

Département de géomatique appliquée
Faculté des lettres et des sciences humaines
Université de Sherbrooke

MÉMOIRE DE MAÎTRISE

Cartographie des éricacées (*Kalmia angustifolia*, *Ledum*) en forêts
d'épinette noire (*Picea mariana*) :
Cas de la Côte-Nord.

Janvier 2009

© Olivier van Lier, 2009

I-2336



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 978-0-494-49628-2
Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-49628-2

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

■*■
Canada

Résumé :

L'établissement et la croissance de l'épinette noire en régénération après une coupe en forêts boréales sont fréquemment affectés par la prolifération de plantes éricacées telles le *Kalmia angustifolia*. La compétition éricacées-épinette noire est fréquente au point d'entraîner une baisse significative du potentiel forestier dans la forêt boréale de l'est du Canada. Il est toujours difficile de proposer des scénarios sylvicoles qui garantissent la résilience des peuplements propices à l'invasion. Ceci découle du manque de connaissance des impacts de l'aménagement sur la dynamique des éricacées à l'échelle du paysage ; ainsi que du manque de compréhension des mécanismes écologiques qui font qu'une pessière coupée se transforme en pessière à éricacées et non en pessière dense. L'objectif général de cette étude est de cartographier la distribution spatiale des éricacées au niveau régional. Après l'acquisition des données et de leur prétraitement, une interprétation experte a permis de produire les polygones pour l'entraînement des algorithmes de classification pour les images IKONOS. Deux séries de polygones (couverture de surface et strate arborescente) découlent de ces opérations. Chaque série est associée à l'une des deux stratifications et contient toutes les classes thématiques de cette stratification. Une première segmentation fut appliquée sur une mosaïque de sept images IKONOS pour créer des objets spatiaux. Ces objets ont ensuite été assignés à une classe thématique en faisant appel à la logique floue disponible dans le logiciel eCognition. Deux types de cartes thématiques (strate arborescente et couverture du sol) sont créés à l'aide des sites d'entraînement issus de la photo-interprétation experte. Les résultats furent validés à l'aide des placettes de sondage terrain (précision globale de 80 % pour les deux thématiques). 70% de l'étendue des cartes produites sur la mosaïque IKONOS furent ensuite utilisées pour son application à la classification de l'image Landsat-TM qui couvre toute la zone d'étude. Le 30% non utilisé des cartes de la mosaïque IKONOS ont servi à valider les résultats cartographiques de la classification de l'image Landsat-TM (précision globale de 88.0% pour la carte arborescente et de 78.4% pour la carte de la couverture du sol). Les méthodes et cartes résultantes seront utiles pour la gestion de la ressource forestière, en particulier pour la productivité de l'épinette noire dans les régions nordiques.

Mots-clés :

Classification orientée objet, multirésolution, foresterie, éricacées

Composition du jury

Cartographie des éricacées (*Kalmia angustifolia*, *Ledum*) en forêts
d'épinette noire (*Picea mariana*) :
Cas de la Côte-Nord.

Olivier R. van Lier

Ce mémoire a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Richard A. Fournier, directeur de recherche
Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et des sciences humaines
Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, CANADA

Robert Bradley, codirecteur de recherche
Département de Biologie, Faculté des sciences
Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, CANADA

Dong-Chen He
Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et des sciences humaines
Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, CANADA

Marek Zaremba
Département d'informatique et d'ingénierie
Université du Québec en Outaouais, Gatineau, QC, CANADA

Table des matières

Liste des figures	iii
Liste des tableaux.....	iv
Avant-propos.....	v
1. Introduction.....	1
1.1 Contexte	1
1.2 Problématique	4
1.3 Objectifs et hypothèse.....	6
1.4 Motivation pour le choix de la méthode	7
2. Manuscrit scientifique.....	9
Abstract	9
2.1 Introduction.....	10
2.2 Materials and methods	12
2.2.1 Study area.....	12
2.2.2 Image datasets.....	13
2.2.3 Ancillary and validation data	14
2.2.4 Mapping – general approach.....	15
2.2.4.1 Mapping - data pre-processing.....	16
2.2.4.2 Mapping - land cover stratifications	17
2.2.4.3 Mapping - understory vegetation from the IKONOS mosaic.....	18
2.2.4.4 Mapping – understory vegetation from the Landsat-TM image.....	19
2.2.4.5 Mapping – overstory vegetation at both resolutions.....	20
2.3. Results and their interpretation	21
2.3.1 Maps of understory from the IKONOS mosaic	21
2.3.2 Maps of understory from the Landsat-TM image.....	23
2.3.3 Maps of overstory	26
2.4. Discussion.....	28
2.5. Conclusion	31
References.....	32
3. Précisions sur la méthode.....	36
3.1 Le protocole de mise en place de placette de sondage.....	36
3.2 La photo-interprétation numérique	41
3.3 L’approche orientée objet	44
4. Discussion	47
5. Conclusion	49
Références supplémentaires.....	51

Liste des figures

Fig. 1. La placette-échantillon (MRNF, 2008).....	2
Fig. 2. La carte écoforestière (Gillis et Leckie, 1993).	3
Fig. 3. Semis d'épinette noire envahis par le <i>Kalmia angustifolia</i> et le <i>Ledum</i>	5
Fig. 4. La coupe avec protection de la régénération et des sols (MRNF, 2008).	6
Fig. 5. Study site and spatial coverage of data.	13
Fig. 6. Methodological flow chart.....	16
Fig. 7. Subset areas of (a) the understory map and (b) the overstory map made using the IKONOS mosaic; and of (c) the understory map and (d) the overstory map made using the Landsat scene.	21
Fig. 8. Distribution quantitative des placettes de sondage terrain.....	40
Fig. 9. Distribution spatiale des placettes de sondage terrain sur la couverture de la mosaïque.	41
Fig. 10. Distribution quantitative des polygones issus de la photo-interprétation.	43
Fig. 11. Distribution spatiale des polygones issus de la photo-interprétation sur la couverture de la mosaïque.	43
Fig. 12. Paramètres du processus de segmentation (Definiens, 2006).	44
Fig. 13 Fonctions discriminantes pour les classes thématiques.	46
Fig. II-1. Contenu sommaire des placettes-échantillon permanentes (Noël et Rouleau, 1979).	54

Liste des tableaux

Table 1. Understory land cover classification system.	18
Table 2. Error matrix for the resulting understory map made with the IKONOS mosaic, assessed by project specific ground sample plots.....	23
Table 3. Error matrix for the resulting understory map made with the Landsat-TM image, assessed by IKONOS map remainder (30%).....	25
Table 4. Error matrix for the resulting understory map made with the Landsat-TM image, assessed by project specific ground sample plots.	26
Table 5. Error matrix for the resulting overstory map made with the Landsat-TM image, assessed by IKONOS map remainder (30%).	27
Table 6. Producer's accuracy, commission and omission errors for the resulting overstory maps made with the IKONOS mosaic and the Landsat-TM image; both assessed by classes extracted from the provincial stand maps and by project specific sample plots.	28
Tableau 7. Légende des classes arborescentes et couverture de surface	37

Avant-propos

Structure du mémoire

Le présent mémoire est présenté en cinq chapitres. Le premier chapitre contient des informations sur le contexte du projet; la problématique qui a motivé cette recherche, les objectifs visant à combler les insuffisances évoquées par la problématique ainsi que la motivation du choix de la méthode. Le deuxième chapitre présente le manuscrit décrivant le projet et les résultats soumis au *International Journal of Earth Observation and Geoinformation*. Parallèlement, on tient à mentionner que les méthodes et les résultats de cette étude ont également été présentés lors d'une présentation d'un affiche au cours du *Carrefour de la recherche forestière* à Québec le 19 au 20 septembre 2007 ainsi qu'à une présentation orale le 1^{er} novembre 2007 à Ottawa lors de la 29^e session du *Canadian Remote Sensing Society / American Society for Photogrammetry and Remote Sensing 2007 Specialty Conference* (Résumé en annexe D). Le troisième chapitre traite de détails liés à la méthode non inclus dans le manuscrit. Enfin, le chapitre quatre élabore sur les discussions du manuscrit et le cinquième, les conclusions.

1. Introduction

1.1 Contexte

Avec l'accroissement de la population humaine et l'amélioration de la qualité de vie, il n'y a jamais eu une si grande pression sur les ressources naturelles que maintenant (Norton, 2002). Les conflits entre la conservation et l'exploitation sont multiples et particulièrement évidents dans le domaine des ressources forestières. Dans le monde entier, les paysages changent, les forêts sont vulnérables aux actions humaines et aux forces de la nature. Ils peuvent facilement être détruits par l'urbanisation et perturbés par les feux, la coupe, etc. Au Québec, la couverture forestière s'étend sur une très grande superficie totalisant près de la moitié du territoire québécois soit environ 402.1 million d'hectares (Ressources Naturelles Canada, disponible sur <http://www.nrcan-rncan.gc.ca/stat/forest-eng.php>, visité le 4 janvier 2009).

Étant donné l'importance d'assurer le fonctionnement correct des taux de croissance des forêts en régénération, la cartographie détaillée des écosystèmes forestiers est nécessaire pour la gestion durable des forêts. La donnée spatiale en foresterie est de différents ordres : de la placette terrain à la carte écoforestière (e.g. 400 m² vs 1 : 20 000, respectivement). Selon le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (2000), le Québec compte près de 200 000 sites géoréférencés, répartis sur l'ensemble du territoire forestier et étant définis comme des unités d'échantillonnage. Ces sites, nommés placettes-échantillon (Fig. 1), sont visités et examinés attentivement par les forestiers. Seulement cinq pourcent de ces placettes-échantillon sont considérés comme étant permanentes (PEP), ceci implique que les forestiers planifient revisiter ces sites. Les 195 000 placettes-échantillons restantes sont dites temporaires (PET) et ne servent normalement qu'à un seul programme d'inventaire.

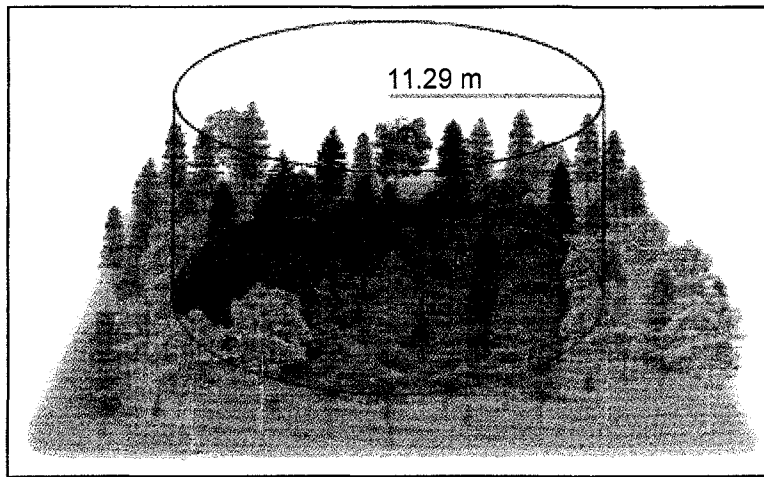


Fig. 1. La placette-échantillon (MRNF, 2008).

Une placette-échantillon temporaire est un endroit spécifique dans un peuplement forestier où les caractéristiques de ce dernier et sa végétation sont mesurées une seule fois. Elles sont établies pour prendre des mesures sur la dynamique de la forêt, de l'arbre et du peuplement (e.g. espèces, hauteur, diamètre, densité, volume) (Noël et Rouleau, 1979). Les attributs principaux mesurés dans les PET sont donnés en annexe II. La PEP diffère de la PET puisque les caractéristiques de ce peuplement et sa végétation sont mesurées périodiquement. Elle fournit un répertoire des changements temporels des arbres et peut être utilisée pour représenter un peuplement avec des caractéristiques similaires (Noël et Rouleau, 1979). Les PEP sont établis dans des peuplements naturels pour pouvoir mesurer le taux de croissance et de mortalité, les changements dans la structure du peuplement et leur développement (Perron et Morin, 1999). Les données recueillies peuvent dès lors être utilisées pour développer des modèles de croissance et de rendement, pour valider les courbes d'indice de qualité de station, pour servir de base à d'autres études scientifiques ainsi que pour fournir de la documentation écologique aux photo-interprètes lors de la production des cartes écoforestières (Perron et Morin, 1999).

La carte écoforestière quant à elle, permet aux forestiers de mieux connaître l'état des forêts et de suivre leur évolution en tenant compte de l'historique des peuplements, des dépôts de surface et du régime hydrique (Létourneau, 2000). Les cartes écoforestières sont confectionnées à partir de l'interprétation des photographies aériennes et inclut les données forestières, écologiques et territoriales sous une même banque de données (Fig. 2). Elle est donc le moyen le plus utilisé dans la pratique pour synthétiser l'information spatiale des écosystèmes forestiers. Cette banque de données est utile en gestion forestière puisqu'elle permet d'estimer le volume

lignieux d'une région d'intérêt, d'en établir la problématique d'aménagement et d'y planifier les interventions à long terme (Bérard et Côté, 1997). Elle permet également un transfert efficace et rapide des informations entre les gestionnaires, améliorant ainsi la communication et la prise de décisions lors de la planification des travaux sylvicoles ainsi que lors du suivi de l'état des forêts. La carte en format vectoriel permet l'exploration et l'analyse des variables de distribution et de proximité qui étaient auparavant trop coûteuse et trop longue à produire avec les méthodes conventionnelles. Beaucoup d'avantages sont associés au format vectoriel de la carte : la précision spatiale du produit au niveau de la prise de donnée facilite sa mise à jour.

Avec l'avènement des systèmes d'informations géographiques (SIG), les intervenants forestiers ont maintenant les outils nécessaires pour mieux planifier leurs activités forestières. À mesure que s'intensifient leurs activités forestières, les forestiers ont besoin de données de plus en plus fiables et précises, ce qui présente un défi étant donné la grande superficie de nos forêts. La photo-interprétation a été l'intermédiaire à la production des cartes forestières pour plus de 30 ans au Service des Inventaires Forestiers (Bérard et Côté, 1997). Cette expérience a démontré qu'une méthode de production rigoureuse incorporant la donnée de télédétection aérienne est essentielle afin d'obtenir un travail de bonne qualité.

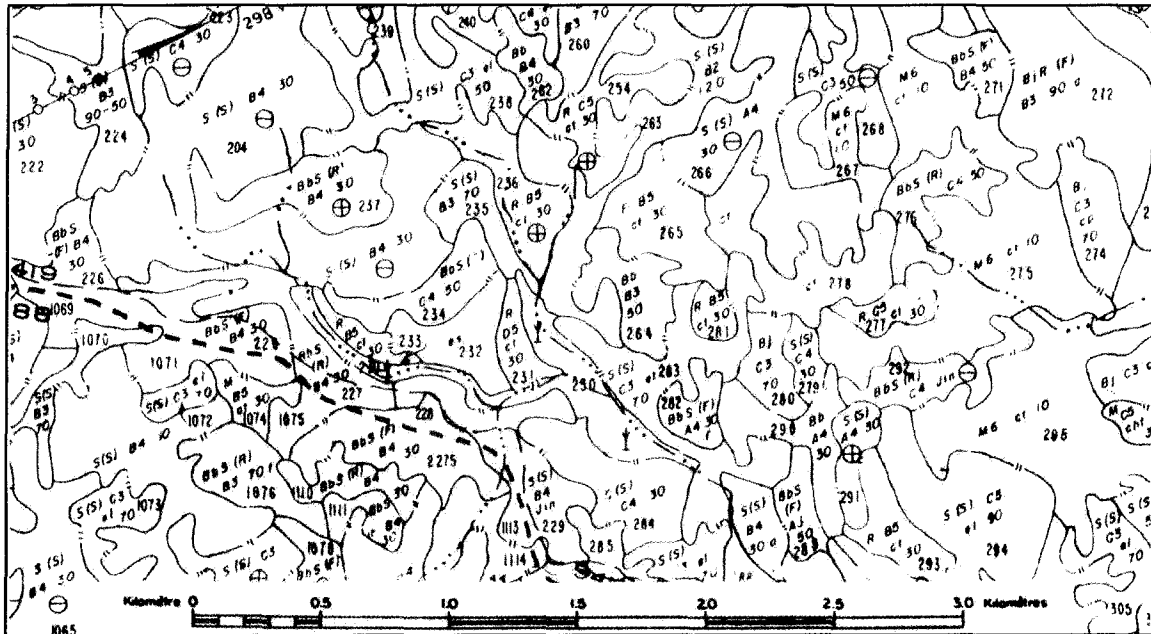


Fig. 2. La carte écoforestière (Gillis et Leckie, 1993).

