

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN RESSOURCES RENOUVELABLES**

par

Stéphan Mc Laughlin

**Évaluation de la densité (tiges/ha.) et caractérisation de la défoliation d'un
territoire forestier boréal à l'aide de la vidéographie aérienne multispectrale (VAM)**

Juillet 1998



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

Ces dernières années, tous ceux qui interviennent dans la gestion du milieu forestier font face à de nouvelles réalités (législation, ouverture de marchés, contraintes environnementales...). Cette situation implique une réorganisation du travail et plus que jamais, on doit faire appel à des outils modernes et efficaces pour recueillir les données représentant les principaux paramètres d'un territoire forestier. Les expériences des dernières années ont démontré que la télédétection et les systèmes d'information à référence spatiale ouvrent de nouvelles avenues sur la façon d'acquérir et de gérer l'information forestière. L'objectif de ce travail est d'évaluer une méthode permettant de caractériser, à partir d'imagerie vidéographique, la densité (tiges/hectare) et l'état de défoliation des peuplements résineux d'un territoire forestier boréal.

Le site étudié (86 km^2) est localisé en plein cœur de la sous-zone boréale supérieure, à quelques 75 km au nord-ouest de la ville de Saint-Félicien au Lac-Saint-Jean. Ce territoire est sous la gestion de la compagnie forestière Donohue Saint-Félicien et est principalement composé de peuplements de résineux d'une haute densité forestière. Le site fut imaginé à l'aide d'une version modifiée du capteur XYBION MSC-02 SPL-4076. Les bandes spectrales acquises sont le vert (550 nm), le rouge (650 nm) et enfin, le proche infrarouge (800 nm). Vingt-cinq lignes de vol dont les axes sont espacés de 400 m furent nécessaires pour échantillonner le territoire.

En premier lieu, on a appliqué aux images des prétraitements de routine permettant de corriger l'aberration chromatique latérale et le défaut de registration entre les plans spectraux. Par la suite, les images dont le groupement d'essence est le résineux furent divisées en quatre groupes, en fonction de la densité forestière (A à D). Dans chaque groupe, on a sélectionné aléatoirement trente images à l'intérieur desquelles on a positionné arbitrairement une placette de 135 x 135 pixels. Ces 120 placettes furent dénombrées par trois interprètes.

En raison de la forme conique d'un résineux et de l'exposition plus directe de sa cime à la lumière solaire, son profil radiométrique passe par un maximum local au voisinage de cette cime. Nous avons utilisé une méthode de reconnaissance de ces maxima pour dénombrer automatiquement les tiges. Par la suite, ces maxima furent analysés afin d'évaluer l'état de défoliation des tiges dénombrées.

Afin d'évaluer la performance de la méthode, le dénombrement obtenu par l'algorithme fut comparé à la valeur moyenne du dénombrement obtenu par les trois interprètes. Cette première évaluation fut suivie d'une analyse des erreurs d'omission et de commission de l'algorithme. Pour évaluer la relation entre le contenu de l'image et la réalité terrain, trois placettes de terrain de 30 x 30 m furent implantées et inventoriées.

La comparaison directe entre les résultats obtenus par le dénombrement fait par les interprètes et celui de l'algorithme donne, pour les densités A, B et C, des erreurs quadratiques moyennes respectives de 4,0%, 8,5% et 10,2%. Pour ces trois classes de densité, les variations de dénombrement entre les interprètes est de l'ordre de 3% de la moyenne. Toutefois, cette erreur peut augmenter à plus de 20% pour certaines des images de densité D alors que pour ces mêmes images, l'erreur de l'algorithme peut atteindre 75%. Pour ces raisons cette classe de densité forestière fut qualifiée d'indénombrable par la méthode présentée.

En tenant compte séparément des erreurs d'omission et de commission de l'algorithme, l'erreur totale de la méthode est légèrement supérieure à celle précédemment présentée et se situe respectivement, pour les densités A, B et C, à 5,2%, 8,6% et de 11,0%. De façon générale, avec l'augmentation du nombre de tiges, les erreurs d'omission ont tendance à augmenter alors que les erreurs de commission diminuent. D'autre part, l'analyse de la teinte des tiges dénombrées a permis de les classifier selon trois classes de défoliation. Enfin, les résultats découlant de l'analyse des placettes de terrain montrent que les images sous-estiment le nombre de tiges. Plusieurs tiges des strates dominantes et co-dominantes ne sont pas résolues.

REMERCIEMENTS

Il me fait plaisir d'exprimer ma gratitude aux personnes qui m'ont permis de mener à bien ce travail. Premièrement, à mon directeur de recherche, M. René Verreault, avec qui je collabore depuis maintenant six ans. En plus de m'avoir guidé dans ce travail, le physicien qu'il est a toujours eu la patience et le temps pour expliquer au géographe que je suis certains des sujets qui n'étaient pas couverts par ma formation de premier cycle.

J'aimerais également accorder un remerciement très spécial aux frères Bégin. D'abord Raymond, qui au long de ces années m'a apporté de précieux conseils et qui m'a donné la force de m'engager pour défendre de nobles causes. Daniel qui, de par son travail acharné, sa compétence et son érudition, est un modèle pour quiconque œuvre dans le domaine des sciences. Enfin, un merci à Dali Berthiaume qui a débuté la programmation du logiciel *Boréa* et à André Arsenault pour les nombreuses discussions et conseils de programmation.

Sous un aspect plus personnel, j'aimerais remercier mes proches qui m'ont encouragé au cours de ces deux dernières années. Notamment, un mot pour ma conjointe, Loana, qui m'a encouragé et qui a su supporter certaines des pires humeurs qu'un tel travail peut susciter et enfin, une immense reconnaissance envers mon père, André, qui a eu la patience de relire ce texte à maintes reprises pour m'aider à le corriger et le rendre plus intelligible.

En terminant, j'aimerais remercier le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et Génie du Canada (CRSNG), qui m'a appuyé financièrement pendant la réalisation de cette étude.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	I
REMERCIEMENTS.....	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
LISTE DES CARTES.....	XII
I INTRODUCTION	1
1.1 La problématique	1
1.2 Les objectifs poursuivis.....	7
II SITE À L'ÉTUDE.....	9
2.1 La localisation du site.....	9
2.2 L'imagerie Landsat-TM.....	9
2.2.1 L'interprétation de l'image satellite.....	10
2.2.2 La classification de l'imagerie	12
2.3 Le relief	15
2.3.1 Le modèle numérique d'élévation du terrain (MNET)	15
2.3.2 La géomorphologie.....	17

III MÉTHODOLOGIE.....	22
3.1 L'instrumentation.....	22
3.2 La configuration du capteur	23
3.3 Le dispositif expérimental.....	24
3.4 Le prétraitement des images.....	27
3.5 Le traitement des images.....	29
3.6 Les placettes images.....	31
3.7 La détermination de la superficie des placettes images	34
3.8 Les placettes de terrain.....	36
3.9 La densité forestière	37
IV INSTRUMENTATION	39
4.1 Le capteur MSC-02 SPL - 4076.....	40
4.1.1 Le module caméra.....	40
4.1.2 La roulette de filtres.....	42
4.1.3 Les filtres d'interférence.....	43
4.1.4 La lentille	45
4.1.5 L'aberration chromatique	47
4.1.6 La calibration de la roulette de filtres	48
4.1.7 Divers.....	49
4.2 Les accessoires et instruments périphériques du système d'acquisition d'imagerie.....	50
4.2.1 Le support de capteur.....	50
4.2.2 Le système de positionnement global (GPS).....	50
4.2.3 Le marqueur informatisé.....	51
4.2.4 L'enregistreur vidéo.....	52

4.2.5 Le système informatique.....	52
V RÉSULTATS	54
5.1 L'acquisition de l'imagerie.....	54
5.2 Le prétraitement des images.....	56
5.2.1 La numérisation des images.....	56
5.2.2 La correction de l'aberration chromatique	57
5.2.3 La mise en registre des images	58
5.2.4 La correction des positions GPS.....	60
5.3 La sélection des placettes images.....	60
5.4 L'implantation des placettes de terrain	63
5.5 Le traitement d'extraction de la densité forestière.....	63
5.5.1 La conversion RVB à TLS de l'imagerie.....	63
5.5.2 La filtration spatiale du bruit et du profil radiométrique des conifères	66
5.5.3 Le «seuillage» de l'imagerie	68
5.5.4 L'identification des maxima locaux	69
5.5.5 L'érosion des maxima locaux	71
5.5.6 Le dénombrement des tiges et l'évaluation de la vigueur des tiges	72
5.6 L'analyse des placettes images	74
5.7 Les omissions et commissions de l'algorithme.....	77
5.8 L'analyse de la vigueur des tiges	78
5.9 L'analyse des placettes de terrain	80
5.10 Cartographie de la densité et de la vigueur des tiges de la banque d'images	81

VI DISCUSSION.....	83
6.1 L'acquisition de l'imagerie	83
6.2 La numérisation des images	84
6.3 La mise en registre des images.....	85
6.4 L'implantation des placettes de terrain	85
6.5 L'extraction des paramètres forestiers	86
6.5.1 La filtration spatiale du bruit et du profil radiométrique des conifères	86
6.5.2 Le «seuillage de l'imagerie».....	87
6.5.3 L'identification des maxima locaux	88
6.6 L'analyse des placettes images	89
6.7 L'analyse des placettes de terrain	92
VII CONCLUSION.....	94
VIII BIBLIOGRAPHIE	99
ANNEXE I LA VIDÉOGRAPHIE PARMI LES CAPTEURS AÉRIENS.....	108
A1.1 La résolution spatiale	108
A1.2 L'étendue latérale du champ de vision.....	109
A1.3 Le potentiel stéréoscopique	110
A1.4 Les caractéristiques spectrales	111
A1.5 La qualité géométrique.....	112
A1.6 Exemples d'imagerie produite avec le capteur Xybion MSC-02 SPL - 4076	113

ANNEXE II PRÉTRAITEMENT	117
A2.1 La numérisation des images	117
A2.2 La nomenclature des images	117
A2.3 La mise en registre des images.....	118
A2.4 Sauvegarde de l'information relative à la position des images	119
A2.5 La diminution de l'erreur sur la position fournie par le GPS.....	121

LISTE DES FIGURES

2.1 Localisation du site à l'étude sur l'imagerie NOAA de la région.....	10
2.2 Modèle numérique d'élévation de terrain (MNET) et image des ombrages.....	16
2.3 Le secteur de résineux à l'étude.....	17
3.1 Plan d'expérience.....	27
3.2 Coupe illustrant les maxima locaux de radiométrie d'une image de conifères.....	31
3.3 Organigramme des groupes d'images.....	32
4.1 Réponse spectrale du CCD du capteur MSC-02 SPL - 4076.....	42
4.2 Vue éclatée du capteur Xybion MSC-02 SPL – 4076.....	43
4.3 Courbes de transmissivité d'une combinaison de filtres d'interférence infrarouge fausses couleurs.....	45
4.4 Distorsion de l'objectif zoom Fujinon pour une valeur de f de 20 mm.....	46
4.5 Format de l'information du marqueur informatisé.....	51
5.1 Histogrammes de radiométrie des bandes spectrales d'une image type.....	55
5.2 Effet de l'aberration chromatique latérale et performance de la correction.....	59
5.3 Version registrée et non registrée d'une même image de ce projet.....	59
5.4 Organigramme des groupes d'images.....	61
5.5 Positionnement des placettes images.....	62
5.6 Placette de terrain.....	62
5.7 Filtre passe bas.....	67
5.8 Effet de la filtration spatiale de type passe-bas sur une image de la luminance.....	68
5.9 Les maxima locaux d'une image vidéographique de conifères.....	70
5.10 Effet de l'érosion sur une tache carrée.....	71
5.11 Domaine de teinte des classes de vigueur des tiges	73

5.12 Individus appartenants aux classes de vigueur et leur valeur radiométrique dans les modèles de couleurs RVB et TLS	73
5.13 L'erreur relative d'omission et de commission en fonction du nombre de tiges par placette image	79
5.14 Résultats de la séquence de traitement.....	79
A1.1 Image infrarouge fausses couleurs du secteur des Iles-de-Boucherville (résolution spatiale de 3 m).....	115
A1.2 Image en couleurs naturelles du delta de la rivière Ha!Ha! (résolution spatiale de 1m).....	116
A2.1 Nomenclature des images vidéographiques.	118
A2.2 L'interface du module de mise en registre du logiciel <i>Boréa</i>	119

LISTE DES TABLEAUX

3.1 Superficie occupée par les différentes classes spectrales.....	13
5.1 Facteurs de rééchantillonage permettant la correction de l'aberration chromatique latérale et des proportions de l'image	58
5.2 Résultats par classe de densité	75
5.3 Écart relatif de dénombrement entre les interprètes.....	77
5.4 Les omissions et les commissions de l'algorithme par classe de densité forestière	77
5.5 Dénombrement des placettes de terrain	80
A1.1 Caractéristiques générales des principaux capteurs	117
A2.1 Paramètres d'intérêt de la structure <i>Image</i>	121

LISTE DES CARTES

2.1 Imagerie Landsat-TM.....	11
2.2 Classification de l'imagerie Landsat-TM.....	14
2.3 Modèle chromo-stéréoscopique	18
2.4 Géomorphologie.....	20
5.1 Densité forestière (tiges/ha.) et vigueur des tiges.	82

I

Introduction

1.1 La problématique

Avec ses 91 212 400 ha et ses quelque 77 000 emplois directs (Parent, 1996), la forêt commerciale est à l'origine du secteur manufacturier le plus important de la province de Québec (Baril, 1997). Par ailleurs, ces dernières années, tous ceux qui interviennent dans sa gestion font face à de nouvelles réalités (législation, fusions et restructurations, contraintes environnementales, avancement technologique, etc.) (Boivin, 1994; Chevalier, 1993; Québec, 1996). En ce qui a trait à l'aménagement forestier, une implication de ces changements est l'intégration progressive de la télédétection et des systèmes d'information à référence spatiale (SIRS) pour recueillir et gérer les données représentant les principaux paramètres d'un territoire forestier (Lowell *et al.*, 1992).

Traditionnellement, l'inventaire de la ressource forestière est réalisé à partir d'une interprétation de photographies aériennes appuyée par des campagnes de terrain (Leckie et Gillis, 1995; Leckie, 1990; MRN, 1984). Cette façon de procéder est une entreprise fastidieuse qui coûte considérablement de temps et d'argent (Pitt *et al.*, 1997; Spencer et Hall, 1988). De plus, la représentativité locale des résultats inventoriés amène fréquemment des problèmes d'incompatibilité entre les données de la carte et la réalité

terrain (Lowell, 1994; Edwards, 1993) Notamment, la qualité de la cartographie forestière peut varier, d'une région à l'autre, puisqu'elle est dépendante de l'expertise du photo-interprète qui la réalise (Edwards et Lowell, 1996). Il s'ensuit que la fiabilité et l'efficacité du processus de prise de décision peuvent être significativement limitées (Tappeiner et Wagner, 1987) et que de nombreux chercheurs en télédétection travaillent à développer des outils qui permettront de combler certaines de ces lacunes (Pitt *et al.*, 1997).

L'imagerie numérique multispectrale comporte de nombreux avantages comparativement à la photographie aérienne traditionnelle (plusieurs bandes spectrales, corrections radiométriques et géométriques des images, etc.) (Gougeon, 1995b). Cependant, l'utilisation de l'imagerie satellitaire n'a connu qu'un succès mitigé pour l'extraction des paramètres forestiers usuels (Jano, 1984; Beaubien, 1983) puisque sa résolution spatiale et sa discrimination des essences sont limitées. (Ahern *et al.*, 1983). On l'utilise principalement pour les territoires où l'exploitation est moins intensive ou encore, pour la mise à jour d'informations plus générales telles que la différenciation entre les peuplements de résineux et de feuillus (Beaubien, 1994; Leckie, 1990; Létourneau et Guimond, 1984).

En attendant la mise en opération des satellites commerciaux d'observation terrestre à haute résolution spatiale (Fritz, 1996; Bullock *et al.*, 1994; Asker, 1993), la télédétection aérienne, avec des capteurs tels que le MEIS-II et le CASI ou encore des technologies telles que la photographie numérique ou la vidéographie, permet d'acquérir de l'imagerie à des

résolutions spatiales inférieures au mètre, ce qui la rend mieux adaptée que l'imagerie satellitaire à l'analyse forestière de précision (Gougeon, 1997a; Lévesque *et al.*, 1995; Anger *et al.*, 1994; Verreault, 1993; King, 1992; McColl *et al.*, 1983).

Toutefois, il va de soi que l'émergence de ces technologies numériques n'a pas freiné le développement de la photographie aérienne (Light, 1996). Actuellement, cette dernière bénéficie d'accessoires modernes tels que les systèmes de compensation de l'avance de l'avion (Fent *et al.*, 1995; Diete 1990; Klose, 1990), de telle sorte que lors d'un récent atelier de travail (Sault Ste. Marie) portant sur l'intégration de la télédétection en aménagement forestier, les spécialistes du domaine concluaient qu'elle est encore le moyen le mieux adapté pour recueillir des données forestières (Pitt *et al.*, 1997). Cependant, il apparaît qu'à moyen terme, la télédétection numérique est appelée à la remplacer progressivement (Pitt *et al.*, 1997; Hartl, 1989).

Selon Gougeon (1995a) et Strome *et al.*, (1989), une imagerie à haute résolution spatiale (30 à 70 cm) et une analyse basée sur la reconnaissance individuelle des tiges sont nécessaires pour évaluer adéquatement la composition des peuplements forestiers. La délinéation des couronnes permet de limiter l'analyse radiométrique aux pixels qui les composent et de ce fait, elle rend possible des études portant sur l'identification de leur essence, de leur vigueur, de leur position, du diamètre de leur cime, etc. (McC Laughlin *et al.*, 1998; Dralle et Rudemo, 1997; Gougeon, 1996). Notamment, à partir de la position des tiges, on peut facilement déduire une information de la densité forestière en tiges/ha

puisque celle-ci est égale à l'inverse de la surface dont le périmètre est défini en joignant tous les points positionnés à mi-distance d'une tige à ses voisines (Eldridge et Edwards, 1993).

Actuellement, comme le stipule la norme de stratification écoforestière du troisième programme d'inventaire forestier (MRN, 1994), «la classe de densité d'un peuplement correspond à l'importance (en pourcentage) de la projection au sol des cimes des tiges qu'il renferme». Cette façon d'évaluer et de codifier l'information reflète mal certaines subtilités du paysage forestier (O'Dowd, 1996; Tremblay, 1995). Par exemple, en fonction de leurs caractéristiques écoforestières respectives, deux peuplements de résineux pourront se voir attribuer une même cote de densité alors qu'il existe une différence importante quant au nombre de tiges qui les compose. En levant cette ambiguïté, la densité forestière, lorsqu'elle est exprimée en tiges/ha, est plus facilement intégrée aux modèles d'estimation du volume de bois et par ailleurs, il est plus aisé de l'utiliser à titre d'indicateur au moment d'évaluer la pertinence de pratiquer des interventions sylvicoles (Doucet *et al.*, 1996).

Bien que certains auteurs aient connu du succès pour pratiquer une analyse à l'échelle des peuplements à partir d'imagerie satellitaire (Quessy, 1996; Laframboise *et al.*, 1996; Strahler *et al.*, 1988), notamment pour l'extraction de la densité, l'applicabilité de ces techniques dans un contexte opérationnel n'a toujours pas été démontrée (Fournier, 1995). En fait, la compréhension de l'interaction qui existe entre la structure du couvert forestier et lumière qu'il réfléchit est complexe (Fournier, 1996). Il apparaît que l'analyse de textures,

les réseaux neuronaux ou encore la segmentation d'images à haute résolution spatiale soient les techniques à privilégier pour l'étudier (Hay et Nieman, 1994; Zaremba *et al.*, 1993; St-Onge et Cavayas, 1992; Gougeon, 1993).

Dans cette optique, Eldridge et Edwards (1993) ainsi que Gougeon et Moore (1989) utilisent un processus de reconnaissance des maxima locaux pour évaluer la densité d'images à haute résolution spatiale provenant du capteur MEIS-II. Gougeon (1995 et 1993) utilise l'imagerie de ce même capteur pour faire la délinéation des couronnes d'une plantation de l'Ontario à l'aide d'un algorithme multirègles qui suit les vallées d'ombres entre les arbres matures. Plus récemment, il utilisait son logiciel de délinéation des tiges sur l'imagerie CASI d'un secteur forestier de la Colombie-Britanique (Gougeon, 1997). En plus d'avoir identifié les essences forestières avec une fidélité de 68,3 %, il a évalué la densité de tiges, la concentration des essences et la fermeture du couvert forestier pour générer les limites de peuplements. McLaughlin *et al.* (1996) évaluent la densité de tiges d'une plantation de pin gris (*Pinus banksiana*, Lamb.) de l'Abitibi à l'aide d'imagerie vidéographique multispectrale. Pollock (1994 et 1996) suggère une méthode de reconnaissance individuelle des tiges basée sur un modèle synthétique de représentation des couronnes. Enfin, Dralle et Rudemo (1997 et 1996) estiment la position individuelle des tiges d'un peuplement équien d'épinette de Norvège (*Picea abies* (L.) Karst.) à l'aide d'un algorithme gaussien isotrope bi-dimensionnel.

Parmi les technologies de télédétection aéroportée précédemment mentionnées, la vidéographie aérienne multispectrale est peu dispendieuse d'opération (King, 1995, Wright, 1993) et rencontre les critères de qualité spectrale et de résolution spatiale nécessaires à l'identification individuelle des arbres (Bartz *et al.*, 1994). En raison de la disponibilité de ses composantes, de nombreux groupes de recherche ont développé leur propre système d'acquisition (Tarussov *et al.*, 1996; Neale *et al.*, 1994; Xiuhong *et al.*, 1994; Verreault *et al.*, 1994; King et Vlcek, 1990). Mentionnons l'exemple d'Everitt et de son équipe, qui utilisent un générateur de synchronisation pour asservir quatre caméras vidéo et un multiplexeur afin d'obtenir de l'imagerie vidéo infrarouge fausses couleurs en temps réel (Everitt, 1995a et b).

Cette technologie a fait ses preuves pour appuyer la réalisation de nombreuses études à caractère environnemental et forestier (Mausel *et al.*, 1992). Verreault *et al.*, (1993) cartographient l'évolution de la végétation dans une coupe forestière en régénération et répètent avec succès l'opération pour caractériser la strate herbacée de la base militaire de Bagotville (Verreault *et al.*, 1996). À la fin des années 80, McLaughlin *et al.*, (1985), McIlveen *et al.*, (1989) et Yuan *et al.*, (1991) font l'évaluation du déclin d'érablières ontariennes alors que Vlcek (1989) propose un index pour l'exprimer. Pour sa part, le service des forêts des États-Unis a distribué 18 exemplaires du système quadra-caméras développé par Myhre *et al.*, (1987, 1992, 1995) afin d'établir un réseau d'interventions dont l'objectif est de cartographier l'étendue des dommages causés par les insectes ravageurs.

1.2 Les objectifs poursuivis

L'objectif général de ce travail est de tester la performance du système d'acquisition d'imagerie vidéographique mis au point par le Laboratoire de télédétection aérienne de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) pour évaluer certains des paramètres décrivant un territoire forestier. La recherche s'inscrit dans le cadre des travaux en foresterie du Consortium de Recherche sur la Forêt Boréale Commerciale. La compagnie forestière Donohue Saint-Félicien est l'instigatrice de ce projet et y collabore à titre de partenaire industriel.

Plus particulièrement, l'objectif premier de la recherche consiste à développer et évaluer une méthodologie permettant de caractériser, à partir d'imagerie vidéographique, la densité (tiges/hectare) des peuplements résineux d'un territoire forestier boréal commercial. Un objectif secondaire consiste à développer un indicateur de défoliation qui permettra de qualifier la vigueur des tiges. Toutefois, ce dernier objectif est conditionnel à la concrétisation de l'objectif principal du projet.

Le prochain chapitre traitera du site à l'étude. Sa description, accompagnée par des cartes thématiques et l'imagerie satellite Landsat-TM du site, permettra au lecteur de se familiariser avec sa localisation et ses particularités forestières et géomorphologiques. Le chapitre III présentera la méthodologie suivie, le dispositif expérimental, les cartes permettant de le décrire spatialement, la configuration de capteur retenue, etc. Puisque le capteur vidéographique de l'UQAC est méconnu de la communauté scientifique, nous

consacrons le chapitre «*IV. Instrumentation*», à en faire une description sommaire. Le chapitre V présentera les résultats obtenus alors que le chapitre VI va permettre de les discuter et d'apporter certaines recommandations. Enfin, suivant la conclusion, le lecteur intéressé trouvera à l'annexe I une discussion comparative entre les caractéristiques du capteur de l'UQAC et celles des capteurs de télédétection aérienne mieux connus. Notamment, il y sera présenté quelques exemples des images que le capteur de l'UQAC permet de réaliser.

II

SITE À L'ÉTUDE

2.1 La localisation du site

Le territoire à l'étude a une superficie de 86 km² et son périmètre est de forme irrégulière. Comme le montre l'image NOAA de la figure 2.1, il est localisé à quelque 75 km au nord-ouest de la ville de Saint-Félicien (Lac-Saint-Jean), dans le secteur sud de la sous-zone boréale supérieure. Il s'étend sur les unités de gestion 22 et 25 de l'aire administrative 02 Saguenay-Lac-Saint-Jean et conformément au cadre bioclimatique de référence, le site appartient à la région de la rivière du Chef dans le sous-domaine de l'Ouest (Grondin, 1996). Enfin, c'est la compagnie forestière Donohue Saint-Félicien qui est responsable de sa gestion et de son exploitation.

2.2 L'imagerie Landsat-TM

Nous disposons des bandes 3,4 et 5 de l'image Landsat-TM du 17 juin 1993. La carte 2.1 la présente avec un rehaussement spectral selon une méthode décrite par Beaubien, (1994). Dans les lignes suivantes, nous nous appuyons sur l'information de la carte forestière et sur l'interprétation et la classification de l'image satellitaire pour présenter la description des principaux phénomènes naturels présents sur le territoire.

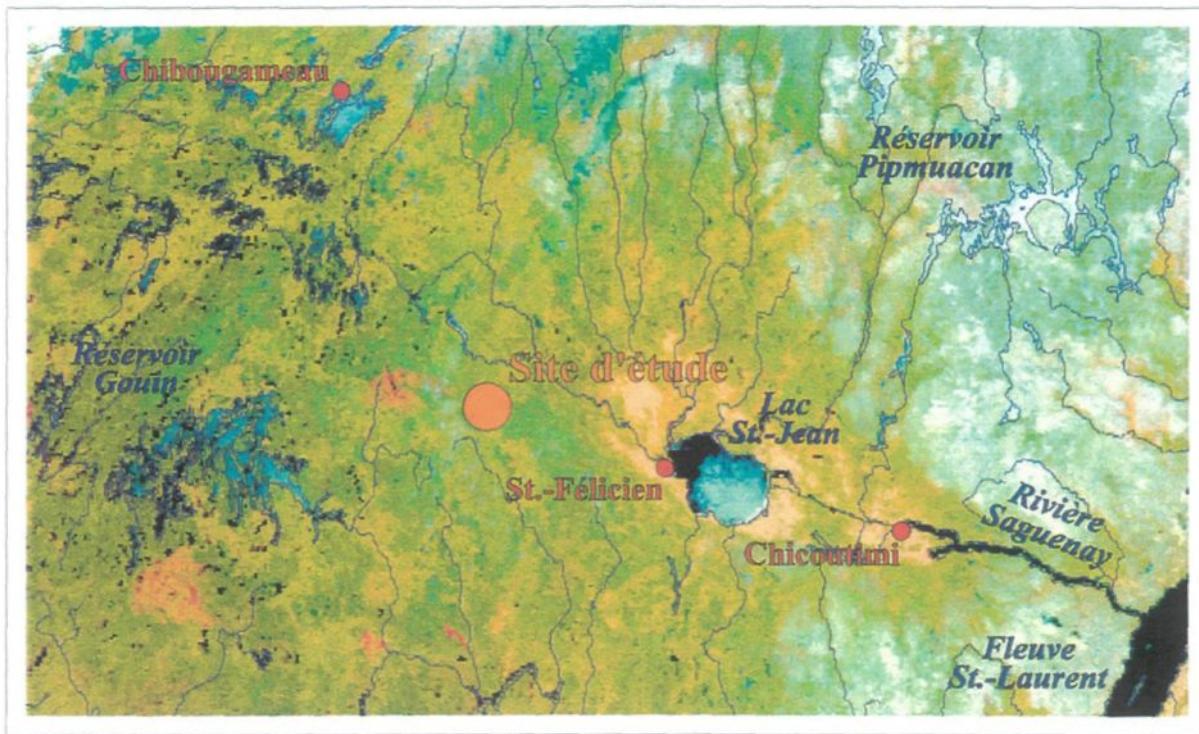


Figure 2.1 Localisation du site à l'étude sur l'imagerie NOAA de la région.
Source: Laboratoire de télédétection de l'UQAC, 1998.

