuite} = \frac{40 \text{ m}}{0,84 \left( \frac{\text{m}}{\text{pixel}} \right)} = 48 \text{ pixels} \approx 50 \text{ pixels}$$

Quant aux seuils sur la moyenne et l'écart-type ainsi que les seuils pour la classification des segments lors de la révision, ils sont tenus constants pour toutes les trois résolutions. Leur calcul est basé sur des valeurs observées sur nos images tel qu'expliqué à la section III.4 sur l'étalonnage du filtre.

<b>CRITERE</b>	<b>RÉSOLUTION</b>		
	84 cm	168 cm	210 cm
Taille du filtre Longueur x Largeur	62 x 13 pixels	33 x 7 pixels	27 x 6 pixels
Décalages spatiaux	⊥ → 5 pixels II → 35 pixels	⊥ → 4 pixels II → 20 pixels	⊥ → 4 pixels II → 17 pixels
Pixels de poursuite *	50 pixels	25 pixels	20 pixels
Seuils du filtre (ref. section 3.4)	$r_{\text{Min}} \text{ sur } \sigma = 0,25 \text{ \& } r_{\text{Min}} \text{ sur } \mu = 0,15$		
Classification des segments (seuils %)	<i>Intacte</i> : Si plus de 60% répondant au $r_{\text{min}}$ <i>Disparue</i> : Si moins de 30% répondant au $r_{\text{min}}$ <i>Suspect ou doute</i> : entre 30% et 60% répondant au $r_{\text{min}}$		

\* Nombre de pixels minimal pour la poursuite

Tableau IV.1: Paramètres de traitement

Les résultats d'application de SIGMA-ROUTES sont synthétisés sous les trois perspectives suivantes.

- 1) Les mesures linéaires détectées, en concordance et en omission avec la référence
- 2) La localisation spatiale des détections assignées intactes
- 3) L'analyse spatiale locale sur quelques segments témoins.

Dans le cas des mesures linéaires détectées avec nuances sur les distances en concordance et en omission avec la référence, on rappelle ci-dessous les règles de calcul.

Dist. en omission = Dist.Réf - (Dist. totale détectée – Dist. en fausse détection)

Dist. fausse détection = Dist. totale détectée + (Dist. en omission - Dist.Réf)

En ce qui a trait au volet de la localisation spatiale des détections assignées intactes, elle peut nous aider à détecter des caractéristiques communes aux tronçons non identifiés telles que certaines géométries ou connexions entre segments. Le troisième volet met l'accent sur quelques segments témoins pour la confrontation locale entre l'occupation du sol et la pertinence d'assignation de l'application. On peut ainsi détecter les limites de la séquence d'analyses présumées. Dans chaque cas une distinction sera apportée entre le rendement basé sur le seuil par la moyenne ou l'écart-type.

## **4.2 Volet de mesures linéaires détectées**

Le tableau IV.2 présente une comparaison entre les mesures linéaires de référence et les résultats produits par SIGMA-ROUTES selon la résolution de l'image analysée et le critère de détection (moyenne et écart-type). Globalement dans le cas de la révision du réseau existant, les distances en concordance avec la référence sont sous les attentes peu importe la résolution des images analysées.

Concernant les segments intacts, le plus haut pourcentage de détection (54%) est obtenu en utilisant le critère par l'écart-type avec une résolution de 84 cm. Comparativement au critère par la moyenne, le critère par l'écart-type donne toujours un taux de détection supérieur. Cependant, on constate qu'une dégradation de la résolution fait baisser le taux de détection des segments intacts à l'exception du critère par la moyenne qui obtient son plus haut score (43%) à la résolution de 168 cm. Pour le critère de l'écart-type, cette baisse de rendement était attendue, car le rééchantillonnage agit comme un filtre de lissage réduisant ainsi l'hétérogénéité des valeurs entre les différentes occupations du sol. Les fausses détections demeurent quand même à un niveau acceptable surtout avec le critère par la moyenne.

Dans le cas des segments suspects, c'est le fort taux des fausses détections qui retient l'attention même si les segments en concordance avec la référence sont passablement bien détectés. On constate cependant que la dégradation à 210 cm avec le critère d'écart-type a systématiquement transféré environ 7 km de détection suspecte en concordance vers le statut de fausses détections disparues. Aucun segment disparu de référence n'est détecté comme tel à l'exception d'un faible pourcentage avec le critère par l'écart-type avec une résolution de 210 cm. Il ressort de cette analyse qu'une importante partie des piètres résultats obtenus s'expliquerait par le haut taux d'assignation des segments suspects en fausses détections.



<b>MESURES LINÉAIRES DÉTECTÉES - DISTANCES EN CONCORDANCE ET EN OMISSION AVEC LA RÉFÉRENCE</b>								
	<b>DÉTECTION –INTACT-</b>		<b>DÉTECTION –DOUTE-</b>		<b>DÉTECTION –DISPARU-</b>		<b>DÉTECTION –NOUVEAU-</b>	
Distance de contrôle	36,4 km		0,7 km		1,8 km		1,6 km	
Paramètre testé	Moyenne (km)	Écart-type (km)	Moyenne (km)	Écart-type (km)	Moyenne (km)	Écart-type (km)	Moyenne (km)	Écart-type (km)
	Distance totale détectée							
84 cm	12,4	20,4	22,2	12,3	3,5	5,3	0,0	0,0
168 cm	15,9	19,5	15,7	17,9	4,4	0,8	1,0	76,9
210 cm	10,9	16,6	19,1	11,1	5,8	8,1	0,1	44,7
	Distance fausse détection							
84 cm	0,2	0,9	21,7	11,8	3,5	5,3	0,0	0,0
168 cm	0,2	1,0	15,2	17,4	4,4	0,8	1,0	76,9
210 cm	0,2	1,0	18,5	10,7	5,8	8,0	0,1	44,6
	Distance en concordance avec la référence (contrôle)							
84 cm	12,2 (33,5%)	19,5 (53,6%)	0,5 (71,4%)	0,5 (71,4%)	0,0	0,0	0,0	0,0
168 cm	15,7 (43,1%)	18,5 (50,8%)	0,5 (71,4%)	0,5 (71,4%)	0,0	0,0	0,0	0,0
210 cm	10,7 (29,4%)	15,6 (42,9%)	0,6 (85,7%)	0,4 (57,1%)	0,0	0,1 (5,6%)	0,0	0,1 (6,2%)
	Distance en omission							
84 cm	24,2 (66,5%)	16,9 (46,3%)	0,2 (28,6%)	0,2 (28,6%)	1,8 (100%)	1,8 (100%)	1,6 (100%)	1,6 (100%)
168 cm	20,7 (56,9%)	17,9 (49,2%)	0,2 (28,6%)	0,2 (28,6%)	1,8 (100%)	1,8 (100%)	1,6 (100%)	1,6 (100%)
210 cm	25,7 (70,6%)	20,8 (57,1%)	0,1 (14,3%)	0,3 (42,9%)	1,8 (100%)	1,7 (94,4%)	1,6 (100%)	1,5 (93,8%)

Tableau IV.2 : Comparaison du rendement de détection entre les critères de moyenne et d'écart-type sur image à différentes résolutions

Dans le cas des nouveaux segments, le critère de la moyenne ne propose toujours pas de détection puisque l'homogénéisation des valeurs de pixels rend ce critère encore plus discriminant. Quand à l'écart-type, il « s'emballe » totalement en fausse détection. Il détecte plusieurs premiers pixels potentiels de nouvelles routes et interprète les moindres variations subséquentes de pixels comme étant la suite de cette route. À une résolution de 168 cm, on se retrouve avec plus de 75 km de fausses détections qui serpentent, selon les directions du code de Freeman, entre les toitures et autres entités contrastantes (figure 4.1). Il est à noter que le processus de détection des nouveaux segments fut interrompu sans quoi la portion sud du secteur serait aussi densément occupée par les fausses détections de nouveaux segments.

Techniquement, la combinaison des deux facteurs sur la base d'une détection selon l'un ou l'autre des critères semblerait avantageuse. Il faut cependant analyser le volet de localisation spatiale pour cibler les sources de la sous-performance globale.

### **4.3 Volet de la localisation spatiale**

Les figures 4.2, 4.3 et 4.4 présentent la répartition spatiale des reconnaissances intactes selon les critères de moyenne et d'écart-type sur l'image sans rehaussement aux trois résolutions. L'analyse graphique des variations d'un critère à l'autre permet de constater que les routes de type collectrice, locale et voie ferrée ont un meilleur taux de détection avec le critère d'écart-type. De façon complémentaire, la moyenne des pixels du filtre a favorisé les voies de communication de type rue et tout particulièrement les chemins étroits. Le tableau IV.3 appui ce constat en présentant un ratio de moyennes qui chute drastiquement de 0,30 à 0,04 du chemin vers le collecteur. Le ratio des écarts-types quant à lui augmente de 0,30 à 0,38 pour ces deux filtres témoins.

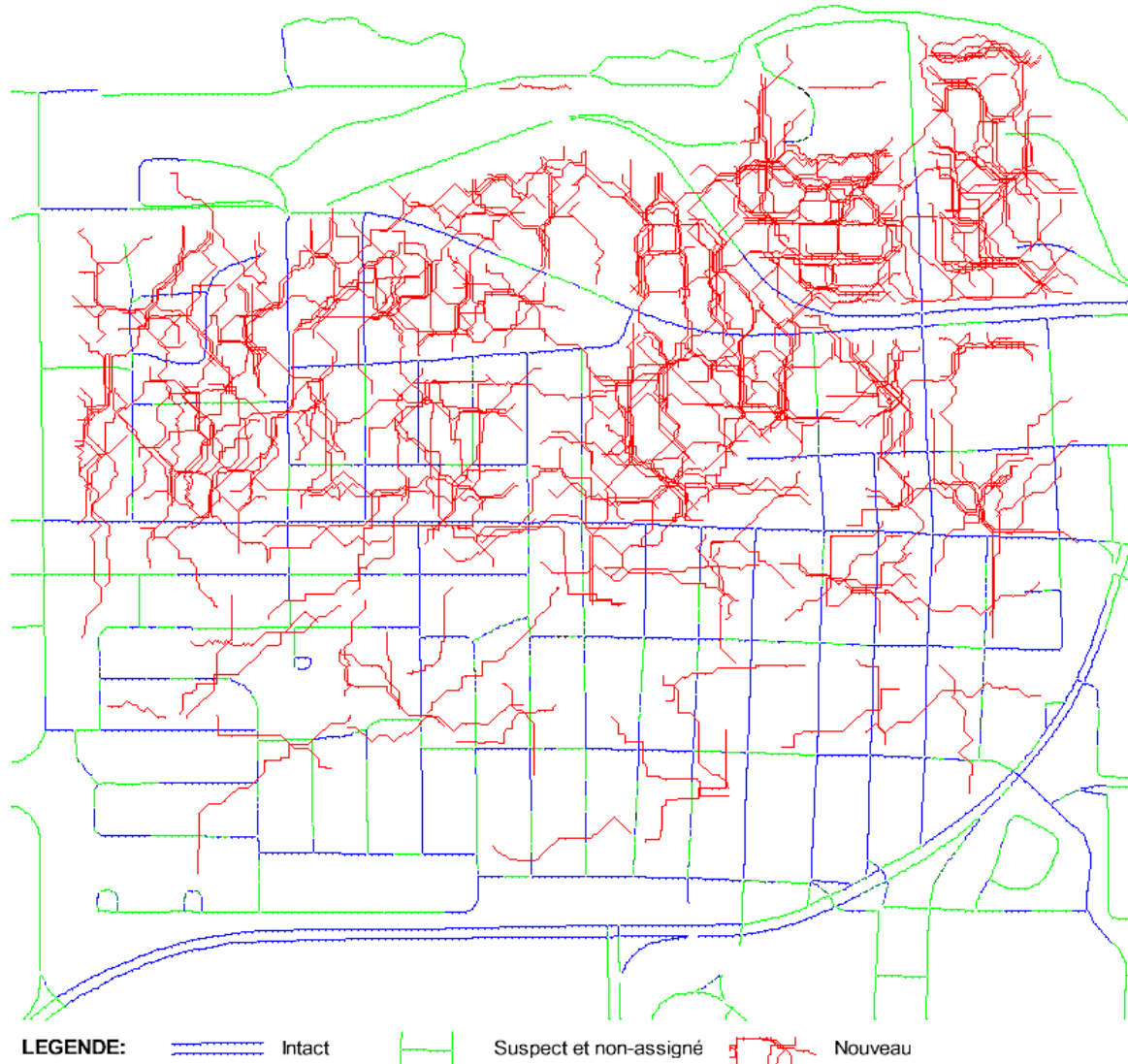


Figure 4.1 : Résolution de 168 cm et critère d'écart-type, fausse détection de nouveaux segments



Figure 4.2 : Répartition spatiale des reconnaissances intactes selon les critères de  $\mu$  et  $\sigma$  sur image sans rehaussement à 84 cm



Figure 4.3 : Répartition spatiale des reconnaissances intactes selon les critères de  $\mu$  et  $\sigma$  sur image sans rehaussement à 168 cm



Figure 4.4 : Répartition spatiale des reconnaissances intactes selon les critères de  $\mu$  et  $\sigma$  sur image sans rehaussement à 210 cm

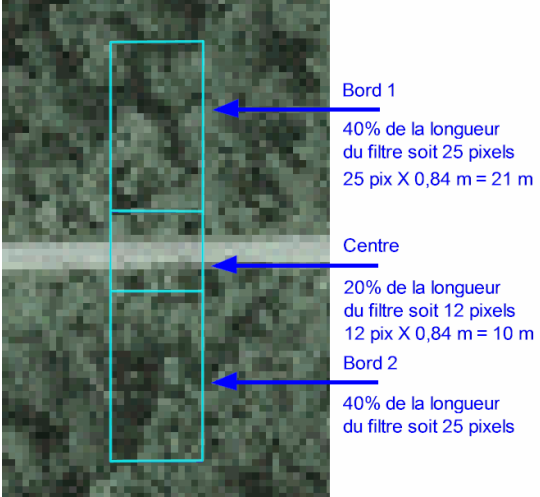
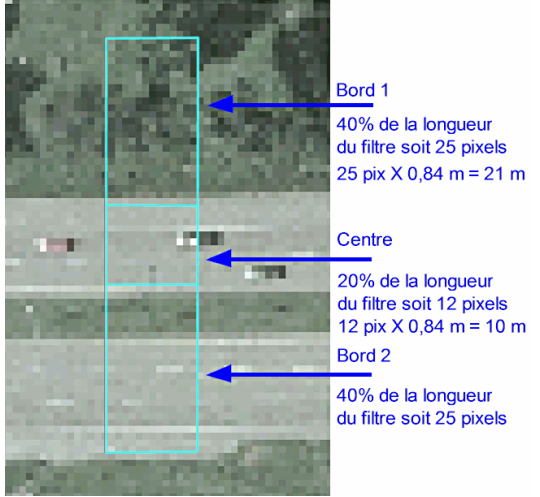
		Filtre sur catégorie CHEMIN de 3 m de largeur				Filtre sur catégorie COLLECTEUR de 14 m de largeur			
									
Filtre témoin	Portion du filtre	Moyenne des valeurs de pixel				Écart-type des valeurs de pixel			
		Rouge	Vert	Bleu	$Min \left[ 1 - \left( \frac{\mu_{bord}}{\mu_{centre}} \right) \right]$	Rouge	Vert	Bleu	$Min \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_{centre}}{\sigma_{bord}} \right) \right]$
Chemin	Bordure 1	73,014	88,673	74,353	0,30 $\geq r_{min}$ de 0,15	24,190	27,810	24,806	0,30* $\geq r_{min}$ de 0,25
	Centre	111,608	126,806	112,485		39,958	40,015	41,629	
	Bordure 2	68,113	82,943	69,082		22,467	26,182	22,944	
Collecteur	Bordure 1	99,193	113,035	99,441	0,04 $\leq r_{min}$ de 0,15	22,898	23,453	22,294	0,38 $\geq r_{min}$ de 0,25
	Centre	172,176	180,479	173,794		13,393	13,004	13,788	
	Bordure 2	162,591	173,158	163,350		24,858	23,774	26,977	

Tableau IV.3 : Analyse de l'efficacité des critères sur les routes étroites et larges \* Inversion du ratio centre/bordure afin d'éviter les valeurs négatives.

Le bon rendement du critère de la moyenne sur les chemins est en partie attribuable au choix d'un seuil de  $r_{\min}$  de 0,15 plutôt bas dont la pondération fut très influencé par le 65% de contenu dans la catégorie rue (section 3.4). En fait, la portion centrale du filtre qui s'étend au-delà des bordures dans le cas des chemins étroits augmente l'hétérogénéité de la portion centrale tout en réduisant le contraste des moyennes ( $1 - \mu_{\text{bord}} / \mu_{\text{centre}}$ ). Le faible seuil  $r_{\min}$  de 0,15 est bien adapté au site d'essai tout en considérant les risques d'augmentation des fausses détections. Dans le cas des larges artères, le cas du tableau IV.3 illustre une portion centrale du filtre, homogène et brillante, qui perd son efficacité (ratio de moyenne) en raison du second collecteur adjacent. On constate sur la figure 4.2 que les larges artères furent presque totalement ignorées de l'assignation intacte.

Cette même logique devrait favoriser les ratios d'écart-types pour pratiquement toutes les catégories de routes. Le tableau IV.3 présente des ratios d'écart-types plus stables que ceux de la moyenne lorsque appliqués sur les deux filtres témoins. En dépit du fait que le ratio du filtre témoin sur le chemin ait une valeur de  $0,30 \geq r_{\min}$  de 0,25, il faut considérer que l'assignation intacte requiert un appariement carte-image pour plus de 60% du segment. Les larges artères sont systématiquement favorisées par ce critère alors que l'homogénéité de la portion centrale du filtre se distingue clairement de ses sections adjacentes.

#### **4.3.1 Critère de moyenne**

L'impact de la diminution de la résolution combiné au critère de moyenne procure un gain de 950 mètres sur les 4,5 km de routes dans la catégorie collecteur. Spatialement, ces gains prennent la forme de segments discontinus qui se distinguent par une présence plus importante de végétation ou d'ombre en bordure. La concentration de pixels foncés des portions latérales du filtre le long de ces segments fut suffisamment accentuée par l'homogénéisation du rééchantillonnage pour passer au statut intact. L'aspect discontinu de la détection souligne cependant la difficulté de généralisation des paramètres en présence d'une telle variabilité spectrale.



C'est cependant dans la catégorie des rues que l'on note des changements spatiaux nettement perceptibles. Lors du premier rééchantillonnage, on constate une amélioration en termes de longueur de segments continus. Cette situation pourrait s'expliquer par un accroissement de l'homogénéité aux limites des bordures et rues contenu dans la large portion centrale du filtre. Il en résulte un accroissement des appariements carte-image au-delà du pourcentage limite de détection pour l'assignation intacte. Il est alors possible de maintenir des seuils  $r_{\min}$  plus haut (plus discriminant) et générer moins de fausses détections qu'avec une image à résolution plus fine.

Le second rééchantillonnage a apporté une nuance à cette généralité en dégradant son rendement sur cette même catégorie (rue) avec une perte de détection intacte ouvrant la porte à une segmentation des longs axes précédemment détectés en segments continus. Nous aurions dépassé la résolution pour laquelle un accroissement de l'homogénéité dans la portion centrale du filtre par rapport aux portions latérales était bénéfique. Le ratio des moyennes  $(1 - \mu_{\text{bord}} / \mu_{\text{centre}})$  serait donc " hypersensible " aux changements de résolution. Dans ce cas, une faible réduction de résolution modifie le  $\mu_{\text{bord}}$  au point de faire basculer le taux de détection intacte. Ce concept est important pour l'évolution des principes d'analyse de l'algorithme, mais nous sommes perplexes devant l'importante chute de rendement issue du passage de 168 à 210 cm.

#### **4.3.2 Fausse détection par proximité**

L'analyse spatiale du résultat sur l'image à 84 cm avec le critère de la moyenne a révélée un risque de fausse détection par proximité des vecteurs de référence. Ainsi, le petit segment en fausse détection de la figure 4.5 illustre bien la difficulté de discernement d'une application non-supervisée. Dans ce cas, au terrain, il n'y a qu'un seul chemin mais l'application s'appuyant sur les anciens vecteurs cartographiques a balayé les deux anciens vecteurs avec un décalage latéral de recherche. Le chemin fut détecté en double puisqu'il était dans le corridor du décalage latéral des vecteurs. L'intervention humaine est donc requise en contrôle de qualité pour ces cas de proximité.

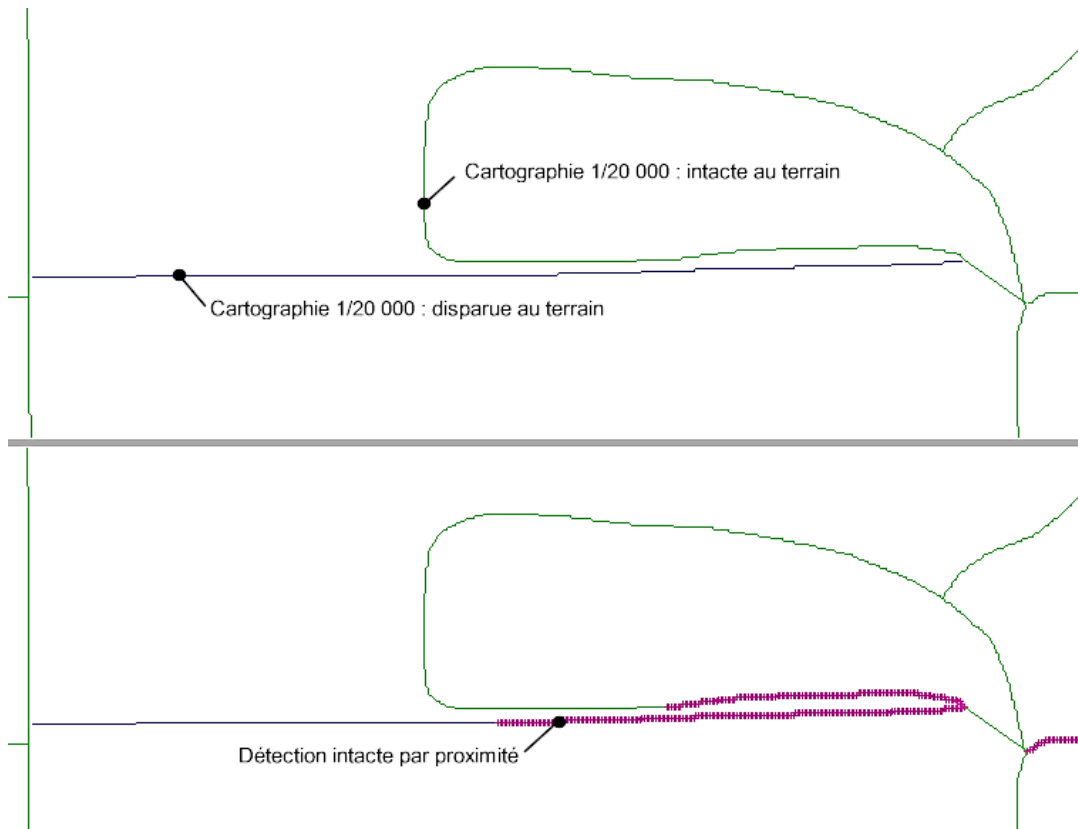


Figure 4.5 : Fausse détection intacte par proximité sur l'image à 84 cm (critère de moyenne)

### 4.3.3 Critère de l'écart-type

Le critère d'écart-type perd graduellement son rendement toutes catégories de routes confondues au fil des ré-échantillonnages. D'une réduction modeste sur les routes plus larges (catégorie collecteur), il devient inefficace sur les rues en fractionnant les longs segments continus détectés à la résolution précédente. Nous attribuons ce constat à une augmentation de l'homogénéité dans le contenu des portions latérales ou bords du filtre. Il en résulte une réduction des appariements carte-image dans l'intervalle du pourcentage de détection faisant passer plusieurs segments de l'assignation intacte à suspecte.

## 4.4 Analyse spatiale sur segments témoins

La figure 4.6 est un sous-secteur urbain type dont les caractéristiques géométriques et topologiques posent un défi aux critères de détection. On y retrouve une combinaison de végétation dont l'ombre affecte les pixels du centre de la route et des aires de stationnements. Les figures 4.6, 4.7 et 4.8 superposent les assignations détectées à différentes résolutions sur l'image des segments témoins. Les tronçons A-B et C-D font l'objet d'une attention particulière. Une échelle des distances le long de ces derniers nous permet de valider le processus d'analyse et d'assignation de SIGMA-ROUTES.

Exceptionnellement pour les résultats sur l'image d'une résolution de 84 cm (figure 4.6), nous allons simuler la séquence de détection sur les segments AB et CD en cohérence avec la procédure et les règles de l'algorithme. Il serait ainsi possible de repérer une discordance entre les principes et leurs applications effectives.

### 4.4.1 Segment A-B, distance de 188 mètres :

À priori, l'ensemble du segment fut classé SUSPECT puisque le % de détection de pixel était entre 30 et 60%. La longueur du segment ayant excédé les 20 pixels, il fut donc divisé en deux à 94 mètres et chaque nouveau segment fut réévalué.

De 0 à 94 mètres, la présence d'ombres de végétation a réduit la réponse du filtre sous le seuil de 0,15 ( $r_{\min}$ ) et le vecteur fut à nouveau divisé en deux. Les deux portions (0-47m & 48-94m) ont été classées SUSPECTES.

De 94 à 188 mètres, c'est le même scénario sauf que la 1<sup>re</sup> demi-portion (94-141m) fut classée INTACTE alors que les ombres de végétation ont relégué la suite (141-188m) à la classe SUSPECTE.

#### 4.4.2 Segment C-D, distance de 194 mètres :

A priori, l'ensemble du segment fut classé SUSPECT puisque le % de détection de pixel était entre 30 et 60%. D'une longueur au-delà de 20 pixels, il fut divisé en deux à 97 mètres et chaque nouveau segment réévalué.

De 0 à 97 mètres, la présence de stationnements a réduit la réponse du filtre sous le seuil de  $r_{\min}$  pour 30 à 60% des pixels et ce vecteur SUSPECT fut à nouveau divisé en deux. La 1<sup>re</sup> demi-portion (0-48,5m) fut classée SUSPECTE due à la présence des stationnements alors que la portion (48,5-97m) fut classée INTACTE.

De 97 à 194 mètres, la 1<sup>re</sup> demi-portion (97-145,5m) fut classée SUSPECTE alors que la seconde (145,5-194m) à la catégorie PERDUE. L'analyse de cette dernière portion classée perdue semble incohérente avec les principes de détection de l'algorithme. En fait, si les seuils sont défavorables à l'intersection et sous l'ombre de la végétation, la somme des distances favorables est nettement supérieure à 50%, laissant présager une classification SUSPECTE ou même INTACTE.

