

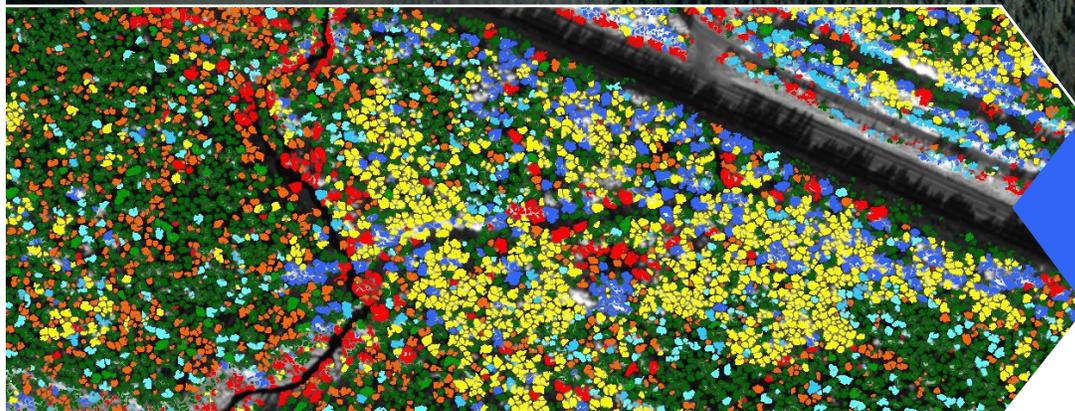


Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Analyse semi-automatique des forêts par l'approche dite « à l'arbre près », à partir d'images satellitaires en haute résolution spatiale : comparaison avec une carte écoforestière du Québec

François A. Gougeon, Pierre Labrecque, Michel Guérin et Donald G. Leckie



Service canadien des forêts
Centre de foresterie du Pacifique

Rapport d'information
BC-X-445

Canada



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Analyse semi-automatique des forêts par l'approche dite « à l'arbre près », à partir d'images satellitaires en haute résolution spatiale : comparaison avec une carte écoforestière du Québec

François A. Gougeon¹, Pierre Labrecque², Michel Guérin³ et Donald G. Leckie¹

Ressources naturelles Canada
Service canadien des forêts
Centre de foresterie du Pacifique
Rapport d'information BC-X-445

2018

¹ Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria, Colombie-Britannique

² Autrefois de CLC-Camint Inc. (iCtrees), Gatineau, Québec

³ CLC-Camint Inc. (iCtrees), maintenant à la Ville de Laval, Laval, Québec

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, représentée par le ministre de Ressources naturelles Canada, 2018
N° de cat. Fo143-2/445F-PDF
ISBN 978-0-660-27041-1

Une version en format PDF de cette publication est disponible à partir du site des Publications du Service canadien des forêts : <http://scf.rncan.gc.ca/publications>.

This publication is available in English under the title: *Semi-automatic Individual Tree Crown Analysis of Forests from High Spatial Resolution Satellite Images: Comparison with a Quebec Ecoforestry Map*

Le contenu de cette publication peut être reproduit en tout ou en partie, et par quelque moyen que ce soit, sous réserve que la reproduction soit effectuée uniquement à des fins personnels ou publiques, mais non commerciales, sans frais ni autre permission, à moins d'avis contraire.

On demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par Ressources naturelles Canada, et que la reproduction n'a pas été faite en association avec Ressources naturelles Canada ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites, sauf avec la permission écrite de Ressources naturelles Canada. Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec Ressources naturelles Canada à rncan.copyrightdroitdauteur.rncan@canada.ca

Couverture : Couverture : en haut, de la collection *Les forêts du Canada*, Ressources naturelles Canada (RNCan), Service canadien des forêts (SCF), 2003. En bas, délinéations et classifications typiques des arbres possible à partir d'images en haute résolution spatiale (< 1m/pixel) provenant de capteurs multispectraux aéroportés ou satellitaires. Gracieuseté de François A. Gougeon, RNCan, SCF, Centre de foresterie du Pacifique, Victoria, Colombie-Britannique.



Imprimé sur du papier recyclé



Imprimé au Canada

Table des matières

Remerciements	5
Résumé	6
Introduction	7
Description des secteurs à l'étude	8
Secteur de L'Annonciation (secteur B)	8
Secteur de Lachute (secteur C)	9
Imagerie satellitaire	9
Données forestières	9
Méthodologie	9
Prétraitement des images	10
Délimitation des cimes d'arbres	10
Photo-interprétation des aires d'entraînement et de validation	10
Classification des cimes d'arbres	10
Délimitation semi-automatique des peuplements	11
Techniques de vérification des résultats	12
Résultats	13
Secteur de L'Annonciation	16
Secteur de Lachute	18
Réflexion	20
Conclusion	21
Références bibliographiques	23

Figures

Figure 1. Localisation des secteurs à l'étude 9

Figure 2. Caractéristiques des virées à placettes de la DIF 12

Tableaux

Tableau 1. Classes de végétation identifiées dans chaque secteur 8

Tableau 2. Répartition des placettes de la DIF dans le secteur de L'Annonciation 12

Tableau 3. Répartition des placettes de la DIF dans le secteur de Lachute 13

Tableau 4. Matrice de confusion du secteur de L'Annonciation 14

Tableau 5. Matrice de confusion du secteur de Lachute 14

Tableau 6. Matrice de confusion des vérifications au sol de la DIF du secteur de L'Annonciation 15

Tableau 7. Matrice de confusion des vérifications au sol de la DIF du secteur de Lachute 15

Tableau 8. Comparaison avec l'inventaire forestier traditionnel du secteur de L'Annonciation 17

Tableau 9. Comparaison avec l'inventaire forestier traditionnel du secteur de Lachute 19

Remerciements

Cette étude est principalement le fruit d'un partenariat de recherche et développement entre des membres de CLC-Camint Inc. (iCtrees) et du Centre de foresterie du Pacifique, du Service canadien des forêts, de Ressources naturelles Canada. L'aide financière pour ce projet provenait des compagnies Max Meilleur et Fils Ltée et Papiers Fraser Inc., dans le cadre du Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier du Québec. Ce projet a également été rendu possible grâce à une contribution financière de Développement économique Canada, par l'entremise du programme IDÉE-PME. Nous tenons spécialement à remercier pour leurs importantes contributions : France Morin et Jean-François Mouton, à l'époque chez CLC-Camint Inc., Jean-Pierre Létourneau (retraité) et Sébastien Matejek (du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec).

Résumé

Au Québec, comme dans les autres provinces du Canada, l'établissement traditionnel d'inventaires forestiers exige des ressources considérables, tant humaines que matérielles. La disponibilité d'images satellitaires en haute résolution spatiale (< 1 m/pixel) ouvre la porte à une nouvelle approche préalablement disponible seulement à partir d'images aériennes : l'analyse semi-automatique dite « à l'arbre près ».

Afin de vérifier cette approche, des images satellitaires QuickBird de deux régions des Laurentides furent acquises. Après des étapes de prétraitement, les cimes d'arbre furent délinéées sur les images panchromatiques et classifiées par essence à l'aide des images multispectrales. Pour chaque polygone de l'inventaire forestier, l'on génère de nouveaux champs d'information qui décrivent leur contenu forestier de façon plus précise.

Des matrices de confusion générées à partir des zones d'essai indiquèrent que la précision de classification obtenue pour chacune des classes de végétation oscillèrent entre 60 et 90 %. Plusieurs approches furent utilisées pour vérifier les résultats à partir d'échantillonnages sur le terrain, mais aucune ne fut jugée très satisfaisante. Finalement, les résultats furent comparés à l'inventaire traditionnel. En raison du processus complexe de regroupement des essences adopté au Québec à l'époque, la comparaison s'avéra difficile à quantifier de façon précise, mais la comparaison faite avec les essences principales fut très encourageante.

Introduction

Au Québec, la carte écoforestière sert de base à plusieurs décisions en matière d'aménagement forestier. La création et la mise à jour de cette carte exige des ressources considérables, tant humaines que matérielles. Ce processus est basé sur l'interprétation de photographies (ou d'images) aériennes. Au moment de l'interprétation, la limite de chaque peuplement forestier est tracée en fonction d'une dizaine de critères de stratification (densité, hauteur, âge, type écologique, etc.), y compris l'un des critères le plus important, le groupement d'essences.

Dans le cadre plus global de la mise en œuvre du développement durable des ressources forestières, les aménagistes forestiers doivent avoir accès à de l'information de plus en plus précise s'ils souhaitent optimiser le potentiel de production de la ressource ligneuse, tout en harmonisant les pratiques industrielles avec les autres usages de la forêt, comme les activités récréotouristiques ou la gestion de la faune.

La disponibilité d'images satellitaires à haute résolution spatiale (<100 cm/pixel), comme celles provenant des satellites IKONOS, QuickBird, GeoEye ou WorldView, ouvre la porte à une nouvelle approche quant à l'inventaire forestier. Cette approche, développée principalement à partir d'images aériennes, consiste à reconnaître l'arbre lui-même plutôt que le peuplement. Bien que la résolution spatiale des satellites actuels ne soit pas encore tout à fait adéquate pour penser obtenir un inventaire réellement à l'arbre près, et qu'il serait difficile d'intégrer ce genre d'information pour de grands territoires dans les présents systèmes d'information géographique (SIG), cette approche préconise de l'information très précise au niveau des peuplements, notamment sur la composition en espèces. De plus, en ayant de l'information presque à l'arbre près, la définition même des peuplements peut être plus dynamique et l'on peut plus facilement réaliser des groupements sous différents critères (p. ex., la gestion de la faune).

L'apport d'une information numérique à l'arbre près ouvre la voie à une foresterie de précision, en améliorant l'information de la carte écoforestière du Québec ou en la remplaçant possiblement à plus long terme. Pour la première fois, grâce à ces techniques, l'aménagiste peut :

- visualiser facilement la répartition spatiale des espèces à l'intérieur d'un polygone écoforestier (y compris certaines espèces minoritaires, mais de grande valeur);
- obtenir un pourcentage de recouvrement de la cime de toutes les espèces forestières présentes dans le polygone écoforestier;
- définir les zones de concentration ou de dispersion d'une espèce donnée dans un polygone écoforestier (ou une grande région);
- optimiser son plan de sondage en fonction des espèces présentes dans le polygone écoforestier;
- améliorer la qualité des données utilisées pour effectuer le calcul de la possibilité forestière (c.-à-d. le volume);

- déterminer l'emplacement et la grandeur des trouées de la canopée, possiblement utile en gestion de la faune;
- repérer l'emplacement des chicots utiles aux oiseaux nicheurs.

La méthode de classification à l'arbre près par cime ou par faite, c'est-à-dire la méthode ITC (Individual Tree Crown), fut développée au cours des vingt-cinq dernières années au Service canadien des forêts de Ressources naturelles Canada (Gougeon et Leckie 2003). De nos jours, elle se présente sous la forme d'un progiciel puissant connu sous le nom de Progiciel ITC ou ITC Suite (Gougeon 2010), lequel fonctionne sous l'interface EASI de la plateforme Geomatica de PCI Geomatics (voir <http://www.pcigeomatics.com>, en anglais seulement).

D'abord développée à partir des données provenant de capteurs aéroportés canadiens (p. ex., MEIS, Casi) dans les années 90 (Gougeon 1995a, 1995b; Leckie et autres 2003b), la méthode ITC fut testée pour les capteurs satellites de haute résolution spatiale apparus au début des années 2000 (Gougeon et autres 2001; Labrecque et autres 2002; Gougeon 2003; Gougeon et Leckie 2006). La tendance actuelle favorise un retour important aux capteurs aériens (p. ex., ADS, Vexcel), en raison de l'intérêt pour de telles acquisitions d'images et pour une interprétation stéréoscopique à l'écran (Pitt et Pineau 2009). Par contre, la disponibilité toujours accrue d'images satellitaires à haute résolution spatiale et leur stockage systématique dans des bases de données, font d'elles un média incontournable de l'inventaire forestier. Dans certaines études, l'on compare des résultats d'analyses ITC avec ces deux types d'images sur les mêmes régions forestières et l'on examine les avantages et les inconvénients de chaque média (p. ex., Gougeon et Leckie 2011). D'un média à l'autre, la méthode ITC reste essentiellement la même, excepté que les données aériennes requièrent plus de prétraitements, de manipulations de fichiers et de traitements ultérieurs, en plus d'une vigilance accrue au moment des interactions contractuelles avec les fournisseurs de ces données (Gougeon 2008, 2009).

Il existe beaucoup d'autres travaux de recherche sur la délimitation des cimes à partir d'images en haute résolution spatiale (p. ex., Larsen et Rudemo 1998; Brandtberg et Walter 1998; Culvenor 2002; Erikson 2003; Yang et autres 2017); à partir d'images de « modèles numériques de la canopée », créées au moyen des données LiDAR de haute densité (Hyypä et autres 2008; Leckie et autres 2003a), et même à partir de nuages de points provenant d'un LiDAR ou d'une autocorrélation stéréoscopique d'images (St-Onge et autres 2015). Dans certains articles, l'on fait une revue et même une comparaison entre ces techniques (Larsen et autres 2011; Ke et Quackenbush 2011; Kaartinen et autres 2012; White et autres 2016).