2.2.1 L'interprétation de l'image satellite

L'analyse de l'image satellite permet de constater que le secteur d'intérêt est principalement composé de végétation résineuse (tons de brun). Bien que celle-ci soit essentiellement constituée d'épinettes noires (*Picea mariana*, Mill. B.S.P.) et de pins gris, il y a présence, en moindre proportion, de sapins baumiers (*Abies balsamea*, (L.) P. Mill.). Également, on découvre de la végétation feuillue (tons d'orangé) distribuée de façon éparse dans le secteur de résineux. Il s'agit principalement de peuplements de bouleaux blancs (*Betula papyrifera*, Marsh.) et le plus souvent, ils sont mélangés.

En bordure du secteur de résineux, principalement du côté ouest du territoire, on observe un secteur perturbé par l'activité anthropique. Ces coupes forestières se détectent aux teintes de jaune, ocre et orangé qui les caractérisent. Les secteurs en jaune vif correspondent aux coupes les plus récentes alors que la régénération colonise progressivement les plus anciennes (ocre). À l'intérieur de ce secteur, on observe quelques résineux qui ont échappé à la coupe forestière jusqu'à maintenant. D'autre part, les peuplements de feuillus sont restés sur pied.

Dispersés ça et là sur le territoire, on trouve plus d'une trentaine de lacs (noir). Ceux-ci sont parfois bordés par des zones marécageuses et par la végétation associée à ce type de milieu naturel (tons de rose). Enfin, dans les secteurs de coupe forestière, on peut constater que le règlement ayant trait au maintien d'une bande de végétation de 20 m sur le pourtour des lacs et rivières est respecté. Les tons de brun de cette bande riveraine tranchent sur le noir des lacs et l'ocre de la régénération avoisinante.

2.2.2 La classification de l'imagerie

Nous avons appliqué à l'imagerie satellitaire une classification automatique regroupant l'information spectrale par angle de distribution minimal¹. La carte 2.2 montre

¹ Ce processus de classification itératif positionne chaque pixel de l'image comme un vecteur dans l'espace à n -dimensions, où n est égal au nombre de bandes spectrales disponibles. Il analyse le jeu de vecteurs afin d'établir le centre des classes en utilisant, comme mesure de similitude, la distance angulaire entre ces vecteurs. Il assume que les

les résultats de cette classification. En plus de confirmer la présence des phénomènes précédemment interprétés et d'en quantifier la superficie, la classification permet de distinguer l'épinette noire du pin gris ainsi que deux types de régénération. L'épinette noire occupe une superficie légèrement plus étendue que le pin gris. D'autre part, la classification n'a pas permis d'identifier et d'isoler le sapin. En conséquence, nous ignorons sa proportion relative et sa distribution à l'intérieur des deux classes résineuses. Également, la classification a permis de distinguer deux classes homogènes à l'intérieur des zones de régénération. Cependant, il n'a pas été possible de déterminer la nature précise de ces classes. Nous les appellerons donc: Régénération I et II. Le tableau 2.1 présente la superficie occupée par chacune des classes.

Tableau 2.1 Superficie occupée par les différentes classes spectrales

Classes	Proportion relative (%)	Superficie (km ²)
Épinette noire	28,43	37,53
Pin gris	25,93	34,22
Feuillus	18,00	23,76
Régénération I	11,68	15,41
Régénération II	6,65	8,78
Coupes récentes	2,16	2,86
Zones humides	0,92	1,22
Lacs	6,23	8,22
Total:	100.00	132.00 ²

vecteurs séparés par une petite distance angulaire ont plus de similitude entre eux que ceux séparés par une plus grande distance. À partir d'une première itération, l'algorithme analyse l'image à nouveau afin de raffiner son analyse. Il en va ainsi jusqu'à ce que le nombre d'itérations souhaité soit atteint (MicroImages, 1997).

² Nous avons classifié un territoire de 11 x 12 km, à l'intérieur duquel le territoire à l'étude (86 km²) est circonscrit.

2.3 Le relief

L'examen des courbes hypsométriques de la carte topographique au 1: 20 000 du territoire montre une variation de relief de 210 m, soit de 490 à 700 m. Les secteurs les plus élevés sont localisés dans la portion sud-ouest du territoire alors que les moins élevés sont au nord, dans les vallées du lac Lauzon et d'une rivière en méandres, à quelques kilomètres à l'ouest de la première.

2.3.1 Le modèle numérique d'élévation du terrain (MNET)

Afin de modéliser le relief et de faciliter sa visualisation, nous avons réalisé un modèle numérique d'élévation du terrain (MNET) à partir de l'hypsométrique numérique. Il fut généré à l'aide d'un processus itératif de courbures minimales en fixant la distance de recherche à 50 m. Le processus utilise, comme méthode d'initialisation, l'inverse de la distance à la grille de génération du modèle³.

Dans cette étude, puisque nous utiliserons de l'imagerie à haute résolution spatiale, le survol s'effectuera à basse altitude et localement, la variation de relief (210 m) aura une

³ Le processus de génération du modèle débute par la construction d'une grille à la résolution spatiale désirée. L'algorithme recherche et extrait, à partir des intersections de grilles, les vecteurs ou points se trouvant à une distance (en pixels) inférieure ou égale à la distance de recherche demandée. À partir des données trouvées, il calcule une valeur d'altitude pour chacune des intersections de la grille. Le calcul s'effectue en attribuant un facteur de pondération qui tient compte de la distance à la grille à laquelle une certaine

importance non négligeable sur la dimension nominale des pixels acquis. Ce MNET sera utilisé pour déterminer la dimension des pixels de chacune des images vidéographiques. La figure 2.2 présente le modèle d'élévation produit ainsi qu'une image de génération des ombrages pour laquelle l'azimut et l'élévation solaire sont respectivement de 45 et 50 degrés. Pour sa part, la [carte 2.3](#) présente un modèle «chromo-stéréoscopique»⁴ du site à l'étude (Toutin, 1997). Celui-ci, lorsqu'il est regardé avec des lunettes appropriées

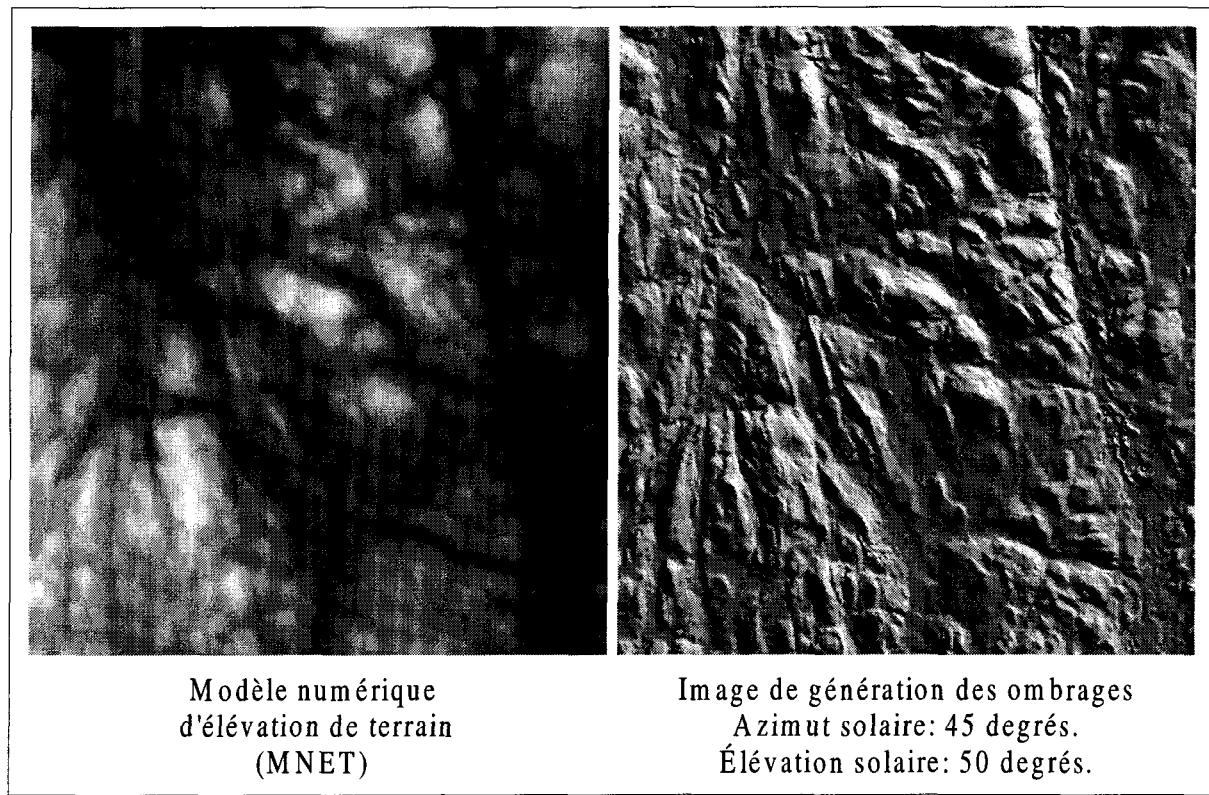


Figure 2.2 Modèle numérique d'élévation de terrain (MNET) et image des ombrages.

donnée fut trouvée. Le modèle final intègre l'ensemble des données à l'intérieur de la distance de recherche (MicroImages, 1997).

⁴ Le modèle fut réalisé en affectant respectivement aux bandes spectrales d'une composition teinte, luminosité et saturation (TLS), l'image différence 255-MNET, la bande spectrale TM-3 et enfin, l'image des ombrages.

importance non négligeable sur la dimension nominale des pixels acquis. Ce MNET sera utilisé pour déterminer la dimension des pixels de chacune des images vidéographiques. La figure 2.2 présente le modèle d'élévation produit ainsi qu'une image de génération des ombrages pour laquelle l'azimut et l'élévation solaire sont respectivement de 45 et 50 degrés. Pour sa part, la [carte 2.3](#) présente un modèle «chromo-stéréoscopique»⁴ du site à l'étude (Toutin, 1997). Celui-ci, lorsqu'il est regardé avec des lunettes appropriées

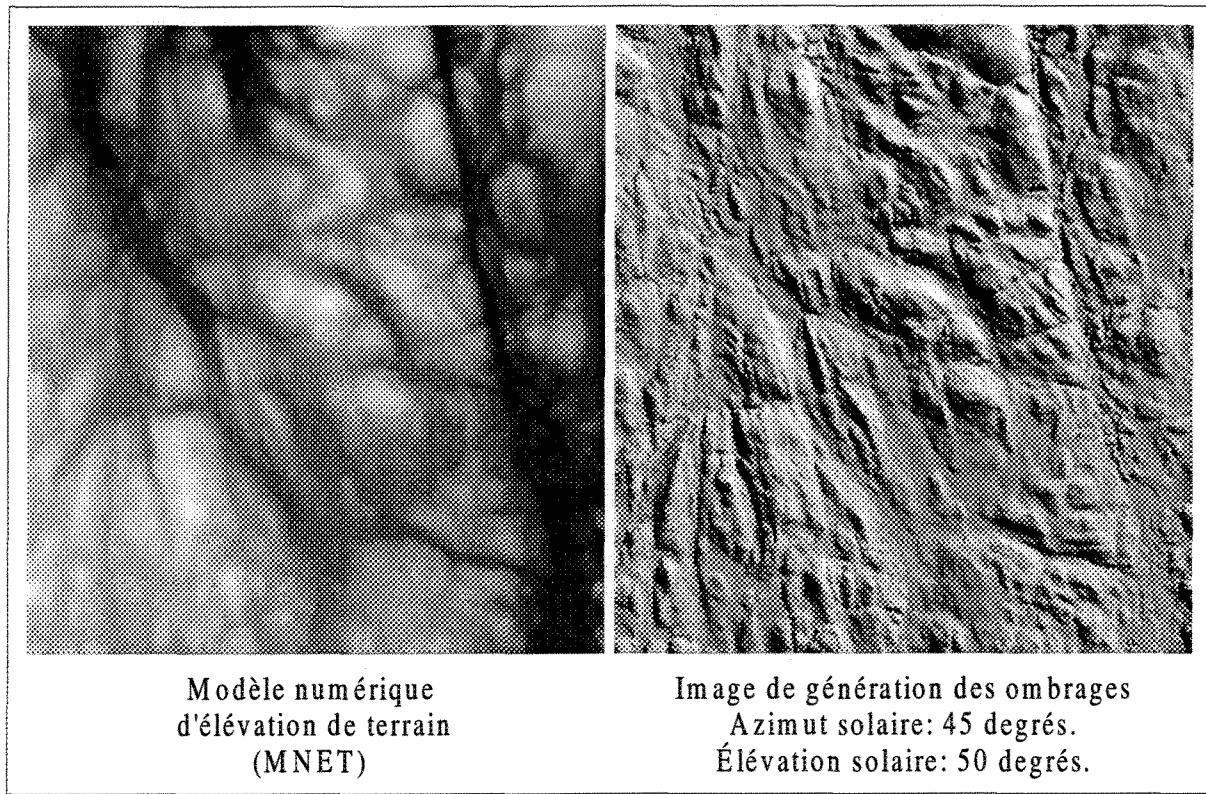


Figure 2.2 Modèle numérique d'élévation de terrain (MNET) et image des ombrages.

donnée fut trouvée. Le modèle final intègre l'ensemble des données à l'intérieur de la distance de recherche (MicroImages, 1997).

⁴ Le modèle fut réalisé en affectant respectivement aux bandes spectrales d'une composition teinte, luminosité et saturation (TLS), l'image différence 255-MNET, la bande spectrale TM-3 et enfin, l'image des ombrages.

(ChromaDepth™ 3-D), montre le relief en trois dimensions. Enfin, la figure 2.3 présente une scène virtuelle du terrain. On y voit, bordé par les secteurs de coupes (tons de orange), le secteur de résineux étudié (tons de brun) tout comme le relief morcelé et la vallée du lac Lauzon.

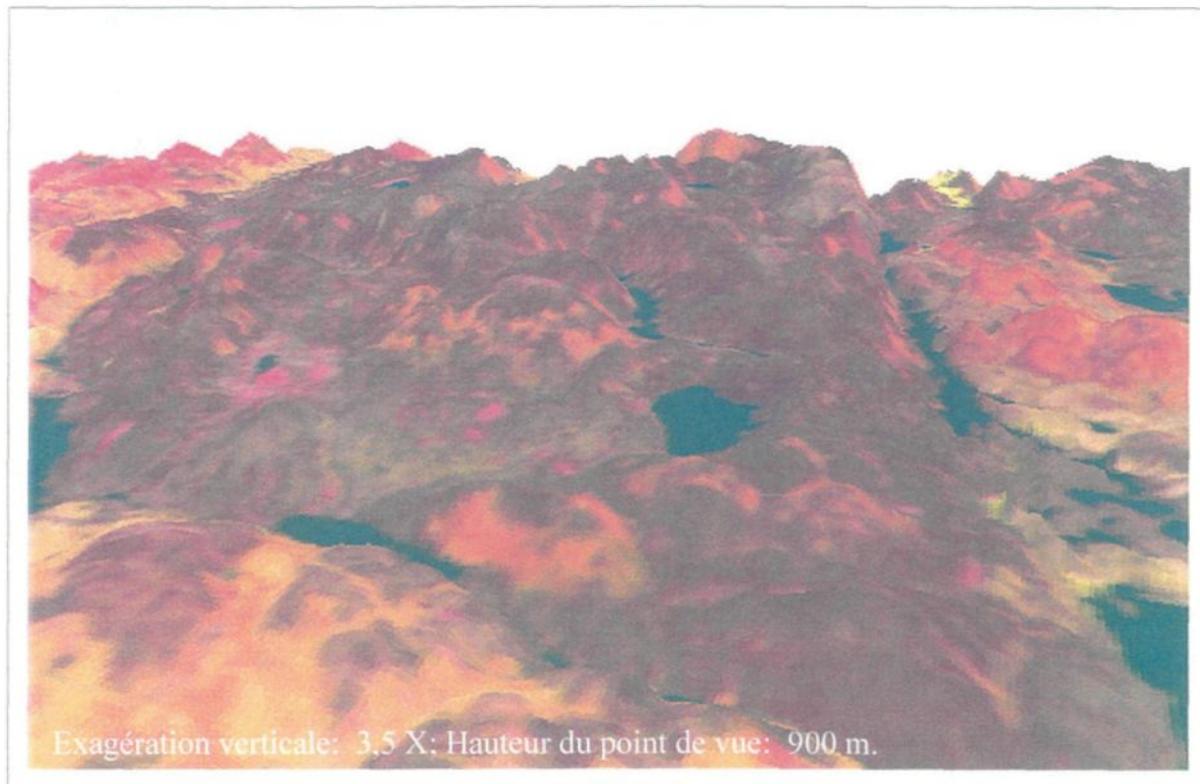


Figure 2.3 Le secteur de résineux à l'étude.

2.3.2 La géomorphologie

À l'aide du MNET, de visites sur le terrain et de la cartographie dont nous disposons, il a été possible d'analyser les grands traits géomorphologiques du territoire (carte 2.4). Globalement, celui-ci présente des caractéristiques géomorphologiques glaciaires relativement typiques du bouclier canadien.

Le MNET a permis de préciser les limites de trois grands gîtes minéraux. Dans le coin nord-est de l'image, en rosé, on retrouve de la migmatite. Ce secteur est délimité à l'ouest par la vallée du lac Lauzon. Celui-ci est le lieu d'une cicatrice importante dans le relief. Il révèle le linéament le plus marqué du territoire. Dans le coin sud-ouest il est possible d'observer un champ de gneiss (gneiss charnockitiques) reconnaissable aux multiples rides topographiques quasi parallèles qui s'y retrouvent. Celui-ci est limité par un deuxième linéament important à sa limite nord-est. Entre ces deux gîtes, on retrouve un complexe gneisique.

Également, la carte présente les pentes supérieures à 15%. Les pentes les plus abruptes sont généralement du côté ouest des cours d'eau et des lacs à l'exception du secteur du champ de gneiss où celles-ci sont distribuées de part et d'autre du réseau hydrographique. Cette orientation générale du pendage est discordante avec la direction du mouvement glaciaire connue pour ce secteur (du nord-ouest au sud-est). Il apparaît donc que l'origine de ces pentes est de nature géologique (failles et cuestas).

Essentiellement, le réseau hydrographique est de type dérangé à l'exception du secteur nord-ouest où il y a la présence d'une rivière dont les méandres sont prononcés. Cette dernière suggère un ancien lac glaciaire et en conséquence, il est fort probable qu'il y ait une présence importante de dépôts dans le fond de cette vallée. Enfin, localement, il est possible d'observer un réseau de drainage dendritique.

On retrouve plusieurs eskers sur le territoire. Ceux-ci sont principalement distribués le long des deux linéaments principaux qui limitent les gîtes minéraux du territoire. L'esker le plus remarquable est celui du lac Lauzon dont il est possible de suivre la trace sur près de 3,5 km alors que, dans ce même secteur, les berges circulaires de ce même lac suggèrent la présence de kettles noyés. Enfin, l'aspect homogène du territoire entre les crêtes et les montagnes laisse penser que les dépôts glaciaires sont importants. Toutefois, cet effet peut être induit par la limite de résolution et de précision du MNET.

III

MÉTHODOLOGIE

3.1 L'instrumentation

L'acquisition de l'imagerie se fera à l'aide du système de télédétection aérienne de l'UQAC. Celui-ci est composé d'une version modifiée du capteur vidéographique monocaméra Xybion MSC-02 SPL-4076. Un support anti-vibration permettant la mise au niveau du capteur, un marqueur informatisé et un système de positionnement global GPS complètent le système d'acquisition. Le chapitre «*IV. Instrumentation*» sera consacré à la description détaillée de ce capteur et des appareils périphériques assurant son fonctionnement.

Le traitement des images se fera sur des plates-formes informatiques de la génération Pentium. À l'exception de la numérisation, tous les traitements seront effectués à l'aide du logiciel de traitement d'images *Boréa*. Celui-ci fut développé afin de répondre aux particularités de traitement des images du système vidéographique de l'UQAC. Également, il constitue une architecture logicielle de base sur laquelle il est facile d'implanter des fonctions telles que celles permettant l'extraction des paramètres forestiers visés dans cette étude. Son interface est particulièrement adaptée à la manipulation d'un grand nombre d'images. À cet effet, le logiciel comporte un module permettant d'effectuer

séquentiellement une série de tâches sur l'ensemble des images d'un répertoire. *Boréa* est développé en langage C pour Windows à l'aide du logiciel de développement Microsoft Visual C/C++.

3.2 La configuration du capteur

À partir de l'expérience acquise lors de pré-tests réalisés sur des images vidéographiques d'une plantation de pins gris de l'Abitibi (McLaughlin *et al.*, 1996) et de l'expertise décrite par différents auteurs (Gougeon, 1995 et Strome *et al.*, 1989), il fut estimé que des images dont la résolution spatiale serait de l'ordre de 30 cm/pixel permettraient de résoudre la majorité des tiges résineuses dans les strates dominante et co-dominante. À cette résolution spatiale, chaque image vidéographique couvre une superficie de 0,03 km² (225 m x 145 m). Puisque l'altitude moyenne du territoire est de 550 m sur le niveau moyen de la mer (NMM) et que nous souhaitons employer l'objectif à la distance focale pour laquelle il présente le moins de distorsion géométrique (20,3 mm), l'acquisition des images s'effectuera à partir d'une altitude de vol de 1 070 m NMM.

Le capteur vidéo sera configuré pour que trois bandes spectrales soient acquises: le vert à 550 nm \pm 35 nm, le rouge à 650 nm \pm 35 nm et enfin, le proche infrarouge à 800 nm \pm 40 nm. Cette composition spectrale se compare avantageusement à la photographie aérienne traditionnelle infrarouge fausses couleurs et possède les caractéristiques souhaitées pour rencontrer les objectifs de cette étude.

La bande proche infrarouge est idéale pour étudier la végétation et notamment, les résineux. Il existe une certaine proportionnalité entre la production de chlorophylle et le signal réfléchi dans cette portion du spectre électromagnétique. À l'intérieur d'une même essence, les individus qui produisent beaucoup de chlorophylle, les arbres en meilleure condition, auront une réponse radiométrique plus importante. D'autre part, le sol à nu et la végétation déchlorophyllisée (arbres morts ou moribonds) ont une faible valeur radiométrique dans cette bande et sont donc moins facilement identifiables. Dans la bande rouge, le sol à nu, les roches et les arbres moribonds ont un signal important. Il existe donc une complémentarité entre ces deux bandes spectrales qui peut être mise à profit pour distinguer un plus large éventail de phénomènes ou encore, pour en éliminer certains, comme c'est le cas lorsqu'on applique un indice de végétation aux images. Pour cette étude, la bande verte est moins intéressante puisqu'elle présente beaucoup de similitude avec la bande proche infrarouge. Cependant, en comparaison avec l'infrarouge, la végétation y est étalée sur une plage radiométrique plus restreinte alors que la réponse radiométrique du sol à nu y est plus importante.

3.3 Le dispositif expérimental

Afin de couvrir les quelque 86 km² du territoire à l'étude, nous proposons une stratégie d'acquisition qui permet de l'échantillonner de façon systématique. Il est inutile, pour l'atteinte des objectifs de ce projet, d'imager la totalité du territoire. À la résolution

spatiale désirée, une telle couverture correspondrait à près de 2 900 images et ce, sans tenir compte d'un pourcentage de recouvrement entre les images.

L'acquisition de l'imagerie est planifiée de façon telle que l'avion survole le territoire sur des lignes de vol parallèles dont les centres sont espacés de 400 m. En partant de l'extrême sud du territoire, la latitude 48° 42' 36" nord, il faut 25 lignes de vol pour couvrir l'ensemble du site à l'étude. Afin d'épouser les limites de la zone d'intérêt, la longueur de ces lignes varie de 3 à 9 km. Par ce design, il sera possible d'acquérir l'imagerie de près de 50% du site expérimental.

Bien que cet échantillonnage, basé sur la distance entre les lignes de vol, assure une bonne représentativité du territoire à l'étude, il sera nécessaire, afin d'éviter d'augmenter indûment le nombre d'images à traiter, d'effectuer un deuxième échantillonnage au moment d'extraire les images de la bande magnétoscopique.

Le GPS dont nous disposons pour ce travail calcule et affiche une position une fois par seconde. Cette fréquence de renouvellement est convenable pour les besoins de navigation des aéronefs usuels. Cependant, en raison des vitesses élevées de ces derniers et des vents dans lesquels ils opèrent, il n'est pas possible d'utiliser cette information de position pour déduire une distance constante comme critère d'échantillonnage le long d'une ligne de vol. De plus, sachant que le système vidéo produit 30 images par seconde, cette

caractéristique du GPS implique que la position géographique sera connue pour une seule de ces 30 images.

L'exemple suivant illustre bien les considérations du paragraphe précédent. En supposant un vent d'ouest de 35 km/h et une vitesse par rapport à l'air de 180 km/h, un avion aura une vitesse sol de 145 km/h lorsqu'il vole en direction ouest alors que sous l'influence du vent arrière, sa vitesse augmentera à 215 km/h lorsqu'il volera en direction est. Dans ces conditions, la distance parcourue par l'avion pendant une seconde de vol correspond à 40 m lorsqu'il vole vers l'ouest (vent debout), alors qu'en direction opposée, elle sera de 60 m (vent arrière).

Dans ce contexte, nous utiliserons le taux de renouvellement de la position GPS de l'avion comme période systématique de numérisation. Afin de mettre en pratique ce deuxième échantillonnage, une image sera numérisée à tous les deux renouvellements ($\cong 2$ secondes) de la position GPS. Compte tenu des conditions d'opération de la plate-forme d'acquisition, soit d'un monomoteur Piper Warrior II, la distance séparant les centres de deux images successives numérisées sera de l'ordre de 100 à 150 m, dépendamment de la vélocité des vents lors du survol. Cet échantillonnage systématique assurera une couverture quasi-continue pour la majorité des lignes de vol et il est estimé qu'il mènera à la numérisation de près de 1 500 images. Il est prévu que deux survols seront nécessaires afin de compléter l'acquisition des 25 lignes de vol planifiées. Ceux-ci seront effectués en début d'été par ciel clair. La figure 3.1 présente le plan d'expérience.