Les méthodes de cartographie forestière nécessiteront toujours l'interprétation des photographies aériennes puisqu'elles offrent une grande résolution spatiale à un prix raisonnable.

Les photographies aériennes ont été et continuent à être la donnée de télédétection la plus utilisée en foresterie, plus particulièrement dans l'évaluation des ressources naturelles à des fins d'inventaire et de suivi. Leur usage en foresterie a été anticipé à décroître avec l'avènement des technologies avancées dans le domaine numérique et de télédétection satellitaire puisque les données numériques (satellites et aériennes) offrent une meilleure résolution spectrale et radiométrique, et sont en format prêtes à être analysées. Malgré les prévisions que les appareils de photographies numériques élimineraient les photographies aériennes analogues, aucun autre système ne peut offrir une résolution spatiale aussi fine que ces derniers. La résolution spatiale offerte par ces images aide à l'identification d'objets ou caractéristiques d'un paysage lors de la photo-interprétation.

Avec la venue du capteur satellitaire Earth Resources Technology Satellite en 1972, plus tard renommé Landsat-1, la donnée de télédétection satellitaire a établi son usage dans la détection et le suivi des ressources forestières. On l'utilise pour inventorier les régions éloignées, faire la mise à jour des inventaires conventionnels ainsi que pour faire le suivi des coupes et de la régénération. On tire profit de l'utilisation de ces images puisque leur nature numérique offre la possibilité d'automatiser (partiellement ou complètement) l'interprétation sous différentes thématiques pour des grandes surfaces à l'intérieur des logiciels de traitement d'images.

1.2 Problématique

Les gestionnaires des forêts boréales de l'est canadien sont préoccupés par l'influence des éricacées (*Ledum*, *Kalmia angustifolia*, et autres *Vaccinii* es.) sur la croissance de la régénération de l'épinette noire (*Picea mariana*) (Franklin *et al.* 1994a; Wang 1994; Titus *et al.* 1995; Yamasaki *et al.* 2002; Thiffault *et al.* 2005ab). Les éricacées, particulièrement le *Kalmia*, peuvent envahir un site rapidement suite à une coupe forestière ou un feu (Fig. 3). Cette situation a pour conséquence une réduction du taux de croissance des semis d'épinettes, qu'ils soient établis naturellement ou plantés. La compétition entre ces deux espèces végétales est fréquente au point d'entraîner une baisse du potentiel forestier (Wallstedt *et al.* 2002).

Les éricacées sont des plantes opportunistes, relativement résilientes, tirant profit d'une grande variété de conditions de croissance. En effet, elles s'établissent à travers une vaste gamme de conditions environnementales. On les retrouve sur les marais de tourbe au sud, jusqu'aux sites les plus secs au nord de la forêt boréale (Titus *et al.* 1995). Les plantes les plus âgées peuvent

avoir un système racinaire pénétrant à plus d'un mètre de profondeur, permettant leur survie pendant les périodes de grande sécheresse. Leur présence sur un site en régénération entraîne parfois une raréfaction des nutriments nécessaires à la croissance des jeunes épinettes (Titus *et al.* 1995; Wallstedt *et al.* 2002) et nuit aux entreprises d'exploitation forestière.

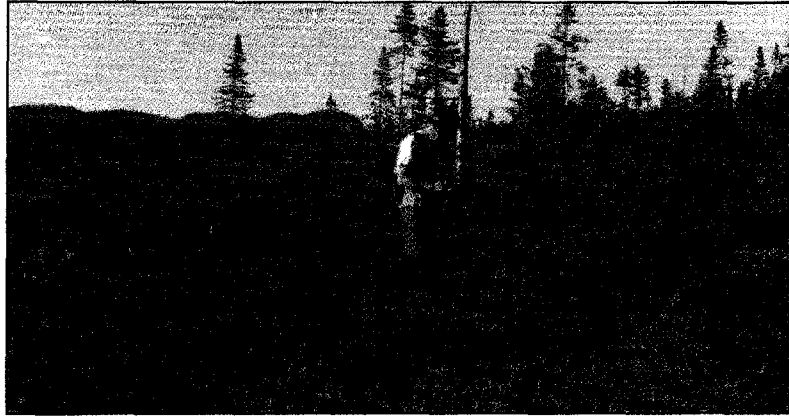


Fig. 3. Semis d'épinette noire envahis par le *Kalmia angustifolia* et le *Ledum*.

Thiffault et Grondin (2003) concluent qu'il est à ce jour impossible de proposer des scénarios sylvicoles promettant la résilience complète des semis propices à l'invasion des éricacées. Cette difficulté provient du manque de compréhension des impacts des aménagements forestiers sur la dynamique des éricacées, ainsi que du manque de connaissance concernant les mécanismes écologiques d'interaction qui transforment une pessière perturbée en pessière à éricacées. Cependant, Boulanger (2005) démontre que l'invasion par les éricacées dans un semis d'épinettes dépend de la fertilité du sol ainsi que de la disponibilité de la lumière, deux facteurs étant significativement affectés par les pratiques sylvicoles. À ce sujet, Thiffault (2005b) compare les effets du scarifiage mécanique et de la fertilisation sur la croissance des semis d'épinettes. Il conclut que le scarifiage réduit la dominance du *Kalmia* et que la fertilisation augmente la croissance initiale des jeunes conifères réduisant ainsi la disponibilité de la lumière pour les éricacées.

Les scénarios sylvicoles permettant d'assurer une croissance adéquate des semis doivent donc être définis, et ce, sans favoriser la croissance des éricacées. Les anciennes méthodes de coupe (coupe totale et partielle : commerciale et pré-commerciale) semblent aggraver la prolifération des éricacées sur les parterres de coupe (Thiffault *et al.* 2005b). L'avènement en 1994, par le gouvernement du Québec, de la coupe avec protection de la régénération et des sols (CPRS) visait à préserver les jeunes pousses d'arbres et à éviter la détérioration des sols (MRNF, 2008).

La CPRS (Fig. 4) permet une plus grande intensité lumineuse au sol tout en laissant intacte une végétation arbustive parfois dominée par les éricacées. Il est donc possible que cette pratique sylvicole entraîne la prolifération d'éricacées sur certains parterres de coupe.

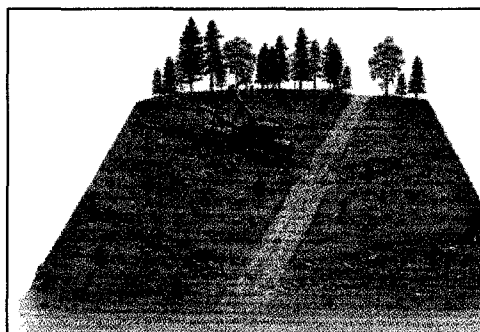


Fig. 4. La coupe avec protection de la régénération et des sols (MRNF, 2008).

Les baisses de productivité forestière dues à la présence d'éricacées ne font pas seulement l'objet d'études au plan écologique (Titus *et al.* 1995; Wallstedt *et al.* 2002; Yamasaki *et al.* 2002; Thiffault et Grondin, 2003; Thiffault *et al.* 2005ab) mais aussi au plan géomatique (Franklin, 1994ab; Wang, 1994; Joshi, 2004). L'application des technologies de la télédétection permet de cartographier plusieurs attributs des espèces envahissantes (Franklin *et al.* 1994; Wang 1994; Joshi *et al.* 2004). À ce jour, la présence d'éricacées sur un site est prise en note seulement lors de l'échantillonnage forestier et écologique (placettes-échantillons permanentes et temporaires; points d'observations écologique). Au delà de ces sites d'échantillonnage, le Québec ne consacre aucun effort sur la cartographie de cette problématique. Il est donc intéressant d'entreprendre le développement d'une méthode de cartographie par télédétection satellitaire de la distribution spatiale des éricacées au niveau du paysage pour une région nordique du Québec.

1.3 Objectifs et hypothèse

L'objectif général de cette étude est de cartographier la distribution spatiale des zones d'envahissement par les éricacées au niveau régional. Quatre objectifs spécifiques visent à combler les insuffisances évoquées par la problématique: (i) produire une carte thématique des zones de présence d'éricacées par télédétection satellitaire à très haute résolution spatiale (3.2 m); (ii) valider la carte thématique en s'appuyant sur des placettes de sondage du terrain spécifiques au projet; (iii) définir une méthode de cartographie thématique de la distribution

d'espèces dans le paysage à partir d'images satellitaires à haute résolution spatiale (30 m) et (iv) valider la méthode de cartographie en s'appuyant sur les résultats cartographiques provenant d'images à très haute résolution ainsi que par les placettes de sondage spécifique au projet. Nous émettons donc l'hypothèse que les zones de présence d'éricacées peuvent être détectées et cartographiées à l'aide de la télédétection à très haute et haute résolution spatiale (Franklin *et al.* 1994ab; Wang 1994).

1.4 Motivation pour le choix de la méthode

Les étapes menant à la production cartographique peuvent être résumé comme suit. Après l'acquisition des données et de leur prétraitement, une photo-interprétation experte a permis de produire les polygones pour l'entraînement des algorithmes de classification pour les images IKONOS. Deux séries de polygones (couverture de surface et strate arborescente) découlent de ces opérations. Chaque série est associée à l'une des deux stratifications et contient toutes les classes thématiques de cette stratification. Une première segmentation fut appliquée sur une mosaïque de sept images IKONOS pour créer des objets spatiaux. Ces objets ont ensuite été assignés à une classe thématique en faisant appel à la logique floue disponible dans le logiciel eCognition. Deux types de cartes thématiques (strate arborescente et couverture du sol) sont créés à l'aide des sites d'entraînement issus de la photo-interprétation experte. Les résultats ont été validés à l'aide des placettes de sondage terrain. 70% de l'étendue des cartes produites sur la mosaïque IKONOS fut ensuite utilisé pour son application à la classification de l'image Landsat-TM qui couvre toute la zone d'étude. Le 30% non utilisé des cartes de la mosaïque IKONOS a servi à valider les résultats cartographiques de la classification de l'image Landsat-TM.

Katoh (2004) a suggéré que le niveau de détails disponible en combinant les photographies aériennes avec des images IKONOS peut potentiellement améliorer la classification. L'option d'utiliser les polygones issus de l'interprétation de photographies aériennes a donc été utilisée dans le contexte de notre projet. De plus, Kayitakire *et al.* (2002) ont démontré que l'information généralisée au niveau de la parcelle à l'aide de l'approche orientée-objet appliquée sur l'imagerie IKONOS peut servir à améliorer la précision d'une classification d'un écosystème forestier. Une approche orientée-objet (avec le logiciel eCognition) a donc été adoptée afin de maximiser le potentiel de nos données de haute résolution. Cette approche nous a permis d'abord de bénéficier de la création d'objets spatiaux par la segmentation et ensuite par l'utilisation de fonctions

discriminantes établies sur les critères spectraux (bandes multispectrales, indices de végétation) et contextuels (relations aux objets voisins).

2. Manuscrit scientifique

Le manuscrit décrivant le projet et les résultats a été soumis au *International Journal of Earth Observation and Geoinformation* le 8 août, 2008.

A multi-resolution satellite imagery approach for large area mapping of ericaceous shrubs in Northern Quebec, Canada.

Olivier R. van Lier^{1†}, Richard A. Fournier¹, Robert L. Bradley², and Nelson Thiffault³

¹ Centre d'Applications et de Recherches en Télédétection, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, J1K 2R1

² Centre d'Étude de la Forêt, Département de biologie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, J1K 2R1

³ Direction de la recherche forestière, Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec, Québec, QC, Canada, G1P 3W8

Submitted 8 August 2008

†Corresponding author: olivier.van.lier@usherbrooke.ca

Abstract

Invasive ericaceous shrubs (e.g. *Kalmia angustifolia*, *Rhododendron groenlandicum*, *Vaccinium* spp.) may reduce the regeneration and early growth of black spruce (*Picea mariana*) seedlings, the most economically important boreal tree species in Quebec. Our study focused, therefore, on developing a method for mapping ericaceous shrubs from satellite images. The method integrates very high resolution satellite imagery (IKONOS) to guide classifiers applied to high resolution satellite imagery (Landsat-TM). An object-oriented image classification approach was applied using Definiens eCognition software. An independent ground survey revealed 80% accuracy at the very high spatial resolution. We found that the partial use (70%) of classified polygons derived from the IKONOS images were an effective way to guide classification algorithms applied to the Landsat-TM imagery. The results of this latter classification (78.4% overall accuracy) were assessed by the remaining portion (30%) of unused very high resolution

classified polygons. We further validated our method (65.5% overall accuracy) by assessing the correspondence of an ericaceous cover classification scheme done with a Landsat-TM image and results of our ground survey using an independent set of 282 sample plots. Discrimination of ericaceous shrub cover from other land cover types was achieved with precision at both spatial resolutions with producer accuracies of 87.7% and 79.4% from IKONOS and Landsat, respectively. The method is weaker for areas with sparse cover of ericaceous shrubs or dense tree cover. Our method is adapted, therefore, for mapping the spatial distribution of ericaceous shrubs and is compatible with existing forest stand maps.

Keywords: Multi-resolution, object-oriented classification, ericaceous shrubs, forestry

2.1 Introduction

Forests cover nearly half of Canada's land area (402.1 million hectares) and play a vital role in its socio-economic development. Forest management is predicated, therefore, on the sustainability of this resource for future generations. In northeastern Canada, foresters are increasingly preoccupied by the growth check of black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) seedlings induced by ericaceous shrubs such as *Kalmia angustifolia* L., *Rhododendron groenlandicum* (Oeder) Kron & Judd, and *Vaccinium* spp. that can quickly invade sites following harvesting or wildfires. These shrubs interfere with black spruce growth through direct competition for resources (e.g. Thiffault et al., 2004) and by modifying soil properties such as pH, litter decomposition and nutrient mineralization rates (e.g. Joannis et al., 2007). The transformation of productive forest stands into heaths poses a threat to the sustainability of Canada's forest sector; adequate monitoring tools must be developed to assess the magnitude of the problem. It is thus essential that we develop a method to map ericaceous swards, as this would give us an indication of which conditions favor their encroachment on disturbed forest sites.

Remote sensing technologies offer many options which are compatible to detection, mapping, and monitoring of invasive species (Wang, 1994; Joshi et al., 2004). Mapping the presence of ericaceous shrubs on regenerating forest sites has already been achieved with 96% overall accuracy through the interpretation of high resolution Compact Airborne Spectrographic Imager

(CASI, 2.5 m spatial resolution) images (Franklin et al., 1994a). Likewise, Franklin et al. (1997) were able to distinguish three different classes of ericaceous shrub cover (low, moderate, and heavy) on disturbed sites with high accuracies (87–99%) using high spatial resolution imagery (CASI). The use of very high spatial resolution imagery is, however, costly and time-consuming for large-scale detection purposes. *Kalmia angustifolia* can be detected with lower resolution images (i.e. Landsat-TM), but with a concomitant lower overall accuracy of 82% (Franklin et al., 1994b). The studies from Franklin et al. were limited to the detection of these shrubs at a local scale mapped on one image and confined to disturbed sites. There is, therefore, a need to develop a method to detect the abundance of ericaceous shrubs for more diverse forest conditions and to expand the application to mapping ericaceous shrubs on a regional scale consistent with forest management planning.

We now face the interesting situation of selecting images from many alternative technologies varying in all spatial and spectral resolutions. Very high resolution aerial photographs continue to be the most used remotely sensed data in forestry, specifically in evaluating natural resources for inventory and monitoring purposes (Howard, 1992). Sometimes, aerial photographs have been used to define a posteriori sample sites derived from an unsupervised classification's spectral clusters (Kindscher et al., 1998). Research has also shown high resolution IKONOS satellite imagery to be relevant for the extraction of forest stand information and mapping (Kayitakire et al., 2002). Katoh (2004) concluded that information on individual trees can be acquired by combining aerial photographs with IKONOS images. This same principle was applied to define the data used to train classifiers for the thematic classification of the IKONOS mosaic.