Ces deux segments témoins devraient être classés INTACTS. L'application doit être en mesure de tenir compte de la végétation surplombant la route, des aires de stationnements et des toitures adjacentes. On peut abaisser le seuil  $r_{\min}$  afin d'augmenter le nombre de segments intacts et réduire les cas de doute en combinant ou non une réduction du pourcentage associée à l'assignation intacte. Une trop grande réduction de ces paramètres conduirait cependant à une assignation sans nuance à la catégorie intacte. La description des phases de détection de l'algorithme sur les segments A-B et C-D met en évidence un problème lié à cette segmentation. Le concept général vise à réduire le taux d'assignation SUSPECTE par une deuxième analyse de ces segments dont la longueur est supérieure à 20 pixels. Contenant potentiellement des sous-segments INTACTS, ces derniers, sont divisés par deux avant d'être soumis à une nouvelle analyse.

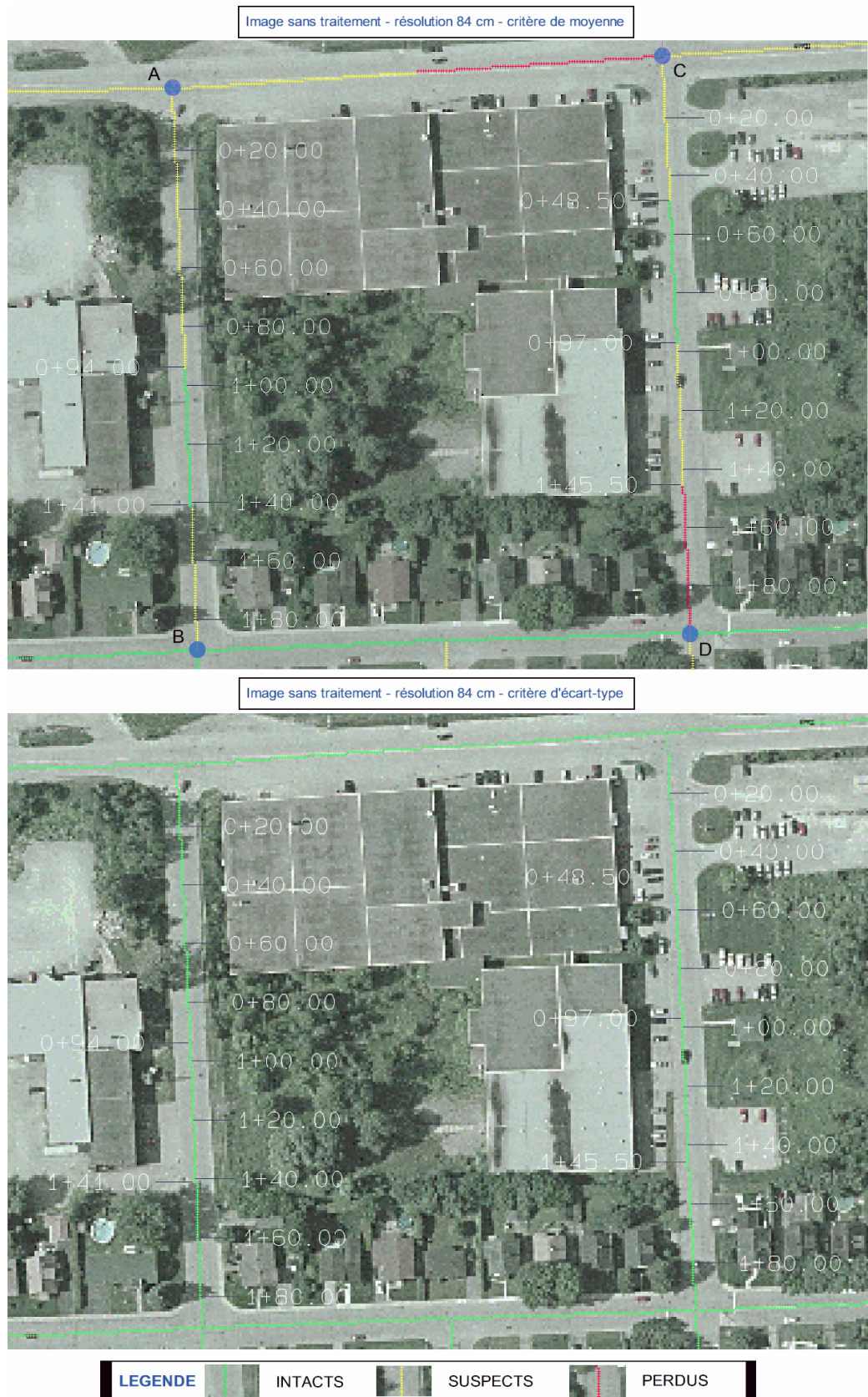


Figure 4.6 : Reconnaissance sur segments témoins-résolution 84 cm

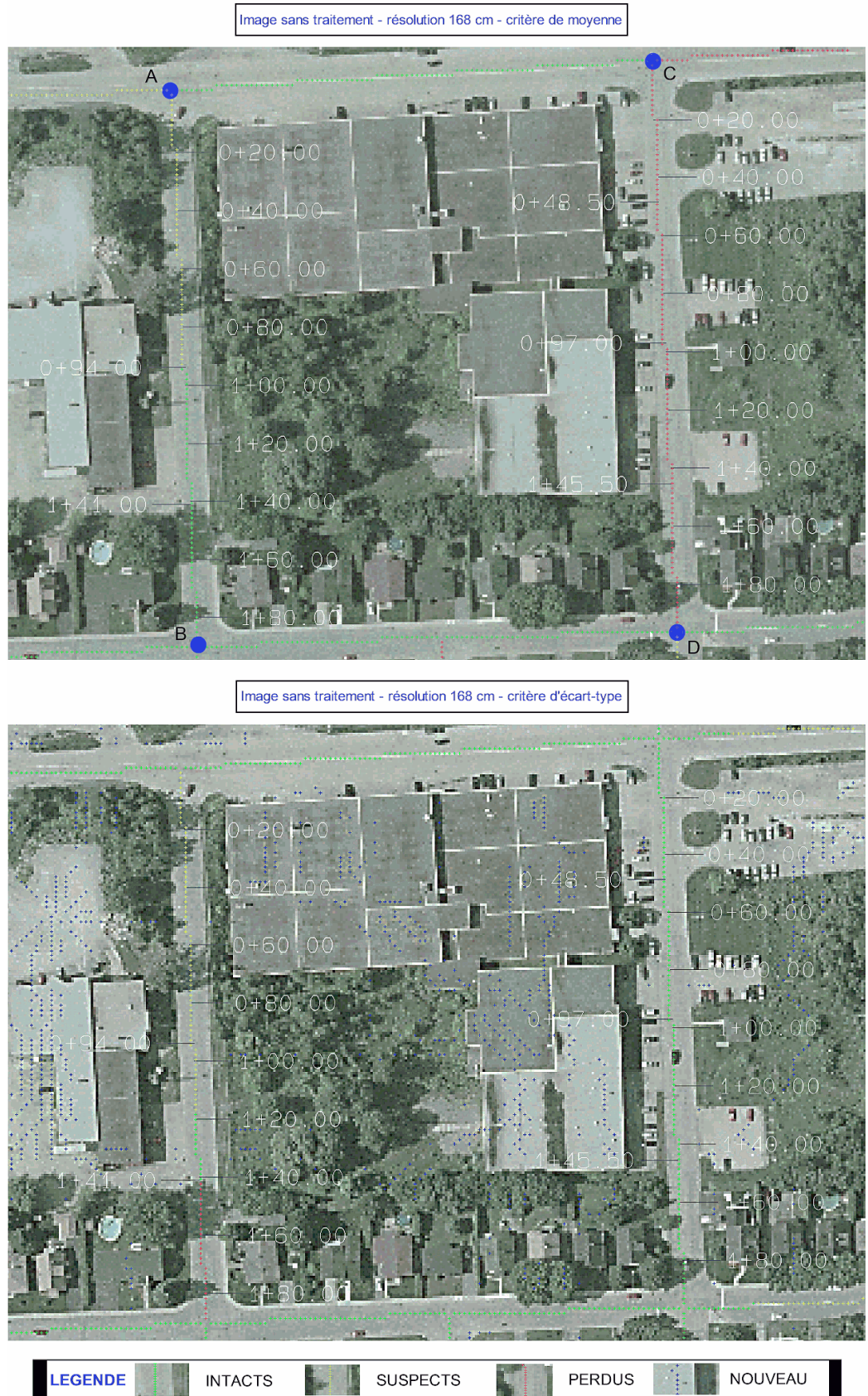


Figure 4.7 : Reconnaissance sur segments témoins -résolution 168 cm

Image sans traitement - résolution 210 cm - critère de moyenne

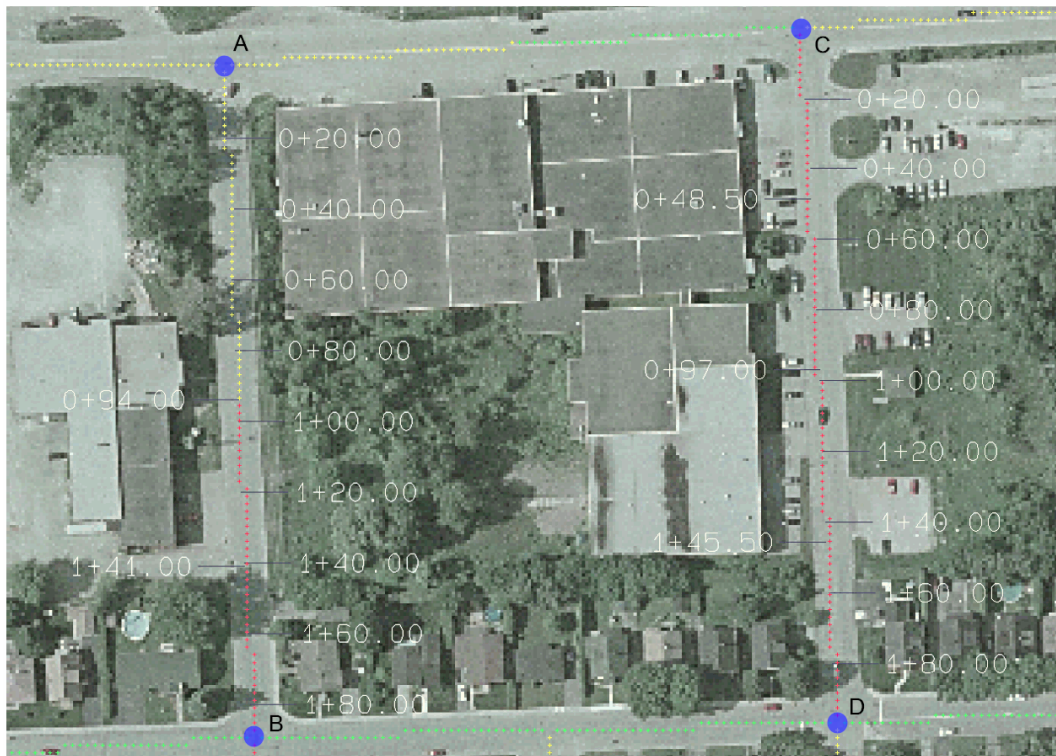


Image sans traitement - résolution 210 cm - critère d'écart-type



Figure 4.8 : Reconnaissance sur segments témoins -résolution 210 cm

Ces résultats présentent une sur-segmentation locale qui fait bondir le taux de fausse détection dans la catégorie des routes DISPARUES. Le résultat risque ainsi d’être incohérent par rapport à une analyse visuelle. À titre d’exemple, au segment C-D de la figure 4.6, l’application subdivise 194 mètres de rue rectiligne en quatre portions dont la centrale étiquetée intacte est bordée par des segments suspects ou disparus. Cette sur-segmentation aurait été encore plus importante et incohérente si l’algorithme avait poursuivi son découpage des 48,5 mètres (58 pixels) de la 1<sup>re</sup> portion suspecte.

#### 4.4.3 Sommaire des tendances pour les trois résolutions

Globalement, le critère de la moyenne génère une segmentation de la détection plus accentuée que le critère d’écart-type. Le facteur d’hétérogénéité (écart-type) des portions adjacentes du filtre est plus efficace et beaucoup moins altéré par le contenu diversifié des bordures. L’impact des résolutions spécifiquement sur ces vecteurs témoins est résumé au tableau IV.4 et illustré à la figure 4.9.

Paramètres		Résolutions	
Segment	Critère	84 cm → 168 cm	168 cm → 210 cm
AB	moyenne	Amélioration des détections intactes.	Détérioration des détections intactes. Plusieurs segments basculent vers l’assignation disparue.
	écart-type	Entièrement intact à 84 cm, chaque dégradation de résolution a détérioré l’assignation. Les vecteurs se segmentent et passent à l’assignation suspecte ou disparue.	
CD	moyenne	Très segmenté à 84 cm et entièrement assignée à disparue dès la première dégradation de résolution.	
	écart-type	Entièrement intact aux trois résolutions.	

Tableau IV.4 : Impact spécifiquement des résolutions sur ces vecteurs témoins



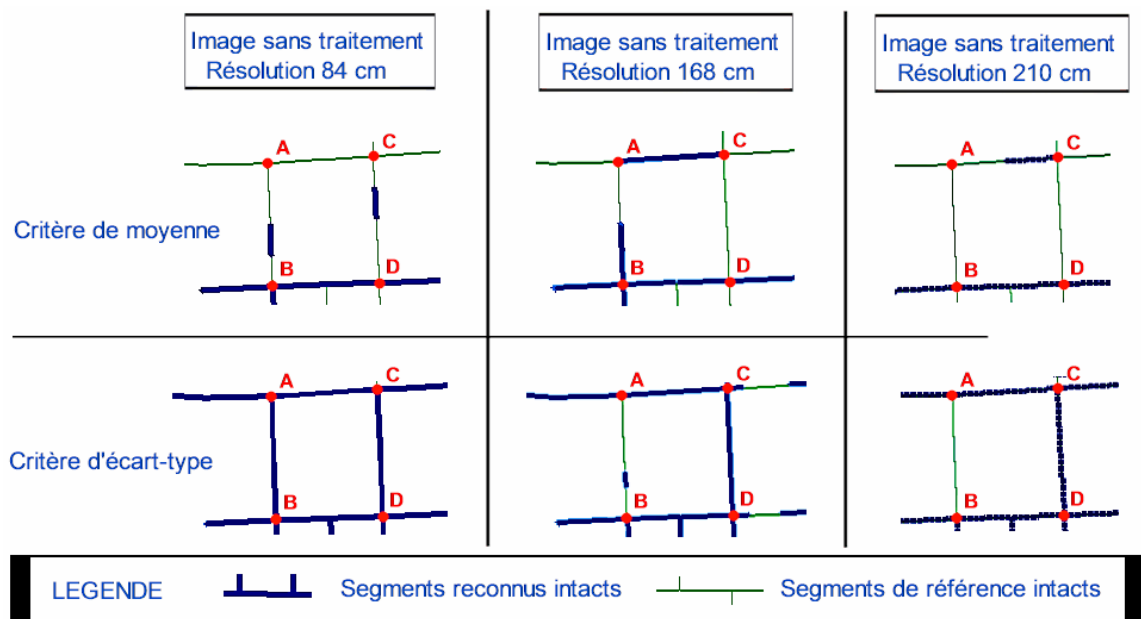


Figure 4.9 : Variation de l'assignation intacte selon les critères et la résolution.

En termes d'assignations intacts, les constats de l'analyse spatiale globale se confirment avec plus de nuance sur les segments témoins. La figure 4.9 montre que lors du changement de résolution, le critère de moyenne est plus discriminant voir plus catégorique dans ses assignations. S'il réduit la segmentation lors du premier ré-échantillonnage, il relègue tout au statut de disparue par la suite.

L'assignation effective au statut disparu pour une résolution de 210 cm soulève cependant un doute. La position d'un filtre témoin à 130 mètres sur le segment A-B présenté au tableau IV.5 favoriserait la détection au-delà du  $r_{\min}$  pour les deux résolutions. L'extrapolation sur l'ensemble du segment ne permet de cibler qu'une faible portion du segment susceptible de passer sous le seuil du  $r_{\min}$ . L'assignation de ce segment devrait être intacte ou minimalement suspecte pour la résolution de 210 cm. Il y a donc ici discordance entre les principes de détection et leurs applications effectives.

Le critère d'écart-type qui se montre très robuste aux variations radiométriques dans les portions adjacentes du filtre étonne cependant sur le segment A-B avec une perte d'assignation globale. Une comparaison spatiale plus globale entre les figures 4.3 et 4.4 permet cependant de constater la généralisation du phénomène de fractionnement de longs segments continus détectés à la résolution précédente. Pour ce critère, la position d'un filtre témoin à 130 mètres sur le segment A-B (tableau IV.5) favoriserait la détection bien au-delà du  $r_{\min}$  pour les deux résolutions ( $0,60 \geq r_{\min}$  de 0,25). L'assignation au statut disparu ne se justifie pas par l'extrapolation visuelle à l'ensemble du segment.

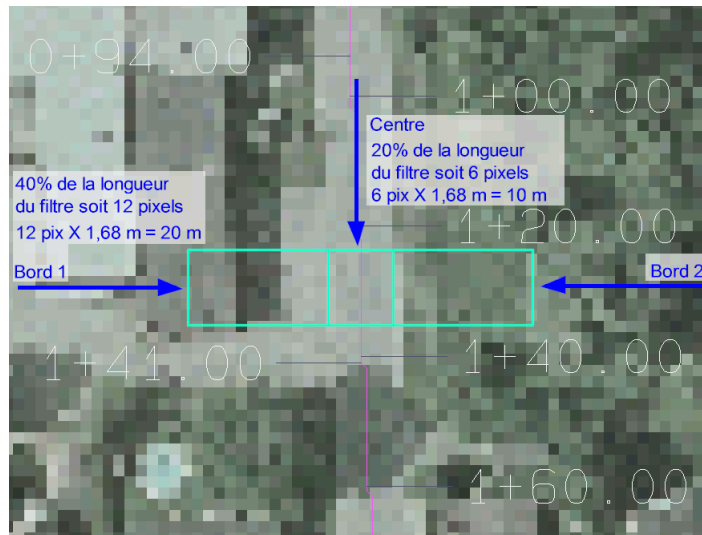
En conclusion, contre toutes attentes, ces rééchantillonnages n'ont apporté aucun gain de performance. Ils nous permettent cependant de prendre la mesure de la sensibilité, voir de l'hypersensibilité de l'assignation finale aux variations de résolution. En fait, une faible variation d'homogénéité des valeurs de pixels dans les différentes parties du filtre entraîne un basculement sous les seuils. Il s'en suit une sous-reconnaissance des routes intactes et la surestimation des routes disparues et nouvelles. L'analyse spatiale sur les segments témoins à la section 4.4 soulève aussi un questionnement sur la séquence d'analyse et d'assignation de SIGMA-ROUTES.

Un abaissement des seuils (ex. : réduire le  $r_{\min}$  à 0,10) combiné à une réduction du pourcentage assigné au statut intact (ex. : assignation intacte dès que 40% des détections du filtre le long d'un segment est au-delà du seuil  $r_{\min}$ ) feraient augmenter le pourcentage des distances linéaires en concordance avec la référence, tout comme celui des fausses détections et de la surestimation des routes disparues et nouvelles. Ces constats s'ajoutent à la mise en évidence d'incohérences analytiques de l'algorithme qui requièrent un test de contrôle ciblé.

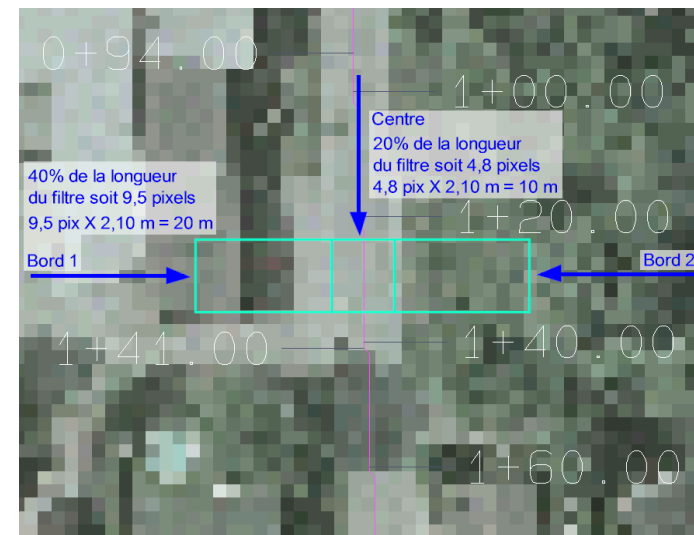
		Moyenne des valeurs de pixel				Écart-type des valeurs de pixel			
Filtre témoin	Portion du filtre	Rouge	Vert	Bleu	$Min \left[ 1 - \left( \frac{\mu_{bord}}{\mu_{centre}} \right) \right]$	Rouge	Vert	Bleu	$Min \left[ 1 - \left( \frac{\sigma_{centre}}{\sigma_{bord}} \right) \right]$
		168 cm	Bordure 1	127,187	134,156	127,338	0,23 $\geq r_{min}$ de 0,15	36,811	38,306
	Centre	164,794	174,771	168,509	6,685	6,758		6,151	
	Bordure 2	118,845	133,669	118,407	21,067	19,064		20,456	
210 cm	Bordure 1	125,091	132,778	125,006	0,25 $\geq r_{min}$ de 0,15	37,342	37,957	38,522	0,60 $\geq r_{min}$ de 0,25
	Centre	166,096	177,740	170,337		7,330	6,956	7,065	
	Bordure 2	115,681	130,452	115,082		18,448	17,340	18,579	

Tableau IV.5 : Application du filtre à 130 mètres sur segment témoin A-B aux résolutions de 168 cm et 210 cm

Filtre sur segment témoin A-B à résolution de 168 cm



Filtre sur segment témoin A-B à résolution de 210 cm



#### 4.5 Combinaison simultanée des critères de moyenne et d'écart-type

Aux sections 4.1 à 4.4, nous avons évalué l'impact d'une dégradation de la résolution spatiale sur les performances des critères de moyenne et d'écart-type. On retient entre autre que les meilleures performances furent obtenues sur l'image à 84 cm de résolution et que les deux critères sont complémentaires en fonction des catégories de routes.

La combinaison des deux critères appliqués sur une image à haute résolution pourrait optimiser le rendement toutes catégories de routes confondues. Les résultats sur l'image sans traitement sont présentés au tableau IV.6 ainsi qu'à la figure 4.10. Ils seront analysés selon deux volets soient la mesure linéaire des détections et la localisation spatiale. C'est d'ailleurs cet essai qui établira la base de comparaison pour les essais ultérieurs sur des images de même résolution ayant subi certains traitements.

<b>RÉSULTATS SUR IMAGE SANS REHAUSSEMENT (84 cm)</b>				
<b>MESURES LINÉAIRES DÉTECTÉES</b>				
<b>Distances</b>	<b>-Intact-</b>	<b>-Doute/suspect-</b>	<b>-Disparu-</b>	<b>-Nouveau-</b>
Contrôle	36,4 km	0,7 km	1,8 km	1,6 km
	Paramètres testés : combinaison de moyenne ou écart-type			
Totale détectée	27,1 km	8,3 km	1,8 km	0 km
Fausse détection	0,9 km	7,8 km	1,6 km	0 km
Concordance avec la référence	26,2 km (71,9%)	0,5 km (71,4%)	0,2 km (11,1%)	0 km
Omission	10,2 km (28,1%)	0,2 km (28,6%)	1,6 km (88,9%)	1,6 km (100%)

Tableau IV.6 : Combinaison de moyenne ou écart-type sur image sans traitement

#### **4.5.1 Volet de mesures linéaires détectées**

Pour les routes intactes, la distance en concordance avec la référence atteint maintenant 72% en comparaison avec un maximum de 54% pour le plus performant des critères utilisé individuellement. Les segments assignés disparus sont réduits de 66% passant de 5.3 km à 1.8 km. Ces 3.5 km d'écart en fausses détections disparues sont réassignés suspects. Ce progrès laisse présager qu'un traitement d'image adéquat permettra une assignation plus conforme à la détection visuelle.

Il est aussi pertinent de souligner que le statut suspect est réduit de 33% passant de 12.3 km à 8.3 km avec réassignation intacte aux 4 km d'écart. Le taux de détection de nouvelles routes est toujours nul comme ce fut le cas pour les essais individuels des critères à cette résolution.

#### **4.5.2 Volet de la localisation spatiale**

D'un point de vue spatial, la combinaison des critères va au-delà de l'addition des résultats des critères individuels en raison des passages itératifs sur les segments suspects. La figure 4.11 illustre la valeur ajoutée de cette synergie. On y présente deux petits segments assignés suspects par des critères distincts qui furent réassignés intacts par le critère complémentaire lors des réexamens successifs.