La technique ITC de délimitation des cimes n'est pas nécessairement jugée la meilleure dans toutes les circonstances, mais elle s'applique généralement bien aux forêts canadiennes. Elle a aussi l'avantage de délimiter la cime de façon plus complète (c.-à-d. en incluant la partie ombragée de la cime), ce qui devrait mener à un meilleur calcul du volume, de la biomasse ou du carbone. Il existe aussi plusieurs techniques qui ne font que la détection et le décompte des cimes, la plupart étant basées sur la détection de maxima

locaux (Gougeon et Moore 1989; Dralle et Rudemo 1997; Wulder et autres 2000), et que nous n'utilisons maintenant que pour détecter et classifier la régénération (c.-à-d. de très petits arbres), principalement la version adaptative du programme (Gougeon et Leckie 1999), qui peut fonctionner même dans les plantations très ouvertes.

Bien qu'il existe plusieurs techniques de délimitation et de détection des cimes, il n'existe que peu de systèmes complets qui maîtrisent presque tous les aspects de l'analyse numérique à l'arbre près, comme le Progiciel ITC (ITC Suite). Les quelques systèmes du genre qui peuvent exister sont la chasse gardée des compagnies privées et l'on ne possède que très peu d'information à leur sujet. Le progiciel ITC fait le prétraitement des images (normalisation, détection des zones non boisées...), la délimitation ou la détection des cimes, la classification par essences, l'évaluation de l'exactitude à l'arbre près et le regroupement en peuplements forestiers. En théorie, le processus peut être presque complètement automatisé et ne nécessiter que l'intervention d'un interprète pour désigner les zones d'entraînement nécessaires au processus de classification par espèces, et pour faire un suivi de la qualité des résultats au moyen de zones de vérification, le tout de manière itérative. Plusieurs modules d'après traitement sont aussi disponibles, comme celui qui résume toute l'information à l'arbre près pour chaque polygone de peuplement forestier. Il y a aussi des modules pour visualiser la densité relative, la fermeture du couvert, la hauteur moyenne, le diamètre moyen des cimes; des modules pour vérifier si la prescription d'une plantation fut respectée; d'autres pour détecter les trouées dans la canopée, etc. Le calcul de la possibilité forestière (c.-à-d. le volume), se fait après toutes les analyses des images, soit au niveau du peuplement avec des valeurs moyennes pour chaque espèce (p. ex., la hauteur et le diamètre des cimes), soit au niveau de l'arbre individuel. Le calcul de la biomasse ou de la rétention de carbone peut se faire de la même manière.

Le projet pilote auquel nous faisons référence dans cet article (CSRE-Forêt et CLC-Camint 2003), comportait plusieurs facettes, dont l'étude des sous-bois conifériens à partir d'images satellites prises en hiver, des habitats disponibles au cerf de Virginie, de la méthode ITC détectant seulement le faite des arbres dans les zones en régénération (au Québec, les strates de moins de 7 m de hauteur), des calculs de possibilité forestière, etc. Ici, nous nous concentrerons sur deux des aspects les plus importants de ce projet : la vérification des espèces obtenues au moyen de la technique d'inventaire semi-automatique à l'arbre près, et sa comparaison avec le regroupement d'espèces typiques de l'inventaire conventionnel au Québec à cette époque.

Cet article a donc pour but d'examiner si l'analyse à l'arbre près appliquée à l'imagerie satellitaire en haute résolution pourrait devenir un nouvel outil d'aménagement forestier au Québec et dans le reste du Canada.

Description des secteurs à l'étude

Le couvert forestier de la région des Laurentides offre une étonnante diversité écologique, en passant de l'érablière à caryer tout au sud à la sapinière à bouleau blanc au nord avec, entre les deux, un gradient de peuplements forestiers riches en espèces

floristiques et fauniques. Originellement, trois secteurs d'étude furent délimités dans la région des Laurentides (figure 1). La délimitation exacte des secteurs fut effectuée par les membres d'un comité technique représentant des parties qui se prêtaient à ce projet. Ces secteurs d'études furent choisis de manière à représenter une mosaïque des peuplements typiques des Laurentides, l'une des régions les plus diversifiées du Québec.

Le secteur A de la partie nord du territoire devait couvrir une superficie de 160 km² (10 km de large et 16 km de haut), et nous devions prendre des images Quickbird d'été panchromatiques et multispectrales. Cependant, en raison des conditions climatiques, nous n'avons pu obtenir des images assez dépourvues de nuages, même si le pourcentage de nuages toléré était de 20 %.

Le territoire étudié dans le cadre de ce projet couvre donc deux secteurs de la région des Laurentides. Le premier est situé près de L'Annonciation et le deuxième près de Lachute. Les forêts du secteur de L'Annonciation sont situées dans le sous-domaine de l'érablière à bouleau jaune, alors que celles du secteur de Lachute se trouvent dans le sous-domaine de l'érablière à caryer cordiforme (Saucier et autres 2001).

Secteur de L'Annonciation (secteur B)

Ce secteur d'étude se trouve à environ 20 km à vol d'oiseau de la ville de L'Annonciation. Le territoire est caractérisé par une vallée alluviale à l'est, où serpente le ruisseau Froid, et par de nombreuses collines où s'entremêlent plusieurs lacs et cours d'eau. Le lac Chaud, l'un des lacs les plus importants, se situe dans la partie sud du secteur à l'étude. L'altitude quant à elle, oscille entre 240 et 630 m.

Selon la carte écoforestière du ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) du Québec, les peuplements feuillus dominent 46 % de la superficie totale du secteur, les peuplements mélangés suivent avec 34 %, tandis que les peuplements à dominance résineuse n'occupent que 5 % de la superficie boisée. Les érablières, les bétulaies à bouleaux jaunes et à bouleaux blancs se démarquent des autres groupements d'essences avec 46, 18 et 12 % de la superficie, respectivement. Les essences (classes) retenues pour l'analyse numérique de ce secteur sont énumérées au tableau 1.

Tableau 1. Classes de végétation identifiées dans chaque secteur

L'Annonciation	Lachute
Pin blanc (PIB)	Pin blanc (PIB)
Épinettes (EE)	Épinettes (EE)
Thuya (THO)	Thuya (THO)
Sapins (SAB)	Sapins (SAB)
Érables (ER)	Pruche (PRU)
Peupliers (PEU)	Érables (ER)
Bouleau à papier (BOP)	Feuillus intolérants (FI)
Bouleau jaune (BJ)	Feuillus tolérants (FT)

Quant à la répartition des classes d'âge dans le secteur de L'Annonciation, 34 % des peuplements sont classés vieux inéquienne (VIN), 0,7 % sont classés étagés, alors que 20 % ont une structure jeune inéquienne (JIN). Plus de 20 % des peuplements ont entre 50 et 70 ans, alors que des peuplements de 10 et 30 ans n'occupent que 7 % du secteur.

Secteur de Lachute (secteur C)

Le secteur de Lachute se situe à environ 5 km à vol d'oiseau à l'est de la ville de Lachute. Le territoire est caractérisé par la plaine alluviale de la rivière Nord au sud, et présente un relief ondulé au nord, où alternent collines basses et vallées. Le dénivelé est relativement faible avec une altitude qui oscille entre 140 et 340 m. Les lacs les plus importants se trouvent dans la partie nord et la partie centrale du secteur à l'étude.

D'après la carte écoforestière du MFFP du Québec, les peuplements feuillus et les peuplements mélangés dominent avec chacun 39 % de la superficie totale du secteur, alors que les peuplements résineux n'occupent que 5 % de la superficie boisée. Les pessières, les érablières et les résineux (R) se démarquent des autres groupements d'essences avec 33, 31 et 15 % de la superficie, respectivement. Il est à noter que selon les normes du MFFP du Québec, les peuplements dits simplement résineux sont ceux qui renferment au moins trois essences résineuses, mais dont aucune n'occupe plus de 50 % de la surface terrière résineuse. Les essences (classes) retenues pour l'analyse numérique de ce secteur sont énumérées au tableau 1.

Imagerie satellitaire

Dans cette étude, le choix s'est porté sur les produits satellitaires provenant du satellite à haute résolution QuickBird. Ce dernier offre une gamme de produits numériques obtenus à partir de deux types d'images qu'il capte, à savoir l'image panchromatique (61 cm/pixel) et l'image multispectrale (2,4 m/pixel). Aux fins de ce projet, cette combinaison s'avère très pratique, puisque la méthode de traitement se divise en deux étapes, soit l'isolation des cimes faite à partir de l'image panchromatique, puis la classification des cimes réalisée au moyen de l'image multispectrale. Les différentes bandes spectrales captées par QuickBird s'apparentent essentiellement aux bandes équivalentes disponibles avec le satellite Landsat ETM 7. Deux images de 160 km² furent acquises en été 2002, une du secteur de L'Annonciation (24 juin), l'autre du secteur de Lachute (20 juillet), comme l'illustre la figure 1.

Données forestières

Les données forestières qui servent à cette étude provenaient de différentes sources et furent utilisées différemment selon les étapes du projet. La couche numérique des feuillots écoforestiers 31G09NO, 31G09NE, 31G16SO, 31G16SE (Secteur B) et 31J10SO, 31J10SE, 31J07NO, 31J07NE (Secteur C), ainsi qu'une série de photographies aériennes infrarouges (1991, 1994 et 1996), furent utilisées pour repérer et délimiter des zones d'entraînement et de validation servant à la classification des cimes.

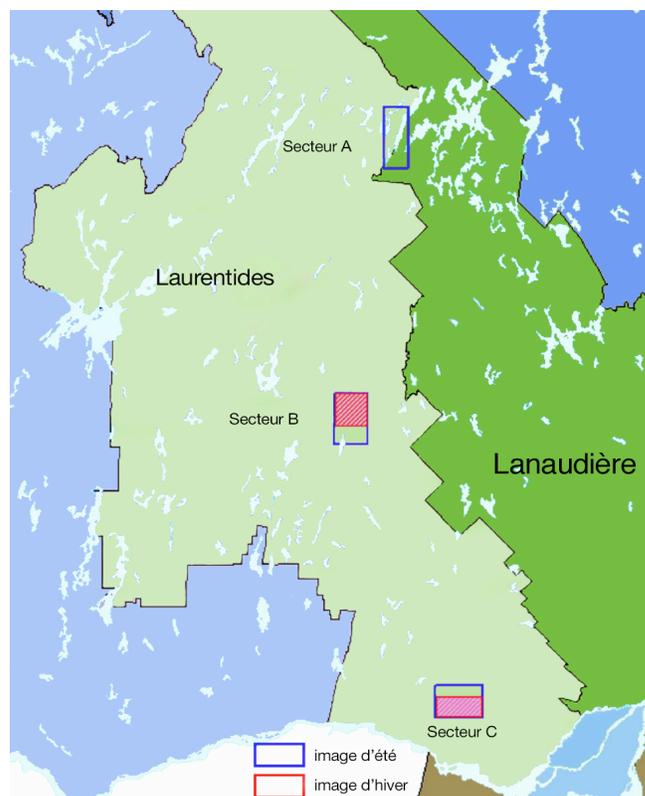


Figure 1. Localisation des secteurs à l'étude

Méthodologie

La méthode d'analyse des images à l'arbre près se divise en plusieurs étapes distinctes, soit :

1. le prétraitement des images et la création des masques de zones non forestières;
2. la délimitation semi-automatique des cimes : étape visant à délimiter les cimes individuelles (ici, à partir de l'image panchromatique);
3. la photo-interprétation (sur photographies aériennes ou images QuickBird ou les deux) d'aires d'entraînement et de validation pour chaque essence d'intérêt;
4. la classification des cimes : étape au cours de laquelle l'on crée, à partir de l'image multispectrale, des signatures spectrales à l'arbre près pour les essences d'intérêt, et que l'on applique ensuite à chaque cime, selon une méthode de maximum de vraisemblance;
5. la délimitation semi-automatique des peuplements : étape de création semi-automatisée des limites des peuplements basée sur l'analyse de la densité des cimes et de la fermeture du couvert par classes de végétation (et leur hauteur quand un modèle numérique de la hauteur du couvert est disponible);
6. le décompte par essence des cimes et de leurs attributs (p. ex., hauteur, diamètre de la cime, etc.) dans les peuplements, le

pourcentage de recouvrement pour chaque essence et la création de nouveaux champs en vue de stocker l'information produite pour chaque peuplement;

7. le calcul du volume par arbre, résumé par essence pour chaque peuplement.

Notons que la dernière étape ne fut pas réalisée au moment de cette étude. Par contre, des travaux à partir d'images aériennes sont toujours en cours en Ontario (Leckie et autres 2017) et nous comptons bien poursuivre jusqu'à cette étape. Notons aussi que pour cette étude, la délimitation des cimes fut réalisée à partir de l'image panchromatique (en plus haute résolution spatiale) et que les images multispectrales furent utilisées telles quelles (en basse résolution), pour créer des signatures spectrales. Théoriquement, il est aussi possible de faire une analyse de l'image à l'arbre près à partir d'un jeu d'images multispectrales à rehaussement spatial panchromatique (c.-à-d. « pan-sharpened »). Dans ce cas, la bande panchromatique elle-même n'étant généralement pas disponible, l'on utiliserait la bande du proche infrarouge rehaussée spatialement pour délimiter les cimes. L'on devrait pouvoir obtenir sensiblement les mêmes résultats si le pourvoyeur des images ne les a pas autrement altérées. Ici, un tel jeu d'images multispectrales rehaussées fut quand même créé pour aider à la visualisation, spécialement au moment de la délimitation des zones d'entraînement et de la vérification des classifications.