Object-oriented based image classification has sometimes been found to be superior in accuracy to traditional pixel-based classification approaches (Rego and Koch, 2003; Oruc et al., 2004), specifically for high resolution image analysis (Xiaoxia et al., 2004). If surface textures are complex, polygon-based multi-resolution segmentation can be beneficial for an initial delineation of different land cover types (e.g., Hess et al., 2003). The segmentation process is a bottom-up region-merging procedure which begins with single-pixel segments (Definiens, 2006). The multi-resolution segmentation allows for object creation at different scales, thus facilitating the thematic classification of larger objects (i.e. forested areas, disturbances, waterbodies, etc...) to finer objects (i.e. ericaceous shrub dominated sites). The need for an ericaceous shrub

mapping method which takes advantage of very high spatial resolution information applied at a super-regional level on high spatial resolution information is essential to further understand the spatial distribution of these species. The complexity of the species' distribution forces, however, the use of a classification method beyond the traditional classification techniques (i.e., pixel-based supervised maximum likelihood).

The aim of this study was to provide a method of mapping the percent land cover of ericaceous shrubs at a regional scale which could be applied to larger eastern boreal regions of Canada. We integrated multi-resolution data as this approach has proven to be beneficial for mapping large areas (Yang et al., 2003). The mapping method was designed for two spatial resolutions: (1) very high spatial resolution (with pixel of ~ 3 m) for detailed maps at the local scale, and (2) high spatial resolution (with pixel of ~ 30 m) for regional maps. In so doing, we developed a new procedure to use very high spatial resolution images to guide the thematic classification of a high spatial resolution image. The method is compatible with procedures and datasets used in the existing forest inventory.

2.2 Materials and methods

2.2.1 Study area

The study area (19,178 km²) is located on the North shore of the St. Lawrence River, 350 km Northeast of Quebec City and 105 kilometers North of the Town of Baie-Comeau, Quebec, Canada (Fig. 5). It is situated in the boreal shield ecozone (Lowe et al., 1994) comprising many lakes, rivers, peatlands and bogs in a rolling topography of pre-Cambrian Canadian Shield. Rock outbreaks occupy approximately 40% of the land area, especially present on vast tabular peaks, along major waterbodies and on steep slopes. A thin layer of glacial till material often covers moderate slopes and certain low rising hills, while thick till can be found in thalwegs and along easy sloped interfluves (Robitaille and Saucier, 1998). Fluvioglacial deposits occupy the larger valleys of the area (Robitaille and Saucier, 1998). The climate is classified as Subpolar Subhumid Continental (Robitaille and Saucier, 1998) and species diversity is much lower than in any temperate deciduous forests further south. The growing season is but 140 days and annual average temperatures range between -2.5 to 0.0 °C. Precipitation is abundant with an annual average of 1,300 mm, of which 35-40% fall as snow. The major tree species are black spruce and balsam fir (*Abies balsamea* (L.) Mill.), with occasional white spruce (*Picea glauca*

(Moench.) Voss), white birch (*Betula papyrifera* Marsh.), aspen (*Populus tremuloides* Michx.) and jack pine (*Pinus banksiana* Lamb.). The study area has been logged for a century and is subject to a natural fire disturbance cycle of 270 years (Bouchard et al., 2008). Ericaceous shrubs dominate many disturbed sites within the study area.

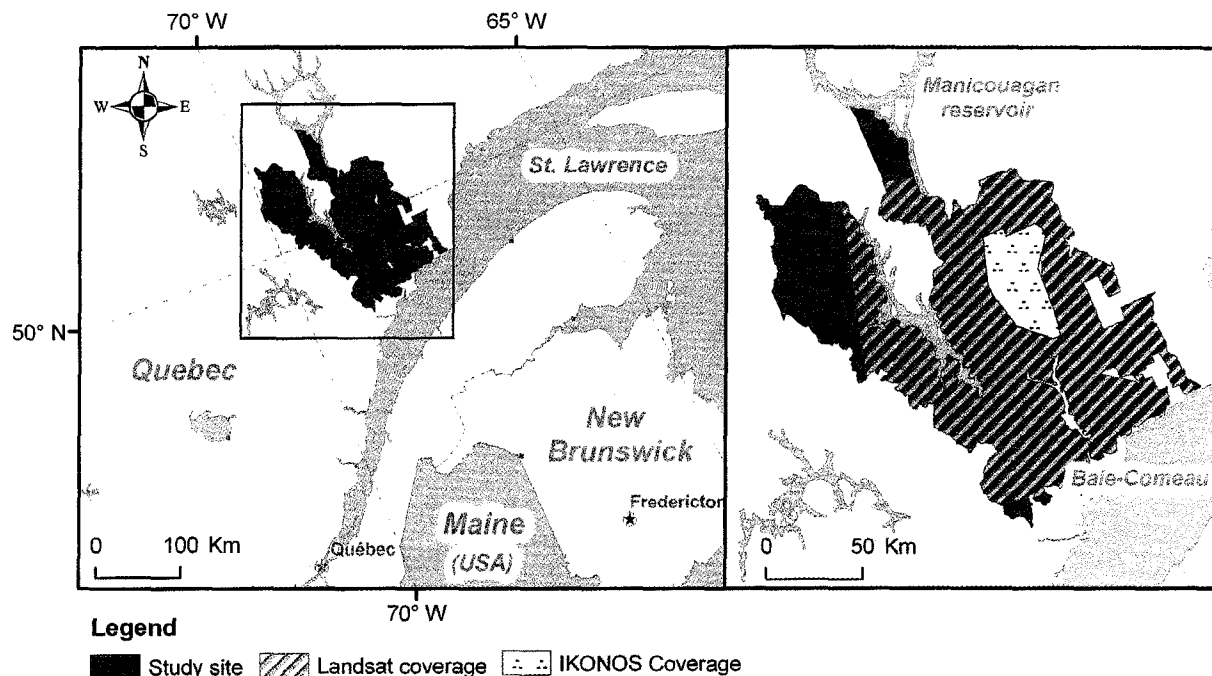


Fig. 5. Study site and spatial coverage of data.

2.2.2 Image datasets

The multi-resolution image dataset for this project is composed of 152 aerial photographs, seven adjacent IKONOS images and one Landsat-TM image which covers 15,580 km² of the study site (Fig. 5). Black and white aerial photographs (1:15,000) were taken between July and September 1999 using a WILD camera with a focal length of 151.413 mm. The photographs were available in printed format, were digitized at 1200 dpi and conform to forest surveying standards set by the provincial government. Aerial photographs were taken to facilitate stereoscopic interpretation with 60% overlap within the continuous flight line. The large areas made available for stereoscopic digital interpretation (327.64 km²) offered great potential for the selection of homogeneously pure and disperse spatially distributed sample sites.

Seven IKONOS images were joined in a mosaic to cover a continuous area of 1,397 km² within the study site. All IKONOS images were taken around nadir with scan azimuth ranging

from 180.05° to 180.07° in reverse, and 0.06° in forward, scan directions. These images were acquired on either July 8, 13 or 16, 2005 at Greenwich Mean Times varying from 15:48 to 16:06 (i.e. 11:48 to 12:06 local time). All images have a spatial resolution of 3.2 m per pixel throughout their four spectral bands (1: 0.45 – 0.52; 2: 0.52 – 0.60; 3: 0.63 – 0.69; 4: 0.76 – 0.90 μ m). No processing was applied to the radiometric values beyond what was applied by the image provider's algorithm to reduce sensor anomalies. All images were purchased with geometric correction made by the image provider and this proved to be accurate enough with error well within 5 m when it was linked with other spatial products. The mosaic was created with Geomatica OrthoEngine® software (©PCI Geomatics, Richmond Hill, Ontario, Canada) to facilitate image manipulation and interpretation. In this process, histogram color balancing (©PCI Geomatics) was computed using the overlap area between images while cutlines were drawn using a combination of minimum grey and gradient values to determine its optimum location.

The Landsat-TM image was acquired on the 15th of July 2005 (path 12, row 25). It was made available with five spectral bands (1: 0.45 - 0.52; 2: 0.52 - 0.60; 3: 0.63 - 0.69; 4: 0.76 - 0.90; 5: 1.55 - 1.75 μ m) at a spatial resolution of 30 m per pixel. Neither radiometric nor geometric normalizations were applied beyond what was already done by the image provider for the image product at level 1G (Systematic Correction).

2.2.3 Ancillary and validation data

Ancillary data were acquired from forest stand maps (1:20,000), 71 permanent and temporary sample plots as well as 138 ecological observation points (Saucier, 1994) established by the Quebec Ministry of Natural Resources and Wildlife. The stand maps and sample plots informed us on stand age and tree species composition whereas ecological observation points included details on topography, soil taxa, geological parent material, drainage class and understory vegetation (including the presence of ericaceous shrubs). We established 282 supplementary validation plots (minimum area of 0.09 ha) with variable land cover. All of these plots were located 50 to 300 m from the roadside, and at least 50 m away from a river, a lake or a recently disturbed stand (i.e., clearcut, burn or windthrow). Spectrally homogeneous polygons were delineated on the IKONOS mosaic using a segmentation algorithm from eCognition software (©Definiens, Munich, Germany) with a 'scale' parameter set at 15. The centroid of each polygon

was then used as a potential point to establish a plot. Points were located in the field with a GPS with 3-9 m accuracy. For each plot, we noted latitude and longitude, understory and overstory vegetation, and we estimated the percent cover of these vegetation groups. Five photographs of each plot were taken, one of the ground cover and one in each cardinal direction.

2.2.4 Mapping – general approach

The methodological flow chart depicted in Fig. 6 illustrates the important steps followed for mapping ericaceous shrubs. Training datasets in the form of polygons for all thematic classes identified for mapping were produced with the assistance of an independent expert in aerial photo-interpretation. The polygons created from this interpretation were used as training areas for the object-oriented classification of the IKONOS mosaic. Once validated with ground-truthing plots, the resulting thematic map was randomly divided in two groups of polygons: 70% were used to train the classifiers for the Landsat-TM imagery; the remaining 30% were then used to validate the mapping results derived from the Landsat-TM dataset. This proportion for polygon division was equivalent in all map classes. The Landsat-TM image classification followed the same iterative procedure applied to the IKONOS mosaic, using different training data. The validation plots were also used to assess the results from the classification of the Landsat-TM image. Four maps were created at two resolutions, that is, one map of the understory and one map of the overstory for each of the IKONOS and Landsat-TM resolutions.

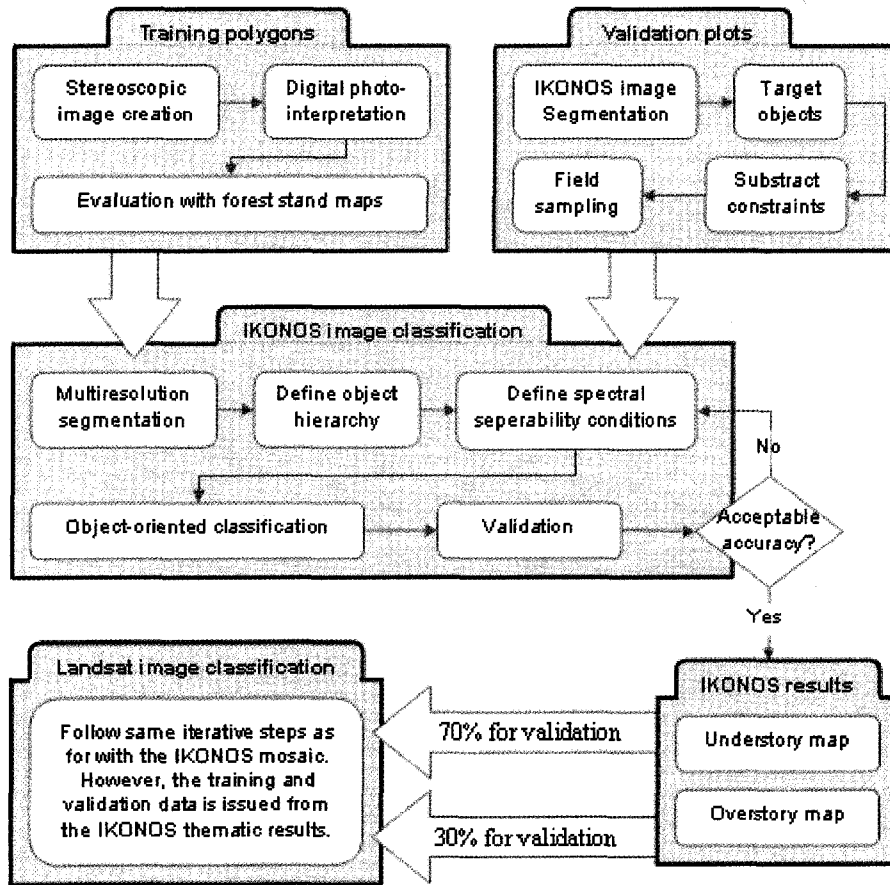


Fig. 6. Methodological flow chart.

2.2.4.1 Mapping - data pre-processing

The use of several image and data types of different sources and scales imposed careful data pre-processing to ensure proper spatial referencing. All spatial data were georeferenced to the same cartographic projection system and same datum (Universal Transverse Mercator zone 19; North American Datum 1983) to insure proper geographic compatibility between the datasets.

Aerial photographs were used to create 54 digital stereoscopic models within DVP-GS' software (©Groupe Alta, Quebec City, Canada). Each model comprised two digitized photographs in which we defined (1) the interior orientation: reconstructing the interior perspective with respect to the projection center; (2) the relative orientation: defining the spatial relationship between two photographs having a central area in common; and (3) the absolute orientation: establishing the correspondence between the stereoscopic model and its geographic coordinates (Bissonnette 2007).

The seven IKONOS images were created as a mosaic to enable analysis on one data entity. No atmospheric or radiometric distortions were visually apparent on any of the satellite imagery. Vegetation indices were calculated for both the IKONOS mosaic and Landsat-TM image and were added as a band to the original image dataset. Normalized difference vegetation index (NDVI) was first calculated (Jensen, 2004). Next, the second Tasseled Cap component (TCC), often called the Greenness component, was calculated from the IKONOS imagery as suggested by Horne (2003) and Navalur (2007). The TCC, previously used for multi-resolution image segmentation and involved in the object-oriented classification process of the mosaic, is defined as follows:

$$u_2 = -0.311x_{\text{blue}} - 0.356x_{\text{green}} - 0.325x_{\text{red}} + 0.819x_{\text{nir}} \quad (\text{Horne 2003})$$

where u_2 is the second Tasseled Cap band, and for a specific pixel, let x_i for $i = \text{blue, green, red, and near infra-red}$ represent the DNs in each of the respective bands of the IKONOS sensor.

2.2.4.2 Mapping - land cover stratifications

Available land cover stratifications of stand cover types usually deal with the dominating tree-level components of the landscape only; they do not include the understory layers (e.g. Friedl et al., 2002; Wulder et al., 2003). As a result, we needed to define two separate sets of classes for the project associated with two resulting maps: understory and overstory. Overstory classes (Table 1) were an aggregated set of classes selected from the current provincial forest service's stand map stratification scheme (Létourneau et al., 2003). For understory classes, a new stratification scheme was devised with particular attention to ericaceous shrub cover (Table 1). This stratification comprised mutually exclusive classes, exhaustive cover of potential land cover classes and hierarchically consistent cartographic strata (Jensen, 2004). Some classes for the understory map were similar from the one adopted by the provincial Ministry of Natural Resources and Wildlife, namely for the forested impervious and wetland classes. However, as their stratification excluded ericaceous strata, we added seven classes to this scheme. Classes E1D, E2D and E3D identify percent cover of ericaceous shrubs in harvested areas of 76-100%, 51-75% and 25-50%, respectively. Similarly, the same percent cover of ericaceous shrubs found in the understory of forested or fully vegetated areas were represented by classes E1V, E2V and

E3V. The seventh class, NER, denoted regenerating sites with no ericaceous shrubs. Although both understory and overstory maps were produced, this paper focuses primarily on the validation and interpretation of the understory map.

Table 1. Understory land cover classification system.