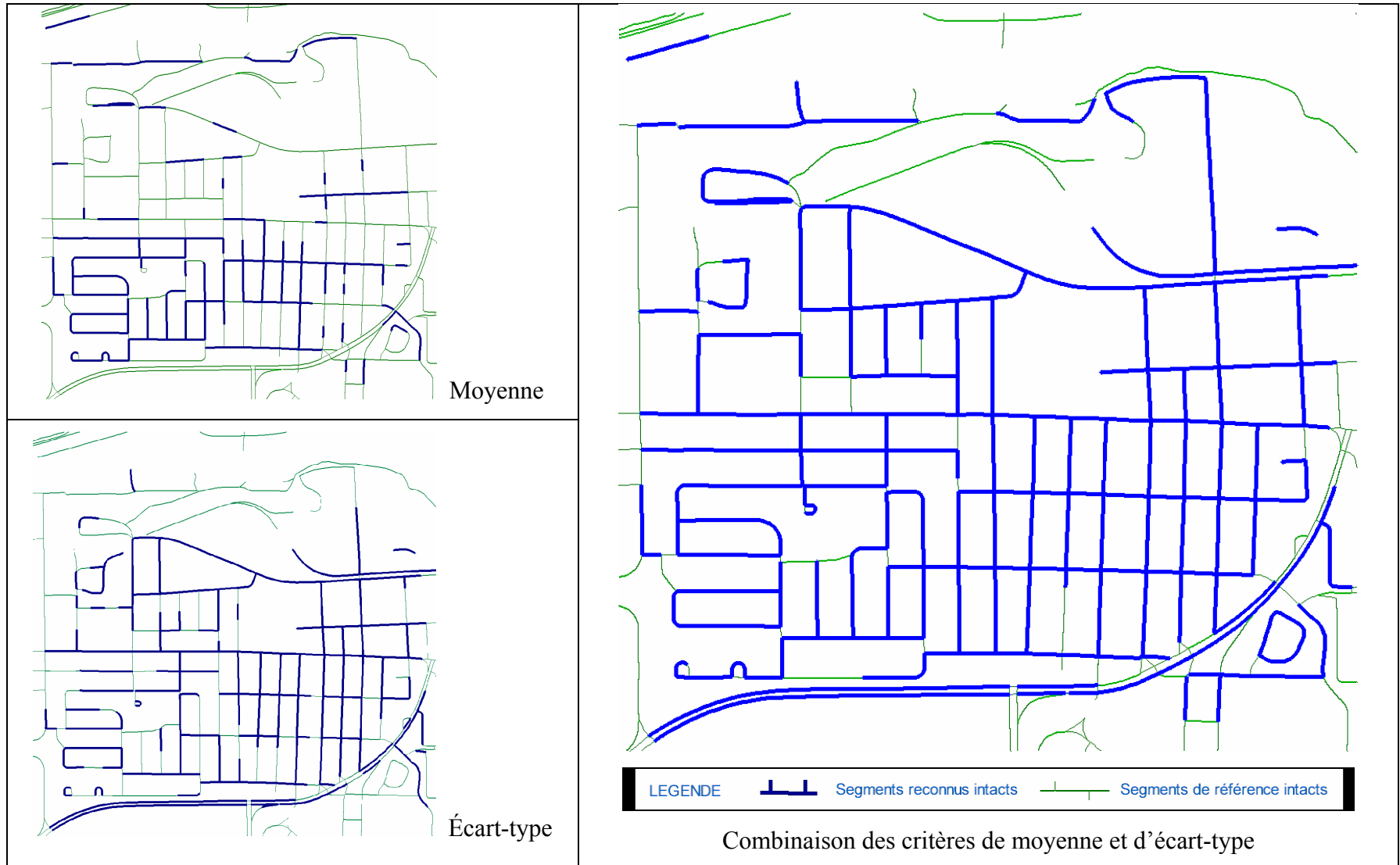


Figure 4.10 : Détection intacte par rapport aux références de vecteurs intactes (détection visuelle)

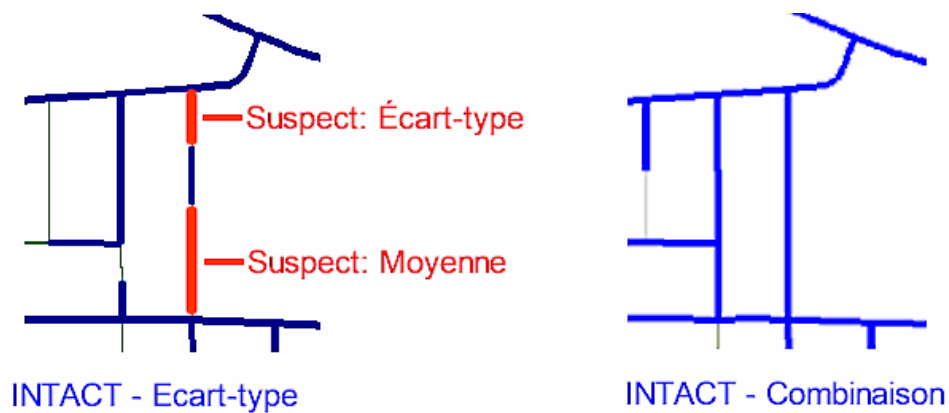


Figure 4.11 : Détection accrue suite aux itérations avec combinaison de critères

Lors de cet essai, aucune catégorie de route n'est favorisée, on peut cependant noter que les voies ferrées et les sentiers constituent l'essentiel des fausses détections. En fait, les voies ferrées comptent pour 78% (0.7 km sur 0.9 km) des fausses détections dans la catégorie intact. Tel qu'illustré à la figure 4.12, les segments de voies ferrées de la cartographie du 1:20K sont assignés intacts dans les cas où les bordures du filtre sont exemptes de végétation. Dans un contexte opérationnel visant à détecter strictement les éléments du réseau routier, il serait pertinent d'ajouter les voies ferrées dans le canal image des lignes exclues.

On note aussi l'omission de plusieurs segments linéaires existants qui n'ont aucune assignation suite au passage du filtre. Tel que présenté à la figure 4.13, la majorité d'entre eux sont très courts et plusieurs sont constitués d'arc de courbes prononcées. Aucune assignation signifie que ces tronçons furent exclus du trajet du filtre, c'est donc au niveau de l'établissement des points de début et fin de lignes dans la base de données topologiques (chapitre 2) que le problème se situe.

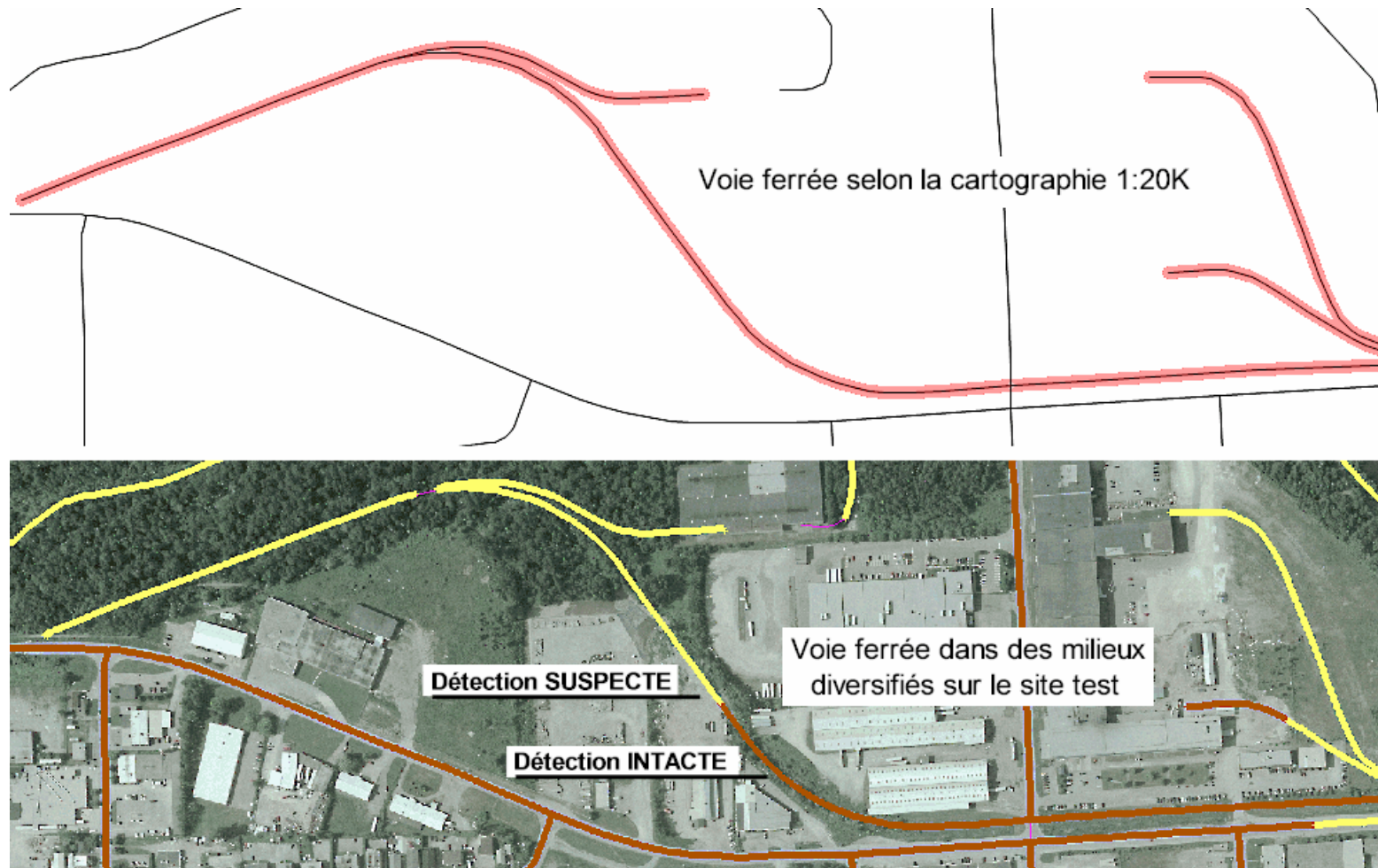


Figure 4.12 : Cas particulier des voies ferrées



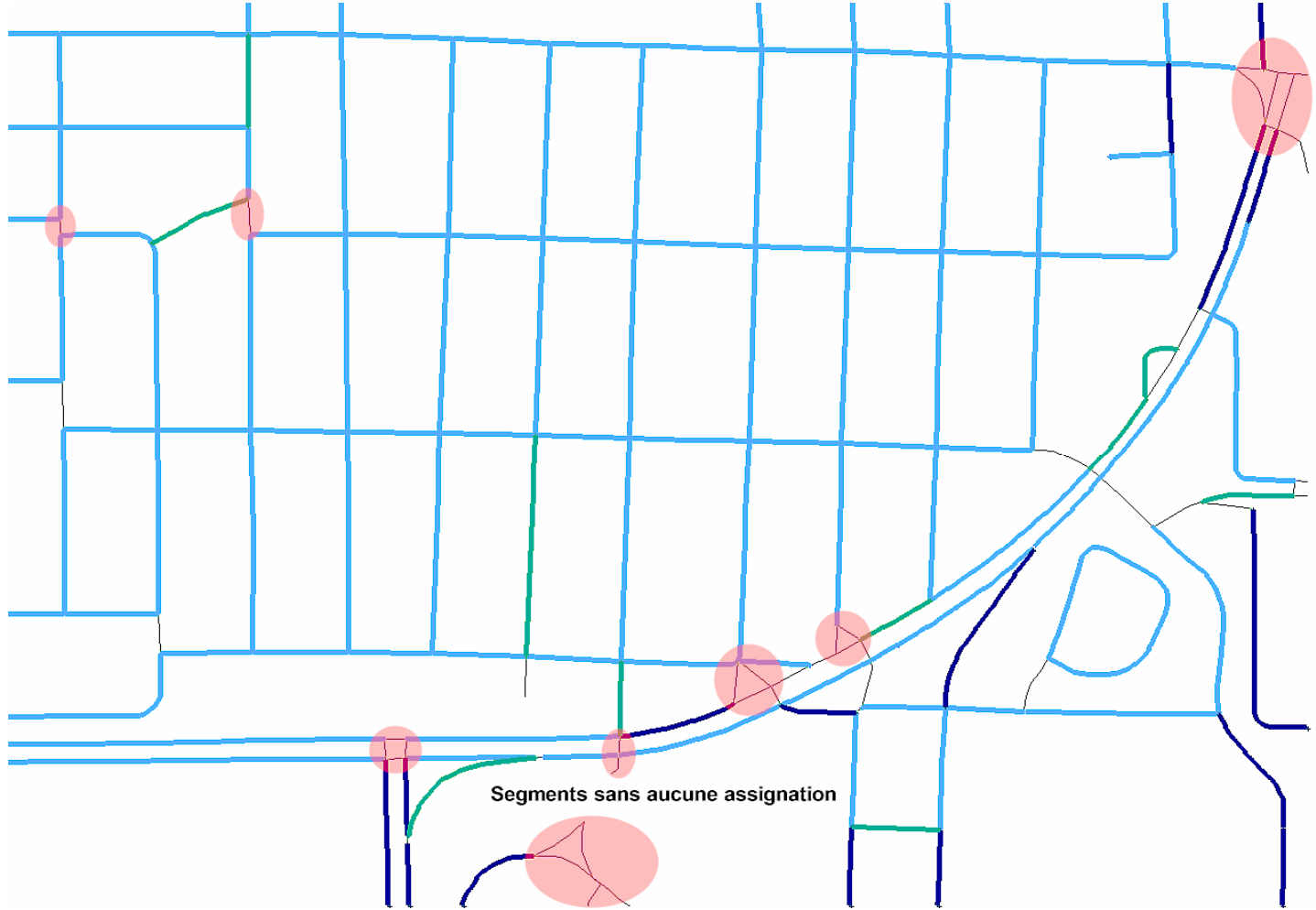


Figure 4.13 : Segments sans assignation de statut (identification non exhaustive)

## 4.6 Appréciation globale et recommandations

Afin de mettre en perspective les résultats du premier bloc d'essais, nous débuterons par un sommaire des observations combinant le rendement des critères et l'impact de la résolution. Nous aborderons ensuite les voies possibles d'amélioration en proposant une nouvelle façon d'examiner les segments suspects.

### 4.6.1 Sommaire du rendement des critères et impact de la résolution

Les essais effectués sur l'image sans traitement à différentes résolutions ont démontrés que;

- Le taux de détection des routes existantes (toutes catégories) décroît lors d'une réduction de résolution. Cette perte de rendement en termes de discontinuités spatiales est plus accentuée avec le critère d'écart-type que l'on pourrait qualifier d'hypersensible à la résolution.
- Globalement, le critère de la moyenne présente un pourcentage de détection des distances en omission avec la référence nettement supérieur au critère d'écart-type. Ce dernier est plus efficace pour les cas intacts mais génère plus de fausses détections. On note cependant que l'analyse spatiale (section 4.4.3) a mis en évidence des incohérences analytiques de l'algorithme.
- La détection par le filtre des moyennes favorise les routes des catégories "rue" et "chemin".

- La détection par le filtre des écart-types favorise les routes des catégories "collectrice" et "locale". Celles-ci étant plus larges, leurs portions centrales plus homogènes offrent un meilleur contraste avec les bordures dans le filtre.
- Les gains de performance par combinaison des critères vont au-delà de l'addition des résultats des critères individuels en raison des passages itératifs sur les segments suspects. Pour les routes intactes, la distance en concordance avec la référence atteint 72% en comparaison avec un maximum de 54% pour le plus performant des critères utilisé individuellement.
- La combinaison des critères ne favorise aucune catégorie de route mais on note que les voies ferrées et les sentiers constituent l'essentiel des fausses détections.
- Tout au long des essais, indépendamment des résolutions ou critères, on repère plusieurs segments linéaires existants qui n'ont aucune assignation suite au passage du filtre. La majorité d'entre eux sont très courts et plusieurs sont constitués d'arc de courbes prononcées.
- Le taux de détection des nouvelles routes est un échec quelque soit la résolution ou le critère utilisé. En fait, le paramètre de longueur minimum de segment pour fin de poursuite de la détection doit être réduit considérablement accentuant ainsi les fausses détections.

#### 4.6.2 Proposition de révision du processus de détection

Nous suggérons de rendre l'application plus conforme au processus de détection visuelle par l'ajout de règles d'interprétation basées sur la connectivité et la continuité. La segmentation devient alors un atout au service de cette nouvelle phase de généralisation. On propose dans un premier temps, de revoir l'algorithme afin qu'il complète adéquatement le découpage des portions suspectes de plus de 20 pixels. Plusieurs petits segments intacts entrecoupés de zones masquées par la présence de végétation ou d'ombres devraient alors être repérés. Ce résultat intermédiaire segmenté ouvrirait la voie à un raffinement par généralisation basée sur la connectivité entre petits segments disparues et suspects.

L'algorithme débiterait par une révision des segments disparus. Pour maintenir ce statut, le segment devrait être connecté à deux segments disparus sinon il sera réassigné à l'étiquette de ces voisins. Lorsqu'un de ces voisins est intact, il devient prioritairement intact. Cette règle repose sur la forte probabilité que le bris de continuité sur une si petite distance est tributaire d'un ombrage ou autres particularités locales. Une révision des segments suspects fait suite avec la possibilité de réassignation au statut intact en cas de connections à deux segments intacts, sinon il demeure suspect. L'organigramme de la figure 4.14 schématise ce principe.

La figure 4.15 illustre cette séquence complémentaire à l'algorithme original sur le segment CD. Tout comme dans le cas de la suggestion relative à la longueur du centre du filtre, ce troisième niveau d'itération devrait permettre un meilleur rendement associé à des seuils et des pourcentages d'assignation plus discriminants. Il devrait aussi drastiquement réduire le taux de fausses assignations disparues.

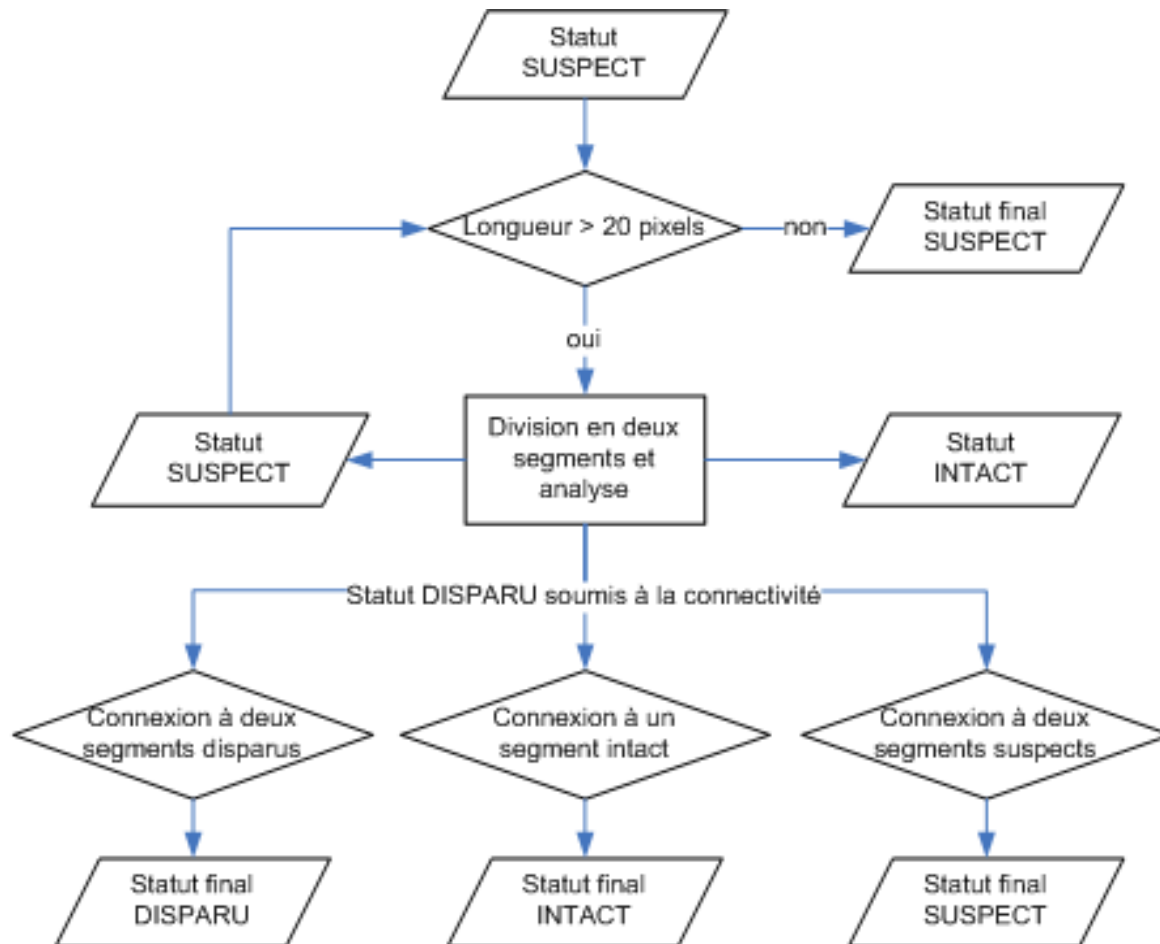


Figure 4.14 : Organigramme de procédure suggéré avec règles de connectivité

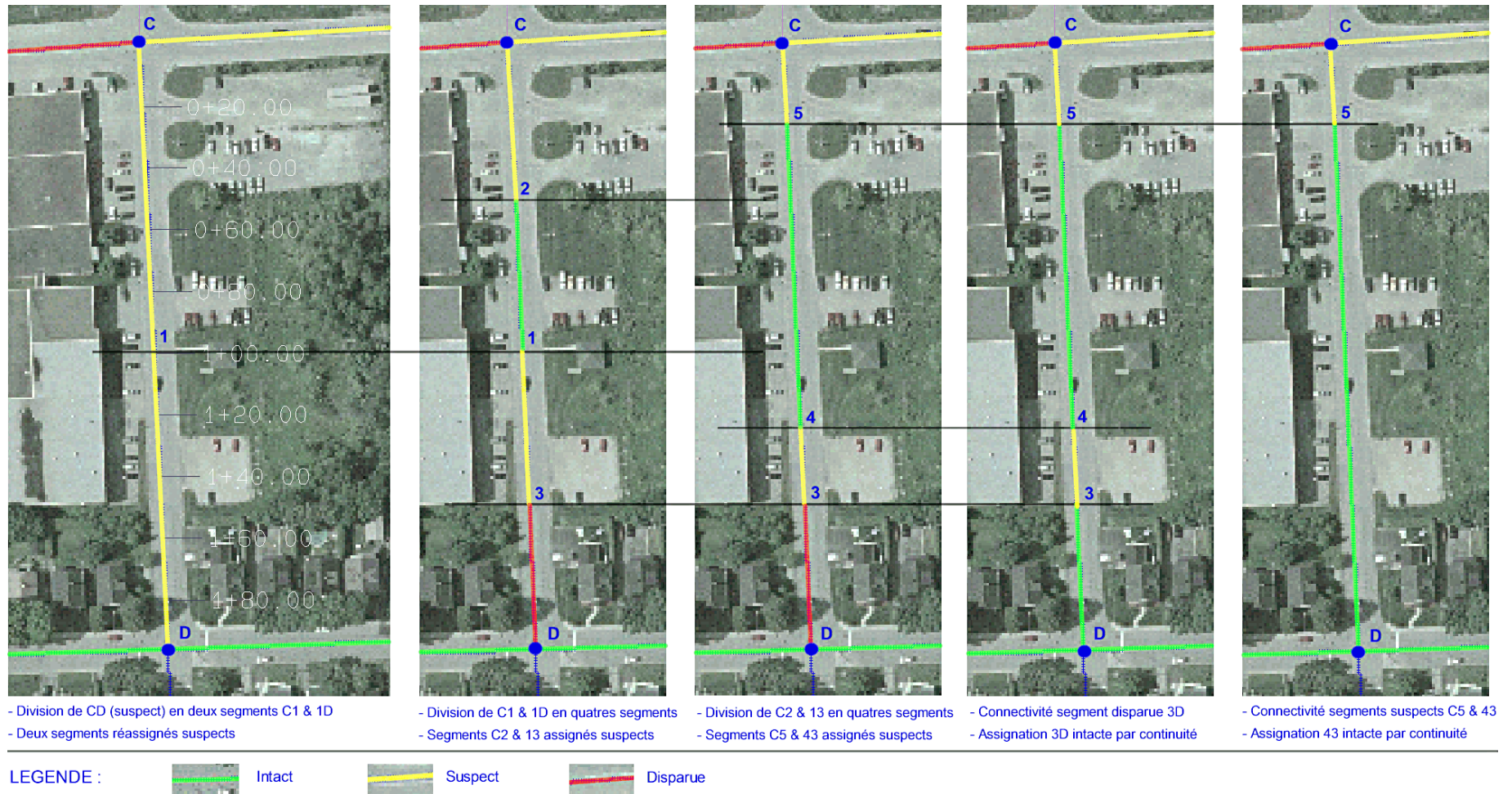


Figure 4.15 : Simulation sur le segment témoin CD du troisième niveau d'assignation basé sur la connectivité

## CHAPITRE 5 : Effets des traitements d'images

Ce chapitre est dédié aux essais sur l'image à 84 cm de résolution ayant subi des rehaussements décrits au chapitre 3 (section 3.5.2). Ces essais permettront de quantifier les gains successifs de réduction des fausses détections. En fonction des résultats d'essais, nous établirons des liens au chapitre 2 traitant des principes de détection sous-jacents à l'application SIGMA-ROUTES.

### 5.1 Plan d'essais

Les rehaussements d'images devraient permettre d'optimiser certains paramètres spectraux qui affecteront le rendement de la détection des voies de communication. L'ensemble des essais furent présentés au tableau III.7 de la section 3.5.1 alors que le tableau V.1 cible la dernière séquence des essais 7 à 11. L'organigramme de la figure 5.1 nous situe dans le protocole d'essais entamé au chapitre précédent.

<i>Essai No</i>	<i>Type de rehaussement</i>	<i>Autres paramètres</i>
7	Segmentation d'images	Seuil $r_{min}$ établi par combinaison de moyenne ou écart-type des valeurs des pixels du filtre
8	Compensation d'histogramme (post-segmentation)	
9	Rehaussement des limites & harmonisation des teintes post-segmentation	
10	Substitution de teinte, extraction par masque et striction/linéarisation	
11	Sur les vecteurs cartographiques du 1/20K pixelisés	

Tableau V.1 : Plan d'essais sur images rehaussées

L'essai numéro 11 se distingue des précédents puisqu'il ne sera pas effectué sur une image du terrain mais sur les vecteurs pixélisés (format image) de la cartographie 1/20K. La comparaison avec les résultats de détection visuelle sur l'image ne sera alors pas applicable. Ce test vise à confirmer l'intégralité du parcours du filtre puisque nous confronterons ainsi le déplacement du filtre sur sa propre référence de parcours. L'essai devrait contribuer à une meilleure compréhension du problème des segments sans assignation tel qu'illustré à la figure 4.13.

L'analyse des résultats sur les images rehaussées sera présentée sous deux volets soient d'abord l'aspect quantitatif des mesures linéaires détectées suivi du volet d'analyse spatiale des variations de détection par rapport aux résultats obtenus sur l'image sans traitement. Tout comme dans les analyses précédentes, les mesures linéaires détectées apporteront des nuances sur les distances en concordance et en omission avec la référence. Le second volet d'analyse spatiale vise à caractériser des variations locales de reconnaissance. Nous pourrons ainsi associer les rehaussements d'images aux gains éventuels de performances sur certaines catégories de routes.