Prétraitement des images

En tout premier lieu, les images de chaque région doivent être transférées de leur format d'origine (.tif) au format .pix de la norme PCI. Cette dernière, la seule que reconnaît présentement le Proiciel ITC, permet de garder toute l'information et les étapes intermédiaires de traitements d'une image donnée à l'intérieur d'un seul fichier.

Les images sont d'abord orthorectifiées à partir des modèles numériques d'élévation. La bande qui servira à délimiter la cime (ici la panchromatique) est lissée à l'aide d'une moyenne glissante dans une fenêtre de 3x3 pixels (c.-à-d. PCI/FAV). Cela a pour effet d'éliminer le bruit de fond et d'adoucir les pentes entre les pixels brillants qui forment la cime des arbres et les zones ombragées qui les entourent, ce qui facilite la tâche liée au processus de séparation des cimes.

Finalement, des masques cachant les régions non boisées (chemin, lac, rivière, jetée, zone d'ombre profonde, nuages et leur ombre, etc.) sont générés à partir des seuils sur certaines bandes spectrales, ainsi qu'à partir de la carte de base de la région. Ces masques sont nécessaires au bon fonctionnement du procédé de délimitation des cimes. Ils seront aussi utiles au moment de la création semi-automatique des peuplements forestiers et de la cartographie finale avec les autres entités du paysage.

Délimitation des cimes d'arbres

Dans un couvert forestier vu à haute résolution spatiale (mieux que 1 m/pixel), il est généralement possible d'isoler les cimes d'arbres visibles (parfois des groupes d'arbres), en utilisant les vallées d'ombre qui habituellement les séparent. Ces dernières peuvent se trouver au sol, au sous-étage ou dans certaines parties des houppiers. (Gougeon 1995b)

Le procédé d'isolement (ITCVFOL, toutes les mentions ITCXXX se rapportent à l'Individual Tree Crown Approach [Gougeon et Leckie 2006; Gougeon 2010]) commence par un seuillage des régions boisées de l'image, afin d'éliminer les grandes zones d'ombre. Vient ensuite le repère des minima locaux (c.-à-d. les pixels les plus sombres des zones d'ombre entre les cimes) et, à partir de ces points, il suit systématiquement les vallées d'ombre qui se trouvent entre les cimes plus illuminées. Le résultat obtenu est une couche binaire (*bitmap*) illustrant ces vallées d'ombre. Celles-ci séparent bien certaines cimes, alors que d'autres sont seulement partiellement séparées.

Dans un second temps, la séparation des cimes se poursuit à l'aide d'un algorithme à base de règles (ITCISOL). À partir d'une région minimale (de 2x2 pixels), qui ne fait pas partie d'une vallée d'ombre (faisant donc potentiellement partie d'une cime), il détecte la vallée d'ombre qui coure à sa gauche et donc potentiellement un peu du périmètre de cette cime. Il suit alors ce périmètre en gardant du matériel de la cime à sa droite, tout en favorisant des mouvements dans le sens des aiguilles d'une montre. Si après plusieurs mouvements de ce genre, l'algorithme revient à sa position de départ, une cime ou un groupement de cimes fut délimité. Cette technique est appliquée à toutes les parties boisées de l'image, ce qui produit la délimitation de millions d'objets. Par après, des règles plus complexes sont appliquées pour essayer de séparer les objets qui semblent correspondre à plus d'une cime. Finalement, après plusieurs itérations, l'on obtient une couche binaire présentant toutes les cimes de la partie boisée de l'image et aussi, à la dernière itération, les îlots d'arbres qui n'ont pu être séparés.

Photo-interprétation des aires d'entraînement et de validation

Par interprétation des photographies aériennes et des images QuickBird, vingt à vingt-cinq polygones représentatifs (c.-à-d. comprenant de nombreux arbres d'une même espèce) furent créés pour chaque classe de végétation. De cette vingtaine de polygones, la moitié servit à créer la signature spectrale de la classe de végétation (les aires d'entraînement), alors que l'autre moitié (les aires de validation) servit de témoin et permit d'établir le pourcentage de la précision de la classification au terme du processus. Il est important de s'assurer d'une grande pureté en terme de représentation de la classe de végétation. En effet, les impuretés (c.-à-d. les arbres d'une autre espèce) influent sur la qualité de la classification en introduisant un biais dans le calcul de la valeur spectrale moyenne d'une signature, ce qui réduit la précision.

Classification des cimes d'arbres

Pour chaque image à classifier, les signatures spectrales de chaque classe de végétation sont générées à partir des aires d'entraînement provenant seulement de l'image elle-même (c.-à-d. sans signature provenant d'autres images). Pour chaque cime d'arbre (ou îlot d'arbres) de ces aires, le procédé de création des signatures (ITCSSG) crée d'abord une signature spectrale de la cime à partir des valeurs multispectrales des pixels à l'intérieur de cette cime. Puis, les valeurs moyennes de chaque cime sont combinées pour créer la signature spectrale de la classe de végétation. La signature spectrale d'une classe correspond donc à la valeur multispectrale moyenne de toutes les cimes qui se trouvent à l'intérieur des aires d'entraînement et à la covariance qui existe entre ces cimes et non entre leurs pixels.

Une variation importante de cette technique (et presque toujours utilisée), consiste à ne considérer que les pixels bien éclairés de chaque cime, plutôt que tous les pixels de la cime. En effet, l'un des avantages de la délimitation des cimes par la technique des vallées d'ombre, est généralement d'obtenir des cimes plus complètes, soit avec le côté ombragé de chaque cime. Cela favorise l'estimation du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) ou du volume de chaque arbre à partir de l'aire de chaque cime, mais la présence des pixels ombragés (sombres) nuit au procédé de classification. L'on a donc recours au procédé ITCMG, lequel crée un masque de manière à ce que seul le côté bien illuminé de chaque cime soit pris en compte au moment de la création des signatures et de la classification de chaque cime.

Le procédé de classification lui-même (ITCSC) permettra de calculer la valeur multispectrale moyenne des pixels de chaque entité (arbre ou groupe d'arbres) de l'image et de la comparer aux signatures de toutes les classes de végétation. L'attribution d'une classe de végétation à une entité se fait en appliquant la règle du maximum de vraisemblance, laquelle est circonscrite par un seuil de confiance.

Délimitation semi-automatique des peuplements

Cette étape consiste à créer des polygones correspondant aux peuplements forestiers présents dans chaque image, en faisant des

regroupements à partir des cimes d'arbres classifiées (voir la figure 2 dans Gougeon et Leckie 2003). La méthode utilisée fait appel à la couche binaire des cimes isolées et aux couches binaires des cimes classifiées, comme celles créées dans les étapes précédentes. Les regroupements sont généralement basés sur la densité du peuplement, la fermeture du couvert forestier et, bien sûr, la composition en espèces. Il est aussi possible d'introduire la hauteur du peuplement quand cette information est disponible (c.-à-d. le modèle de la hauteur de la canopée provenant des données LiDAR ou des stéréocorrélations automatisées). Seule la densité des tiges fut utilisée dans ce projet.

Le module STEM DENS crée une image de la densité des tiges en réduisant chaque cime à son centre de gravité, et en faisant un décompte du nombre de tiges dans une fenêtre mobile de dimension fixe, ce qui exprime la densité dans un voisinage donné. L'information sur la composition en espèce résulte « indirectement » de l'application de ce procédé à chaque couche binaire des cimes classifiées, chaque couche binaire représentant une seule espèce. La combinaison de toutes ces images intermédiaires au moyen d'un processus de classification automatique (PCI/FUZCLUS), résulte en des zones qui correspondent bien aux peuplements forestiers (dû à leur contenu). L'utilisateur obtient un certain contrôle de la précision du contenu en incluant plus ou moins de classes au processus de classification. Certaines de ces classes pourront aussi être regroupées au gré de l'utilisateur ou de l'interprète.

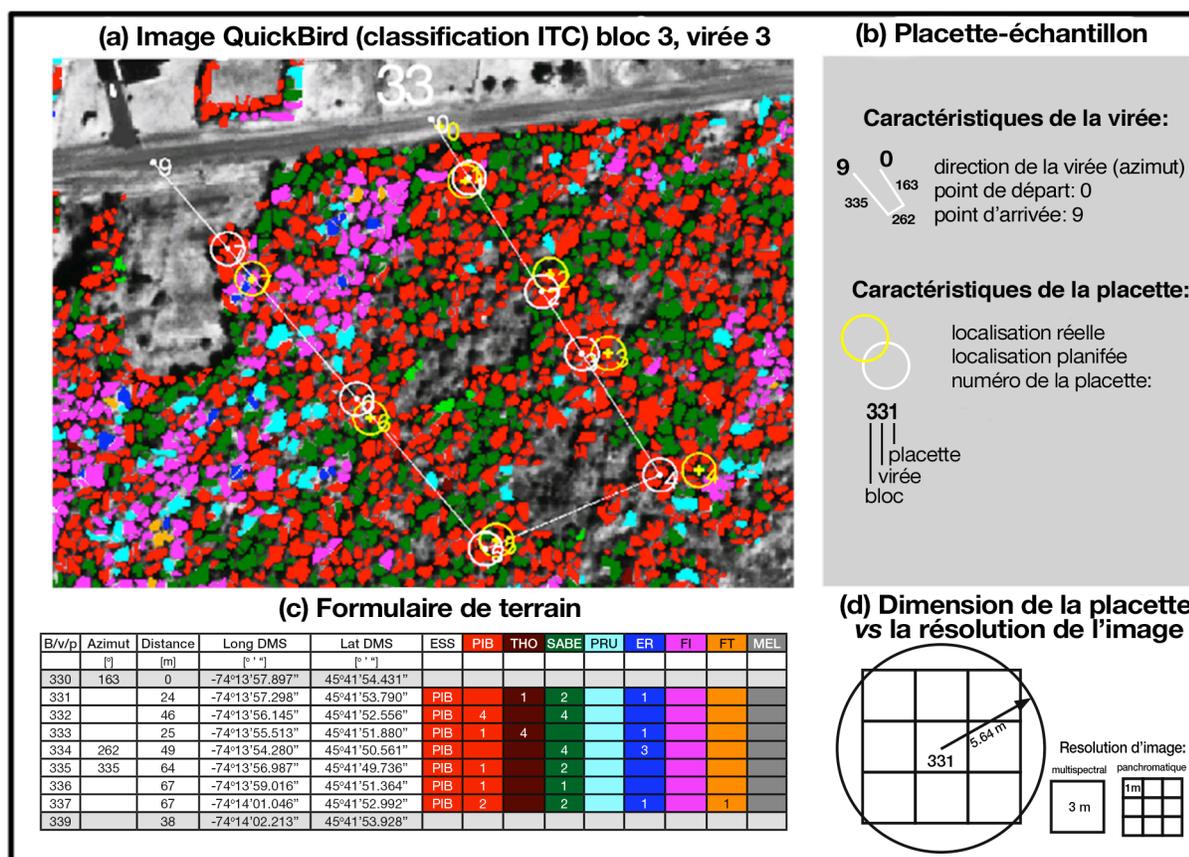


Figure 2. Caractéristiques des virées à placettes de la DIF

Les regroupements dont la superficie est trop petite (inférieure à un ha) sont éliminés en les intégrant aux regroupements limitrophes (PCI/SIEVE), puis les limites des regroupements sont adoucies à l'aide d'un filtre (PCI/FMO). L'on peut alors introduire les éléments non forestiers (lacs, rivières, chemins, etc.), que l'on avait isolés puis masqués à l'étape du prétraitement. L'on transforme alors la couche binaire des regroupements en polygones. Enfin, à l'aide d'un SIG, l'on peut éditer cette couche vectorielle en vue de raffiner la délimitation des polygones forestiers.

Une fois satisfait de ces polygones de peuplements forestiers, il est possible d'y joindre des champs résumant toute l'information forestière à l'arbre près contenue dans chaque polygone (ITCPCD), comme les pourcentages de recouvrement. Dans cette étude comparative entre les résultats obtenus du processus d'analyse de l'ITC et ceux plus conventionnels basés sur l'interprétation des photos aériennes, l'on utilisera bien entendu les polygones des peuplements de l'inventaire actuel (provenant de l'interprétation), comme établis au ministère.

Techniques de vérification des résultats

a) Matrices de confusion

L'une des techniques traditionnelles pour vérifier les résultats de classification en télédétection se veut l'emploi de matrices de confusion. Ces dernières nous fournissent le décompte (ou le pourcentage) des arbres de chaque espèce (ou classe) à l'intérieur des aires de validation que l'on présume ne contenir qu'une seule espèce (ou classe). Si ces aires de validation sont bien représentatives, le pourcentage sur la diagonale de la matrice correspond à la probabilité qu'une cime de l'espèce A soit classifiée « espèce A » dans cette image, les autres pourcentages démontrant la probabilité qu'elle soit classifiée autrement. L'on a créé ces aires de validation par photo-interprétation en même temps que les aires d'entraînement.

b) Vérification par virées à placettes d'échantillonnage du ministère

Une autre technique pour vérifier les résultats de la classification à l'arbre près (ITC) est de comparer les compositions en espèces

ainsi générées par le dénombrement des tiges de chaque espèce provenant des virées ou des placettes d'échantillonnage sur le terrain. À la Direction des inventaires forestiers (DIF), du MFFP du Québec, l'on a entrepris une telle vérification. Afin d'augmenter la probabilité de cibler le bon endroit, à la DIF, l'on a préconisé de localiser, dans la mesure du possible, ces placettes à l'intérieur des peuplements les plus purs. Ceci était vrai dans le cas des espèces comme l'épinette (EE), le sapin/épinette (SABE), l'érable (ER) et le peuplier (PEU), lesquelles forment des peuplements plus homogènes. Il était difficile de planifier des placettes dans des peuplements purs quant aux autres essences.