Super-objects	Sub-Objects
Harvested	Alder
	Wetland
	Non-ericaceous regeneration E1D, E2D, E3D
	Exposed land
Forested	Alder
	Coniferous
	Deciduous
	Mixed wood
	E1V, E2V, E3V
	Exposed land Wetland
Waterbodies	
Cloud	
Shadow	

Note 1: E1D, E2D and E3D identify percent cover of ericaceous shrubs in harvested areas of 76-100%, 51-75% and 25-50%, respectively. Similarly, E1V, E2V and E3V identify the same percent cover of ericaceous shrubs found in the understory of forested or fully vegetated areas.

2.2.4.3 Mapping - understory vegetation from the IKONOS mosaic

Polygons of uniform land cover classes for both the understory and overstory themes, which served as training data for the IKONOS thematic classification, were produced by an expert aerial photo-interpreter using digital stereoscopic models. The interpretation was guided by the available ancillary data excluding forest stand maps. To ensure the mutual exclusiveness of each class, the photo-interpreter selected only homogeneous samples associated (i.e. there was to be no visible ericaceous understory in any forested samples). Selected polygons ranged from 0.5 to 12 ha. A cross-reference with the forest stand map validated the training data. The interpretation generally showed little to no differences with the forest stand map.

A first large-scale image segmentation was carried out solely on the second component of the Tasseled Cap transformation, enabling the classification of large bodies of water. Unclassified

objects were merged and re-segmented using the blue, green, red and near-infrared bands of the mosaic (weighed 0.3, 0.3, 0.3 and 0.9 respectively) permitting the classification of smaller waterbodies, disturbance sites, exposed land, forested terrain, cloud and shadow. The classification of these groups within eCognition software was refined by iterative manual editing and segmentation at finer levels using all six weighted bands (four multispectral, NDVI, TCC) together with software utilities (discriminatory functions, feature view, 2D feature space plot). The training polygons from the photo-interpretation were then imported to guide the standard nearest-neighbor classifier to classify the sub-objects in relation to their super-objects (Table 1).

We used the error matrix to assess the accuracy of our results and to characterize the errors (Congalton, 1991; Congalton and Green, 1993; Foody, 2002; Wu and Shao, 2002). A nearest-neighbor classification was then performed and error matrix derived from the validation plots serving as ground truth. Class descriptions for which the accuracies were low were re-examined and addition, subtraction, or definition of new threshold parameters on object features were redefined according to the class's respective sample space. This was done recursively until satisfactory results were achieved.

2.2.4.4 Mapping – understory vegetation from the Landsat-TM image

The classification process for the high resolution Landsat-TM imagery followed the same iterative steps as for the very high resolution IKONOS mosaic (Fig. 2). However, since statistical variance of pixel spectral values decreases with poorer resolution (increasing the proportion of mixed pixels), there was a need to increase sample dimension. The training and validation data for this classification and accuracy assessment were therefore polygons produced from the IKONOS mosaic instead of the aerial imagery. This involved separating training from validation polygons automatically from the resulting thematic IKONOS derived map. A random selection of 70% of polygons of each mapping class was applied to the mosaic's classification results and imported as a training mask to the Landsat-TM image classification. Fine polygons were also generated from the segmentation of the Landsat-TM image. Sample polygons were selected from the Landsat-TM image when a minimum overlap of 80% was obtained between the Landsat-TM polygon and the corresponding polygon area from the training mask. The remaining 30% of the polygons from the mosaic's classification were imported to be used for accuracy assessment. A

supplemental evaluation of the results was done using an error matrix between the classification results and the validation plots made specifically for this project.

2.2.4.5 Mapping – overstory vegetation at both resolutions

The methodological steps involved in the overstory mapping followed the same protocol as for the understory mapping. Additional accuracy assessments were made by comparing these maps with the forest inventory and sample plots. Provincial forest management inventory stand maps were used to generate land cover reference data. The stand maps did not include classes which were defined through our stratification and needed to be labelled accordingly. Seven classes were extracted directly from the inventory maps and used in the accuracy assessment process (water; wetland, alder, coniferous, deciduous, mixed wood and exposed land). For our purposes, accuracy was first assessed by the IKONOS map (remainder of 30%). In support of this validation, an assessment was carried out by comparing the overstory map pixel value directly to the label of the inventory polygon. Further validation of the results was assessed by comparing the classification results with the validation plots. Only sample plots associated to one thematic class were used (e.g. a plot of class E1V and coniferous was not taken in account) otherwise biasing the validation by over sampling forested classes; namely coniferous.

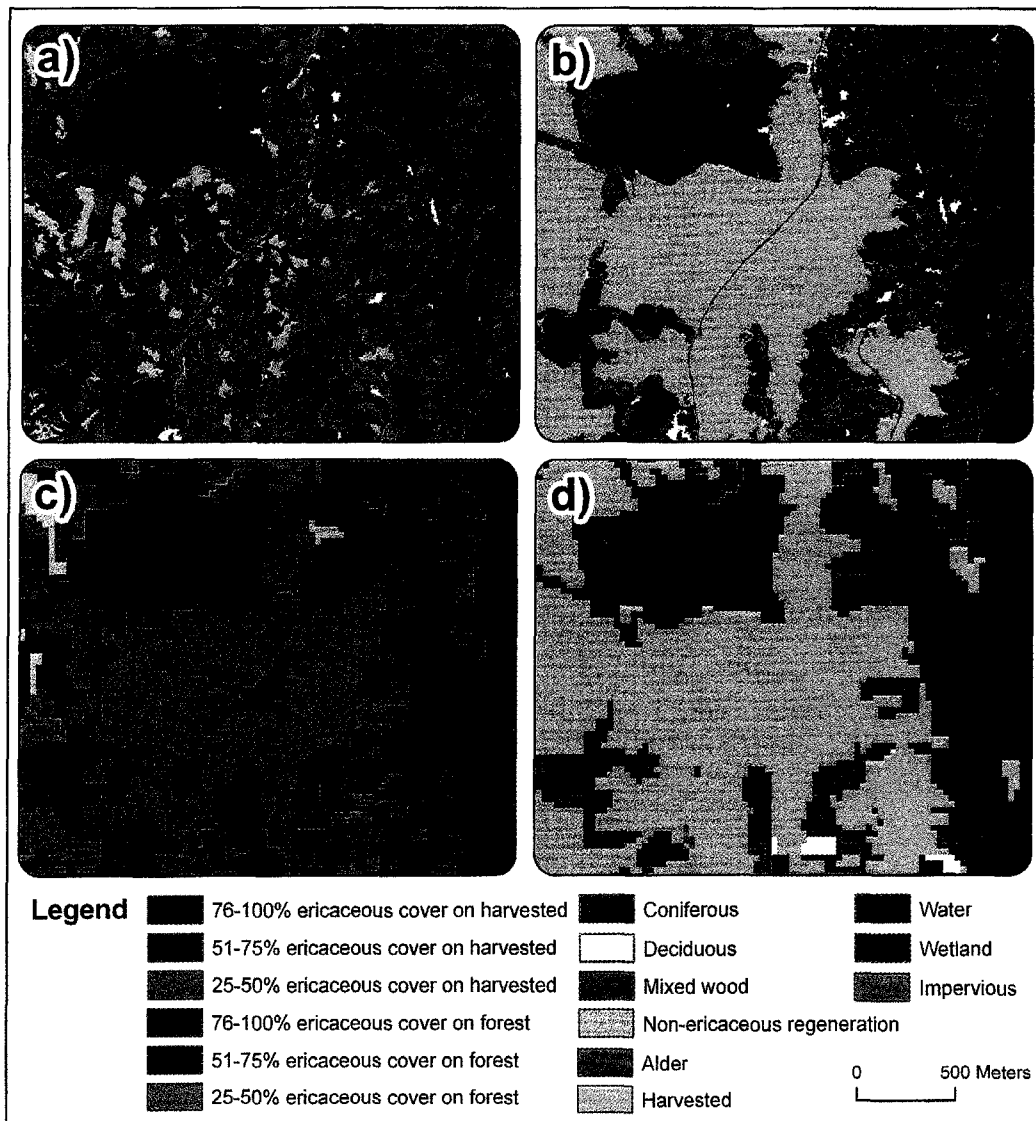


Fig. 7. Subset areas of (a) the understory map and (b) the overstory map made using the IKONOS mosaic; and of (c) the understory map and (d) the overstory map made using the Landsat scene.

2.3. Results and their interpretation

2.3.1 Maps of understory from the IKONOS mosaic

Fig. 7a illustrates a subset area of the understory map derived from the IKONOS mosaic. The error matrix of this classification (Table 2) was derived through a comparison with the validation plots and gave an overall classification accuracy of 69.9% with a Kappa coefficient (K) of 0.67 for the most detailed understory classes. The overall classification accuracy was 79.8% (K of

0.72) when ericaceous shrub density classes were generalized to a single ericaceous class. Spectral confusion is noticeable between ericaceous shrub cover classes. Ericaceous shrub cover was classified with producer's class accuracies ranging from 44.4% (E3V) to 86.2% (E1D). Confusion was apparent between density classes and supported by the higher overall accuracy of merged density classes (i.e. generalized). The discrimination level between E1V and E2V is lower than the one between classes E2V and E3V. For class E1V, we note that 33% of the 18.2% commission error and 43% of the 50.0% omission error are associated to its neighboring cover class E2V. Similarly, for class E2V, we note that 75% of the 42% commission error and 25% of the 27% omission error are related to class E1V. Overestimation of class E3D is apparent. Small errors were observed between E1D; E2D, E1V, E2V, E3V, coniferous forest, deciduous forest, non-ericaceous-regeneration sites and the E3D class. The error matrix therefore shows that ericaceous shrubs can generally be identified from other classes with a high level of accuracy (i.e. producer's accuracy of 87.7% with commission and omission errors below 15%). However, it is observed that most of the confusion in the density classes occurs between parented classes of the general ericaceous category (e.g. E1V with E2V; or E1D with E2D).

Ericaceous shrubs found in the forest's understory were difficult to spectrally discern from other classes from the proposed stratification since tree types found in these areas varied in density and essence as the understory varies in land cover (e.g. mosses, ericaceous shrubs, impervious outbreaks, alder, fallen trees and/or debris). Hence, there is some spectral confusion with other classes of the proposed land cover stratification. The errors in the ericaceous shrub discrimination (shaded in Table 2) are mainly a result of confusion with forested classes (i.e. coniferous, deciduous and mixed forest) accounting for 68% of the 13% commission error and 65% of the 12% omission error. Therefore, the confusion between ericaceous shrubs and forested areas were the second source of confusion in importance.

Table 2. Error matrix for the resulting understory map made with the IKONOS mosaic, assessed by project specific ground sample plots.

Ref	Classified															P	C	O
	WAT	WET	ALD	E1D	E2D	E3D	E1V	E2V	E3V	NER	CON	DEC	MIX	EXP	Total			
WAT	21	1	1					1			1				25	84.0	12.5	16.0
WET	3	9		2										1	15	60.0	18.2	40.0
ALD			24	1	1						1				27	88.9	20.0	11.1
E1D				25	2										29	86.2	21.9	13.8
E2D		1		2	21	2				1			1		28	75.0	38.2	25.0
E3D				3	3	14				1				1	20	70.0	44.0	30.0
E1V			1	3	3	14	8			1			1		28	50.0	17.6	50.0
E2V				3	11	1								1	15	73.3	42.1	26.7
E3V				3	3	8				5			3		18	44.4	38.5	55.6
NER						1				7				1	9	77.8	22.2	22.2
CON			1			2		1	2		13		2	1	22	59.1	50.0	40.9
DEC			1		2	1			1		1	9			15	60.0	0.0	40.0
MIX			1		1		2				4		7		16	43.8	50.0	56.3
EXP			1											14	15	93.3	26.3	6.7
Total	24	11	30	32	34	25	17	19	13	9	26	9	14	19	282			

Note 1: Overall accuracy = 69.9%. K = 0.67. WAT, water; WET, wetland; ALD, alder; NER, non-ericaceous regeneration; CON, coniferous; DEC, deciduous; MIX, mixed wood; EXP, exposed land; E1D, E2D, E3D, E1V, E2V, E3V are ericaceous shrub densities; P, producer's accuracy (%) for the class; C, commission error (%) for the class; O, omission error (%) for the class.

Note 2: Merged shaded area represents the more general ericaceous land cover. Overall accuracy = 79.8%. K = 0.72%.

2.3.2 Maps of understory from the Landsat-TM image

Subset areas of the understory map made from the Landsat-TM image is illustrated in Fig. 7c. The comparison of the Landsat-TM classification results with the 30% validation polygons of the IKONOS mosaic (Table 3) gave an overall classification accuracy of 70.8% (K of 0.58) for the more detailed land cover classes. As with the IKONOS classification, ericaceous density classes were generalized to a single ericaceous class resulting in a higher overall classification accuracy of 78.4% (K of 0.67). The class specific discriminations are more sparsely distributed than the IKONOS classification results due to the larger validation dataset; i.e. greater commission and omission errors were observed. Ericaceous shrub percent cover classes are classified with higher

producer's accuracies than for the IKONOS mosaic with values ranging here from 44% (E3V) to 56% (E1D, E3D). Small errors are observed speckled across the matrix with no major class discrimination problems. Significant confusions are seldom in occurrences with most being acceptable and understandable as such is between mixed and coniferous forests. Table 3 also informs us of the degree of confusion between ericaceous shrub density classes within its respective generalized class (shaded). We note that discriminations errors associated with the generalized ericaceous shrub class are largely due to confusion with the coniferous class (54% of the 23% commission error; 32% of the 21% omission error).

The second evaluation resulted in an error matrix which compares the final classification and the validation plots taken as ground truth (Table 4). The overall classification accuracies were (a) 53.5% (K of 0.44) for the detailed understory classes and (b) 65.5% (K of 0.55) when ericaceous density classes were generalized to a single ericaceous class. Similar to the assessment based on the IKONOS map remainder, omission errors associated with the generalized ericaceous shrub class are largely due to confusion with the coniferous class (71% of the 30% omission error). Conversely, the majority of the commission error is associated with the alder class (46% of the 12% commission error). This assessment reveals ericaceous shrub cover classified with class accuracies ranging now from 16% (E3V) to 75% (E3D). An over estimation of the E3D cover is noted and accounts for such a high individual class producer's accuracy. Again, confusion in the density classes occurs mainly between parented classes of the general ericaceous category and of second importance, the coniferous class.

Table 3. Error matrix for the resulting understory map made with the Landsat-TM image, assessed by IKONOS map remainder (30%).

Ref	Classified															P	C	O
	WAT	WET	ALD	E1D	E2D	E3D	E1V	E2V	E3V	NER	CON	DEC	MIX	EXP	Total			
WAT	479	1				1	1	1			20			1	504	95.0	50.6	5.0
WET	67	20	6	22	18	19	10	12	2	1	45	4	14	8	437	47.8	48.6	52.2
ALD	30	8	439	39	26	38	13	15	6		51	7	23	15	708	7.2	93.6	92.8
E1D	19	14	45	308	85	22	23	30	5	27	62	6	25	62	1615	56.2	46.3	43.8
E2D	11	5	44	12	54	12	6	13	10	14	43		17	36	1017	53.2	54.2	46.8
E3D	25	23	76	33	24	13	21	27	17	33	107	5	41	100	2302	56.6	35.7	43.4
E1V	50	10	10	16	15	12	21	7	11	1	69		13	8	421	48.7	61.8	51.3
E2V	27	14	15	3	10	27	11	26	2	1	101	1	22	18	546	46.9	57.8	53.1
E3V	8	4	2	5	5	9	5	7	15		18		1	2	104	44.2	70.9	55.8
NER			4	17	8	18	3	1	2	77	6		1	8	144	53.5	56.0	46.5
CON	178	93	94	130	103	139	175	164	55	4	8526	29	408	65	10163	83.9	7.9	16.1
DEC	1		3	1		1	1			2	6	62	6		83	74.7	50.4	25.3
MIX	64	11	28	27	19	38	21	25	7	1	162	8	547	7	965	56.7	51.7	43.3
EXP	11	10	27	76	53	81	24	17	4	14	43	3	14	413	790	52.3	44.4	47.7
Total	970	407	793	1690	1180	2025	536	606	158	175	9259	125	1132	743	19799			

Note 1: Overall accuracy = 70.8%. K = 0.58%. WAT, water; WET, wetland; ALD, alder; NER, non-ericaceous regeneration; CON, coniferous; DEC, deciduous; MIX, mixed wood; EXP, exposed land; E1D, E2D, E3D, E1V, E2V, E3V are ericaceous shrub densities; P, producer's accuracy (%) for the class; C, commission error (%) for the class; O, omission error (%) for the class.