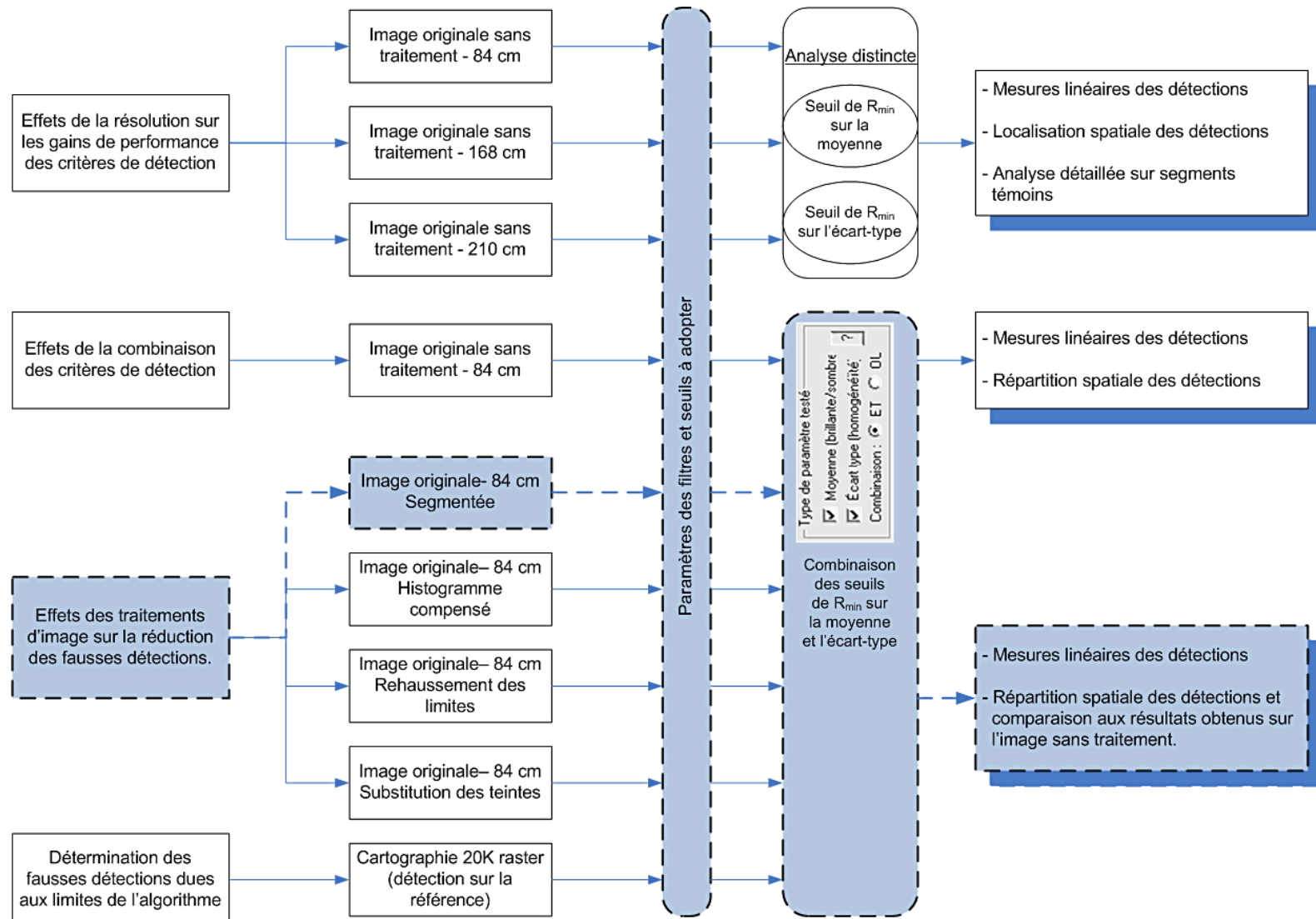


Figure 5.1 : Bloc d'essais visant à mesurer l'effet des traitements de rehaussement

### 5.1.1 Sommaire des traitements et attentes

Nos options de rehaussement constituent une progression débutant par une segmentation d'image ayant le potentiel d'homogénéiser les valeurs des pixels par classification (Figure 5.2B). Cette première phase est ensuite combinée à une compensation d'histogramme visant globalement à rehausser et mettre en évidence des entités routières. On poursuit la séquence avec plus d'intensité par un rehaussement des limites en post-segmentation. On termine avec l'approche par masque d'extraction après substitution des teintes (figure 5.2C) qui élimine les pixels n'appartenant potentiellement pas aux segments de route (bruits spectraux). L'objectif ultime est d'abaisser le taux de fausses détections, cependant, un nettoyage de l'image trop intense pourrait éliminer des informations pertinentes telles que les variations de revêtements routiers, l'état de ces revêtements ou la présence de nouvelles routes.

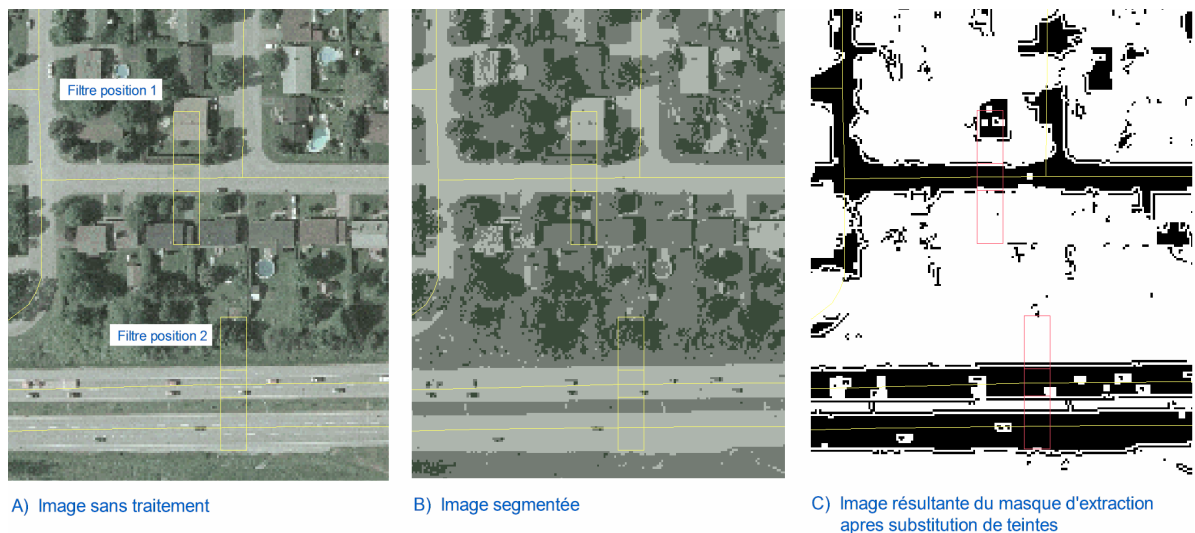


Figure 5.2 : Comparaison de l'image sans traitement, segmentée et résultante du masque d'extraction.

L'ensemble de ces préparatifs réduit significativement la complexité spectrale de l'image et devrait accroître conséquemment la justesse des assignations. Dans cet objectif, certains chercheurs, tels que Zhao et al. (2003), proposent des prétraitements pour générer une image des segments de routes candidats alors que d'autres préconisent l'élimination d'un maximum de contenu non-routier avant de procéder à une détection fine.

### **5.1.2 Établissement des paramètres de traitement**

Le tableau V.2 établit, pour une résolution de 84 cm, les paramètres des critères de taille du filtre et de décalages spatiaux selon les règles de la section 2.2.2. Le traitement de segmentation s'inscrit dans la séquence surlignée de la figure 5.1. Les seuils du filtre sont extrapolés à partir d'une analyse locale de l'image traitée (chapitre 3).

## **5.2 Résultats et analyses**

Le tableau V.3 présente une grille comparative des résultats de détection en fonction des traitements de rehaussement. Ces résultats seront subséquentement analysés sous le volet quantitatif des mesures linéaires détectées et deuxièmement sous le volet spatial des variations de détection.

### **5.2.1 Analyse des mesures linéaires détectées (tableau V.3 en deux parties)**

Pour les routes intactes, la distance en concordance avec la référence atteint 77,5% suite à la combinaison de la segmentation et de la compensation d'histogramme. Bien que le gain ne soit pas très significatif, soulignons que le taux d'omission est réduit et que l'analyse spatiale de la section 5.2.2 fait état de plusieurs segments assignés disparues ou suspects dorénavant assignés intacts.

<b>CRITERE</b>		
Résolution	84 cm	
Taille du filtre	Longueur x Largeur : 62 x 13 pixels	
Décalages spatiaux	$\perp \rightarrow 5$ pixels $\parallel \rightarrow 35$ pixels	
Pixels de poursuite *	50 pixels	
<b>SEUILS DU FILTRE- BASÉ SUR LES VARIATIONS DE RÉPONSE D'UN FILTRE TÉMOIN (Référence section 3.5.4, tableau III.9)</b>		
<b>TRAITEMENT</b>	$r_{Min}$ sur $\mu$	$r_{Min}$ sur $\sigma$
Segmentation	0,15	0,25
Histogramme compensé	0,16	0,23
Rehaussement des limites	0,20	0,36
Substitution de teintes	0,18	0,30
Cartographiques 1/20K pixélisés	0,45	0,10
Seuils de classification des segments	<i>Intact</i> : Si plus de 60% répondant au $r_{min}$ <i>Disparu</i> : Si moins de 30% répondant au $r_{min}$ <i>Suspect ou doute</i> : entre 30% et 60% répondant au $r_{min}$	

\* Nombre de pixels minimum pour la poursuite

Tableau V.2: Paramètres de traitements selon les différents traitements de rehaussement

Plus spécifiquement, c'est 1,2 km sur les 1,8 km préalablement disparus qui font le saut directement au statut intact. Sur cette image, les routes sont mieux discriminées ce qui réduit plusieurs fausses détections au statut suspect. Le taux de détection de nouvelles routes est cependant toujours nul. Les gains escomptés en rehaussant les limites et en harmonisant les teintes ne se sont pas concrétisés. L'amplification des écarts de moyennes entre la route et les bordures (section 3.5.3) s'est soldée par des distances en concordance avec la référence inchangées alors qu'on observe une légère réduction des fausses détections intactes. L'important transfert anticipé du statut suspect vers le statut intact n'a pas eu lieu. Le taux du statut suspect est inchangé tout comme celui des nouvelles routes.

Afin de mettre ces résultats en perspective, on rappelle une publication de Yan et Zhao (2003) qui fait état d'une concordance de 81% après l'application d'opérateurs de bas niveau sur une image IKONOS générant une nouvelle image de segments candidats suivi d'opérateurs de haut niveau pour établir le parcours et la connexion des segments de routes. Mokhtarzade *et al.* (2008) présentent un rendement maximal de 88% sur des images Quick Bird et IKONOS après un processus de segmentation suivi d'une génération d'image de routes potentielles (*Road Raster Map*) et finalement d'une vectorisation de cette dernière. Les 77,5% de détection obtenu avec SIGMA-ROUTES témoignent de l'efficacité des principes de détection en combinaison avec quelques prétraitements de rehaussement. De plus, on devrait potentiellement ajouter les segments sans assignation de statut repérés (figure 4.13) qui totalisent environ 1,5 km et feraient passer le taux de concordance intacte à 85%.

Il est possible d'obtenir un taux d'assignation intacte encore plus élevé avec les images prétraitées en abaissant les seuils et le pourcentage minimum d'assignation à ce statut. En contrepartie, une telle réduction ne serait plus étalonnée sur la radiométrie de l'image utilisée et l'algorithme très sensible aux bruits spectraux urbains gonflerait les fausses détections intactes. De plus, la variation de ces paramètres ne nous permet pas d'évaluer les gains relatifs d'un traitement à l'autre. Dans un contexte de production, cette flexibilité permet cependant à l'opérateur de tenir compte de particularités telles qu'une présence massive d'ombrage sur les routes locales.

Le rendement maximal fut atteint par la combinaison de segmentation et de compensation d'histogramme. Le volet d'analyse de la localisation spatiale nous permettra de cibler les gains selon les catégories de route tout en validant simultanément la cohérence de ceux-ci avec les principes de détection de l'application.

<b>MESURES LINÉAIRES DÉTECTÉES - DISTANCES EN CONCORDANCE ET EN OMISSION AVEC LA RÉFÉRENCE (Partie 1)</b>				
	<b>DÉTECTION –INTACT-</b>	<b>DÉTECTION – SUSPECT-</b>	<b>DÉTECTION –DISPARU-</b>	<b>DÉTECTION – NOUVEAU-</b>
Distance de contrôle	36,4 km	0,7 km	1,8 km	1,6 km
Paramètre testé	Combinaison de moyenne ou écart-type	Combinaison de moyenne ou écart-type	Combinaison de moyenne ou écart-type	Combinaison de moyenne ou écart-type
	Distance totale détectée			
Sans rehaussement	27,1 km	8,3 km	1,8 km	0 km
Segmentation	28,5 km	8,3 km	1,3 km	0 km
Histogramme compensé	29,5 km	6,7 km	2,0 km	0 km
Rehaussement des limites	27,9 km	8,8 km	1,4 km	0 km
Substitution de teintes	28,1 km	9,1 km	0,9 km	0 km
	Distance fausse détection			
Sans rehaussement	0,9 km	7,8 km	1,6 km	0 km
Segmentation	1,1 km	7,8 km	1,2 km	0 km
Histogramme compensé	1,3 km	6,7 km	1,8 km	0 km
Rehaussement des limites	0,8 km	8,2 km	1,3 km	0 km
Substitution de teintes	1,2 km	8,7 km	0,9 km	0 km

Tableau V.3 (1<sup>re</sup> partie) : Comparaison du rendement de détection en fonction des traitements de rehaussement

<b>MESURES LINÉAIRES DÉTECTÉES - DISTANCES EN CONCORDANCE ET EN OMISSION AVEC LA RÉFÉRENCE (Partie 2)</b>				
	<b>DÉTECTION –INTACT-</b>	<b>DÉTECTION – SUSPECT-</b>	<b>DÉTECTION –DISPARU-</b>	<b>DÉTECTION – NOUVEAU-</b>
	Distance en concordance avec la référence (contrôle)			
Sans rehaussement	26,2 km (71,9%)	0,5 km (71,4%)	0,2 km (11,1%)	0 km
Segmentation	27,4 km (75,3%)	0,5 km (71,4%)	0,1 km (5,6%)	0 km
Histogramme compensé	28,2 km (77,5%)	0 km	0,2 km (11,1%)	0 km
Rehaussement des limites	27,1 km (74,4%)	0,6 km (85,7%)	0,1 km (5,6%)	0 km
Substitution de teintes	26,9 km (73,9%)	0,4 km (57,1%)	0 km	0 km
	Distance en omission			
Sans rehaussement	10,2 km (28,1%)	0,2 km (28,6%)	1,6 km (88,9%)	1,6 km (100%)
Segmentation	9,0 km (24,7%)	0,2 km (28,6%)	1,7 km (94,4%)	1,6 km (100%)
Histogramme compensé	8,2 km (22,5%)	0,7 km (100,0%)	1,6 km (88,9%)	1,6 km (100%)
Rehaussement des limites	9,3 km (25,6%)	0,1 km (14,3%)	1,7 km (94,4%)	1,6 km (100%)
Substitution de teintes	9,5 km (26,1%)	0,3 km (42,9%)	1,8 km (100%)	1,6 km (100%)

Tableau V.3 (2<sup>e</sup> partie) : Comparaison du rendement de détection en fonction des traitements de rehaussement

### 5.2.2 Analyse de la localisation spatiale

Les figures 5.3 à 5.6 montrent graphiquement les changements du statut disparu ou suspect à intact suite aux divers prétraitements d'image. Le tableau V.4 présente un sommaire des catégories de routes favorisées ainsi que les distances spécifiques qui furent transférées au statut intact en conformité avec la référence.

<b>CHANGEMENTS DU STATUT DISPARU OU SUSPECT À INTACT SUITE AUX DIVERS PRÉTRAITEMENTS D'IMAGE.</b>			
<b>Traitement</b>	<b>Catégorie de routes favorisées</b>	<b>Distances transférées au statut intact</b>	
		<b>Statut initial suspect</b>	<b>Statut initial disparu</b>
Segmentation. Fig. 5.3	Rues et chemins étroits	0,50 km	1,20 km
Compensation d'histogramme. Fig. 5.4	Rues, chemins et quelques segments de voies plus larges	1,50 km	1,25 km
Rehaussement des limites et harmonisation des teintes. Fig. 5.5	Rues et quelques segments de voies plus larges	0,40 km	1,20 km
Substitution de teintes et l'extraction par masque figure 5.6	Rues et plusieurs segments de voies plus larges	0,60 km	1,30 km

Tableau V.4 : Changement du statut disparu ou suspect à intact suite aux divers prétraitements.



La classification résultante de la segmentation d'image a permis de mieux définir les grandes surfaces telles que les revêtements de chaussées. La figure 5.3 et le tableau V.4 montrent que la majorité des gains de segments intacts sont de courts segments dans les catégories rues et chemins. Fait à noter, ce sont majoritairement des portions initialement assignées disparues dans la catégorie "rue" qui ont fait directement le saut au-delà du seuil des assignations intactes. Cette situation s'explique par le fait que la classification a favorisé la mise en évidence des rues locales alors que seulement les portions de chemins ayant une certaine distinction ont bénéficié du traitement. En lien avec les principes de détection, l'homogénéisation issue de la classification favorise un gain de détection par le critère de la moyenne qui fut relié à ces catégories de routes dans les essais du chapitre 4.

De façon complémentaire, la compensation d'histogramme en post-segmentation redistribue les valeurs de pixels classifiés en favorisant un étalement statistique plus accentué de la variabilité spectrale en bordures des routes. Conséquemment, l'image résultante devrait aussi bénéficier de l'application du critère de détection par écart-type qui, selon les résultats d'essais du chapitre 4, favorise la détection des voies plus larges. La figure 5.4 et le tableau V.4 confirment ce fait en ajoutant quelques segments de voies plus larges mais proposent surtout d'importants gains sur de longs segments de chemins (étroits) initialement assignés suspects. Les fausses détections dans l'assignation intacte sont légèrement à la hausse mais toujours essentiellement constituées des voies ferrées.

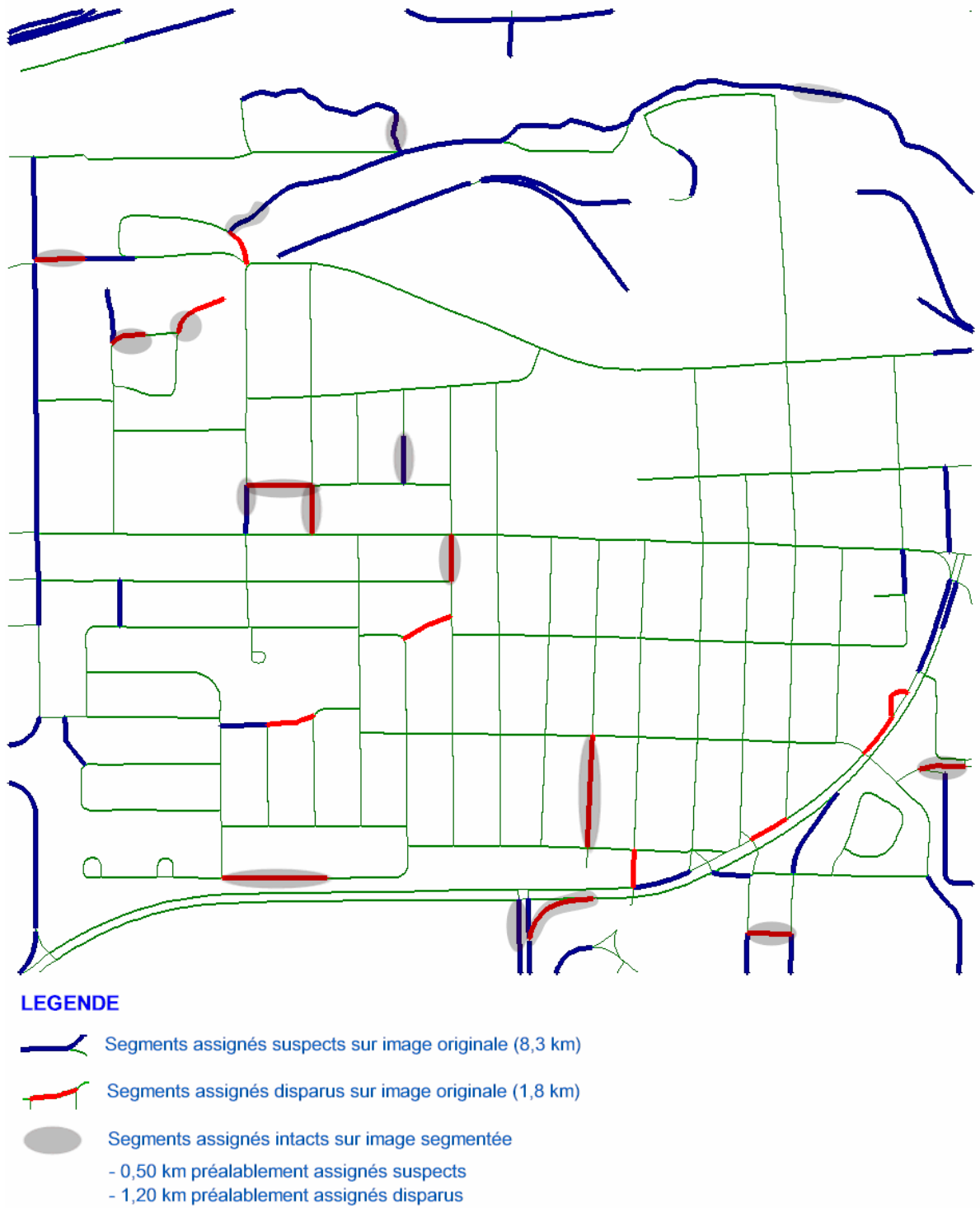


Figure 5.3 : Changement du statut disparu et suspect à intact suite à la segmentation d'image

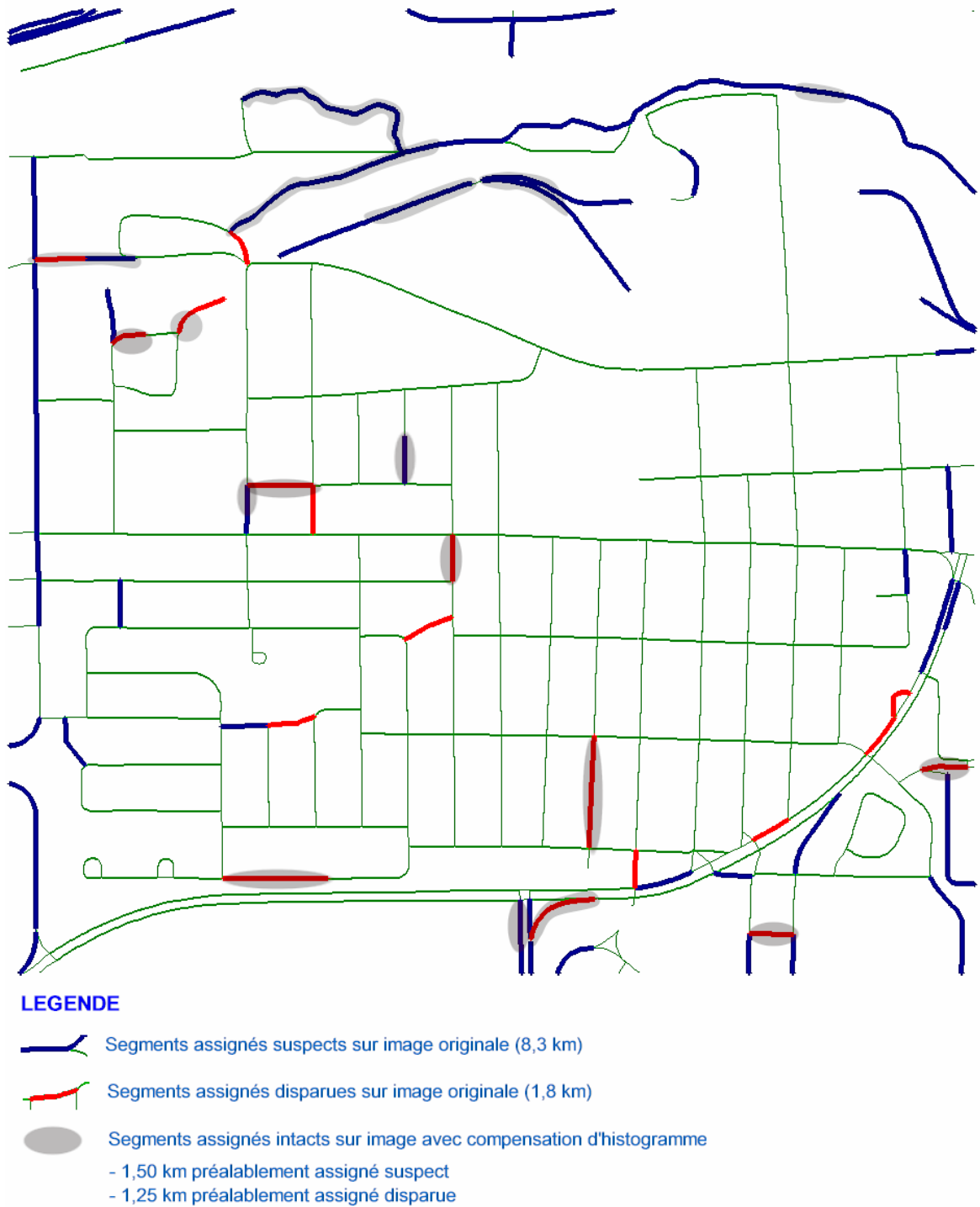
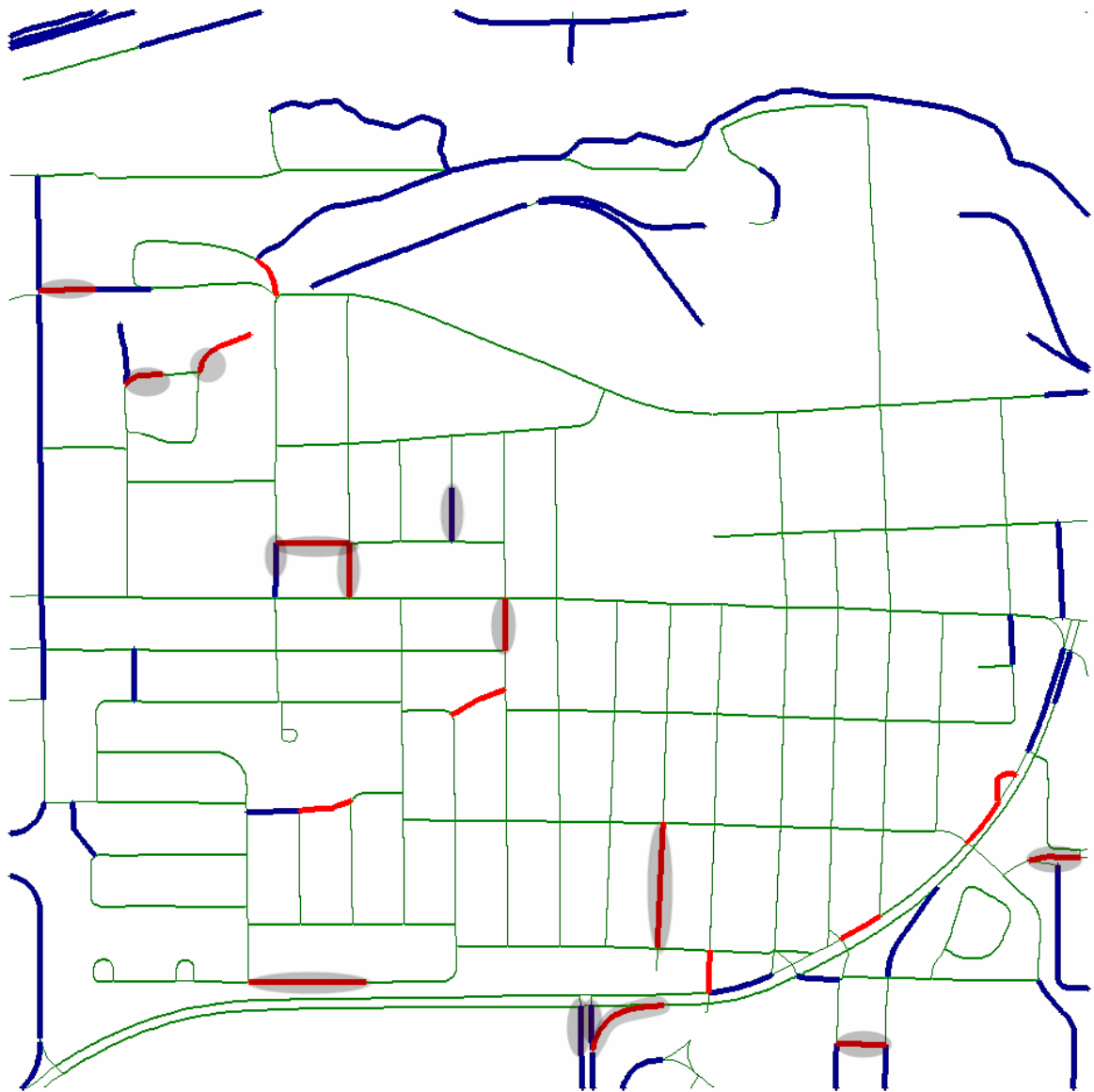


Figure 5.4 : Changement du statut disparu ou suspect à intact suite à la compensation d'histogramme



#### LEGENDE




-  Segments assignés suspects sur image originale (8,3 km)
-  Segments assignés disparus sur image originale (1,8 km)
-  Segments assignés intacts sur image avec rehaussement des limites et harmonisation des teintes
  - 0,40 km préalablement assignés suspects
  - 1,20 km préalablement assignés disparus

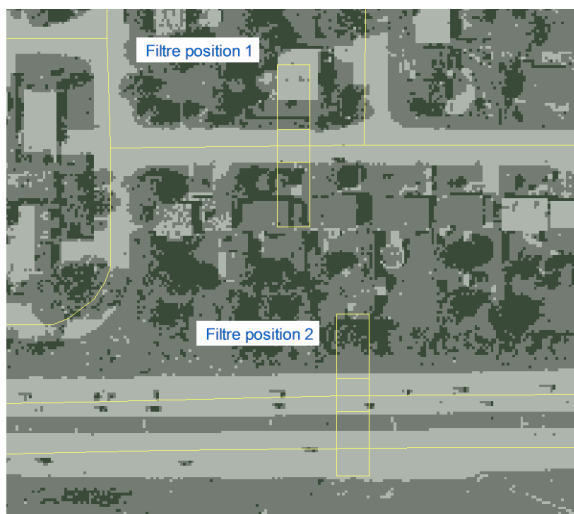
Figure 5.5 : Changement du statut disparu ou suspect à intact suite au rehaussement des limites et harmonisation des teintes



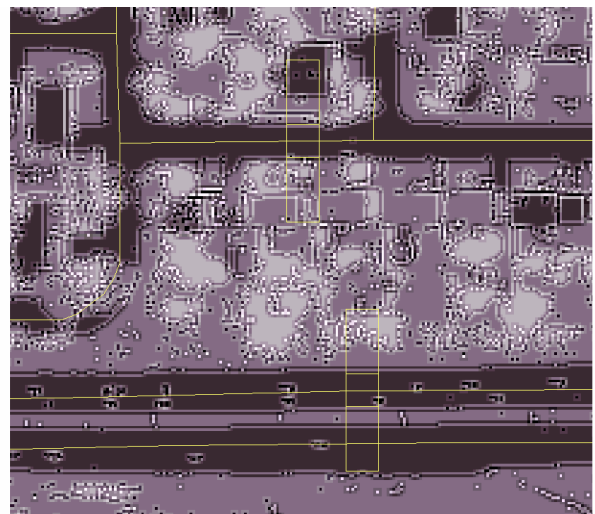
Figure 5.6 : Changement du statut disparu ou suspect à intact suite à la substitution de teintes et l'extraction par masque

Nous fondions certains espoirs sur le rehaussement des limites et l'harmonisation des teintes. Cette approche a le potentiel d'homogénéiser les valeurs des pixels de la chaussée et d'accentuer les contrastes entre les portions centrale et latérale du filtre. L'attente étant de maximiser le rendement aussi bien sur le critère de moyenne que d'écart-type. La moyenne bénéficie de l'accentuation des contrastes issue de l'écart entre des bordures rehaussés et un revêtement routier harmonisé. Cette harmonisation étant plus efficace sur la chaussée que sur les bordures, le critère d'écart-type devrait aussi être plus discriminant. Confrontons maintenant ces principes au rendement effectif.