Les blocs ont aussi été sélectionnés en considérant l'accès au terrain. Chaque virée comprenant en moyenne 6 placettes circulaires (maximum 8) d'une superficie équivalente à un centième d'hectare chacune (5,64 m de rayon), est caractérisée par le point de départ et le point d'arrivée et par des directions exprimées selon les azimuts et la distance à parcourir entre chaque placette, voir la figure 2.

Dans le secteur de L'Annonciation, cinq blocs furent considérés et leurs placettes disposées de manière à avoir environ 7 à 15 placettes par strate (tableau 2). À Lachute, huit blocs furent sélectionnés, puis 17 virées furent tracées. La répartition des 94 placettes par strate et par blocs est présentée au tableau 3. Dans chaque placette, en plus d'enregistrer les coordonnées du centre, l'identification des essences et le dénombrement des tiges furent effectués (figure 2). Quant aux peuplements matures, l'on a seulement tenu compte des tiges de plus de 7 m.

c) Vérification par bloc de placettes

En espérant minimiser les effets potentiels des erreurs de positionnement, une deuxième validation sur le terrain fut réalisée. Le niveau de correspondance fut évalué entre le pourcentage de recouvrement des classes de végétation estimée au moyen de la méthode ITC et celui des classes de végétation provenant des placettes temporaires à l'intérieur de blocs de 0,49 ha (soit 70 m par 70 m).

Pour chacune des 4 placettes à rayon fixe de 11,28 m à l'intérieur des blocs de 0,49 ha, l'on a dénombré toutes les tiges dont la cime était « visible d'un satellite » et avons mesuré leur DHP. Ce dénombrement a permis de déterminer la surface terrière et,

Tableau 2. Répartition des placettes de la DIF dans le secteur de L'Annonciation

Bloc	Strates de plus de 7 m							
	PIB	EE	THO	SABE	ER	PEU	BOP	BOJ
1	2	3			3	12		
2	5			1	7	1		6
3		4	2	5			8	
4	3							
5			8	7			7	5
Total	10	7	10	13	10	13	15	11

Tableau 3. Répartition des placettes de la DIF dans le secteur de Lachute

Bloc	Strates de plus de 7 m						
	PIB	THO	SABE	PRU	ER	FI	FT
1		1		2			
2	3		13	5	4	1	
3	12		1				
4			5				6
5		2	1				1
6		3	1	13	3		1
7			3		2	4	1
8	3		2				1
Total	18	6	26	20	9	5	10

par conséquent, le pourcentage de cette dernière pour chacune des classes de végétation à l'intérieur de chacun des blocs.

La comparaison a priorisé les trois regroupements les plus importants pour chacun des secteurs. Ainsi, dans le secteur de L'Annonciation, les regroupements de ER, BJ et BOP furent visités, tandis qu'à Lachute, ce fut les regroupements SABE, ER et R. Dans chaque regroupement visité, 5 blocs de 0,49 ha (soit 70 m par 70 m) furent délimités, dans lesquels 4 placettes d'inventaire furent établies. La carte écoforestière permet de spatialiser les regroupements, tandis que l'image panchromatique permet de localiser les zones les plus homogènes à l'intérieur de ces regroupements.

d) Vérification par virées continues

À L'Annonciation, une troisième vérification fut réalisée sur le terrain. Celle-ci fut basée sur la composition en espèces provenant des virées (bande longue et étroite utilisée comme unité d'échantillonnage) produisant un continuum d'observations (c.-à-d. sans placettes d'échantillonnage). Ce genre de virées (ou transects) pourrait offrir une meilleure intégration de la variabilité spatiale et permettre de réduire les erreurs de positionnement. Pour réduire l'imprécision liée au positionnement, les transects furent définis dans des secteurs qui présentent des tendances marquées, homogènes et vastes au niveau des résultats de l'ITC. La longueur, l'orientation et la position des transects furent déterminées visuellement, en se basant sur la classification de l'ITC et le tracé routier.

Sur le terrain, le point de départ de chaque transect fut défini au moyen d'un GPS (Global Positioning System). Tous les autres points furent déterminés à l'aide d'une boussole et d'un topofil (compteur métrique à fil perdu). Des points d'observation eurent lieu tous les 15 m le long du transect. Pour chaque point, des observations qualitatives (visuelles) furent effectuées et enregistrées dans des fiches préparées à cet effet. La zone visée par chaque point d'observation intègre les données comprises entre le point mesuré et le point suivant. L'information recueillie renseigne sur le pourcentage de chaque essence des strates dominantes et codominantes, la densité de chaque strate et la taille des cimes.

e) Comparaison avec l'inventaire forestier traditionnel

Une autre approche pour vérifier les résultats provenant de l'analyse de l'image à l'arbre près, est de comparer la composition en espèces, ainsi obtenue, avec celles de l'inventaire forestier traditionnel, en utilisant les polygones de cette dernière. Bien que ce genre de comparaison nous soit souvent demandé et puisse aider à faire un lien avec la méthode ITC pour le forestier qui est habitué d'utiliser l'inventaire traditionnel, cela pose comme hypothèse de base que l'inventaire traditionnel représente bien la réalité. Malheureusement, le peu d'information qui existe sur la précision des inventaires provinciaux est plutôt décourageant à cet égard. Au Québec, les travaux liés au Rapport de la commission Coulombe (Bibliothèque nationale du Québec 2004, p.106), semblent indiquer une concordance entre la photo-interprétation et la réalité du terrain de l'ordre de 64 % (55 % à 76 %) pour les principales essences de conifères, et de 48 % (40 % à 53 %) pour les principales essences de feuillus, et ce, pour les peuplements purs. La concordance tombe souvent sous la barre des 20 % pour les peuplements ayant plus de une essence. Des travaux en Ontario (Thompson et autres 2007), font état des compositions en espèces incorrectes (Khi-carré) de 64 % des peuplements en forêt boréale par rapport à des transects au sol.

Il existe aussi quelques difficultés intrinsèques à cette comparaison. Premièrement, dans une carte écoforestière, le type de peuplement est défini en fonction de la « surface terrière » des essences dominantes qui le composent, alors qu'avec la méthode ITC, la dominance d'une espèce est basée sur le « pourcentage de recouvrement » des cimes de cette espèce. L'importance des conifères à petite cime (p.ex., l'épinette noire) aura donc tendance à être sous-estimée par rapport aux autres espèces dans un même peuplement. Deuxièmement, un très faible écart de pourcentage peu faire basculer un peuplement de type EoR (Érable rouge/Résineux) en un peuplement de type REo (Résineux/Érable rouge), par exemple.

Résultats

a) Matrices de confusion

En utilisant au départ des aires d'entraînement et de validation indépendantes pour chaque essence, certaines classes furent

finalement regroupées, car il s'avéra difficile d'obtenir des signatures spectrales suffisamment homogènes pour acquérir une classification assez précise. Par exemple, dans le secteur de Lachute, nous avons préféré regrouper les classes du peuplier et du bouleau à papier sous le regroupement des feuillus intolérants et les classes du hêtre et du chêne sous le regroupement des feuillus tolérants. Ces regroupements ont permis d'augmenter la précision des nouvelles classes.

De manière générale, le résultat des classifications est très intéressant si l'on se rapporte aux pourcentages de précision obtenus avec les matrices de confusion. En effet, la précision obtenue pour chacune des classes de végétation oscille entre 60 et 90 % dans le secteur de L'Annonciation (tableau 4). Il en est de même dans le secteur de Lachute où la précision varie entre 74 à 89 % (tableau 5). Avec huit classes d'arbres matures, une précision

de l'ordre de 70 à 75 % est considérée très bonne et la confusion entre les espèces ne semble pas indiquer de problème majeur.

La matrice de confusion permet de définir comment se répartit la précision suivant la classification. Étant donné la nature statistique du processus de classification, il est normal de toujours obtenir une certaine confusion entre les espèces. L'on s'attardera donc aux confusions importantes (> 10 %). Par exemple, pour les arbres matures du secteur de L'Annonciation (tableau 4), le pin blanc a la précision la plus faible (60,1 %) et semble souvent confondu avec l'épinette à raison de 7,9 %, avec le thuya à raison de 5,6 %, mais surtout avec le sapin baumier à raison de 14,5 %. Quant aux arbres matures du secteur de Lachute (tableau 5), la classification du pin blanc est de beaucoup supérieure (88,3 %), le mode de confusion avec le sapin baumier s'étant quelque peu inversé (c.-à-d. plus de sapins dits PIB et moins de PIB dits sapins), et la confusion avec les autres espèces étant moindre.

Tableau 4. Matrice de confusion du secteur de L'Annonciation

% de ITC classifiés pour chacune des classes										
Classes	ITC ^a	NC ^b	PIB	EE	THO	SAB	ER	PEU	BOP	BJ
PIB	393	2,8 %	60,1 %	7,9 %	5,6 %	14,5 %	0,0 %	0,8 %	4,1 %	4,3 %
EE	633	4,3 %	2,8 %	90,0 %	2,5 %	0,3 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
THO	573	2,4 %	0,3 %	18,2 %	76,3 %	2,4 %	0,0 %	0,0 %	0,3 %	0,0 %
SAB	724	0,4 %	6,4 %	0,8 %	13,4 %	76,7 %	0,0 %	0,0 %	2,2 %	0,1 %
ER	2332	1,6 %	0,1 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	85,2 %	1,3 %	0,8 %	11,0 %
PEU	704	2,6 %	0,0 %	0,0 %	0,6 %	0,3 %	0,4 %	82,0 %	8,2 %	6,0 %
BOP	503	5,2 %	0,4 %	0,0 %	1,6 %	2,4 %	1,2 %	10,7 %	9,6 %	8,9 %
BJ	1046	2,2 %	0,2 %	0,0 %	0,1 %	0,3 %	8,2 %	5,4 %	8,5 %	75,0 %

Note : Voir tableau 1 pour les classes de végétation.

^aITC : Nombre de ITC compris dans la vérification.

^bNC : Pourcentage de ITC non classifiés.

Tableau 5. Matrice de confusion du secteur de Lachute

% de ITC classifiés pour chacune des classes										
Classes	ITC ^a	NC ^b	PIB	EE	THO	SAB	PRU	ER	FI	FT
PIB	496	4,8 %	88,3 %	0,2 %	0,2 %	6,5 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
EE	425	4,9 %	1,2 %	85,6 %	4,9 %	0,7 %	2,6 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
THO	692	2,0 %	2,0 %	11,4 %	74,0 %	9,1 %	1,4 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
SAB	324	0,3 %	10,8 %	0,9 %	3,7 %	82,4 %	1,5 %	0,0 %	0,3 %	0,0 %
PRU	399	3,3 %	5,3 %	1,3 %	2,0 %	4,5 %	77,2 %	3,3 %	1,5 %	1,8 %
ER	815	3,7 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,1 %	89,4 %	0,5 %	6,3 %
FI	308	1,0 %	3,6 %	0,0 %	0,3 %	0,6 %	2,9 %	3,2 %	84,7 %	3,6 %
FT	1119	3,8 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %	1,9 %	12,1 %	1,5 %	80,4 %

Note : Voir tableau 1 pour les classes de végétation.

^aITC : Nombre de ITC compris dans la vérification.

^bNC : Pourcentage de ITC non classifiés.

Ces confusions possibles entre les espèces prédites au moyen du processus d'analyse ITC seront prises en considération au moment de la comparaison avec les données recueillies au sol ou avec l'inventaire traditionnel.

b) Vérification ministérielle par virées à placettes

Les données recueillies sur le terrain par les responsables du ministère, à l'aide d'un formulaire préétabli (figure 2), furent compilées et structurées de façon à calculer des matrices de confusion qui traduisent la concordance entre la classification et la référence au sol.

En ce qui a trait au secteur de L'Annonciation, les résultats de la classification peuvent être intéressants si l'on se rapporte aux pourcentages de précision des espèces, comme l'épinette (EE), le sapin/épinette (SABE), l'érable (ER) et le peuplier (PEU), qui forment des peuplements plus homogènes. En effet, la précision obtenue pour chacune de ces classes de végétation oscille entre 71,2 et 92,2 % (tableau 6).

La faible exactitude moyenne de 47,8 %, s'explique par le manque de concordance entre la classification et la référence quant au pin blanc (0 %) et au thuya (3,4 %). Une fois ces deux espèces écartées de l'analyse, l'on constate que l'exactitude moyenne de la

classification passe de 47,8 à 63,1 %. En ce qui concerne le bouleau à papier, un très faible pourcentage de précision est aussi affiché (17,5 %), ainsi qu'un pourcentage assez faible (32,8 %) pour le bouleau jaune.

Quant au secteur de Lachute, mis à part le sapin, l'érable et le pin blanc où le pourcentage de précision est de 69,2 %, 57,5 % et 52,8 % respectivement, la précision des autres classes est plutôt faible et oscille entre 21,6 et 48,5 % (tableau 7). Il est à noter qu'ici, le pin blanc (52,8 %) et le thuya (48,5 %) sont mieux classifiés comparativement à ceux du secteur de L'Annonciation.

c) Vérification par blocs de placettes

Ici, le niveau de correspondance fut évalué en comparant le pourcentage de recouvrement des classes de végétation estimées selon la méthode à l'arbre près (ITC) avec celui des classes de végétation provenant des placettes à l'intérieur des blocs de 70 m par 70 m (0,49 ha). Dans le secteur de L'Annonciation par exemple, seuls les regroupements désignés ER, BJ et BB furent visités. L'on peut donc comparer l'espèce dominante (ER, BJ et BB) avec des espèces compagnes. Vu que les résultats détaillés de cette comparaison comptent 46 pages du rapport principal (CSRE-Forêt et CLC-Camint, 2003), nous nous en tiendrons aux faits importants.