Note 2: Merged shaded area represents the more general ericaceous land cover. Overall accuracy = 78.4%. K = 0.67%.

An overview of Tables 2 and 3 reveals high producer's accuracies assessed between polygons classified as ericaceous and their respective validation data (88% from IKONOS and 79% from Landsat-TM). Comparing the accuracies for the density classes with their generalized one, we confirm that the residual confusion is essentially confined to within similar classes. Results were lowest (producer's accuracy of 44% at both spectral resolutions) where ericaceous shrub percent cover was between 25% and 50% of a forested or fully vegetated area's understory.

Table 4. Error matrix for the resulting understory map made with the Landsat-TM image, assessed by project specific ground sample plots.

Ref	Classified															P	C	O
	WAT	WET	ALD	E1D	E2D	E3D	E1V	E2V	E3V	NER	CON	DEC	MIX	EXP	Total			
WAT	14	3								8					25	56.0	30.0	44.0
WET	5	6			1	1				1		1			15	40.0	40.0	60.0
ALD			14		1	4			1	5				1	26	19.2	68.8	80.8
E1D				2						2		1	1		29	51.7	0.0	48.3
E2D					11	13								2	27	40.7	35.3	59.3
E3D						16				1	2			2	20	75.0	69.4	25.0
E1V		1					2	12	2			1			28	42.9	20.0	57.1
E2V								7						2	16	46.7	30.0	53.3
E3V								2	3						18	16.7	0.0	83.3
NER							1			8					9	88.9	11.1	11.1
CON	1						1			18					20	90.0	76.0	10.0
DEC							1			3	8	1			13	61.5	0.0	38.5
MIX						1	1			11		3			16	18.8	57.1	81.3
EXP			1											13	14	92.9	38.1	7.1
Total	20	10	16	15	17	49	16	10	8	9	75	8	7	21	282			

Note 1: Overall accuracy = 53.5%. K = 0.44%. WAT, water; WET, wetland; ALD, alder; NER, non-ericaceous regeneration; CON, coniferous; DEC, deciduous; MIX, mixed wood; EXP, exposed land; E1D, E2D, E3D, E1V, E2V, E3V are ericaceous shrub densities; P, producer's accuracy (%) for the class; C, commission error (%) for the class; O, omission error (%) for the class.

Note 2: Merged shaded area represents the more general ericaceous land cover. Overall accuracy = 65.5%. K = 0.55%.

2.3.3 Maps of overstory

A subset area of the overstory maps at both spatial resolutions are presented in Fig. 7b and 7d and are made from the IKONOS mosaic and the Landsat-TM image, respectively. These correspond with the same subset areas illustrated for the understory in part b) of both figures. Classification accuracies vary depending on the validation approach. For the Landsat-TM map, an overall accuracy of 88.0% (K of 0.64) was observed when assessed from the IKONOS map remainder (Table 5); 77.9% (K of 0.46) from provincial stand maps and 57.0% (K of 0.48) from sample plots (Table 6). Variability of the overall accuracy was also present for the overstory map derived from IKONOS. Here, we note an overall accuracy of 79.4% (K of 0.76) when assessed

from sample plots and of 62.9% (K of 0.32) when assessed from the stand maps. Overestimation of the coniferous class is apparent through all validation schemes and significant confusion exists between the latter and the mixed wood class (45% of the commission error; 56% of the 1.5% omission error). Other significant confusion is present between water and the coniferous class accounting here for 40% of the coniferous class' 10.5% commission error.

Table 5. Error matrix for the resulting overstory map made with the Landsat-TM image, assessed by IKONOS map remainder (30%).

Ref	Classified								P	C	O
	WAT	WET	ALD	CON	DEC	MIX	EXP	Total			
WAT	105	2		6				113	92.9	7.1	78.0
WET	57	151	2	14	1	10	3	238	63.4	36.6	34.1
ALD	10	1	48	1				60	80.0	20.0	28.4
CON	260	70	13	6129	9	322	43	6846	89.5	10.5	1.4
DEC		1	2	5	21	3		32	65.6	34.4	36.4
MIX	39	4	2	49	2	425	4	525	81.0	19.0	44.6
EXP	7			12		7	183	209	87.6	12.4	21.5
Total	478	229	67	6216	33	767	233	8023			

Note: Overall accuracy = 88.0%. K = 0.64%. WAT, water; WET, wetland; ALD, alder; NER, non-ericaceous regeneration; CON, coniferous; DEC, deciduous; MIX, mixed wood; EXP, exposed land; P, producer's accuracy (%) for the class; C, commission error (%) for the class; O, omission error (%) for the class

The accuracies of Table 6 compare the overstory map pixel value directly to the extracted inventory polygon label and furthermore to the sample plot label. Similar trends can be observed within accuracies and errors at both resolutions, specifically for results derived from forest stand maps. Results obtained from the sample plots show similar trends with the exception of the mixed wood class. The table therefore shows that the mapping procedure is expandable to a different theme and is produced with an acceptable level of accuracy. However, it is observed that confusion exists and is present with classes having lower producer's accuracy throughout all validation schemes (e.g. wetland; mixed wood).

Table 6. Producer's accuracy, commission and omission errors for the resulting overstory maps made with the IKONOS mosaic and the Landsat-TM image; both assessed by classes extracted from the provincial stand maps and by project specific sample plots.

Class	IKONOS						Landsat-TM					
	from stand maps			from sample plots			from stand maps			from sample plots		
	P	C	O	P	C	O	P	C	O	P	C	O
Water	79.5	21.1	20.5	84.0	12.5	16.0	81.1	28.1	18.9	56.0	30.0	44.0
Wetland	15.7	93.4	84.3	69.2	10.0	30.8	5.0	89.3	95.0	53.8	30.0	46.2
Alder	8.3	99.7	91.7	90.9	23.1	9.1	0.8	99.7	99.2	66.7	14.3	33.3
Coniferous	67.8	14.9	32.2	80.0	38.5	20.0	89.5	16.8	10.5	94.1	65.2	5.9
Deciduous	18.0	94.0	82.0	81.8	10.0	18.2	15.8	53.3	84.2	54.5	0.0	45.5
Mixed wood	25.9	86.3	74.1	57.1	20.0	42.9	10.0	78.5	90.0	7.1	0.0	92.9
Exposed land	9.6	92.1	90.4	92.3	14.3	7.7	1.9	91.1	98.1	75.0	0.0	25.0
Overall Acc.	62.9	---	---	79.4	---	---	77.9	---	---	57.0	---	---
Kappa	0.32	---	---	0.76	---	---	0.46	---	---	0.48	---	---

Note: P, producer's accuracy (%) for the class; C, commission error (%) for the class; O, omission error (%) for the class.

2.4. Discussion

The method presented here was established to be compatible with familiar and accessible datasets (i.e. IKONOS and Landsat-TM satellite imagery, aerial photographs, forest stand maps, permanent and temporary sample plots) while integrating and expanding on known data analysis algorithms (i.e. digital stereoscopic photo-interpretation, object-oriented and nearest neighbor classification). The high overall accuracy (~80%) of generalized classes for the Landsat-TM image classification also demonstrated the advantages of using a finer spatial resolution image (in our case the thematically classified IKONOS imagery) to improve classification results on a coarser image and for extended spatial extent.

Specific low class accuracies for the IKONOS classification may be related to misinterpretation during the digital photo-interpretation stage and to the flexibility in personal interpretation of class density thresholds. Though the interpretations were done by an experienced photo-interpreter, the integration of digital stereoscopy within DVP software was new to our expert and thus could constitute a significant source of error. Also, since the project was limited by the lack of available information concerning the presence of these shrubs, we

could not validate the interpretation of ericaceous shrub dominated sites or the percent cover thereof.

Wulder et al. (2006) suggest that caution is needed when making comparisons between raster and vector datasets, more precisely pixel and polygon; or overstory maps and forest inventory. Their research recommends validation approaches which would account for the heterogeneity of land cover classes within a forest inventory polygon. They concur that when possible, the use of project specific data is recommended for the validation of maps derived from remote sensing data. A high overall accuracy of 78.4% for the Landsat-TM classification (79.8% at the IKONOS level) using the IKONOS polygons demonstrated that our method is valid for large area mapping. However, the 30% polygons set aside for validation was not totally independent from the training dataset. The use of polygons from higher spatial resolution images (IKONOS mosaic) is particularly useful as it provides much samples for each thematic class, which is otherwise difficult to achieve with traditional training data (both sample plots and/or aerial photo-interpretation derived polygons). A second evaluation of the classification with the Landsat-TM image was done with our validation plots to verify and assess the quality of the classification with a totally independent dataset. As expected, the results were lower than those with the first evaluation with an overall accuracy of 64.5%. But, these results remain satisfactory to confirm the relevance of the proposed method.

Using our method, classification using a Landsat-TM image was guided by the availability of a finer level classification using IKONOS images. We noted that the results for the Landsat-TM image classification can only be as accurate as those obtained for the IKONOS classification. The lower producer's accuracies for individual classes of the Landsat-TM classification compared with the IKONOS classification are explained by the possible spatial misregistration of sample polygon delimitations due to the difference in the spatial resolution of these two datasets. Alternatively, higher producer's accuracies for individual classes of the IKONOS classification can be explained by the spectral homogeneity and spatial explicitness of its sampling and validation datasets. Moreover, the training and validation datasets for the Landsat-TM classification are limited in coverage to the mosaic's geographic extent. This possibly restrains the Landsat-TM sample space radiometric variability and classification validity to the IKONOS data coverage. The use of very high resolution images dispersed within the coverage of

the high resolution imagery would be of interest as this would increase the spatial distribution of the samples and consequently, classification accuracy.

The use of the eCognition software provided several advantages. First, its segmentation tools provided the ability to define spatial objects suited for producing maps as well for producing validation polygons. eCognition also provided an expanded availability of class discriminatory functions defined through spectral criteria (e.g. multispectral data, vegetation indices) and contextual criteria (e.g. relation to neighboring objects). The use of the eCognition software also added some limitations to the classification process. We found that the implementation of textural criteria or extensive definition of these discriminatory functions could not be used for practical reasons as this monopolized hardware resources for long processing times. We also noted that the processing time increased with the number of discriminatory functions, which was particularly limiting with the use of very high spatial resolution images of large area.

Overall we demonstrated the usefulness of very high resolution images as a step towards mapping ericaceous shrubs over large areas. This approach has been used in other studies to map various landscapes (Yang *et al.*, 2003; Arroyo-Mora *et al.*, 2005). The proposed method is a cost-effective alternative to accurate large scale mapping with high resolution data. Dependent on dataset size and the necessity for a smaller multispectral spatial resolution, the implementation of data fusion algorithms such as pan-sharpening (Zhang, 2002) could be beneficial to thematic classification projects. Pan-sharpening was examined but overlooked in this project as analysis would be too time consuming. Moreover, a 3.2 m resolution appeared fine enough to fulfill the objectives of our study. Although the 15-m spatial resolution panchromatic data was not available for the Landsat-TM dataset, it would be appropriate to test how it could improve the results. The possibility of implementing other high resolution sensors of different spatial resolutions (e.g. CASI, Quick Bird) is feasible guaranteed all land cover types are exhausted in the high resolution imagery coverage. We think the methods presented here are adaptable to other lower spatial and spectral resolutions (e.g. SPOT-5, ASTER) and other large area mapping themes. The expandability of the method has probably no longitudinal or latitudinal limits. The idea behind the multi-resolution classification procedure is merely to increase the spectral range of the sampling and validating thematic datasets applied to the lowest spatial resolution image. However, we expect that expanding our method in another ecozone would require significant adjustments as land cover diversity would increase.

2.5. Conclusion

Our results further innovate the earlier studies (e.g. Franklin *et al.*, 1997) in two ways. They first propose a practical methodological framework allowing to produce maps over extended areas. In addition we showed that regional maps can be produced operationally from available multi-resolution datasets and for most conditions present in our study site, typical of the boreal forest in northeastern Canada. The land cover mapping method we propose is well adapted to integrate continuous monitoring information on ericaceous shrub encroachment and can thus be used as a forest management decision-support tool.

The proposed method enables mapping various percent cover of ericaceous shrubs found in the understory of forested or fully vegetated areas (e.g. E1V, E2V, E3V) and in disturbance sites (e.g. E1D, E2D, E3D). The method follows a bottom-up approach wherein each dataset at a finer level guides the production of results at the next coarser level: i.e., (i) sample plots help building photo-interpreter's acuity, (ii) polygons from photo interpretation guide the classifiers in the production for very high resolution maps (approx. 1 to 10 m), and (iii) the later cartographic results being used as training areas for high resolution maps (approx. > 10 m). We think that such a process is adaptable for a wide selection of sensors. We observed a limitation in areas well covered by trees or those with shrubs densities < 50% (namely classes E3V and E3D) where higher confusion exist with other parented land cover classes (e.g., E2D and E3D). However, our results suggest that careful selection of thresholds during image classification reduces this confusion, keeping results at a reasonable level of accuracy. Overall, our results are encouraging to the point that a broader application of the method could be attempted to other regions in Canada where ericaceous shrub invasion is observed, like Northcentral and Northeastern Quebec, Newfoundland and Labrador, and in British Columbia (Titus *et al.*, 1995; Thiffault and Grondin, 2003). Our method can be enhanced to support forest management if it is combined with a historical assessment of the spatial distribution of ericaceous shrubs and spatial modeling at the landscape level of the conditions favorable to, or refraining from, ericaceous shrub invasion. The method to map the spatial distribution of ericaceous shrubs provides a solid base from which to start the next steps of monitoring their state of invasion.

Acknowledgements

We are grateful to Charles Gauthier, Charles Warren and Jean-Francois Gauthier (Abitibi-Bowater Inc.) for providing data and logistical support. We thank the Groupe Optivert Inc. for their expertise in photo-interpretation. This work was funded by the Science & Technology Internship of Natural Resources Canada, and by a Strategic Project grant from the Natural Science and Engineering Research Council of Canada.

References

- Arroyo-Mora, J., Sánchez-Azofeifa, G., Kalacska, M., Rivard, B., Calvo-Alvarado, J. and Janzen, D. 2005. Secondary Forest Detection in a Neotropical Dry Forest Landscape Using Landsat 7 ETM+ and IKONOS Imagery. *Biotropica*. 37(4): 497–507.
- Bissonnette, Y. 2007. DVP Orientation 6 Quick step, DVP Geomatic Systems Inc. Beauport (Québec).
- Bouchard, M., Pothier, D., and Gauthier, S. 2008. Fire return intervals and tree species succession in the North Shore region of eastern Quebec. *Canadian Journal of Forest Research*. 38(6): 1621-1633.
- Congalton, R.G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*. 37: 35-46.
- Congalton, R.G., and Green, K. 1993. A practical look at the sources of confusion in error matrix generation. *Photogrammetric engineering and remote sensing.*, 59(5): 641-644.
- Definiens AG 2006. Definiens eCognition Professional 5 User Guide, Definiens AG, Munich, Germany. 249 p.
- Foody, G.M. 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*. 80: 185-201.
- Franklin, S., Gillespie, R., Titus, B. and McCaffre, T. 1997. Discrimination of *Kalmia angustifolia* using Compact Airborne Spectrographic imager (CASI) data. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 23(1): 71-75.
- Franklin, S., Gillespie, R., Titus, B. and Pike, D. 1994a. Aerial and satellite sensor detection of *Kalmia angustifolia* at forest regeneration sites in central Newfoundland. *International Journal of Remote Sensing*. 15(13): 2553-2557.