Pour quantifier les gains de ce traitement, nous avons simulé le rendement de plusieurs filtres sur différents types de routes réparties sur l'image. À titre d'exemple, deux positions du filtre sur une rue locale et sur une artère plus importante sont illustrées à la figure 5.7. Le tableau V.5 montre les résultats de ces deux positions selon les deux principaux critères. Il est à noter que l'image de la figure 5.7B fut traitée comme une image négative pour le critère de moyenne puisque les routes sont plus sombres que les entités non-routières.



A) Image segmentée



B) Image avec rehaussement des limites en post-segmentation

Figure 5.7 : Filtre sur une rue locale et sur une artère plus large pour estimation des gains.

<i>Localisation Des filtres</i>	<i>Moyenne : Minimum : <math>1 - \left( \frac{\mu_{bord}}{\mu_{centre}} \right)</math></i>			<i>Écart – type : Minimum : <math>1 - \left( \frac{\sigma_{centre}}{\sigma_{bord}} \right)</math></i>		
	<i>Image segmentée</i>	<i>Image segmentée + rehaussement des limites</i>	<i>Gain/perte</i>	<i>Image segmentée</i>	<i>Image segmentée + rehaussement des limites</i>	<i>Gain/perte</i>
Filtre 1	<b>+0,12</b>	<b>+0,22</b>	<b>+0,10</b>	<b>+0,80</b>	<b>+0,44</b>	<b>-0,36</b>
Filtre 2	<b>+0,02</b>	<b>+0,06</b>	<b>+0,04</b>	<b>+0,53</b>	<b>+0,51</b>	<b>-0,02</b>

Tableau V.5 : Gains/pertes de résultats sur les deux critères après le rehaussement des limites.

Le rendement général est non conforme aux attentes avec un faible gain sur le critère des écarts de moyennes et une diminution de rendement du critère d'écart-type. Dans les faits, la moyenne a légèrement bénéficié de l'accentuation des contrastes entre des bordures rehaussées et un revêtement routier harmonisé. Cette harmonisation des teintes a cependant eu plus d'effet sur les portions adjacentes des routes que sur la chaussée qui avait déjà été efficacement homogénéisée par la segmentation initiale. Les écarts de variations spectrales ayant été pratiquement toujours réduits, le critère d'écart-type a perdu suffisamment d'efficacité pour que certaines portions de routes dans la catégorie des voies plus larges passent d'un statut intact ou suspect à disparu. Conformément aux essais précédents, le critère de la moyenne, ici légèrement plus discriminant, a réassigné quelques petits chemins du statut suspect au statut intact. En comparant les figures 5.3 et 5.5, on constate une similarité de gains avec l'image segmentée. Ce traitement ne constitue donc pas une préparation d'image bénéfique pour l'application de SIGMA-ROUTES.

La substitution de teintes et l'extraction par masque (essai numéro 10; tableau V.1) se voulait une approche plus drastique destinée à éliminer un maximum d'entités non-routières. Au tableau V.4 ainsi qu'en comparant les figures 5.3 et 5.6, on constate que, si les distances de segments transférés au statut intact sont pratiquement identiques, c'est en termes de catégories de voies que l'on note une particularité. Lors du traitement d'images, les chemins et sentiers de faibles largeurs dont le revêtement n'est pas asphalté sont pratiquement éliminés de l'image résultante.

Dans un premier temps, ces entités n'ont pas été sélectionnées lors de la substitution de teintes pour la mise en évidence du réseau routier. Ces entités aux caractéristiques spectrales plus subtiles s'apparentent à de nombreuses entités non routières. Leurs assignations à une valeur de pixel unique produiraient une mise en évidence non discriminante du réseau routier. Dans un deuxième temps, les quelques portions de chemins et sentiers encore distinctifs seraient incluses dans le masque d'extraction des entités non-routières. Pour limiter l'inclusion d'entités routières dans le masque d'extraction, l'utilisateur dispose de tolérances permettant la sélection d'un intervalle de valeur de pixel autour du pixel de référence. Il est ainsi possible de mettre à profit l'homogénéisation des surfaces routières issue des prétraitements de rehaussement en effectuant un masque des surfaces routières suivi d'une inversion de ce masque pour mieux cibler le contenu non-routier à extraire. En dépit des efforts d'optimisation de sélection, nous devons assumer la perte de segments dans les catégories de voies étroites à titre de "dommages collatéraux" tolérés pour la détection sans ambiguïté des autres voies de communication.

Concernant la détection des nouveaux segments, l'impact des rehaussements est difficilement quantifiable compte tenu des résultats non concluants. On peut affirmer qu'un opérateur conscient des forces et faiblesses associées aux différents traitements pourrait mettre à profit les gains respectifs des images traités dans le cadre d'une détection ciblée par catégorie.



Cependant, pour tous les essais, ce sont les fausses détections d'assignation suspectes en bordure de l'image qui semblent problématiques. Un exemple typique est la route locale de direction Nord-Sud sur la bordure Ouest du site (figure 5.3). Cet axe routier est systématiquement relégué au statut suspect quelque soit le traitement alors qu'il possède toutes les propriétés spectrales destinées à une assignation intacte. Il s'agit d'une distance non-négligeable qui, extrapolée au traitement de plusieurs images complètes, ne sera jamais assignée intacte en dépit de forts contrastes entre le centre et les bordures du filtre. On ne peut aucunement mettre en cause les seuils ou les limites de détection à la base des assignations. Cette situation semble se répéter sur une bordure d'environ 60 à 65 mètres sur le périmètre du site. La section 5.3 sera spécifiquement dédiée à ce problème.

### **5.3 Localisation spatiale : erreurs de détection en bordure d'image**

Afin de vérifier si l'erreur en bordure de l'image est systématique, nous avons découpé le site complet en deux sous-secteurs A et B présentés sur la figure 5.9. En y appliquant individuellement SIGMA-ROUTES, nous sommes en mesure de faire un suivi des changements d'assignations sur les bordures d'images des deux sous-secteurs. Un premier découpage est constitué d'une bande de 300 mètres de largeur du Nord au Sud à la limite Ouest du site. Le second couvre 400 par 600 mètres au Sud-Est du site. La partie gauche de la figure 5.9 montre que la bordure Est du premier sous-secteur A est constituée de segments classés intacts tandis que ceux de l'extrémité Ouest, suspects (fausse catégorie). Dans le cas du sous-secteur B, toutes les routes locales sont assignées intactes conformément à la réalité terrain. La portion de droite de la figure 5.9 présente les résultats sur deux sous-secteurs de l'image.

On constate que le contenu d'une bande d'environ 60 mètres ceinturant chaque sous-secteur a changé de statut. A priori, on attribue cette erreur grossière de détection au fait qu'une portion du filtre excéderait le cadre de l'image. Ce n'est cependant pas le cas puisque la longueur totale du filtre est de 50 mètres + 3 pixels  $\approx$  54 mètres. C'est donc 17 mètres de part et d'autre du vecteur cartographique qui sont largement inclus sur l'image (figure 5.8).

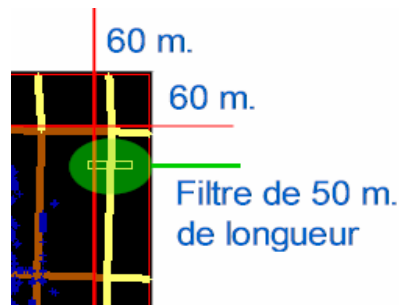


Figure 5.8 :

Erreur de détection en bordure, le filtre n'excède pas le cadre de l'image

Cette situation particulière implique de courts et de très longs segments continus. Dans le cas de courts segments tronqués par la limite de l'image, il est possible que cette coupure du segment ait fait passer le taux de détection sous la limite du 60% pour l'assignation intacte. Cette situation ne s'applique cependant pas aux fausses détections des longs segments. L'analyse des résultats de l'essai effectué sur sa propre référence (section 5.4) confirmerait que ce problème est lié au parcours du filtre et non aux critères de détection. Ces segments en fausse détection sur les bordures du site complet totalisent près de 4 km de distance. Ajoutés aux 29,5 km de détection intact en concordance du tableau V.3, on atteindrait hypothétiquement 92% de détection conforme à la détection visuelle.

Ce rendement est un objectif requérant des traitements plus élaborés s'inspirant des approches des travaux cités au chapitre 1 et repris à la section 5.2.1. Ces recherches font intervenir des opérateurs sophistiqués de bas et haut niveaux avec des résultats sous la barre des 90% de concordance.

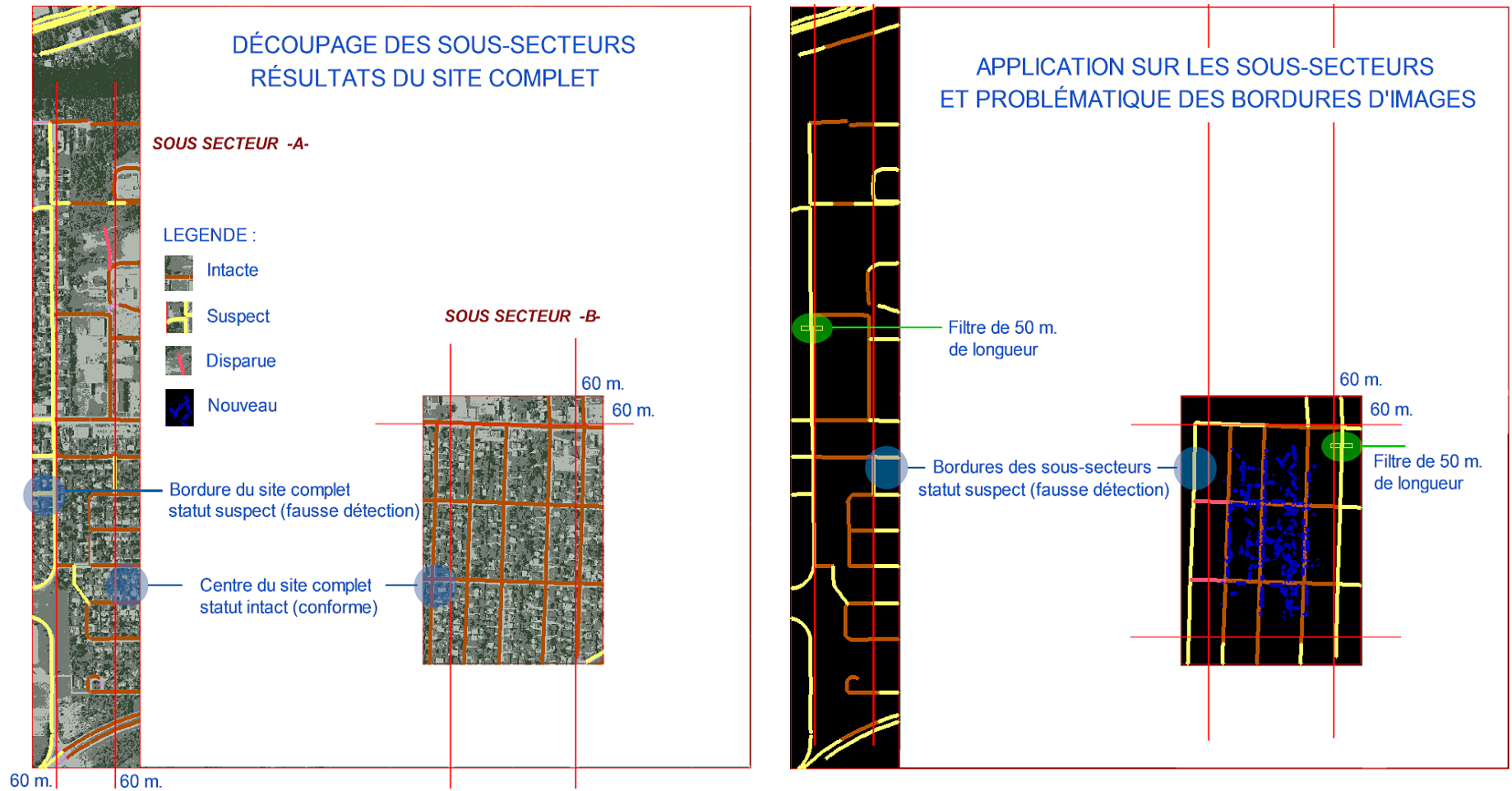


Figure 5.9 : Problème de détection sur les bordures d'images

## 5.4 Test de parcours du filtre par essai sur la cartographie de référence

Ce dernier test, identifié essai numéro 11 au tableau V.1, vise à confirmer l'intégralité du parcours du filtre en remplaçant l'image à haute résolution du terrain par les vecteurs pixelisés de la cartographie 1/20K. En confrontant le déplacement du filtre sur sa propre référence de parcours, nous tenterons d'expliquer et de quantifier le phénomène des segments sans assignation et autres particularités s'il y a lieu. La comparaison avec les résultats de détection visuelle sur l'image ne sera alors pas applicable. L'organigramme de la figure 5.10 nous situe dans le protocole d'essais.

### 5.4.1 Établissement des paramètres de traitement

L'image raster de la référence cartographique est à la même résolution de 84 cm que les images prétraitées. Les paramètres des critères de taille du filtre et de décalages spatiaux sont donc inchangés depuis les valeurs du tableau V.2. À titre de rappel, ils sont énumérés ci-dessous et les relations permettant de les calculer sont détaillées aux sections 2.2.2 et 2.2.3.

**Résolution :** 84 cm

**Taille du filtre :** Longueur x Largeur : 62 x 13 pixels

**Décalages spatiaux :**  $\perp \rightarrow 5$  pixels     $\parallel \rightarrow 35$  pixels

**Nombre de pixels min. pour la poursuite :** 50 pixels

#### **Classification des segments :**

Seuil de classification intacte : Si plus de 60% répondant au  $r_{\min}$

Seuil de classification disparue : Si moins de 30% répondant au  $r_{\min}$

Seuil de classification suspecte : entre 30% et 60% répondant au  $r_{\min}$

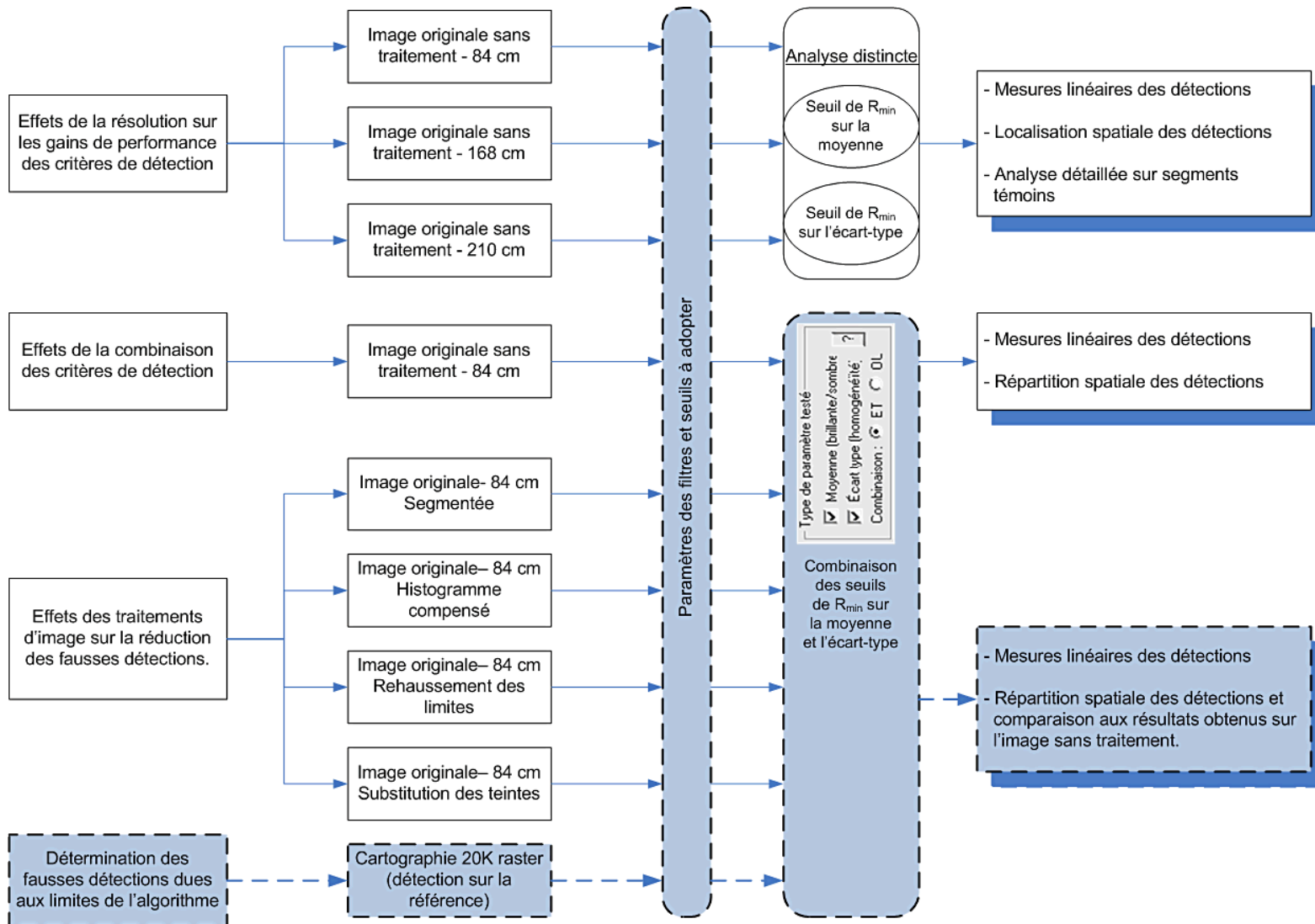


Figure 5.10 : Essai en cours dans la séquence détaillée des essais

Compte tenu du contraste radiométrique entre les routes et leurs bordures, nous allons uniquement utiliser le critère du ratio de moyenne présenté au tableau V.6. On retrouve dans ce tableau deux positions de filtres témoins entraînant des réponses très différentes. Le filtre numéro 2 étant plus contraignant, nous avons opté pour un seuil de 0,40 légèrement inférieur à celui de second filtre témoin afin de s'assurer qu'aucune configuration de route n'altérerait le potentiel de détection intacte.

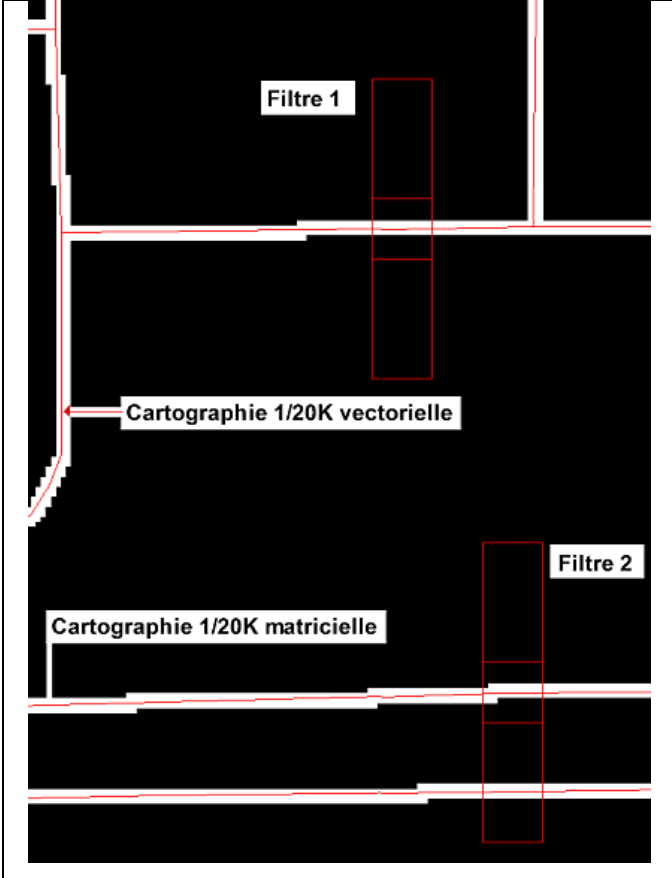
	<b>Localisation des filtres</b>	$\text{Min.} \left[ 1 - \left( \frac{\mu_{\text{bord}}}{\mu_{\text{centre}}} \right) \right]$
	Filtre 1	$1 - \left( \frac{1,0}{67,0} \right) = 0,99$
	Filtre 2	$1 - \left( \frac{34,0}{69,0} \right) = 0,51$

Tableau V.6 : Détermination des seuils sur la cartographie routière format matriciel

#### 5.4.2 Analyse des mesures linéaires détectées (tableau V.7)

Cet ultime essai de la validation d'intégrité du parcours effectué par le filtre de détection sur une version matricielle de la cartographie de référence devrait assigner la totalité des 38,8 km au statut intact. Les résultats présentés au tableau V.7 montrent que seulement 87% soit 33,6 km sont effectivement classés intacts. Les 5,2 km en omission sont constitués de 4,3 km classés suspects, de 100 mètres jugés disparus et de 800 mètres ou 2% de segments sans assignation. Les 7,3 km de nouvelles routes sont des fausses détections puisque l'image ne contient aucun nouveau tracé de route. Nous émettrons une hypothèse d'explication sur l'origine de cette situation à la section 5.4.6.

<b>RÉSULTATS SUR LES VECTEURS DE LA CARTOGRAPHIE 20K            PIXELISÉS - RÉOLUTION DE 84 cm            MESURES LINÉAIRES DÉTECTÉES            - DISTANCES EN CONCORDANCE ET EN OMISSION AVEC LA RÉFÉRENCE</b>				
<b>Distances</b>	DÉTECTION -INTACT- Tout le 20K	DÉTECTION -DOUTE- N/A sur ref. 20K	DÉTECTION -DISPARU- N/A sur ref. 20K	DÉTECTION -NOUVEAU- N/A sur ref. 20K
Contrôle ref. 20K	38,8 km	0,0 km	0,0 km	0,0 km
	Paramètre testé : moyenne (écart-type non applicable à cette image)			
Totale détectée	33,6 km	4,3 km	0,1 km	7,3 km
Fausse détection	0,0 km	4,3 km	0,1 km	7,3 km
Concordance avec la référence	33,6 km (86,6%)	0 km (N/A)	0 km (N/A)	0 km (N/A)
Omission	5,2 km (13,4%)	0 km (N/A)	0 km (N/A)	0 km (N/A)

Tableau V.7 : Combinaison de moyenne ou écart-type sur cartographie 20K raster

### **5.4.3 Analyse de la localisation spatiale**

L'analyse spatiale confirme certains problèmes déjà identifiés, en soulève de nouveaux et offre des pistes d'explications. Le tableau V.7 et la figure 5.11 revisitent la problématique des fausses détections en bordure de l'image (section 5.4, figure 5.9). On retrouve aussi les segments sans assignation qui furent repérés sur l'image segmentée mais définitivement inattendus dans ce cas. La troisième particularité est celle des fausses détections intactes par proximité qui fut sommairement abordée dans l'analyse spatiale du premier essai au chapitre 4, section 4.3.2. Il est permis ici d'établir un lien entre cette dernière problématique et l'emballlement des fausses détections de nouvelles routes sur les images.

### **5.4.4 Analyse de la localisation spatiale : Fausses détections en bordure de l'image**

En ce qui a trait aux fausses détections suspectes et disparues, les résultats de la figure 5.11 appuient les analyses sur la problématique de détection en bordure de l'image (section 5.4 figure 5.9). Spatialement, la totalité des 4,3 km de fausses détections suspectes et disparues sont localisées dans ce cadre de 60 à 65 mètres en périphérie de l'image. Un examen plus détaillé soulève quelques rares cas énigmatiques de détections intactes dans ce cadre au quadrant Nord-Est.