Tableau 6. Matrice de confusion des vérifications au sol de la DIF du secteur de L'Annonciation

	N ^{bre}	PIB	EE	THO	SABE	ER	PEU	BOP	BOJ
PIB	27	0	18,5	25,9	18,5	0	18,5	3,7	3,7
EE	77	0	92,2	0	3,9	0	0	3,9	0
THO	119	0	5	3,4	82,4	0	1,7	3,4	4,2
SAB	96	1	2,1	2,1	87,5	1	1	2,1	3,1
ER	49	0	0	0	0	77,6	2	4,1	10,2
PEU	156	0	0	0	2,6	15,4	71,2	7,1	3,2
BOP	126	0	0	0,8	50,0	5,6	12,7	17,5	13,5
BJ	67	0	0	0	11,9	37,3	11,9	4,5	32,8

Exactitude moyenne = **47,76 %**

Exactitude globale = **49,09 %**

Tableau 7. Matrice de confusion des vérifications au sol de la DIF du secteur de Lachute

	N ^{bre}	PIB	THO	SABE	PRU	ER	FI	FT	EE
PIB	108	52,8	29,6	13,0	0,9	2,8	0	0,9	0
THO	66	0	48,5	9,1	12,1	6,1	0	12,1	12,1
SAB	250	2,4	13,6	69,2	2,4	8,0	2,0	1,2	0,8
PRU	172	0	22,1	8,1	30,8	21,5	4,7	7,0	5,8
ER	66	0	1,5	10,6	6,1	57,5	1,5	22,7	0
FI	35	2,9	0	22,9	2,9	25,7	40,0	5,7	0
FT	74	0	4,1	2,7	8,1	58,1	4,1	21,6	1,4

Exactitude moyenne = **45,78 %**

Exactitude globale = **49,68 %**

L'érable du secteur de L'Annonciation est sous-estimé quand il est l'espèce principale (54 % vs 76 % au sol) et aussi quand il est une espèce secondaire (de 11 % dans les blocs de BJ et de 16 % dans les blocs de BB). Le bouleau jaune (BJ) est très près de la marque quand il est l'espèce principale (47 % vs 48 % au sol), mais surévalué comme espèce secondaire (de 24 % dans les blocs de BB et de 14 % dans les blocs de ER). Le bouleau blanc est sous-estimé dans son territoire (16 % vs 28 % au sol), et surestimé (18 %) dans les zones de bouleau jaune où il n'a aucune présence au sol. Ceci indique probablement davantage la confusion spectrale entre les deux bouleaux. Il est à noter que d'une manière ou d'une autre (ITC ou le sol), les blocs désignés « bouleau blanc » ne semblent même pas mériter leur désignation (avec 16 et 28 % de recouvrement).

Dans le secteur de Lachute où les regroupements de SAB, ER et R furent visités, l'érable est un peu surestimé par l'ITC quand il est l'espèce principale (60 % vs 55 % au sol), mais sa présence est sous-estimée dans les blocs de SAB (8 % vs 28 % au sol) et de R (2 % vs 26 % au sol). Dans les blocs désignés à dominance résineuse, composés de pins blancs, d'épinettes, de thuyas, de sapins, de pruches, d'érables, de feuillus intolérants et de feuillus tolérants, la méthode ITC donne les pourcentages suivants, 28, 1, 4, 35, 19, 2, 9, et 0 %, respectivement, alors que l'échantillonnage au sol produit 9, 18, 33, 4, 5, 26, 5, et 0 %. La méthode ITC semble surévaluer le pin, le sapin et la pruche; et sous-estimer l'épinette et le thuya. La présence de l'érable est aussi très sous-estimée. Ainsi, dans les blocs désignés à dominance de sapins dans l'inventaire forestier, la méthode ITC donne les pourcentages suivants, 13, 4, 10, 15, 18, 8, 19, et 7 %, respectivement, alors que l'échantillonnage au sol produit 4, 6, 5, 2, 39, 27, 10, et 7 %. Il est à noter que d'une manière ou d'une autre (ITC ou au sol), ces blocs ne semblent même pas mériter leur désignation de sapinière (avec 15 et 2 %).

d) Vérification par virées continues

Des transects furent définis dans des secteurs qui présentent des tendances marquées au niveau des résultats de l'ITC, en vue de vérifier la composition en espèces produite au moyen de la classification ITC par rapport à celle vue sur le terrain. Les résultats furent présentés graphiquement pour permettre d'analyser les différences d'une manière qualitative.

Les observations faites à chaque point d'observation furent compilées pour chaque transect. Ainsi, après avoir transposé les transects et les points d'observation sur l'image, la composition en espèce de l'ITC autour de chaque point d'observation fut résumée d'une manière similaire (CSRE-Forêt et CLC-Camint, 2003). Les résultats furent présentés sous forme de graphiques à interpréter pour les 26 transects et seules quelques généralités furent mises en évidence.

De façon générale, la densité d'une essence semble plus déterminante que sa position hiérarchique dans le couvert forestier. En effet, les essences captées au moyen de l'ITC se caractérisent par une haute densité au sol, et ce, peu importe si elles font partie de la strate dominante ou codominante. En général, il semble que la méthode ITC eut surestimer le PIB et le THO au détriment des EE, le BOP au détriment du BJ et le BJ au détriment des ER.

e) Comparaison avec l'inventaire forestier traditionnel

Finalement, afin de démontrer le potentiel de la méthode ITC pour l'identification et la cartographie des peuplements forestiers, les résultats de la classification de l'ITC seront comparés avec la carte écoforestière du MFFP du Québec, telle que produite au moyen de la méthode conventionnelle de photo-interprétation et selon la nomenclature en vigueur à l'époque (Bérard 1996). Bien évidemment, dans cette comparaison, l'on utilisera les polygones de la carte écoforestière et non ceux générés de façon semi-automatique au moyen de la méthode ITC. À noter que même si dans la classification ITC, on utilise des sigles comme ER ou BJ (en majuscules) pour les classes, quand cette information est résumée au niveau du peuplement, la nomenclature de la carte écoforestière est utilisée, soit Er, Bj, ErBj, etc., pour comparer les classes dominantes de la méthode ITC avec celles de la carte.

Pour apprécier cette comparaison à sa juste valeur, il est important de considérer que la composition en espèces et donc, le type de peuplements dans une carte écoforestière est défini en fonction de la « surface terrière » des essences dominantes qui le compose, alors qu'avec la méthode ITC, la dominance d'une espèce est basée sur le « pourcentage de recouvrement » des cimes de cette espèce. Il y aura donc des différences au niveau de l'évaluation des proportions de chacune des essences et donc, au niveau d'une appellation potentielle. En effet, pour des DHP identiques, la dimension de la cime d'un résineux sera plus petite que celle d'un feuillu, ce qui influera sur les proportions, surtout dans les peuplements mélangés où l'importance des résineux sera typiquement sous-estimée.

De plus, bien que cette comparaison se fasse en utilisant l'inventaire forestier traditionnel comme « référence », il est très important de considérer que ce dernier a aussi des problèmes de précision et d'exactitude, comme présenté plus tôt dans le texte.

Secteur de L'Annonciation

Dans les peuplements désignés Er du secteur de L'Annonciation qui correspondent à des zones où les feuillus constituent plus de 75 % de la surface terrière et l'érable à sucre plus de 66 % des feuillus, 66 % de ces polygones furent reconnus Er au moyen de la méthode ITC, selon l'espèce dominante, ici ER (tableaux 1 et 8). Par contre, dans ces 98 polygones, le recouvrement moyen des érables à sucre n'est que de 57 % ($\sigma=12$ [écart type]) des feuillus.

En considérant les groupements des deux premières espèces désignées par la méthode ITC, on obtient 66 % de ErBj, 31 % de BjEr et 3 % de BjBb. Si l'on se fie à l'inventaire traditionnel, il y a donc une certaine confusion spectrale entre l'érable et le bouleau jaune, qui semble favoriser la dominance du bouleau jaune dans 31 % des cas. Cette tendance, qui fut aussi remarquée dans une étude antérieure (Gougeon et autres 2001), pourrait aussi expliquer pourquoi l'érable ne constitue pas toujours plus que 66 % des feuillus (ici, 57 %), même lorsqu'il apparaît comme la 1^{re} espèce avec la méthode ITC.

Malgré cela, si l'on se fie uniquement à l'espèce dominante de la méthode ITC, on pourrait considérer qu'il y a une correspondance de plus de 66 % entre la méthode ITC et la carte écoforestière quant aux peuplements désignés Er.

Dans les peuplements désignés Bj correspondant à des zones où les feuillus constituent plus de 75 % de la surface terrière et le bouleau jaune plus de 50 % des feuillus, 79 % de ces polygones furent classifiés Bj selon l'espèce dominante ITC (BJ), 12 % Bb, 6 % Er et 3 % SaB (tableau 8). Quant aux polygones comprenant principalement du bouleau jaune, le recouvrement moyen fut de 51 % ($\sigma=6$) des feuillus.

Dans les peuplements désignés ErBj correspondant à des zones où les feuillus constituent plus de 75 % de la surface terrière, l'érable 33 à 66 % des feuillus et le bouleau jaune 33 à 50 % des feuillus, les résultats de la méthode ITC indiquent que seulement 32 % de ces polygones seraient reconnus ErBj. Par contre, 47 % seraient des BjEr, l'autre groupe principal étant des BjBb à 19 % (tableau 8). À elles seules, les combinaisons de ErBj et de BjEr, représentent 79 % des cas. On peut s'imaginer qu'il ne faudrait pas beaucoup de confusion au niveau spectrale pour brouiller le peu de distinction entre les ErBj et les BjEr.

Lorsque les ER dominent les polygones, le recouvrement moyen

Tableau 8. Comparaison avec l'inventaire forestier traditionnel du secteur de L'Annonciation

Appellation	Nbre de polygones	TYPE FORESTIER		GROUPEMENT FORESTIER		Résultats de la méthode ITC ^b				
		Norme écoforestière	ITC ^a	Norme écoforestière	ITC ^a					
Feuillus	Er	148	feuillus > 75 % du peuplement	87 % (8)	Er > 66 % des feuillus	57 % (12)	Er 66 %	Bj 34 %		
Feuillus	Bj	34	feuillus > 75 % du peuplement	78 % (15)	Bj > 50 % des feuillus	51 % (6)	Bj 79 %	Bb 12 %		
Feuillus	ErBj	183	feuillus > 75 % du peuplement	84 % (10)	Er 33-66 % des feuillus	53 % (11)	ErBj 32 %	BjEr 47 %	BjBb 19 %	
					Bj 33-50 % des feuillus	49 % (21)				
Résineux	EE	33	résineux > 75 % du peuplement	85 % (9)	E > 75 % des résineux	53 % (12)	EE 88 %			
Résineux	SS	10	résineux > 75 % du peuplement	76 % (10)	S > 75 % des résineux	61 % (7)	SaB 50 %	Pb 20 %	THO 20 %	
Résineux	ES	13	résineux > 75 % du peuplement	81 % (9)	E 50-74 % des résineux	50 % (8)	ESaB 23 %	EPb 38 %	SaBE 15 %	
					S 2 ^e essence	16 % (9)				
Mélange (F)	Bj+R	106	feuillus 50-74 % du peuplement	62 % (16)	Bj > 50 % des feuillus	49 % (5)	BjSaB 8 %	BjBb 37 %	BbBj 15 %	BjEr 13 %
					Bj > 51-74 % du peuplement	33 % (6)				
					R 26-49 %	27 % (14)				
Mélange (F)	Bj-R	34	feuillus 50-74 % du peuplement	59 % (19)	Bj > 50 % des feuillus	51 % (6)	BjSaB 12 %	BjBb 47 %	BjEr 15 %	
					Bj > 26-50 % du peuplement	33 % (7)				
					R 26-49 %	27 % (14)				
Mélange (F)	Bb1S	32	feuillus 50-74 % du peuplement	49 % (20)	Bb 51-75 % des feuillus	49 % (9)	Bs1S 38 %	BsEr 22 %	BsPeu 19 %	
					SaB+E > 50 % R	52 % (11)				

- Bonne correspondance du type forestier
- Bonne correspondance du groupement forestier
- Correspondance limite

^a La valeur entre parenthèses indique la variance.

^b Pourcentage des polygones de l'inventaire traditionnel où cette espèce est dominante lors de la classification ITC. Seuls figurent les résultats supérieurs à 10 % des essences autres que celles visées. Ainsi, certaines discussions des résultats font occasionnellement référence à des pourcentages plus précis.

des ER sur les feuillus est de 53 % ($\sigma=11$). Le recouvrement moyen des feuillus par peuplement se situe à 84 % ($\sigma=10$).

Dans les peuplements désignés EE correspondant à des zones où les résineux constituent plus de 75 % de la surface terrière et l'épinette plus de 75 % des résineux, l'épinette fut identifiée comme étant la 1^{re} essence dans 88 % des cas par la méthode ITC. Par contre, la part des résineux attribuée à l'épinette n'est en moyenne que de 53 % ($\sigma=12$), alors qu'elle devrait être supérieure à 75 %. Ceci est probablement attribuable à la différence entre une estimation basée sur la surface terrière et une basée sur le recouvrement, l'épinette étant l'essence ayant généralement la plus petite cime parmi les résineux, surtout l'épinette noire.

