

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

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

PAR

SYLVAIN QUESSY

B.A. (GÉOGRAPHIE)

UTILISATION D'UNE IMAGE LANDSAT ET D'UN SYSTÈME D'INFORMATION  
GÉOGRAPHIQUE (SIG) POUR LA DÉTERMINATION DE SITES POTENTIELS À LA  
COUPE D'ÉCLAIRCIE PRÉCOMMERCIALE EN FORÊT BORÉALE

AOÛT 1996



### **Mise en garde/Advice**

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

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

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

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

## RÉSUMÉ

L'évaluation de la densité des jeunes peuplements forestiers de cinq à vingt ans après perturbation est importante pour la planification de divers travaux sylvicoles en forêt comme la coupe d'éclaircie précommerciale et également pour la production des plans d'aménagement forestier. Puisque la façon traditionnelle d'évaluer les densités (photographies aériennes, inventaires de terrain) est souvent limitée, surtout sur de grands territoires, l'utilisation de méthodes modernes comme la télédétection et les systèmes d'information géographique (SIG) s'impose.

Avec l'aide d'un inventaire des tiges fait sur le terrain et d'un système de traitement d'images (PCI), on a pu réaliser une classification dirigée par maximum de vraisemblance d'une image satellitaire LANDSAT-TM d'une résolution de trente mètres au sol en date du 29 mai 1991. Cette classification a permis d'afficher les jeunes peuplements résineux naturels par densité de tiges à l'hectare (ha) en cinq classes distinctes sur un territoire de la forêt boréale au nord de Chicoutimi.

Par la suite, la superposition des données satellitaires sur des données forestières provenant du service de l'inventaire forestier du ministère des Ressources naturelles a servi, par l'entremise de certains critères (densité, pente, âge, origine), à l'élaboration d'un modèle intégré. Ce modèle construit avec le système d'information géographique ARC/INFO a aidé à déterminer les sites potentiels pour les futures opérations de coupes d'éclaircie précommerciale en forêt boréale.

La démarche utilisée devient alors un instrument grâce auquel il sera possible de circonscrire facilement avec une seule image les milieux d'intervention. Ce projet de géomatique touchant le milieu forestier a été réalisé en partenariat entre l'Université du Québec à Chicoutimi et la compagnie forestière Abitibi-Price Inc.

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens sincèrement à remercier monsieur Majella-J. Gauthier, le directeur de recherche, ainsi que monsieur Gilles-H. Lemieux, le codirecteur pour leur aide et leur appui précieux pour la réalisation de ce projet de recherche.

Je remercie également messieurs Viateur Beaulieu, Steeve Coulombe, Luc Filion, Pierre-Mauril Guimond, Daniel Lecours et Sylvain Nadeau de la compagnie forestière Abitibi-Price Inc. pour leur précieuse collaboration et connaissance dans le domaine forestier. Ce projet n'aurait jamais vu le jour sans le support technique essentiel de messieurs Réal Beauregard, Carl Brisson, Raymond Bégin, Daniel Bégin, Claude Chamberland et Justin Proulx du Laboratoire de télédétection et de géomatique de l'Université du Québec à Chicoutimi. Un remerciement sincère à madame Edith Saint-Pierre et à monsieur Stéphane Riverin pour la correction et la révision du document.

Finalement, je remercie le Groupe de recherche en productivité végétale (GRPV) ainsi que le Consortium de recherche sur la forêt boréale commerciale (CRFBC) pour l'aide financière et technique sans laquelle le présent mémoire n'aurait pu être réalisé.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>II</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>III</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTE DES CARTES.....</b>	<b>VIII</b>
<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>COUPE D'ÉCLAIRCIE PRÉCOMMERCIALE .....</b>	<b>8</b>
1.1 OBJECTIFS.....	9
1.2 INVENTAIRE .....	10
1.3 TRAITEMENT ET CONTRÔLE.....	11
<b>CHAPITRE II</b>	
<b>DESCRIPTON DU TERRITOIRE.....</b>	<b>16</b>
2.1 LOCALISATION ET DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE.....	17
2.1.1 <i>Secteur Lac Onatchiway (22E/03 S.E.).....</i>	17
2.1.2 <i>Secteur Lac Houlière (22E/14 S.E.).....</i>	23
2.2 DONNÉES CLIMATIQUES .....	27
<b>CHAPITRE III</b>	
<b>MÉTHODOLOGIE DE LA CLASSIFICATION FORESTIÈRE À L'AIDE DE LA TÉLÉDÉTECTION.....</b>	<b>30</b>
3.1 DONNÉES DE TÉLÉDÉTECTION .....	31
3.1.1 <i>Image satellitaire LANDSAT .....</i>	31
3.1.2 <i>Choix des bandes TM.....</i>	34
3.1.3 <i>Sélection des classes .....</i>	39
3.1.4 <i>Zones d'entraînement .....</i>	41

3.2 TRAITEMENT NUMÉRIQUE DE L'IMAGE SATELLITAIRE POUR DÉTERMINER LA DENSITÉ DES TIGES .....	47
3.2.1 <i>Logiciel de télédétection</i> .....	47
3.2.2 <i>Classification dirigée</i> .....	49
3.2.3 <i>Filtre spatial</i> .....	50
3.2.4 <i>Transformation sous la forme de vecteurs</i> .....	51
<b>CHAPITRE IV</b>	
<b>RÉSULTATS DE LA CLASSIFICATION FORESTIÈRE .....</b>	<b>53</b>
4.1 CLASSIFICATION FORESTIÈRE.....	54
4.2 VALIDATION DE LA CLASSIFICATION.....	65
<b>CHAPITRE V</b>	
<b>PRÉPARATION DE L'INFORMATION À L'INTÉRIEUR DU SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE .....</b>	<b>74</b>
5.1 LE SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE.....	75
5.1.1 <i>Logiciel d'analyse spatiale (SIG)</i> .....	77
5.1.2 <i>Paramètres biophysiques utilisés</i> .....	77
5.1.3 <i>Données forestières</i> .....	78
5.1.4 <i>Données topographiques</i> .....	79
5.1.5 <i>Autres paramètres</i> .....	79
5.2 INTÉGRATION ET TRAITEMENT DE L'INFORMATION DE L'IMAGE SATELLITAIRE ET DES PARAMÈTRES BIOPHYSIQUES À L'INTÉRIEUR DU LOGICIEL D'ANALYSE SPATIALE.....	80
5.2.1 <i>Construction des couvertures de densité des tiges provenant des données satellitaires</i> .....	80
5.2.2 <i>Conception des couvertures de pente avec les données topographiques</i> .....	82
<b>CHAPITRE VI</b>	
<b>UTILISATION DU SIG POUR L'ÉLABORATION DU MODÈLE INTÉGRÉ.....</b>	<b>88</b>
6.1 CRITÈRES UTILISÉS.....	89
6.2 ÉLABORATION DU MODÈLE.....	92
6.3 RÉSULTAT FINAL DU MODÈLE INTÉGRÉ .....	99
<b>DISCUSSION.....</b>	<b>102</b>
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>113</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>116</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1	Schéma de la recherche (partie 1, télédétection) .....	6
Figure 2	Schéma de la recherche (partie 2, système d'information géographique) .....	7
Figure 3	Exemple d'une coupe d'éclaircie précommerciale en forêt boréale .....	10
Figure 4	Vue aérienne de la coupe d'éclaircie précommerciale .....	15
Figure 5	Régénération forestière, secteur Lac Onatchiway (22E/03 S.E.) .....	18
Figure 6	Modèle d'élévation terrain du secteur Lac Onatchiway .....	22
Figure 7	Jeunes peuplements forestiers au sud du Lac Houlière .....	24
Figure 8	Modèle d'élévation terrain du secteur Lac Houlière .....	26
Figure 9	Le spectre électromagnétique (Centre canadien de télédétection, 1993) .....	36
Figure 10	Signature spectrale de réflectance de la végétation (Sabins, 1987) .....	37
Figure 11	Intensité des niveaux de gris de la sous-image brute (sans étalement) .....	46
Figure 12	Superficie des classes de densité des tiges pour le secteur complet d'Abitibi-Price .....	55
Figure 13	Superficie des classes de densité des tiges pour le secteur du Lac Onatchiway .....	62
Figure 14	Superficie des classes de densité des tiges pour le secteur du Lac Houlière .....	65
Figure 15	Exemple de calcul des moyennes des pixels de la classification par rapport au relevé terrain .....	67
Figure 16	Comparaison entre les données terrain et les données de la classification satellitaire pour le secteur du Lac Onatchiway .....	69
Figure 17	Comparaison entre les données terrain et les données de la classification satellitaire pour le secteur du Lac Houlière .....	71
Figure 18	Schéma de la superposition .....	93

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau I	Critères d'évaluation de la qualité d'exécution de la coupe d'éclaircie précommerciale.....	12
Tableau II	Comparaison entre les méthodes de production .....	14
Tableau III	Données climatiques, Station du Lac Onatchiway (48°54' N - 71°02' O).....	28
Tableau IV	Données climatiques, Station Chute-des-Passes (49°54' N - 71°15' O).....	29
Tableau V	Description de l'image satellitaire (EOSAT tape header).....	32
Tableau VI	Coordonnées de la scène entière LANDSAT .....	33
Tableau VII	Description des bandes spectrales du capteur TM.....	34
Tableau VIII	Signature spectrale de chacune des classes de densité des tiges (selon le contenu des zones d'entraînement).....	47
Tableau IX	Classification de l'image du territoire d'Abitibi-Price. ....	54
Tableau X	Matrice de confusion (nombre de pixels correspondant aux zones d'entraînement) .....	57
Tableau XI	Séparabilité des signatures selon la distance de Bhattacharrya avec les bandes 3, 4, 5 .....	58
Tableau XII	Nombre de zones d'entraînement utilisées pour chacune des classes (incluant les zones test) .....	58
Tableau XIII	Nombre de pixels inclus dans les zones d'entraînement de chaque classe .....	59
Tableau XIV	Statistiques de la classification dirigée du secteur Lac Onatchiway .....	60
Tableau XV	Statistiques de la classification dirigée du secteur Lac Houlière.....	63
Tableau XVI	Données d'inventaires, secteur Lac Onatchiway .....	68
Tableau XVII	Regroupement des blocs inventoriés secteur Lac Onatchiway.....	69
Tableau XVIII	Données des essences résineuses inventoriées sur le terrain pour le secteur du Lac Onatchiway .....	70
Tableau XIX	Données d'inventaire, secteur Lac Houlière .....	70
Tableau XX	Regroupement des blocs inventoriés, secteur Lac Houlière.....	70
Tableau XXI	Données des essences résineuses inventoriées sur le terrain pour le secteur du Lac Houlière.....	71
Tableau XXII	Exemple de quelques données disponibles sur la couverture forêt .....	78
Tableau XXIII	Nombre de polygones pour chaque couverture utilisée pour le secteur du Lac Onatchiway .....	83
Tableau XXIV	Nombre de polygones pour chaque couverture utilisée pour le secteur du Lac Houlière.....	83
Tableau XXV	Coordonnées géographiques (MTM) des couvertures.....	94

**LISTE DES CARTES**

Carte 1	Localisation générale des sites d'étude (Saguenay—Lac-Saint-Jean).....	19
Carte 2	Image multibande TM 5,4,3 du secteur Lac Onatchiway. ....	20
Carte 3	Image multibande TM 5,4,3 du secteur Lac Houlière.....	25
Carte 4	Images des bandes TM3, TM4, TM5 et multibande TM 5,4,3.....	38
Carte 5	Localisation des zones d'entraînement pour les classes de densité des tiges .....	45
Carte 6	Transformation de la classification sous la forme de vecteurs.....	52
Carte 7	Classification du secteur Lac Onatchiway .....	61
Carte 8	Classification du secteur Lac Houlière.....	64
Carte 9	Vérification terrain du secteur Lac Onatchiway.....	72
Carte 10	Vérification terrain du secteur Lac Houlière.....	73
Carte 11	Densité des tiges déterminée à partir de l'image LANDSAT pour le secteur Lac Onatchiway.....	84
Carte 12	Densité des tiges déterminée à partir de l'image LANDSAT pour le secteur Lac Houlière. ....	85
Carte 13	Classe de pentes en pourcentage pour le secteur Lac Onatchiway. ....	86
Carte 14	Classe de pentes en pourcentage pour le secteur Lac Houlière.....	87
Carte 15	Origine des perturbations, secteur Lac Onatchiway.....	95
Carte 16	Origine des perturbations, secteur Lac Houlière. ....	96
Carte 17	Âge des peuplements, secteur Lac Onatchiway.....	97
Carte 18	Âge des peuplements, secteur Lac Houlière. ....	98
Carte 19	Modèle intégré, secteur Lac Onatchiway.....	100
Carte 20	Modèle intégré, secteur Lac Houlière. ....	101

## INTRODUCTION

Avec la nouvelle certification de l'aménagement forestier durable au Québec, il est de plus en plus crucial non seulement de bien connaître les ressources, notamment en matière de foresterie, mais aussi d'avoir une idée plus précise de leur répartition spatiale. Les inventaires forestiers préalables à la coupe d'éclaircie précommerciale entraînent des coûts tels, qu'il faille faire appel à des méthodes plus sophistiquées qui vont garantir une fiabilité des informations sur de grands territoires.

Les intervenants en forêt comme les compagnies forestières et les coopératives, doivent appuyer la planification de leurs actions sur des données qui rendent justice à la réalité terrain. Pour planifier des coupes, délimiter les aires de travaux sylvicoles comme l'éclaircie précommerciale, pour évaluer la densité des jeunes peuplements et pour respecter le milieu naturel, on doit compter sur des informations les plus représentatives possibles.

On est alors en droit de se demander comment améliorer à la fois la qualité de l'information et les moyens d'en tirer partie. En ce qui concerne les données, il serait tout à fait logique de penser à accroître leur fiabilité en passant par la télédétection, science avec laquelle il est possible de recueillir de nombreuses données, à un degré de précision acceptable (quand on parle de grands espaces), à des moments relativement fréquents et à un coût raisonnable. L'utilisation des données LANDSAT (thematic mapper) en foresterie est de mise depuis

bien des années, en fait depuis que le capteur est en fonction (1985). Plusieurs travaux ont été réalisés (Ahern & *al.* 1985, Beaubien 1994, Benson & *al.* 1985, Horler & *al.* 1986, Levesque 1987, White & *al.* 1995) avec l'utilisation de TM en milieu forestier. En ce qui concerne les méthodes, il va de soi que pour intégrer l'information provenant de la télédétection aux autres types de données nécessaires à un bon aménagement forestier (peuplements forestiers, travaux, régénération), la géomatique, et particulièrement les systèmes d'information géographique (SIG), s'imposent.

Plusieurs travaux existent sur l'intégration de la télédétection avec les systèmes d'information géographique (Aranoff & *al.* 1987, Edwards 1993, Edwards & *al.* 1990, Gonzales 1994, Goodenough & *al.* 1985, Madry 1989, Maher & *al.* 1985, Manore 1990, Saushyn & *al.* 1991, Stebins & *al.* 1993, Welch & *al.* 1992).

Cependant, dans le domaine forestier, les expériences d'arrimage de la télédétection avec les SIG sont encore hésitantes (Baker 1992). Peu de réussites sont connues notamment dans une application de suivi de la régénération.

Malgré le coût des installations et des logiciels, plusieurs raisons valables font que bon nombre de compagnies forestières optent pour l'utilisation des outils de la géomatique. La principale raison de cela est la baisse des coûts d'exploitation. Ces logiciels augmentent la production, la précision, la rapidité du traitement et rationalisent le personnel. Tout cela

amène une baisse des coûts de production, souvent de plusieurs milliers de dollars et une hausse de productivité. Avec ces logiciels, les compagnies forestières peuvent facilement comparer ou simuler des scénarios de travaux sylvicoles en fonction de l'économie et en tenant compte des contraintes imposées par l'écosystème à protéger (Borde 1995).

Par exemple, les gestionnaires du milieu forestier peuvent définir quel chemin doivent emprunter les camions lourds pour convenir aux normes du transport routier ou encore déterminer précisément quel secteur forestier peut être exploité sans être visible à partir de sites d'observation de la nature.

L'objectif général de ce projet, est d'aider les intervenants forestier à circonscrire facilement sur des cartes, des zones d'intervention forestières pour la coupe d'éclaircie précommerciale en forêt boréale. Les objectifs principaux de cette recherche sont: 1) Interpréter la densité des tiges des jeunes peuplements résineux avec l'aide de la télédétection (LANDSAT-TM), 2) Élaborer un modèle numérique intégré pour déterminer les sites potentiels d'intervention pour la coupe d'éclaircie précommerciale.

Pour réaliser cette recherche, les étapes suivantes ont été suivies. Dans un premier temps, on a tenté avec l'aide de la télédétection, de déterminer un taux de tiges de résineux au pixel (pixel de 30 mètres:  $900\text{m}^2$ ) avec LANDSAT-TM par la réalisation d'une classification forestière par maximum de vraisemblance pour construire une couverture de densité des

tiges. Nous voulions également savoir si l'on pouvait appliquer une classification forestière à tout le territoire forestier d'un intervenant en sélectionnant des zones d'entraînement dans une seule région. C'est une des raisons pour laquelle on a choisi deux sites géographiques assez distants l'un de l'autre sur un même territoire d'exploitation. Une vérification terrain a été nécessaire pour valider les résultats.

Dans un deuxième temps, on a intégré dans le système d'information géographique (SIG), en l'occurrence le logiciel ARC/INFO de ESRI Inc., les données de l'image satellitaire LANDSAT-TM du 29 mai 1991 traitées en classes de densité de végétation avec le logiciel EASI/PACE de PCI Inc. Le tout a été réalisé au Laboratoire de télédétection et de géomatique de l'UQAC. Un lien géométrique de l'image et du terrain a été nécessaire pour ajuster les coordonnées. Le logiciel ARC/INFO a contribué à construire les cartes de densité des tiges provenant des données de la classification forestière, les modèles numériques d'élévation terrain et les cartes des pentes en pourcentage (%).

Dans un troisième temps, pour structurer la démarche, on a utilisé des cartes numériques de terrain qui comprenaient différents attributs comme par exemple la topographie, les dépôts de surface, le type d'essence, l'origine et l'âge des peuplements après perturbation.