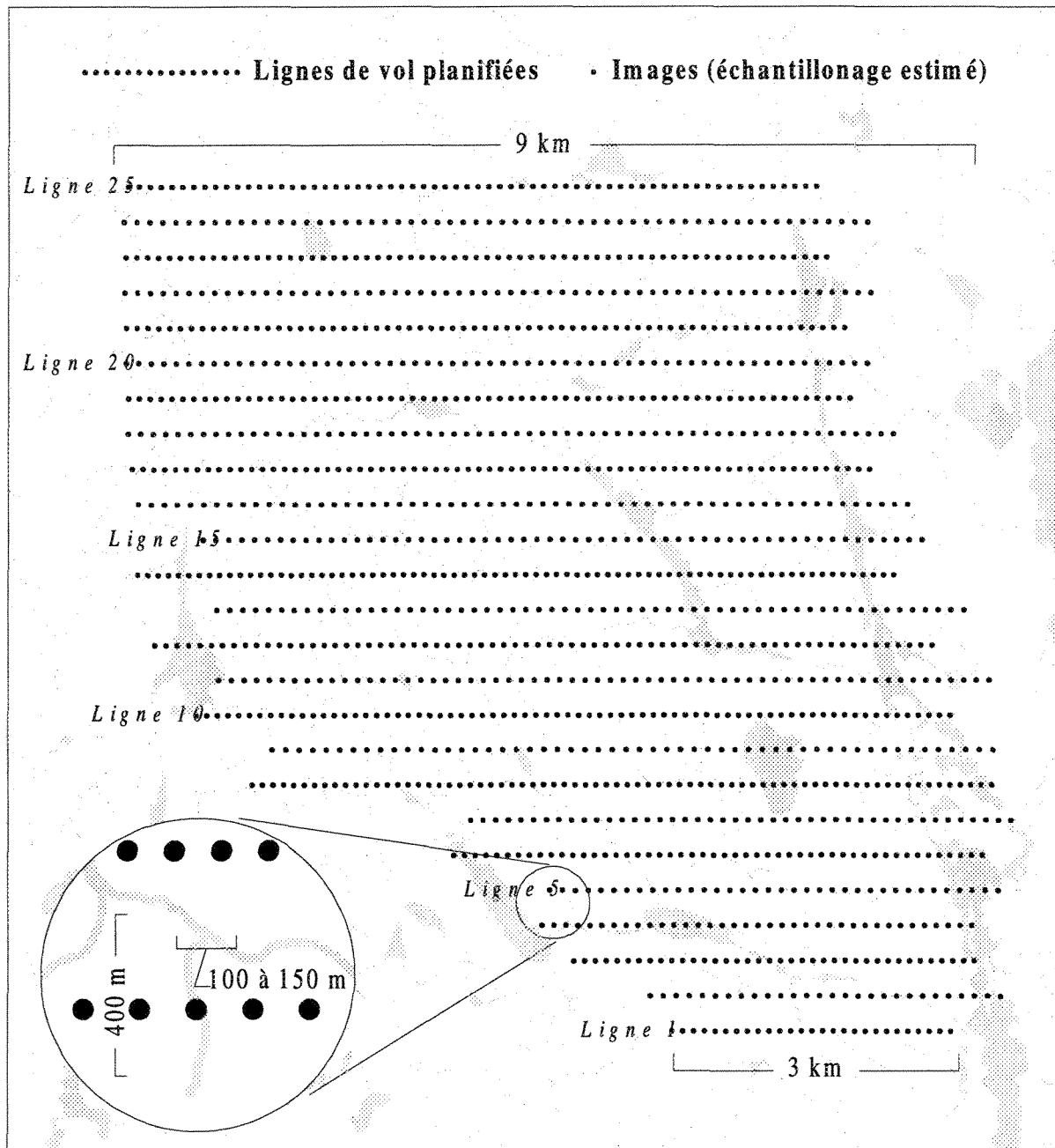


Figure 3.1 Plan d'expérience

3.4 Le prétraitement des images

On peut définir le prétraitement des images comme étant l'ensemble des opérations préliminaires qu'il est nécessaire d'appliquer aux images afin qu'elles soient dans un

format utilisable pour des fins d'interprétation. Les opérations de prétraitement sont très techniques et puisqu'elles sont effectuées manuellement, le temps nécessaire pour les achever est considérable. Ces dernières années, ces opérations de prétraitement étaient exécutées avec le logiciel Xicas. Il s'agit d'un logiciel fourni à l'achat du capteur qui assure des fonctions minimales de traitement d'images, dont leur numérisation. Toutefois, comme mentionné précédemment, un logiciel plus évolué, *Boréa*, fut développé au Laboratoire de Télédétection aérienne de l'UQAC. Il permet d'améliorer la performance de l'étape de prétraitement ainsi que d'effectuer certaines corrections que l'ancien système ne supportait pas. Le développement de ce logiciel est un premier pas vers la réalisation automatique du prétraitement des images vidéo.

Dans le cadre de ce projet, quatre étapes de prétraitement devront être réalisées:

1- La numérisation des images permettra d'extraire les images vidéographiques de la bande magnétoscopique S-VHS et de les sauvegarder en format numérique. Puisque cette recherche se penche sur l'analyse de secteurs forestiers, les images majoritairement composées d'eau, tel un lac ou une rivière, ne seront pas retenues.

2- La correction de l'aberration chromatique latérale permettra de corriger les défauts de netteté de l'image associés au fait qu'un même réglage du système optique est utilisé pour imager un vaste domaine spectral.

3- La mise en registre des images permettra de mettre en parfaite coïncidence les trois plans spectraux formant une même image.

4- L'extraction et la correction de l'information du GPS permettra de connaître la position du centre de chacune des images numérisées.

3.5 Le traitement des images

L'identification individuelle des tiges et l'évaluation de la densité forestière sont basées sur l'hypothèse qu'une séquence appropriée de traitements d'images permettra de reconnaître automatiquement les maxima locaux que forme le profil radiométrique des conifères dans une image infrarouge fausses couleurs. Des travaux se basant sur une approche similaire (Gougeon et Moore, 1989, Gougeon 1997a et Eldridge *et al.*, 1993) furent réalisés avec succès à partir d'images à haute résolution spatiale du capteur MEIS-II. Bien que la registration bande à bande et la qualité spectrale de l'imagerie de ce dernier capteur soient supérieures aux images vidéographiques, nous faisons l'hypothèse que l'imagerie vidéo permettra l'atteinte des objectifs.

La présence de maxima locaux dans l'imagerie s'explique en partie par la structure des conifères. En plus d'être la partie de l'arbre exposée le plus directement à la lumière solaire, à partir du point de vue du capteur, la cime correspond à la région de l'arbre où il y a la plus grande probabilité de voir une portion chlorophyllisée du résineux. La figure 3.2. montre une représentation en trois dimensions de la bande de luminance d'une image

infrarouge «fausses-couleurs» de conifères ainsi qu'une coupe radiométrique dans laquelle il est possible d'observer la présence de maxima locaux.

Un deuxième aspect méthodologique visera à caractériser la vigueur des tiges. Un arbre en santé produit plus de chlorophylle qu'un arbre moribond. En conséquence, sa réponse radiométrique dans la bande proche infrarouge sera intense et il apparaîtra dans les tons de rouge. D'autre part, le moribond apparaîtra dans les teintes de vert. Afin d'extraire l'information ayant trait à la vigueur des tiges, ces dernières caractéristiques de l'imagerie seront exploitées. Il s'agira donc d'une analyse de la teinte des tiges identifiées.

La séquence de traitements qui permettra d'identifier individuellement les tiges et de qualifier leur vigueur sera établie empiriquement. Elle sera composée de filtrations spatiales, de fonctions morphologiques, de conversions de modèles de couleurs et de tests logiques sur les images ... Le chapitre «*V. Résultats*» présentera la séquence de traitements retenue, celle qui permet d'atteindre les objectifs.

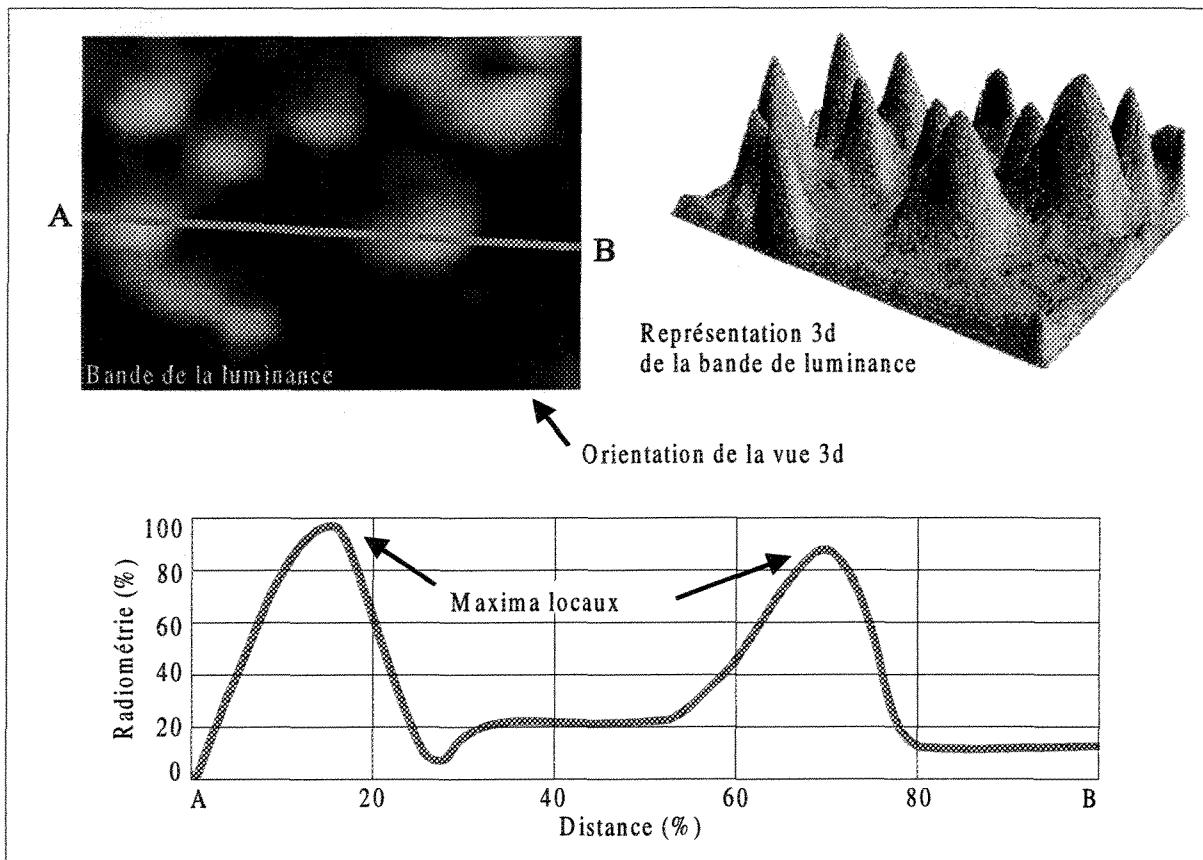


Figure 3.2 Coupe illustrant les maxima locaux de radiométrie d'une image de conifères.

3.6 Les placettes images

Afin de mesurer la performance du traitement retenu pour l'identification des tiges et d'évaluer l'influence de la densité forestière sur cette performance, nous effectuerons une analyse minutieuse des résultats générés par la séquence de traitements sur une trentaine d'images et ce, pour chacune des classes de densité forestière.

La première étape de ce processus de sélection se fera en répartissant chacune des images numérisées dans un groupe correspondant à leur densité forestière (A, B C et D). Nous retiendrons seulement les images dont l'attribut du groupement d'essence est le conifère. Afin de réaliser ces sélections, nous utiliserons les informations de la carte forestière et les résultats de la classification de l'imagerie Landsat présentée au chapitre 3. Enfin, la dernière partie du processus consistera à sélectionner aléatoirement trente images dans chacun des quatre groupes de densité.

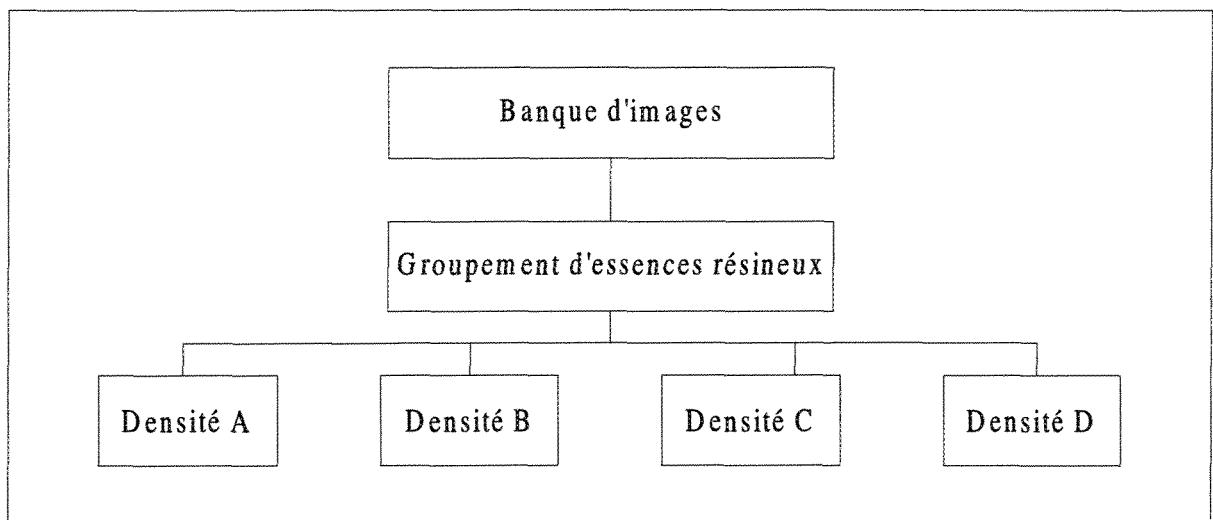


Figure 3.3 Organigramme des groupes d'images.

Puisque les tiges visibles dans ces images seront manuellement dénombrées par des «photos-interprètes» et que cette opération peut prendre plus d'une heure pour une seule image de densité A, il importe de restreindre le secteur de l'image à analyser. Pour ce faire, nous avons établi qu'une surface pratique d'interprétation aura une dimension de 135 x 135 pixels, puisque tel que vérifié empiriquement, elle peut être dénombrée en une dizaine de

minutes. Dans le reste de ce texte, nous appellerons *placette image*, une portion d'image ayant cette dimension de 135 x 135 pixels.

Le positionnement de ces placettes images, à l'intérieur des images retenues, sera subjectif. Bien que la superficie des images soit relativement restreinte (3,25 ha/image à 30 cm/pixel), des portions de différente nature peuvent simultanément s'y retrouver. Dans certains cas, en plus d'un secteur forestier, l'image sera composée d'un lac, d'un ruisseau ou d'un marécage ou encore, un chemin forestier ou une coupe la traverseront. Dans d'autres cas, l'image sera à l'intersection d'un peuplement de résineux et d'un peuplement de feuillus ou même, à celle de peuplements de densités forestières différentes.

En conséquence, pour satisfaire aux limites de cette étude, les placettes ne seront pas disposées sur des secteurs non forestiers tels qu'un chemin, un lac ou un marécage. Dans le cas où l'on observe plus d'une densité forestière sur une même image, la placette sera positionnée dans le secteur où la densité correspond à l'information ayant servi à établir le groupe de densité d'appartenance de l'image (voir l'organigramme de la figure 3.3). Enfin, lorsqu'un peuplement de feuillus se trouve dans l'image, la placette ne lui sera jamais attribuée; on privilégiera les secteurs résineux. Malgré ces contraintes, des expériences préalables ont montré qu'il est facile d'exécuter le positionnement de la placette.

Trois interprètes ayant reçu un entraînement adéquat dénombreront les tiges de chacune des placettes images. Ce dénombrement sera réalisé à l'aide du logiciel de manipulation d'images Corel Photo-Paint 7 en marquant d'un point de couleur bleue chacune des tiges identifiées. Une fonction permettant l'addition de ces points bleus sera implantée dans le logiciel *Boréa*. Cette façon de procéder permettra à l'interprète de ne pas avoir à se soucier de retenir le cumul pendant le dénombrement tout en assurant qu'un même arbre ne soit compter qu'une seule fois. Enfin, pour faciliter l'interprétation, un rehaussement linéaire sera appliqué aux images. Les bornes de cet étalement de contraste seront fixées au premier et dernier centile de l'histogramme des radiométries de la placette image. On conviendra que le dénombrement final d'une placette image correspondra à la moyenne du résultat obtenu par les trois interprètes.

Ce photo-dénombrement permettra de comparer la fiabilité des résultats obtenus par la séquence de traitements retenue à celle des relevés des photos-interprètes. Jusqu'à maintenant, la photo-interprétation demeure la référence en matière de savoir-faire en ce qui a trait à l'inventaire forestier sur de grandes superficies.

3.7 La détermination de la superficie des placettes images

Il faut garder à l'esprit que le nombre de tiges par placette image ne constitue pas à lui seule une détermination de la densité forestière. Il s'agit d'un nombre absolu qui peut potentiellement servir à l'établir si on le rapporte à la superficie de la placette image. Lorsque l'avion survole le territoire à une altitude fixe, localement, la dimension des pixels

dévie de sa valeur nominale en fonction de la topographie du territoire. Rappelons, comme présenté au chapitre II, qu'il existe une variation topographique de 210 m entre les extrêmes d'altitude du territoire étudié. Il s'ensuit que la hauteur de vol variera et que la dimension du pixel changera dans une proportion qui peut atteindre 20%, de part et d'autre, de sa valeur nominale (de 24 à 36 cm), selon la position survolée.

Puisque la dimension du pixel entre dans le calcul d'une superficie terrain, afin de ramener l'information de densité image à celle de densité forestière, il est important de connaître précisément la dimension du pixel moyen de chacune des images retenues. Afin de préciser la dimension du pixel, puisque l'altitude de l'avion est constante sur une même ligne de vol et que cette information est consignée par écrit pendant le survol, il ne nous reste qu'à déterminer l'altitude du terrain. Afin de la trouver, nous utiliserons l'information du modèle numérique d'élévation de terrain (MNET) présenté au chapitre II et de la position du centre de chacune des placettes. La précision à laquelle cette procédure permet de déterminer la taille locale des pixels dépend de l'erreur de positionnement de la carte utilisée pour générer le MNET et de la précision de pilotage relative au maintien de l'altitude de l'avion sur la ligne de vol. Étant donné la précision des cartes au 1:20 000 et que l'erreur verticale de pilotage est de l'ordre de plus ou moins 5 m, la dimension locale des pixels sera affectée d'une erreur relative de l'ordre de 1,5 % de sa valeur nominale, soit moins d'un demi-centimètre, si l'on néglige l'erreur associée à la méthode de génération du MNET. À partir de cette correction, nous pourrons calculer plus justement la superficie (\pm

3%) et lui attribuer le nombre de tiges dénombrées afin d'établir la densité forestière en terme de tiges/ha.

3.8 Les placettes de terrain

Afin d'établir la relation qui existe entre les tiges présentes sur le terrain et celles visibles sur l'image, trois placettes de terrain de 30 m x 30 m seront implantées et dénombrées. Certaines caractéristiques territoriales telles que la proximité d'une voie carrossable, une densité forestière homogène serviront de critères lors de l'implantation de ces placettes. Notamment, une placette de terrain sera implantée sur un site où il sera possible d'établir un lien sans équivoque entre l'image et le terrain. Cette condition sera atteinte lorsqu'il sera possible d'identifier, sur l'image et le terrain, au moins deux des quatre coins d'une placette.

Une fois cette condition rencontrée, les autres coins de la placette de terrain seront positionnés, son pourtour sera marqué d'un ruban orangé et sa position prélevée à l'aide d'un GPS différentiel. Cette attention, quant au positionnement des placettes, permettra de les géoréférencer avec précision. Procéder ainsi permet d'être certain que la région analysée sur l'image de la placette de terrain est exactement la même que celle implantée en forêt, si ce n'est de l'erreur instrumentale sur le positionnement.

Cette erreur repose sur la précision du GPS différentiel et sera de l'ordre du mètre. La conséquence de cette erreur sera l'inclusion et l'exclusion de tiges situées à proximité du pourtour de la placette. C'est afin de minimiser cet impact qu'il fut décidé d'implanter des placettes de terrain de grande dimension.

Le dénombrement de la placette se fera en marquant tous les arbres à l'aide de peinture orangée bio-dégradable. Le technicien qui effectuera le marquage caractérisera chacune des tiges en fonction du groupement d'essences, résineux ou feuillus, et de la strate d'étage⁵ de chacune des tiges. Ce technicien dictera, de tige en tige, l'information recueillie pour qu'elle soit consignée par écrit par un second technicien.

3.9 La densité forestière

Lorsque les résultats auront montré qu'une séquence de traitements est convenable pour rencontrer les objectifs de dénombrement et de qualification de la vigueur des tiges, celle-ci sera appliquée à chacune des images de la banque d'images. Pour cette étape, il ne sera pas nécessaire de restreindre la zone d'analyse à 135 x 135 pixels comme ce fut le cas pour les placettes images. Afin de sélectionner une portion de l'image respectant les limites de la méthode, nous retiendrons les mêmes critères de sélection qui ont permis de choisir les placettes images (non-sélection d'un chemin forestier, d'un lac ...). Cependant,

nous maximiserons la superficie d'analyse en fonction des caractéristiques territoriales de chaque image. Il résultera de cette opération une base de données incluant la position des images, la densité (tiges/ha) et l'information correspondant à la vigueur des tiges. Pour l'exercice, les strates d'étages furent regroupées.

⁵ Les strates d'étages inférieurs seront regroupées afin de ne retenir que trois groupes: les dominants, les co-dominants et les opprimés. Normalement, les tiges de cette dernière strate ne sont pas visibles à partir du point de vue d'un capteur aérien.

IV

INSTRUMENTATION

Le Laboratoire de télédétection aérienne de l'UQAC opère deux exemplaires d'un système d'acquisition d'imagerie dont le cœur est une évolution de la caméra Xybion MSC-02 SPL - 4076. Malgré quelques mentions dans la littérature (Thomasson *et al.*, 1994; et Frost, 1985), ce capteur demeure peu utilisé et ses caractéristiques sont méconnues de la communauté scientifique. Cette situation n'est pas étrangère à la performance mitigée de la caméra à sa sortie de production, laquelle requiert certaines corrections optiques et mécaniques avant de rencontrer ses spécifications de rendement. Conséquemment, nous profitons de ce texte pour faire une présentation générale du système et des modifications que l'équipe du Laboratoire de télédétection aérienne de l'UQAC lui a apportées au cours des trois dernières années.

Les principales composantes de ce système d'acquisition d'imagerie sont: une caméra MSC-02 SPL-4076 de la corporation Xybion Electronic Systems, un récepteur du système de positionnement global (GPS) Trimble TNL 2000 Approach, un marqueur informatisé Compix LP701, un magnétoscope S-VHS Panasonic AG-7400 et enfin, la carte de numérisation Xybion IMCAP-01.

4.1 Le capteur MSC-02 SPL - 4076

Le capteur vidéographique MSC-02 SPL - 4076 comporte quatre éléments qu'il importe de traiter séparément: son module caméra, sa roulette de filtres, ses filtres d'interférence et enfin, sa lentille. Subséquemment, nous aborderons certains aspects liés à la calibration et l'opération du système.

4.1.1 Le module caméra

Le capteur utilise la caméra à transfert de charges («charge-coupled-device», CCD) monochrome SONY XC-77 dont le détecteur, de format «2/3 de pouce», se compose d'une matrice de 768 x 494 éléments rectangulaires. Cependant, seulement 752 x 480 éléments servent à former l'imagerie. Malgré que le CCD soit entièrement exposé à tous les 1/60 s., un temps de 1/30 s. est nécessaire pour compléter l'ensemble de sa lecture (décharge sur la bande magnétoscopique). Pendant le premier 1/60 s, les lignes impaires du CCD sont déchargées, alors que ses lignes paires le sont dans le 1/60 s suivant. La caméra produit ainsi un signal vidéo monochrome de format RS-170 compatible avec les systèmes usuels d'enregistrement.

Le silicium utilisé comme matériau détecteur est sensible à l'énergie lumineuse dans le domaine spectral allant de 400 à 1 100 nm. La figure 4.1 illustre sa courbe de réponse spectrale. On y voit que son maximum de sensibilité s'obtient dans le vert, au voisinage de 540 nm. Essentiellement, l'ensemble de la partie visible du spectre électromagnétique a une réponse relative supérieure à 50% du maximum alors que dans la portion proche

infrarouge, la sensibilité du détecteur diminue très rapidement au point que le capteur soit difficilement utilisable au-delà de 900 nm. Dans la mesure où nous exploiterons la plage spectrale 515 - 840 nm pour cette étude, cela ne constitue guère un handicap. Tel qu'expliqué en détail à la section «*4.1.6 La calibration de la roulette de filtres*», un réglage minutieux pourra être pratiqué pour pallier à la perte de sensibilité dans le proche infrarouge.

Le capteur peut être exploité selon deux modes vidéo. Le mode champ permet l'acquisition simultanée de six bandes spectrales à une résolution de 752 x 240 pixels alors que le mode image autorise une résolution verticale de 480 pixels et l'acquisition simultanée d'un maximum de trois bandes spectrales. Le passage semi-permanent d'un mode à l'autre n'est pas simple puisqu'il implique d'exécuter des opérations de soudure sur le circuit électronique du module caméra. Toutefois, le matériel en mode image peut être exploité en mode champ au niveau du logiciel, ce qui permet d'utiliser à loisir trois ou six filtres. Dans le cadre de cette étude, puisque nous souhaitons obtenir des images à très haute résolution spatiale et que trois bandes spectrales suffiront à rencontrer nos exigences, nous emploierons le capteur en mode image.

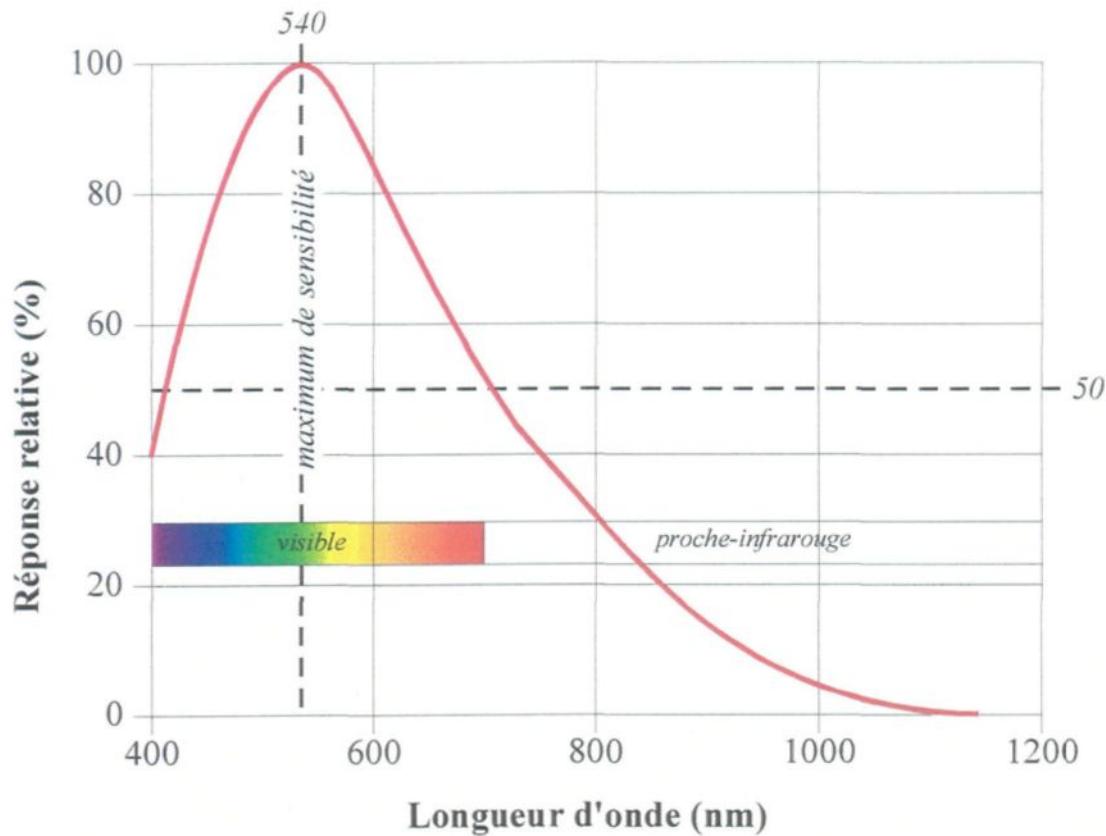


Figure 4.1 Réponse spectrale du CCD du capteur Xybion MSC-02 -SPL - 4076.
Adaptée de: Xybion Electronic Systems Corp., User's Manual, p. 2.