Dans les peuplements désignés SS correspondant à des zones où les résineux constituent plus de 75 % de la surface terrière et le sapin plus de 75 % des résineux, la méthode ITC démontre le sapin comme la 1^{re} essence dans seulement 50 % des polygones (tableau 8), et la part des résineux attribuée au sapin n'est en moyenne que de 61 % ($\sigma=7$). Dans l'autre 50 % des cas, la 1^{re} essence est le pin blanc (20 %), le thuya (20 %) et l'épinette (10 %). Par contre dans ces cas, le sapin est la 2^e essence avec 80 % la plupart du temps. Il y a peut-être une surestimation du pin blanc et du thuya, car ceux-ci ont souvent des signatures spectrales très larges.

Dans les peuplements désignés ES correspondant à des zones où les résineux constituent plus de 75 % de la surface terrière et l'épinette 50 à 74 % des résineux, avec le sapin comme 2^e essence, la méthode ITC détermine l'épinette comme 1^{re} essence dans 61 % (23 + 38 %) des cas, le sapin dominant dans les autres cas (15 %). Dans les polygones où domine l'épinette, dans un tiers seulement (23/61) le sapin est la 2^e espèce, la majorité ayant du pin blanc (62 % [38/61]) et quelques autres du Thuya (10 %). Le pin blanc et le thuya, avec leurs très larges signatures spectrales, semblent encore surreprésentés. De plus, l'épinette blanche et le sapin bien éclairé sont souvent classifiés comme des pins blancs (Gougeon et autres 2001).

Dans les peuplements mélangés, du genre Bj+R, où les feuillus doivent correspondre à de 50 à 74 % de la surface terrière et le bouleau jaune à plus de la moitié des feuillus et à de 51 à 74 % du peuplement, alors que les résineux font de 26 à 49 % du peuplement, la méthode ITC détermine le BJ comme 1^{re} essence dans 65 % des cas, suivi du BOP dans 26 % des cas. Dans la majorité des cas, la 2^e espèce est un autre feuillu, ce qui concrétise leur dominance du peuplement. Le recouvrement moyen des feuillus par peuplement est de 62 % ($\sigma=16$). Quant à l'apport des résineux, il nous faut donc regarder la 2^e, la 3^e ou la 4^e espèce, selon la situation. De cette manière, l'on retrouve du bouleau (BJ ou BOP) accompagné de résineux dans 83 polygones forestiers, soit dans 84 % des cas.

Dans les peuplements mélangés, du genre Bj-R, où les feuillus doivent correspondre à de 50 à 74 % de la surface terrière et le bouleau jaune à plus de la moitié des feuillus et à de 26 à 50 % du peuplement, alors que les résineux font de 26 à 49 % du peuplement, la méthode ITC démontre le BJ comme 1^{re} essence

dans 85 % des cas, suivi des ER dans 6 % des cas. Dans la majorité des cas, la 2^e espèce est encore un autre feuillu. Quant à l'apport des résineux, il nous faut donc regarder la 2^e, la 3^e ou la 4^e espèce, selon la situation. De cette manière, l'on retrouve du bouleau (BJ ou BOP) accompagné de résineux dans 28 polygones, soit dans 82 % des cas.

Dans les peuplements mélangés, du genre Bb1S, où les feuillus doivent correspondre à de 50 à 74 % de la surface terrière, le bouleau blanc à de 51 à 75 % des feuillus et l'épinette ou le sapin à plus de la moitié des résineux, la méthode ITC détermine le bouleau blanc comme 1^{re} essence dans 49 % des cas. Mais même après un regroupement des deux types de bouleau comme Bs (dans 79 % des cas) et une combinaison du sapin et de l'épinette sous la nomenclature 1S, la combinaison Bb1S n'est obtenue que dans 38 % des cas.

Secteur de Lachute

Dans les peuplements désignés Er du secteur de Lachute correspondant à des zones où les feuillus constituent plus de 75 % de la surface terrière et l'érable plus de 66 % des feuillus, 96 % de ces polygones furent classifiés Er à l'aide de la méthode ITC (tableau 9). Ce pourcentage élevé semble indiquer une excellente discrimination des érables au moyen de la méthode ITC. Par contre, le recouvrement moyen des ER sur les feuillus est un peu bas, soit à 60 % ($\sigma=11$). Il y a donc un peu de confusion spectrale avec les autres feuillus.

Dans les peuplements désignés Eo correspondant à des zones où les feuillus constituent plus de 75 % de la surface terrière et l'érable rouge plus de 50 % des feuillus, 86 % de ces polygones furent reconnus Er, selon l'espèce de l'ITC prédominante (ER). Le groupement Eo fut comparé avec l'essence Er, car au moment de notre analyse, tous les érables furent confondus en une seule classe en raison des difficultés de discrimination spectrale qu'ils présentaient. Ce haut pourcentage indique une excellente discrimination des érables à l'aide de la méthode ITC, mais il est difficile de différencier l'érable rouge de l'érable à sucre avec ces données QuickBird.

Dans les peuplements désignés ErFt correspondant à des zones où les feuillus constituent plus de 75 % de la surface terrière, l'érable 33 à 66 % des feuillus et les feuillus tolérants 33 à 50 % des feuillus, 62 % de ces polygones furent classifiés ErFt à l'aide de la méthode ITC. De plus, 17 % des polygones furent classifiés ErFi et 7 % FtEr. Le recouvrement moyen de l'érable lorsqu'il domine est de 57 % ($\sigma=9$) des feuillus et les autres feuillus tolérants (Ft) de 32 % ($\sigma=8$) des feuillus. Il y donc une bonne discrimination du groupement ErFt avec la méthode ITC.

Dans les peuplements désignés EoR correspondant à des zones où les feuillus constituent de 50 à 74 % de la surface terrière, l'érable rouge plus de 50 % des feuillus et les résineux de 26 à 49 % du peuplement, 67 % des polygones sont dominés par l'érable (tableau 9). Pour ceux-ci, le recouvrement moyen des ER sur les feuillus est de 59 % ($\sigma=13$) et les résineux occupent 34 % ($\sigma=17$) du peuplement.

Dans la majorité des cas, la 2^e espèce est un autre feuillu, ce qui concrétise leur dominance du peuplement. Quant à l'apport des résineux, il nous faut regarder la 2^e, la 3^e ou la 4^e espèce, selon la situation. De cette manière, l'on retrouve des érables accompagnés de résineux dans 85 polygones, soit dans 55 % des cas.

Dans les peuplements désignés REo correspondant à des zones où les résineux constituent de 50 à 74 % de la surface terrière et l'érable rouge plus de 50 % des feuillus, le fait de regarder la liste des essences principales, et même secondaires, donne peu d'information. Il faut d'abord regrouper les résineux sous l'appellation R, puis considérer les feuillus. Cela fait, l'on constate que 50 % des polygones seraient classifiés RFi, 16 % REr, et 7 % RFt, ce qui indique de la confusion spectrale entre les ER et les FI. Par contre, la dominance des résineux est bien déterminée dans 73 % des polygones.

Le recouvrement moyen des résineux par peuplement est de 51 % ($\sigma=16$), à peine plus élevé que le recouvrement moyen des feuillus, soit de 46 % ($\sigma=16$), mais il faut considérer l'aspect surface terrière par rapport au recouvrement des cimes.

Dans les peuplements désignés FtR correspondant à des zones où les feuillus constituent de 50 à 74 % de la surface terrière, les feuillus tolérants constituent plus de 50 % des feuillus et les résineux de 26 à 49 % de la surface terrière, le fait de regarder la liste des essences principales, et même secondaires, donne encore peu d'information. Il faut d'abord faire des regroupements. Puisque la désignation Ft comprend l'essence ER, l'érable fut donc combiné aux feuillus tolérants sous la bannière Ft, et tous les résineux furent regroupés sous l'appellation R, ce qui apporte de nouvelles combinaisons, absentes du tableau 9.

Malgré tout, la combinaison FtR n'apparaît que dans 24 % des cas et c'est la combinaison FtFi qui domine (59 % des cas). Par contre, cette combinaison est accompagnée de résineux dans 100 % des cas, ce qui indique tout simplement qu'il existe une bonne confusion entre les classes de feuillus tolérants et intolérants.

Dans les peuplements désignés PbPb correspondant à des zones où les résineux constituent plus de 75 % de la surface terrière et le pin blanc plus de 75 % de ces résineux, seulement 50 % de ces polygones furent classifiés Pb au moyen de la méthode

Tableau 9. Comparaison avec l'inventaire forestier traditionnel du secteur de Lachute

Type forestier	Appellation	N ^{bre} de polygones	TYPE FORESTIER		GROUPEMENT FORESTIER		Résultats de la méthode ITC ^b			
			Norme écoforestière	ITC ^a	Norme écoforestière	ITC ^a				
Feuillus	Er	94	feuillus > 75 % du peuplement	80 % (11)	Er > 66 % des feuillus	60 % (11)	Er 96 %			
Feuillus	Eo	104	feuillus > 75 % du peuplement	76 % (16)	Eo > 50 % des feuillus	58 % (12)	Er 86 %			
Feuillus	ErFt	116	feuillus > 75 % du peuplement	80 % (11)	Er 33-66 % des feuillus	57 % (9)	ErFt 62 %	ErFi 17 %	FtEr 7 %	
					Ft 33 - 5 % des feuillus	32 % (8)				
Mélange (F)	EoR	154	feuillus 50-74 % du peuplement	63 % (17)	Eo > 50 % des feuillus	59 % (13)	ErPu 8 %	ErFt 33 %	ErFi 26 %	FiEr 17 %
					R 26-49 % du peuplement	34 % (17)				
Mélange (R)	REo	68	résineux 50-74 % du peuplement	51 % (16)	Eo > 50 % des feuillus	59 % (15)	SaBP 13 %	PbFi 10 %	FiEr 10 %	
Mélange (F)	FtR	34	feuillus 50-74 % du peuplement	62 % (15)	Ft > 50 % des feuillus	51 % (16)	ErPu 21 %	ErFt 21 %	FiEr 18 %	ErFi 12 %
					R 26-49 % du peuplement	35 % (14)				
Résineux	PbPb	18	résineux > 75 % du peuplement	79 % (11)	Pb > 75 % des résineux	58 % (8)	Pb 50 %	SaB 39 %		

- Bonne correspondance du type forestier
- Bonne correspondance du groupement forestier
- Correspondance limite

^a La valeur entre parenthèses indique la variance

^b Pourcentage des polygones de l'inventaire traditionnel où cette espèce est dominante lors de la classification ITC. Seuls figurent les résultats supérieurs à 10 % des essences autres que celles visées. Ainsi, certaines discussions des résultats font occasionnellement référence à des pourcentages plus précis.

ITC et, dans ces polygones, le PIB ne constitue que 58 % ($\sigma=8$) des résineux. Dans 39 % des cas, les SAB dominent dans ces polygones. Mais lorsque le SAB est la 1^{re} essence, dans 86 % des cas, il est accompagné de PIB. D'ailleurs, lorsque le PIB est la 1^{re} essence, dans 100% des cas, il est accompagné de SAB. Ici, il semble être difficile de séparer le pin blanc du sapin au moyen de l'analyse ITC.

Réflexion

a) Matrices de confusion

L'emploi des matrices de confusion est la manière traditionnelle de juger de la précision ou de l'exactitude en télédétection. Ici, nous parlons surtout de « précision », en réservant le terme « exactitude » pour les comparaisons au sol. Cette précision de classification est quantifiée en utilisant des zones jugées pures par un interprète, c'est-à-dire ne comprenant essentiellement qu'une seule espèce. Une classification avec des résultats de l'ordre de 70 à 75 % pour huit classes, est typiquement jugée très bonne. Nos matrices présentent donc de bons résultats et la confusion entre les espèces ne semble pas indiquer de problème majeur (tableaux 4 et 5).

b) Vérification par virées à placettes du ministère

Les résultats obtenus avec les virées des placettes du ministère sont plus mitigés. Par exemple, dans les peuplements les plus homogènes du secteur de L'Annonciation l'exactitude est supérieure à 70 %, alors qu'elle l'est beaucoup moins dans les autres. Certaines espèces vues au sol, comme le pin blanc ou le thuya, ne semblent même pas se trouver dans le processus de classification (tableau 6).

Dans le secteur de Lachute, les résultats sont mieux répartis (tableau 7), le pin blanc et le thuya ayant un pourcentage de détection similaire aux autres essences, mais la reconnaissance des espèces semble plutôt faible.

Il est possible, et même probable, que ce phénomène soit dû à trois facteurs qui se recoupent : a) l'emploi des placettes d'un rayon de 5,64 m présente un potentiel d'erreurs de positionnement substantiel; b) ces petites placettes ne contiennent typiquement qu'une dizaine d'arbres et seulement 4 à 5 cimes individuelles; c) toutes les tiges de plus de 7 m sont énumérées, sans égard à leur visibilité du haut des airs (p. ex., dans l'image satellite).