Dans un quatrième et dernier temps, on a rassemblé et analysé l'information par la superposition et la comparaison des données utiles dans le but final d'obtenir des modèles

numériques et cartographiques afin de démontrer les endroits où l'intervention forestière est possible en ce qui concerne la coupe d'éclaircie précommerciale.

La démarche utilisée est représentée par les schémas de la recherche (figures 1 et 2). La présente recherche a été réalisée en collaboration avec le département de l'exploitation forestière de la Papeterie Abitibi-Price Inc. Division Saguenay–Lac-Saint-Jean.

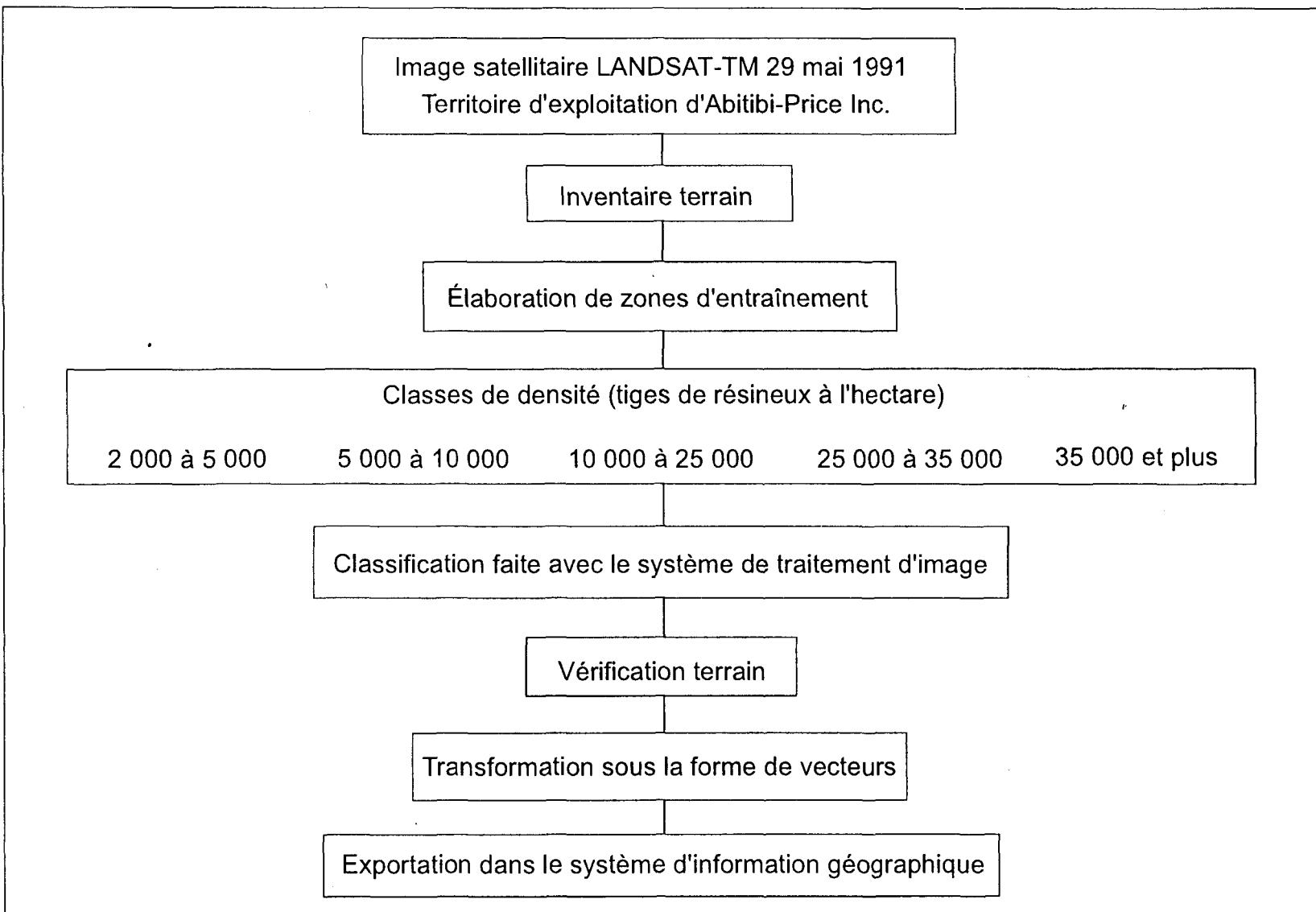


Figure 1. Schéma de la recherche (partie1, télédétection).

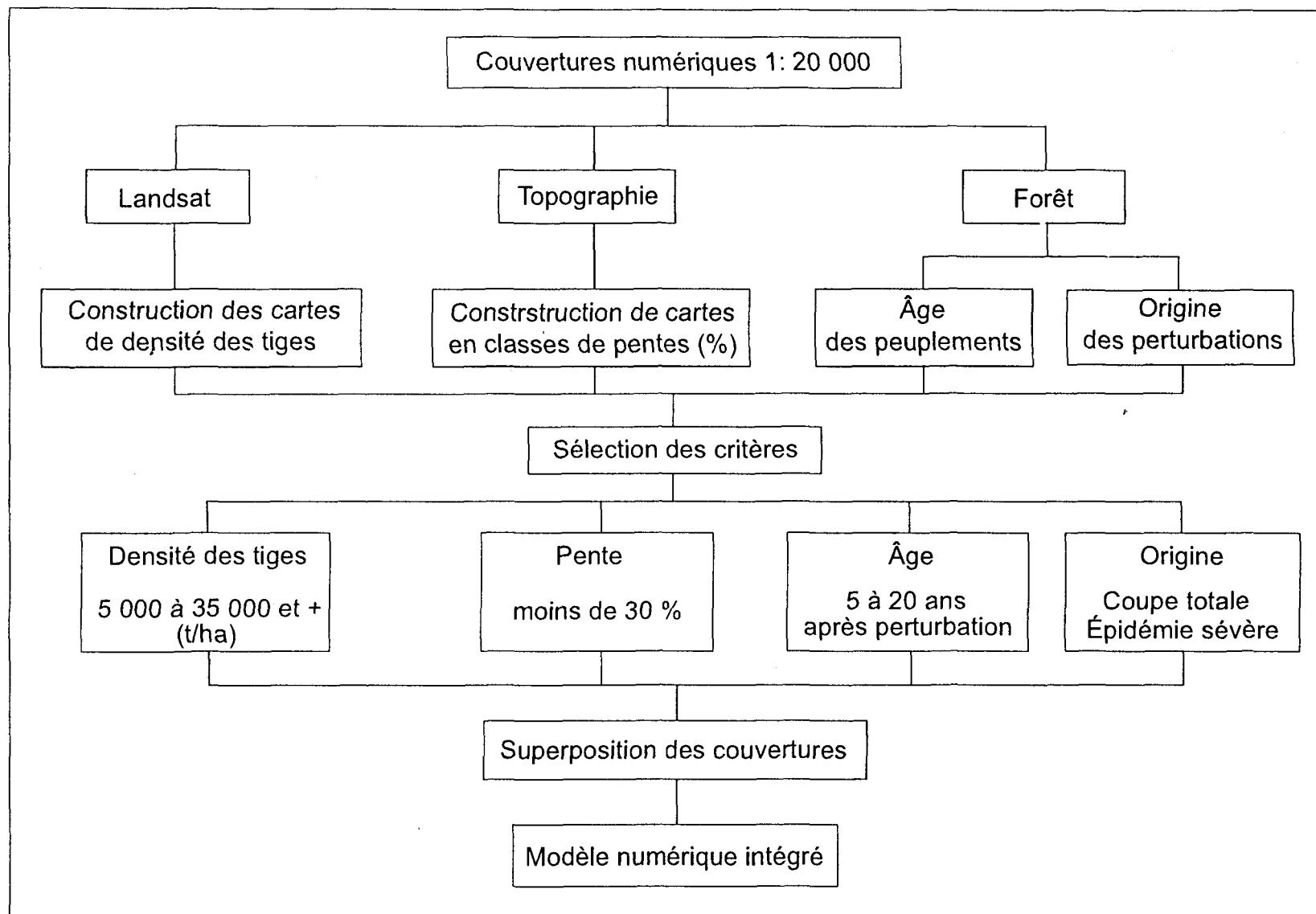


Figure 2. Schéma de la recherche (partie 2, système d'information géographique).

## **CHAPITRE I**

### **COUPE D'ÉCLAIRCIE PRÉCOMMERCIALE**

## 1.1 Objectifs

La coupe d'éclaircie précommerciale est un traitement sylvicole défini comme étant l'abattage des arbres qui nuisent à la croissance des arbres choisis dans un jeune peuplement en vue d'accélérer la croissance et la qualité des arbres sélectionnés (Gouvernement du Québec 1992). Elle a pour but d'augmenter le volume du peuplement, de raccourcir la période de rotation entre deux intervalles de coupe, d'augmenter la qualité des tiges et d'être un outil de prévention contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*).

Normalement au Saguenay—Lac-Saint-Jean, la composition des jeunes peuplements résineux naturels varie entre 1 000 et 50 000 tiges à l'hectare. Le nombre idéal de tiges pour la qualité et la croissance des arbres se situe suivant la connaissance actuelle entre 1 800 et 2 500 tiges à l'hectare, soit l'équivalent d'une plantation (figure 3). Jusqu'à aujourd'hui, les classes de densité des peuplements étaient établies à l'aide de la photo-interprétation alors que le nombre de tiges à l'hectare servant à définir les taux de traitement était calculé lors d'inventaires terrestres. Ces techniques sont dispendieuses et peu productives. La télédétection est donc un outil qui peut améliorer cette situation tout en étant suffisamment précise et couvrant beaucoup plus de territoire.

## 1.2 Inventaire

L'éclaircie précommerciale dans le domaine de la forêt boréale s'applique habituellement aux strates de pessières, de pessières à sapin, de sapinières, de sapinières à épinette et de sapinières à bouleau. Ces jeunes peuplements sont caractérisés par les éléments suivants:

- La densité des tiges à l'hectare (10 000 à 50 000)
- L'âge (5 à 20 ans après perturbation)
- La hauteur des arbres (1,5 à 3 m)
- Le diamètre hauteur de poitrine (DHP) (2 à 4 cm)

Source: Houde 1990



Figure 3. Exemple d'une coupe d'éclaircie précommerciale en forêt boréale.

Pour l'éclaircie précommerciale, la première étape consiste à déterminer les secteurs d'origine de coupes ou d'épidémies âgés de 5 à 20 ans et de localiser ces secteurs sur les photographies aériennes pour évaluer la densité, les types de peuplements et leur hauteur.

Avant de procéder au traitement en forêt, un inventaire est effectué pour déterminer le nombre de tiges à l'hectare par essence (classe de densité pour définir les taux du traitement), et évaluer d'autres paramètres comme les dépôts de surface, le drainage, la topographie, la pierrosité et les déchets de coupe (servant à définir le degré de difficulté du traitement). L'inventaire se fait à l'aide de placettes-échantillons de  $4m^2$  de superficie (1,13 m de rayon) prises à tous les 50 ou 100 m le long de virées continues. Pour atteindre l'objectif de précision recherché, nous devons atteindre une moyenne de 1 parcelle par 2 ha de peuplements inventoriés. Un inventaire particulier des arbres doit être fait à toutes les trois parcelles où on y enregistre le type d'essence, la hauteur de l'arbre et le diamètre de la souche.

### **1.3 Traitement et contrôle**

Lors des traitements sylvicoles, une vérification stricte des travaux exécutés sur le terrain est réalisée par des responsables pour veiller à ce que tout soit fait selon les règles. À ce propos, les informations sur le traitement et contrôle, proviennent de "Les travaux précommerciaux: l'exécution" (Houde 1990). Les travaux en forêt débutent vers la fin mai

ou début juin pour se terminer au mois d'octobre. La supervision et le contrôle de la qualité sont exécutés le plus tôt possible après le traitement. L'objectif est d'obtenir et de maintenir de hauts standards de qualité. L'évaluation de la qualité est faite suivant les critères décrits au tableau I.

Tableau I. Critères d'évaluation de la qualité d'exécution de la coupe d'éclaircie précommerciale

Critères	Pondération (%)	Parcelles circulaires
Densité	30	
Espacement	10	1/100 ha
Blessures	15	(5,64 m de rayon)
Sélection	15	
Branches vertes	15	1/250 ha
Tiges résiduelles	15	(3,57 m de rayon)

Source: Houde, 1990.

La densité des tiges est évaluée à l'aide de placettes-échantillons circulaires de 1/100 ha (rayon de 5,64 m). On accepte un intervalle de 2 200 à 2 800 tiges sans pénalité. Lorsque le nombre de tiges n'est pas compris dans cet intervalle, on applique une pénalité de 4 % à chaque tige jusqu'à concurrence de 30 %. Lorsque l'espacement entre deux arbres est moins de 1,4 m, 1 % de pénalité est octroyé. Chaque tige blessée est pénalisée de 3 % jusqu'à concurrence de 15 %.

Le choix de l'arbre, c'est-à-dire la sélection, se fait selon deux caractéristiques; la première est la vigueur de l'arbre. Pour cela, il faut éliminer les tiges endommagées, favoriser une

tige à pousse unique, favoriser une tige à tronc droit, et finalement, considérer la longueur de la pousse annuelle. La deuxième caractéristique est l'essence. L'épinette noire (*Picea mariana*) et l'épinette blanche (*Picea glauca*) seront favorisées par rapport à toutes les autres essences en raison de la très grande qualité de leur fibre pour l'industrie forestière et qu'elles sont d'une très bonne qualité également pour le bois de sciage. S'il y a absence d'épinettes, c'est le sapin baumier (*Abies balsamea*) qui sera retenu; viendront ensuite dans l'ordre le pin gris (*Pinus banksiana*), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides*), le bouleau blanc (*Betula papyrifera*), etc. Lors des travaux, toutes les tiges coupées doivent être rabattues pour ne pas nuire aux tiges dégagées. Afin de ne pas créer de trouées, une tige feuillue sera acceptée en l'absence de tiges résineuses. Chaque tige mal sélectionnée sera pénalisée de 2 % jusqu'à concurrence de 15 %.

La hauteur de coupe de la souche est mesurée dans une parcelle plus petite (1/250 ha) située au centre de la parcelle de 1/100 ha. La hauteur ne doit pas excéder 15 cm et les souches doivent être démunies de branches vertes (pénalité 15 %). Pour les tiges résiduelles, il s'agit d'éliminer celles de moins de 30 cm. Cette règle s'applique surtout pour les tiges feuillues (pénalité 15 %). Pour être acceptables, les travaux finaux devront être supérieurs à 85 %. Dans les espaces forestiers destinés à la production de résineux, la tige est considérée comme étant "éclaircie" lorsqu'aucune autre tige de plus du tiers de sa hauteur ne croît dans un rayon de 1 m à partir du centre de la tige (norme du ministère des Ressources naturelles). Dans ces aires, on peut accepter un maximum de 200 tiges

d'essences feuillues commercialisables pour atteindre le nombre nécessaire d'arbres éclaircis (Gouvernement du Québec 1993).

Chaque semaine, les exécutants produisent un rapport sur les mesures de qualité et de superficie. Chez Abitibi-Price Inc., les premières expérimentations (petites superficies) d'éclaircie précommerciale ont été réalisées en 1985 et 1986, mais le début réel sur une grande superficie a débuté en 1988 (taux: 2 000 ha/année).

En bref, la coupe d'éclaircie précommerciale est un traitement sylvicole important qui vise à diminuer la compétition interspécifique et intraspécifique, tout en assurant un espacement idéal entre les tiges afin d'augmenter la production du peuplement et de raccourcir la révolution. Elle sert également, comme on l'a déjà dit, de prévention contre la tordeuse des bourgeons de l'épinette (*Choristoneura fumiferana*). Comme le démontre le tableau II, elle aura pour effet de permettre une productivité équivalente aux plantations tout en étant plus performante que la forêt naturelle (Gouvernement du Québec, 1992).

Tableau II. Comparaison entre les méthodes de production

Type	Production (m <sup>3</sup> /ha)
Forêt naturelle	100
Coupe d'éclaircie précommerciale	160
Plantation	160

Source: Gouvernement du Québec, 1992

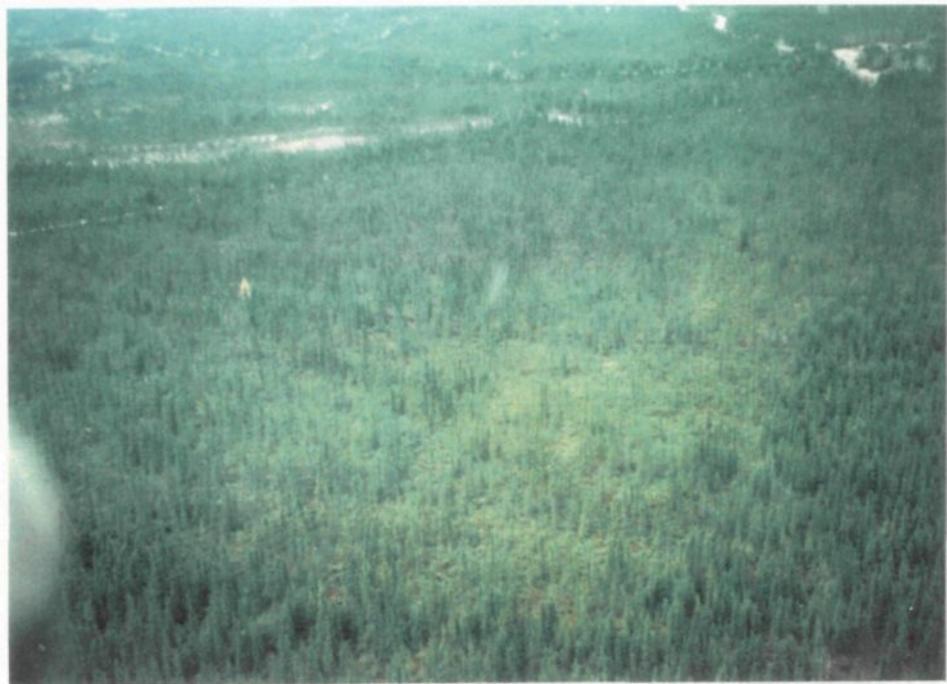


Figure 4. Vue aérienne de la coupe d'éclaircie précommerciale.