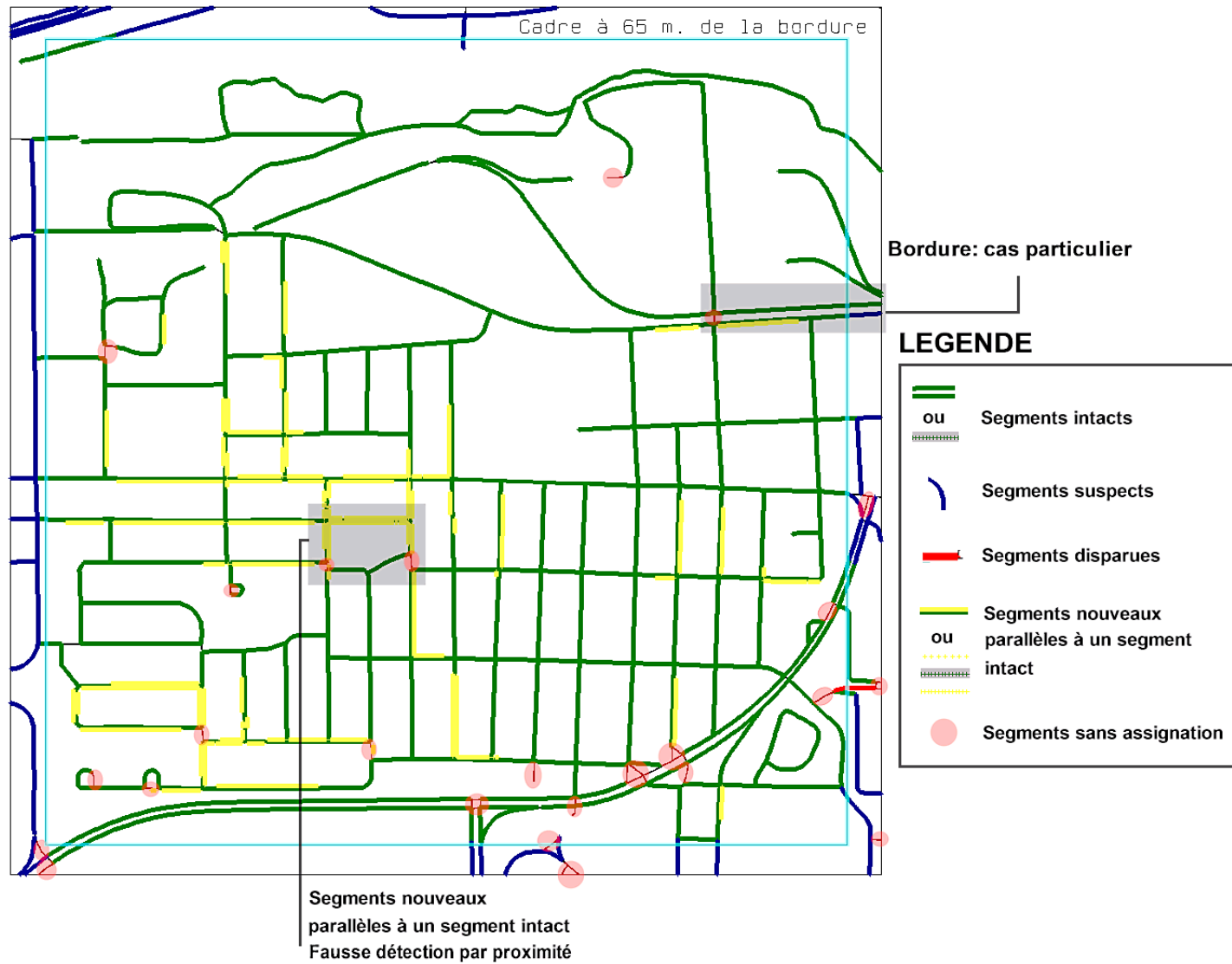


Figure 5.11 : Particularités de détection sur la cartographie matricielle de référence.

La figure 5.12 représente un agrandissement d'une petite zone de trame grise de la figure 5.11 où l'on retrouve deux segments parallèles de longueurs distinctes entre les nœuds ou les intersections identifiés 1 à 4. Le segment entre les nœuds 1-2 d'une longueur de 322 mètres compte 20% de sa longueur dans le cadre en bordure. Celui entre les nœuds 3-4 d'une longueur de 135 mètres compte 48% de sa longueur dans ce cadre. Le premier (1-2) est entièrement assigné intact et le second (3-4) partiellement suspect.

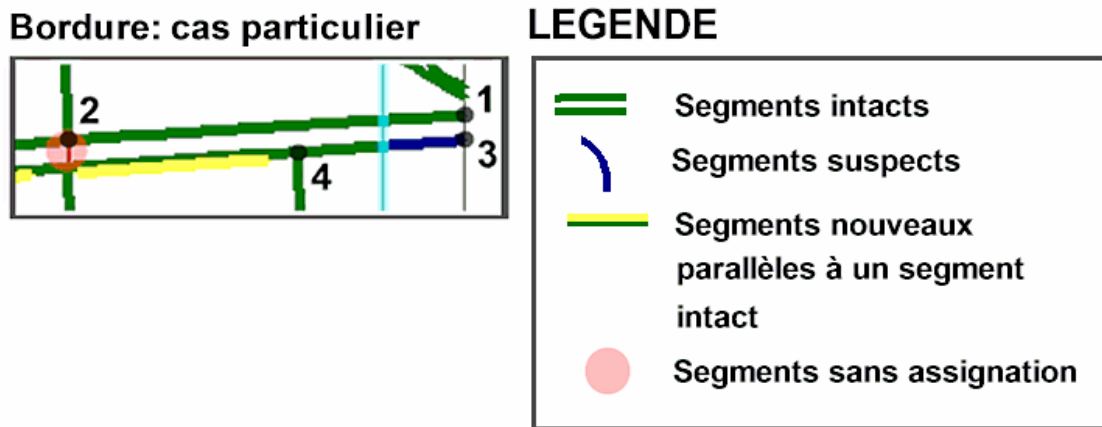


Figure 5.12 : Cas particulier des fausses détections en bordures d'image

Deux autres petits segments au nord de ces derniers segments sont sujets à la même particularité. L'analyse nous dirige vers une réduction drastique et incohérente du paramètre de pourcentage de détection minimal pour l'assignation du statut intact. Si c'est le cas, l'algorithme doit être révisé au niveau de la détermination des débuts et fins de segments dans la base de données topologiques (BDT) puisqu'aucun prétexte lié à la variabilité spectrale ne saurait justifier une assignation non intacte.

#### **5.4.5 Analyse de la localisation spatiale : Segments sans assignation**

Dans un autre ordre d'idées, on retrouve 800 mètres de segments sans assignation. Tel que montré à la figure 5.11 et déjà abordé à la section 4.5.2 (figure 4.13), la majorité d'entre eux sont très courts et plusieurs sont constitués d'arc de courbes prononcées. Il n'y a donc aucun passage du filtre et c'est une fois de plus au niveau de l'établissement des points de début et fin de lignes dans la BDT que le problème se situe. La figure 5.13 contient deux de ces courts segments ignorés par le processus de détection.

#### **5.4.6 Analyse de la localisation spatiale : Fausses détections par proximité**

On termine ce volet d'analyse par les fausses détections de nouvelles routes. En dépit d'un principe de détection à priori pertinent, les résultats furent inexistantes ou tout simplement inexploitable en raison d'un emballement total dans les bruits spectraux. Au fil des traitements d'images, nous avons pourtant réduit sensiblement cette variabilité radiométrique par segmentation, homogénéisation, substitution des teintes et même par extraction d'entités non routières.

L'image matricielle de la cartographie est l'ultime nettoyage des entités non routières. De par la superposition intégrale des vecteurs sur les routes de l'image, toute nouvelle détection est incohérente. La figure 5.13 est l'agrandissement d'une zone de trame grise sur la figure 5.11 qui témoigne de la détection de nouvelles routes parallèlement à des assignations intactes.

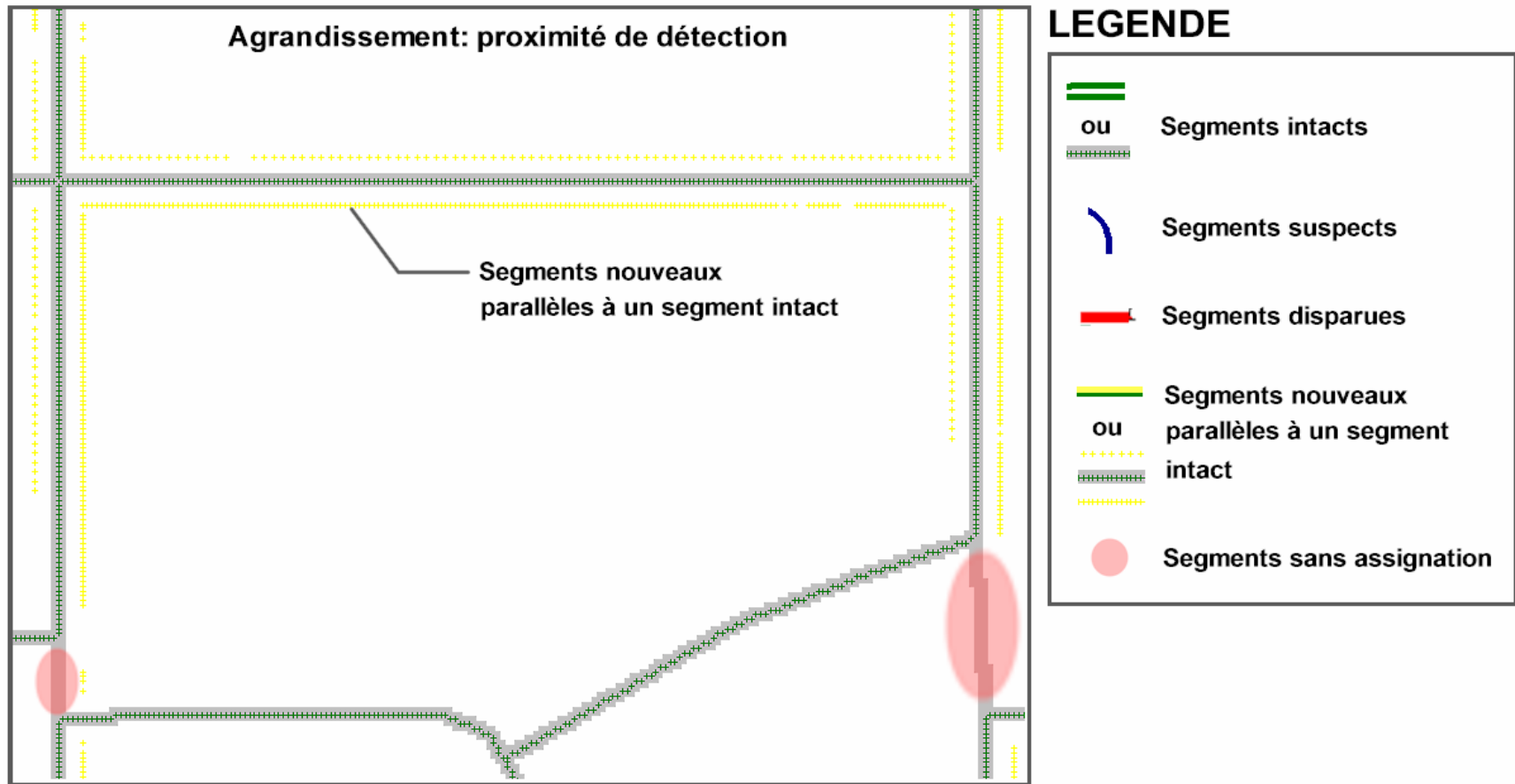


Figure 5.13 : Possibilité de double détection intacte et nouvelle route.

Comment relier ce phénomène des routes parallèles à des assignations intactes aux principes de détection des nouvelles routes (section 2.2.3.2)? Une hypothèse serait que les points de départ potentiels qui initient le protocole de détection des nouvelles routes soient confondus, aux intersections, avec un pixel d'une autre route. De ces points de départ, l'algorithme confondrait la détection d'une route parallèle assignée intacte avec un nouveau segment puisqu'elle se trouve dans la portion centrale du filtre (distance maximale de 5 mètres). La figure 5.14 illustre cette situation qui est sans doute une piste de recherche pour la révision de la programmation. Ce phénomène est aussi présent sur les images à différentes résolutions (chapitre 4). Le problème pourrait être en grande partie résolu en empêchant le filtre de considérer les pixels déjà reconnus comme faisant partie de l'ancien réseau.

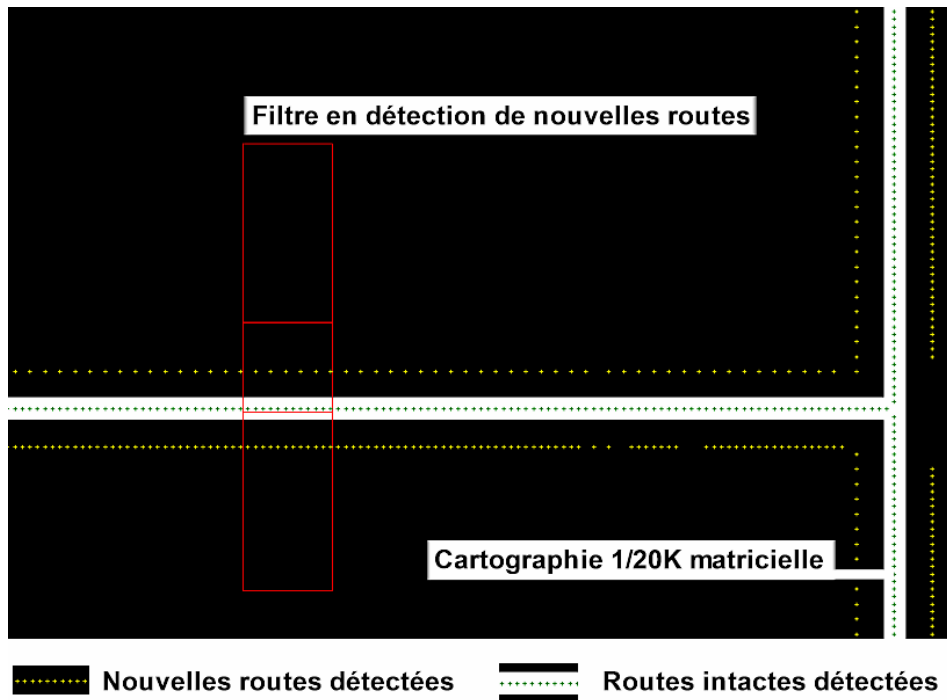


Figure 5.14 : Possibilité de double détection intacte et nouvelle route.

Le chapitre 6 fera un sommaire des résultats en intégrant globalement les constats d'analyse issus des essais aux chapitres 4 et 5. Une conclusion générale après le chapitre 6 complétera ce mémoire.

## **CHAPITRE 6 : Résultats expérimentaux : sommaire et discussion**

Ce chapitre a pour objectif de synthétiser les résultats des essais des chapitres 4 et 5 dans une perspective globale. Les constats d'analyses ouvriront la voie aux recommandations pour l'optimisation de SIGMA-ROUTES. Le chapitre est structuré selon la séquence suivante;

- 1- Sommaire d'analyse sur l'image non rehaussée à différentes résolutions (chapitre 4).
- 2- Sommaire d'analyse sur l'image rehaussée selon différentes approches (chapitre 5).
- 3- Recommandations spécifiques.

### **6.1 Sommaire d'analyse sur l'image non rehaussée à différentes résolutions**

Les critères d'évaluation du rendement furent synthétisés sous trois volets complémentaires : a) mesures linéaires détectées avec distinction des distances en concordance et en omission avec la référence; b) analyse de la répartition spatiale des détections assignées intactes permettant de cibler des caractéristiques communes aux tronçons non identifiés tels que certaines géométries ou connexions entre segments; et c) examen de quelques segments témoins pour la confrontation locale entre l'occupation du sol et la pertinence d'assignation de l'application. Nous avons ainsi identifié des failles dans la séquence de détection. Ces trois volets d'analyse ont confrontés le processus de détection automatisée à la détection par extraction manuelle d'informations sur des images de haute résolution.

### 6.1.1 Taux de détection linéaires

Le tableau VI.2 est une synthèse des résultats de mesures linéaires en concordance ou en omission avec la référence issue d'une extraction visuelle (tableau IV.2 et IV.6). Les essais effectués sur l'image sans traitement à différentes résolutions ont globalement démontré que le taux de détection linéaires des routes existantes (toutes catégories) décroît lors d'une réduction de résolution. En contrepartie, les résolutions plus fines accroissent les fausses détections assignées au statut suspect.

Le critère de la moyenne présente un pourcentage de détection des distances en omission avec la référence nettement supérieur au critère d'écart-type. Le critère de la moyenne, plus performant sur les routes étroites, affiche un gain significatif lors du premier rééchantillonnage de l'image suivi d'une importante chute du rendement à la seconde baisse de résolution. Cette sensibilité à la résolution pourrait être liée à l'accroissement de l'homogénéité contenu dans la portion centrale du filtre (section 4.3). Spécifiquement pour le critère de la moyenne, serait-il possible que le rééchantillonnage ait eu un effet bénéfique jusqu'à une résolution équivalente à la largeur d'un véhicule pour se dégrader rapidement par la suite ? Le tableau VI.1 montre les largeurs d'empreintes de deux berlines types dont la largeur moyenne de 170,6 cm est pratiquement identique à notre résolution charnière de 168 cm pour ce critère.

#### DIMENSIONS

EXTÉRIEUR, mm (po)	Berline
Empattement (A)	2 600 (102,4)
Longueur (B)	4 500 (177,2)
Largeur (C)	1 725 (67,9)

#### DIMENSIONS EXTÉRIEURES, CENTIMÈTRES (POUCES)

Empattement	260,1 cm (102,4 po)
Longueur hors tout	452,4 cm (178,1 po)
Largeur hors tout	168,6 cm (66,4 po)

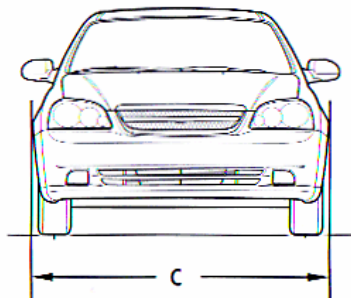


Tableau VI.1 : Dimension d'empreinte sur photo aérienne ou largeur d'une berline type.

<b>MESURES LINÉAIRES DÉTECTÉES – DISTANCES EN CONCORDANCE ET EN OMISSION AVEC LA RÉFÉRENCE</b>												
<b>IMAGE ORIGINALE SANS REHAUSSEMENT</b>												
	<b>DÉTECTION –INTACT-</b>			<b>DÉTECTION –DOUTE-</b>			<b>DÉTECTION – DISPARU-</b>			<b>DÉTECTION – NOUVEAU-</b>		
Paramètre testé	<b>Moyenne</b>											
Résolution d'image	84 cm	168 cm	210 cm	84 cm	168 cm	210 cm	84 cm	168 cm	210 cm	84 cm	168 cm	210 cm
% en concordance	33,5%	43,1%	29,4%	71,4%	0%	85,7%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
% en omission	66,5%	56,9%	70,6%	28,6%	100%	14,3%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Paramètre testé	<b>Écart-type</b>											
% en concordance	53,6%	50,8%	42,9%	71,4%	0%	57,1%	0%	0%	5,6%	0%	0%	6,2%
% en omission	46,3%	49,2%	57,1%	28,6%	100%	42,9%	100%	100%	94,4%	100%	100%	93,8%
Paramètre testé	<b>Combinaison moyenne et écart-type</b>											
% en concordance	71,9%	n/d	n/d	71,4%	n/d	n/d	11,1%	n/d	n/d	0%	n/d	n/d
% en omission	28,1%	n/d	n/d	28,6%	n/d	n/d	88,9%	n/d	n/d	100%	n/d	n/d

Tableau VI.2 : Comparaison du rendement de détection en fonction de la résolution



Le critère d'écart-type, globalement mieux adapté aux résolutions fines, est plus efficace et maintient son rendement sur les catégories de routes plus larges mais génère plus de fausses détections. L'analyse spatiale révèle cependant qu'une baisse de résolution entraîne un fractionnement des longs segments continus détectés par le ratio d'écart-type à résolution plus fine. Une baisse des seuils d'assignation corrigerait cette situation au prix d'une augmentation des fausses détections.

Les deux critères présentent des avantages complémentaires lors de l'application de SIGMA-ROUTES sur des photographies aériennes à haute résolution. Sur notre site au contenu semi-urbain, les résultats du tableau VI.2 démontrent qu'une résolution de l'ordre de 1 mètre combinée à l'utilisation simultanée des deux critères permet une synergie de rendement sur les principales catégories de routes. Une approche complémentaire (en post-détection) de généralisation des assignations des statuts par connectivité entre les segments voisins contribuerait à rendre le résultat plus conforme au processus de détection visuelle (section 4.6.2).

### **6.1.2 Rendement par catégories de routes**

La détection par le filtre des moyennes favorise les routes des catégories "rue" et "chemin" caractérisées par de faibles largeurs et des bordures plus homogènes dans le cas des chemins. La détection par le filtre des écart-types favorise les routes des catégories "collectrice" et "locale". Celles-ci étant plus larges, leurs portions centrales plus homogènes offrent un meilleur contraste avec les bordures dans le filtre. La détection des chemins étroits tels que les sentiers aménagés, les voies piétonnières ou les pistes cyclables est laborieuse en raison de leurs fréquentes discontinuités et de leurs largeurs. Il faut procéder à ces détections distinctement des autres catégories en réduisant la largeur de la portion centrale du filtre à trois mètres.

A titre d'exemple, pour notre résolution de 84 cm, la longueur du filtre passerait de 62 à 18 pixels  $\left( \frac{3 \text{ m}}{0,84 \text{ m/pixel} \times 0,20} \right)$  afin d'assurer une variation radiométrique adéquate entre le centre et les bordures du filtre.

L'analyse détaillée des assignations sur un secteur témoin a révélé certaines faiblesses dans le processus de détection. À la section 4.3.3, figures 4.2 et 4.3, on observe une segmentation excessive entre les assignations intactes, suspectes et disparues. Nous suggérons de rendre l'application plus conforme au processus de détection visuelle par l'ajout de règles d'interprétation basées sur la connectivité et la continuité. La section 4.6.2 et les figures 4.14 et 4.15 décrivent la problématique, démontrent et illustrent ces règles d'interprétation en les appliquant sur le secteur témoin.

### 6.1.3 Détection des nouvelles routes

Le taux de détection des nouvelles routes est un échec quelque soit la résolution ou le critère utilisé. Alors que le critère du ratio de moyennes n'en détecte aucune, le critère de ratio d'écart-types s'emballe en fausses détections devant la variabilité radiométrique des images à haute résolution.

La détection des pixels potentiels de départ et la poursuite de cette recherche sont encadrées par des règles visant à tenir compte des interruptions de détection lorsque la nouvelle route est partiellement invisible (végétation ou autre masque). La valeur de 25 mètres sélectionnée à titre de saut maximum de poursuite de détection semble étonnamment trop forte pour le milieu semi-urbain de notre site. La figure 6.1 nous rappelle les résultats d'essai sur l'image à 210 cm sans rehaussement.

On constate sur cette figure que les plus grands sauts de poursuite de détection sont de l'ordre de 10 à 15 mètres. Cependant, le choix d'une valeur si basse éliminerait aussi bien les fausses détections que les cas véritables de nouveaux segments.

Le second critère complémentaire à la distance maximum des sauts de détection est celui de la distance minimale de détection continue pour éviter d'assigner une entrée asphaltée de propriété ou la longueur d'un toit à titre de route. La valeur de 40 mètres sélectionnée est légitime pour ce site mais elle a aussi possiblement contribué à tolérer le début du parcours de nombreuses fausses détections de nouvelles routes. La réduction de cette valeur court-circuiterait dès le départ plusieurs chaînes de fausses détections mais générerait un grand nombre de petits segments que ce critère visait à éviter. Ce phénomène témoigne de la complexité des interactions entre des règles pertinentes ainsi que de la difficulté à reproduire l'analyse multicritères en simultanée de l'intervention humaine.

Nous pouvons aussi lier cette problématique de fausses détections des nouvelles routes aux détections parallèles à des assignations intactes. Les vecteurs parallèles constituent une amorce à des fausses détections subséquentement alimentées par la présence de bordures de toitures en périphérie. La figure 6.2 compare les fausses détections parallèles du même segment lors du passage sur la cartographie matricielle et sur l'image sans traitement à 168 cm de résolution. On constate que des vecteurs de fausses détections parallèles modifient leur trajet vers des zones non-routières selon les directions du code de Freeman. Pour éviter cette situation, l'image doit subir un prétraitement permettant l'homogénéisation ou même l'extraction d'entités à la source de la confusion radiométrique. C'est une approche citée par certains auteurs.

Image sans traitement - résolution 210 cm - critère d'écart-type



LEGENDE			
	INTACTS		SUSPECTS
	PERDUS		NOUVEAU
	POINTS DE DÉPART DE NOUVELLES ROUTES		
			SAUTS DE DÉTECTION

Figure 6.1 : Fausses détections de nouveaux segments

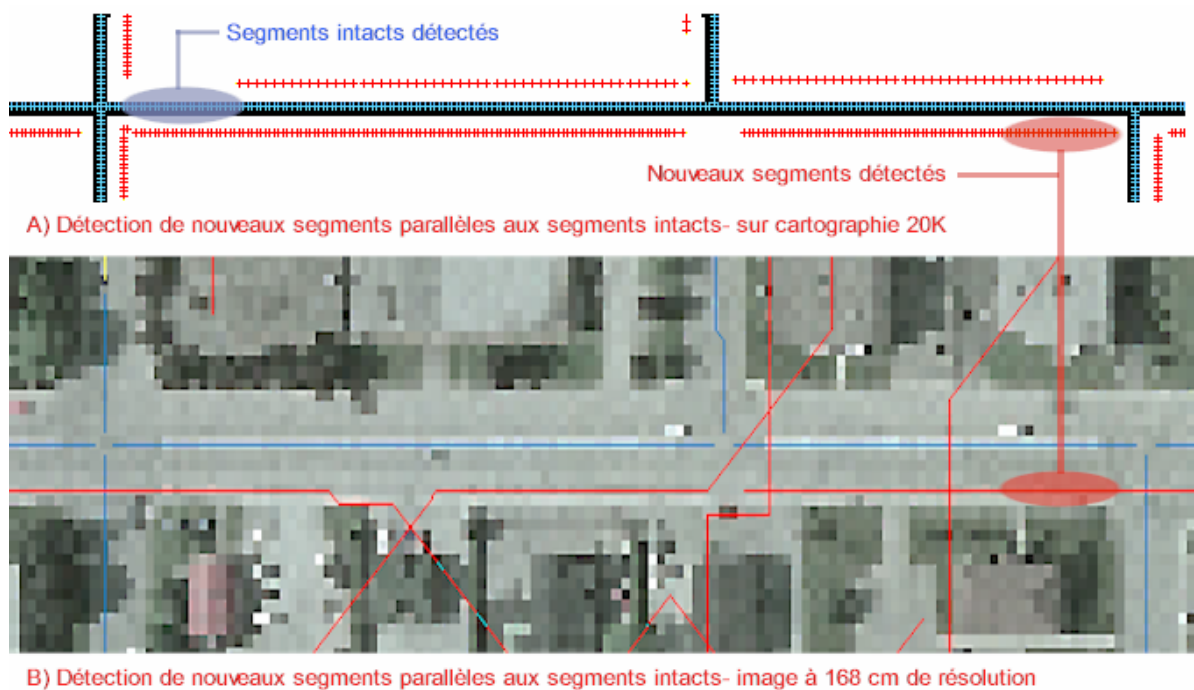


Figure 6.2 : Comparaison de la double détection parallèle sur la cartographie de référence et sur l'image à 168 cm

## 6.2 Sommaire du rendement des traitements d'images

Sans reprendre les détails des analyses de rendement sur chaque traitement, effectuons un sommaire comparatif pour avoir une vue d'ensemble des gains obtenus. Le tableau VI.3 présente une comparaison du rendement de détection en fonction des traitements d'images. Il faut d'abord rappeler que pour isoler l'effet des traitements d'images, nous devons fixer certains paramètres. Pour tous les essais, nous avons :

- Combiné la détection sur les critères de moyenne et d'écart-type afin de bénéficier de la synergie de détection lors du ré-examen des détections suspectes.
- Utilisé seulement la résolution de 84 cm pour ne pas confondre l'effet de la résolution avec celui des traitements d'images.