4.1.2 La roulette de filtres

L'originalité de ce capteur réside dans la stratégie adoptée par le manufacturier pour assurer l'acquisition de plusieurs bandes spectrales à partir d'un monocapteur. Une roulette, sur laquelle il est possible de monter jusqu'à six filtres d'interférence, tourne à 600 révolutions par minute dans un tronçon du faisceau convergent de lumière couvrant l'intervalle de 7 à 14 mm à l'avant du détecteur. Une carte électronique de synchronisation permet d'asservir la roulette de filtres à la lecture vidéo assurant ainsi l'acquisition d'une

séquence complète de six bandes spectrales en 1/10 s. La vue éclatée de la figure 4.2 montre la structure du capteur et met en évidence la roulette de filtres.

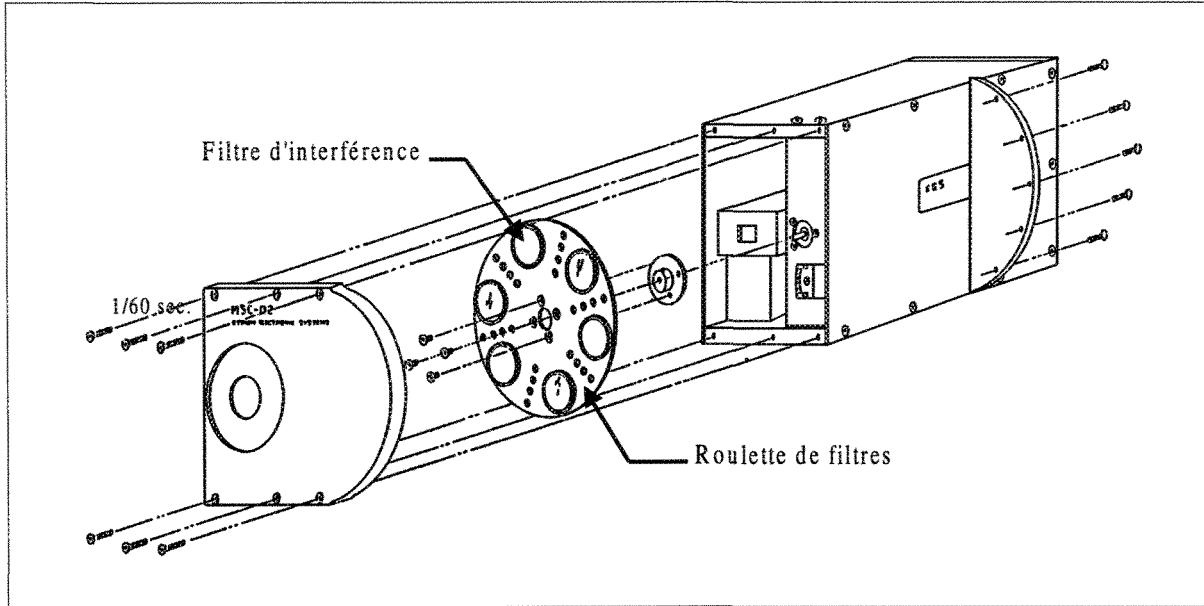


Figure 4.2 Vue éclatée du capteur Xybion MSC-02 SPL - 4076
Adaptée de: Xybion Electronic Systems Corp., User's Manual, p. 32.

4.1.3 Les filtres d'interférence

L'utilisation des filtres d'interférence en conjonction avec la roulette de filtres permet l'acquisition de sections bien précises du spectre électromagnétique. Ces filtres ont un diamètre de 2,54 cm et une épaisseur pouvant atteindre 0,64 cm pour certains d'entre eux. Plusieurs manufacturiers rendent disponible ce type de filtres et ce, pour la totalité du domaine spectral auquel est sensible le CCD du capteur vidéographique. Bien que différentes largeurs de bandes passantes soient disponibles pour des filtres d'interférence de même longueur d'onde nominale, l'expérience de l'équipe du Laboratoire de physique de l'UQAC a démontré que, dans les limites de sensibilité du capteur (18 lux), il devient

marginal de l'opérer avec des filtres de bandes passantes de l'ordre de 10 nm (Saoudi, 1997). Il vaut mieux utiliser des bandes passantes plus larges, de l'ordre de 50 nm et plus.

Dans cette étude, nous utilisons une composition de filtres qui permet d'approcher les caractéristiques du film photographique infrarouge fausses couleurs utilisé en photographie aérienne traditionnelle soit: un filtre vert centré à 550 nm dont la largeur de bande passante est de 55 nm, un filtre rouge, centré sur 650 nm dont la largeur de bande passante est de 60 nm, et enfin, un filtre proche infrarouge centré sur 800 nm dont la largeur de bande passante est de 86 nm.

L'examen des courbes de réponse spectrale des filtres d'interférence sélectionnés permet d'expliquer leur impact sur la sensibilité globale du capteur (figure 4.3). On y observe que leur transmissivité maximale est près de la longueur d'onde centrale et que, malgré l'utilisation d'une large bande passante, leur transmissivité est rapidement atténuée de part et d'autre de cette valeur, ce qui diminue leur performance. Également, on y observe que la bande passante des filtres est mesurée à la valeur de leur demi-transmissivité et que le filtre proche infrarouge, en plus d'avoir une plus large bande passante, transmet plus que les autres et possède deux maximums locaux de transmissivité. Cette dernière caractéristique lui confère un profil plus rectangulaire.

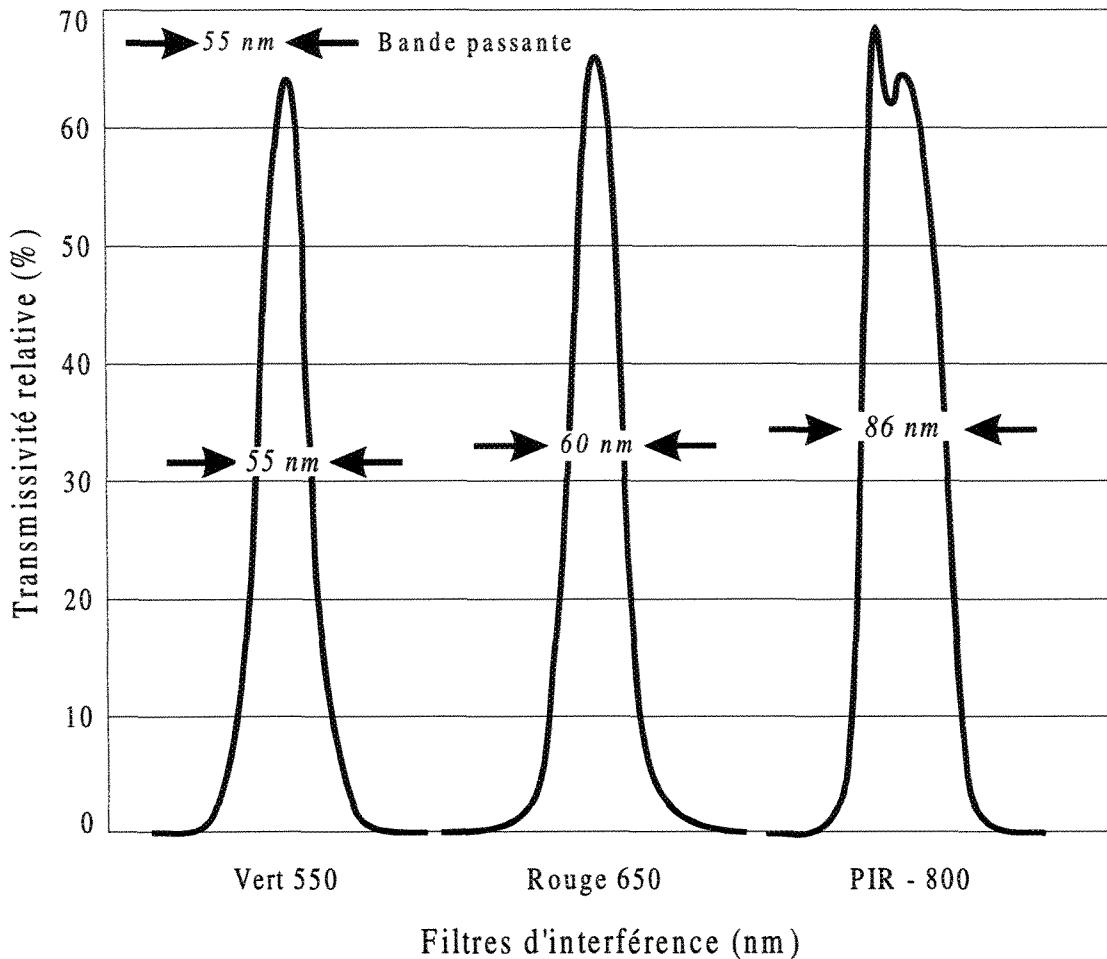


Figure 4.3 Courbes de transmissivité d'une combinaison de filtres d'interférence infrarouge fausses couleurs.

Adaptée de: Fiches de caractérisation des filtres d'interférence de Oriel inc.

4.1.4 La lentille

Le capteur est utilisé avec un objectif zoom Fujinon 12,5-75 mm, $f/1,4$.

Contrairement à des capteurs plus évolués pour lesquels il est possible de régler le signal acquis en affectant, par logiciel, le gain respectif de chacune des bandes spectrales utilisées, ce réglage, pour le capteur vidéographique, s'effectue par le contrôle de l'obturation de sa

lentille. Cette situation restreint le réglage du signal à une seule et même obturation pour les trois bandes acquises. La marge de manœuvre est donc très mince et la minutie accordée à la calibration de la roulette de filtres est d'autant plus importante.

La caractérisation de la lentille a permis d'établir des courbes de distorsion pour différentes valeurs focales. L'expérimentation a montré qu'à $f=20,3$ mm, qui est la focale planifiée dans ce projet, la distorsion de la lentille est inférieure à 2 pixels à l'extrême de son champ de vision et n'atteint jamais plus de 4 pixels (figure 4.4). Cette caractéristique est très appréciée puisque, si l'on néglige les distorsions géométriques liées au relief et à l'attitude de l'avion, les images sont essentiellement orthogonales et exemptes de distorsion optique.

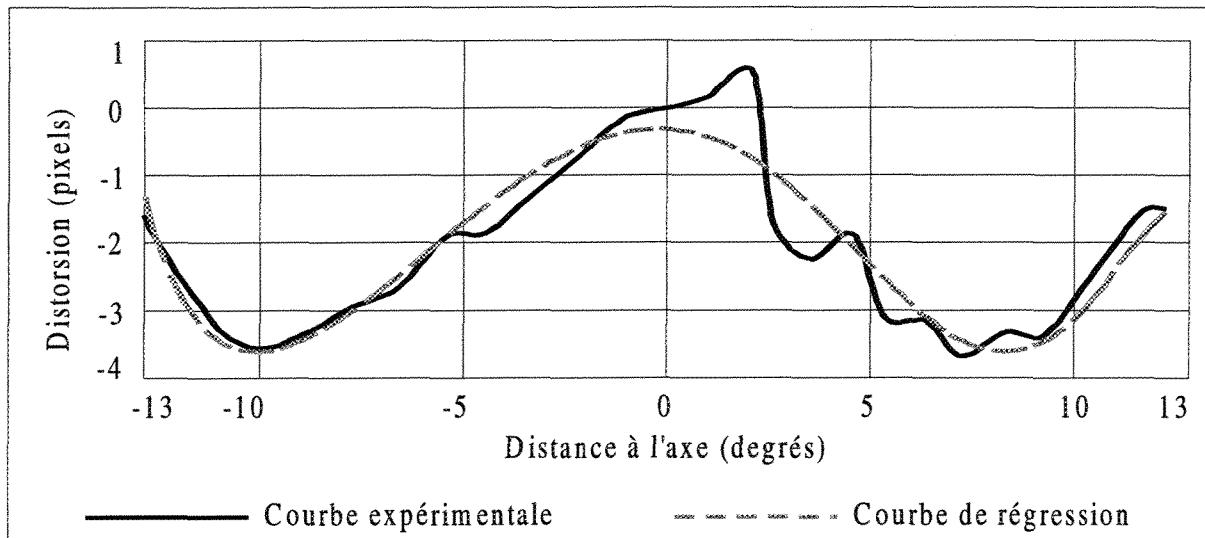


Figure 4.4 Distorsion de l'objectif zoom Fujinon pour une valeur de f de 20 mm.

4.1.5 L'aberration chromatique

Sous un autre aspect, l'utilisation d'un seul détecteur et d'une seule lentille pour imager simultanément plusieurs sections du spectre électromagnétique cause certains problèmes. En raison de leur localisation, les filtres d'interférence utilisés allongent le chemin optique et il en résulte que le plan focal est décalé de quelques millimètres vers l'arrière, en direction du CCD. Comme ce déplacement est principalement dépendant de la longueur d'onde et de l'épaisseur relative entre les divers filtres d'interférence, il devient impossible, sans intervention sur le design du capteur, d'obtenir un point de stigmatisme unique pour toutes les longueurs d'ondes utilisées. En conséquence, l'image obtenue sans cette intervention souffre d'un défaut de netteté lié à l'aberration chromatique. Verreault (1997) explique le phénomène et propose une méthode efficace pour corriger l'aberration chromatique longitudinale pour diverses configurations optiques de capteurs produisant de l'imagerie multispectrale à partir de détecteurs monochromes. Il décrit une technique permettant de corriger la position du foyer des filtres individuels en leur collant une lamelle de verre d'épaisseur appropriée. À partir des mesures d'aberration chromatique qu'il a effectuées pour une configuration spectrale donnée, Verreault (1997) calcule l'épaisseur critique des lamelles de verre. Cette méthode fut appliquée aux capteurs vidéographiques de l'UQAC, dans le cadre de nos travaux.

Cette technique ne permet toutefois pas de corriger l'aberration chromatique latérale. Il est toutefois possible de la corriger en redimensionnant l'image par les facteurs appropriés. En appliquant la correction, les images atteignent un niveau parfait de

registration, d'un coin à l'autre. Dans le cas où un objectif n'a pas été préalablement calibré, on peut déduire expérimentalement l'information de correction par l'orientation et la séquence du décalage des teintes.

4.1.6 La calibration de la roulette de filtres

Dans les sections précédentes, nous avons vu que plusieurs facteurs influencent la qualité de l'imagerie vidéographique. Les aspects relatifs à la géométrie et aux proportions de l'image sont solutionnés par les corrections d'aberration chromatique et par l'utilisation d'une lentille zoom à des focales pour lesquelles la distorsion géométrique est minimale. Quant à l'aspect radiométrie, nous avons discuté de la courbe de réponse du capteur, de la transmissivité des filtres d'interférence, de la sensibilité globale du module de caméra ainsi que du réglage unique de l'obturation. Au moment d'aborder les aspects relatifs à la correction de cette radiométrie, il faut considérer l'ensemble de ces facteurs.

Il est possible, en intervenant sur la roulette de filtres, de normaliser le signal venant des différentes bandes spectrales et conséquemment, d'appliquer une correction radiométrique globale au capteur. Afin de réaliser cette normalisation, il a été prévu, dans le design du système, d'affecter la réponse des filtres, et du même coup celle du capteur, en masquant une partie plus ou moins grande de leur surface. À proximité des orifices de la roulette de filtres, on retrouve des repères angulaires calibrés qui permettent de guider l'étape de masquage. Une procédure établie par Xybion Corp. System et corrigée par les

Laboratoire de physique de l'UQAC, permet d'intégrer la longueur d'onde du filtre, sa bande passante, sa transmissivité et la réponse du capteur afin d'établir l'angle de masquage approprié. Cette stratégie est fonctionnelle mais demande beaucoup de manipulations et de temps pour être mise en œuvre. Conséquemment, cette correction doit se faire en laboratoire, ce qui interdit tout changement de dernière minute. Il va de soi que masquer une partie de la surface des filtres diminue leur transmissivité, et dans le contexte où le capteur est peu sensible, son opération en est d'autant limitée.

4.1.7 Divers

Lorsque le capteur, dans sa version livrée par le manufacturier, est positionné à la verticale, comme c'est le cas lors d'un survol aérien, le rotor du moteur et la roulette de filtres bougent vers l'avant du capteur jusqu'à s'accoter contre un des paliers. Il s'ensuit une friction que le moteur synchrone de la caméra ne peut compenser adéquatement. La conséquence de cette friction est une mauvaise synchronisation entre la capture des images et la position, en rotation, de la roulette de filtres. Cette situation affecte grandement la qualité des images. Dans ces conditions celles-ci sont formées par une contribution non régulière de la radiométrie provenant de plus d'une des bandes spectrales disponibles. Ces images impures sur le plan spectral rendent impossibles leur utilisation pour des études précises de caractérisation de l'environnement.

Le problème de la friction est solutionné en installant un palier axial à rubis à l'extrémité de l'arbre de la roulette de filtres. La microsphère de rubis atténue le frottement en deçà des limites de couple perturbateur pour le moteur électrique et permet d'éviter cette désynchronisation.

4.2 Les accessoires et instruments périphériques du système d'acquisition d'imagerie

4.2.1 Le support de capteur

Un support de capteur a été construit par l'équipe du Laboratoire de télédétection aérienne de l'UQAC afin de supporter l'ensemble des systèmes d'imagerie qu'il utilise (capteurs MSC-02 SPL 4076, capteurs thermiques, appareils photographiques, etc.). Le support peut pivoter en tangage et en lacet afin de compenser les effets d'attitude et de dérive de l'avion. À cet effet, un indicateur de niveau est installé sur chacun des capteurs afin de diriger adéquatement la manipulation du support. Afin d'éliminer les vibrations à haute fréquence générées par le moteur de l'avion, le support repose sur quatre pattes de caoutchouc. Sa construction en aluminium le rend léger, un facteur non négligeable lors d'opérations aériennes.

4.2.2 Le système de positionnement global (GPS)

En plus d'assurer la navigation de l'aéronef le long des lignes de vol planifiées, nous recueillons l'information du GPS, via un port RS 422, afin de documenter la position centrale de chacune des images. Nous employons un récepteur GPS Trimble TNL 2000 -

Approach dans le mode normal de correction de position. Le récepteur met son information à jour à chaque seconde et ne fournit pas d'interpolation de la position entre ces périodes. À défaut de disposer d'un récepteur permettant les corrections différentielles sur la position, une stratégie de minimisation de l'erreur sur la position des images est présentée au chapitre «*V Résultats*».

4.2.3 Le marqueur informatisé

Le lien entre l'image et l'information de position provenant du GPS se fait par le biais d'un marqueur informatisé de modèle Compix LP701. Il permet d'encastrer sur l'image vidéo l'information relative à la position en latitude et longitude⁶, la date, l'heure ainsi que la route suivie par l'aéronef. Ce système, qui comporte une seule sortie vidéo, est connecté en série entre le capteur et l'enregistreur. Une de ses principales lacunes réside dans le fait qu'il génère une image de l'information de la position plutôt que de l'encrypter. Il s'ensuit qu'il faut manuellement extraire cette position afin de la convertir dans un format plus adéquat. La figure 4.5 nous montre une image de l'affichage de la position produit par le marqueur informatisé.



Figure 4.5 Format de l'information du marqueur informatisé.

⁶ L'affichage du marqueur informatisé présente les positions dans le format: degrés, minutes et 1/100 de minute.

4.2.4 L'enregistreur vidéo

Le magnétoscope AG7400 S-VHS de la compagnie Panasonic est utilisé pour effectuer les tâches d'enregistrement de l'imagerie produite avec le système. L'utilisation d'un enregistreur de type S-VHS est justifiée afin de recueillir le maximum de résolution possible. Bien que ce magnétoscope analogique ait une résolution horizontale de plus de 400 lignes TV, il constitue un des maillons faibles du système de l'UQAC et un des facteurs limitants vers l'utilisation d'un module caméra à plus haute résolution. Deux canaux audio sont disponibles pour documenter les opérations d'acquisition d'imagerie (lignes de vol en cours, altitude, température, vitesse, direction...). Cependant, jusqu'à maintenant, ces informations ont été recueillies sur papier.

4.2.5 Le système informatique

Les systèmes informatiques étant courants et très changeants, nous traiterons strictement de deux aspects spécifiques et essentiels à la réalisation des opérations d'acquisition d'imagerie. Premièrement, la carte d'acquisition numérique (ADC) IMCAP-01, gérée à l'aide du logiciel Xicas de Xybion, permet l'extraction des images de la bande magnétoscopique à des résolutions (horizontale x verticale) allant jusqu'à 752 x 480 pixels. Également, le Laboratoire de télédétection aérienne de l'UQAC implante présentement les routines qui permettront d'utiliser une carte d'acquisition plus évoluée. Cette dernière est livrée avec une librairie de développement qui la rend très flexible dans l'élaboration de scénarios où l'extraction des images est automatisée.

Pendant le déroulement d'un survol, le logiciel Xicas permet l'affichage, en temps réel, des histogrammes des bandes spectrales en cours d'acquisition, ainsi que la mesure radiométrique de cibles bien précises dans l'image. Il est donc l'outil qui permet l'ajustement du diaphragme de la lentille du capteur. Sous un autre aspect, la puissance disponible à bord des aéronefs étant limitée, nous devons opérer avec des moniteurs monochromes. Ceux-ci vont fréquemment consommer jusqu'à trois fois moins de puissance. L'absence de la couleur n'entrave en rien les travaux à exécuter pendant l'étape aérienne de leur réalisation.

V

Résultats

5.1 L'acquisition de l'imagerie

Comme planifié, deux survols furent nécessaires afin d'acquérir l'imagerie du site expérimental. Ces deux survols furent exécutés par conditions météorologiques favorables les mardi 11 et mercredi 19 juin 1996.

L'analyse des images a permis de déceler qu'une erreur technique était survenue lors du premier survol. Une mauvaise manipulation de la lentille a mené à la sélection d'une distance focale deux fois plus longue que celle planifiée. Il en résulte que les images des 15 premières lignes de vol ont une résolution spatiale nominale de 15 cm à l'encontre des 30 cm souhaités, à l'exception de la ligne numéro 3, qui fut reprise lors du second survol. Afin de limiter l'étude au cadre méthodologique planifié, les lignes dont la résolution spatiale des images est de 15 cm seront rejetées⁷.

La figure 5.1 présente les histogrammes de radiométrie des trois bandes spectrales d'une image vidéo type du site expérimental. On y observe que l'étalement spectral n'utilise

⁷ Au moment où l'erreur fut décelée, le deuxième survol était déjà complété et les images de ces lignes de vol étaient prétraitées.

pas de façon optimale la gamme dynamique disponible. Les images sont légèrement sous-exposées et il s'ensuit que l'information est près du niveau de bruit du capteur. Parfois, dans les parties sombres, elle est non disponible. Malgré ces impairs, en général, les images livrent une information pertinente et il sera possible de les exploiter pour caractériser la densité forestière et la vigueur des tiges.

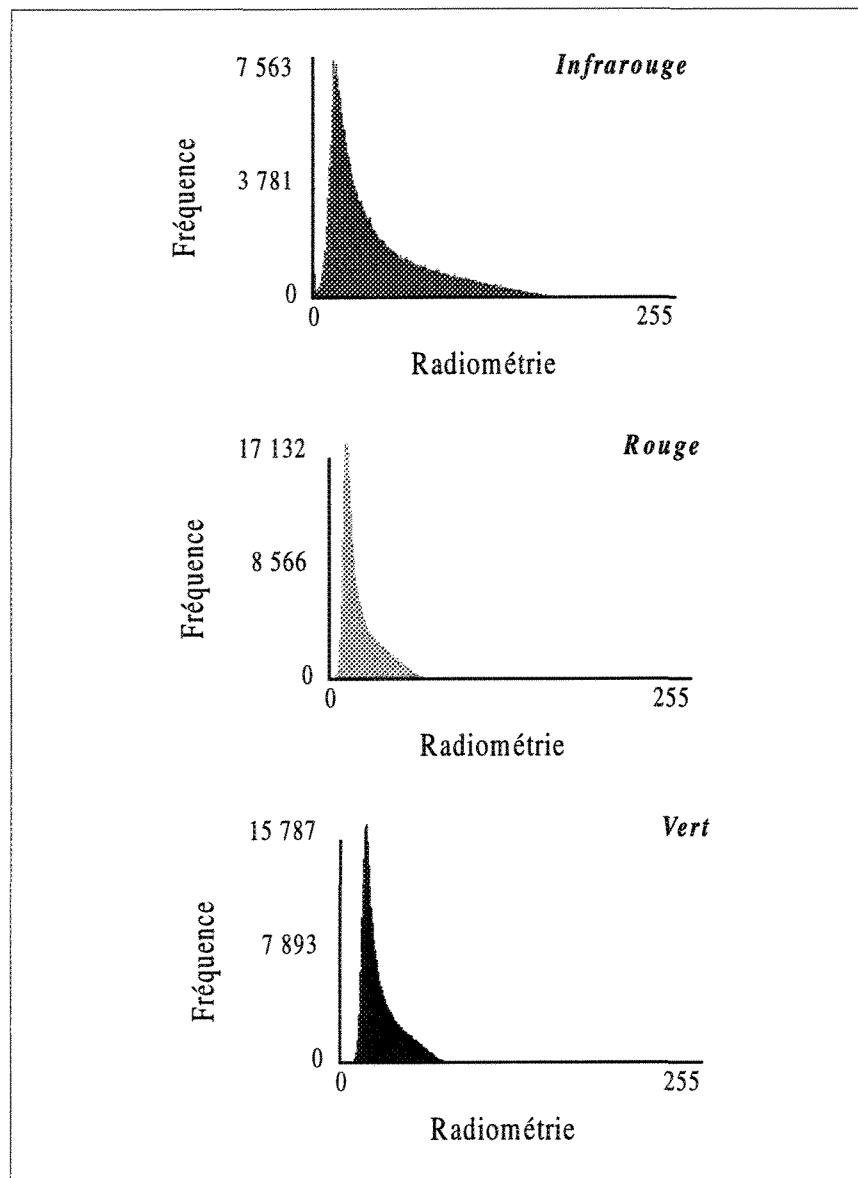


Figure 5.1 Histogrammes de radiométrie des bandes spectrales d'une image type.

5.2 Le prétraitement des images

5.2.1 La numérisation des images

Comme planifié, les images furent numérisées à tous les deux renouvellements de l'information GPS. Afin de conserver au mieux la précision donnée par celui-ci, il a été important de numériser la première image affichée suivant cette mise à jour de la position. En procédant ainsi l'erreur type absolue sur la position demeure essentiellement l'erreur nominale de 100 m sur l'information calculée par le récepteur GPS. L'effet de la distance de 2 m parcourue par l'avion pendant un trentième de seconde est négligeable sur l'erreur quadratique moyenne de la position⁸.

En considérant les deux résolutions spatiales acquises, cette étape de prétraitement a mené à la numérisation de 1 412 images. En moyenne, il fut possible de compléter la numérisation au rythme de 35 images/heure. L'annexe II traite du prétraitement des images. Sa première partie explique comment rencontrer les critères de précision précédemment cités, avec le système dont nous disposons. Également, elle décrit la nomenclature retenue pour sauvegarder les images, elle discute de la mise en registre des images, de l'enregistrement de la position du centre des images vidéo et enfin, de la correction de la position fournie par le GPS.

⁸ Cependant, sauf pour quelques rares cas, sur l'intervalle de quelques minutes que dure une ligne de vol, l'erreur type relative des images d'une même ligne se ramène à quelques

5.2.2 La correction de l'aberration chromatique

Les coefficients de rééchantillonage permettant de corriger l'aberration chromatique latérale furent déterminés empiriquement en calculant le rapport entre les distances séparant un même couple de points dans les trois plans spectraux. Cette distance fut établie à l'aide du module de mise en registre de *Boréa* qui permet de connaître l'adresse d'un pixel en ligne et colonne. Afin de minimiser l'impact de l'erreur associée au pointage des repères, ceux-ci furent sélectionnés au voisinage des coins diagonalement opposés d'un plan image.