## **CHAPITRE II**

### **DESCRIPTON DU TERRITOIRE**

## **2.1 Localisation et description des sites d'étude**

Pour réaliser cette étude, deux territoires distincts de la forêt boréale commerciale au nord de Chicoutimi ont été sélectionnés (carte 1). Les deux sites étudiés se situent dans la municipalité régionale de comté (MRC) du Fjord du Saguenay. Ils sont tous deux accessibles par chemins forestiers, ce qui a facilité la tâche pour effectuer des vérifications sur le terrain. On a sélectionné les limites de deux feuillets cartographiques à l'échelle 1: 20 000 du Service de l'inventaire forestier du Gouvernement du Québec. Les deux territoires sont distincts autant par leur situation géographique que par leur écologie et leur topographie (relief). Les deux secteurs ont subi des travaux sylvicoles, mais à des époques différentes. La superficie totale des deux feuillets couvrent environ 52 000 ha soit 26 000 ha chacun.

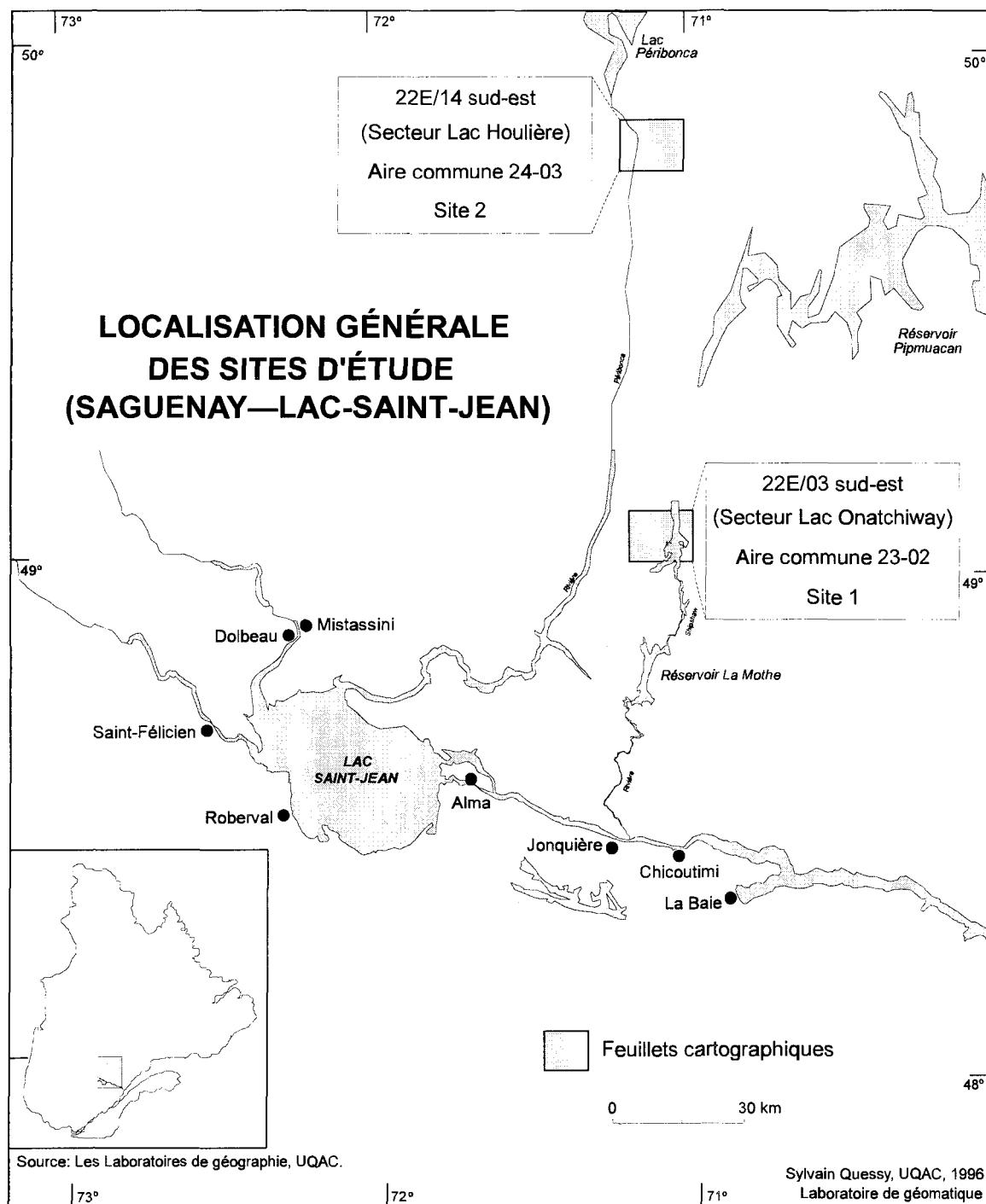
### **2.1.1 Secteur Lac Onatchiway (22E/03 S.E.)**

Le site 1, feuillet cartographique 22E/03 sud-est, faisant partie de l'aire commune 23-02 est situé dans le bassin hydrographique de la rivière Shipshaw, à environ 75 km au nord de Chicoutimi (carte 1). Ses coordonnées géographiques se situent entre 49°00'00" et 49°07'30" de latitude Nord et 71°00'00" et 71°15'00" de longitude Ouest. Ce secteur appartient à la zone boréale dans le domaine de la sapinière à bouleau blanc

(Richard, 1987). C'est un territoire où la bétulaie et la tremblaie se régénèrent après feu. À l'état mature, ce territoire est dominé par le sapin et les autres espèces conifériennes (figure 5). Le sapin baumier (*Abies balsamea*) représente 50 à 80 % du volume de bois. L'épinette blanche (*Picea glauca*) et le bouleau blanc (*Betula papyrifera*) l'accompagnent sur les pentes. La régénération coniférienne y est moins importante qu'au nord. On peut apercevoir, quand on consulte la photographie aérienne, la présence de plusieurs tiges de feuillus en régénération (figure 5).

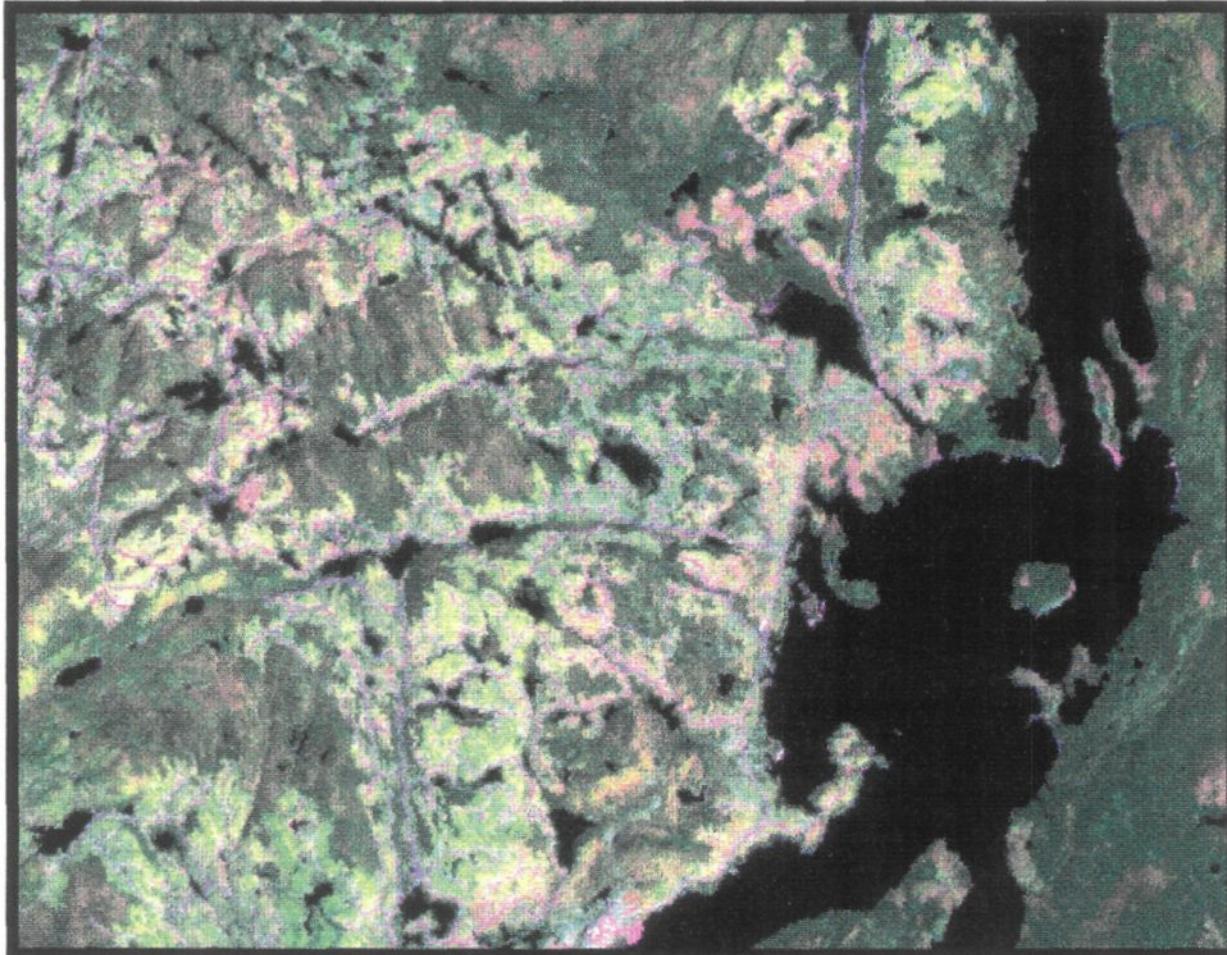


Figure 5. Régénération forestière, secteur Lac Onatchiway (22E/03 S.E.).



Carte 1. Localisation générale des sites d'étude (Saguenay—Lac-Saint-Jean).

## IMAGE SATELLITAIRE LANDSAT-TM



**Secteur  
Lac Onatchiway**

**22E/03 sud-est**

0  2 km

Source: Satellite LANDSAT 5, image du 29 mai 1991.

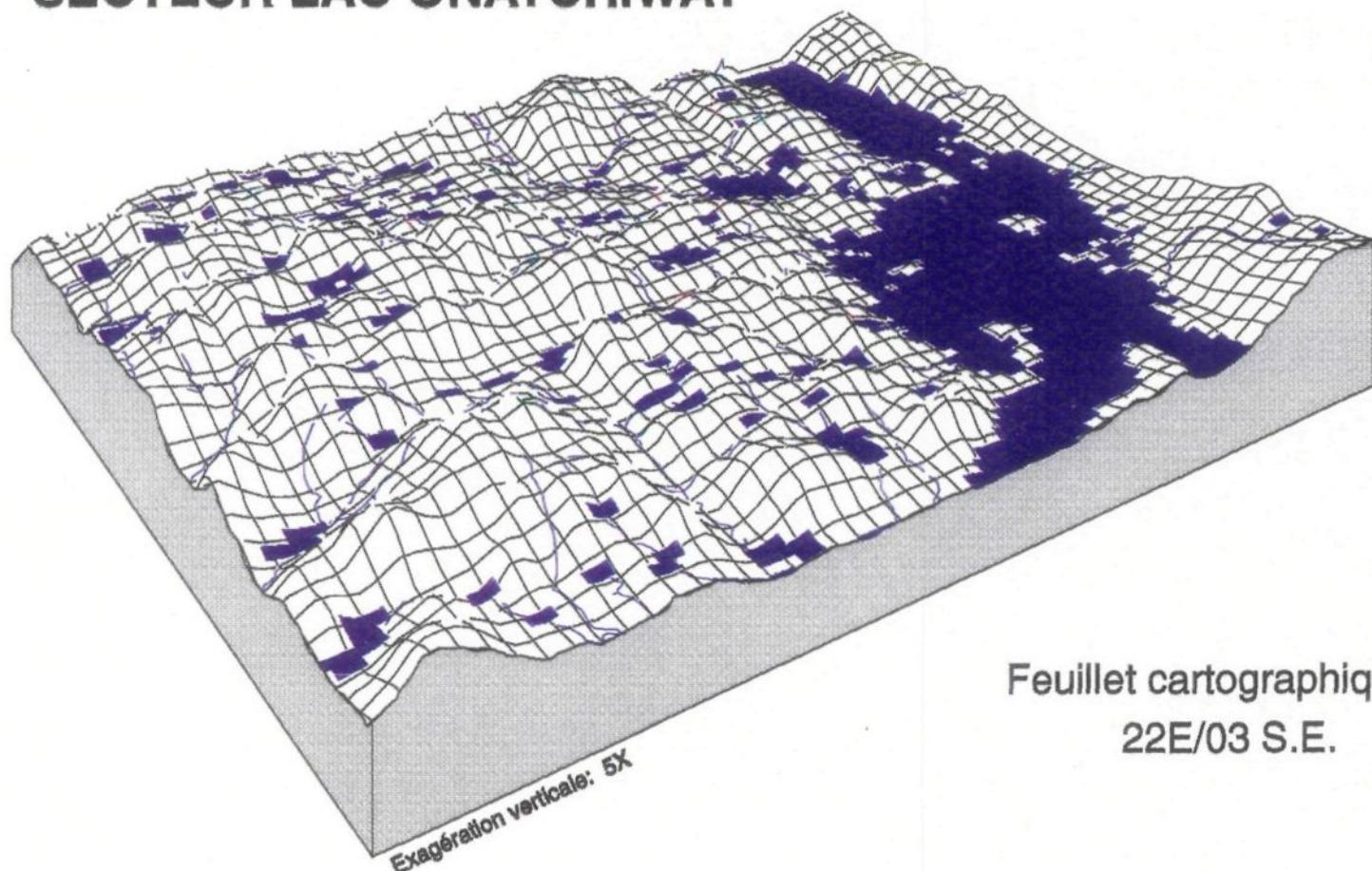
Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

Carte 2. Image multibande TM 5,4,3, du secteur Lac Onatchiway (22E/03 S.E.).

Le territoire de ce secteur est relativement accidenté comme on peut le voir sur le modèle numérique d'élévation de terrain (DEM) de la figure 6. La présence de pentes abruptes dans un secteur montagneux limite les lieux d'intervention.

Le secteur du Lac Onatchiway est dominé par les dépôts de surface de type glaciaire. Ce sont des tills indifférenciés minces de 0,25 à 1 m d'épaisseur, les tills indifférenciés de plus de 1 m d'épaisseur et le substrat rocheux.

## MODÈLE D'ÉLÉVATION TERRAIN SECTEUR LAC ONATCHIWAY



Feuillet cartographique  
22E/03 S.E.

Source: Données topographiques, ministère des Ressources naturelles

Justin Proulx et Sylvain Quessy, 1996  
Laboratoire de géomatique

Figure 6. Modèle d'élévation terrain du secteur Lac Onatchiway (22E/03 S.E.).

### 2.1.2 Secteur Lac Houlière (22E/14 S.E.)

Le site 2, feuillet cartographique 22E/14 sud-est, localisé dans l'aire commune 24-03, fait partie du bassin hydrographique de la rivière Péribonca. Ce site est situé à environ 160 km au nord de Chicoutimi (carte 1). Les coordonnées géographiques de ce feuillet se situent entre 49°45'00" et 49°52'30" de latitude Nord et 71°00'00" et 71°15'00" de longitude Ouest. Ce secteur de la forêt boréale fait partie du domaine de la pessière à mousses hypnacées (Richard, 1987) et recouvre 22 % du territoire québécois. L'épinette noire (*Picea mariana*) domine ce territoire. On note la présence de sapinières sur les sols riches et une présence de pinèdes grises sur les plateaux sableux. Selon les données de la carte des régions écologiques du Québec (Thibault, 1985), la région écologique dont fait partie ce secteur (pessière noire à mousses) est un groupement d'espèces de transition dominé par le peuplier-faux-tremble (*Populus tremuloides*) sur les sols mésiques et le bouleau blanc (*Betula papyrifera*) sur les sols plus riches. La figure 7, présente une partie du territoire au sud du lac Houlière où la jeune pessière domine alors que la figure 8 présente le modèle d'élévation terrain du même secteur où le relief est peu accidenté.

Tout comme le site 1, les dépôts de surface dominants sont les tills indifférenciés de plus de 1 m d'épaisseur, les tills indifférenciés de 0,25 à 1 m d'épaisseur et les affleurements rocheux.