- Utilisé des dimensions du filtre et des décalages parallèles et perpendiculaires conformes aux règles de calcul stipulées à la section 2.2.2.
- Utilisé des % de détection identiques pour l'assignation des statuts et établir les seuils de  $r_{\min}$  en référence aux particularités d'images telles que décrites à la section 3.5.4 tableau III.9.

### 6.2.1 Traitement de segmentation

La segmentation agit en quelque sorte comme un rééchantillonnage à une résolution plus grossière sans la distorsion géométrique des entités. Elle réduit la variabilité spectrale et homogénéise la texture des voies de communication. Le critère des variations de moyennes est favorisé et la variation d'écart-type bénéficie de l'homogénéisation des routes par rapport au voisinage. C'est donc un gain sur toutes les catégories de routes mais particulièrement sur les routes plus étroites.

Le taux des assignations intactes conformes à la détection visuelle atteint 75% et grimperait à 89% après correction de la problématique de détection en bordure de l'image et des segments sans assignation. Les fausses détections sont essentiellement les voies ferrées dont les signatures spectrales sont distinctives des autres routes et chemins. Ces dernières devraient être sur un canal de l'image de voies exclues pour être reprises avec des paramètres de détection plus appropriés. C'est donc globalement un traitement qui offre un gain significatif par rapport à l'image originale.

<b>MESURES LINÉAIRES DÉTECTÉES – DISTANCES EN CONCORDANCE ET EN OMISSION AVEC LA RÉFÉRENCE</b> <b>IMAGE À RÉOLUTION DE 84 cm REHAUSSÉE PAR LES TRAITEMENTS CI-DESSOUS</b> Traitement 1 : segmentation d'image Traitement 2 : histogramme compensé Traitement 3 : masque d'extraction et substitution de teintes Traitement 4 : vecteurs de cartographie routière 1/20K format raster* * Donnée de référence convertit en image. Non lié à un traitement de rehaussement.																
	DÉTECTION –INTACT-				DÉTECTION –DOUTE-				DÉTECTION –DISPARU-				DÉTECTION –NOUVEAU-			
Traitement d'image	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
% en concordance	77,5%	74,4%	73,9%	86,6%	0%	85,7%	85,7%	n/d	11,1%	5,6%	0%	n/d	0%	0%	0%	n/d
% en omission	22,5%	25,6%	26,1%	13,4%	100%	14,3%	14,3%	n/d	88,9%	94,6%	100%	n/d	100%	100%	100%	n/d

Tableau VI.3 : Comparaison du rendement de détection en fonction des traitements d'images

### **6.2.2 Traitement par compensation d'histogramme**

Ce traitement vise à rehausser les voies de communications tout en étalant les valeurs spectrales dans les portions adjacentes du filtre de détection. Le taux de détection intacts fut de 78% mais passerait à 92% en ignorant le problème en bordure de l'image. Les sentiers et chemins étroits font cependant l'objet d'une assignation intacte trop "enthousiaste" par rapport au processus de détection visuelle qui assignerait un statut de doute dans plusieurs cas. Pour les routes locales et les voies plus larges, il permet le meilleur transfert des fausses détections disparues vers le statut intact ou suspect. C'est donc globalement un traitement performant qui s'avère parfois peu nuancé et nous semble complémentaire aux résultats obtenus avec l'image segmentée.

### **6.2.3 Traitement par rehaussement des limites et harmonisation des teintes**

Le rehaussement des limites et l'harmonisation des teintes accroît l'homogénéité des valeurs des pixels de la chaussée et rehausse le contraste des bordures de la route. Il vise à favoriser une détection franche en accentuant les écarts entre les différentes portions du filtre (centrale et latérales). Les résultats affichent cependant un rendement équivalent et même légèrement inférieur à l'unique segmentation. Ce sous-rendement est partiellement dû à la couverture de la portion centrale du filtre qui inclut les limites rehaussées lorsqu'il est appliqué sur les chemins étroits. Pour ces derniers, les dimensions du filtre n'exploitent pas efficacement les modifications apportées à l'image. Ce phénomène, non exclusif au produit de ce traitement, fut souligné et illustré lors de l'analyse des résultats à la section 5.2. De plus, l'apport d'harmonisation des teintes des revêtements routiers ne propose pas de gain significatif par rapport à l'image segmentée. Ce traitement ne constitue pas une préparation d'image bénéfique pour l'application de SIGMA-ROUTES.



#### **6.2.4 Traitement par substitution des teintes et masque d'extraction**

La substitution des teintes cible les pixels de la chaussée afin de leur assigner une valeur unique. Par différenciation avec le revêtement asphalté unifié, le masque d'extraction repère et extrait la majorité des entités non-routières. Sans reprendre l'analyse détaillée, soulignons que la difficulté se situe au niveau du ciblage des caractéristiques spectrales des revêtements asphaltés dont l'état varie. Le fait d'effectuer ce traitement en post-segmentation est essentiel puisqu'une certaine homogénéisation des textures est déjà effectuée. Le dosage de la tolérance de sélection est délicat alors qu'un spectre trop large substituera l'asphalte, les toitures et le gravier sans discernement. Il faut donc être plus spécifique au risque de perdre les sentiers, chemins et quelques routes étroites dans le masque d'extraction.

Avec un taux de détection intact conforme à la détection visuelle équivalent à la segmentation en incluant les fausses détections en bordure de l'image, ce traitement devrait être considéré à titre de confirmation efficace pour certaines catégories de voies de communication.

#### **6.2.5 Problèmes de détection confirmés par le test sur une image de la référence cartographique**

Quelque soit l'efficacité du prétraitement d'image, il ne peut surpasser le test de détection sur une version image des vecteurs cartographiques devant être parcourus intégralement par le filtre de détection. Indépendamment des propriétés d'images, ce test nous informe sur le rendement maximal de SIGMA-ROUTES en tenant compte des problèmes inhérents à l'algorithme de détection.

Le premier problème fut celui des fausses détections en bordures de l'image observée lors de la série d'essais relatifs à l'impact de la résolution et l'efficacité des critères de détection. Nous avons alors regroupé des fausses détections qui défiaient toute justification technique en lien aux paramètres de détection. Elles représentent 11,3% de la longueur totale des voies de communication sur notre site test (tableau III.4). L'application à l'ensemble de la photo aérienne no 129-031 (annexe 1) porte cette détection problématique à 7,7% (14,6 km en bordure sur 190,4 km au total). Il faudrait donc effectuer la détection sur les photographies adjacentes présentant un recouvrement pour compléter la solution.

Le second problème est celui des segments sans assignation non parcourus par le filtre de détection (figure 6.3). Ce phénomène fut d'abord noté lors du test de combinaison des critères sur l'image sans traitement (section 4.5). L'essai sur l'image de la cartographie de référence a permis de quantifier ces non-détections à 2.0% de la longueur totale des voies de communication sur notre site test. Dans le cas des routes existantes, nous éprouvons ainsi des difficultés sur un total de 13,3% du réseau. La révision de l'algorithme devrait corriger cette situation.



Figure 6.3 : Segments non parcourus par le filtre de détection

Le troisième problème est celui des nouvelles routes. Les nombreuses fausses détections de nouvelles routes parallèles à des assignations intactes seraient possiblement des amorces à l'emballage subséquent en régions non-routières. Une correction de ce problème permettrait de mieux exploiter ce volet fondamental de l'outil qu'est la mise à jour du réseau existant. D'excellentes performances sur les routes existantes sont à prévoir en jumelant certains traitements préparatoires aux corrections d'algorithme. Le traitement apportant un gain le plus significatif est la segmentation alors que la compensation d'histogramme et la substitution de teintes avec extraction par masque proposent quelques gains ciblés et complémentaires à la segmentation. Les résultats obtenus en lien avec les réponses du filtre suite aux modifications radiométriques issues des rehaussements devraient permettre d'élaborer des prétraitements d'images plus performants.

### **6.3 Recommandations**

Un opérateur qui exécute une numérisation à partir d'images couleurs à haute résolution filtre simultanément beaucoup d'informations pour mettre l'accent sur le réseau de communication. La simulation de ce processus de détection visuelle dans le cadre d'une détection automatisée implique le suivi de règles et de conditions par un algorithme sans totalement exclure l'intervention humaine à quelques phases charnières du processus. Il en va de la conformité du résultat dans une approche de contrôle qualité en cours de production.

En ce sens, nous proposons une telle procédure à la figure 6.4 sur la base des résultats d'essais des chapitres 4 et 5. Cette approche utilise différentes sources de données complémentaires pouvant faire l'objet de rehaussement dans le but d'exploiter les performances de l'application résumées aux sections 6.1 et 6.2. L'organigramme de la figure 6.4 sera décrit aux sections subséquentes.

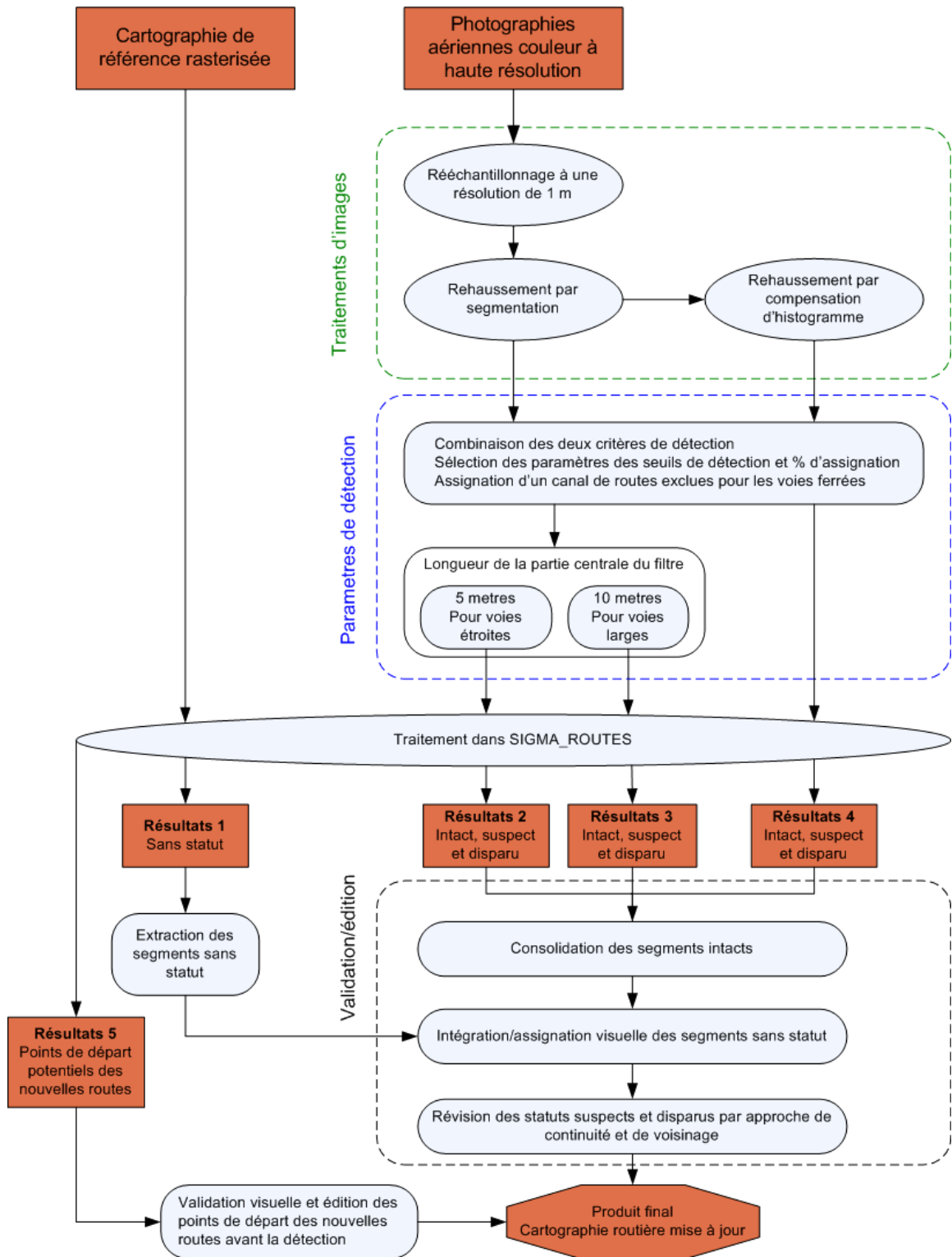


Figure 6.4 : Procédure de détection automatisée avec intervention humaine spécifique

### **6.3.1 Principales phases de la procédure et données de base**

Le processus de la figure 6.4 implique trois grandes phases soient 1) le traitement des images, 2) le choix des paramètres de détection et 3) la validation avec édition afin de consolider l'ensemble des résultats en un produit final. Les données d'entrées incluent les photographies aériennes à haute résolution ainsi que la cartographie de référence en format raster qui constitue un élément de contrôle d'intégrité du parcours du filtre. Ce dernier demeure pertinent en dépit des corrections éventuelles au processus de génération de la base de données topologiques (BDT) à l'origine du problème des segments sans assignation.

Les traitements d'images visent à préparer des fichiers d'entrées prédisposés à offrir des résultats complémentaires lorsque jumelés à des paramètres de détection judicieux. Au premier plan de ces paramètres, on retrouve la dimension des portions du filtre qui affecte directement le rendement de détection selon le type de route. La dernière phase de validation avec édition est en mode semi-automatique et fait intervenir un opérateur pour la validation et certaines assignations. Chacune de ces trois phases sont subséquentement détaillées.

### **6.3.2 Traitements d'images**

Le premier traitement d'image consiste en un rééchantillonnage à une résolution de l'ordre de 1 mètre. Cette résolution précède le point de bascule du rendement selon le critère de moyenne alors que le critère d'écart-type s'acquiert efficacement des résolutions aussi fines. Les images issues du rehaussement par segmentation et compensation d'histogramme ont apporté un gain significatif et complémentaire sur différentes catégories de routes (section 6.2.2). La consolidation des résultats intacts de ces deux sources devrait améliorer le taux en concordance avec la référence.

### **6.3.3 Paramètres de détection**

Les essais du chapitre 4 ont démontré que la synergie de détection par combinaison des critères de ratio des moyennes et celui des écart-types allait au-delà de la sommation des rendements effectifs de chacun. Les seuils de détection du filtre et les taux d'assignation doivent être adaptés au type d'occupation du sol mais la dimension du filtre a un impact en amont de ces paramètres. La possibilité de modifier la longueur du filtre en paramétrant distinctement ses portions centrale et latérales permettrait de s'adapter aux catégories de routes en s'assurant que la portion centrale n'inclut aucune entité en bordure de la route. On maximiserait ainsi les ratios entre les portions du filtre pour tous les critères. Les résultats identifiés 2 et 3 sur la figure 6.4 cibleraient donc respectivement les voies plus étroites et plus larges.

L'analyse spatiale a révélé que les voies ferrées comptent pour 78% des fausses détections dans la catégorie intacte. Dans un contexte opérationnel visant à détecter strictement les éléments du réseau routier, il serait pertinent d'ajouter les voies ferrées dans le canal image des lignes exclues.

### **6.3.4 Validation et édition assistées par un opérateur**

Le début de cette grande phase est une consolidation des segments intacts complémentaires issus des résultats intermédiaires 2, 3 et 4 (figure 6.4), fruits de la photographie aérienne prétraitée. En se fiant aux résultats des essais, on devrait atteindre un pourcentage de concordance de l'ordre de 78-80%. La seconde étape de cette phase cible les segments sans assignation en mode semi-automatique. Le résultat intermédiaire 1 réalisé sur la cartographie de référence en format raster est exempt des interactions radiométriques avec le contenu d'une image et permet de repérer les segments absents de la base de

données topologiques. Tel que mentionné à la section 6.2.5, ces non-détections qui représentent 2.0% de la longueur totale des voies de communication sur notre site test se verraient assignées un statut par l'opérateur.

La troisième étape est un processus automatique en deux temps qui met à profit les règles actuelles de révision des segments suspects en combinaison avec un nouveau module de révision basé sur des règles de connectivité et de continuité explicitées à la section 4.6.2. En principe, l'algorithme procède à une révision des segments suspects dont la taille est supérieure à 20 pixels. Ils devraient être divisés en deux et retraités dans le but de lever les ambiguïtés et d'avoir un maximum de pixels classés intacts ou disparus. Cette règle pertinente ne semble cependant pas systématiquement appliquée. Lors de nos analyses spatiales, plusieurs segments suspects de cette taille auraient dus être divisés avec réassignations franches aux statuts intacts ou disparus. La révision de l'algorithme conformément à ce principe produirait un résultat intermédiaire segmenté pouvant être ensuite raffiné par généralisation basée sur la connectivité entre petits segments disparus et suspects.

Le processus génère de nombreux petits segments intacts entrecoupés de segments disparus en raison des zones masquées par la présence de végétation ou d'ombres. Ce résultat intermédiaire segmenté ouvrirait la voie à un raffinement par généralisation basée sur la connectivité entre petits segments disparues et suspects. Ce nouveau module de révision post-détection ciblerait les segments disparus. Pour maintenir ce statut, le segment devrait être connecté à deux segments disparus sinon il sera réassigné à l'étiquette de ces voisins. Lorsqu'un de ces voisins est intact, il devient prioritairement intact. Cette règle repose sur la forte probabilité que le bris de continuité sur une si petite distance est tributaire d'un ombrage ou autres particularités locales.

Une révision des segments suspects fait suite avec la possibilité de réassignation au statut intact en cas de connections à deux segments intacts, sinon il demeure suspect. L'organigramme de la figure 4.14 (section 4.6.2) schématise ce principe alors que la figure 4.15 présente une simulation de ce principe de connectivité sur un segment témoin. Une telle approche réduirait drastiquement le taux de fausses assignations disparues.

### **6.3.5 Traitement particulier pour les nouvelles routes**

Les essais ont mis en évidence deux grandes catégories de fausses détection de nouvelles routes à savoir 1) les vecteurs parallèles à grande proximité des routes existantes 2) l'embrassement de propagation multidirectionnelle de nouvelles routes en zone non-routière. Une très grande proportion de ces cas serait évitée par une validation ou un filtrage visuel des points de départ identifiés. Ainsi, le résultat intermédiaire 5 de la figure 6.4 représente les points de départ repérés par l'application (exemple à la figure 6.3). Ces positions seraient clairement étiquetées sur l'image afin qu'un opérateur procède à une édition visuelle en ne conservant que les cas réels. Après cette pause de contrôle qualité, le processus automatique reprendrait la poursuite de la détection.

Un raffinement de ce processus automatique impliquerait l'ajout de nouvelles règles empêchant le filtre de considérer les pixels déjà reconnus comme faisant partie de l'ancien réseau. Une option consisterait au rejet des détections de nouveaux segments lorsque ceux-ci sont à une faible distance latérale d'une route existante. Cette distance serait équivalente à la longueur de la portion centrale du filtre. On éliminerait ainsi les fausses détections de nouvelles routes en parallèle à celles déjà assignées intactes (figure 5.14).



## CONCLUSION

Cette recherche visait à examiner l'applicabilité du progiciel SIGMA-ROUTES sur des photographies aériennes à très haute résolution spatiale. Ce progiciel est dédié à la détection du réseau routier et de ses mises à jour dans la base de données topographiques du Québec à partir d'images optiques et radar. Pour ce faire, nous avons fixé deux objectifs spécifiques. Le premier faisait référence à l'incidence de la résolution et des prétraitements d'images sur le taux et les critères de détection en conformité avec le produit issu de la détection visuelle. Le second objectif était de proposer des adaptations à partir du rendement effectif mesuré.

En ce qui a trait au premier objectif, les essais réalisés au chapitre 4 ont démontré que la synergie de détection par combinaison des critères de ratio des moyennes et celui des écarts-types allait au-delà de la sommation des rendements effectifs de chacun. De plus, les critères ont un effet distinct sur certaines catégories de routes. En ce sens, nous constatons qu'une résolution de l'ordre de 1 mètre permet de consolider le rendement du critère des moyennes sur les voies plus étroites avec l'efficacité du critère des écarts-types sur les voies plus larges dans un contexte radiométrique complexe. Concernant les traitements d'accentuation d'images, celles issues du rehaussement par segmentation et compensation d'histogramme ont apportés un gain significatif et complémentaire sur différentes catégories de routes. Le chapitre 5 présente les résultats détaillés.

Le second objectif soit celui de proposer des adaptations à partir du rendement effectif mesuré nous a conduits à identifier certaines incohérences dans le processus de détection telles qu'un parcours incomplet du filtre, une séquence de ré-examen des segments suspects non systématique ainsi qu'une détection systématiquement déficiente en bordure de l'image. La détection des routes existantes devrait atteindre 90% de succès en extrapolant les résultats sur la base des recommandations d'adaptations et de corrections. Le repérage des nouvelles routes est cependant un échec alors qu'il y a présence de nombreuses fausses détections de nouvelles routes en parallèle à celles déjà assignées intactes. La procédure suggérée à la section 6.3 pourrait réduire substantiellement les fausses détections de nouvelles routes.

Le cadre général de cette procédure fait une place importante aux prétraitements dans le but d'optimiser la suite du processus. En ce sens, l'approche de la classification de l'image préalable à l'analyse pourrait offrir un rendement supérieur pour la révision et la détection des nouveaux segments. Comme les images à haute résolution aéroportées ou satellitales possèdent au moins trois bandes spectrales, un tel traitement offrirait une carte de matériaux de couverture du sol. Cette carte pourrait être par la suite traitée pour former des entités polygonales. Les analyses de forme de ces entités (compacité, indice d'élongation, etc.) pourraient offrir des critères complémentaires à ceux présentés ici pour réduire les fausses alarmes, particulièrement dans le cas de détection des nouvelles routes. À titre d'exemple, la présence d'une entité polygonale compacte couverte du même type de matériau qu'une chaussée signifiera une toiture de bâtiment ou un terrain de stationnement. Ainsi la recherche d'une nouvelle route s'arrêtera avant que l'algorithme « s'emballe » comme ce fut le cas ici. Bien que cela n'ait pas été considérée dans cette recherche, c'est une avenue à explorer

## Bibliographie

- Adair, M., Guindon, B.**, (1990), Statistical Edge detection operators for linear feature extraction in SAR images. *Canadian journal of Remote Sensing*, 16(2): 10-19.
- Amini, A., Weymouth, T., Jain, R.**, (1990), Using dynamic programming for solving variational problems in vision. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, 12: 855–867.
- Armenakis, C., Savopol, F.**, (1998), Mapping potential of the IRS-1C Pan satellite imagery. *IAPRS, GIS-Between Visions and Applications*, 32(4): 23-26.
- Bajcsy, R., Tavakoli, M.**, (1976), Computer Recognition of Roads from Satellite Pictures. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 6 (9): 623-637.
- Benjamin, S., Gaydos, L.**, (1990), Spatial resolution requirements for automated cartographic road extraction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(1): 93-100.
- Dal Poz, A.P., Agouris, P.**, (2000b), Georeferenced road extraction and formulation of hypotheses for new road segments. In: Roper, W.E., Hamilton, M.K. (Eds.), *Automated Geospatial Image and Data Exploitation, Proc. SPIE*, 4054: 56–65.
- Dal Poz, A.P., Do Vale, G.M.**, (2003), Dynamic programming approach for semi-automated road extraction from medium and high-resolution images. *ISPRS Archives*, 34(3-W8):87-91.

- Deschenes, F., Ziou, D., Auclair-Fortier, M.-F.**, (2004), Detection of lines, line junctions and line terminations. *International Journal of Remote Sensing*, 25(3): 511-535.
- Faber, A., Forstner, W.**, (1999), Scale characteristics of local autocovariances for texture segmentation. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing*, 32 (Part 7-4-3 W6): 7 p.
- Fischler, M.A., Tenenbaum, J.M., Wolf, H.C.**, (1981), Detection of roads and linear structures in low resolution aerial imagery using multi-source knowledge integration technique. *Comput. Graph. Image Process*, 15: 201–223.
- Fiset, R., Cavayas, F.**, (1997), Automatic comparison of a topographic map with remotely sensed images in a map updating perspective: the road network case. *International Journal of Remote Sensing*, 18(4): 991-1006
- Fiset, R., Cavayas, F., Mouchot, M-C., Solaiman, B., Desjardins, R.**, (1998), Map-image matching using a multi-layer perceptron: the case of the road network. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 53: 76-84.
- Gao, J., Wu, L.**, (2003), Automatic extraction of road networks in urban areas from Ikonos imagery based on spatial reasoning. *Congrès ISPRS*, URL: <http://www.cartesia.org/geodoc/isprs2004/comm3/papers/290.pdf>
- Geman, D., Jedynak, B.**, (1996), An Active Testing Model for Tracking Roads in Satellite Images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 18(1): 1-14.
- Gruen, A., Li, H.**, (1997), Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-Snakes. *Photogrammet. Eng. Remote Sensing*, 63: 985–995.

- Hinz, S., Baumgartner, A., Mayer, H., Wiedemann, C., Ebner, H.,** (2001), Road Extraction Focussing on Urban Areas. *Baltsavias, Grün, van Gool (eds.), Balkema Publishers, Rotterdam* : 255 - 265.
- Kass, M., Witkin, A., Terzopoulos, D.,** (1987), Snakes: Active contour models. *Internat. J. Comput. Vis.*, 321–331.
- Katartzis, A., Sahli, H., Pizurica, V., Cornelis, J.,** (2001), A model based approach to the automatic extraction of linear features from airborne images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 39 (9): 2073–2079.
- Keaton, T., Brokish, J.,**(2002), A Level Set Method for the Extraction of Roads from Multispectral Imagery. *Proceedings of the 31<sup>st</sup> Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR-02)*.
- Klang, D.,** (1998), Automatic detection of changes in road databases using satellite imagery. *ISPRS Commission IV Symposium on GIS-Between Visions and Applications*, 32(4): 293-298.
- Laptev, I., Mayer, H., Lindeberg, T., Eckstein, W., Steger, C., Baumgartner, A.,** (2000), Automatic extraction of roads from aerial images based on scale space and snakes. *Machine Vision Application*, 12 (1): 23–31.
- Li, X., Qiao, Y., Yi, W., Guo, Z.,** (2003), The Research of Road Extraction for High Resolution Satellite Image. *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '03)*, 6: 3949-3951.
- Long, H., Zhao, Z.,** (2005), Urban road extraction from high-resolution optical satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 26(22): 4907-4921.