Par ailleurs, dans le Rapport de la Commission Coulombe (Bibliothèque nationale du Québec 2004), l'on signale que les placettes traditionnelles ne sont pas très utiles pour vérifier la composition des peuplements d'un inventaire. Elles sont surtout utiles au niveau du calcul du volume fait par stratification.

c) Vérification par blocs de placettes

Le but de la vérification par blocs de 70 m x 70 m, en ne considérant que les arbres potentiellement visibles du haut des airs, était d'éviter

les embûches liées à l'approche b (ci-dessus). L'on constate que l'érable semble être sous-estimé dans le secteur de L'Annonciation, qu'il soit l'essence principale ou secondaire, alors que dans le secteur de Lachute, il est surestimé comme espèce principale et sous-estimé comme espèce secondaire. Le bouleau jaune de l'ITC dans L'Annonciation est près de la marque comme espèce principale, mais surévalué comme espèce secondaire. Il est à noter que ces surestimations et sous-estimations sont de l'ordre de 20 %.

Par contre, l'on constate aussi qu'à quelques occasions, que ce soient les dénombrements par cimes individuelles (ITC) ou ceux au sol, certains blocs ne semblent même pas présenter le pourcentage pouvant justifier la désignation officielle du peuplement dans lequel ils sont situés. Cela pourrait indiquer que même des blocs de 70 m x 70 m ne sont pas assez représentatifs.

d) Vérification par virées

Un troisième effort de vérification au sol des classifications ITC, fut entrepris en faisant de longues virées (transects) où la composition en espèces est notée à plusieurs points d'arrêt le long de ces virées. Dans cet exercice, les virées furent établies dans des secteurs présentant des tendances marquées dans les résultats de l'ITC plutôt que dans l'inventaire du ministère.

Les résultats présentés graphiquement (CSRE-Forêt et CLC-Camint, 2003), ne permettent d'analyser que les différences d'une manière « qualitative », et ce, toujours en espérant que les points d'observation se retrouvent plus ou moins au même endroit au sol et dans l'image, ce qui est probablement plus ou moins le cas. Pour chaque virée, quelques constatations furent établies par rapport à la sous-estimation ou la surestimation de certaines espèces, mais ce ne sont que des constatations très locales. Certaines caractéristiques plus globales émergent, comme la surestimation du pin blanc et du thuya au dépend de l'épinette, la surestimation du bouleau blanc au dépend du bouleau jaune, et du bouleau jaune au dépend de l'érable.

Bien que ces constatations puissent potentiellement nous guider au moment de produire une nouvelle classification avec la méthode ITC, elles ne furent pas utiles pour quantifier l'exactitude d'une telle classification. Dans le cadre d'une autre étude (Leckie et autres 2003b), des virées furent utilisées pour quantifier l'exactitude de la classification, en notant l'espèce de tous les arbres à une distance de un mètre à droite et à gauche de la ligne de virée de manière continue, puis en comparant la composition en espèces ainsi obtenue avec celle obtenue avec la méthode ITC pour le peuplement dans lequel elle se trouvait. L'on constate que la présence de l'espèce principale d'un tel peuplement est à 10 % près du décompte au sol et que les espèces secondaires représentant plus de 25 % du peuplement sont à 15 % près. Mais, c'étaient des peuplements beaucoup plus simples, originalement des plantations équiennes.

e) Comparaison avec l'inventaire forestier traditionnel

Si, en se donnant un peu de latitude, l'on résume à leur plus simple expression la comparaison des résultats de la méthode ITC avec l'inventaire forestier traditionnel pour le secteur de L'Annonciation, les peuplements désignés Er, Bj, ErBj, EE, SS, ES, Bj+R, Bj-R, et

Bb1S sont reconnus à 66, 79, 79, 88, 50, 69, 65, 85, et 68 %, respectivement, basé essentiellement sur les espèces dominantes établies avec la classification ITC (tableau 8).

Dans le secteur de Lachute (tableau 9), cette comparaison donne de bons résultats et d'autres plus médiocres. En premier lieu, les peuplements désignés Er, Eo et ErFt sont reconnus à 96, 82 et 62 %, respectivement. Deuxièmement, les peuplements désignés EoR, REo, et FtR, présentent des situations plus complexes à analyser. Dans les peuplements désignés EoR, l'érable domine dans 56 % des polygones, mais des résineux accompagnent l'érable dans seulement 55 % de ces cas. Dans les peuplements désignés REo, la dominance des résineux est bien identifiée dans 73 % des polygones, mais ces polygones seraient classifiés RFi, REr, et RFt, dans 50, 16 et 7 % des cas, respectivement. Dans les peuplements désignés FtR, la combinaison FtR elle-même n'apparaît que dans 24 % des cas. C'est la combinaison FtFi qui domine (59 % de cas), mais cette combinaison est accompagnée de résineux dans 100 % des cas. Ces deux derniers résultats indiquent qu'il existe une confusion substantielle entre la classe des feuillus tolérants, des feuillus intolérants et l'érable.

Enfin, dans les peuplements désignés PbPb, seulement 50 % de ces polygones seraient reconnus Pb avec la méthode ITC, suivi de 39 % en SaB. Mais lorsque les SAB constituent la 1^{re} essence, ils sont accompagnés du pin blanc dans 86 % des cas, et lorsque le PIB est la 1^{re} essence, il est accompagné des SAB dans 100 % des cas. Il existe donc une confusion marquée entre ces deux essences. Cette confusion existait déjà dans les matrices de confusion (tableaux 4 et 5), mais elle ne semblait pas si importante.

Malgré toutes les embûches de ce genre dans les comparaisons, si l'on relit tous les résultats en se donnant ± 10 % pour les erreurs d'interprétation et ± 10 % pour les erreurs de classification avec la méthode ITC ou pour la différence entre les pourcentages en surface terrière par rapport à ceux en recouvrement, la concordance entre l'inventaire traditionnel et l'inventaire à l'arbre près est tout de même assez impressionnante.

En regardant l'ensemble des résultats obtenus pour chacun des peuplements, l'on peut mettre de l'avant les conclusions suivantes :

- Pour les 16 types de peuplements analysés, à l'exception de Bb1S, tous les peuplements expriment le pourcentage défini dans le cadre de la norme écoforestière quant à la définition des types forestiers.
- Au niveau des groupements forestiers, les pourcentages obtenus avec la méthode ITC coïncident généralement très bien avec ceux définis dans la norme écoforestière, quoique les valeurs correspondent davantage aux limites inférieures des classes. Cette situation vient sans doute du fait qu'au moment de la délimitation des cimes au moyen de l'ITC, les interstices entre les cimes constituent des superficies non classées qui sont exclues des calculs de recouvrement. L'on peut donc envisager que le fait de considérer ces superficies augmenterait le pourcentage de recouvrement de chaque espèce, ce qui les rapprocherait davantage des valeurs centrales de chaque classe.
- Au niveau du groupement des essences, la correspondance est bonne pour les peuplements des feuillus et des résineux constitués d'une seule essence, comme les classes Er, Eo, Bj,

et EE, ainsi que pour quelques peuplements composés de plus de une essence, comme les ErBj et les ErFt. De façon générale, la coïncidence s'est avérée moindre pour les peuplements mélangés de feuillus et mélangés de résineux, comme les classes Bj+R, Bj-R, Bb1S, FtR, EoR, et REo. Comme déjà mentionné, la plus faible correspondance observée dans les peuplements mélangés de résineux et mélangés de feuillus, s'explique en partie par le paramètre de mesure utilisé. En effet, dans l'évaluation de la surface terrière des résineux, le photo-interprète applique un facteur correctif permettant d'estimer la surface terrière des résineux à partir de la cime, alors que l'importance du résineux avec la méthode ITC ne tient compte que de la superficie des cimes.

- L'analyse des différents groupements d'essences a également mis en évidence la présence de confusion spectrale entre certaines essences, notamment le BOP et le BJ, du moins avec les images QuickBird utilisées. De plus, des essais regroupant le BOP et le BJ démontrent des résultats plus près de ceux de la carte écoforestière. Aussi, au niveau des résineux, l'on a pu constater la surestimation généralisée du PIB.
- L'absence d'une coïncidence parfaite entre la méthode ITC et la carte écoforestière s'explique en partie par la confusion spectrale entre certaines essences dans certains cas particuliers. Le cas des essences ER et BJ des peuplements Er, Bj et ErBj illustre bien ce propos. Les peuplements Er mettent en lumière une certaine confusion entre les cimes classifiées ER et celles BJ, alors que les peuplements Bj n'en démontrent aucune. Il y a donc une surestimation du BJ au dépend de l'érable, ce que l'on perçoit aussi dans les peuplements ErBj qui sont plus souvent classifiés BjEr que ErBj.
- Toutefois, la cause des différences observées ne saurait être que spectrale et il semble que le paramètre de mesure utilisé joue également un rôle. En effet, à maintes reprises, dans les peuplements mélangés de résineux et mélangés de feuillus, les résineux se retrouvent aux 3^e et 4^e rang au lieu du 1^{er} ou 2^e rang. Or, puisque le rang de l'ITC est fonction du pourcentage de recouvrement des cimes et que celui-ci, en comparaison avec la mesure de la surface terrière, sous-estime l'importance des résineux, ceci pourrait expliquer la différence la plus importante observée entre la méthode ITC et la carte écoforestière en ce qui concerne les groupements mélangés.

Conclusion

Dans cet article, nous résumons l'un des principaux aspects d'un projet pilote sur la forêt québécoise (CSRE-Forêt et CLC-Camint, 2003) : l'examen des résultats d'une technique d'inventaire semi-automatique dite à l'arbre près (c.-à-d. la méthode ITC). Cet examen, essentiellement concentré sur la reconnaissance des espèces, fut réalisé de plusieurs manières. Premièrement, en utilisant des aires de vérification à même les images, puis, par plusieurs types d'échantillonnage au sol, mais surtout, en comparant des compositions en espèces au niveau des polygones forestiers avec l'inventaire conventionnel du Québec de l'époque.

Des images QuickBird furent acquises pour deux régions des Laurentides. Après des étapes de prétraitement, les cimes d'arbres furent délinéées sur les images panchromatiques et classifiées par

essence à l'aide d'images multispectrales. Les matrices de confusion indiquent une bonne classification des espèces. En effet, la précision obtenue pour chacune des classes de végétation oscille entre 60 et 90 % dans le secteur de L'Annonciation et entre 74 à 89 % dans celui de Lachute.

Cette étude démontre aussi qu'il peut être difficile de vérifier l'exactitude des classifications de l'ITC en les comparant avec des données au sol. Des vérifications par placettes, par virées et même par blocs importants (70 m x 70 m), peuvent facilement devenir des pseudo-vérifications à l'arbre près, et deviennent donc intimement reliées à une très bonne position géographique. De plus, pour une bonne comparaison, il faut considérer seulement les arbres jugés visibles à partir d'un satellite. Il n'y a donc pas de résultats concluants par rapport aux placettes, aux blocs et aux virées au sol, sinon que de telles comparaisons sont extrêmement difficiles. Pour des besoins de recherche, nous pouvons faire, avec beaucoup de soins, des vérifications à l'arbre près (Leckie et autres 2005), mais cela n'est pas pratique pour de grands territoires.

Les arbres furent aussi regroupés selon les polygones des peuplements forestiers de l'inventaire conventionnel existant, en vue de faire une comparaison de la composition en espèces. Dans le secteur de L'Annonciation, les peuplements désignés Er, Bj, ErBj, EE, SS, ES, Bj+R, Bj-R, et Bb1S furent reconnus à 66, 79, 79, 88, 50, 69, 65, 85 et 68 % respectivement. Dans le secteur de Lachute, les peuplements désignés Er, Eo et ErFt, furent reconnus à 96, 86 et 62 % respectivement. D'autres résultats sont plus médiocres. Par exemple, il existe aussi une confusion substantielle entre les classes PIB et SAB et, généralement, une surestimation du PIB. Peut-être que l'introduction de paramètres, comme la grosseur ou la forme des cimes, permettrait une meilleure distinction dans le futur.

Avec la méthode ITC, l'information forestière au niveau des peuplements a des chances d'être aussi (sinon plus) représentative de la réalité que la méthode conventionnelle (Potvin et autres 1999; Pinto et autres 2007), et l'on disposerait d'information sur la dispersion géographique de chaque espèce à l'intérieur

de chaque peuplement. Plutôt que d'interpréter des forêts entières, les photo-interprètes n'auraient qu'à identifier des aires d'échantillonnage pour chaque espèce (et possiblement aussi, quelques situations spécifiques pour certaines espèces), pour entraîner le processus de classification, d'autres pour vérifier les résultats, avec un processus de rétroaction pour s'assurer de la qualité du produit.

Malgré sa désignation d'inventaire à l'arbre près, nous sommes encore assez loin de cette réalité. Quel que soit la résolution spatiale, il existera toujours des îlots d'arbres difficiles à séparer. De plus, ce ne sera toujours qu'un inventaire d'arbres visibles du haut des airs (surtout les arbres dominants et codominants). Notre constat au fil des ans étant que, bien qu'ayant une certaine importance, le type de capteur (aérien ou satellite), sa résolution spatiale (si assez proche de 50 cm/pixel) et le processus de classification (maximum de vraisemblance vs réseaux de neurones), ont assez peu d'importance par rapport à la quantité d'espèces ou d'espèces en situations particulières à reconnaître (c.-à-d., le nombre de classes).