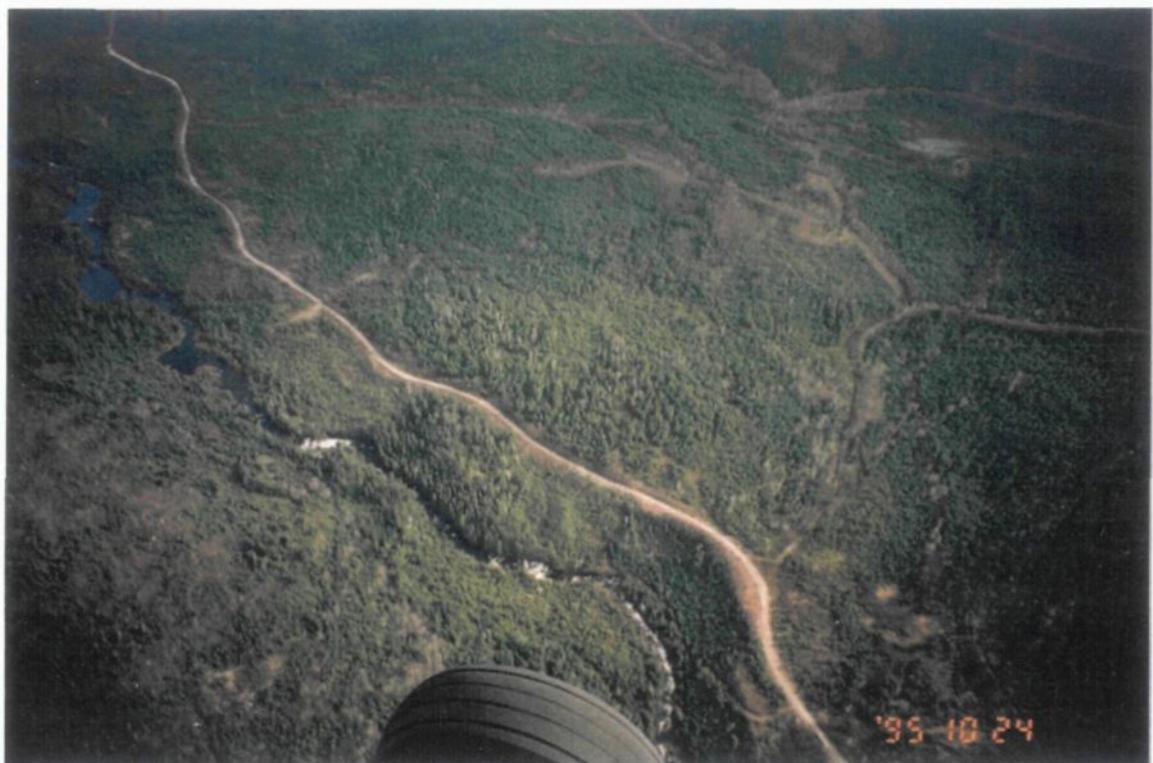
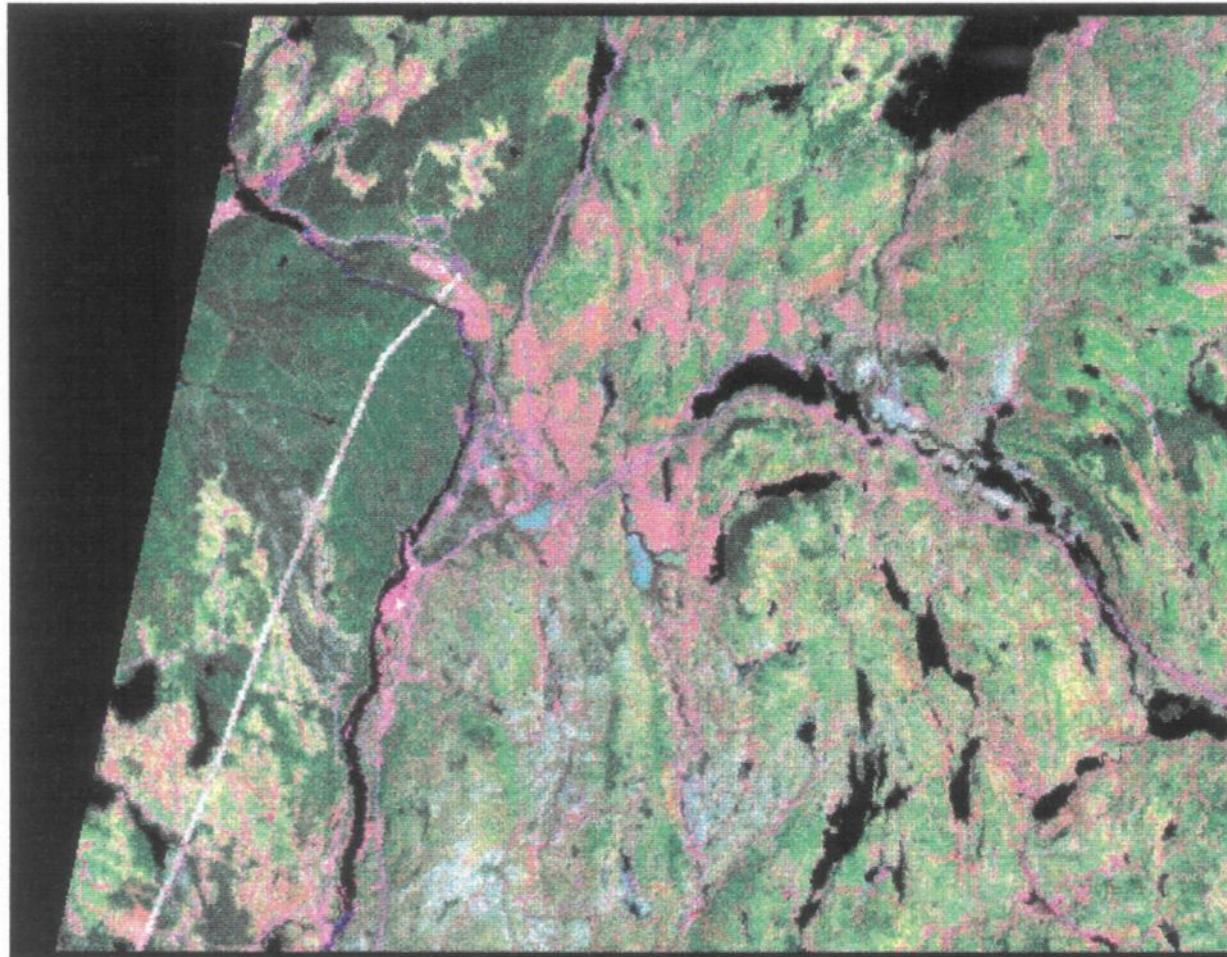


Figure 7. Jeunes peuplements forestiers au sud du Lac Houlière.

## IMAGE SATELLITAIRE LANDSAT-TM



**Secteur  
Lac Houlière**

**22E/14 sud-est**

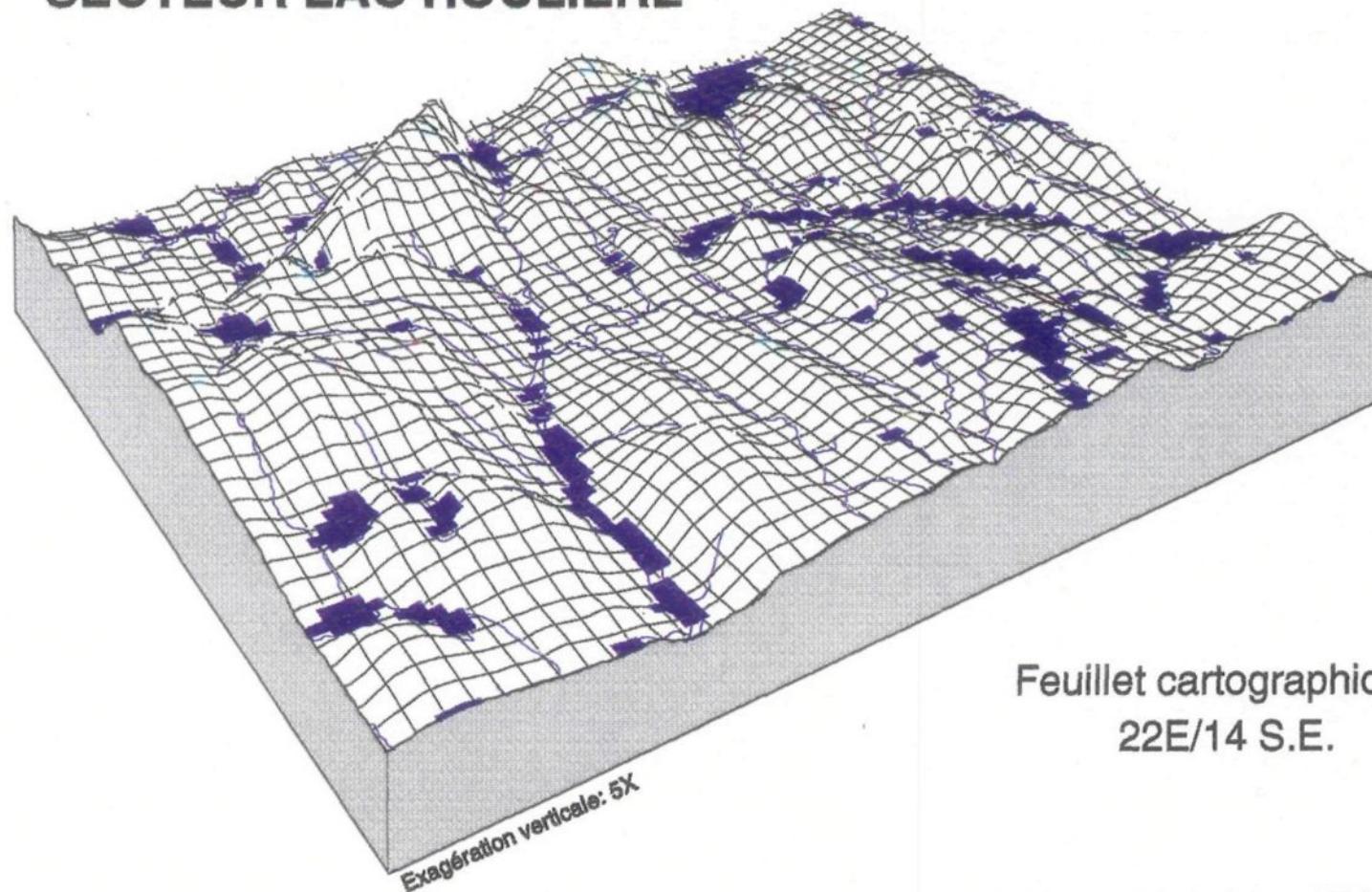
0  2 km

Source: Satellite LANDSAT 5, image du 29 mai 1991.

Sylvain Quesny, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

Carte 3. Image multibande TM 5,4,3, du secteur Lac Houlière (22E/14 S.E.).

## MODÈLE D'ÉLÉVATION TERRAIN SECTEUR LAC HOULIÈRE



Source: Données topographiques, ministère des Ressources naturelles

Figure 8. Modèle d'élévation terrain du secteur Lac Houlière (22E/14 S.E.).

Justin Proulx et Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

## 2.2 Données climatiques

Le climat joue un rôle important sur la distribution géographique des espèces. Les deux sites étudiés se situent dans les Hautes-Terres du Saguenay–Lac-Saint-Jean, où le climat est de type tempéré continental (Gauthier & Bouchard, 1981). Ce type de climat implique de grandes variations des températures quotidiennes.

Le climat des secteurs étudiés est quelque peu différent de celui de Chicoutimi (Gauthier & Bouchard, 1981). Les totaux pluviométriques ont tendance à augmenter avec l'altitude. Les hautes-terres reçoivent 25 à 30 % plus d'eau que les basses-terres dont fait partie Chicoutimi. L'hiver, la neige couvre le sol pendant près de six mois consécutifs entre novembre et avril. Pour le site 1, les données de la station météorologique du Lac Onatchiway située à 305 m d'altitude ont été retenues (tableau III). Pour le site 2, les données ont été prises à la station Chute-des-Passes située à 399 m d'altitude (tableau IV).

Toutes les données climatiques parviennent du document d'Environnement Canada sur les normales climatiques du Canada de 1951 à 1980 (Environnement Canada, 1982).

Pour le site 2, la température annuelle moyenne de l'air est de -0,2 °C comparativement à 1,0 °C pour le site 1. L'une des caractéristiques les plus significatives de ces données, est la

température moyenne qui est toujours plus élevée dans le site 1 comparativement au site 2, ce qui est normal car le site 1 est beaucoup plus au sud. Autre caractéristique notable, le site 1 reçoit beaucoup plus de précipitations à comparer au site 2. Comme le démontrent les tableaux III et IV, le site 1 reçoit 1 129 mm de précipitations totales sur 190 jours de précipitation contre 978 mm de précipitations totales sur 180 jours de précipitations pour le site 2. Il est à noter que les deux sites ont presque le même nombre de jours-neige avec 82 et 80 respectivement, mais le site 1 reçoit environ 90 cm de neige de plus que le site 2. Ces variations dans les températures et les précipitations auront un effet direct sur les activités en forêt et sur les signatures spectrales.

Tableau III. Données climatiques Station du Lac Onatchiway (48°54' N - 71°02' O)

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Température °C	-17,1	-15,4	-8,3	0,8	7,8	13,9	16,4	14,7	10,1	4,7	-2,5	-13,3	1,0
Pluie (mm)	7,7	11,2	16,0	45,5	81,6	105,7	139,5	117,9	141,5	87,3	49,5	9,5	812,9
Neige (cm)	79,1	61,0	48,6	16,7	2,8	0,3	0,0	0,0	0,3	8,4	42,8	92,3	352,3
Précipitations totales (mm)	83,4	62,6	59,9	59,0	77,7	106,0	139,5	117,9	140,0	96,0	93,3	94,2	1 129
Jours de pluie	1	1	3	7	15	15	18	17	18	15	8	2	120
Jours de neige	17	13	11	6	1	0	0	0	0	3	14	17	82
Jours de précipitation	17	14	12	12	14	15	18	17	18	16	19	18	190

Source: Normales climatiques au Canada 1951-1980, températures et précipitations, Environnement Canada, 1982.

Tableau IV. Données climatiques Station Chute-des-Passes (49°54'N - 71°15' O)

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Juin	JUIL.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
Température °C	-18,4	-16,2	-8,7	-0,3	6,8	13,0	15,5	13,8	8,7	2,7	-4,5	-14,8	-0,2
Pluie (mm)	2,7	2,2	10,9	28,5	71,1	113,0	144,7	116,3	103,5	64,6	24,7	6,8	689,0
Neige (cm)	51,3	38,8	33,7	20,3	3,0	0,3	0,0	0,0	0,7	14,9	44,4	53,1	260,5
Précipitations totales (mm)	69,0	43,7	52,3	53,7	68,0	113,3	137,6	108,6	100,8	77,9	90,2	62,8	978
Jours de pluie	1	0	2	6	12	14	17	16	16	11	5	1	101
Jours de neige	17	14	11	7	1	0	0	0	0	4	15	15	84
Jours de précipitation	17	14	13	12	12	14	17	16	16	15	18	16	180

Source: Normales climatiques au Canada 1951-1980, températures et précipitations, Environnement Canada, 1982.

La date de la prise de l'image est importante pour comprendre l'influence des données climatiques. Par exemple, la date du passage du satellite permet de vérifier l'état de la végétation au moment du captage de l'image. Pour cette étude, une image tardive de printemps (29 mai) présente-t-elle une signature spectrale différentielle entre la partie sud et nord du territoire? Est-ce que le débourrement, c'est-à-dire l'éclosion printanière des bourgeons et des feuilles, a débuté à certains endroits? Ce débourrement aura une relation directe sur la signature spectrale de la végétation et pourrait fausser quelques peu les résultats. La couverture au sol est également un autre aspect à ne pas négliger et qui pourrait jouer un rôle sur la signature spectrale des pixels, comme par exemple, les arbustes qui gardent leurs feuilles toute l'année. Il y a donc plusieurs phénomènes reliés aux conditions climatiques qui pourraient intervenir dans l'interprétation des données. Somme toute, les territoires étudiés révèlent des structures différentes tant par le relief, la végétation et le climat. Les deux territoires sélectionnées apportent donc une bonne représentation des territoires que l'on peut retrouver dans la forêt boréale.

## **CHAPITRE III**

# **MÉTHODOLOGIE DE LA CLASSIFICATION FORESTIÈRE À L'AIDE DE LA TÉLÉDÉTECTION**

### **3.1 Données de télédétection**

L'utilisation de la télédétection, science et technique qui utilise la détection à distance, permet d'évaluer de grands territoires avec une qualité fort acceptable. Cet outil amène les utilisateurs à observer d'une façon plus globale le territoire et ses paramètres physiques, et ce à des fréquences bien déterminées, ce qui peut faciliter la prise de décisions.

#### **3.1.1 Image satellitaire LANDSAT**

Le choix des images satellitaires varie en fonction des besoins des utilisateurs. Pour réaliser ce projet, nous voulions obtenir une image assez récente qui pourrait servir à cette étude, mais également à d'autres études ayant comme terrain de recherche le même territoire. L'image devait recouvrir la totalité du territoire d'exploitation forestière de la compagnie Abitibi-Price Inc. De plus, cette image ne devait pas être influencée par le feuillage des arbres feuillus de façon à discriminer le plus possible les aires des jeunes peuplements résineux. L'image devait avoir une résolution acceptable afin d'obtenir le plus de précision possible. Finalement, elle devait être claire, sans nuage, ou du moins avoir le minimum d'interférence atmosphérique possible. Le choix s'est arrêté sur une image du satellite LANDSAT 5. Ce satellite artificiel construit par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) possède le capteur TM (Thematic Mapper) qui a une résolution

de pixels de trente mètres (tableau V). Un pixel, correspond à la plus petite surface homogène consécutive d'une image enregistrée par le capteur (Bonn & Rochon, 1993). Ce capteur détecte le rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis par la surface de la terre. Il est séparé en sept bandes spectrales différentes, réparties entre le bleu du visible et l'infrarouge thermique. Le satellite LANDSAT observe la surface de la terre entre 78° de latitude Nord et 78° de latitude Sud à partir d'une orbite héliosynchrone, avec un balayage de 185 km de largeur et ce à 705 km d'altitude (Gouvernement du Canada, 1985). Sur son orbite invariable, le satellite LANDSAT croise toujours une même latitude à une même heure locale et ce à tous les 16 jours et comme une orbite dure 99 minutes, il contourne la terre 14,5 fois par jour (Ryerson & *al.*, 1983).

Tableau V. Description de l'image satellitaire (EOSAT tape header)

Produit	94044842-01 WRS =013/02584
Date	1991 05 29
Numéro du satellite	L5
Instrument	TM10
Type de produit	Orbite orientée
Taille du produit	Scène complète 185 x 185 km
Projection	UTM
Taille des pixels	30 m
Liste des bandes	1,2,3,4,5,6,7
Longueur d'enregistrement (octets)	7 020
Pixels par ligne de balayage	6 920
Lignes de balayage par image	5 728

Source: EOSAT Company, 1991.

Les probabilités que la température soit clémence lorsque le satellite passe à l'endroit voulu, au bon moment de l'année sont faibles. Des images d'années précédentes ont dû être consultées pour trouver l'image désirée. Après quelques considérations, le choix s'est arrêté sur une image sans nuage du printemps, celle du 29 mai 1991.

L'image a été acquise de façon géoréférencée, c'est-à-dire, qu'elle était corrigée géométriquement en coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator), ce qui facilite l'exportation vers d'autres environnements informatiques (tableau VI). L'image entière de  $34\,225\text{ km}^2$  utilisait à elle seule 286 mega-octets d'espace disque dans la mémoire de l'ordinateur.

Tableau VI. Coordonnées de la scène entière LANDSAT

Coordonnées	Longitude	Latitude
Supérieure gauche	71° 08' 34,0182" W	50° 00' 51,9897" N
Supérieure droite	68° 37' 46,2483" W	49° 38' 38,3959" N
Inférieure gauche	69° 16' 44,6513" W	48° 09' 25,5619" N
Inférieure droite	71° 43' 15,1701" W	48° 30' 53,3655" N
Coordonnées	UTM (mètres)	
Supérieure gauche	346480,226 W	5542218,980 N
Supérieure droite	526748,071 W	5498898,499 N
Inférieure gauche	479245,286 W	5333581,759 N
Inférieure droite	299064,949 W	5376881,211 N

Source: EOSAT Company, 1991.