Nous avons mentionné au chapitre traitant du système d'acquisition vidéo, que les éléments du détecteur de la caméra sont rectangulaires. En fait, il existe un rapport de 1,18 à 1 entre la dimension verticale et horizontale de ces éléments. Afin d'éviter les dégradations cumulatives de la radiométrie qu'entraînent des rééchantillonnages successifs, nous avons intégré la correction de cette différence de proportion à celle de l'aberration chromatique. Cette opération fut effectuée en multipliant le facteur de rééchantillonage vertical par 1,18. Les coefficients de rééchantillonage sont présentés au tableau 5.1. Ils correspondent à la moyenne des coefficients obtenus en évaluant trois images. Pour sa part, la figure 5.2 montre une portion d'une image du projet, avant et après que ne soit appliquée la correction d'aberration chromatique latérale et de rectification des proportions. On voit facilement que l'image non corrigée présente une irisation due au décalage des plans

mètres, de sorte qu'il est souvent possible de caler une ligne sur quelques objets cartographiés et d'approcher la précision de la carte (voir l'Annexe II).

spectraux. Comme on peut l'observer, la correction appliquée élimine complètement ce problème.

Tableau 5.1 Facteurs de rééchantillonage permettant la correction de l'aberration chromatique latérale et des proportions de l'image.

	Vert	Rouge	Infrarouge
Horizontal	1.003	1.002	1.000
Vertical	1.184	1.182	1.180

5.2.3 La mise en registre des images

La mise en registre a permis de mettre en parfaite coïncidence les trois plans spectraux composant une même image. Les défauts de registration entre ces plans sont inhérents à la stratégie de génération d'imagerie multispectrale du capteur. Puisque ce dernier est en mouvement lors de l'acquisition des images et que celles-ci sont acquises à partir d'une seule caméra, les trois plans spectraux sont décalés l'un de l'autre d'une distance équivalant au déplacement de l'avion pendant 1/30 s. Lorsque la vitesse de l'avion est de 185 km/h, comme ce fut le cas lors des survols, l'avion parcourt 1,71 m par trentième de seconde. À la résolution spatiale de 30 cm, cette distance équivaut à près de 6 pixels. Il existe donc, entre le premier et le dernier plan spectral acquis, un décalage longitudinal type de 12 pixels. Ce décalage s'ajoute à celui qui est associé à l'alignement imparfait entre les plans des trois filtres d'interférence du capteur et aux changements d'attitude de l'avion (erreurs de pilotage et turbulence).

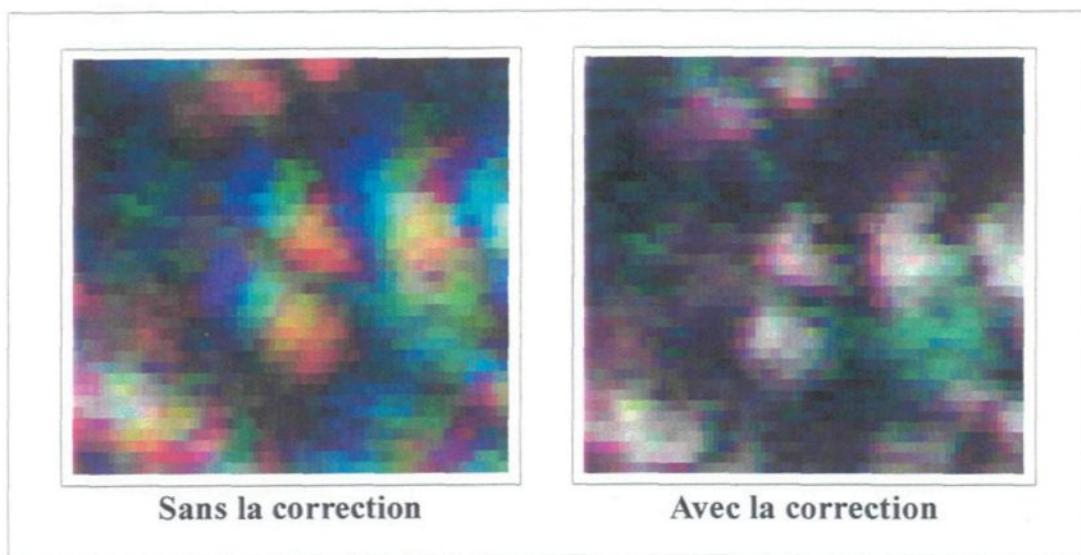


Figure 5.2 Effet de l'aberration chromatique latérale et performance de la correction.

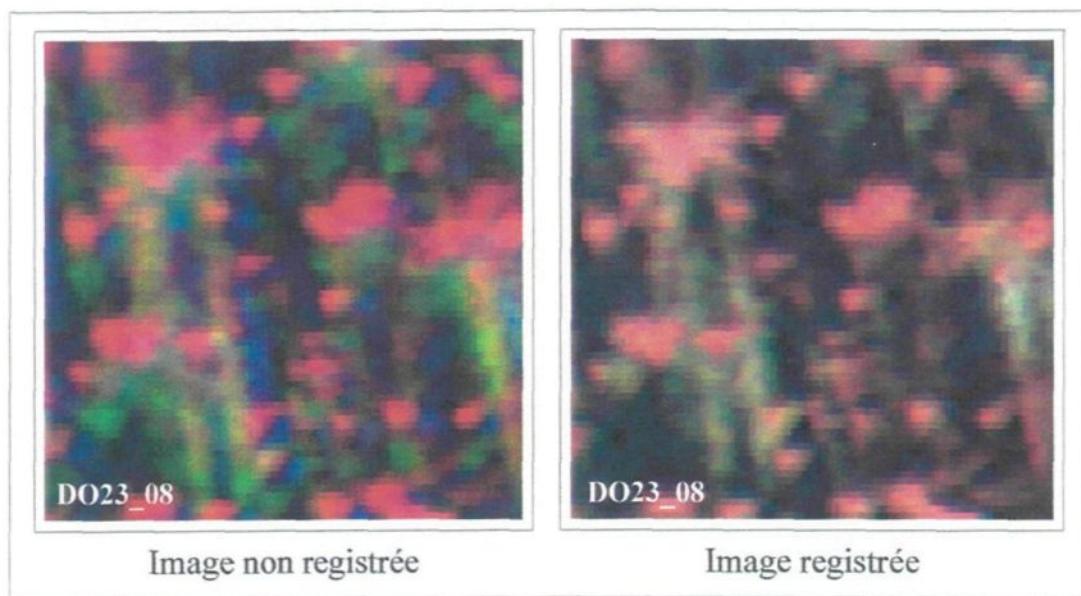


Figure 5.3 Version registrée et non registrée d'une même image de ce projet.

En pratique, la mise en registre est effectuée en appliquant une translation bidimensionnelle à deux des plans spectraux de l'image, en prenant le troisième comme référence. La correction fut réalisée au rythme d'une trentaine d'images/heure. La dernière partie de l'annexe II donne plus de détails sur la façon d'effectuer la mise en registre alors

que la figure 5.3 illustre l'effet de la correction sur une portion d'une image de la ligne numéro 23 de ce projet.

5.2.4 La correction des positions GPS

La procédure de correction des positions GPS décrite à l'annexe II fut appliquée à la position des images numérisées. Elle a permis de réduire de moitié l'imprécision sur la position des images. Il en résulte que la position du centre des images a pu être déterminée avec une erreur de moins de 50 m, soit typiquement 30 m rms. Enfin, à partir de ce raffinement de la position, il a été possible d'extraire automatiquement l'altitude de chacune des images à partir du MNET du site expérimental. Suite à cette étape, la position des images était donc disponible en «northing», «easting» et altitude.

5.3 La sélection des placettes images

Comme prévu, les images prétraitées furent réparties en quatre groupes en fonction de la classe de densité forestière cartographiée et du groupement d'essences. L'organigramme de la figure 5.4 reprend la structure de ces groupes en indiquant le nombre d'images qui fut assigné à chacun d'eux. Puisque les images dont la résolution spatiale de 15 cm furent prétraitées avant que ne soit décelée l'erreur de manipulation de la distance focale, nous les incluons à l'organigramme⁹.

⁹Toutefois, nous tenons à rappeler que les images dont la résolution spatiale est de 15 cm ne seront pas analysés.

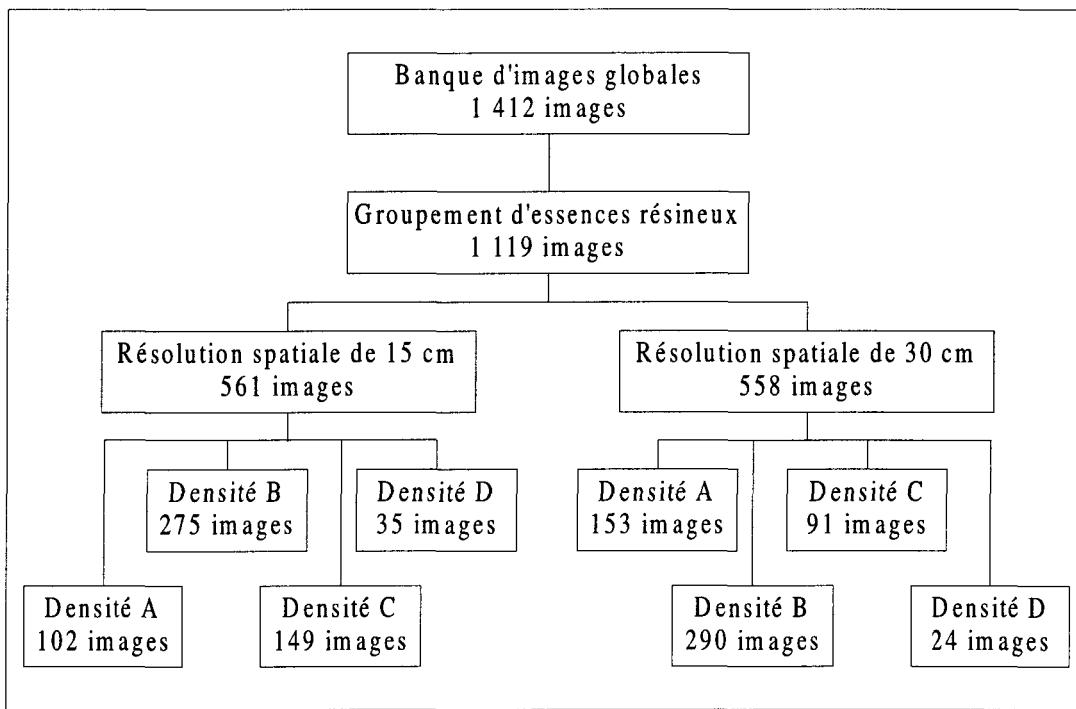


Figure 5.4 Organigramme des groupes d'images.

La figure 5.5 présente une image appartenant à la classe de densité B. Elle illustre la façon dont le positionnement des placette images de 135 x 135 pixels fut effectué et dans quelle mesure il respecte les critères de positionnement précédemment définis.

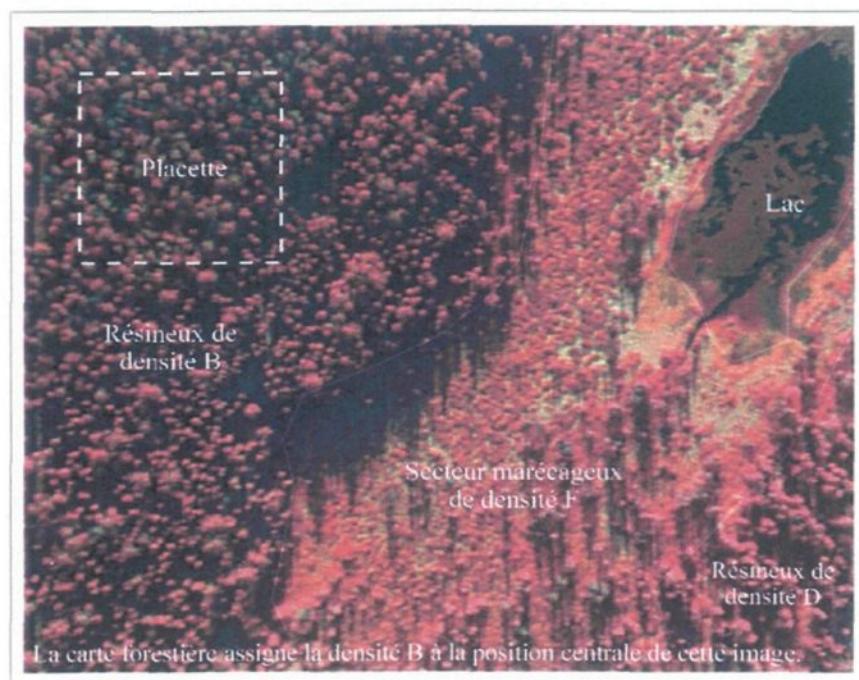


Figure 5.5 Positionnement des placettes images

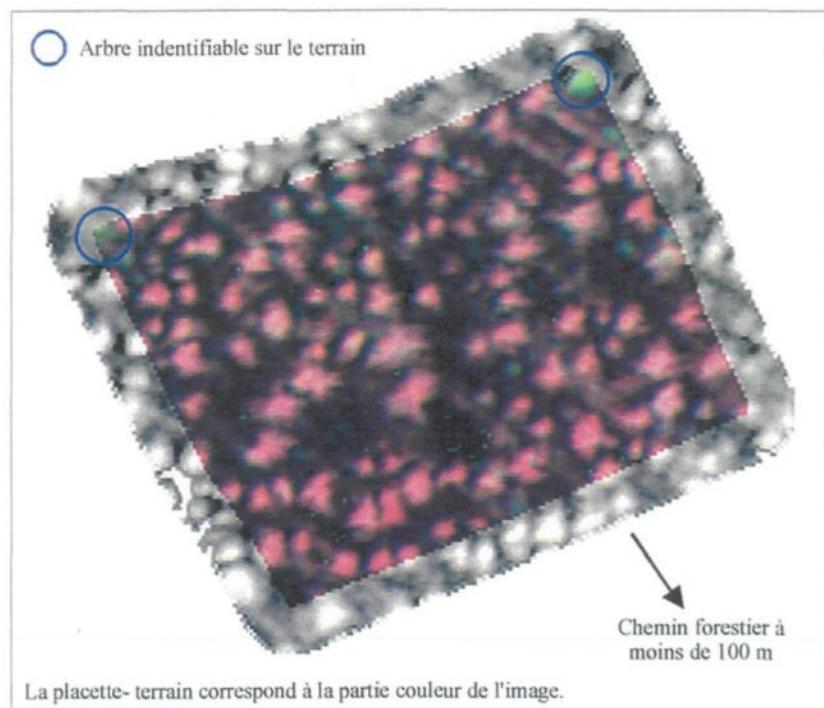


Figure 5.6 Placette de terrain

5.4 L'implantation des placettes de terrain

Pendant l'automne 1996, trois placettes de terrain furent implantées et dénombrées. Il a été possible de respecter les critères d'implantation définis de telle sorte que le lien entre l'image et le terrain fut positivement établi. La figure 5.6 présente une des trois placettes de terrain.

5.5 Le traitement d'extraction de la densité forestière

Cette section présentera la séquence de traitements retenue qui a permis de dénombrer les tiges dans les peuplements résineux, de qualifier leur vigueur et d'établir la densité forestière. L'ensemble des traitements présentés fut implanté dans le logiciel *Boréa* qui peut les exécuter séquentiellement et créer directement une base de données contenant les informations de positionnement des images ainsi que les paramètres forestiers qu'il aura été possible d'en extraire.

5.5.1 La conversion RVB à TLS de l'imagerie

Traditionnellement, c'est le modèle de couleur RVB (Rouge - Vert - Bleu) qui est privilégié pour présenter l'imagerie infrarouge fausses couleurs. Dans ce modèle, puisque la végétation réfléchit davantage la lumière solaire dans la bande proche infrarouge que dans les bandes visibles, la teinte qui prédomine dans les images forestières est le rouge.

D'autre part, généralement, les feuillus réfléchissent davantage la lumière solaire que les conifères et à l'intérieur d'une même essence et strate forestière, un arbre sain

réfléchit davantage qu'un autre souffrant de défoliation. Il s'ensuit qu'entre un arbre parfaitement sain et un autre moribond, il existe une multitude d'états de vigueur qui se traduisent par autant de possibilités quant aux proportions de rouge et de proche infrarouge caractérisant la signature spectrale de ces arbres. Entre ces deux extrêmes, la teinte des tiges variera du rouge au vert en passant par l'orangé et le jaune.

Un des objectifs de cette étude est d'identifier individuellement les tiges indépendamment de leur vigueur. La représentation de l'imagerie infrarouge fausses couleurs dans le modèle de couleur TLS (Teinte - Luminance - Saturation) est plus adaptée à l'atteinte de cet objectif puisque la bande de luminance de ce modèle intègre l'ensemble des tiges quelle que soit leur vigueur. D'autre part l'analyse de la bande de teinte est adaptée à la détermination de la vigueur des tiges puisqu'il existe un lien entre la vigueur et la teinte. Pour ces raisons, la transformation des images du modèle RVB à TLS est une étape importante de la séquence de traitement et ce fut le premier traitement appliqué aux images.

Il existe plusieurs approches pour effectuer la conversion RVB à TLS. Nous avons implanté dans *Boréa* le convertisseur basé sur le modèle à double hexaones tel que décrit dans Levkowitz et Herman (1993). Pour des fins de compatibilité avec d'autres logiciels utilisés, un déphasage angulaire fut appliqué dans la bande de teinte afin que la conversion génère les mêmes résultats que ceux obtenus avec ces autres logiciels. Le déphasage angulaire fut appliqué en ajoutant 120 degrés aux équations permettant d'obtenir la teinte.

Enfin, la bande de saturation n'étant pas utilisée dans cette étude, elle n'a pas été calculée. Les équations qui suivent permettent d'effectuer la conversion et furent implantées dans une fonction de *Boréa*.

En attribuant à la variable max la plus haute valeur parmi R, V et B et à min la plus basse:

$$Teinte = 2 + \frac{(V - B)}{(\max - \min)} * 42.5, \text{ si } R = \max \quad (5.1)$$

$$Teinte = 4 + \frac{(B - R)}{(\max - \min)} * 42.5, \text{ si } V = \max \quad (5.2)$$

$$Teinte = \frac{(R - V)}{(\max - \min)} * 42.5, \text{ si } B = \max \quad (5.3)$$

Le facteur 42.5 permet d'exprimer la position angulaire sur une échelle de 256 valeurs (8 bits) plutôt que 360 degrés. D'autre part, dans le cas où max est égal à min, la teinte est non définie.

$$Luminance = \frac{(\max + \min)}{2} \quad (5.4)$$

5.5.2 La filtration spatiale du bruit et du profil radiométrique des conifères

Afin d'atténuer le bruit électronique ainsi que d'éliminer les sous-maxima locaux à l'intérieur même du profil radiométrique d'un conifère, nous avons appliqué à la bande de luminance des images, un filtre passe-bas implanté dans une matrice 3 x 3. Tous les pixels de l'image étant successivement traités, la convolution se calcule en attribuant au pixel courant la moyenne pondérée telle que calculée par l'équation 5.5:

$$Résultat = \frac{\sum_{i,j=1}^3 (P_{(i,j)} \times I_{(i,j)})}{\sum_{i,j=1}^3 P_{(i,j)}} \quad (5.5)$$

où i, j représentent respectivement les indices de lignes et de colonnes de la matrice, où P représente le poids de l'élément i,j de la matrice, et $I_{i,j}$ représente la valeur radiométrique du pixel (i,j) de la matrice centrée sur le pixel couramment traité.

Traditionnellement, il existe deux implantations simples de cette convolution. Une première consiste à attribuer à la matrice des coefficients positifs dont la valeur est égale à un. Cette façon d'implanter la filtration est souvent dénommée un filtre de moyenne et fait abstraction de la distance entre le pixel traité et ses voisins. Un examen plus attentif d'une image permet de déceler, en raison de sa géométrie orthogonale, que la distance euclidienne séparant le centre d'un pixel au centre de ses voisins n'est pas égale pour chacun d'eux malgré qu'ils soient contigus. Elle peut être calculée par l'équation 5.6:

$$Distance_{euclidienne} = \sqrt{(X_c - X_v)^2 + (Y_c - Y_v)^2} \quad (5.6)$$

où X_c = la colonne du pixel central, X_v = la colonne du pixel voisin considéré, Y_c = la ligne du pixel central, et enfin, Y_v = la ligne du pixel voisin.

Dans cette étude une convolution de type passe-bas qui tient compte de cet effet de proximité du voisinage fut implantée. La figure 5.7 présente les coefficients de la matrice utilisée dans ce travail. On observe que les pixels les plus éloignés du centre, les coins, ont un coefficient de moindre importance alors que les pixels en croix, par rapport au pixel central, reçoivent un poids intermédiaire. Enfin, puisqu'il est le plus représentatif de la valeur radiométrique à la position considérée, le pixel central a le coefficient le plus important, soit quatre. Un tel filtre a la caractéristique de ne pas favoriser une orientation plus qu'une autre et sa filtration est donc non directionnelle.

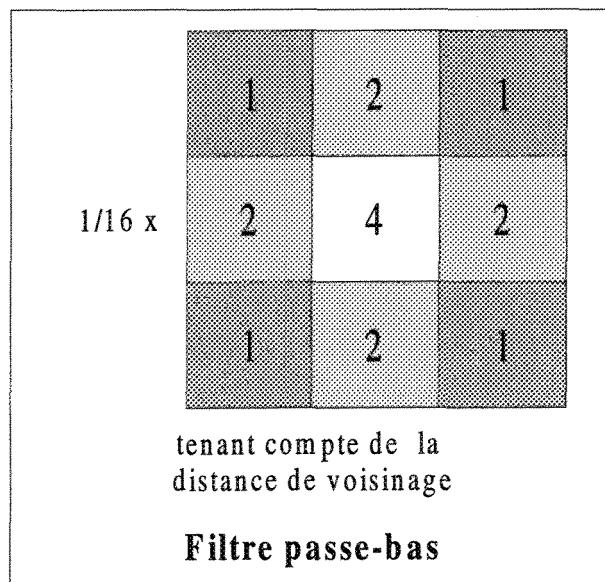


Figure 5.7 Filtre passe-bas.

La figure 5.8 montre l'effet de la filtration sur une portion de la bande de luminance d'une image et l'effet qui en résulte sur le profil radiométrique des conifères. Notamment, en ce qui a trait à la radiométrie, on observe que les amplitudes sont moindres et que les variations sont moins subites sur l'image filtrée que sur l'image brute.

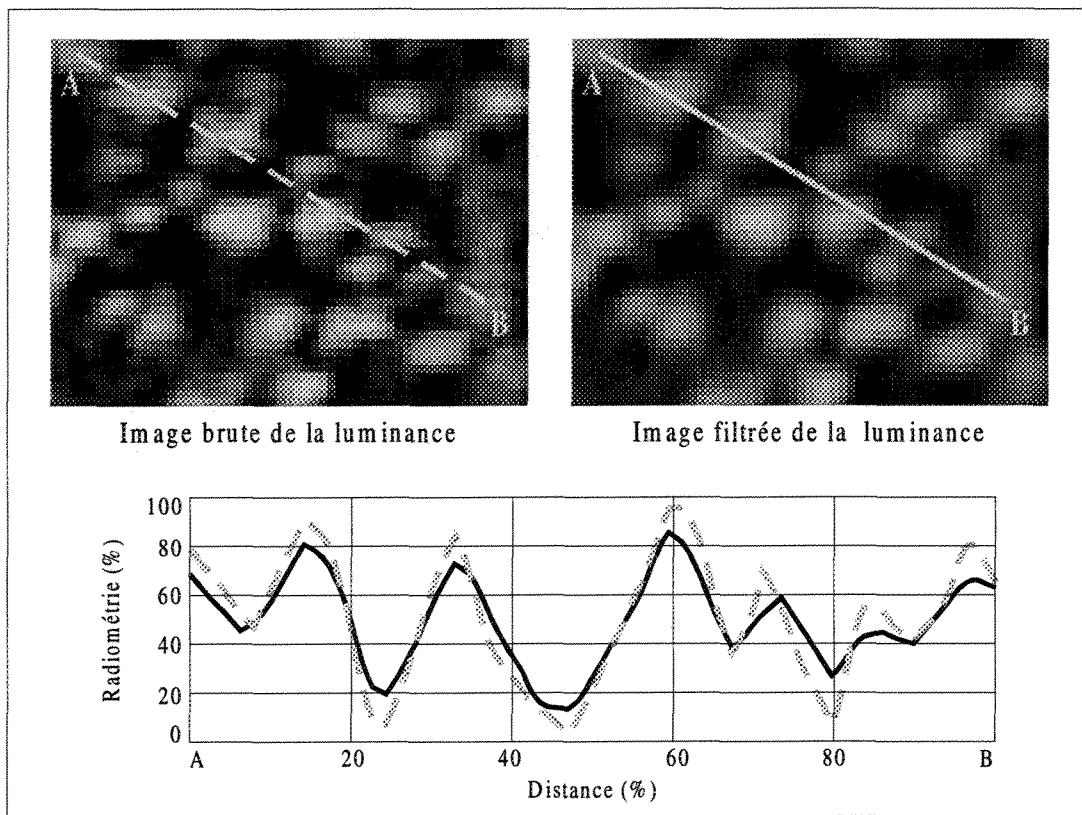


Figure 5.8 Effet de la filtration spatiale de type passe-bas sur une image de la luminance.

5.5.3 Le «seuillage» de l'imagerie

L'effet du filtre passe-bas n'a pas permis d'éliminer complètement le bruit, ni de masquer, bien que leurs radiométries ne soient pas dominantes, les secteurs de l'imagerie où le sous-bois forestier est apparent. Il n'a fait qu'atténuer les variations radiométriques

associées à ces deux phénomènes. Il y eut donc lieu d'éliminer l'information de l'image se trouvant en deçà d'un certain seuil radiométrique afin de la soustraire à l'imagerie et d'éviter qu'elle ne soit confondue, dans la mesure du possible, avec des maxima locaux correspondant à des tiges.

Le «seuillage» fut implanté dans *Boréa* sous la forme d'un test conditionnel du type *si...alors*, par lequel tous les pixels de l'image sont séquentiellement traités. Le seuil fut empiriquement déterminé et fixé à une valeur de 20 pour ce jeu de données.

5.5.4 L'identification des maxima locaux

Afin de trouver les maxima locaux d'une image de résineux, une fonction de détermination du maximum absolu fut implantée dans *Boréa* sur la base d'un test conditionnel. Littéralement, cette fonction peut s'exprimer comme suit: *si* le pixel central d'une matrice 5 x 5 est celui dont la valeur radiométrique de la matrice est la plus élevée ou égale à celle-ci, ce pixel est un maximum local et *alors*, il faut le copier dans l'image résultat. En le copiant dans l'image résultat, préalablement initialisée à 0, sa radiométrie est altérée en lui attribuant une valeur de 255. Ainsi, bien que le format de l'image résultat soit de «8-bits», de par la nature de son contenu, 0 ou 255, celle-ci peut être considérée comme étant binaire.

Il est arrivé fréquemment qu'un maximum local soit constitué par un groupe de pixels contigus de même valeur radiométrique. Dans ce contexte, afin d'extraire l'ensemble des maximums locaux, il fallut implanter la condition du test de la fonction sous la forme d'une inéquation de type *plus grand ou égale à*. Cette façon de procéder a obligé un traitement ultérieur de l'image appelé «érosion». Il a comme objectif de réduire à un seul pixel les groupes de pixels appartenant à une même tige.

L'image résultant de cette fonction a l'aspect d'une planche de points et de groupes de points, où chacun de ceux-ci représente un maximum local. En raison des caractéristiques des images forestières et du profil radiométrique des conifères, on peut affirmer que ces maxima locaux correspondent essentiellement à des tiges. La figure 5.9 montre une portion d'une image résultant de ce traitement ainsi que la juxtaposition de cette même section d'image à sa bande infrarouge. On peut y voir que la majorité des tiges sont résolues et que les maxima locaux se trouvent à la position de la cime. L'image montre également quelques maxima locaux constitués de groupes de pixels.