- Franklin, S., Titus, B. and Gillespie, R. 1994b. Remote sensing of vegetation cover at forest regeneration sites. *Global Ecology and Biogeography Letters*. 4(2): 40-46.
- Friedl, M. A., McIver, D. K., Hodges, J. C. F., Zhang, X. Y., Muchoney, D., Strahler, A. H., Woodcock, C. E., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F., & Schaaf, C. 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 83: 288– 303.
- Hess, L.L., Melack, J.M., Novo, E.M.L.M., Barbosa, C.C.F., and Gastil, M. 2003. Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. *Remote sensing of environment*, Vol. 87, pp. 404-428.
- Horne, J.H. 2003. A tasseled cap transformation for IKONOS images. In: *Proceedings of the ASPRS 2003 Annual Meeting*. 9 p.
- Howard, J. 1992. *Remote sensing of forest resources: theory and application*. Chapman & Hall, London, ON. 432 p.
- Jensen, J.R. 2004. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Approach*. 3rd Edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ 07458, USA: 526 p.
- Joanisse, G. D.; Bradley, R. L.; Preston, C. M.; Munson, A. D. 2007. Soil enzyme inhibition by condensed litter tannins may drive ecosystem structure and processes: the case of *Kalmia angustifolia*. *New Phytologist*. 175(3): 535-546.
- Joshi, C.; de Leeuw, J.; van Duren, I.C. 2004. Remote sensing and GIS applications for mapping and spatial modelling of invasive species. XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey, Commission 7: 669-678.
- Katoh, M. 2004. Classifying tree species in a northern mixed forest using high resolution IKONOS data. *Journal of Forest Research*. 9: 7-14.
- Kayitakire, F.; Farcy, C.; Defourny, P., 2002. IKONOS-2 imagery potential for forest stands mapping. Presented at ForestSat Symposium Heriot Watt University, Edinburgh, August 5th – 9th 2002.
- Kindscher, K., Fraser, A., Jakubauskas, M.E., and Debinski, D.M. 1998. Identifying wetland meadows in Grand Teton National Park using remote sensing and average wetland values. *Wetlands ecology and management*. 5: 265-273.

- Létourneau, J.P., Bard, A., and Lambert, J., 2003. Normes de cartographie écoforestière. Troisième inventaire écoforestier. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec. Direction des Inventaires Forestiers.
- Lowe, J. J., Power, K., Gray, S. L., 1994. Canada's forest inventory 1991. Info. Report PI-X-115. Petawawa Forestry Center, Chalk River, Ontario.
- Navalur, K. 2007. Multispectral image analysis using the object-oriented paradigm. Taylor & Francis, Boca Raton, 163 p.
- Oruc, M., Marangoz, A. M., and Buyuksalih, G., 2004. Comparison of Pixel-Based and Object-Oriented Classification Approaches using Landsat-TM-7 ETM Spectral Bands. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing XXth Congress, Istanbul, July 2004, pp. 1118-1123.
- Rego F.L. and Koch B., 2003. Automatic classification of land cover with high resolution data of the Rio de Janeiro city Brazil comparison between pixel and object classification. In: Remote sensing of urban areas. Ed. J. Carstens, pp. 153-157.
- Robitaille, A. and Saucier, J-P. 1998. Paysages régionaux du Québec méridional. Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Publications du Québec, Sainte-Foy, 213 p.
- Saucier, J-P. 1994. Le point d'observation écologique : Normes techniques. Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Service des inventaires forestiers. 116 p.
- Thiffault, N., and Grondin, P. 2003. Envahissement des parterres de coupe par les éricacées. In Grondin, P. and Cimon, A. (eds). Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs du Québec. Pp.103-130.
- Thiffault, N., Titus, B.D., and Munson, A.D. 2004. Black spruce seedlings in a Kalmia-Vaccinium association: microsite manipulation to explore interactions in the field. Canadian Journal of Forest Research; 34(8): 1657-1668.
- Titus, B., Sidhu, S. and Mallik, A. 1995. A Summary of some studies on Kalmia angustifolia L.: a problem species in Newfoundland forestry. Information report N-X-296, Canadian Forest Service, Natural Resources Canada, St. John's, NF, 68 p.
- Wang, N. 1994. Application of remote sensing in detecting and monitoring forest regeneration process in a disturbed environment. M.A. thesis, Carleton University (Canada), 134 p.

- Wu, W. And G. Shao, 2002. Optimal combinations of data, classifiers, and sampling methods for accurate characterizations of deforestation. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 28(4): 601-609.
- Wulder, M. A., Dechka, J. A., Gillis, M. A., Luther, J. E., Hall, R. J., Beaudoin A., and Franklin S. E. 2003. Operational mapping of the land cover of the forested area of Canada with Landsat-TM data: EOSD land cover program. *Forestry Chronicle*, 79(6): 1075–1083.
- Wulder, M. A., White, J. C., Luther J. E., Strickland, G. Rimmel, T. K. and Mitchell, S.W. 2006. Use of vector polygons for the accuracy assessment of pixel-based land cover maps. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 32(3): 268-279.
- Xiaoxia, S., Zhang, J., Zhengjun, Liu., 2004. An Object-Oriented Classification Method on High resolution Satellite Data. 25th Asian Conference on Remote Sensing, Thailand, November 2004, pp. 347-350.
- Yang, L., Huang, C., Homer, C.G., Wylie, B.K., and Coan, M.J. 2003. An approach for mapping large-area impervious surfaces: synergetic use of Landsat-TM-7 ETM+ and high spatial resolution imagery. *Canadian journal of remote sensing*, Vol. 29, No. 2, pp. 230-240.
- Zhang, Y. (2002) Automatic image fusion: A new sharpening technique for IKONOS multispectral images. *GIM International* 16(5): 54-57.

3. Précisions sur la méthode

La complexité méthodologique ne peut être que globalement présentée au niveau du manuscrit. Les volets conceptuels (le protocole de mise en place de placette de sondage, la photo-interprétation numérique, l'approche orientée objet) sont ici abordés à titre complémentaire afin d'améliorer l'information fournie dans l'article scientifique.

3.1 Le protocole de mise en place de placette de sondage

Le protocole de validation a nécessité une préparation minutieuse afin d'assurer la rigueur statistique et minimiser les coûts. La première étape dans le processus visait l'identification et hiérarchisation par priorité les objectifs de la validation. Nous avons établis comme objectif principal de valider les cartes thématiques résultantes du traitement de l'imagerie IKONOS. Le deuxième objectif avait pour but de faire une évaluation supplémentaire des cartes thématiques résultantes du traitement de l'imagerie Landsat-TM. Afin d'assurer l'indépendance des données d'évaluation par rapport aux données d'entraînement, nous avons décidé de faire la validation des résultats cartographiques à partir des placettes de sondage spécifiques au projet. Un protocole de mise en place de placette de sondage est composé de trois éléments: la conception du livrable, la stratégie d'échantillonnage et enfin, l'analyse des données (Stehman and Czaplewski, 1998). D'abord, l'aspect de conception du livrable spécifie le protocole utilisé afin de déterminer la classe de référence et définit la correspondance entre la valeur du pixel classifié à sa classe de référence. Puis, la stratégie d'échantillonnage sert à définir le protocole de sélection des sites où ont été prises les données de référence. Finalement, l'aspect d'analyse des données estime des mesures de précision d'intérêts (e.g. précision globale ; de l'utilisateur, de l'interprète) et l'erreur standard qui leur est associé (e.g. erreur d'omission, de commission). Ce volet a pour but d'élaborer sur les aspects de la conception du livrable et de la stratégie d'échantillonnage.

Le protocole utilisée afin de déterminer la classe de référence définit la procédure utilisée pour la collecte des données de référence à l'intérieur de sa région de support spatiale (RSS) (Wulder et al. 2007). Le RSS est définie comme étant la taille, la géométrie et l'orientation de l'espace sur lequel une observation est définie (Atkinson & Curran, 1995). Étant la variabilité dans l'orientation des couvert terrestres à l'intérieure du site d'étude, il n'était pas pratique de limiter l'échantillonnage à une orientation fixe. Toutefois, nous avons constaté approprié de limiter la RSS à une parcelle circulaire d'un rayon de 30 m, ainsi garantissant la correspondance avec la

donnée Landsat-TM. Lors du sondage terrain, l'équipe de sondage a été muni d'un GPS dans lequel les sites à sonder ont préalablement été enregistré, celui-ci permettant une erreur moyenne de positionnement d'environ 4 m. Une fois sur place, le positionnement géographique a été relevé afin d'assurer une correspondance entre l'échantillon final et celui proposé. L'équipe de sondage nota donc les étiquettes de référence associées à la strate arborescente et couverture de surface (tableau 7), des perturbations et interventions d'origine (tableau 8) et capturait quatre photographies ; une dans chaque direction cardinal. Le formulaire d'échantillonnage utilisé lors des mesures terrain sur la page suivante.

Tableau 7. Légende des classes arborescentes et couverture de surface

Classe	Description
Strate arborescente	
FEU	Feuillus
CON	Conifères
MIX	Forêt mixte
SN	Sol nu
DH	Dénudé humide
AA	Aulnaies
<i>Pourcentage de couverture du peuplement</i>	
A	Supérieur à 80%
B	De 61% à 80%
C	De 41% à 60%
D	De 25% à 40%
<i>Hauteur moyenne des arbres dominants et codominants</i>	
1	Supérieur à 22m
2	Entre 17m et 22m
3	Entre 12m et 17m
4	Entre 7m et 12m
5	Entre 4m et 7m
6	Entre 2m et 4m
Couverture de surface	
E1D	Éricacées : 25 à 50 % du couvert dénudé sec ou humide
E2D	Éricacées : 51 à 75 % du couvert dénudé sec ou humide
E3D	Éricacées : 76 à 100% du couvert dénudé sec ou humide
E1V	Éricacées : 25 à 50 % du couvert végétale
E2V	Éricacées : 51 à 75 % du couvert végétale
E3V	Éricacées : 76 à 100% du couvert végétale
RSE	Regénération sans éricacées

Formulaire de sondage

Point d'échantillonnage finale

Information sur le sondeur

Nom :

Titre :

Téléphone :

Date :

Courriel :

Descriptif de la localisation du point d'échantillon

No. du Point :

Code :

Arborescente :

Densité :

Hauteur :

Couverture de surface :

Descriptif de la localisation du point routier le plus près (stationnement) :

DESCRIPTIF DU POINT D'ÉCHANTILLONAGE

Coordonnées GPS LONG. :

LAT. :

Prise de photographies

N -

Perturbation observée

(centre du segment)

S -

E -

O -

Acceptation du point comme échantillon finale

CRITÈRES :

- La zone est homogène selon son code pour une unité minimale de 30 m par 30 m
- Les anomalies dans la distribution de l'homogénéité s'étendent sur la zone tampon d'unité maximale (10 x 10m)

REMARQUES

Commentaires:

Tableau 8. Classes des perturbations et interventions d'origine.

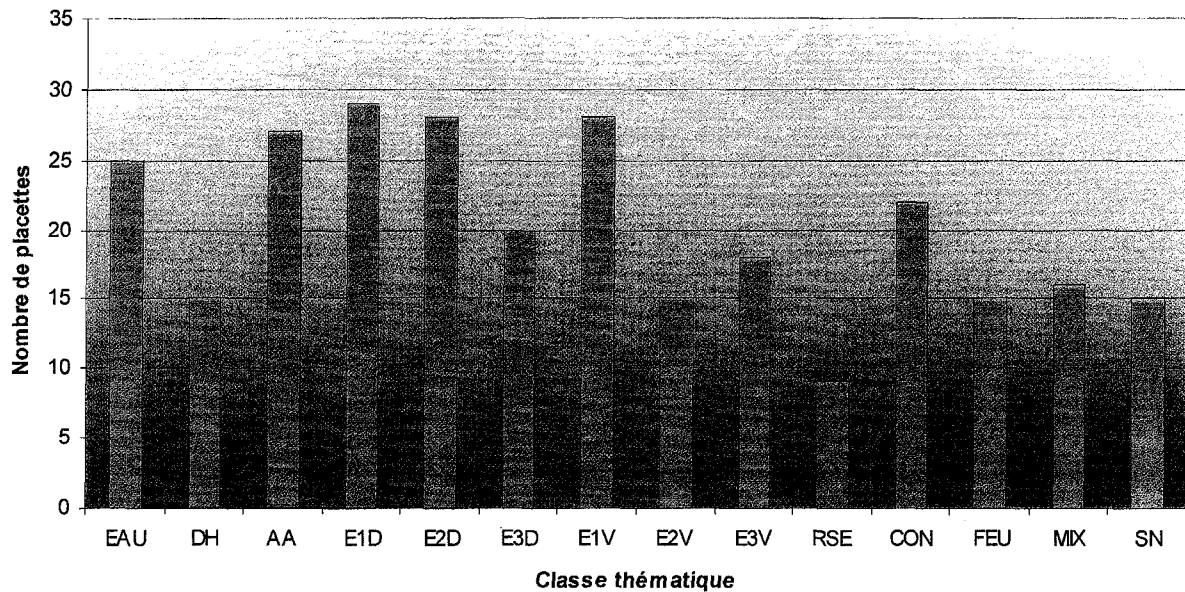
Classe	Description
Perturbations	
cht	Chablis total
dt	Dépérissement total
es	Épidémie grave
br	Brûlis total
fr	Friche
ver	Verglas grave
Interventions	
cpr	Coupe avec protection de la régénération
crs	Coupe avec réserve de semenciers
cbt	Coupe par bande finale
cpe	Coupe progressive d'ensemencement (coupe finale)
ct	Coupe totale
crb	Coupe de récupération dans un brûlis
etr	Élimination des tiges résiduelles
ens	Ensemencement
enm	Ensemencement avec mini serres
p	Plantation
pln	Plantation de semis cultivés à racine nues
plr	Plantation de semis cultivés en récipients
plb	Plantation de boutures
rea	Régénération d'une aire d'ébranchage
ria	Régénération d'un site occupé par une infrastructure abandonnée
rps	Récupération en vertu d'un plan spécial d'aménagement

Il était important de porter une attention particulière au sous-bois lors de la prise d'échantillon puisqu'il était possible que la placette soit associée à plusieurs classes thématiques. On réfère ici à la possibilité qu'un échantillon appartienne à une classe arborescente où l'on observe de même la présence d'éricacées.

L'aspect de la stratégie d'échantillonnage consiste à établir de façon systématique et aléatoire, la localisation des placettes échantillons. Il y avait plusieurs considérations et contraintes à prendre en compte lors de la sélection initiale des emplacements d'échantillons. D'abord, afin de répondre au premier objectif du protocole de validation et de limiter les coûts, on a limité l'aire de validation à la couverture de l'imagerie IKONOS. Une considération importante était l'homogénéité spectrale d'un site d'échantillonnage. Pour prendre en compte cette considération, une segmentation a été faite au préalable sur l'image IKONOS afin de produire une carte de polygones homogènes selon la signature spectrale de chaque pixel. Cette segmentation est un processus de partitionnement complet de l'image en régions spectralement homogènes qui ne se

superposent pas (segments). Au maximum, un seul échantillon peut être sélectionné par polygone homogène. Le centroïde de celui-ci est le point identifié pour la placette de sondage.

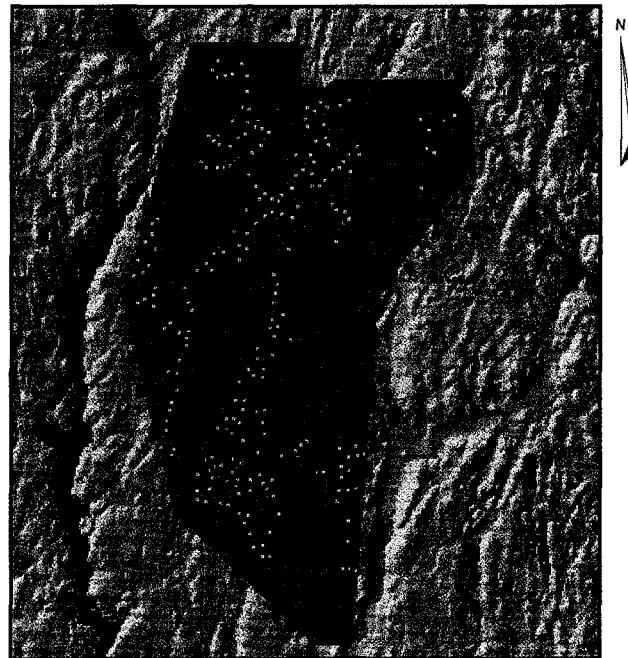
La sélection des échantillons visités a été déterminée par leur proximité aux voies d'accès (entre 50 et 300 mètres) et par la redondance dans la prise d'échantillon de chacune des classes (diversification des classes sondées, Fig. 8). La condition de proximité à une voie d'accès a été imposée pour deux raisons. Il semblait raisonnable qu'une distance supérieure à 300 mètres serait trop loin à échantillonner et une placette visitée à une distance inférieure à 50 mètres pourrait être influencée par la luminosité pénétrante par l'éclaircie de la voie d'accès. Afin de maximiser la diversification des classes sondées, l'équipe de sondage a tenté de visiter, lorsque possible, chaque classe au minimum d'une reprise par journée de terrain.