Pour réaliser l'étude, seulement une portion de l'image entière fût sélectionnée. La sous-image avait une dimension de 2 360 lignes par 4 300 pixels et recouvrait presque la totalité du territoire d'exploitation de la compagnie Abitibi-Price Inc.

### 3.1.2 Choix des bandes TM

Le choix d'une image LANDSAT-TM donne la possibilité d'utiliser les sept bandes offertes par le capteur du satellite (tableau VII). D'après Bonn & Rochon (1993), c'est en utilisant le bilan d'énergie à la surface que sont réalisées les études des signatures spectrales. Le rayonnement visible et le proche infrarouge utilisent le phénomène de la réflexion du spectre sur la surface terrestre tandis que le rayonnement thermique et les hyperfréquences passives utilisent plutôt l'émission naturelle de la surface comme signature.

Tableau VII. Description des bandes spectrales du capteur TM

Numéro de bande	Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	Couleur et spectre
TM1	0,45 à 0,52	Bleu
TM2	0,52 à 0,60	Vert
TM3	0,63 à 0,69	Rouge
TM4	0,76 à 0,90	Proche infrarouge
TM5	1,55 à 1,75	Infrarouge moyen
TM6	10,4 à 12,5	Infrarouge thermique
TM7	2,08 à 2,35	Infrarouge moyen

Source: Sabins, 1987.

En télédétection, c'est le spectre défini entre 0,3 et 3 micromètres ( $\mu\text{m}$ ) qui est habituellement utilisé et même s'il existe plusieurs types de rayonnement, c'est la réflexion qui domine (figure 9). Le comportement spectral de la végétation est plutôt complexe, car c'est un phénomène changeant dans le temps dont les caractéristiques spectrales changent avec les saisons et la croissance de la végétation. Le rayonnement solaire est fortement absorbé dans le visible au niveau de la feuille vivante où la réflectance ne dépasse 15 %, surtout au niveau du rouge. Ceci est causé par un pigment photosynthétique, la chlorophylle. Celui-ci se caractérise par un fort coefficient d'absorption dans le bleu et le rouge qui donne un coefficient de réflexion maximum dans le vert. Son coefficient de transmission est très faible. Dans le proche infrarouge, les feuilles se caractérisent par une forte réflectance et transmittance. Dans l'infrarouge moyen, ce sont les bandes d'absorption de l'eau qui font l'absorptance<sup>(1)</sup> de la feuille.

En ce qui concerne le couvert végétal, la réponse des signatures spectrales peut être trompeuse, car le sol sous la végétation peut la modifier. Pour cette recherche, les bandes TM5 projeté dans le canon rouge, TM4 dans le canon vert et TM3 dans le canon bleu ont été choisies (figure 9) car, cette combinaison semble optimale pour discriminer le couvert forestier tant par ses propriétés de réflectance que d'absorptance (Benson & DeGloria, 1985).

<sup>(1)</sup> Rapport du flux énergétique absorbé par un corps au flux énergétique incident pendant le même intervalle de temps (Bonn & Rochon, 1993).

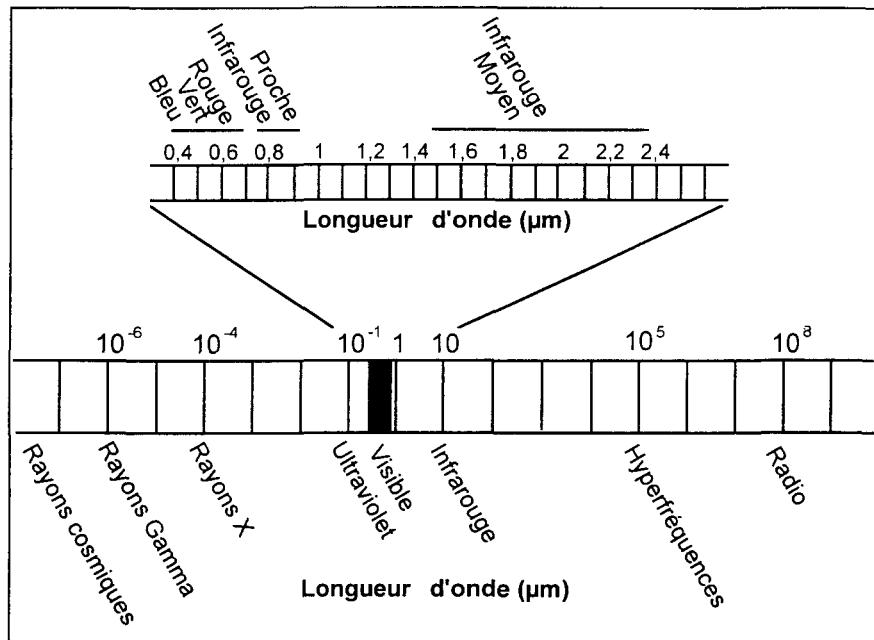


Figure 9. Le spectre électromagnétique (Centre canadien de télédétection, 1993).

Selon les recherches déjà effectuées dans le domaine de la signature spectrale par Sabins (1987), la bande TM3, située dans le rouge du visible, est influencée par l'absorption du pigment photosynthétique de la feuille qu'est la chlorophylle (figure 10). Cette bande dont les longueurs d'ondes sont situées entre 0,63 et 0,69  $\mu\text{m}$  discrimine bien la végétation. Le proche infrarouge (TM4), est influencé par la structure interne des feuilles et aide à déterminer la biomasse, tandis que l'infrarouge moyen (TM5) est sensible au contenu en eau de la feuille.

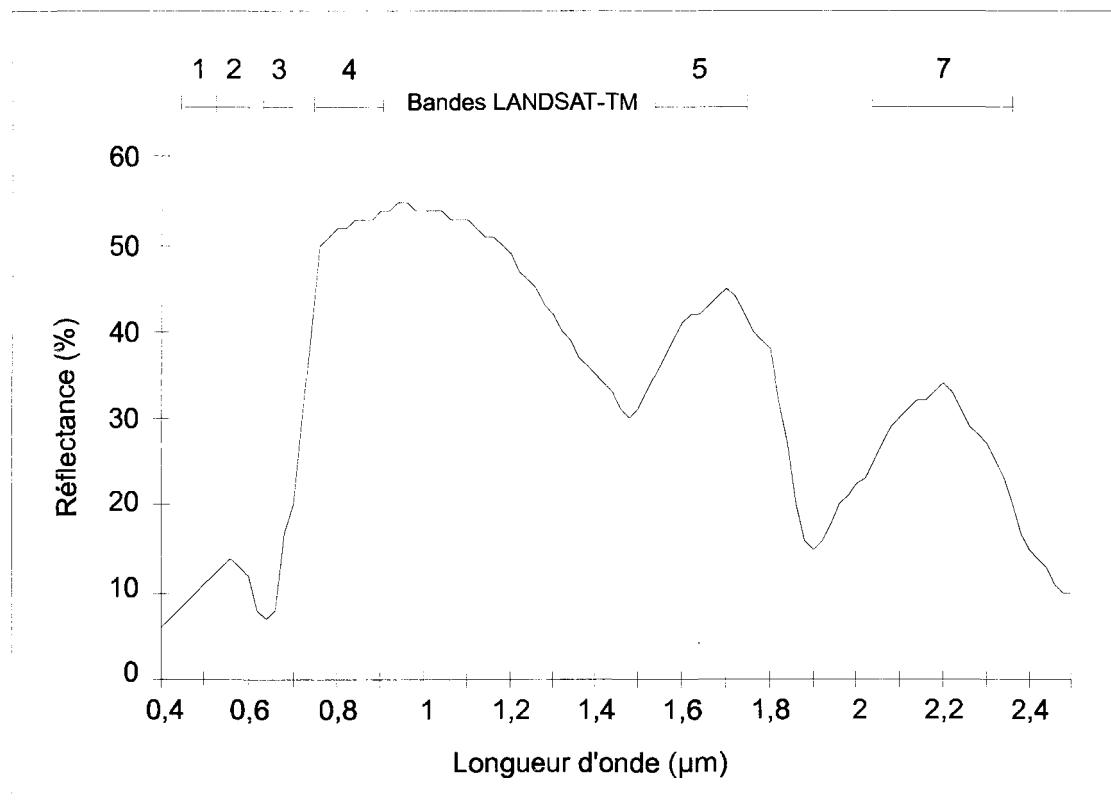


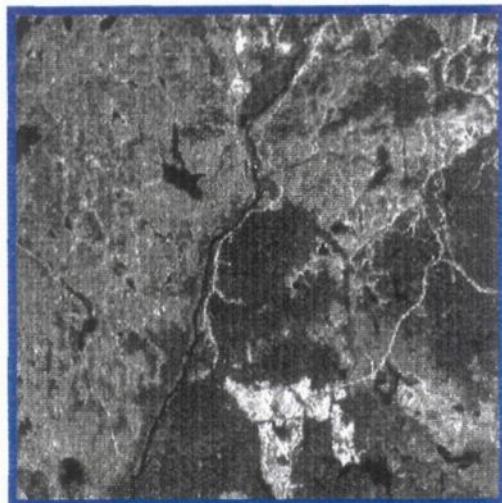
Figure 10. Signature spectrale de réflectance de la végétation (Sabins, 1987).

La carte 4 présente chacune des propriétés spectrales (en ton de gris) en A,B,C de chacune des bandes utilisées et l'image D illustre les trois bandes réunies en rouge-vert-bleu avec l'application d'un étalement linéaire. La discrimination entre les jeunes peuplements et la forêt mature est bien visible dans le TM4. Les perturbations comme les coupes forestières, les secteurs brûlés et les chemins sont bien différenciées dans le TM3 et TM5. L'image multibande est un mélange des pixels des trois bandes sélectionnées. Cette image peut résulter en une vision pouvant offrir jusqu'à 16 777 216 millions ( $256^3$ ) de couleurs.

## IMAGES LANDSAT-TM

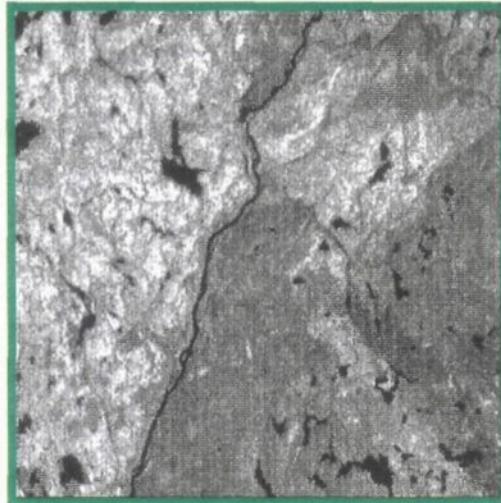
A

TM 3  
(Visible rouge)



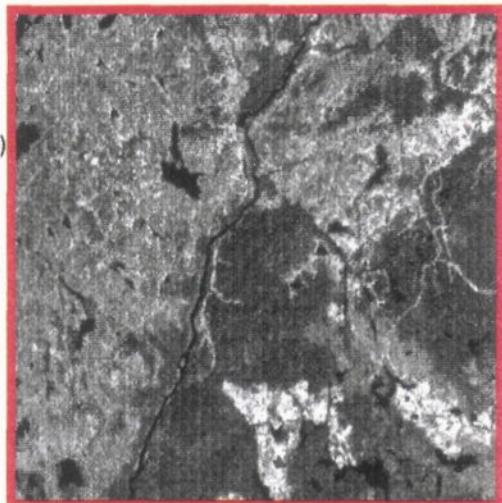
B

TM 4  
(Proche infrarouge)



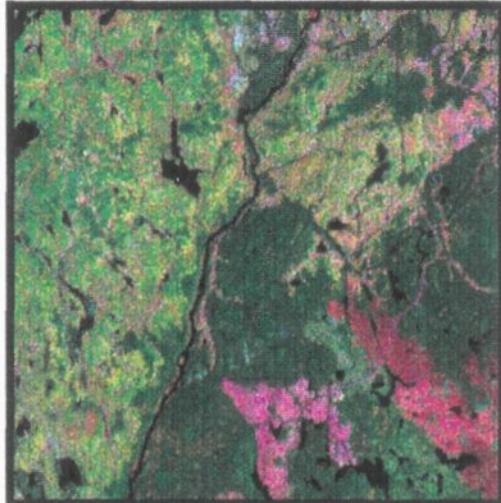
C

TM 5  
(Infrarouge moyen)



D

TM 5,4,3  
(Image multibande)



Source: Images LANDSAT-TM du 29 mai 1991

Sylvain Quessy, UQAC, Laboratoire de géomatique, 1996

Carte 4. Images des bandes TM3, TM4, TM5 et multibande TM 5,4,3.

### 3.1.3 Sélection des classes

Pour réaliser la classification, ont été rassemblés dans des classes distinctes, les pixels de l'image de même valeur. Le choix des classes, s'est fait en fonction des éléments généraux observables à première vue sur l'image LANDSAT. Quelques classes ont été regroupées, par exemple, les coupes forestières et les aires brûlées, les chemins et les espaces dénudés. Les classes de végétation ont été généralisées en seulement trois classes d'espèces matures, c'est-à-dire, les peuplements résineux matures, les peuplements mélangés à tendance résineuse matures et les peuplements mélangés à tendance feuillue matures. Les seules classes qui ont été spécifiques sont celles de la densité des tiges (nombre de tiges à l'hectare). Ces classes n'ont pas été sélectionnées selon les normes gouvernementales, mais bien selon les recommandations des intervenants de la compagnie Abitibi-Price Inc. En effet, les normes d'Abitibi-Price dans l'évaluation des densités sont de sélectionner toutes les tiges de plus de 60 cm tandis que celles du ministère des Ressources naturelles sont de sélectionner les tiges résineuses de plus de 1,5 m et les tiges feuillues de plus de 2,2 m de hauteur. Les deux types d'inventaire donnent des résultats de densité très différents.

Pour ces intervenants, le terme "densité" est utilisé pour le couvert forestier. On le divise en quatre classes selon le pourcentage de couverture au sol, en rejetant toutes les cimes.

A = 80 à 100 % de couverture

B = 60 à 80 % de couverture

C = 40 à 60 % de couverture

D = moins de 40 %

Pour cette recherche, le terme densité correspond aux traitements réalisés avec la télédétection afin de déterminer un certain nombre de tiges à l'hectare dans les jeunes peuplements résineux.

Les classes sélectionnées sont:

A- Pour les jeunes peuplements résineux

- Aires de 2 000 à 5 000 tiges/ha;
- Aires de 5 000 à 10 000 tiges/ha;
- Aires de 10 000 à 25 000 tiges/ha ;
- Aires de 25 000 à 35 000 tiges/ha;
- Aires de 35 000 tiges/ha et plus;

## B- Pour les autres

- Forêt résineuse mature;
- Forêt mélangée mature à tendance résineuse;
- Forêt mélangée mature à tendance feuillue;
- Coupe forestière et aire brûlée;
- Chemin et espace dénudé;
- Tourbière et marécage;
- Épidémie;
- Hydrographie;
- Aire non-classifiée.

### **3.1.4 Zones d'entraînement**

Les zones d'entraînement sont des tracés faits sur l'image satellitaire correspondant à chaque classe d'objets identifiée sur le terrain, sur les cartes ou sur les photographies aériennes. Le choix des zones d'entraînement pour la classification, c'est-à-dire, les secteurs où seront sélectionnés les pixels qui serviront au calcul des statistiques, est fonction du choix des classes. Pour chaque classe, le nombre de zones variera selon la complexité de la classe et selon la disponibilité des données précises du terrain, i.e. inventaire de régénération naturelle.

Par exemple, pour la classe de l'eau, plusieurs zones ont été circonscrites, surtout dans les rivières, où la signature spectrale est souvent différente d'une rivière à l'autre. Les paramètres de cette variation spectrale peuvent être l'écoulement, la largeur de la rivière, la profondeur, la morphologie et la sédimentation. La présence de rapides dans une rivière démontrera une signature différente. Ce sont tous des critères dont il faut tenir compte dans le choix des zones d'entraînement. Les lacs sont plus faciles à classifier; ils ont une eau stagnante et la signature spectrale ne varie pas beaucoup. Les classes de tourbières, de forêts résineuses matures et de coupes forestières requièrent moins de zones car les signatures spectrales et les niveaux de brillance ne varient pas beaucoup entre eux dans ces secteurs. Pour la classe de la forêt mélangée mature à tendance résineuse, un choix précis a été fait pour ce type de peuplement à partir de cartes forestières. Les zones d'entraînement ont été sélectionnées dans des secteurs indiqués MB5, c'est-à-dire, mélangé à densité B (entre 60 et 80 %) et à hauteur 5 (entre 4 et 7m). Le grand nombre de sites pour les chemins est dû à la signature très variée selon que les chemins soient très larges comme les chemins forestiers primaires ou peu larges comme les chemins tertiaires servant de passage à la machinerie de débusquage. Ces deux types de chemins auront une brillance différente et c'est pour cette raison qu'un plus grand nombre de zones d'entraînement ont été tracées pour cette classe.

Pour les classes de densité (le dénombrement de tiges de résineux à l'hectare dans les jeunes peuplements), ce sont les données précises d'inventaires qui ont été utilisées (carte 5). C'est

la raison pour laquelle une série de zones d'entraînement plus petites ont été sélectionnées. Ce sont des zones qui ont été inventoriées sur le terrain avec la prise de parcelles-échantillons à des distances équidistantes de 50 m, le tout sur des virées continues. La distance entre les virées est répartie uniformément sur le terrain. Ces données font partie des inventaires effectués par la compagnie Abitibi-Price Inc. pour les projets des travaux précommerciaux de 1994 et 1995.