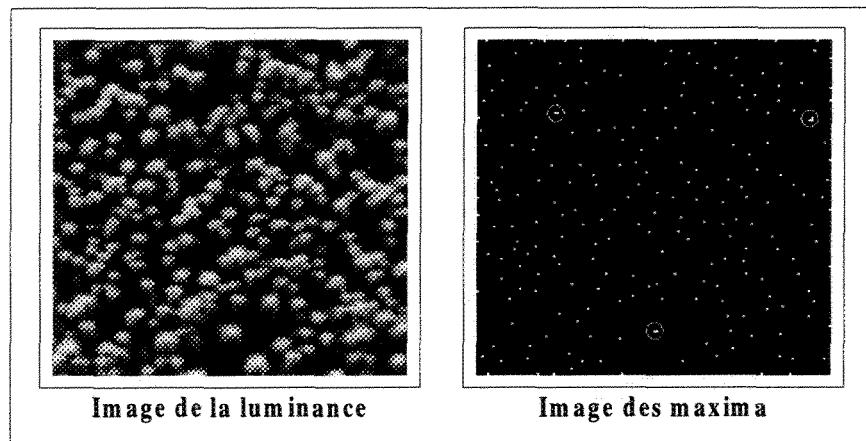


Figure 5.9 Les maxima locaux d'une image vidéographique de conifères.

5.5.5 L'érosion des maxima locaux

L'érosion est une fonction morphologique de base. Dans ce travail, elle fut utilisée afin de réduire à un seul pixel une tache formée par un groupe de pixels contigus. Selon Gonzalez et Woods (1993), l'érosion d'une image A, par un élément structurant B, peut se définir comme étant l'ensemble des points x tel que B, par la translation de x, est contenu dans A. Mathématiquement, cet énoncé s'exprime par l'équation 5.7:

$$A \oplus B = \{x | (B)_x \subseteq A\} \quad (5.7)$$

Pratiquement, comme le montre la figure 5.10, l'érosion d'une tache carrée élimine un pixel sur le pourtour de la tache. En conséquence, il a fallu appeler récursivement la fonction jusqu'à ce que toutes les taches soient réduites à un seul point.

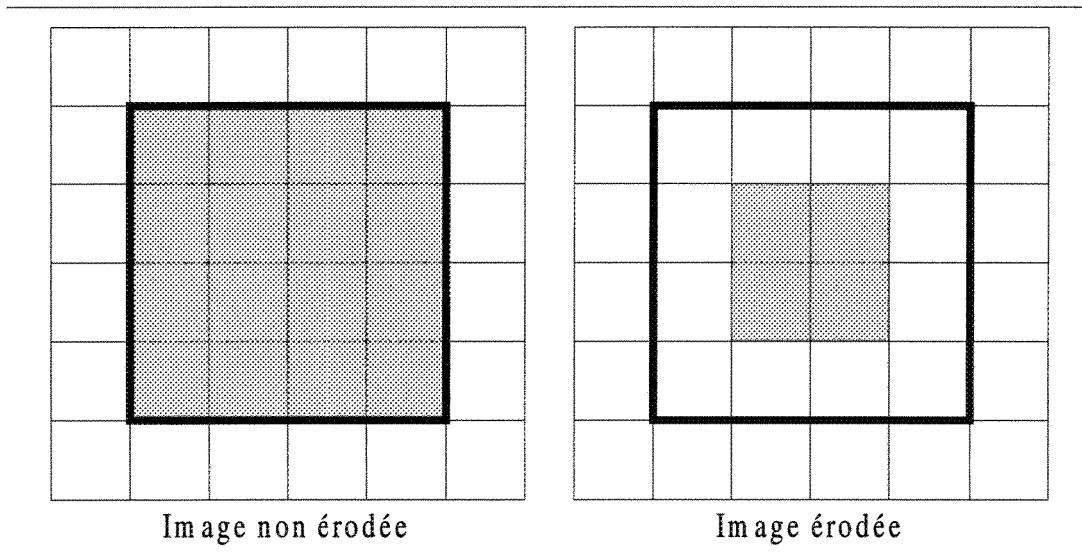


Figure 5.10 Effet de l'érosion sur une tache carrée
Adaptée de: Gonzalez et Woods, Digital Image Processing, p. 523.

De plus, puisque les taches n'ont pas toutes la même dimension, il a été nécessaire d'implanter deux niveaux de condition d'arrêt à la fonction. Une première agit localement et permet d'éviter qu'une tache plus petite que les autres ne disparaisse complètement alors que globalement, la fonction n'a pas terminé son travail. Il s'agit d'un test conditionnel qui permet de valider si l'érosion doit être effectuée ou non. Le test, du type *si...alors* est le suivant: *si* les voisins du pixel central d'une matrice de dimension 3 x 3 ont tous une radiométrie nulle *alors* l'érosion ne doit pas être appliquée sur ce pixel. Indépendamment de la première condition d'arrêt, lorsque l'érosion a été appliquée sur une section de l'image, un compteur d'actions fut incrémenté. Il a permis d'activer la deuxième condition d'arrêt, celle qui fait l'interruption de l'appel récursif de la fonction. Lorsque aucun pixel de l'image n'est modifié par la fonction, ce qui arrivera seulement lorsque toutes les taches auront été réduites à un pixel, la valeur du compteur d'actions est réinitialisée à zéro. Un test conditionnel a vérifié le statut de cette variable et lorsque sa valeur était nulle, la fonction s'interrompait.

5.5.6 Le dénombrement des tiges et l'évaluation de la vigueur des tiges

À ce stade du traitement, il n'y a eu qu'à additionner l'ensemble des points de l'image érodée pour connaître le nombre de tiges présentes dans l'image. Cette opération fut exécutée par une fonction de cumul implantée dans *Boréa*. Pour obtenir la densité forestière sous la forme de tiges par hectare, la superficie de l'image fut rapportée à ce cumul.

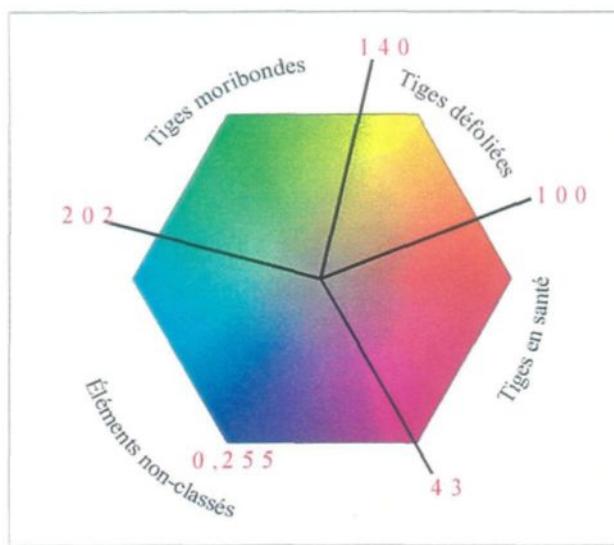


Figure 5.11 Domaine de teintes des classes de vigueur des tiges

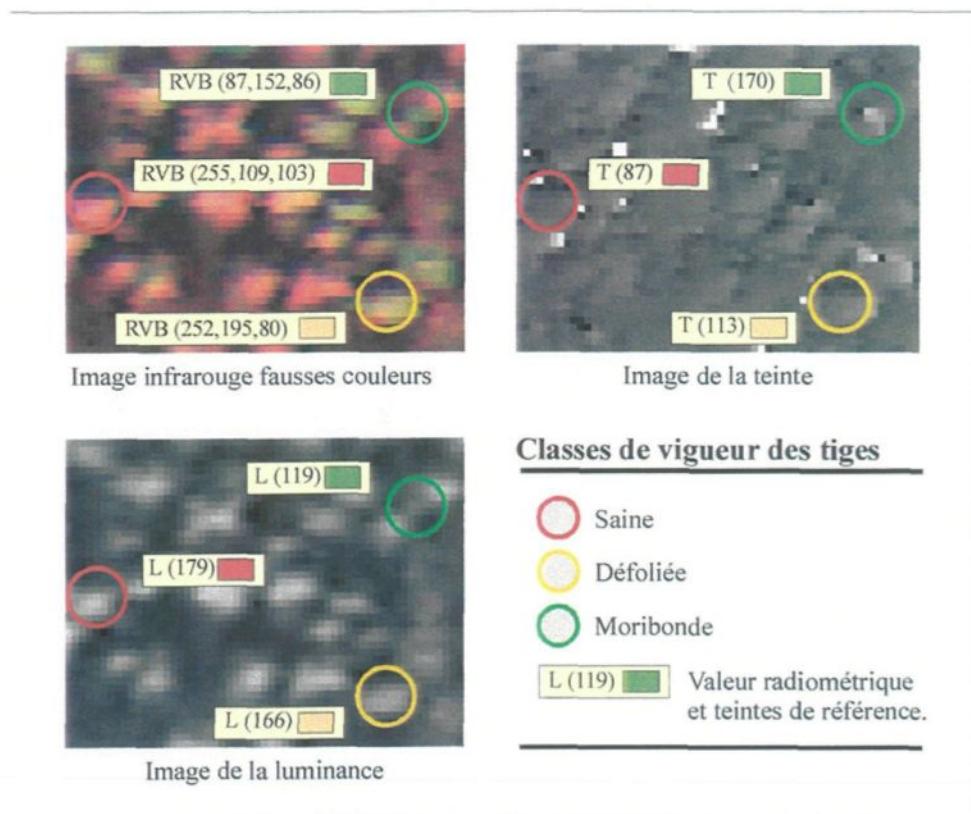


Figure 5.12 Individus appartenant aux classes de vigueur et leur valeur radiométrique dans les modèles de couleurs RVB et TLS.

Au fur et à mesure que les tiges furent comptabilisées, leur teinte fut analysée en évaluant leur valeur radiométrique à l'adresse image leur correspondant dans la bande de teinte. Cette analyse a permis d'évaluer la vigueur des tiges et de les regrouper en trois catégories: les tiges en santé, les tiges défoliées et enfin, les moribondes. La figure 5.11 montre les domaines de teintes ayant servi à classifier la vigueur des tiges. Pour sa part, la figure 5.12 présente les bandes de luminance et de teintes d'une image infrarouge fausses couleurs. Il est possible d'y observer des conifères appartenant à chacune des trois classes de vigueur établies. On voit également que les individus retenus ont une radiométrie similaire dans la bande de luminance alors que, dans la composition RVB, cette dernière était variable d'une bande spectrale à l'autre. Dans l'image de la teinte, on observe que les radiométries sont relativement distantes, contrairement à ce qu'on peut observer dans une même bande de la composition RVB.

5.6 L'analyse des placettes images

Les quelque 114 placettes images dont la résolution spatiale est de 30 cm furent dénombrées manuellement par trois interprètes après que ceux-ci eurent reçu les consignes d'usage et un entraînement adéquat. Ces mêmes placettes images furent automatiquement dénombrées en appliquant sur chacune d'entre elle, la séquence de traitement précédemment décrite. Le tableau 5.2 présente les résultats obtenus tant par l'algorithme que par les interprètes et ce, pour chacune des quatre classes de densité étudiées. La colonne «Moyenne des interprètes» de ce tableau présente le dénombrement moyen obtenu

par les trois interprètes. Cette donnée fait office de référence pour évaluer la performance de l'algorithme.

Tableau 5.2 Résultats par classe de densité

Densité	Paramètres statistiques	Moyenne des interprètes (tiges)	Dénombrement de l'algorithme (tiges)	Erreurs relatives (%)	Erreurs quadratiques moyennes (%)
A	moyenne	236,2	230,7	-2,2	4,0
	écart-type	40,1	36,0	3,3	
	maximum	338,3	312,0	3,7	
	minimum	167,3	165,0	-9,9	
B	moyenne	173,6	176,0	1,6	8,5
	écart-type	27,4	28,7	8,4	
	maximum	240,3	237,0	25,4	
	minimum	109,7	112,0	-14,6	
C	moyenne	171,0	185,6	9,5	13,7
	écart-type	41,5	40,3	9,8	
	maximum	247,0	249,0	30,3	
	minimum	90,7	98,0	-8,3	
D	moyenne	133,8	185,2	42,3	50,5
	écart-type	30,1	33,8	27,7	
	maximum	179,3	252,0	111,5	
	minimum	85,7	116,0	-2,1	

La dernière colonne présente l'erreur quadratique moyenne. Elle est calculée en traitant les écarts existants lorsqu'on compare le dénombrement de l'algorithme à celui de la moyenne des interprètes. Notamment, on peut voir que plus la densité forestière est élevée, plus le dénombrement de l'algorithme est près de celui des interprètes.

Pour les placettes images de densité A, cette erreur est de 4,0 % alors qu'elle est respectivement de 8,5 %, 13,7 % et 50,5 % pour les classes de densité B, C et D. La séquence de traitement livre donc des résultats comparables à ceux d'un interprète pour les

classes de densité A, B et C. Toutefois, il y a un décrochage de la méthode qui la rend inapplicable pour dénombrer les tiges de la classe de densité D.

La séquence de traitement livre des résultats qui, en moyenne, sous-estiment le nombre de tiges pour la classe de densité A. À l'inverse elle surestime le nombre de tiges pour les densité B, C et D. Cette surestimation est presque nulle pour les images de la classe de densité B alors qu'elle augmente rapidement pour la classe de densité D.

Puisque le dénombrement moyen entre les interprètes fait office de référence, il importe d'évaluer, d'un interprète à l'autre, la variation du nombre de tiges dénombrées. Le tableau 5.3 présente l'écart relatif à la moyenne du dénombrement entre les trois interprètes. On y observe que plus la densité est élevée, plus le dénombrement entre les trois interprètes est similaire. Par exemple, pour la densité A, sur 30 placettes images, il y a moins de 2 % d'écart relatif entre le dénombrement des interprètes. Pour tous les cas, l'écart entre les interprètes est inférieur à l'écart qui existe entre le dénombrement de l'algorithme et celui du dénombrement moyen des interprètes. Bien que l'écart relatif entre les interprètes ne soit pas important, il a été possible d'observer que l'interprète 1, celui des trois qui avait le moins d'expérience, sous-estimait systématiquement le nombre de tiges comparativement aux deux autres interprètes.

Enfin, mentionnons que c'est pour la classe de densité D, que l'écart relatif entre le dénombrement des interprètes est le plus important. Il est en moyenne de 3,79 % et a atteint un maximum de près de 9 % pour une des placettes.

Tableau 5.3 Écart relatif de dénombrement entre les interprètes

Paramètres statistiques	Densité A (%)	Densité B (%)	Densité C (%)	Densité D (%)
moyenne	1.65	2.88	3.26	3.79
écart-type	1.32	1.54	1.11	2.78
maximum	4.91	5.86	5.95	8.92
minimum	0.00	0.24	0.65	0.29

5.7 Les omissions et commissions de l'algorithme

Les résultats précédemment présentés ne tiennent pas compte des erreurs d'omission et de commission produites par l'algorithme de traitement. Ils reflètent les résultats bruts fournis par la séquence de traitements. Pourtant, en pratique, ces erreurs d'omission et de commission se compensent partiellement et peuvent même, à la limite, s'annuler. Pour mesurer plus précisément la performance de la séquence de traitements, une analyse plus poussée des omissions et des commissions fut accomplie pour l'ensemble des placettes images. Pour ce faire, le dénombrement de l'interprète 3, celui des trois qui a le plus d'expérience avec l'imagerie vidéographique en milieu forestier, fut retenue. Le tableau 5.4 présente la synthèse des résultats découlant de cette analyse.

Tableau 5.4 Les omissions et les commissions de l'algorithme par classe de densité forestière

Classe de densité	Commissions de l'algorithme (%)	Omissions de l'algorithme (%)	Erreur quadratique moyenne (%)
A	1,76	4,87	5,17
B	5,92	6,19	8,56
C	10,77	3,63	11,37
D	53,65	3,79	53,78

Le tableau 5.4 montre que les erreurs de commission sont au minimum lorsque la densité forestière est élevée (densité A) alors qu'elles augmentent rapidement avec la diminution de la densité. Cette erreur culmine à plus de 50% (densité D) et explique, pour ce cas, la majeure partie de l'erreur quadratique moyenne. D'autre part, l'erreur relative d'omission est plutôt constante dans toutes les classes de densité. Elle varie entre 3,65 % et 6,19 %. En comptabilisant indépendamment les erreurs d'omission et de commission, au moment de calculer l'erreur quadratique moyenne, cette dernière est plus élevée si on la compare aux résultats bruts que livre la séquence de traitements.

La courbe de la figure 5.13 présente séparément les erreurs relatives de commission et d'omission en fonction du nombre de tiges pour les 114 placettes images analysées. On peut y voir plus distinctement que les omissions (vert) augmentent légèrement avec le nombre de tiges par placette alors que la tendance, pour ce qui est des erreurs de commission (rouge), est une diminution rapide avec l'augmentation du nombre de tiges par placette image.

5.8 L'analyse de la vigueur des tiges

Pendant l'exécution de la séquence de traitements, chacune des tiges identifiées dans les 114 placettes images fut analysée pour qualifier sa vigueur. Comme il fut planifié, chacune d'entre elles fut répartie dans la classe de vigueur appropriée en fonction des domaines spectraux établis (voir la figure 5.11).

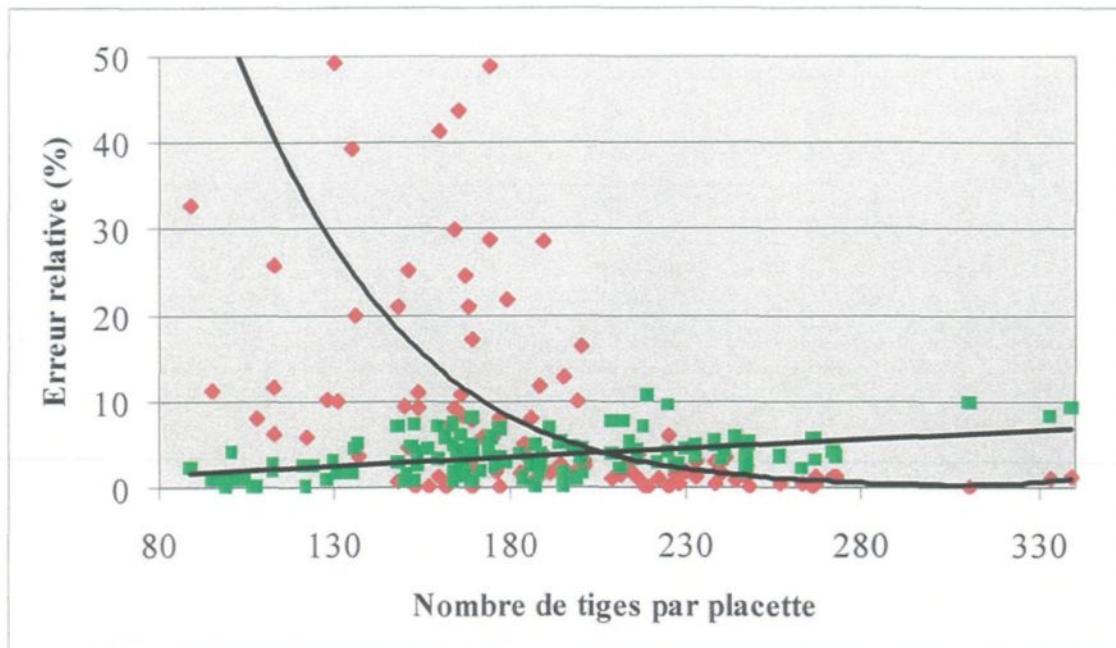


Figure 5.13 L'erreur relative d'omission et de commission en fonction du nombre de tiges par placette image.

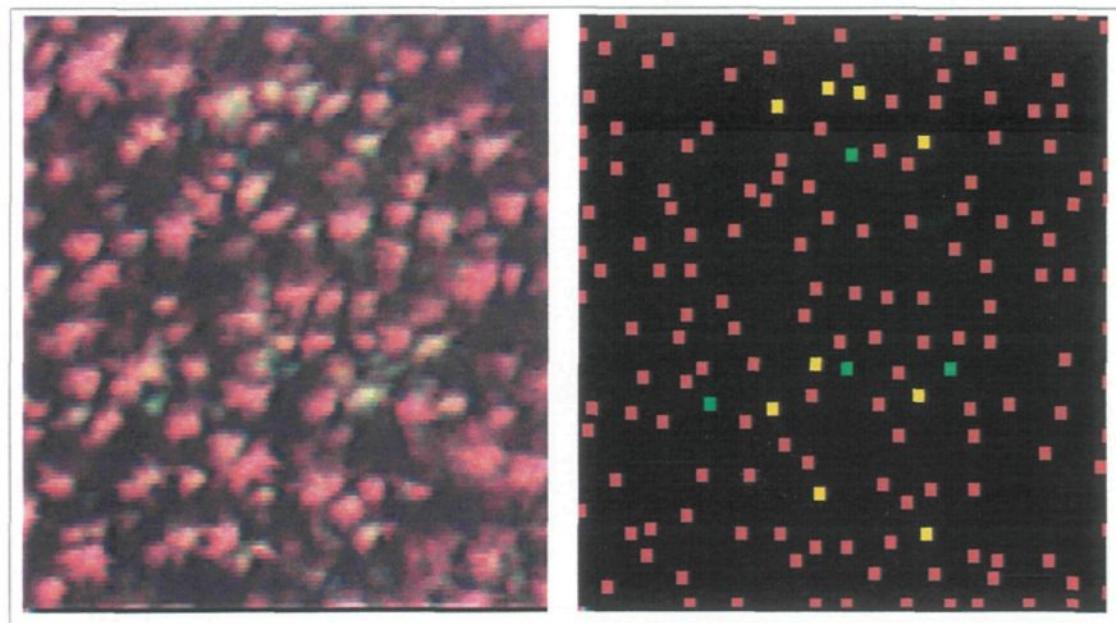


Figure 5.14 Résultats de la séquence de traitements

En terminant cette section, la figure 5.14 présente une placette image de densité B ainsi que la planche de points présentant les tiges identifiées qui lui correspondent. La couleur des points représente la classification, qui fut automatiquement établie, de la vigueur de ces tiges. Les plus saines apparaissent en rouge, les jaunes ont légèrement souffert de défoliation et enfin, les moribondes sont représentées par des points verts.

5.9 L'analyse des placettes de terrain

L'emphase de ce travail fut mis sur la relation entre les résultats obtenus par des interprètes et ceux livrés par la séquence de traitements. Cependant, la comparaison entre le dénombrement terrain des tiges et celui des photos-interprètes fut effectuée. Elle montre clairement qu'il n'est pas possible, à partir du point de vue aéroportée, d'accéder à l'ensemble des tiges des strates dominante et co-dominante telles qu'identifiées par les techniciens effectuant l'inventaire. En fait, l'imagerie sous-estime nettement la réalité terrain. Le tableau 5.5 montre les résultats obtenus pour cette partie de l'étude. Dans le meilleur des cas, celui de la placette 2, 11,2 % des tiges dénombrées sur terrain n'ont pu être dénombrées par l'interprétation de l'image. Dans le cas le plus défavorable, l'erreur relative atteint 42,5 %.

Tableau 5.5 Dénombrement des placettes de terrain

Placette	Terrain (nb. tiges)	Interprétation (nb. tiges)	Écart relatif (%)
1	172	136	-20,9
2	116	103	-11,2
3	186	97	-47,8

5.10 Cartographie de la densité et de la vigueur des tiges de la banque d'images

La séquence permettant le dénombrement et la qualification de la vigueur des tiges fut appliquée à l'ensemble des images (558) du territoire n'appartenant pas à la classe de densité D et pour lesquelles la résolution spatiale est de 30 cm. Les images appartenant à la classe de densité D ne furent pas traitées puisque la méthode ne livre pas des résultats acceptables pour cette classe de densité.

Moins d'une seconde par image fut nécessaire pour compléter la séquence de traitements sur une image avec les plates formes informatiques dont nous disposions. La [carte 5.1](#) montre une représentation cartographique de la base de données résultant de cette opération. Dans cette [carte](#), l'information relative à la vigueur des tiges est présentée sous la forme d'une classe représentant le pourcentage de tiges par image ayant souffert de défoliation. Pour sa part, le nombre de tiges par hectare est représenté par des cercles dont la dimension et la couleur sont linéairement proportionnelles au nombre de tiges par hectare.

VI

Discussion

6.1 L'acquisition de l'imagerie

L'erreur qui est survenue lors du premier survol et qui consiste en une mauvaise sélection de la distance focale du capteur a eu certaines conséquences sur le déroulement du projet. Bien que nous ayons éliminé de l'analyse les images pour lesquelles la résolution spatiale était de 15 cm afin de restreindre l'analyse au cadre méthodologique planifié, cette action a eu pour effet de réduire considérablement le nombre d'images disponibles dans la banque globale. Bien sûr, une première conséquence est qu'il n'a pas été possible de caractériser l'ensemble du territoire d'intérêt. Également, il s'ensuit qu'à l'étape de la sélection des placettes images nous n'avons pas disposé de la trentaine d'images souhaitées pour la classe de densité forestière D. Nous avons donc été forcé de nous contenter des 24 images disponibles.

Il faut prendre note que les images de ce premier survol ont toutes été prétraitées et que l'exposition de ce jeu d'images est au mieux. Il pourra donc servir ultérieurement dans une étude servant à évaluer l'impact de la résolution spatiale sur la méthode présentée dans ce travail.

6.2 La numérisation des images

La situation temporelle exacte des images numérisées a été très importante puisqu'elle a conditionné directement l'erreur sur la position géographique de ces images. Sans précaution, la position des images aurait été affectée d'une imprécision de manipulation correspondant, dans le cas le plus défavorable, à la distance parcourue par l'avion pendant 29/30 s. Dans le même ordre d'idée, la meilleure précision atteignable correspond à la distance parcourue par l'avion pendant 1/30 s. La valeur rms de cette distribution est de 17/30. Puisque cette vitesse était de l'ordre de 185 km/h (51 m/s) pendant les deux survols, considérant qu'il persiste une erreur nominale de 30 m rms sur l'information GPS après calage sur la carte au 1: 20 000, la précision rms sur la position des images numérisées, qui sera pratiquement inchangé dans le meilleur des cas (30,05 m), aurait pu atteindre 42 m rms sans les précautions discutées. Les erreurs se composent en effet quadratiquement selon les équations 5.1 et 5.2.

$$\sqrt{30^2 m + \left(\frac{1}{30} s * 51 m/s \right)^2} = 30,05 m \quad (5.1)$$

$$\sqrt{30^2 m + \left(\frac{17}{30} s * 51 m/s \right)^2} = 42,2 m \quad (5.2)$$

6.3 La mise en registre des images

La mise en registre des images n'a permis qu'une correction au premier ordre du décalage entre les plans spectraux puisqu'elle ne corrige que les problèmes liés à l'avance de l'avion. Les déformations géométriques associées aux mouvements en lacet, tangage ou roulis, qui sont du second ordre, n'ont pas été rectifiées. Elles sont généralement inférieures au pixel, sauf pour certains cas de forte turbulence.

En se limitant à ce niveau de correction, il se peut, pour certains cas extrêmes, que les trois plans spectraux ne correspondent pas parfaitement les uns aux autres. Cette erreur mène à une composition spectrale impure des pixels, ce qui se répercute forcément sur la teinte de ces pixels. Conséquemment, cette situation peut influencer le traitement d'analyse de la vigueur des tiges. Cependant, puisque ce dernier s'effectue en analysant les pixels centraux d'une tige, la teinte analysée est tout de même représentative puisque l'information des plans spectraux provient de l'individu analysé. La situation aurait été différente si l'analyse avait été effectuée sur des pixels en bordure de la tige puisque le pixel analysé aurait pu, à titre d'exemple, provenir de la tige dans un des plans spectraux alors qu'il aurait pu provenir du sol ou d'un autre objet dans les deux autres plans.

6.4 L'implantation des placettes de terrain

Bien qu'il fut possible de respecter les critères d'implantation des placettes de terrain, en pratique, il fut très difficile d'établir le lien image *vs* terrain et ce, malgré que la

résolution spatiale des images soit très élevée. La différence de point de vue fait en sorte qu'une fois en forêt il n'y a que les arbres à proximité d'un phénomène bien caractérisé, comme une éclaircie, un chablis, un arbre mort, une bordure de coupe ou de ruisseau, qui soient facilement identifiables.

6.5 L'extraction des paramètres forestiers

6.5.1 La filtration spatiale du bruit et du profil radiométrique des conifères

Une considération technique dont nous avons tenu compte au moment de programmer cette convolution est l'effet de limite à la bordure de l'image. Au moment de traiter les pixels se trouvant sur l'extrême pourtour de l'image, puisque cette dernière ne représente pas une surface infinie, une portion de la matrice se retrouvera à l'extérieur de l'image et ne peut pas effectuer son travail convenablement.