Note : EAU, eau ; DH, dénudé humide ; AA, aulnaie ; E1D, E2D, E3D, E1V, E2V, E3V, classes de densité du couvert éricacée ; RSE, régénération sans éricacées, CON, conifère ; FEU, feuillus, MIX, forêt mixte ; SN, sol nu.

Fig. 8. Distribution quantitative des placettes de sondage terrain.

L'échantillonnage a été basé sur un tirage aléatoire de 1200 échantillons cibles répartis sur l'ensemble de la couverture des données du capteur satellitaire IKONOS. De ces points, environ le quart, 282 points distribués spatialement de façon aléatoire (Fig. 9), ont été retenus comme échantillons finaux.



1 : 2,250,000 ◦ Placettes de sondage

Fig. 9. Distribution spatiale des placettes de sondage terrain sur la couverture de la mosaïque.

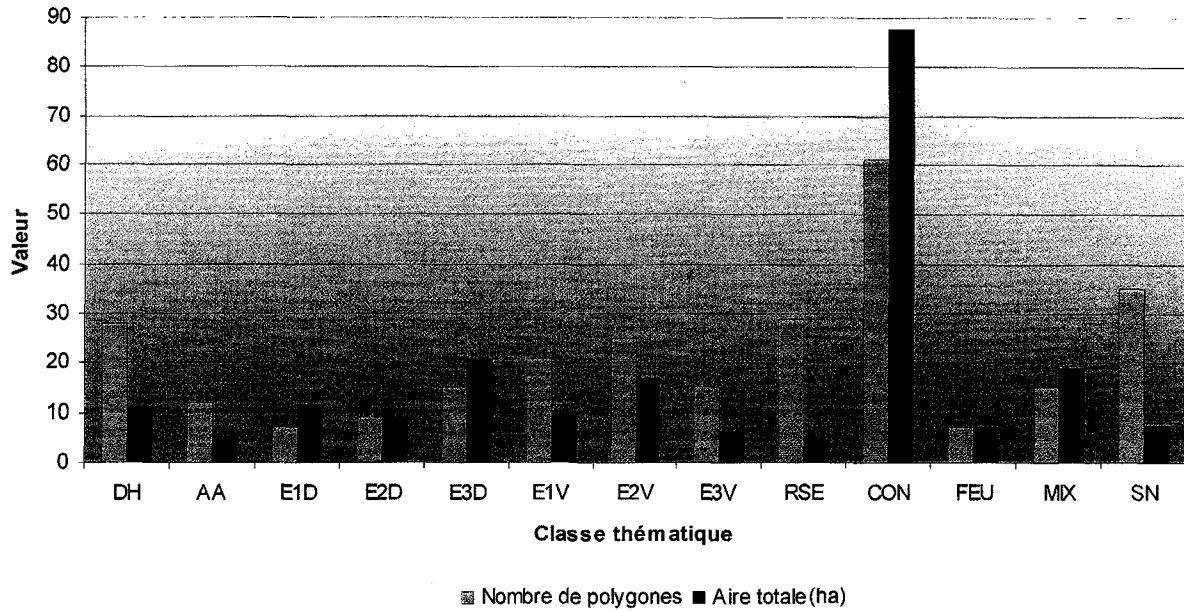
3.2 La photo-interprétation numérique

Le prétraitement des photographies aériennes a permis la création d'un montage de couples stéréoscopiques numériques à partir de photographies aériennes successives provenant d'un même plan de vol. D'abord, chaque photographie a été numérisée à l'aide d'un balayeur optique (à 600 dpi). Le logiciel DVP-GS a permis la visualisation en stéréoscopie d'un couple d'images successives. Les couples furent orientés sur trois plans : orientation intérieure, orientation relative et orientation absolue. L'orientation intérieure a permis la reconstruction de la perspective intérieure de chaque image sur le moniteur telle qu'elle était au moment de la prise de vue. La deuxième orientation, l'orientation relative, a permis la vision stéréoscopique. L'élévation relative est devenue apparente en éliminant le décalage vertical tout en conservant le décalage horizontal. Enfin, l'orientation absolue a établi une correspondance pour chaque objet du modèle stéréoscopique avec ses coordonnées géographiques terrestres. Les points de contrôles (planimétriques et altimétriques) permettant de positionner les photographies selon les axes X, Y, et Z ont été définis en les localisant sur l'imagerie IKONOS (X : longitude, Y : latitude) et un modèle numérique d'élévation (Z : altitude).

L'étape suivante de photo-interprétation a impliqué l'interprétation de paires de photographies aériennes numérisées dans le système DVP pour établir un nombre suffisant de polygones d'entraînement par strate pour la production des deux cartes thématiques. L'interprétation experte, faite par un spécialiste de la firme Groupe Optivet Inc, a été guidée à partir des PET/PEP, ainsi que des placettes d'observations écologiques couvrant le territoire de la mosaïque IKONOS. L'interprète a été appelé à identifier 50 polygones d'une dimension variant entre 0.5 et 12 ha parmi les zones les plus représentatives des deux séries de classes thématiques (strates). Le minimum de 0.5 ha par polygone garantit aussi leur pertinence pour la classification de la mosaïque Landsat-TM. De plus, nous avons donné la directive à l'interprète de favoriser plusieurs petits échantillons homogènes au détriment des plus gros polygones pour assurer une meilleure représentativité de chacune des classes de la stratification.

Les polygones produits par l'interprète ont ensuite été évalués en les comparant à ceux de la carte écoforestière afin de déterminer si l'interprétation avait impliqué des biais ou des anomalies. Si possible, chacun des polygones a été comparé avec la classe identifiée par la carte écoforestière. Lors de divergence significative avec les données de la carte écoforestière, un choix a été fait de garder ou non le polygone. Les polygones conservés au cours de cette étape ont été placés dans une base de données consolidée par séries (strate arborescente, couverture de surface) afin d'être utilisée lors des procédures de classification orientée objet.

La participation du photo-interprète pour trois jours de travail a permis de valider la classe de 279 polygones recouvrant ainsi une aire totale de 204.14 ha interpréter ; moyennant 0.73 ha par polygone. La figure 10 démontre la distribution quantitative des polygones conservés par classe thématique. Nous avons constaté que trois jours de travail étaient insuffisants puisqu'une de ces journées fut attribuée à l'initiation de l'expert interprète au logiciel DVP. Malgré cela, le nombre de polygones résultants était suffisant pour poursuivre notre exercice. Les polygones retenus varient en superficie de 0.01 à 7.82 ha et sont distribués à l'intérieur de toute la couverture de l'imagerie IKONOS (Fig. 11).



Note : DH, dénudé humide ; AA, aulnaie ; E1D, E2D, E3D, E1V, E2V, E3V, classes de densité du couvert éricacée ; RSE, régénération sans éricacées, CON, conifère ; FEU, feuillus, MIX, forêt mixte ; SN, sol nu.

Fig. 10. Distribution quantitative des polygones issus de la photo-interprétation.

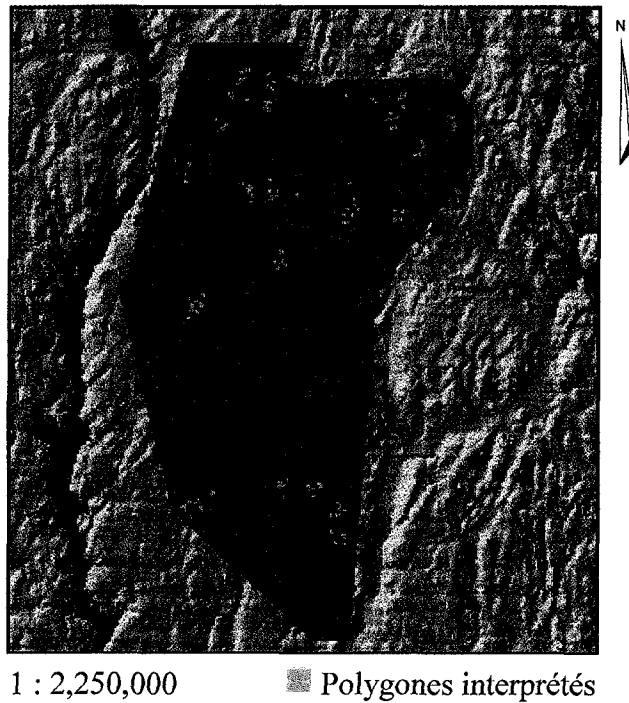


Fig. 11. Distribution spatiale des polygones issus de la photo-interprétation sur la couverture de la mosaïque.

3.3 L'approche orientée objet

Le processus de classification fut conçu pour l'analyse multi résolution de la mosaïque IKONOS. Il se divise en trois grandes étapes : (1) la segmentation et le développement d'une hiérarchie de segments ou d'objets spatiaux (Fig. 12), (2) le choix de fonctions discriminantes pour établir les classes d'objets et (3) la classification des objets. Une approche *top-down* a été adoptée lors de la segmentation. En créant des segments plus grossiers, il a été possible de masquer les régions non intéressantes à analyser telles les cours d'eau, les sols nus, etc. L'algorithme de segmentation multi résolution du logiciel eCognition utilise une procédure d'optimisation heuristique qui minimise localement l'hétérogénéité moyenne de tous les objets d'une résolution donnée. Ensuite, l'établissement hiérarchique d'un réseau d'objets a permis l'utilisation d'une multitude de caractéristiques de séparabilité qui excède de beaucoup la simple information spectrale (Definiens 2006).

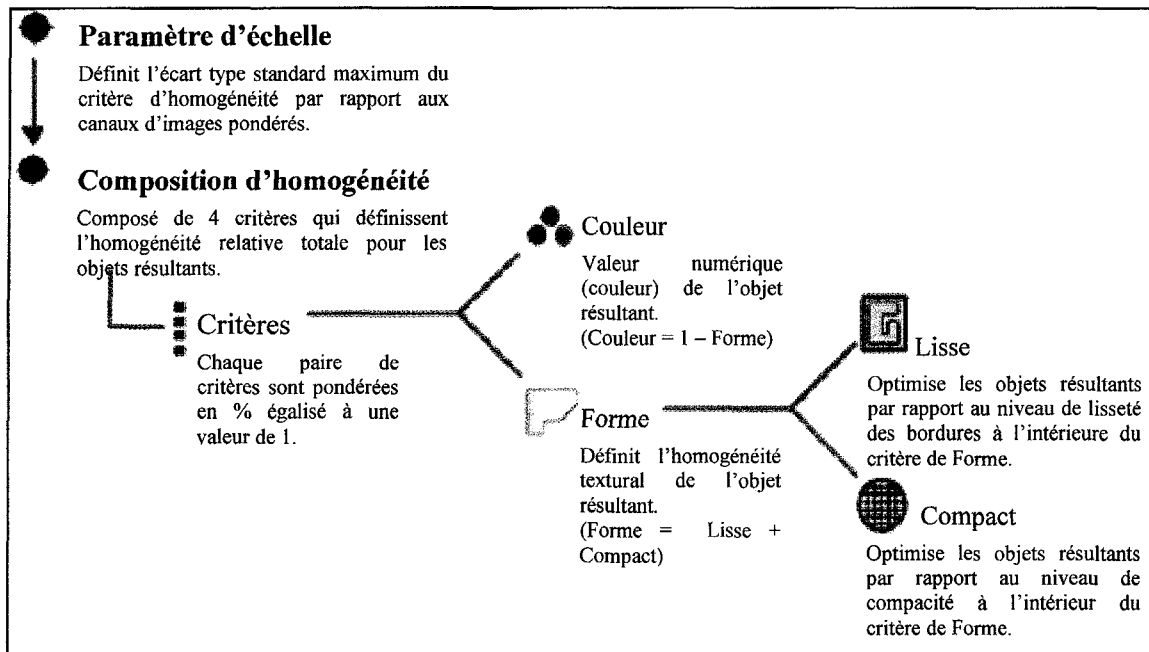





























Fig. 12. Paramètres du processus de segmentation (Definiens, 2006).

Le logiciel eCognition offre l'option de choisir des fonctions discriminantes pour définir les conditions de séparabilité entre les classes. Ces fonctions ont été utilisées comme opérateurs booléens ou de logique floue pour établir des seuils de séparabilité entre les classes, basés sur les informations spectrales, contextuelles et hiérarchiques (Fig. 13). Les objets ont ensuite été classifiés en étapes itératives par logique floue. Finalement, les résultats initiaux ont pu être

raffinés par une extension de la description des classes et par une reconstruction de la hiérarchie des objets. En effet, chaque objet a été assigné à la classe dont l'évaluation a retourné la plus grande valeur d'appartenance ou est demeuré non classifié lorsque la valeur d'appartenance minimale prédéfinie n'était pas atteinte (Definiens 2006).

Classe	IKONOS				Landsat-TM			
	Fonction	Initialisé par	Transition		Fonction	Initialisé par	Transition	
			Début	Fin			Début	Fin
WAT	x NDVI		0.00	1.00	x NDVI		0.00	1.00
	x GRNS		0.00	0.90	x GRNS		0.00	0.90
	r NIR		0.10	0.48	r MIR		0.00	1.87
	r GRN		0.15	0.35	r GRN		0.00	2.54
Harvested	x GRN		100.00	1000.00	x BLU		0.00	512.00
	x NDVI		0.00	1.20	X RED		6.00	255.00
	x GRNS		0.00	1.00	X MIR		0.00	512.00
	c WAT		0.00	1.00	Brightness		10.00	250.00
Forested	c non-classifié		0.00	1.00	c non-classifié		0.00	1.00
	*				**			
WET	c WAT		0.00	1.00	c WAT		0.00	1.00
	*				**			
ALD	c WAT		0.00	1.00	c WAT		0.00	1.00
	*				**			
E1D	rs Harvested		0.00	1.00	rs Harvested		0.00	1.00
	Diff. Max.		1.50	3.50	σ RED		0.00	81.40
	x NIR		200.00	1059.00	NDVI		-1.40	0.91
	NDVI		0.05	0.90	r MIR		0.00	0.76
	*				**			
E2D	rs Harvested		0.00	1.00	rs Harvested		0.00	1.00
	Diff. Max.		1.50	3.80	σ RED		0.00	78.50
	x NIR		215.00	1230.00	NDVI		-1.40	0.86
	NDVI		0.00	0.95	r MIR		0.00	0.84
	*				**			
E3D	rs Harvested		0.00	1.00	rs Harvested		0.00	1.00
	Diff. Max.		1.25	3.60	σ RED		0.00	73.40
	x NIR		110.00	1080.00	NDVI		-1.30	1.30
	NDVI		-0.05	0.77	r MIR		0.00	0.91
	*				**			
E1V	rs Forested		0.00	1.00	rs Forested		0.00	1.00
	Diff. Max.		1.60	4.10	σ RED		0.00	35.57
	x NIR		125.80	1380.00	σ MIR		0.00	63.15
	NDVI		-0.05	0.83	r MIR		0.00	0.74
	*				**			
E2V	rs Forested		0.00	1.00	rs Forested		0.00	1.00
	Diff. Max.		1.60	3.80	σ RED		0.00	66.45
	x NIR		212.20	1031.00	σ MIR		0.00	57.01
	NDVI		0.05	0.78	r MIR		0.00	0.43
	*				**			
E3V	rs Forested		0.00	1.00	rs Forested		0.00	1.00
	Diff. Max.		1.50	3.50	σ RED		0.00	42.39
	x NIR		192.80	913.00	σ MIR		0.00	48.00
	NDVI		0.05	0.75	r MIR		0.00	0.51
	*				**			

NER	*				**			
	rs Harvested		0.00	1.00	rs Harvested		0.00	1.00
	σ GRNS		0.00	0.27	σ RED		0.00	76.48
CON	*				**			
	c WAT		0.00	1.00	c WAT		0.00	1.00
	NDVI		0.05	0.83	σ RED		0.00	144.50
					σ NIR		0.00	37.97
				σ MIR		0.00	66.89	
DEC	*				**			
	c WAT		0.00	1.00	c WAT		0.00	1.00
	NDVI		0.31	0.82	σ RED		0.00	64.00
					σ NIR		0.00	32.79
				σ MIR		0.00	38.50	
MIX	*				**			
	c WAT		0.00	1.00	c WAT		0.00	1.00
	Diff. Max.		1.66	3.61	σ RED		0.00	119.50
					σ NIR		0.00	37.97
				σ MIR		0.00	58.30	
EXP	*				**			
	c WAT		0.00	1.00	c WAT		0.00	1.00
	σ GRNS		0.00	0.50	σ RED		0.00	137.00
				r MIR		0.00	0.53	

Classifieur du plus proche voisin initialisé par:

* Brightness, x GRN, x GRNS, σ RED, σ GRN, σ NIR, σ NDVI, σ GRNS et NDVI.