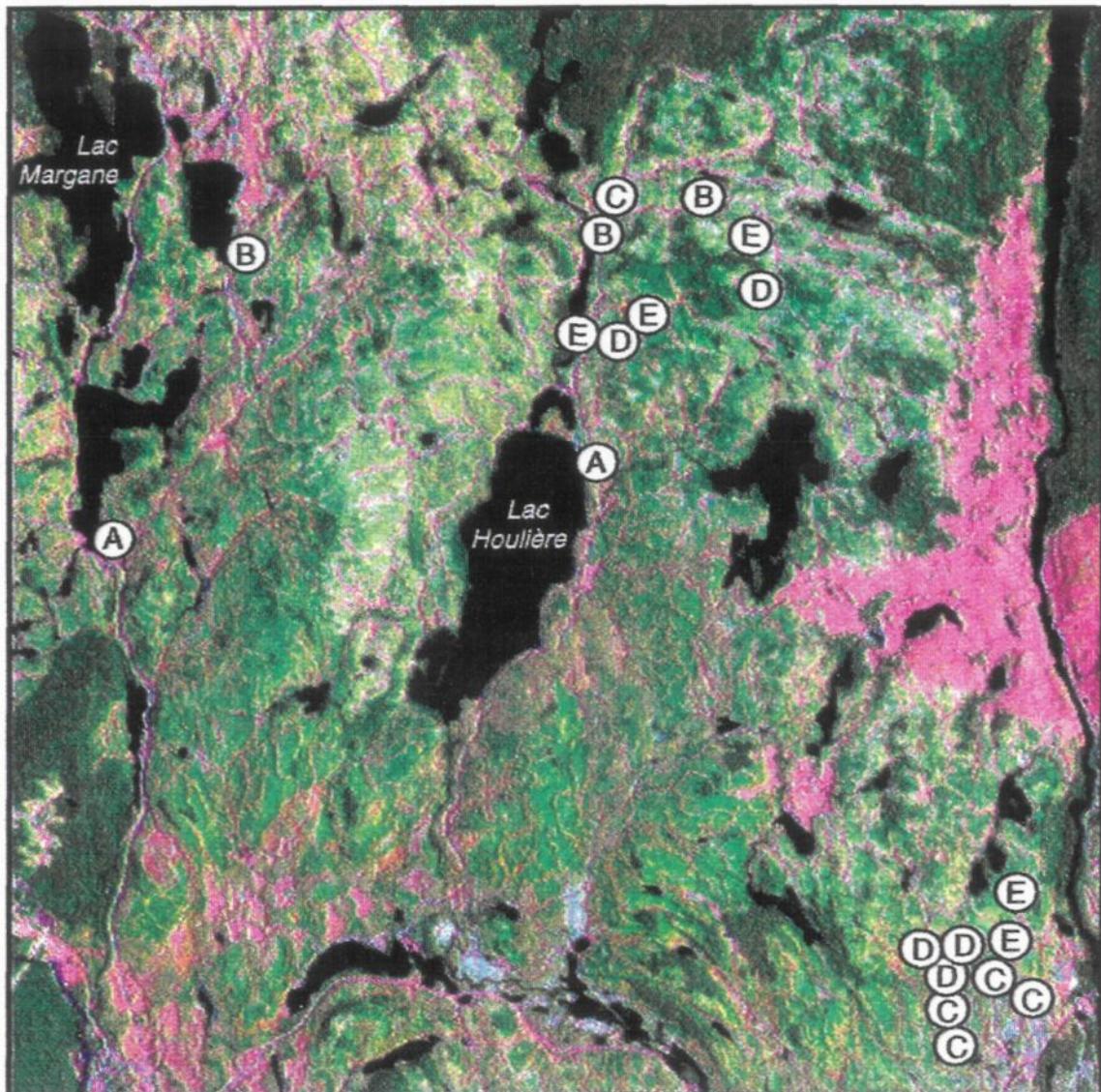
L'aspect visuel de l'image est important dans la sélection des zones d'entraînement. La figure 11 nous affiche les niveaux de gris de chacune des trois bandes utilisées pour la classification à partir de la sous-image brute, sans étalement de 2 360 lignes par 4 300 pixels. Le graphique de la bande TM3 indique une moyenne de 58,941 pour un écart-type de 29,294. Le premier pic dont le pourcentage de brillance est le plus élevé dans le visible est celui de l'eau. Le deuxième graphique montre les niveaux de gris de la bande TM4. Le pic possédant le maximum de brillance (100 %) appartient aux espèces végétales. La moyenne des valeurs de brillance est de 53,135 avec un écart-type de 19,942. Les niveaux de gris de la bande TM5 indiquent une moyenne de 27,022 avec écart-type de 8,303. Le pic visible sur le graphique est celui de la teneur en eau des feuilles.

Les grandes variations entre les écart-types viennent du fait que les calculs tiennent compte des intensités de pixels de tous les phénomènes de l'image, que ce soit l'eau dont les valeurs en ton de gris sont faibles entre 0 et 20 environ ou les espaces dénudés dont les valeurs en

ton de gris dépassent régulièrement 100 dans le visible. Les calculs de ces statistiques ont été effectués sur une analyse de 10 148 000 pixels. L'utilisation de ces statistiques sans modifications amène une difficulté d'identification des phénomènes. Suite à cela, l'application d'un rehaussement linéaire sur l'image a permis de modifier les données statistiques des pixels pour avoir une meilleure représentation visuelle à l'écran. L'étalement linéaire de contraste consiste à la sélection des valeurs extrêmes de gris de tous les pixels et distribue ces valeurs proportionnellement sur toute l'image. Sans contraste, il est difficile de différencier les phénomènes observables sur les images satellitaires.

Le tableau VIII présente les statistiques des signatures spectrales des bandes TM3, TM4 et TM5 pour chacune des zones d'entraînement des classes de densité des tiges. La remarque la plus explicite de ce tableau est l'approximation des valeurs pour chacune des bandes et cela s'applique à toutes les classes. Plus l'écart-type est petit, moins il y aura possibilité de confusion. Ce qui porte à croire que l'utilisation de la bande TM5 n'était pas la plus appropriée. Mais la moyenne de brillance semble cependant relativement élevée pour chacune des classes dans ce canal, ce qui vient compenser la valeur élevée des écart-types.

## LOCALISATION DES ZONES D'ENTRAÎNEMENT SÉLECTIONNÉES POUR LES CLASSES DE DENSITÉ



- Ⓐ 2 000 à 5 000 t/ha
- Ⓑ 5 000 à 10 000 t/ha
- Ⓒ 10 000 à 25 000 t/ha
- Ⓓ 25 000 à 35 000 t/ha
- Ⓔ 35 000 t/ha et plus

Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

Carte 5. Localisation des zones d'entraînement pour les classes de densité des tiges.

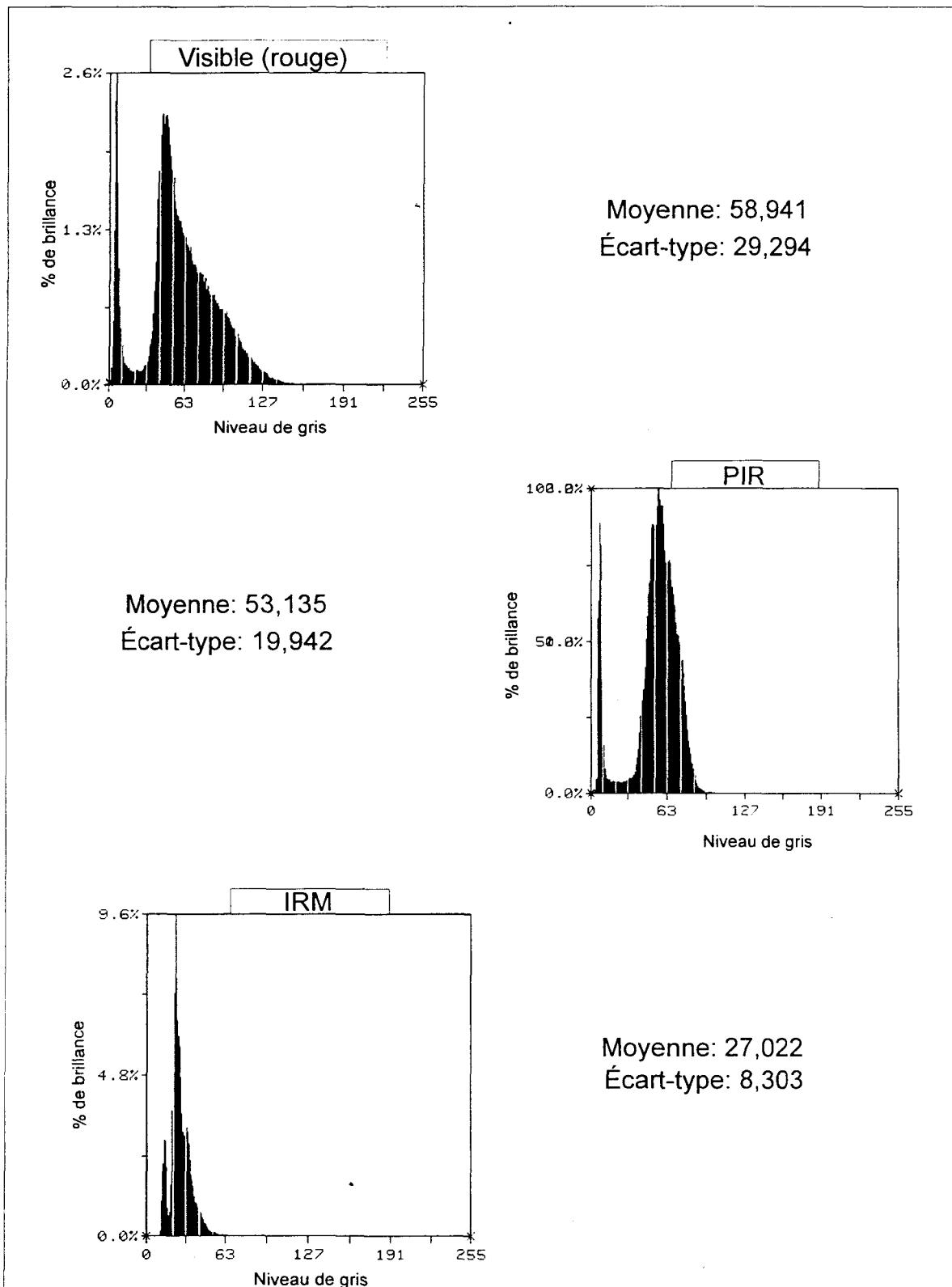


Figure 11. Intensité des niveaux de gris de la sous-image brute (sans étalement).

Tableau VIII. Signature spectrale de chacune des classes de densité des tiges  
(selon le contenu des zones d'entraînement)

Classe	Bandé	Moyenne	Médiane	Écart-type
2 000 à 5 000	TM 3	32,19	33	1,36
	TM 4	67,87	69	3,14
	TM 5	82,00	83	4,17
5 000 à 10 000	TM 3	34,26	34	3,00
	TM 4	73,73	73	5,81
	TM 5	85,63	87	8,25
10 000 à 25 000	TM 3	33,03	33	2,26
	TM 4	77,16	77	3,64
	TM 5	81,43	81	8,94
25 000 à 35 000	TM 3	31,30	31	1,86
	TM 4	75,36	75	3,09
	TM 5	73,02	74	6,71
35 000 et +	TM 3	32,70	32	4,15
	TM 4	78,91	79	5,99
	TM 5	78,00	76	12,38

### 3.2 Traitement numérique de l'image satellitaire pour déterminer la densité des tiges

#### 3.2.1 Logiciel de télédétection

La recherche nous amène à utiliser des appareils informatiques de plus en plus sophistiqués, tant pour les calculs des statistiques que pour l'analyse des cartes. Le Laboratoire de télédétection et de géomatique de l'UQAC possède des outils informatiques qui sont à la fine pointe de la technologie actuelle et ce, tant pour le traitement de l'information que pour

l'impression. Le logiciel PCI (version 6.0) est désigné pour traiter bon nombre de données numériques. C'est un système de traitement d'images qui peut utiliser des données de vidéographie aérienne ou satellitaire (Using PCI Software, 1993). Les données les plus souvent utilisées avec PCI au Laboratoire sont celles des satellites LANDSAT (LAND SATellite), NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration), et SPOT (Satellite Pour l'Observation de la Terre). Les données aériennes multispectrales par balayage et les données vectorielles numériques sont aussi utilisées fréquemment.

Le logiciel peut également faire des corrections géométriques d'images et les géocoder, c'est-à-dire, les superposer à différentes projections cartographiques et échelles. Une fois géocodées, les données peuvent être introduites dans un système d'information à référence spatiale ou géographique. L'une des particularités du logiciel PCI, est le nombre de programmes variés utilisés pour la classification satellitaire et aérienne multispectrale. Celles-ci sont basées sur les signatures spectrales de différents types de couvert terrestre. La possibilité d'exécuter des rehaussements d'images en leur donnant plus de clarté pour l'interprétation visuelle est un autre aspect important de ce logiciel. PCI utilise plusieurs interfaces. Pour la réalisation du projet, les interfaces EASI (Engineering Analysis and Scientific Interface) et IMAGEWORKS ont été utilisées. Le logiciel PCI était installé sur une station de travail SUN SPARC 20 qui utilisait l'environnement SOLARIS sur un système d'exploitation UNIX.

### 3.2.2 Classification dirigée

La classification dirigée a pour but d'utiliser la connaissance des données de l'utilisateur et d'entraîner le logiciel à reconnaître les classes en valeur de pixels particulière. La classification est un aspect important de la télédétection. Le rassemblement des données de cette classification sert à interpréter de façon plus globale les phénomènes territoriaux observables sur l'image satellite. Les pixels de l'image sont regroupés dans des classes où ils peuvent être superposés sur la donnée originale. Une bonne connaissance du terrain est requise pour valider les résultats.

Pour réaliser l'étude, c'est la classification par maximum de vraisemblance qui a été sélectionnée. Après avoir fait un test entre plusieurs classifications (maximum de vraisemblance, distance minimale et parallélépipèdes) les résultats ont été beaucoup plus concluants pour la classification par maximum de vraisemblance. La méthodologie, les statistiques et les résultats de cette classification sont présentés au chapitre IV.

La classification par maximum de vraisemblance évalue quantitativement la variance et la covariance de la réponse spectrale pour déterminer la classe d'un pixel. Elle utilise le théorème de Bayes qui permet d'optimiser la probabilité du succès dans la séparation de la signature spectrale (Bonn & Rochon, 1993). Pour ce faire, un nuage de points Gaussien (distribution normale) est formé. La distribution de cette réponse spectrale est décrite par la

moyenne des vecteurs et par la matrice de covariance (Using PCI Software, 1993). C'est avec le traitement de ces statistiques que le logiciel peut calculer la probabilité qu'un pixel se retrouve dans une certaine classe.

### 3.2.3 Filtre spatial

Après la classification, la dispersion de certains pixels fait en sorte que la carte est difficile à interpréter. On doit alors procéder à un filtrage des données. Le filtre sert à éliminer le bruit (interférence lors du captage) ou à faire ressortir les textures en éliminant les données non utiles qui masquent l'information (Bonn & Rochon, 1993). Selon une étude réalisé par Pain & Mepham (1986), le filtre de mode serait un des filtres les plus efficaces. Le filtre de mode a donc été utilisée pour l'aide à l'interprétation des données. Ce filtre consiste à calculer le mode (variables qui ont la plus forte fréquence) des valeurs de ton de gris avec la fenêtre carrée ou rectangulaire qui entoure chaque pixel. On a utilisé le filtre 3 x 3 avec la fonction qui permettait d'empêcher l'élimination des lignes minces i.e., ruisseaux et routes. Ce type de filtre prend le pixel central et le clarifie seulement si la valeur de ton de gris de ce pixel central se retrouve à cet endroit moins de trois fois avec une fenêtre de filtre 3 x 3. Pour diminuer le nombre élevé de polygones créés par la classification, les polygones de moins de six pixels (180 m) ont été éliminés. Chacun des polygones éliminés était redistribué dans la classe la plus près.

### 3.2.4 Transformation sous la forme de vecteurs

À la suite de la classification forestière, effectuée avec le système de traitement d'images, on devait exporter le contenu de chaque polygone et les contours dans le système d'information géographique. Pour réaliser cette expérience, on devait transformer les matrices de la classification sous la forme de vecteurs. Le logiciel PCI a permis de faire le contour de chacun des polygones en conservant les données intérieures des polygones, c'est-à-dire, les lignes et les points. La carte 6 montre le résultat des cartes classifiées et vecteurisées en polygones par le contour des classes, ainsi qu'une représentation à l'écran de l'application utilisée.

Somme toute, l'utilisation des moyens offerts par la télédétection (image satellitaire, rehaussement multibande, classification, filtre), à contribué à exécuter les traitements nécessaires pour déterminer les densités des jeunes peuplements et à préparer les données à l'exportation dans le système d'information géographique.