Il existe deux manières de solutionner cette situation. La première, qui permet de traiter l'image avec le plus haut degré de fidélité radiométrique, consiste à éliminer du traitement le pourtour de l'image, de sorte que la totalité de la matrice corresponde toujours à l'image. Cependant, en utilisant cette technique, le pourtour de l'image ne sera pas traité et il faudra donc l'éliminer. La largeur de ce pourtour sera équivalente au nombre de pixels correspondant à la moitié de la dimension de la matrice arrondie à l'entier le plus bas. Pour une matrice 5 x 5 pixels, ce pourtour sera donc large de 2 pixels. Il résultera de cette

opération, et de celles qui proviendraient de l'application de convolutions semblables, une diminution progressive, d'une convolution à l'autre, de la superficie utile de l'image.

La deuxième, celle que nous avons retenue dans cette étude, consiste à dupliquer le pourtour de l'image. En procédant ainsi, on effectue un compromis sur la qualité radiométrique locale des images, au profit de la superficie exploitable de ces images.

6.5.2 Le «seuillage de l'imagerie»

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la valeur radiométrique d'un seuil. Lorsqu'il existe un lien entre un paramètre statistique de l'image et le phénomène que l'on souhaite soustraire, le seuil pourra être fixé sur la base de celui-ci et conséquemment, il s'adaptera au contenu et à la radiométrie globale de l'image. Également, l'attribution d'un seuil fixe, bien que moins flexible, pourra être une méthode performante qui permettra d'éliminer une portion souhaitée de l'image. Toutefois, dans ce dernier cas, ce seuil sera très dépendant des facteurs influençant la radiométrie de l'imagerie tel que l'ensoleillement pendant un survol donné ou encore le diaphragme de la caméra pendant le déroulement de ce survol.

Initialement, nous avions implanté un seuil adaptatif basé sur la moyenne radiométrique d'une portion automatiquement masquée de la bande de luminance correspondant aux secteurs de teinte rouge d'une image, c'est-à-dire, les conifères bien

portants. En procédant ainsi, nous pouvions éliminer du calcul de la moyenne les secteurs très sombres de l'image et ne conserver que la radiométrie des arbres les plus visibles de la bande de luminance. Toutefois, des analyses préliminaires nous ont montré qu'en pratique, cette façon de procéder était moins performante que l'attribution d'un seuil fixe de radiométrie valant vingt. Ce dernier a donc été retenu. Il fut déterminé empiriquement en étudiant les fluctuations radiométriques qu'il apporte à l'image et en comparant le dénombrement des tiges de l'algorithme à celui obtenu par les interprètes.

Puisque ce seuil est non adaptatif, bien que très performant sur le jeu d'imagerie dont nous disposons, il devra probablement être révisé pour traiter des images provenant d'un survol pour lequel l'exposition de l'imagerie est différente.

6.5.3 L'identification des maxima locaux

Pour cette étape de la séquence de traitement, nous avons également testé une matrice de 3×3 pixels. Toutefois, il apparaît, tenant compte du contenu forestier et de la résolution spatiale des images dont nous disposons, qu'une matrice de 5×5 éléments soit davantage compatible. Un problème de la matrice de 3×3 pixels est que celle-ci repérait des maxima locaux à l'intérieur d'une même tige. À l'inverse, avec la matrice de 5×5 pixels, certaines tiges, lorsqu'elles sont très proches les unes des autres ne peuvent être résolues et il en résulte des erreurs d'omission de certaines d'entre elles. C'est parce que ces erreurs d'omission, avec la matrice de 5×5 éléments, étaient moins fréquentes que les erreurs de

commission de la matrice de 3 x 3 pixels, que fut retenue la dimension de la première matrice.

6.6 L'analyse des placettes images

Comparativement à des interprètes, la séquence de traitements donne des résultats très satisfaisants pour évaluer la densité forestière, en terme de tiges/ha. En regard du système traditionnel de classification de la densité forestière, les images appartenant aux classes de densité A, B et C furent le plus fidèlement dénombrées.

L'analyse des omissions et des commissions de l'algorithme a permis de comprendre les principales sources d'erreurs de la séquence de traitements.

Les images du territoire analysé sont principalement composées de résineux et plus particulièrement d'épinettes noires et de pin gris. Il a été observé qu'en général, le pin gris a une dimension plus importante que l'épinette noire et sa forme caractéristique, semblable à une étoile, est identifiable sur l'imagerie. Il arrive fréquemment que la matrice 5 x 5 soit d'une dimension mal adaptée à traiter le cas du pin gris. Il s'ensuit des erreurs de commission se traduisant par l'identification de deux ou même trois tiges, là où un interprète en identifie une seule. Par ailleurs, ce dernier reconnaît facilement le pin gris de l'épinette noire, ce qui facilite grandement son interprétation et la fiabilité de son dénombrement.

Lorsque le nombre de tiges à l'hectare est très élevé (densités A et B), les tiges sont très rapprochées les unes des autres et il s'ensuit un effet d'auto assombrissement qui laisse le sous-bois forestier et les tiges les plus petites dans l'ombre. Cette situation est tout particulièrement observable si l'imagerie n'est pas acquise au moment de la journée où le soleil est très haut au-dessus de l'horizon. En conséquence, seules les tiges des strates dominante et co-dominante sont éclairées et réfléchissent une information significative vers le capteur. Cette condition facilite l'analyse des interprètes mais surtout celle de l'algorithme qui, pour ce cas, ne commettra essentiellement pas d'erreurs de commission.

Dans ce même cas, la proximité et le petit diamètre des tiges font en sorte que la matrice 5×5 est mal adaptée à reconnaître les tiges. Il s'ensuit des erreurs d'omission qui pourraient, en partie, être évitées par l'utilisation d'une matrice de 3×3 pixels. Toutefois, pour ce faire, il faudrait que la séquence de traitements soit à même d'identifier automatiquement ce cas.

À l'inverse de la situation précédemment expliquée, lorsque le milieu forestier est très ouvert, comme c'est le cas pour les images des classes de densité forestière C et tout particulièrement de la classe D, le sous-bois forestier et le sol à nu sont très éclairés par la lumière solaire et réfléchissent une information significative vers le capteur. Dans ce cas, l'algorithme génère beaucoup d'erreurs de commission. Il identifie certaines roches, les patrons alternés d'ombres et de sol à nu comme étant des tiges. Une information vidéo

supplémentaire, comme un plan thermique, pourrait aider à discriminer la végétation au sol de celle des cimes en exploitant le gradient de température important dans les basses couches de l'atmosphère.

En ce qui a trait à l'évaluation de la vigueur des tiges, la séquence de traitements a bien rempli sa fonction. En quelque sorte, elle livre une information pouvant être utilisée comme un indicateur de défoliation. Celui-ci permettra à un intervenant forestier de poser un diagnostic de premier ordre sur la vigueur du territoire dont il a la gestion. Cette évaluation ne permet toutefois pas d'expliquer les causes ayant mené à la défoliation des tiges.

Cette évaluation de la vigueur des tiges est liée au succès de la partie de la séquence de traitements permettant l'identification individuelle des tiges. Une erreur de commission de la séquence de traitements pourra mener à une erreur d'évaluation de la vigueur des tiges puisque, si le phénomène identifié, sans être une tige, a la teinte d'une des classes établies, il sera assigné à cette classe de vigueur. D'autre part, l'évaluation de la vigueur des tiges est exécutée à la position exacte des maxima locaux identifiés. Par exemple, si un maximum est dans un secteur de la tige où il n'y a aucune défoliation, il sera assigné à la classe de vigueur des tiges saines et ce, même si un autre secteur de cette tige est défolié de façon importante. Notamment, c'est une des raisons qui limitent l'utilisation de cette information à celui d'indicateur, plutôt qu'à celui d'une information quantitative arrêtée.

6.7 L'analyse des placettes de terrain

Bien que la campagne de terrain ne soit pas exhaustive et qu'elle ne fut pas au cœur de cette étude, les résultats auxquels elle mena furent très décevants. Bien que fragmentaires, ces résultats semblent indiquer qu'une séquence de traitements qui permettrait d'identifier systématiquement toutes les tiges visibles dans une image sous-estimerait la réalité terrain puisqu'un grand nombre de tiges, parmi les strates d'intérêts, les dominantes et co-dominantes, ne sont pas visibles sur l'image.

Même si la séquence de traitements livre des résultats comparables à une analyse photo-interprétée de la densité, une finalité de ce type d'évaluation est que les résultats obtenus soient compatibles à la réalité terrain. Bien que l'on comprenne qu'une image soit une approximation limitée de la réalité terrain, la sous-estimation qu'elle en fait, quant au nombre de tiges visibles, nous force à conclure que pratiquement, il y a un manque de fidélité entre le contenu d'une image vis-à-vis sa réalité terrain. Néanmoins, une étude dont l'objectif serait d'évaluer le contenu d'une image en regard de la réalité terrain, et ce, pour diverses résolutions et configurations spectrales d'images, permettrait de mieux comprendre la relation entre ces deux éléments.

Enfin, mentionnons que la placette de terrain numéro 3, celle pour laquelle la différence terrain *vs* image est la plus importante, constitue un cas assez particulier. Il s'agit d'une placette implantée dans un secteur ouvert de densité D où les tiges sont jeunes

et poussent par bosquets très denses. Ainsi, il arrive fréquemment qu'un bosquet de cinq où même six tiges soit identifié comme une seule tige sur l'image.

VII

Conclusion

À la lumière des travaux réalisés et de l'analyse des résultats qui en est découlée, il fut possible de rencontrer les objectifs fixés pour cette étude et de ce fait, caractériser la densité en terme de tiges par hectare et qualifier la vigueur des tiges des peuplements résineux d'un territoire forestier boréal à l'aide d'imagerie vidéographique aérienne multispectrale à haute résolution spatiale. L'étude a montré qu'en tenant compte séparément des erreurs d'omission et de commission de l'algorithme, l'erreur sur le dénombrement de la densité pour les densités A, B et C, est respectivement de 5,2%, 8,6% et de 11,0%. D'autre part, l'analyse de la teinte des tiges dénombrées a permis de les classifier selon trois classes de défoliation. Enfin, les résultats découlant de l'analyse des placettes de terrain montrent que les images sous-estiment le nombre de tiges.

Plus particulièrement, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

1. L'étude a mené à l'acquisition de l'imagerie du site expérimental. Une collection de 1 412 images furent numérisées et prétraitées. La moitié de ces images a une résolution spatiale de 30 cm, alors que l'autre moitié a 15 cm de résolution. Ces images pourront donc avantageusement servir lors de travaux ultérieurs puisqu'elles sont dans un format directement interprétable.

2. Une séquence de traitements permet l'identification individuelle des tiges, la qualification de leur vigueur en trois classes et l'évaluation de la densité forestière, en terme de tiges/ha.
3. Les travaux accomplis ont permis de développer le logiciel *Boréa*. Celui-ci est un logiciel de traitement d'images dont certaines de ses fonctions le rendent particulièrement adapté à manipuler et traiter de grandes quantités d'images. C'est le cas pour la plupart des projets impliquant la vidéographie aérienne multispectrale.

Plusieurs modules spécialisés à l'analyse d'imagerie forestière furent implantés à *Boréa* afin qu'il réalise la tâche permettant de rencontrer les objectifs de ce travail. Notamment, on peut actionner la séquence de traitements permettant le dénombrement et la qualification de la vigueur des tiges à partir d'une même fonction, bien qu'elle soit étalée sur plusieurs modules du logiciel.

4. Une classification de l'imagerie Landsat TM de l'été 1993 et la réalisation d'un modèle numérique d'élévation de terrain MNET ont permis de caractériser la végétation et la géomorphologie du site expérimental. Le MNET a également permis d'établir localement la dimension nominale des pixels.
5. L'analyse des résultats obtenus entre des interprètes et la séquence de traitement a montré que les résultats de cette dernière sont comparables à ceux des interprètes. Pour les classes de densité forestière A, B, C et D, l'erreur quadratique moyenne entre la

séquence de traitements et les interprètes est respectivement de 4,0 , 8,5, 13,7 et 50,5 %.

À la lumière de ces résultats, il apparaît que la séquence de traitements est mal adaptée à l'évaluation de la densité forestière des images appartenant à la classe de densité forestière D.

6. L'analyse des omissions et des commissions de l'algorithme a montré que les omissions sont au minimum lorsque la densité (tiges/ha.) est peu élevée alors qu'elles augmentent légèrement avec l'augmentation de la densité. D'autre part, les commissions varient inversement. Elles sont très nombreuses lorsqu'il y a peu de tiges dans une placette alors qu'elles diminuent rapidement avec l'augmentation de la densité. Pour la classe de densité forestière D, les commissions expliquent la majorité de l'erreur quadratique moyenne de la séquence de traitements.

Lorsqu'on analyse les résultats provenant de la séquence de traitements en tenant compte séparément des omissions et commissions de l'algorithme, l'erreur quadratique moyenne augmente et équivaut respectivement à 5,2, 8,6, 11,4 et 53,8 % pour les classes de densité forestière A, B, C et D.

7. L'analyse des placettes de terrain a mené à la conclusion qu'il existe une différence importante entre le contenu image et la réalité terrain. L'image n'est qu'une approximation limitée de la réalité terrain et elle le sous-estime quant au nombre de tiges qu'elle permet de dénombrer.

Suite à cette étude, plusieurs avenues de recherche peuvent être proposées. Certaines d'entre elles sont la continuité directe de cette étude, alors que d'autres, plus techniques, font référence à l'équipement disponible et à l'amélioration des techniques de traitements des images vidéographiques.

1. Il apparaît important d'effectuer une étude qui permettrait de déterminer plus précisément la nature des secteurs de territoire forestier que l'on peut retrouver sur les images vidéographiques. Une telle étude permettrait d'établir un lien plus solide entre l'image et le terrain et de se pencher sur l'existence d'un facteur de régression qui permettrait d'expliquer l'écart entre la densité mesurée sur le terrain et celle détectée sur l'image. Pour ce faire, le Laboratoire de Télédétection aérienne de l'UQAC devrait profiter des facilités de la forêt expérimentale Simoncouche qui est située à moins d'une vingtaine de kilomètres de l'UQAC. Un réseau de placettes permanentes devraient y être implanté et accompagné de repères permettant de facilement délimiter les placettes, à partir du point de vue aérien du capteur. Cette étude, qui pourrait être conduite par un biologiste, s'inscrirait très bien dans le cadre de travaux de recherche du Consortium de Recherche sur la Forêt Boréale Commerciale de l'UQAC.
2. Une autre avenue de recherche consiste en la continuité de la recherche présentée dans ce texte. Le jeu de 1 412 images permettrait d'évaluer l'impact de la résolution spatiale sur les résultats obtenus. Il serait d'intérêt d'étudier si un indice de végétation adéquat permettrait d'éliminer le sous-bois forestier de l'image. Il en résulterait une amélioration de la séquence de traitements dans les classes de densité C et D.

3. Sous un aspect plus technique, une étude dont l'objectif serait d'automatiser le prétraitement des images permettrait d'améliorer grandement la performance de l'ensemble des travaux réalisés au Laboratoire de Télédétection aérienne de l'UQAC. Comme il a été montré dans cette étude, la numérisation et la mise en registre des images sont des opérations manuelles qui prennent considérablement de temps.

L'acquisition d'un capteur plus récent pourrait permettre, en partie, de solutionner certains aspect de cette problématique. Notamment, plusieurs de ces nouveaux capteurs livrent directement l'information dans un format numérique.

4. Enfin, des tests minimaux réalisés sur des images de la réserve faunique des Laurentides permettent d'avancer que l'ajout d'un canal vidéo thermique pourrait contribuer à mieux discriminer les faibles densités et réduire les erreurs de commission. Il importe de mentionner que les images utilisées furent acquises par conditions météorologiques d'inversion thermique.

VIII

BIBLIOGRAPHIE

Ahern, F.J., D.N.H. Horler, J. Cihlar, W.J. Bennet et E. MacAulay, 1983, Digital Processing to Improve Forest Classification: Results at Resolutions of 5 to 50 Meters, *Actes de SPIE Symposium on Techniques for Extraction of Information for Remotely Sensed Images*, Rochester, New York, pp. 153-170.

Anger, C.D., S. Mah et S.K. Babey, 1994, Technological enhancements to the compact airborne spectrographic imager (CASI), *Actes de First International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Strasbourg, France, 11-15 septembre, Vol. 2, pp. 205-213.

Askers, J.R., 1993, Pressure Builds to Free Satellite Imaging Sales, *Aviation Week and Space Technology*, 15 novembre, pp. 26-27.

Baril, H., 1997. Une année "noir et blanc" pour les pâtes et papiers, *Le Soleil*, Montréal, mercredi 31 décembre, p. B2.

Bartz, K.L., J.L. Kershner, R.D. Ramsey et C.M.U. Neale, 1994, Delineating Riparian Cover Types Using Multispectral Airborne Videography, *Actes de 14th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography for Resource Monitoring*, Logan, Utah, 24-27 mai, pp. 58-67.

Beaubien, J., 1994, Landsat TM Satellite Images of Forests: From Enhancement to Classification, *Journal canadien de télédétection*, Vol. 20, No. 1, pp. 17-26.

Beaubien, J., 1983, Une méthode de rehaussement d'images Landsat pour la classification du couvert végétal, *Actes du 8^e Symposium canadien de télédétection*, Montréal, Québec, pp. 559-566.

Boivin, L., 1994, Clayoquot Sound: la lutte se poursuit sur la scène européenne, *La Presse*, Montréal, samedi 31 décembre, p. A10.

Bullock, M., P.O. DeWolf et S.W. Wagner., 1996, High resolution commercial satellite imagery and data exploitation for forestry applications, *Actes de Sixth Forest Service Remote Sensing Applications Conference*, 29 avril au 3 mai, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 202-211.

Chevalier, P., 1993, *Gestion des ressources renouvelables: Secteurs agricole et forestier*, Télé-Université, Sainte-Foy, 557 pp.

Diete, N., 1990, LMK-2000: A new Aerial Survey Camera System, *Jena Review*, Vol. 3, pp. 135-138.

Doucet, R., M. Pineau, J.C. Ruel et G. Sheedy, 1996, Sylviculture appliquée, dans *Manuel de Foresterie*, Bérard, J.A. (éd.), Les Presses de l'Université Laval, Québec, pp. 965-1004.

Dralle, K. et M. Rudemo, 1997, Automatic estimation of individual tree positions from aerial photos, *Canadian Journal of Forestry Resources*, Vol. 27, pp. 1728-1736.

Dralle, K. et M. Rudemo, 1996, Stem number estimation by kernel smoothing in aerial photos, *Canadian Journal of Forestry Resources*, Vol. 26, pp. 1228-1236.

Edwards, G. et K.E. Lowell, 1996, Modeling Uncertainty in Photointerpreted Boundaries, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 62, No. 4, pp. 337-391.

Edwards, G., 1993, Image analysis for locally reliable information, *Actes du symposium GIS-93*, Vancouver, Colombie-Britannique, février, pp. 783-790.

Eldridge, N.R. et G. Edwards, 1993, Acquiring localized forest inventory information: extraction from high resolution airborne digital images, *Actes du 16^e Symposium canadien de télédétection*, Sherbrooke, Québec, 8-10 juin, pp. 443-448.

Everitt, J.H., D.E. Escobar et I. Cavazos, 1995b, A three-camera multispectral digital video imaging system, *Actes de 15th Biennial Workshop on Videography & Color Photography in Resource Assessment*, Terre Haute, Indiana, 1-3 mai, pp. 244-252.

Fent, L., R.J. Hall et R.K. Nerby, 1995, Aerial Films for Forest Inventory: Optimizing Film Parameters, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61, No. 3 pp. 281-289.

Fournier R.A. et G. Edwards, 1996, Une analyse de la réflectance des couverts forestiers de résineux, *Actes du 9^e Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection*, Québec, Québec, 30 avril au 3 mai, 1 CD-ROM.

Fournier, R.A., G. Edwards et N.R. Eldridge, 1995, A catalogue of potential spatial discriminators for high spatial resolution digital images of individual crowns, *Journal canadien de télédétection*, Vol. 21, No. 3, pp. 285-298.

Fritz, L.W., 1996, The era of commercial earth observation satellites, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 62, No. 1, pp. 39-45.

Frost, P.A., 1985, *A multispectral video imaging and analysis system*, Xybion Electronic Systems Corp., Cedar Knolls, New Jersey, Rep. No. 22.

Gonzalez, R.C. et R.E. Woods, 1993, *Digital Image Processing*, Addison-Wesley, Reading, 716 pages, ISBN 0-201-50803-6.

Gougeon, F.A., 1997a, A locally adaptive technique for forest regeneration assessments from high resolution aerial images, *Actes du 19^e Symposium canadien de télédétection*, Ottawa, Ontario, 24-30 mai, 1 CD-ROM.

Gougeon, F.A., 1997b, Recognizing the forest from the trees: Individual tree crown delineation, classification and regrouping for inventory purposes, *Actes de Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Copenhague, Danemark, 7-10 juillet, Vol. 2, pp. 807-814.

Gougeon, F.A., 1996, Vers l'inventaire forestier automatisé: reconnaître l'arbre ou la forêt?, *Actes du 9^e Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection*, Québec, Québec, 30 avril au 3 mai, 1 CD-ROM.

Gougeon, F.A., 1995a, Comparison of possible multispectral classification schemes for tree crowns individually delineated on high spatial resolution MEIS images, *Journal canadien de télédétection*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-9.

Gougeon, F.A., 1995b, A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images, *Journal canadien de télédétection*, Vol. 27, No. 3, pp. 274-284.

Gougeon, F.A., 1993, Individual Tree Identification from High Resolution MEIS Images, *Actes de International Forum on Airborne Multispectral Scanning for Forestry and Mapping (with Emphasis on MEIS)*, Val-Morin, Québec, 13-16 avril, pp. 117-128.

Gougeon, F.A. et T. Moore, 1989, Classification individuelle des arbres à partir d'images à haute résolution spatiale, *Télédétection et Gestion des Ressources*, Bernier, M, F. Bonn et P. Gagnon (eds.). Association Québécoise de Télédétection, Vol. VI, pp.185-196.

Grondin, P et al., 1996, Écologie Forestière, *Manuel de Foresterie*, Bérard, J.A. (éd.), Les Presses de l'Université Laval, Québec, pp. 133-279.

Hartl, P., 1989, Remote Sensing and Satellite Navigation: Complementary Tools of Space Technology, *Photogrammetric Record*, Vol. 13, No. 74, pp.263-275.

Hay, G.J. et K.O. Niemann, 1994, Visualizing 3-D Texture: A Three-Dimensional Structural Approach to Model Forest Texture, *Journal canadien de télédétection*, Vol. 20, No. 2, pp. 90-101.

Jano, A.P., 1984, Comparison of Landsat, MEIS-II and Airborne MSS Data for Forest Classification in the Boreal Region of Ontario, *Actes du 9^e Symposium canadien de télédétection*, Saint-Jean, Terre-Neuve, 14-17 août, pp. 627-632.

King, D.J., 1995, Airborne multispectral digital camera and video sensors: A critical review of system designs and applications, *Journal canadien de télédétection*, Vol. 21, No.3, pp. 245-273.

King, D.J., 1992, Development and Application of an Airborne Multispectral Digital Frame Camera Sensor, *Acte du XVII Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Commission I*, Washington, District of Columbia, 2-14 août, pp. 190-192.

King, D.J. et J. Vlcek, 1990, Development of a Multispectral Video System and its Application in Forestry, *Journal canadien de télédétection*, Vol. 16, pp. 15-22.

Klose. H., 1990, The New Gyro-Stabilized Mount for LMK Aerial Survey Cameras, *Jena Review*, Vol. 3, pp. 138-140.

Laframboise, P., A. Guimond, C. Warren et J. Duval, 1996, L'apport des images Landsat pour l'évaluation du potentiel d'éclaircie pré-commercial et leur intégration dans un SIRS, conjointement avec les données GPS, pour la planification des travaux sylvicoles, *Actes du 9^e Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection*, Québec, Québec, 30 avril au 3 mai, 1 CD-ROM.

Leckie, D.G. et M.D. Gillis, 1995, Forest inventory in Canada with emphasis on map production, *The Forestry Chronicle*, Vol. 71, No. 1, pp. 74-88.

Leckie, D.G., 1990, Advances in Remote Sensing Technologies for Forest Surveys and Management, *Canadian Journal of Forestry Resources*, Vol. 20, pp. 464-483.

Létourneau, J.-P. et A. Guimond, 1984, La télédétection par satellite et son intégration au système d'inventaire forestier du Québec, *Actes du 9^e Symposium canadien de télédétection*, Saint-Jean, Terre-Neuve, 14-17 août, pp. 595-599.

Lévesque, J. et D.J. King, 1995, The Use of Airborne Digital Camera Semivariance in the Evaluation of Forest Damage at an Acid Mine Site, *Actes de 15th Biennial Workshop on Videography & Color Photography in Resource Assessment*, Terre Haute, Indiana, 1-3 mai, pp. 270-279.

Levkowitz, H. et G.T. Herman, 1993, GLHS: A generalized lightness, hue and saturation color model, *CVGIP: Graphic models and Image Processing*, Vol. 55, No. 4, pp. 271-285.

Light, D.L., 1996, Film Cameras or Digital Sensors? The Challenge Ahead for Aerial Imaging, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 62, No. 3, pp. 285-291.

Lillesand, T.M. et R.W. Kiefer, 1994, *Remote sensing and image interpretation*, 3^e édition, John Wiley & Sons, Inc., New York, 750 pp.

Lowell, K. 1994, A fuzzy surface cartographic representation for forestry based on Voronoi diagram area stealing, *Canadian Journal of Forestry Resources*, Vol. 24, pp. 1970-1980.

Lowell, K., G. Edwards et C. Gold, 1992, Localizing Forest Management Using GIS and Remote Sensing: The Research Agenda of the Industrial Research Chair in Geomatics Applied to Forestry, *Actes de la conference National GIS-92*, Ottawa, Ontario, Mars, pp. 191-201.

Mausel, P.W., J.H. Everitt, D.E. Escobar et D.J. King, 1992, Airborne Videography: Current Status and Future Perspectives, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 58, pp. 1189-1195.

McColl, W.D., R.A. Neville et S.M. Till, 1983, Multidetector Electro-optical Imaging Scanner MEIS II, *Actes du 8^e Symposium canadien de télédétection*, Montréal, Québec, 3-6 mai, pp. 71-79.

McIlveen, W.D., D.L. McLaughlin et R.W. Arnup, 1989, *A survey to document the decline status of the sugar maple forest of Ontario: 1986*, Ministry of Environment Publication, Ontario, ISBN 0-7729-6253-7, 22 pp.

McLaughlin, D.L., S. Linzon, D. Dimma et W.D. McIlveen, 1985, *Sugar maple decline in Ontario*, Tech. Report No. ARB-144-85-Phyto, Ministry of Environment Publication, Ontario, 18 pp.

McLaughlin, S. et R. Verreault, 1998, Caractérisation de la densité (tiges/ha.) et de la défoliation d'un territoire forestier boréal à l'aide de la vidéographie aérienne multispectrale (VAM), *Actes du 20^e Symposium canadien de télédétection*, Calgary, Alberta, 10-13 mai, sous presse.

McLaughlin, S., R. Verreault et D. Berthiaume, 1996, Inventaire automatisé de la densité du couvert forestier à l'aide de la vidéographie aérienne multispectrale (VAM) et du

logiciel Boréa, *Actes du 9^e Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection*, Québec, Québec, 30 avril au 3 mai, 1 CD-ROM.

MicroImages, 1997, OnLine Documentation, *Tnt products V5.8*, Lincoln, Nebraska, 1 CD-ROM.

Ministère de l'Énergie et des ressources, 1984. *Normes d'Inventaire Forestier*, Direction générale des publications gouvernementales, Québec, 177 pages.

Ministère de l'Énergie et des ressources, 1981, *Gîtes minéraux: Laurentie-Saguenay*, Direction générale des publications gouvernementales, Québec, 1 carte, Feuille Roberval 32A..