Les techniques dites à l'arbre près étant encore beaucoup du domaine de la recherche (Leckie et autres 2016a à c), il existe peu de travaux de grande envergure (Chubey et autres 2009), nos plus récents analysant 18 espèces dans un site Ontarien de 228 km² à partir d'images multispectrales aériennes de 40 cm/pixel (Leckie et autres 2017). Ils donneront lieu à d'autres comparaisons de composition en espèces avec l'inventaire traditionnel, mais par tranches de 10 %. De plus, l'ajout d'information provenant de données LiDAR ou de stéréo-corrélations automatisées produisant des modèles de la hauteur de la canopée (White et autres 2013), permettra des évaluations du volume forestier au niveau des peuplements, en utilisant des valeurs moyennes pour chaque espèce. Dans un futur rapproché, le calcul de la possibilité forestière par arbre (volume, biomasse, carbone), pourrait nous donner une information beaucoup plus précise que tous les systèmes actuels (Bernier et autres 2010). À plus long terme, l'information à l'arbre près pourra peut-être nous permettre de laisser complètement tomber le concept du peuplement forestier et gérer la ressource à l'arbre près.

Références bibliographiques

- BÉRARD, J. (ed.) (1996). « Manuel de foresterie », Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Les Presses de l'Université Laval. Sainte-Foy, (QC) Canada.
- BERNIER P.Y., G. DAIGLE, L.-P. RIVEST, C.-H. UNG, F. LABBÉ, C. BERGERON et A. PATRY (2010). « From plots to landscape: A k-NN-based method for estimating stand-level merchantable volume in the Province of Québec », *Forestry Chronicle*, vol. 86, n° 4, juillet, p. 461-468.
- BIBLIOTHÈQUE NATIONALE DU QUÉBEC « Rapport de la Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise », Québec, 2004, 307 p.
- BRANDTBERG, T. et F. WALTER (1998). « Automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images by multiple-scale analysis », *MachineVision and Applications*, vol. 11, n° 2, octobre, p. 64-73.
- CHUBEY, M., K. STEHLE, R. ALBRICHT, F. GOUGEON, D. LECKIE, S. GRAY, M. WOODS, et P. COURVILLE (2009). « Semi-Automated Species Classification in Ontario Great Lakes – St. Lawrence Forest Conditions », Rapport final : Great Lakes-St. Lawrence ITC Project (2005-2008). Ministère des richesses naturelles et des Forêts, janvier 71 p.
- CSRE-FORÊT et CLC-CAMINT, 2003. Rapport Final - L'imagerie satellitaire à haute résolution : nouvel outil d'aménagement. CLC-Camint, Hull, mai 2003, 134 p.
- CULVENOR, D.S. (2002). « TIDA: an algorithm for delineation of tree crowns in high spatial resolution remotely sensed imagery », *Computers & Geoscience*, vol. 28, n° 1, février, p. 34-44.
- DRALLE, K. et M. RUDEMO (1997). « Automatic Estimation of Individual Tree Positions from Aerial Photos », *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 27, n° 11, novembre, p. 1728-1736.
- ERIKSON, M. (2003). « Segmentation of individual tree crowns in colour aerial photographs using region growing supported by fuzzy rules », *Revue canadienne de recherche forestière*, vol. 33, n° 8, août, p. 1557-1563.
- GOUGEON, F.A. (1995a). « Comparison of possible multispectral classification schemes for tree crowns individually delineated on high spatial resolution MEIS Images », *Journal canadien de télédétection*, vol. 21, n° 1, p. 1-9.
- GOUGEON, F.A. (1995b). « A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images », *Journal canadien de télédétection*, vol. 21, n° 3, p. 274-284.
- GOUGEON, F.A. (2008). « Les images aériennes de haute résolution spatiale pour l'inventaire forestier semi-automatique », dans 13^e Congrès de l'Association québécoise de télédétection, Trois-Rivières (QC), du 30 avril au 1^{er} mai.
- GOUGEON, F.A. (2009). « The Individual Tree Crown (ITC) Approach to Forest Inventories: Satellite and Aerial Sensor Considerations », dans International Union of Forest Research Organisations (IUFRO) Div. 4, conférence Extending Forest Inventory and Monitoring, Québec (QC), du 19 au 22 mai.
- GOUGEON, F.A. (2010) « The ITC Suite Manual: A Semi-Automatic Individual Tree Crown (ITC) Approach to Forest Inventories », Centre de foresterie du Pacifique, Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada, Victoria (C.-B.), juin, 92 p.
- GOUGEON, F.A. et D. LECKIE (1999). « Forest regeneration: individual tree crown detection techniques for density and stocking assessment », p. 169-177, dans Hill, D.A. et Leckie, D.G. éditeurs, compte rendu du forum international Automated Interpretation of High Spatial Resolution Digital Imagery for Forestry. Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada, Victoria (C.-B.), du 10 au 12 février 1998.
- GOUGEON, F.A. et D.G. LECKIE (2003). « Extraction d'information forestière à partir d'images à haute résolution spatiale en utilisant une méthode de reconnaissance individuelle des cimes d'arbres », Rapport d'information BC-X-396-F, Centre de foresterie du Pacifique, Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada, Victoria (C.-B.), 26 p.
- GOUGEON, F.A. et D.G. LECKIE (2006). « The Individual Tree Crown Approach Applied to IKONOS Images of a Coniferous Plantation Area », *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol 72, n° 11, novembre, p. 1287-1297.
- GOUGEON, F.A. et D.G. LECKIE (2011). « ITC Analyses of the Petawawa Research Forest from Satellite and Aerial Data », dans 32^e Symposium canadien de télédétection, 14^e Congrès de l'Association québécoise de télédétection, Sherbrooke (QC), du 13 au 16 juin.
- GOUGEON, F.A. et T. MOORE (1989). « Classification individuelle des arbres à partir d'images à haute résolution spatiale », p. 185-196 dans Bernier, M., et autres. éditeurs, *Télédétection et gestion des ressources*, vol. VI, compte rendu du 6^e congrès de l'Association québécoise de télédétection, Sherbrooke (QC), du 4 au 6 mai 1988.
- GOUGEON, F., P. LABRECQUE, M. GUÉRIN, A. LECKIE et A. DAWSON (2001). « Détection du pin blanc dans l'Outaouais à partir d'images satellitaires à haute résolution IKONOS », dans compte rendu du 23^e Symposium canadien de télédétection, 10^e Congrès de l'Association québécoise de télédétection, Sainte-Foy (QC), du 21 au 24 août.
- GOUGEON, F., R. CORMIER, P. LABRECQUE, P., B. COLE, D. PITT et D. LECKIE (2003). « Individual Tree Crown (ITC) Delineation on Ikonos and QuickBird Imagery: the Cockburn Island Study », dans compte rendu du 25^e Symposium canadien de télédétection, 11^e Congrès de l'Association québécoise de télédétection, Montréal (QC), du 14 au 17 octobre.
- HYYPÄ, J., H. HYYPÄ, D. LECKIE, F. GOUGEON, X. YU et M. MALTAMO (2008). « Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, n° 5, mars, p. 1339-1366.
- KAARTINEN H., J. HYYPÄ, X. YU, M. VASTARANTA, H. HYYPÄ, A. KUKKO, M. HOLOPAINEN, C. HEIPKE, M. HIRSCHMUGL, F. MORSODORF, E. NÆSSET, J. PITKÄNEN, S. POPESCU, S. SOLBERG, B. M. WOLF et J.-C. WU (2012). « An International Comparison of Individual Tree Detection and Extraction Using Airborne Laser Scanning » *Remote Sensing*, vol. 4, n° 4, mars, p. 950-974.
- KE Y. et L. J. QUACKENBUSH. (2011). « A review of methods for automatic individual tree-crown detection and delineation from passive remote sensing », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 32, n° 17, juillet, p. 4725-4747.
- LABRECQUE, P., F. GOUGEON et M. GUÉRIN (2001). « Application d'une méthode d'identification géospatiale du pin blanc à partir d'images satellitaires à haute résolution IKONOS », Rapport final – Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier, volet 1, CLC-Camint, Gatineau (QC), avril, 34 p.
- LABRECQUE, P., F. GOUGEON, M. GUÉRIN, et J.-F. MOUTON (2002). « Vers une meilleure connaissance forestière grâce aux images satellitaires à haute résolution IKONOS », Phase II, Rapport final – Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier, volet 1, CLC-Camint, Gatineau (QC), avril, 88 p.
- LARSEN, M. et M. RUDEMO (1998). « Optimizing templates for finding trees in aerial Photographs », *Pattern Recognition Letters*, vol. 19, n° 12, octobre, p. 1153-1162.
- LARSEN, M., M. ERIKSSON, X. DESCOMBES, G. PERRIN, T. BRANDTBERG et F.A. GOUGEON (2011). « Comparison of six individual tree crown detection algorithms evaluated under varying forest conditions », *International Journal of Remote Sensing*, vol 32, n° 20, p. 5827-5852.
- LECKIE, D.G., F.A. GOUGEON, D. HILL, R. QUINN, L. ARMSTRONG et R. SHREENAN (2003b). « Combined high density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis », *Journal canadien de télédétection*, vol 29, n° 5, p. 633-649.

- LECKIE, D.G., F. GOUGEON, R. MCQUEEN, K. ODDLEIFSON, N. HUGHES, N. WALSWORTH et S. GRAY (2017) « Production of a Large-Area Individual Tree Species Map for Forest Inventory in a Complex Forest Setting and Lessons Learned », *Journal canadien de télédétection*, vol. 43, n° 2, janvier.
- LECKIE, D.G., S. TINIS, T. NELSON, C. N. BURNET, F. A. GOUGEON, E. CLONEY et D. PARADINE (2005). « Issues in Species Classification of Trees in Old Growth Conifer Stands », *Journal canadien de télédétection*, vol. 31, n° 2, p. 175-190.
- LECKIE, D.G., N. WALSWORTH, et F. GOUGEON (2016a). « Recognition and Possible Remediation of Automated Tree Delineations with Multiple Isolations per Tree (Split Cases) on High Resolution Imagery », *Journal canadien de télédétection*, vol. 42, n° 6, août, p. 656-679.
- LECKIE, D.G., N. A. WALSWORTH, et F. GOUGEON (2016b). « Identifying Tree Crown Delineation Shapes and Need for Remediation on High Resolution Imagery Using an Evidence Based Approach », *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 114, avril, p. 206-227.
- LECKIE, D.G., N. A. WALSWORTH, F.A. GOUGEON, S. GRAY, D. JOHNSON, L. JOHNSON, K. ODDLEIFSON, D. PLOTSKY et V. ROGERS (2016c). « Automated Individual Tree Isolation on High Resolution Imagery: Possible Methods for Breaking Isolations Involving Multiple Trees », *IEEE Journal Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 9, n° 7, juillet, p. 3229-3248.
- LECKIE, D.G., F.A. GOUGEON, N. WALSWORTH et D. PARADINE (2003). « Stand delineation and composition estimation using semi-automated individual tree crown analysis », *Remote Sensing of the Environment*, vol. 85, n° 3, mai, p. 355-369.
- PINTO F, D ROUILLARD, J-M SOBZE, et M. TER-MILKAEIAN (2007). « Validating tree species composition in forest resource inventory for Nipissing Forest Ontario, Canada », *The Forestry Chronicle*, vol. 83, n° 2, p. 247-251.
- PITT, D. et J. PINEAU (2009). « Forest Inventory Research at the Canadian Wood Fibre Centre: Notes from a research coordination workshop June 3-4 2009, Point Claire, QC », *The Forestry Chronicle*, vol. 85, n° 6, p. 859-869.
- POTVIN F., L. BÉLANGER et K. LOWELL (1999). « Validité de la carte forestière pour décrire les habitats fauniques à l'échelle locale: une étude de cas en Abitibi-Témiscamingue », *The Forestry Chronicle*, vol. 75, n° 5, p. 851-859.
- SAUCIER, J.-P., J.-F. BERGERON, P. GRONDIN et A. ROBITAILLE (2001). « Les régions écologiques du Québec méridional (3^e version) : un des éléments du système hiérarchique de classification écologique du territoire », *Carte à l'échelle du 1 : 1 250 000, ministère des Ressources naturelles du Québec*.
- ST-ONGE, B., F.-A. AUDET, et J. BÉGIN (2015). « Characterizing the Height Structure and Composition of a Boreal Forest Using an Individual Tree Crown Approach Applied to Photogrammetric Point Clouds », *Forests*, vol. 6, n° 11, octobre, p. 3899-3922.
- THOMPSON I. D., S.C. MAHER, D.P. ROUILLARD, J.M. FRYXELL et J.A. BAKER (2007). « Accuracy of forest inventory mapping: Some implications for boreal forest management », *Forest Ecology and Management*, vol. 252, n° 1, novembre, p. 208-221.
- WHITE J.C., M.A. WULDER, M. VASTARANTA, N.C. COOPS, D. PITT et M. WOODS (2013). « The Utility of Image-Based Point Clouds for Forest Inventory: A Comparison with Airborne Laser Scanning », *Forests*, vol. 4, n° 3, juin, p. 518-536.
- WHITE, J.C., N.C. COOPS, M.A. WULDER, M. VASTARANTA, T. HILKER, et P. TOMPALSKI (2016). « Remote Sensing Technologies for Enhancing Forest Inventories : A Review », *Journal canadien de télédétection*, vol. 42, n° 5, p.619-641.
- WULDER M., K.O. NIEMANN, et D.G. GOODENOUGH (2000). « Local maximum filtering for the extraction of tree locations and basal area from high spatial resolution imagery », *Remote Sensing of Environment*, vol. 73, n° 1, juillet, p. 103-114.
- YANG, J., Y. HE, J.P. CASPERSEN et T.A. JONES (2017). « Delineating Individual Tree Crowns in an Uneven-Aged, Mixed Broadleaf Forest Using Multispectral Watershed Segmentation and Multiscale Fitting », *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, n° 4, avril, p. 1390-1401.