- Lu, D., Mausel, P., Brondizio, E., Moran, E.,** (2003), Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12): 2375-2407.
- Maillard, P., Cavayas, F.,** (1989), Automatic map-guided extraction of roads from SPOT imagery for cartographic database updating. *International Journal of Remote Sensing*, 10(11): 1775-1787.
- Mayer, H., Laptev, I., Baumgartner, A., Steger, C.,** (1997), Automatic road extraction based on multi-scale modeling, context and snakes. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing*, 32(3-2W3): 106–113.
- Mena, J.B.,** (2003), State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification. *Elsevier B.V., Pattern Recognition Letters*, 24: 3037–3058.
- Mena, J.B., Malpica, J.A.,** (2005), An automatic method for road extraction in rural and semi-urban areas starting from high resolution satellite imagery. *Elsevier B.V., Pattern Recognition Letters*, 26: 1201-1220.
- Mohammadzadeh, A., Tavakoli, A., Valadan Zoej, M.J.,** (2002), Automatic linear feature extraction of Iranian roads from high resolution multi-spectral satellite imagery. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Istanbul.
- Mokhtarzade, M., Valadan Zoej, M.J., Ebadi, H.,** (2008), Automatic road extraction from high resolution satellite images using neural networks, texture analysis, fuzzy clustering and genetic algorithms. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B3b): 549-555.

- Péteri, R., Celle, J., Ranchin, T.**, (2003), Detection and extraction of road networks from high resolution satellite images. *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'03)*, 1: 301-304.
- Péteri, R., Ranchin, T.**, (2004), Multiresolution Snakes for urban road extraction from Ikonos and Quickbird images. *In Proceedings of the 23rd EARSeL Symposium Remote Sensing in Transition*, Rudi Goossens editor, Millpress, Rotterdam, ISBN 90 5966 007 2 : 69-76.
- Price, K.**,(1999), Road Grid Extrapolation and Verification. *USC Computer Vision, ISPRS GIS99*: 101-106
- Ruskoné, R., Airault, S.**, (1997), Toward an automatic extraction of the road network by local interpretation of the scene. *In: 46th Photogrammet Week*, Stuttgart.
- Sae-Ui, P.** (2003). *Topographic map model feature recognition*, M.Sc. in Informatics, Division of Informatics, University of Edinburgh, 76 pages.
- Shackelford, A.K., Davis, C.H.**, (2003), Fully Automated Road Network Extraction from High-Resolution Satellite Multispectral Imagery. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '03, Proceedings. 2003 IEEE International* , 1: 461-463.
- Shi, W., Zhu, C.**, (2002), The line segment match method for extracting road network from high-resolution satellite images. *IEEE Trans. Geosciences. Remote Sensing*, 40(2): 511–514.
- Stoica, R., Descombes, X., Zerubia, J.**, (2000), Extraction des routes dans les images aériennes et satellitales utilisant un processus ponctuel de Markov. *Project ARIANA, Rapport de recherche de l'INRIA 3923*.

- Synetix**, (2007), Adaptation du logiciel SIGMA<sup>0</sup> aux besoins de détection de changements et de mise à jour cartographique à l'échelle de 1/20 000. *Rapport technique CSA-CR, Programme de développement d'applications en observation de la Terre, Agence Spatiale Canadienne*, 176 pages.
- Takru, K., Bretschneider, T.R., Leedham, C.G.**, (2004), Unsupervised detection of roads in high resolution panchromatic satellite images. *Proceedings of the International Workshop Advanced Image Technology (IWAIT-2004)*.
- Tupin, F., Maitre, H., Mangin, J.F., Nicolas J.M., Pechersky, E.**, (1998), Detection of Linear Features in SAR Images: Application to Road Network Extraction. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 36(2): 434-452.
- Umbagh S. E.**, (2010), Digital Image Processing and Analysis: Human and Computer Vision Applications with CVIptools, Second Edition, CRC Press, 977p.
- Van Cleynenbreugel, I., Fierens, F., Suetens, P., Oosterlinck, A.**, (1990), Delineating Road Structures on Satellite Imagery by a GIS-Guided Technique. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56(6): 893-898.
- Wang, A., Wang, S., Lucieer A.**, (2010), Segmentation of multispectral high-resolution satellite imagery based on integrated feature distributions. *International Journal of Remote Sensing*, 31(6), 1471-1483
- Wiedemann, C., Hinz, S.**, (1999), Automatic Extraction and Evaluation of Road Networks from Satellite Imagery. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32(3-2W5): 95-100.



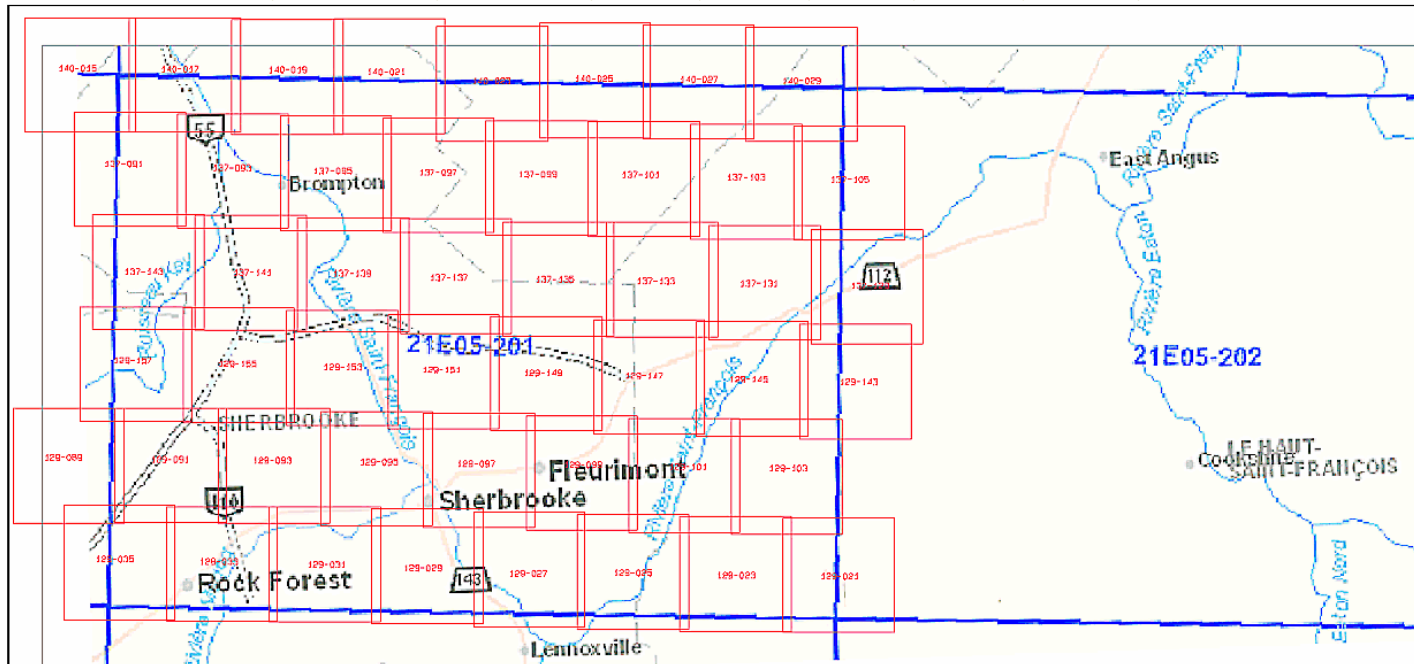
- Yan, D., Zhao, Z.,** (2003), Road Detection from Quickbird Fused Image Using IHS Transform and Morphology. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '03. Proceedings. IEEE International*, (6): 3967-3969
- Yoon, T., Park, W., Kim, T.,** (2002), Semiautomatic road extraction from IKONOS satellite image. *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology*, Proc. SPIE, 4545: 320–328.
- Zhang, C.,** (2004), Towards an operational system for automated updating of road databases by integration of imagery and geodata. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 58: 166-186.
- Zhang, Q., Wang, J., Peng, X., Gong, P. Shi, P.,** (2002), Urban Built-up land change detection with road density and spectral information from multi-temporal Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (15): 3057–3078
- Zhang, Q., Couloigner, I.,** (2004), Automatic road change detection and GIS updating from high spatial remotely-sensed imagery. *Geo-spatial Information Science*, 7(2): 89-95.
- Zhang, Q., Couloigner, I.,** (2006), Automated road network extraction from high resolution multi-spectral imagery. *ASPRS 2006 Annual Conference*.
- Zhang, Q.,** (2006), Automated road network extraction from high resolution multi-spectral imagery. *Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Geomatics Engineering, Calgary, Alberta, Canada.*

# ANNEXE 1 : Couverture aérienne et limites du feuillet 21E05-200-0201



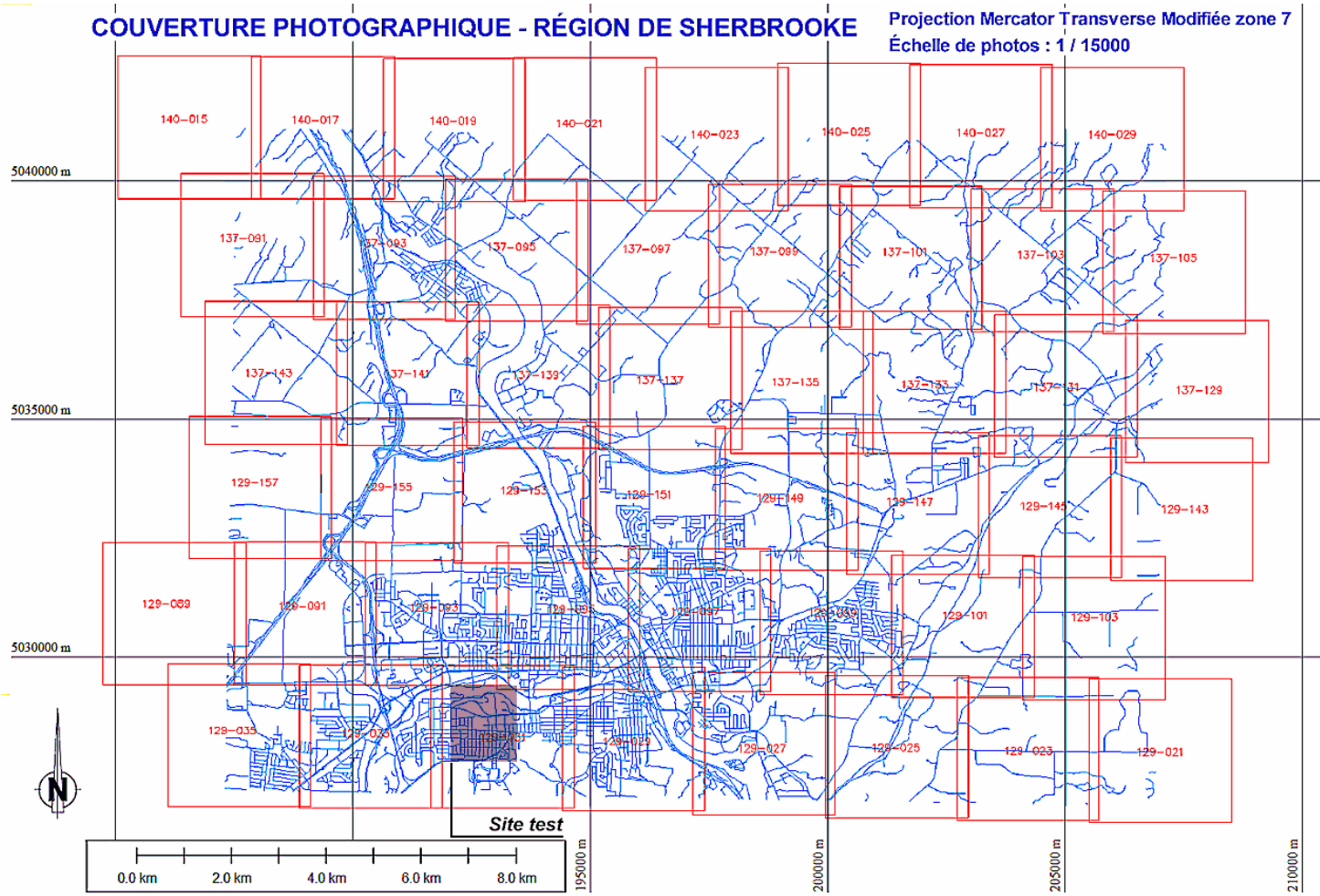
DIRECTION GÉNÉRALE DE L'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE

BASE DE DONNÉES TOPOGRAPHIQUES DU QUÉBEC (BDTQ)  
 SYSTÈME DE RÉFÉRENCE GÉODÉSIQUE NAD 83 - NORMES BDTQ v1.0



----- DONNÉES SUR LA PLUS RÉCENTE INTERVENTION -----							
FEUILLE CARTOGRAPHIQUE	FUSEAU MTM	TYPE DE DONNÉES	TYPE D' INTERVENTION	ANNÉE SOURCE	COURBES NIVEAU	DATE DE VALIDATION	TITRE DE LA FEUILLE
21E05-200-0201	7	PLANIMÉTRIE	révision	2000		2001-12-04	Sherbrooke
21E05-200-0201	7	HYPSONÉTRIE	révision	2000	M10	2001-12-04	Sherbrooke

# DÉCOUPAGE PHOTOGRAPHIQUE DES DONNÉES SUR FOND DE CARTOGRAPHIE 1/20K DU RÉSEAU ROUTIER



## ANNEXE 2 : Indicateurs du MRNF de codification des voies de communication

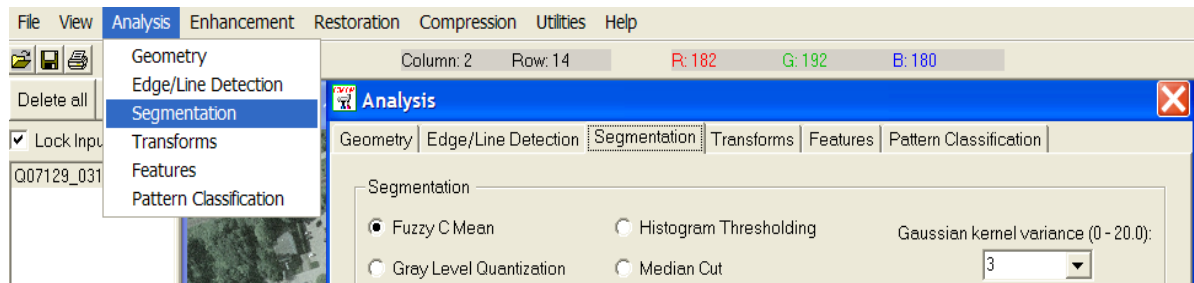
### INDICATIFS DE CODIFICATION - CARTOGRAPHIE 1/20K - VOIE DE COMMUNICATION

Indicatif		Indicatif		Indicatif	
0201000000	Voie de communication	02010025015	Route nationale non pavée	02600001000	Pont
0201000006	Voie de communication en construction	02010025021	Route régionale pavée	02600001001	Pont couvert
0201000007	Voie de communication abandonnée	02010025025	Route régionale non pavée	02600001010	Gué
02010001000	Autoroute	02010025031	Route collectrice pavée	02600002000	Pont d'étagement (viaduc)
02010001002	Autoroute à axes fusionnés	02010025035	Route collectrice non pavée	02600004000	Passerelle
02010003021	Rue pavée	02010025041	Route locale pavée	02600010000	Tunnel
02010003025	Rue non pavée	02010025045	Route locale non pavée	02600015000	Bretelle
02010010011	Chemin carrossable pavé	02010025051	Route d'accès aux ressources pavée		
02010010015	Chemin carrossable non pavé	02010025055	Route d'accès aux ressources non pavée		
02010010020	Chemin non carrossable	02020001000	Voie ferrée		
02010025011	Route nationale pavée	02030001000	Traverse		

## ANNEXE 3 : Description et illustration des processus associés aux prétraitements (référence figure 3.10)

### Prétraitement 1 : Traitement de base avant l'application des rehaussements.

#### Segmentation par approche "Fuzzy C Mean"



Source: Extrait du menu d'aide du logiciel *CVIPTools*.

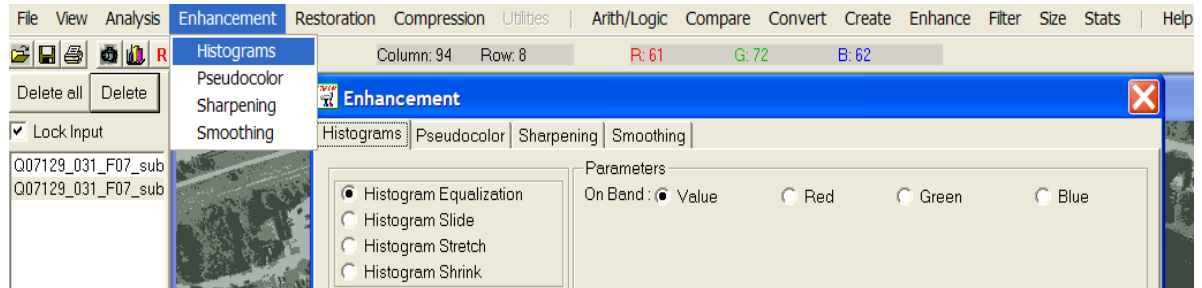
*"Color image segmentation based on thresholding and the fuzzy c-means can be divided into two stages: coarse and fine segmentation. The coarse segmentation is intended to reduce the computational burden required for the fine segmentation- the fuzzy c-means. In coarse segmentation, a scale-space filter is used to analyze the histograms of the three color components. It determines the number of valid classes and assigns classified pixels to these classes according to the threshold value (safety margins). The fine segmentation uses fuzzy c-means to assign the remaining unclassified pixels to their closest class. Histogram analysis using the scale-space filter in coarse segmentation stage is a technique that involves generating a multiscale description of histogram by convolving it with a series of Gaussians of gradually increasing width, and marking the location and direction of the sign change of zero-crossing in its second derivatives. The parameter  $(x, \tau)$ -space is known to be the scale-space where  $\tau$  is the scale constant.*

*The scale constant tau is inversely proportional to the number of peaks and valleys that can be extracted from the histograms. The importance of this fact is that if prior knowledge is known about a particular type of image, tau can be set to be a constant to obtain the desired number of peaks and values and the process can be made unsupervised. The tau value that will give satisfactory result in most of the color space used in an experiment is 5. After histogram analysis, valid classes will be determined according to the safety margin (Usually 5% - 20%) specified by user. Classified pixels will be assigned to their valid classes, and the other pixels will be tagged as unclassified. In this implementation, they will appear as white pixels (255) on the image. The larger the safety margin, the more accurate the result of the segmentation will be, and the more computational efforts it will need when using the fuzzy c-means in fine stage.*

*In fine segmentation stage, the fuzzy membership of the unclassified pixels will be calculated and assigned to the class where they have the maximum membership value. The last parameter the user has to decide when using the program is the display color of the result image. The user has the option of using the means value for each valid class or the predefined colors for the segmented regions."*

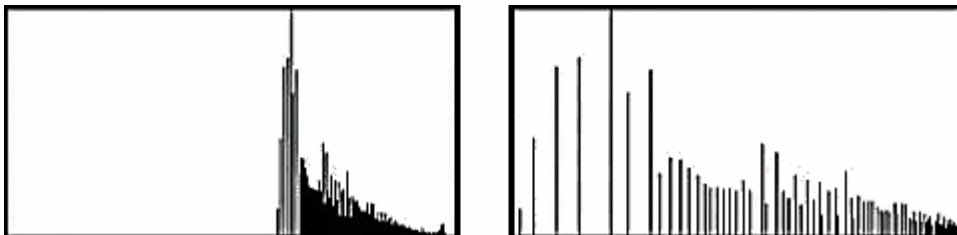
## Prétraitement 2 : Accentuation (post-segmentation) du réseau routier

### Compensation (égalisation) d'histogramme sur bandes RGB



Source: **Umbagh S. E.**, (2010), *Digital Image Processing and Analysis: Human and Computer Vision Applications with CVIPtools*, Second Edition, p.461-464.

*"The theoretical basis for histogram equalization involves probability theory, where we treat the histogram as the probability distribution of the gray levels. This is reasonable, since the histogram is the distribution of the gray levels for a particular image. Its function is similar to that of a histogram stretch but often provides more visually pleasing results across a wider range of images. The histogram equalization process for digital images consists of four steps: (1) find the running sum of the histogram values, (2) normalize the value from step 1 by dividing by the total number of pixels, (3) multiply the values from step 2 by the maximum gray-level value and round, and (4) map the gray-level values to the results from step 3 using a one-to-one correspondence. With a color image, the user specifies band 0, 1, or 2 as the band to use for histogram calculations."*



Exemple d'histogramme avant et après compensation ou égalisation d'histogramme

## Prétraitement 3 : Accentuation (post segmentation) du réseau routier

### Rehaussement des limites & harmonisation des teintes



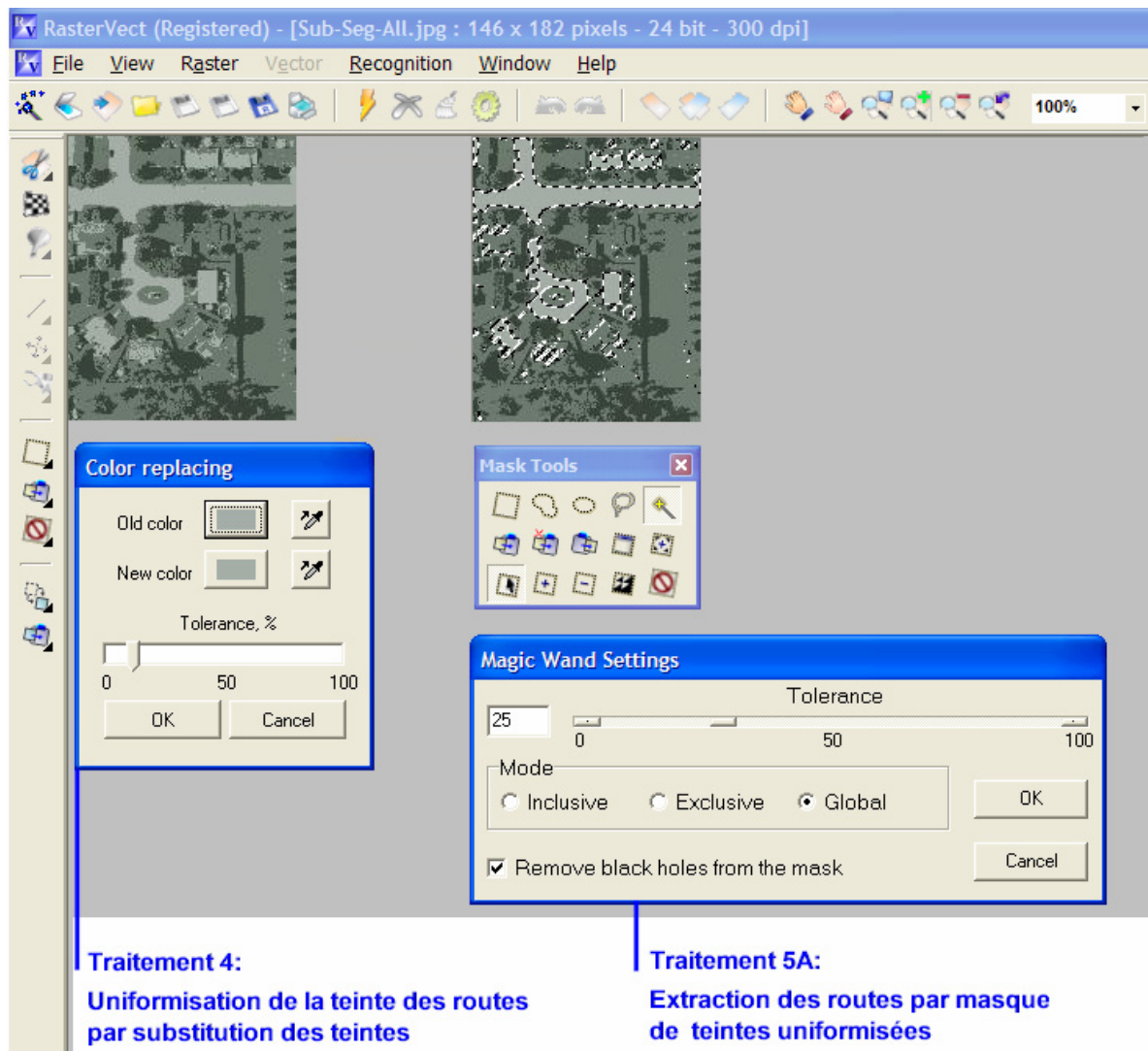
Source: Extrait du menu d'aide du logiciel *CVIPTools*.

*"Unsharp masking is a technique that combines filtering and histogram modification. The input image is lowpass filtered; a histogram shrink is then performed on the filtered image. The resultant image is subtracted from the original, and a histogram stretch completes the process."*



## Prétraitements 4 et 5 : Accentuation post-segmentation du réseau routier

Harmonisation des teintes de routes, extraction par masque et striction au pixel central du masque



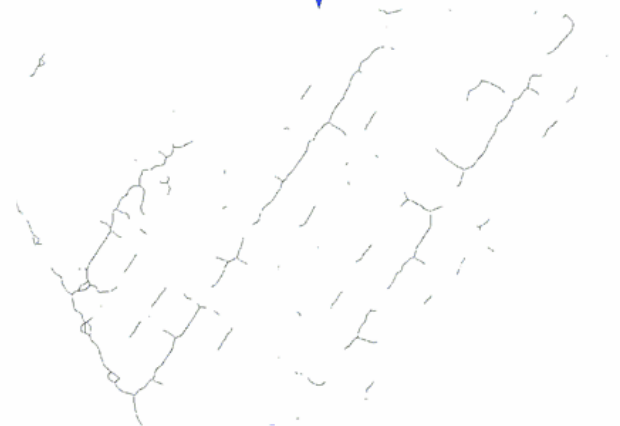
Extraction par masque de pixel  
(tolérance adaptée)



Contenu exclusif du masque



Striction au pixel central (20 cm)  
et nettoyage des pixels isolés



### OBJECTIF(S) DU TRAITEMENT

- Éliminer le maximum d'entités autres que les voies de communication.
- Optimiser les paramètres de détection de SIGMA-ROUTES.
- Minimiser la détection des segments SUSPECTS.

## GÉORÉFÉRENCE DES IMAGES SEGMENTÉES ET REHAUSSÉES

PCI Orthoengine pour la gestion des canaux RGB, vecteurs de routes guide et géoréférence MTM zone 7 de l'image format PIX.