## TRANSFORMATION DE LA CLASSIFICATION SOUS LA FORME DE VECTEURS

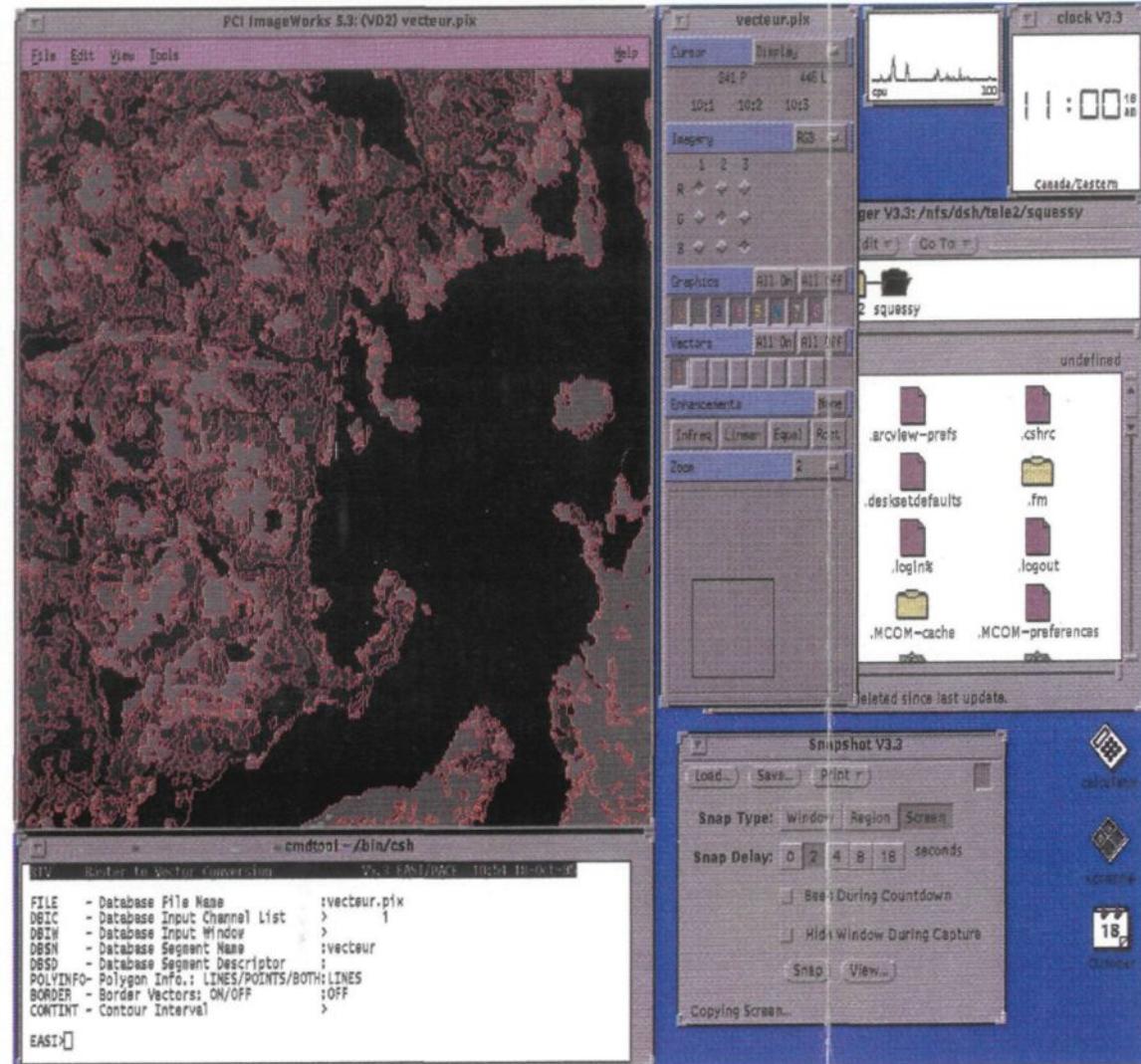
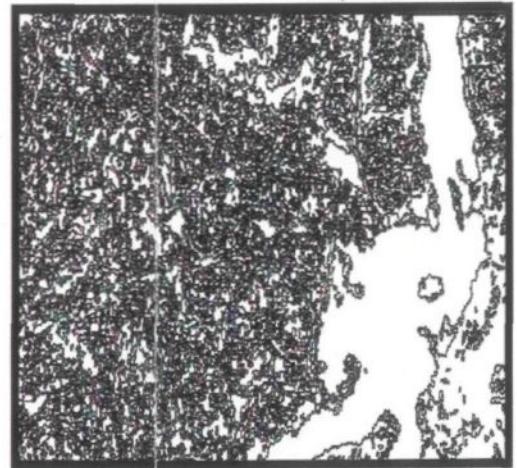


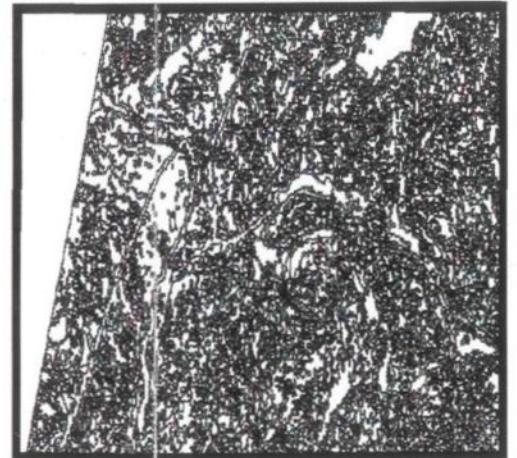
Photo écran du logiciel Easi/Pace de PCI sur environnement UNIX.

Carte 6. Transformation de la classification sous la forme de vecteurs.

Feuillet cartographique 22E/03 S.E..



Feuillet cartographique 22E/14 S.E.



## **CHAPITRE IV**

### **RÉSULTATS DE LA CLASSIFICATION FORESTIÈRE**

#### 4.1 Classification forestière

La classification dirigée, faite par maximum de vraisemblance, a été obtenue à l'aide des 13 classes déjà mentionnées. Une partie seulement de l'image entière a été traitée, soit un territoire de 70,8 km x 129 km (2 360 pixels x 4 300 lignes). Les résultats couvrant le territoire d'Abitibi-Price Inc. sont indiqués au tableau IX. Chacune des classes possède son code, le nombre de pixels calculés faisant partie de la classe, la superficie couverte en hectares et le pourcentage de l'image qu'elle couvre. Les résultats découlant de la classification font suite à la méthodologie décrite dans le chapitre III.

Tableau IX. Classification de l'image du territoire d'Abitibi-Price.

Classes	Code	Pixels	Hectares	% Image
Aire de 2 000-5 000 t/ha	70	443 207	39 888,63	4,37
Aire de 5 000-10 000 t/ha	80	612 211	55 098,99	6,03
Aire de 10 000-25 000 t/ha	90	274 298	24 686,82	2,70
Aire de 25 000-35 000 t/ha	100	260 611	23 454,99	2,57
Aire de 35 000 t/ha et +	110	83 824	7 544,16	0,83
Forêt résineuse mature	50	4 247 778	382 300,03	41,85
Forêt mélangée mature à tendance résineuse	60	655 719	59 014,71	6,46
Forêt mélangée mature à tendance feuillue	120	113 206	10 188,54	1,12
Coupe, brûlé	30	561 776	50 559,84	5,54
Chemin, espace dénudé	40	1 103 800	99 342,01	10,88
Hydrographie	10	1 453 182	130 786,38	14,32
Tourbière, marécage	20	59 691	5 372,19	0,59
Épidémie	140	256 175	23 055,75	2,52
Aire non-classifiée	0	22 522	2 026,98	0,22
Image totale		10 148 000	913 320,06	100,00

Les classes de densité des tiges qui nous intéressent, c'est-à-dire celles codées de 70 à 110 recouvrent 150 673,59 ha sur un total de 913 320,06 ha (figure 12). Les jeunes peuplements couvrent seulement 16,5 % de l'image.

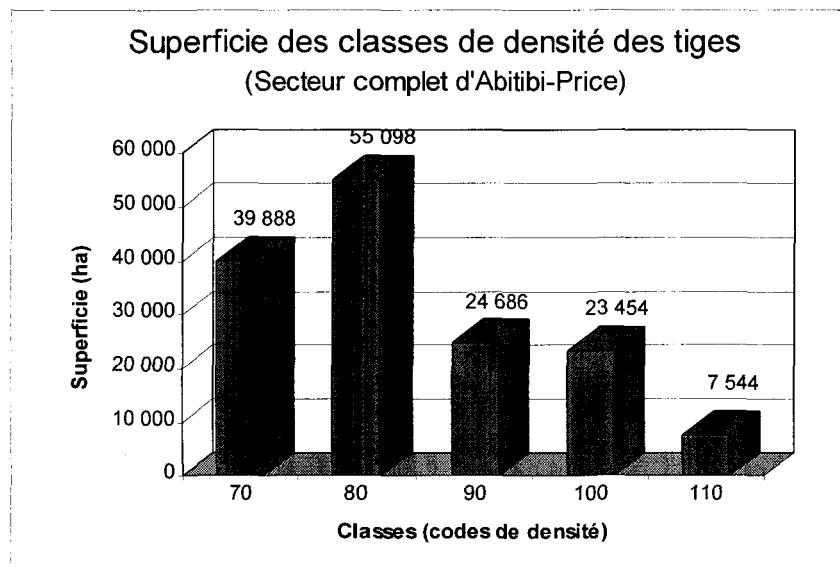


Figure 12. Superficie des classes de densité des tiges pour le secteur complet d'Abitibi-Price.

Au tableau X, la matrice de confusion indique le nombre de pixels de la zone d'entraînement  $i$  considérée affectée à la classe  $i$  (dont les caractéristiques sont calculées d'après les caractéristiques de cette même zone d'entraînement) après le passage de l'algorithme de classement par maximum de vraisemblance (Levesque, 1987). Les échantillons sur le terrain ont été obtenus à la suite de l'élaboration de quadrats de quatre mètres carrés de superficie ( $4 \text{ m}^2$ ) tandis que la classification a été réalisée avec des zones d'entraînement qui comptaient plusieurs pixels (tableau XIII). Avec l'utilisation de la

classification multibande, le logiciel employé i.e., EASI/PACE suggérait de sélectionner un minimum de 60 pixels pour des raisons mathématiques. Le nombre de pixels sélectionné dépasse largement ce niveau. Malgré une certaine confusion dans la plupart des classes, mais surtout dans les classes de densité des tiges, la classification obtenue nous semble satisfaisante. Après vérification sur le terrain des classes de densité des tiges, à des endroits différents dans les territoires étudiés, cette classification s'est avérée assez précise. Il en demeure néanmoins que les zones d'entraînement resteront toujours des interprétations visuelles et comporteront par le fait même un certain risque d'erreurs.

Avec l'aide du logiciel de traitement d'images, il a été possible d'obtenir les valeurs de la séparabilité des pixels entre chaque classe (tableau XI). La moyenne de 1,81 indique une séparabilité acceptable ce qui démontre que la classification et la méthode de sélection des classes de densité des tiges semblent pertinentes.

Les tableaux XII et XIII révèlent le nombre de zones d'entraînement utilisées pour chaque classe ainsi que le nombre de pixels traités par la classification utilisant la méthode de maximum de vraisemblance. Les classes de densité des tiges sont celles qui possèdent le moins de zones d'entraînement car ce sont les classes où ces zones étaient les plus difficiles à délimiter. Les autres classes ont été déterminées avec l'aide de cartes forestières et des données du Service de l'inventaire forestier du Gouvernement du Québec de 1987.

Tableau X. Matrice de confusion (nombre de pixels correspondant aux zones d'entraînement)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Nul	Total	
1- Hydrographie	37 105			64			1					37	17	71	37 295	
2- Tourbière, marécage		2 257		3		1	8		1				1	20	2 591	
3- Coupe, brûlé			21 517	100		5	39	3	1	1		6	1	81	21 754	
4- Chemin, espace dénudé	8	15	95	27 649	1	14	58	6	3	6	5	11	1 311	11	29 193	
5- Forêt mélangée (résineuse)			1	9	24 737	38	29	25	95	20	11		19 956	9	44 930	
6- 2 000 à 5 000 t/ha	1	5	13	33	23	27 384	76	16	21		4	5	216		27 797	
7- 5 000 à 10 000 t/ha		12	37	35	6	56	36 870	40	34	16	1	2	301		37 410	
8- 10 000 à 25 000 t/ha		1	5	22	23	26	82	21 302	90	66	19			7	21 643	
9- 25 000 à 35 000 t/ha			3	6	51	28	18	44	18 009	16	2		3	1	18 181	
10- 35 000 t/ha et +				22	41	13	22	73	102	6 664	2		40	16	6 995	
11- Forêt mélangée (feuillue)					11	16	2	2	23	3	2	4 619		12	24	4 714
12- Épidémie				3	7								2 524	101		2 635
13- Forêt résineuse mature	33			74	73				2			22	4 751	1	4 956	
Exactitude moyenne = 92,84 %																
Exactitude totale = 90,57 %																
Indice Kappa = 0,89562																
Écart-type = 0,00076																

Tableau XI. Séparabilité des signatures selon la distance de Bhattacharrya  
avec les bandes 3, 4, 5

Séparabilité moyenne	1,81176
Séparabilité minimale	0,30306
Séparabilité maximale	2,00000

Tableau XII. Nombre de zones d'entraînement utilisées pour chacune des classes  
(incluant les zones test)

Classes	Nombre de zones d'entraînement
Hydrographie	11
Tourbière, marécage	5
Coupe, brûlé	8
Chemin, espace dénudé	18
Forêt résineuse mature	8
Forêt mélangée mature à tendance résineuse	5
Forêt mélangée mature à tendance feuillue	7
Épidémie	7
Aire de 2 000 à 5 000 tiges/ha	2
Aire de 5 000 à 10 000 tiges/ha	3
Aire de 10 000 à 25 000 tiges/ha	5
Aire de 25 000 à 35 000 tiges/ha	5
Aire de 35 000 tiges/ha et plus	5

Tableau XIII. Nombre de pixels inclus dans les zones d'entraînement de chaque classe

Classes	Nombre de pixels traités
Hydrographie	37 295
Tourbière, marécage	2 591
Coupe, brûlé	21 754
Chemin, espace dénudé	29 193
Forêt résineuse mature	4 956
Forêt mélangée mature à tendance résineuse	44 930
Forêt mélangée mature à tendance feuillue	4 714
Épidémie	2 635
Aire de 2 000 à 5 000 tiges/ha	27 797
Aire de 5 000 à 10 000 tiges/ha	37 410
Aire de 10 000 à 25 000 tiges/ha	21 643
Aire de 25 000 à 35 000 tiges/ha	18 181
Aire de 35 000 tiges/ha et plus	6 995

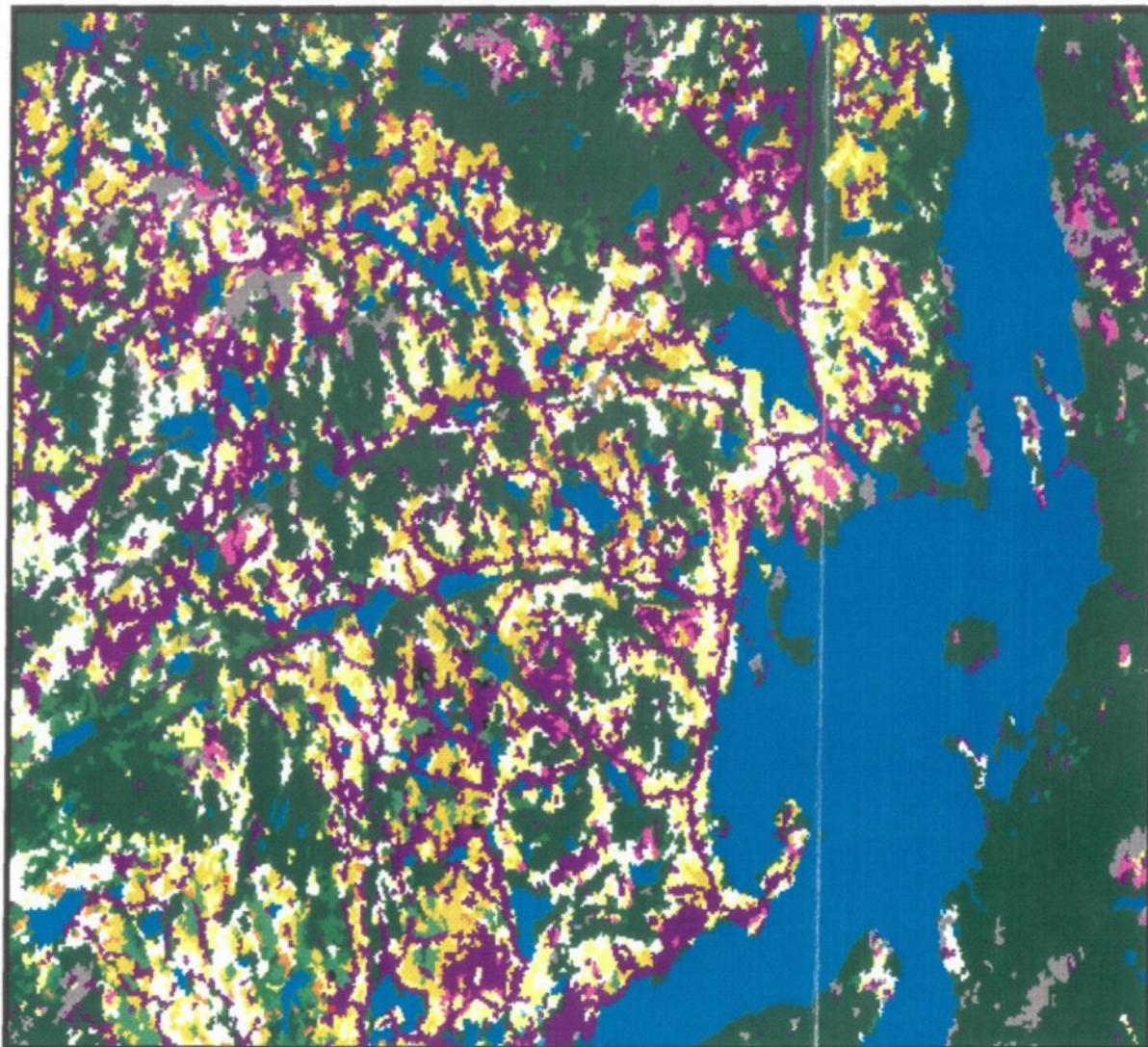
À la suite du traitement effectué sur l'ensemble du territoire, les statistiques concernant les deux feuillets cartographiques cibles soit: 22E/03 sud-est et 22E/14 sud-est ont été relevées (tableaux XIV et XV). Le secteur du Lac Onatchiway (22E/03 S.E.) démontre une bonne croissance des jeunes peuplements avec 24,82 % de couverture de territoire (6 303,78 ha). Il y a plusieurs années, ce secteur a subi des perturbations forestières, comme la coupe totale et les feux. Ce sont ces perturbations qui ont modelé le couvert. La présence élevée de résineux matures dans ce territoire, soit 30,18 %, (7 664,67 ha) s'explique par l'inaccessibilité d'une partie importante de cette région. L'eau a une présence appréciable sur ce territoire avec 19,42 % de superficie (4 932,99 ha). C'est dans ce secteur que l'on retrouve la plus grande superficie de territoire touché par les épidémies ou la défoliation avec 696,87 ha (2,74 %).