Ministère des Ressources naturelle, 1994, *Norme de stratification écoforestière: Troisième programme d'inventaire forestier*, Direction générale des publications gouvernementales, Québec, 142 pp.

Myhre, R.J., A.S. Munson, D.E. Meisner et S. Dewhurst, 1987, Assessment of a color infrared aerial video system for forest insect detection and evaluation, *Actes de 11th Biennial Workshop on Color Aerial Photography and Videography*, Bethesda, Maryland, pp. 244-251.

Myhre, R.J. et B. Silvey, 1992, An airborne video system developed within forest pest management - status and activities., *Actes de Fourth Forest Service Remote Sensing Applications Conference*, Orlando, Floride.

Myhre, R.J., 1995, An airborne videography system developed and now operational within the U.S. forest service, *Actes de 15th Biennial Workshop on Videography & Color Photography in Resource Assessment*, Terre Haute, Indiana, 1-3 mai, pp. 237-243.

Neale, C.M.U. et B.G. Crowther, 1994, An airborne Multispectral Video/Radiometer Remote Sensing System: Development and Calibration, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 49, pp. 187-194.

O'Dowd, P., 1996, Communication personnelle à l'occasion d'une rencontre au Laboratoire de Télédétection aérienne de l'UQAC.

Parent, B., 1996., *Ressource et industrie forestières*, Direction générale des publications gouvernementales, Québec, 142 pp.

Pitt, D.G. R.G. Wagner, R.J. Hall, D.J. King, D.G. Leckie et U. Runesson, 1997, Use of remote sensing for forest vegetation management: A problem analysis, *The Forestry Chronicle*, Vol. 73, No. 4, pp. 459-477.

Pollock, R.J., 1996, *The automatic recognition of individual trees in aerial images of forest based on a synthetic tree crown image model*, Thèse de doctorat, Computer Science, University of British Columbia, Vancouver.

Pollock, R.J., 1994, A model-based approach to automatically locating tree crowns in high spatial resolution images, *Actes de SPIE 2315 Image and signal processing for remote sensing*, Rome, Italie, pp. 526-537.

Québec, (Province), Lois, statuts, etc., 1996, *Loi sur les forêts: L.R.Q., chapitre F-4.1*, Éditeur officiel du Québec, Québec, 55 pages.

Quessy S. et M.J. Gauthier, G.H. Lemieux et V. Beaulieu, 1996, Utilisation de la télédétection et d'un système d'information géographique pour la planification des coupes d'éclaircie pré-commerciale en forêt boréale, *Actes du 9^e Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection*, Québec, Québec, 30 avril au 3 mai, 1 CD-ROM.

Saint-Onge, B. et F. Cavayas, 1991, La segmentation d'images de forêt de haute résolution à l'aide de mesures de texture basées sur le demi-variogramme, dans *Télédétection et gestion des ressources*, Gagnon, P. (ed.), L'Association québécoise de télédétection, Vol. VII, pp. 219-225.

Saoudi, A., 1997, *Utilisation des rapports radiométriques de bandes spectrales dans la discrimination des essences forestières par vidéographie aérienne multibande (VAM)*, mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, pp. 90.

Spencer, R.D. et R.J. Hall, 1988, Canadian Large-Scale Aerial Photographic Systems (LSP), *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 54, No. 4, pp. 475-482.

Strahler, A.H., Y. Wu et J. Franklin, 1988, Remote Estimation of Tree Size and Density from Satellite Imagery by Inversion of a Geometric-Optical Canopy Model, *Actes de 22nd International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Abidjan, Côte-d'Ivoire, pp. 337-348.

Strome, W.M., D.G. Leckie, J. Miller et R. Buxton, 1989, Application of High-Resolution Remote Sensing Image Data, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, Seebass, R.A. (ed.), American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 128, pp. 77-93.

Tappeiner, J.C. et R.G. Wagner, 1987, Principles of silvicultural prescriptions for vegetation management, dans *Vegetation management for conifer production*, J.D. Walstad et P.J. Kuch (eds.), John Wiley and Sons Inc., New York, pp. 399-429.

Tarussov, A., J.M. Dubois et M. Wenzl, 1996, Les systèmes légers de télédétection aéroportés pour les sciences de la Terre, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17, No. 4, pp. 2699-2718.

Thomasson, J.A., C.W. Bennett, B.D. Jackson et M.P. Maillander, 1994, Differentiating Bottomland Tree Species with Multispectral Videography, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 60, No. 1, pp. 55-59.

Toutin, T., 1997, Qualitative aspects of chromo-stereoscopy for depth perception, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 63, No. 2, pp. 193-203.

Tremblay, T., 1995, Communication personnelle à l'occasion d'une rencontre au Laboratoire de Télédétection aérienne de l'UQAC.

Verreault, R., 1997, An efficient method of correcting chromatic aberrations of multispectral video systems in the spectral range 400-1100 nm, *Actes de Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition*, Copenhague, Danemark, 7-10 juillet, Vol. 2, pp. 781-788.

Verreault, R., S. M'Laughlin et C. Desmarais, 1996, Caractérisation de la strate herbacée et du couvert forestier de la base militaire de Bagotville par vidéographie aérienne multibande (VAM), *Actes du 9^e Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection*, Québec, Québec, 30 avril au 3 mai, 1 CD-ROM.

Verreault, R., F. Gagnon, S. M'Laughlin et L. Tremblay, 1995, Spatial resolution improvement of CCD video imagery, *Actes de 15th Biennial Workshop on Videography & Color Photography in Resource Assessment*, Terre Haute, Indiana, 1-3 mai, pp. 115-128.

Verreault, R., G.H. Lemieux et S. M' Laughlin., 1993, La vidéographie aérienne multispectrale (VAM) appliquée au monitoring de la régénération forestière, *Acte du 16^e Symposium canadien de télédétection*, Sherbrooke, Québec, 7-10 juin, pp. 647-651.

Vlcek, J. D.J. King et X. Yuan, 1989, *Determination and evaluation of aerial video and photographic maple decline index*, Final Report, Ministry of Environment Publication, Ontario, 33 pp.

Wright, R. 1993, Airborne videography: principles and practice, *Photogrammetric Record*, Vol. 14, pp 447-457.

Xiuhong, S. J. Baker et R. Hordon, 1995, A spectrally-filtered airborne video system and its imagery, *Actes de 15th Biennial Workshop on Videography & Color Photography in Resource Assessment*, Terre Haute, Indiana, 1-3 mai, pp. 253-2259.

Xybion Electronic Systems Corporation, 1989, *Multispectral Video Camera User's Manual: Model MSC-02 SPL-4076*, Xybion Electronic Systems Corporation, San Diego, 33 pages.

Yuan, X., D.J. King et J. Vlcek, 1991, Sugar Maple Decline Assessment based on Spectral and Textural Analysis of Multispectral Aerial Videography, *Remote sensing of environment*, Vol. 37, pp. 47-54.

Zaremba, M.B., M. Locas et F.A. Gougeon, 1993. La reconnaissance des arbres sur une image multispectrale de haute résolution par des réseaux neuronaux, *Acte du 16^e Symposium canadien de télédétection*, Sherbrooke, Québec, 7-10 juin, pp. 757-760.

ANNEXE I

La vidéographie parmi les capteurs aériens

Dans cette étude, l'utilisation d'un capteur de type vidéo n'est pas étrangère au fait que le laboratoire qui coordonne cette recherche se spécialise en vidéographie aérienne, qu'il possède deux capteurs de ce type et qu'il développe des applications à cet effet. Dans les paragraphes qui suivent, nous verrons comment se situe la vidéographie par rapport aux principaux capteurs de télédétection aérienne. Le tableau A1.1 «*Caractéristiques générales des principaux capteurs aériens*», fait la synthèse de cette annexe.

A1.1 La résolution spatiale

Au moment de planifier un projet de télédétection, il importe d'identifier la résolution spatiale qui permettra l'atteinte des objectifs. À ce chapitre, les principaux auteurs œuvrant dans le domaine de la télédétection appliquée à la foresterie s'entendent pour mentionner que l'imagerie qui permettra de résoudre des problématiques liées aux inventaires forestiers aura une résolution spatiale inférieure au mètre (Strome *et al.*, 1989) et préféablement, entre 30 et 50 cm. La majorité des capteurs aériens ont la flexibilité permettant de rencontrer cette condition.

A1.2 L'étendue latérale du champ de vision

Il existe une relation directe entre la résolution acquise et l'étendue latérale du champ de vision couvert par un capteur. Puisque ce paramètre conditionne, pour une résolution et un capteur donnés, le nombre de lignes de vol nécessaires pour acquérir les images d'un territoire, il est le principal déterminant du coût de la mission d'acquisition. Une faible étendue du champ latéral de vision impliquera de faire plus de lignes de vol pour couvrir un territoire donné et davantage d'images devront être traitées et corrigées pour l'analyser.

Les capteurs à balayage linéaire ont des barrettes de détecteurs dont le nombre d'éléments varie entre 512 et 1 024. Pour ce qui est des capteurs vidéographiques, leur résolution spatiale est limitée par deux facteurs. Un premier, comme dans le cas des capteurs à balayage linéaire, concerne le nombre d'éléments de leur détecteur alors que le second provient du média utilisé pour l'enregistrement des images. Bien que ces considérations valent pour tous les types de capteurs évalués, dans le cas des photographies aériennes, il est possible d'effectuer un post balayage avec des numériseurs de haute performance dans un contexte où la vitesse d'opération est moins critique que durant le vif d'un survol aérien. Le film photographique est un média qui enregistre une très grande quantité d'informations et il s'ensuit que la résolution spatiale type d'une photographie au 1:15 000 sera de l'ordre de 20 cm sur une largeur de champ aussi vaste que 3 x 3 km. Avec les équipements du passé, cette couverture de champ s'obtenait par un compromis radiométrique. Les améliorations technologiques des dernières années, en ce qui a trait aux

films, à l'optique et aux systèmes de compensation du déplacement des plates-formes, permettent, sans réduction de la couverture de champ, d'atténuer grandement ce compromis radiométrique (Fent *et al.*, 1995; Light, 1996).

Les récents progrès de l'informatique, principalement en ce qui a trait à la rapidité et au volume des unités de stockage d'informations, ont permis de commencer d'utiliser des caméras numériques en télédétection aérienne. Il existe des prototypes avec des détecteurs matriciels dont le nombre d'éléments de la matrice est de l'ordre de 7000 x 7000 (Pitt *et al.*, 1997). Avec un tel détecteur, pour un pixel de 30 cm, la couverture de champ est de près de 2,1 km x 2,1 km alors que pour cette même résolution spatiale, dans le cadre de cette étude, nous obtenons un champ de 0,225 km x 0,150 km avec le capteur vidéo.

A1.3 Le potentiel stéréoscopique

Puisque le volume de bois d'un territoire forestier est une fonction du diamètre, de la hauteur et de la densité de tiges, le potentiel stéréoscopique est une caractéristique des plus importantes puisqu'elle constitue la principale avenue pour en arriver à déterminer la hauteur des arbres.

Les capteurs à balayage linéaire, de par le mode de constitution des images, ont un potentiel stéréoscopique plus limité que les capteurs matriciels. Seule la zone de

recouvrement entre des lignes de vol parallèles présente cette stéréoscopie¹⁰. Toutefois, le MEIS-II permet un balayage avant-arrière afin d'acquérir de l'information stéréoscopique. Quant aux capteurs vidéographiques, le potentiel stéréoscopique est limité en raison de l'utilisation de téléobjectifs et du compromis «résolution *vs* largeur de champ».

Avec les caméras traditionnelles et numériques, l'utilisation d'objectifs grand angulaire favorise la présence du déplacement radial (la parallaxe). Elles demeurent le moyen le plus efficace d'obtenir de la précision sur les mesures stéréoscopiques.

A1.4 Les caractéristiques spectrales

Jusqu'à maintenant les principaux capteurs à balayage font l'acquisition de nombreuses bandes spectrales. Notamment, le CASI est qualifié de capteur hyperspectral puisqu'il peut acquérir simultanément jusqu'à 288 bandes dont la largeur de la bande passante est fine. En foresterie, pour déterminer l'essence forestière, on utilise ces multiples bandes afin d'établir une signature dite spectrale.

Bien que seulement trois bandes spectrales soient utilisées dans cette étude, les capteurs vidéographiques peuvent typiquement en acquérir jusqu'à six. L'utilisation de téléobjectifs diminue considérablement les problèmes de vignettage des images,

¹⁰À condition d'y avoir accès puisque la mauvaise qualité géométrique de ces images peut faire en sorte qu'il ne soit pas possible de les redresser selon une projection épipolaire.

augmentant ainsi leur qualité radiométrique. Cependant, d'autre part, le média d'enregistrement limite la qualité radiométrique de l'information acquise.

La majorité des photographies aériennes traditionnelles des territoires forestiers est acquise en infrarouge fausses couleurs. Bien qu'il soit possible, avec les caméras numériques, d'acquérir cette même composition spectrale, certaines d'entre elles font partie intégrante de systèmes utilisant des roulettes de filtres placés à l'avant de l'objectif pour acquérir davantage de bandes spectrales (King, 1992). Autrefois, les produits photographiques présentaient des problèmes importants de vignettage de l'objectif. De nos jours, avec l'appareillage moderne qui intègre le type d'améliorations énumérées à la section A1.2, ces problèmes sont atténués.

A1.5 La qualité géométrique

En raison du mode de constitution de l'imagerie, les images produites avec les capteurs à balayage linéaire sont difficilement utilisables pour le repérage et la cartographie de précision sans qu'elles n'aient préalablement subi des corrections géométriques complexes. Pour leur part, les images vidéographiques et photographiques sont relativement simple à corriger. Elles proviennent de capteurs matriciels et de plus, les méthodes de corrections développées pour la photographie peuvent s'appliquer. Toutefois, il est plus simple de corriger les photographies, puisque du fait que leur couverture de champ est plus importante, il est nettement plus facile d'y repérer des points de contrôle.

A1.6 Exemples d'imagerie produite avec le capteur Xybion MSC-02 SPL - 4076

Récemment, le système d'acquisition d'imagerie vidéographique de l'UQAC a été sélectionné par le Centre Canadien de Télédétection (CCT), dans le cadre du Programme d'Applications Locales à l'Environnement (LEAP), pour représenter la technologie des capteurs vidéographiques. Les deux exemples présentés illustrent différents types d'environnements, à différentes résolutions spatiales et compositions spectrales. La première image est une portion d'une mosaïque de 82 images infrarouge fausses couleurs à la résolution spatiale de 3 m du secteur des Iles-de-Boucherville. On y voit une partie de l'Île Charron qui sert de plate-forme d'emprise au tunnel Hyppolite-Lafontaine. Au nord de celui-ci, en longeant la route qui se dirige vers l'entrée du parc provincial de récréation des Iles-de-Boucherville, on observe une station d'épuration des eaux, ainsi que des secteurs de végétation de clairières. Également, beaucoup de nuances sont visibles dans les teintes de l'eau du fleuve Saint-Laurent.

La deuxième image présente le delta de la rivière Ha! Ha!, dans le secteur Grande-Baie de la municipalité de Ville-de-la-Baie, au Saguenay. L'image est en couleurs naturelles et sa résolution spatiale est de 1 mètre. Il est possible d'y voir le nouveau lit de la rivière Ha!Ha! tout comme l'avancement des travaux de reconstruction, une année après les importantes inondations de 1996.



Figure A1.1 Image infrarouge fausses couleurs du secteur des Iles-de-Boucherville
(résolution spatiale de 3 m)

Source: Air Focus Inc., 1996.



Figure A1.2 Image en couleurs naturelles du delta de la rivière Ha!Ha! (résolution spatiale de 1m)

Source: Air Focus Inc., 1997.

Tableau A1.1 Caractéristiques générales des principaux capteurs aériens

Capteurs	Résolution spatiale (cm) ¹	Amplitude de la visée latérale	Potentiel stéréoscopique	Caractéristiques spectrales	Nature de l'imagerie	Corrections géométriques
Photographie aérienne	> 1,7 ²	de 25 ² m à 5 km	Excellent	Visible et proche IR	Analogue ou numérisée	Faciles
Caméra numérique	> 4 ³	de 50 ³ m à 10 km	Excellent	Visible et proche, moyen et thermique IR (de 3 à 8 bandes)	Numérique	Faciles
Vidéographie aérienne	> 4 ⁴	de 25 ⁴ m à 5 km	Modéré	Visible et proche, moyen et thermique IR (de 3 à 8 bandes)	Analogue ou numérique	Intermédiaires
Xybion MSC-02 SPL – 4076	>4.4 ⁵	de 33 m à 3 km	Modéré	Visible et proche IR (de 3 à 6 bandes)	Analogue	Intermédiaires
Xybion MSC-02 SPL – 4076 dans ce travail	25	225 m	Modéré	Composition infrarouge fausses couleurs (3 bandes)	Analogue	Intermédiaires
MEIS WHiRL	> 30 > 25	de 300 m à 5 km de 1,5 à 10 km	Faible	Visible et proche IR (de 1 à 8 bandes) ⁶	Numérique	Difficiles
CASI	> 30 ⁷	de 150 m à 5 km	Faible	Visible et proche IR (de 1 à 288 bandes)	Numérique	Difficiles
Laser, LIDAR	> 30	Point	n/a	Généralement proche IR	Numérique	Modérées

¹GRD (Lillesand *et al.*, 1994) pour les photographies; dimension du pixel au sol pour les capteurs numériques.

²Le minimum est basé sur une échelle au 1: 5 000 sur format 70 mm.

³Le minimum est basé sur une capteur de 9 x 7 mm avec une focale de 50 mm à une hauteur de 300 m.

⁴Le minimum est basé sur un capteur de 4 x 3 mm avec une focale de 50 mm à une hauteur de 300 m.

⁵Le minimum est basé sur un capteur de 8,8 x 6,6 mm avec une focale de 75 mm à une hauteur de 300m.

⁶Le capteur MEIS a 8 bandes; le WHiRL a une seule bande.

⁷Le nombre de bandes captées influence la résolution spatiale; ex.: 30 cm de résolution s'atteint avec une seule bande, 60 cm s'atteint avec 5 bandes, et 1 m avec 10 bandes.

Adapté de: Pitt *et al.*, Use of remote sensing for forest vegetation management: A problem analysis, p. 464.

Annexe II

Prétraitement

A2.1 La numérisation des images

Au moment d'effectuer la numérisation des images vidéo, le laboratoire ne disposait pas des équipements nécessaires pour automatiser la saisie des images. Dans un contexte manuel, afin d'effectuer la numérisation des images au moment précis où se fait le renouvellement de l'information GPS, il faut intégrer mentalement le rythme du changement de cette information et actionner le début de la séquence de numérisation une fraction de seconde avant la seconde souhaitée. La mémoire de la carte de numérisation étant limitée à 4 Mb, à la résolution souhaitée (752 x 480 pixels), nous disposons de 11 espaces mémoire pour l'accomplir. Cet espace mémoire correspond à un laps de temps de 10/30 s. pendant lequel il faut saisir 3/30 s. Bien que la marge de manœuvre soit mince, un technicien d'expérience pourra effectuer la numérisation au rythme de 30 images/heure.

A2.2 La nomenclature des images

Afin de compléter la numérisation des 25 lignes de vol planifiées, 1 412 images furent extraites de la bande magnétoscopique. Puisqu'il y a trois plans spectraux images cette opération génère 4 236 fichiers. La gestion d'un grand nombre de fichiers implique la mise sur pied d'une nomenclature permettant de les repérer et de les manipuler facilement.

Un répertoire baptisé *Donohue* fut créé à la racine de l'unité de disque rigide. Ce répertoire contient 25 sous-répertoires correspondant aux 25 lignes de vol du projet. C'est à l'intérieur de cette arborescence que sont sauvegardés les fichiers images. La nomenclature des images permet de les associer au projet auquel elles se rattachent, à repérer leur ligne de vol ainsi que leur position séquentielle dans cette ligne. Pour sa part, l'extension de type attribuée au fichier précise la bande spectrale qu'il contient. Cette extension sert d'indicateur au logiciel *Boréa* pour lui permettre de charger automatiquement des compositions infrarouges fausses couleurs en «24-bits». Il utilise également cette extension de type pour les manipulations algébriques entre les images. La figure suivante, A2.1, résume la nomenclature des images.

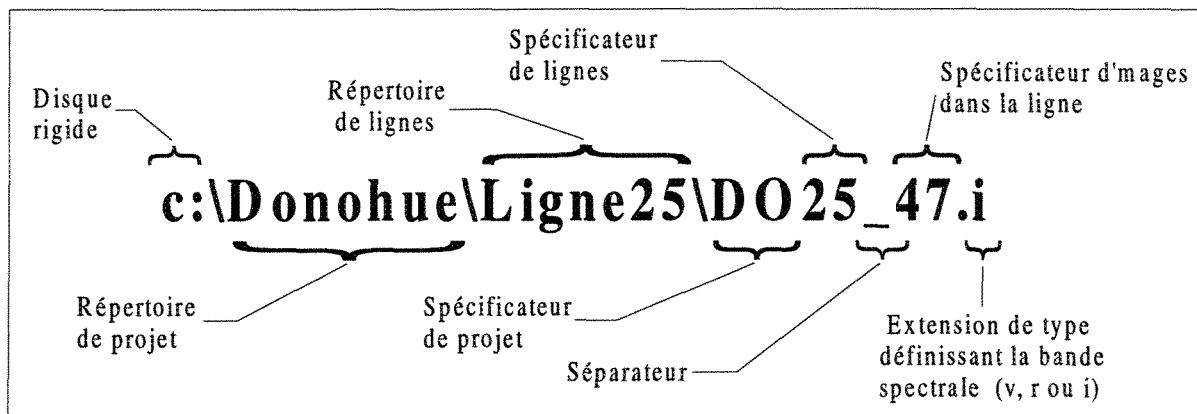


Figure A2.1 Nomenclature des images vidéographiques.

A2.3 La mise en registre des images

Un delta de position, qui est fonction du déplacement relatif entre les plans spectraux, est établi en calculant la différence d'adresse image qui origine du pointage d'un même objet (la cime d'un arbre par exemple) dans les trois plans spectraux. Afin d'assurer

un pointage au pixel près, l'interface de *Boréa* permet des zooms avant et arrière. En appliquant la correction commandée par le delta position, les images sont automatiquement enregistrées sous leur nom d'origine et seule la surface image commune aux trois plans spectraux est conservée. La figure A2.2 présente l'interface du module de mise en registre des images.

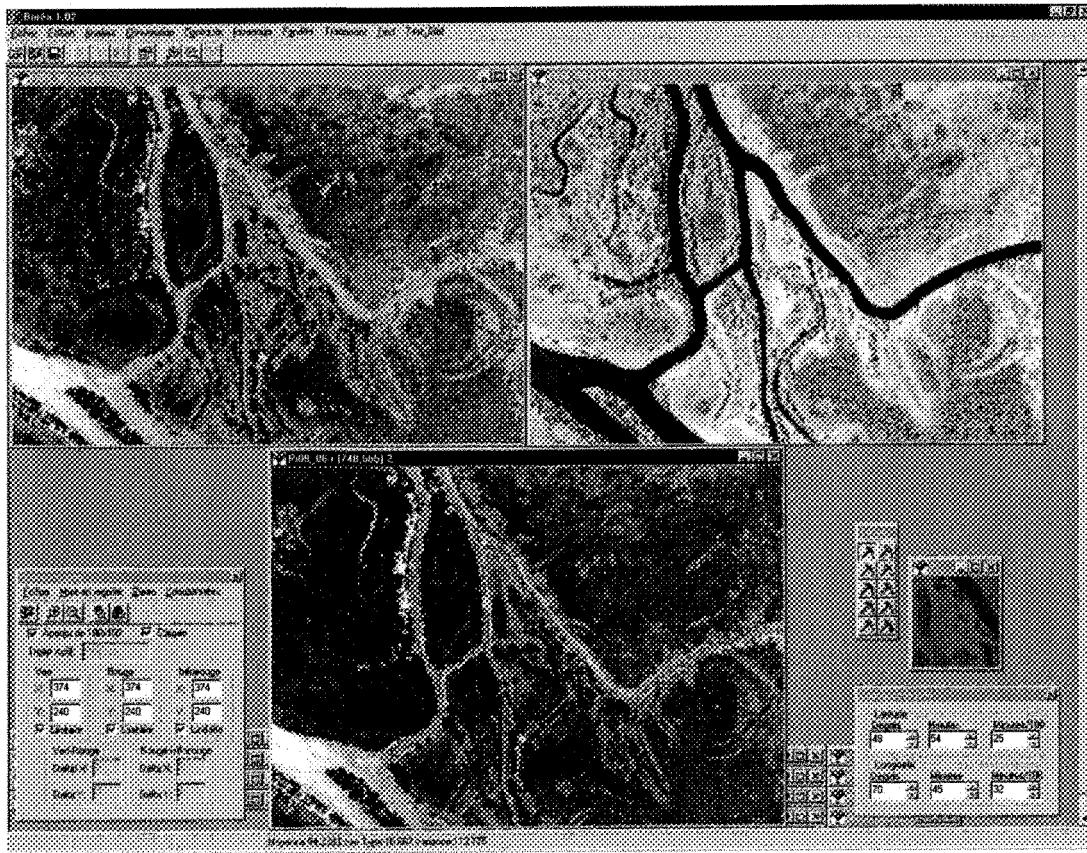


Figure A2.2 L'interface du module de mise en registre du logiciel *Boréa*.

A2.4 Sauvegarde de l'information relative à la position des images

À l'étape de la mise en registre, l'information du marqueur informatisé est visible à la base des images. Cette information de position est essentielle pour localiser les images.

Cependant, comme nous l'avons mentionné précédemment, cette information n'est pas encryptée dans le fichier. Elle est encastrée sous la forme d'image dans l'image.

Afin de conserver cette information tout en l'éliminant de l'image, nous avons développé une structure qui accompagne chacune des images. Lorsqu'une image est chargée dans *Boréa* pour la première fois, cette structure est automatiquement créée et initialisée. En plus de contenir des paramètres techniques servant à la manipulation du logiciel, une dizaine de champs y furent réservés pour sauvegarder certaines des informations stratégiques de ce projet. Le tableau A2.1 présente la structure *Image*.

Tableau A2.1 Paramètres d'intérêt de la structure *Image*

Type	Nom	Initialisation	Fonction
char	rem[255]	utilisateur	Inscrire des remarques et informations sur le contenu de l'image.
float	pixel	automatique	Dimension du pixel (cm)
int	altitude	utilisateur	Altitude du terrain (m)
double	Latitude	utilisateur	Position en latitude (degrés, minutes)
double	Longitude	utilisateur	Position en longitude (degrés, minutes)
byte	date	utilisateur	Inscription de la date (temps)
byte	heure	utilisateur	Inscription de l'heure (temps)

Par défaut ces champs sont initialisés à zéro. Nous exploitons l'étape de la mise en registre pour assigner aux champs de position de la structure *Image* leur valeur réelle. Pour ce faire, une boîte de dialogue faisant partie du module de mise en registre permet de saisir les paramètres.

A2.5 La diminution de l'erreur sur la position fournie par le GPS

Il existe une procédure cartographique permettant d'améliorer la précision de la position des images numérisées. Par défaut, lorsque la numérisation est effectuée adéquatement, cette erreur de position est de l'ordre de 100 m. La carte topographique au 1:20 000 comporte suffisamment de repères pour que la position du centre de plusieurs des images d'une même ligne de vol, typiquement de 3 à 8 par ligne de 5 km, soit identifiable sur le document cartographique. Lorsque cette carte est numérisée et géoréférencée, il devient facile de comparer la position cartographique du centre de ces images à leur position GPS et d'établir un vecteur qui permet de la corriger. Puisque l'on dispose de plusieurs vecteurs de correction le long d'une ligne de vol, il est possible, section de ligne par section de ligne, d'interpoler entre ceux-ci des vecteurs intermédiaires et de s'en servir pour corriger la position des images.

L'application de cette procédure permet d'améliorer le positionnement des images. L'erreur résiduelle est de l'ordre de 20 à 40 m, soit environ 30 m rms plutôt que les 100 m initiaux. Cette procédure, qui s'apparente à l'utilisation d'un GPS différentiel en temps différé, améliore considérablement la précision de la localisation des images.