** x RED, x GRN, x BLU, σ RED, σ NIR, σ MIR, σ NDVI et NDVI.

Note: x, moyenne; σ , écart type; c, classifié; rs, relié au super objet classifié; r, ratio.

Fig. 13 Fonctions discriminantes pour les classes thématiques.

4. Discussion

Le présent travail fait suite à une série de tâches méthodologiques essentielles à la réalisation de tout projet de traitement d'image satellitaire. Ainsi, il a fallu dans un premier temps faire une revue bibliographique afin de cerner et définir clairement une problématique affectant les forêts Boréales de l'est du Canada : l'envahissement par les plantes éricacées. Ce travail achevé, l'ensemble des données devant servir à la classification et la validation ont été recensées. Ainsi, on a fait le lien entre logiciel et base de données : la méthodologie. Les difficultés rencontrées lors de l'implémentation de la méthodologie ne sont pas présentées au niveau du manuscrit, et sont discuté ici.

Le choix du logiciel eCognition trouve sa justification dans le fait qu'il présente une large gamme de fonctionnalités à même de répondre aux besoins de ce projet. Cependant, le temps de traitement alloué pour la segmentation d'image et sa classification peuvent être nuisible à l'élaboration du projet. Par exemple, le temps de segmentation était particulièrement de longue durée au niveau fin de l'imagerie IKONOS (i.e. : jusqu'à sept jours). De plus, nous avons trouvé que l'intégration de critères de textures et l'élaboration des fonctions discriminantes pour définir les conditions de séparabilité monopolisait les ressources de l'unité centrale de traitement au point d'arrêt. Ces limitations étaient substantiels puisque la classification c'est fait de façon itérative et une itération pouvait durée quelques jours. En parallèle, on note qu'il serait difficile d'implémenter la méthodologie tel que proposé dans ce mémoire pour une zone d'étude étendue sur plusieurs scènes Landsat. Les fonctions discriminantes de l'approche orientée-objet ont été définies par les valeurs spectrales moyennes individuelles de la mosaïque IKONOS, et la scène Landsat-TM. Il est donc impossible d'appliquer ces fonctions directement sur une ou plusieurs autres scènes sans ajuster les seuils de séparabilité en fonction de chaque scène, ou encore, établir de nouvelles règles adaptées pour l'ensemble des scènes de la zone d'étude. Ceci étant également vrai au niveau des paramètres de segmentation. Les paramètres de segmentation et les fonctions discriminantes sont uniques à une image et ne sont donc pas directement applicable sur une autre image. Ceci étant dit, ils peuvent, par contre, servir de guide pour définir la classification par objets d'une ou plusieurs nouvelles scènes.

Les limitations observées due au choix de la méthode de classification questionnent la pertinence de l'analyse orientée objet pour de grandes superficies. On note que le recours à d'autres logiciels de traitement d'image numérique tel *Focus* (PCI Geomatics), ou encore *ENVI*

(ITT Visual Information Solutions), aurait permis d'avoir des résultats plus rapidement. Ceci aurait permis le développement de d'autres volets méthodologique, possiblement au niveau de cartographie multi-temporel ; et ce, pour le même laps de temps. Néanmoins, les résultats démontrent que les données des capteurs IKONOS et Landsat-TM, et une approche de classification orientée-objet, peuvent être utilisé afin de cartographier la distribution spatiale des éricacées sur un grand territoire. On suggère par contre l'utilisation d'une approche par pixel pour l'étude d'une très grande superficie (i.e. : plus de 10 scènes Landsat).

5. Conclusion

La revue de littérature a révélé que la détection des éricacées peut être réalisée avec grande précision à travers l'interprétation d'imagerie à haute résolution. Par contre, lorsqu'on désire traiter un grand territoire, l'utilisation d'imagerie à haute résolution est très coûteuse tant au niveau financier qu'au niveau temporel. L'objectif général de cette étude était d'élaborer une méthode de détection de la distribution spatiale des zones d'envahissement par les éricacées applicable à de grandes régions subarctiques boréales. Pour ce faire, nous avons démontré qu'il était possible de détecter la présence d'éricacées sur l'imagerie Landsat-TM, cette dernière permettant l'analyse de grandes superficies. Notre recherche démontre que l'utilisation d'imagerie à très haute résolution pour des fins de détection des éricacées a été bénéfique pour l'amélioration des méthodes de classification d'images de haute résolution. Le sondage terrain a révélé une précision globale de 80% pour la classification de l'imagerie de très haute résolution. Nous avons trouvé que l'utilisation partielle (70%) des polygones classifiés dérivés de l'imagerie IKONOS a été un moyen efficace pour guider les algorithmes de classification de l'imagerie Landsat-TM. Les résultats de cette dernière (78.4% de précision globale) ont été évalués par la portion restante (30%) des polygones non utilisés de la classification de l'imagerie de très haute résolution. Nous avons également validé la méthode (65.5% de précision globale) par l'évaluation de la correspondance entre les résultats de classification de la couverture des éricacées fait avec l'image Landsat-TM et les résultats de notre sondage terrain.

Cette recherche apporte donc une méthode nouvelle et innovatrice de cartographie thématique adaptée à la cartographie des éricacées pour de grandes superficies. La méthode présentée est reproductible et valide pour les forêts boréales de l'est du Canada. Elle permettra de faire un bilan de la situation d'un problème prenant une ampleur alarmante. En effet, les besoins de cartographie sont particulièrement présents pour les compagnies forestières qui ont à gérer des aires communes étendues (par ex. Abitibi-Bowater inc., Boisaco inc.). Les méthodes de cartographie et de bilan ont donc un impact important sur l'amélioration des connaissances concernant la réduction de la productivité de l'épinette noire causée par l'envahissement par les éricacées dans les régions nordiques de la forêt boréale québécoise. En ce qui concerne cet aspect, les produits cartographiques démontrés dans ce travail sont d'une grande utilité pour mieux comprendre les variables spatiales qui influencent la problématique des éricacées et proposer des pistes de modélisation. Cette recherche rejoint donc les objectifs du MRNF et de

Ressources Naturelles Canada en assurant un développement durable des ressources naturelles et est d'un intérêt majeur pour les écologistes (portée scientifique) et les administrateurs forestiers (portée pratique). Un bilan cartographique multitemporel représente une contribution essentielle au développement futur d'un modèle spatial de prédiction des zones propices à l'envahissement par les éricacées. Finalement, le bilan est particulièrement important pour établir l'impact de la CPRS, une directive importante du MRNF. Il est aussi la première étape de la continuité de ce travail à travers la modélisation des facteurs d'influence qui facilitent ou réduisent l'envahissement des éricacées dans les forêts boréales de l'est du Canada.

Références supplémentaires

La liste de références suivante ne couvre que les références non mentionnées dans la section de références du manuscrit scientifique.

- A P. Atkinson et P.J. Curran. 1995. Defining an optimal size of support for remote sensing investigations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33 : 768–776.
- Bérard, J. et M. Côté. 1997. Manuel de foresterie. Les presses de l'université Laval, Québec, Québec. 1430 p.
- Boulanger, F. 2005. La regeneration de l'épinette noire en forêt boréale en presence de *Kalmia angustifolia* : etude des effets de la lumière. Mémoire de maîtrise. Université de Sherbrooke. 49 p.
- Gillis, M. et D. Leckie. 1993. Forest inventory mapping procedures across Canada. Petawawa National Forestry Institute. Chalk River, Ontario. 79 p.
- Létourneau, J.-P. 2000. Norme de cartographie écoforestière confection et mise à jour. Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Québec, QC. 242 p.
- MRNF. 2008. Understanding our forest. Ministère des Ressources Naturelles et Faune. Site web disponible sur <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/english/forest/understanding/index.jsp>. Québec. Site visité le 13 juin 2008.
- Noël, C. et Rouleau, R. 1979. Parcelles-échantillons permanentes – normes techniques 1979. Service d'Inventaire Forestier, Québec. 112 p.
- Norton, W. 2002. Human Geography. 4th ed. Oxford University Press. Canada. 436 p.
- Perron, J-Y. et P. Morin. 1999. Normes d'inventaire forestier : placettes-échantillons permanentes (édition provisoire). Ministère des Ressources Naturelles du Québec. Direction des inventaires forestiers. 258 p.
- Stehman, S. V. et R. L. Czaplewski. 1998. Design and analysis for thematic map accuracy assessment: Fundamental principles. *Remote Sensing of Environment* 64 : 331-344.
- Thiffault, N., Munson, A., Fournier, R. et R. Bradley. 2005a. La relation éricacées – conifères, Bonheur d'oppression? *Le naturaliste Canadien*. 129 (2) : 57-61
- Thiffault, N., Titus, B., and A. Munson. 2005b. Silvicultural options to promote seedling establishment on *Kalmia-Vaccinium*-dominated sites. *Scandinavian Journal of Forest Research*; 20 (2): 110-121.

- Wallstedt, A., Coughlan, A., Munson, A., Nilsson, M-C. and H. Margolis. 2002. Mechanisms of interaction between *Kalmia angustifolia* cover and *Picea mariana* seedlings. *Canadian Journal of Forest Research*; 32(11): 2022-2031.
- Wulder, M.A.; White, J.C.; Magnussen, S., et S. McDonald. 2007. Validation of a large area land cover product using purpose-acquired airborne video. *Remote Sensing of Environment* 106 : 480-491.
- Yamasaki, S., Fyles, J., and B. Titus. 2002. Interactions among *Kalmia angustifolia*, soil characteristics, and the growth and nutrition of black spruce seedlings in two boreal Newfoundland plantations of contrasting fertility. *Canadian Journal of Forest Research*. 32 : 2215–2224

O.R. **van Lier**, R.A. Fournier, R. Bradley, “Application of multi-resolution satellite imagery to map ericaceous shrub dominated woodland in North-Eastern Quebec”. Présentation orale lors de l’American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS) and the Canadian Remote Sensing Society (CRSS) Specialty Conference (November, 2007).

ABSTRACT

Application of multi-resolution satellite imagery to map ericaceous shrub dominated woodland in North-Eastern Quebec.

The influence of ericaceous shrubs (*Ledum*, *Kalmia angustifolia*, *Vaccinium*) on the regeneration and growth of black spruce seedlings (*Picea mariana* (Mill.) BSP) is a current focus of interest for ecologists and natural resource managers. The conversion from productive forest stands to ericaceous-dominated sites following a clear-cut or fire is frequent to the extent that it compromises forest productivity. Detection of ericaceous shrubs can be achieved with great precision through the interpretation of high-resolution Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI, 2.5m resolution) images over all types of land cover. However, the use of high-resolution imagery is very costly, monetarily and timely, for large and even local detection purposes. Studies have shown that the invasive species can be detected with lower resolution images (Landsat TM) with an associated lower precision. High-resolution images used for detection purposes could be beneficial for improving classification methods using lower resolution images. The aim of this study was to provide a detection method that could be applied to all sub-arctic boreal regions. We have increased the detection accuracy of ericaceous shrubs on Landsat TM imagery enabling the analysis of large areas. The use of high-resolution satellite imagery (IKONOS, 3.2m resolution) further improved the detection accuracy of ericaceous-dominated woodlands on medium resolution satellite imagery (Landsat TM, 30m resolution). An object-oriented classification approach was applied through Definiens eCognition software, which allows us to obtain an accurate detection method for the ericaceous thematic from medium resolution data.

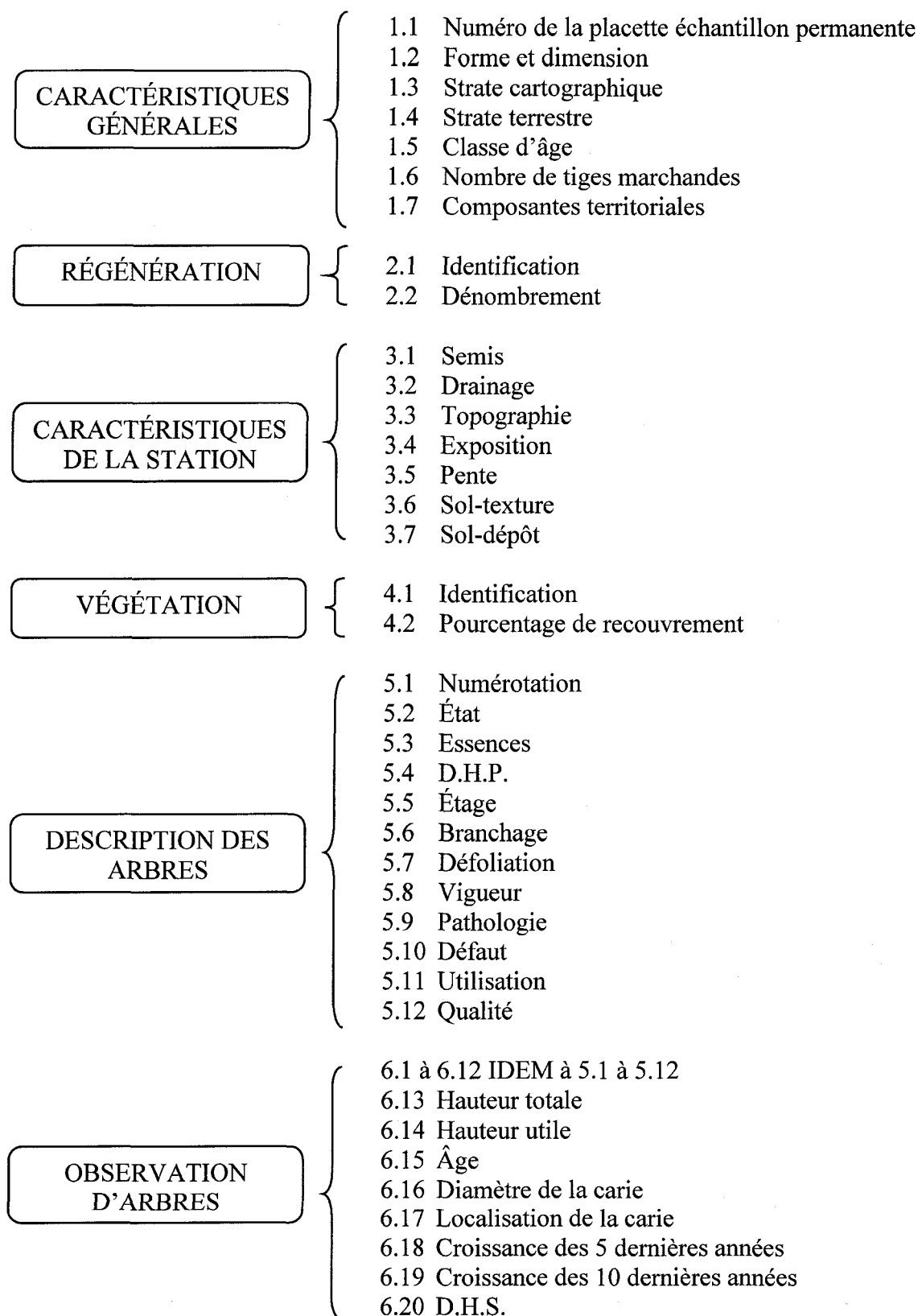


Fig. II-1. Contenu sommaire des placettes-échantillon permanentes (Noël et Rouleau, 1979).