Tableau XIV. Statistiques de la classification dirigée du secteur Lac Onatchiway

Classes	Code	Pixels	Hectares	% Image
Aire de 2 000-5 000 t/ha	70	23 290	2 096,10	8,25
Aire de 5 000-10 000 t/ha	80	27 904	2 511,36	9,89
Aire de 10 000-25 000 t/ha	90	13 462	1 211,58	4,77
Aire de 25 000-35 000 t/ha	100	4 225	380,25	1,50
Aire de 35 000 t/ha et +	110	1 161	104,49	0,41
Forêt résineuse mature	50	85 163	7 664,67	30,18
Forêt mélangée mature à tendance résineuse	60	13 577	1 221,93	4,81
Forêt mélangée mature à tendance feuillue	120	3 803	342,27	1,35
Coupe, brûlé	30	6 708	603,72	2,38
Chemin, espace dénudé	40	39 065	3 515,85	13,84
Hydrographie	10	54 811	4 932,99	19,42
Tourbière, marécage	20	563	50,67	0,20
Épidémie	140	7 743	696,87	2,74
Aire non-classifiée	0	704	63,36	0,25
Image totale		282 179	25 396,11	100,00

La figure 13 démontre la superficie des classes de densité des tiges pour le secteur du Lac Onatchiway. On peut remarquer que les deux premières classes soit: 2 000 à 5 000 et 5 000 à 10 000 t/ha, sont celles dont les superficies sont les plus élevées; la raison de ceci repose sur le fait que ce secteur ne possède pas beaucoup de surface à haute densité de résineux.

## CLASSIFICATION FORESTIÈRE EN CLASSES DE DENSITÉ (TIGES/HA)



■	2 000 à 5 000 t/ha, (2 096 ha)
■	5 000 à 10 000 t/ha, (2 511 ha)
■	10 000 à 25 000 t/ha, (1 212 ha)
■	25 000 à 35 000 t/ha, (380 ha)
■	35 000 t/ha et plus, (104 ha)
■	Forêt résineuse dense, (7 665 ha)
■	Forêt mélangée à tendance résineuse, (1 222 ha)
■	Forêt mélangée à tendance feuillue, (342 ha)
■	Coupe, brûlé, (604 ha)
■	Chemin, espace dénudé, (3 516 ha)
■	Hydrographie, (4 933 ha)
■	Tourbière, marécage, (51 ha)
■	Épidémie, (697 ha)
■	Aire non-classifiée

**Secteur Lac Onatchiway**

**22E/03 sud-est**

0 1,5 3 km

Source: Image LANDSAT-TM du 29 mai 1991, classification par maximum de vraisemblance.

Carte 7. Classification du secteur Lac Onatchiway.

Sylvain Quessy, UQAC, 1998  
Laboratoire de géomatique

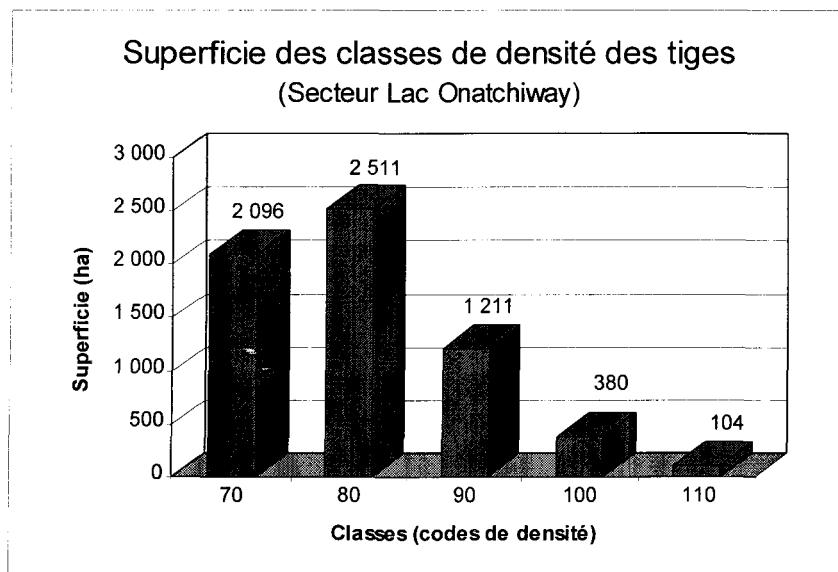


Figure 13. Superficie des classes de densité des tiges pour le secteur du Lac Onatchiway.

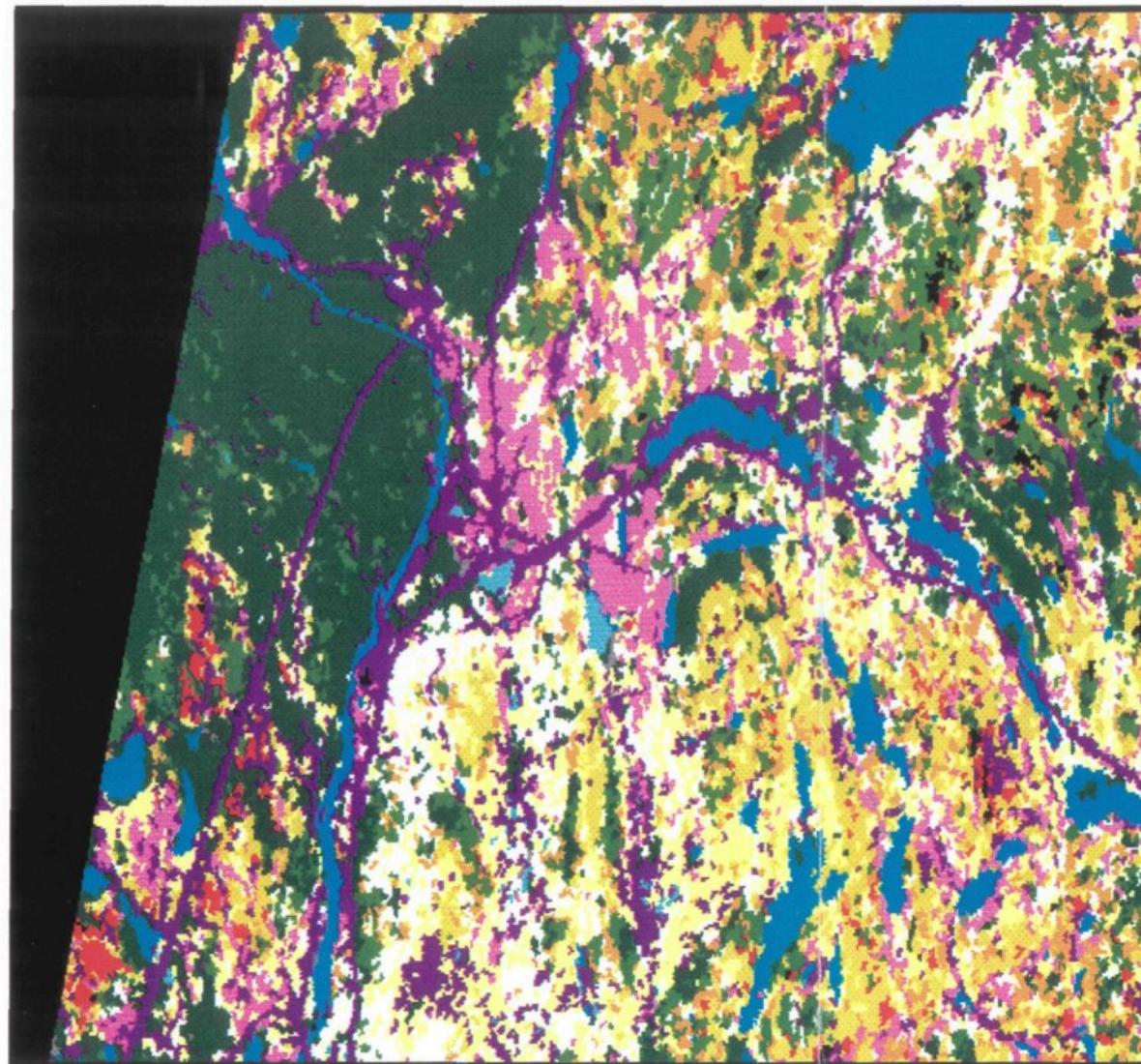
Le secteur du Lac Houlière est celui possédant la plus grande superficie de jeunes peuplements (tableau XV). Son total de 42,67 % du territoire (9 710,28 ha) démontre que la très grande partie du territoire a été exploitée et que présentement, c'est un territoire potentiellement apte à subir un traitement d'éclaircie. La présence de plans d'eau et de forêts denses matures n'est pas aussi considérable que le secteur du Lac Onatchiway, mais doit être considérée. Au total, 30 % des peuplements sont matures (6 845,04 ha) et l'eau recouvre 5,78 % du territoire pour une superficie de 1 314,36 ha. Pour chacun des territoires, le pourcentage d'aires non classifiées est faible avec 0,25 % et 0,67 %, ce qui démontre une bonne représentativité des classes.

Tableau XV. Statistiques de la classification dirigée du secteur Lac Houlière

Classes	Code	Pixels	Hectares	% Image
Aire de 2 000-5 000 t/ha	70	26 753	2 407,77	10,58
Aire de 5 000-10 000 t/ha	80	36 792	3 311,28	14,55
Aire de 10 000-25 000 t/ha	90	20 574	1 851,66	8,14
Aire de 25 000-35 000 t/ha	100	17 451	1 570,59	6,90
Aire de 35 000 t/ha et +	110	6 322	568,98	2,50
Forêt résineuse mature	50	48 566	4 370,94	19,21
Forêt mélangée mature à tendance résineuse	60	25 130	2 261,70	9,94
Forêt mélangée mature à tendance feuillue	120	2 360	212,40	0,93
Coupe, brûlé	30	18 279	1 645,11	7,23
Chemin, espace dénudé	40	30 272	2 724,48	11,97
Hydrographie	10	14 604	1 314,36	5,78
Tourbière, marécage	20	1 829	164,61	0,72
Épidémie	140	2 207	198,63	0,87
Aire non-classifiée	0	1 703	153,27	0,67
Image totale		252 842	22 755,78	100,00

Pour le secteur du Lac Houlière, la figure 14 sur la superficie des classes de densité des tiges illustre également une densité plutôt faible par le grand nombre d'hectares des deux premières classes. Mais comparativement à l'autre secteur, les autres classes, soit: 10 000 à 25 000, 25 000 à 35 000 et 35 000 et plus, semblent posséder de plus grandes superficies.

## CLASSIFICATION FORESTIÈRE EN CLASSES DE DENSITÉ (TIGES/HA)



Source: Image LANDSAT-TM du 29 mai 1991, classification par maximum de vraisemblance.

Carte 8. Classification du secteur Lac Houlière.

Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

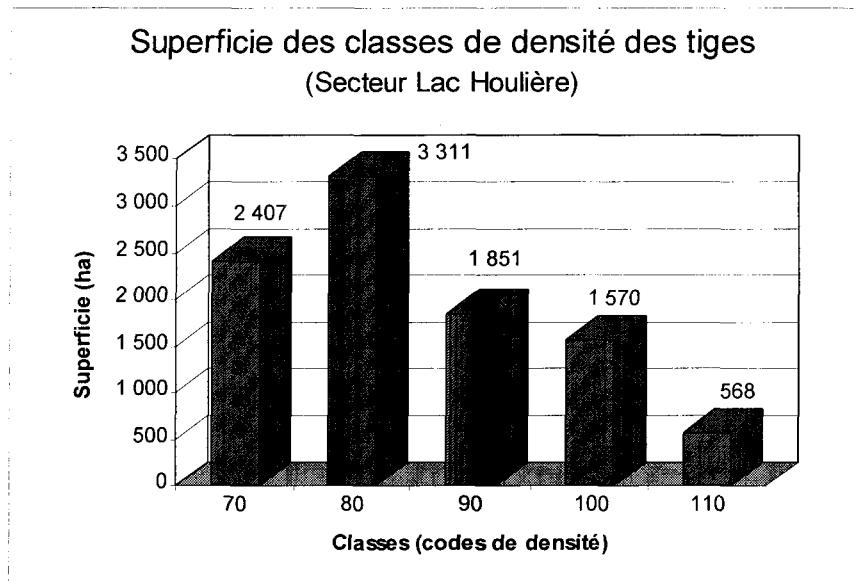


Figure 14. Superficie des classes de densité des tiges pour le secteur du Lac Houlière.

#### 4.2 Validation de la classification

Des vérifications ont été faites sur le terrain pour les deux territoires afin de valider les résultats de la classification obtenue par l'imagerie satellitaire. Les données vérifiées sont celles des classes de densité déterminées par la classification en nombre de tiges de résineux à l'hectare. Les données servant de validation pour le secteur du Lac Onatchiway proviennent d'un inventaire réalisé à l'automne 1995, tandis que celles pour le secteur du Lac Houlière proviennent des données d'inventaire de régénération naturelle réalisé pour la coupe d'éclaircie précommerciale à l'été 1993.

L'inventaire consistait à déterminer le nombre de tiges à l'hectare par des relevés réalisés dans des parcelles circulaires de 1/2 500 d'hectare (4 m<sup>2</sup>), c'est-à-dire dans rayon de 1,13 m et ce, à tous les 50 m. La distance des virées sélectionnées variait de 250 m à 900 m. Lors de l'inventaire, toutes les tiges résineuses et feuillues plus grandes que 60 cm présentes dans le rayon de 1,13 m étaient dénombrées. Deux compilations ont été faites, une avec le nombre de tiges totales à l'hectare et l'autre avec la moyenne. Ces deux compilations ont été réalisées d'une part avec les deux peuplements inventoriés, c'est-à-dire les feuillus et les conifères, et d'autre part avec seulement les tiges résineuses (tableaux XVII et XVIII).

Les moyennes des tiges de résineux vérifiées sur le terrain comparées à celles démontrées par la classification forestière de l'image satellitaire ont été faites selon la méthodologie suivante. Dans un premier temps, les lignes des virées des inventaires terrain ont été intégrées à la classification forestière. Ensuite, chacun des pixels situés dans la ligne de la virée et les pixels adjacents à ceux-ci ont été sélectionnés pour le calcul des moyennes (figure 15).

Les virées de chaque bloc ont été regroupées afin d'obtenir une moyenne globale du terrain inventorié (tableaux XVII et XX). Pour le secteur du Lac Onatchiway, deux blocs sur cinq ont des moyennes situées dans la même classe, autant par la classification forestière que par la vérification terrain (tableau XVIII).

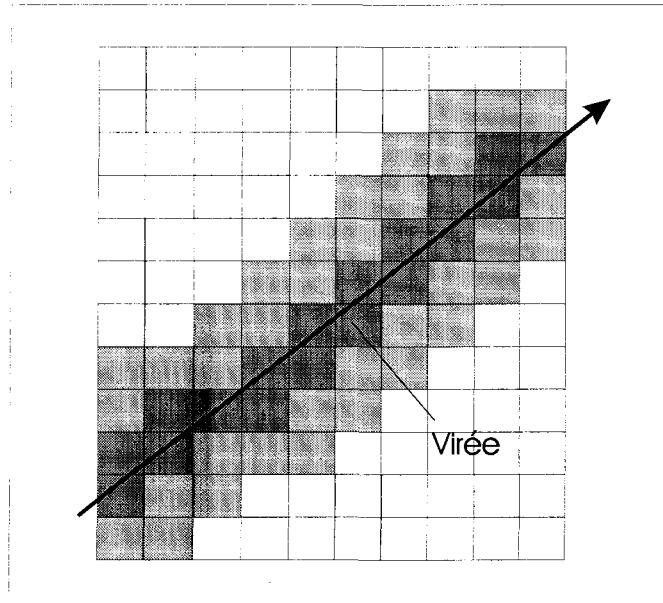


Figure 15. Exemple de calcul des moyennes des pixels de la classification par rapport au relevé terrain.

Pour le bloc 1, les deux moyennes se situent dans la classe 5 000 à 10 000 tiges de résineux à l'hectare avec une différence de 1 412 tiges. Le bloc 4 a également ses moyennes de tiges dans une même classe, celle de 10 000 à 25 000 tiges résineuses à l'hectare. Les moyennes des blocs 2, 3 et 5 ne font pas partie de la même classe de la classification et de la vérification terrain. Il existe toujours une différence. Pour le bloc 2, la réalité terrain indique une moyenne de 4 500 tiges de résineux à l'hectare (classe 2 000 à 5 000 t/ha) tandis que la classification indique 7 454 (classe 5 000 à 10 000 t/ha). Il ne manque que 500 tiges pour que les deux soient dans la même classe. Dans le bloc 3, la différence est de 785 tiges pour que les moyennes soient dans la même classe. Pour le bloc 3, le manque est de 1 146 tiges de résineux. Donc, pour le secteur du Lac Onatchiway, on peut constater que les moyennes de la réalité terrain et celles de la classification forestière sont réalistes.

Cette réalité est encore plus évidente dans le secteur du Lac Houlière où trois des quatre blocs obtiennent des moyennes de validation terrain et de classification forestière comparables. Elles se retrouvent donc dans une même classe (tableau XXI). Seul le bloc 2 n'a pas ses moyennes dans la même classe. La moyenne de la vérité terrain est de 15 192 tiges de résineux à l'hectare et la moyenne de la classification terrain est de 9 688 tiges de résineux à l'hectare. Il ne manque que 312 tiges à la moyenne de la classification pour se retrouver dans la classe de la réalité terrain, soit celle de 10 000 à 25 000 tiges à l'hectare.

Tableau XVI. Données d'inventaires, secteur Lac Onatchiway

Bloc	Virée	Distance (mètres)	Tiges dénombrées	Résineux	Feuillus	Tiges totales	Moyenne totale	Tiges de Résineux	Moyenne résineux
1	1	300	65	22	43	162 500	27 083	55 000	9 167
1	2	300	36	15	21	90 000	15 000	37 500	6 250
1	3	250	17	15	2	42 500	10 625	37 500	9 375
2	1	450	37	15	22	92 500	10 278	37 500	4 167
2	2	300	24	12	12	60 000	10 000	30 000	5 000
3	1	350	51	36	15	127 500	18 214	90 000	12 857
3	2	350	98	33	65	245 000	35 000	82 500	11 787
4	1	300	90	36	54	225 000	37 500	90 000	15 000
5	1	350	60	16	44	147 500	21 071	40 000	5 714
5	2	300	54	12	42	135 000	22 500	30 000	5 000

Source: Inventaire 1995.

Tableau XVII. Regroupement des blocs inventoriés secteur Lac Onatchiway

Bloc	Distance (mètres)	Tiges dénombrées	Résineux	Feuillus	Tiges totales	Moyenne totale	Tiges de Résineux	Moyenne résineux
1	850	118	52	66	295 000	17 353	130 000	7 647
2	750	61	27	34	152 500	10 167	67 500	4 500
3	700	149	69	80	372 500	26 607	172 500	12 321
4	300	90	36	54	225 000	37 500	90 000	15 000
5	650	114	28	86	282 500	21 731	70 000	5 385

Source: Inventaire 1995.

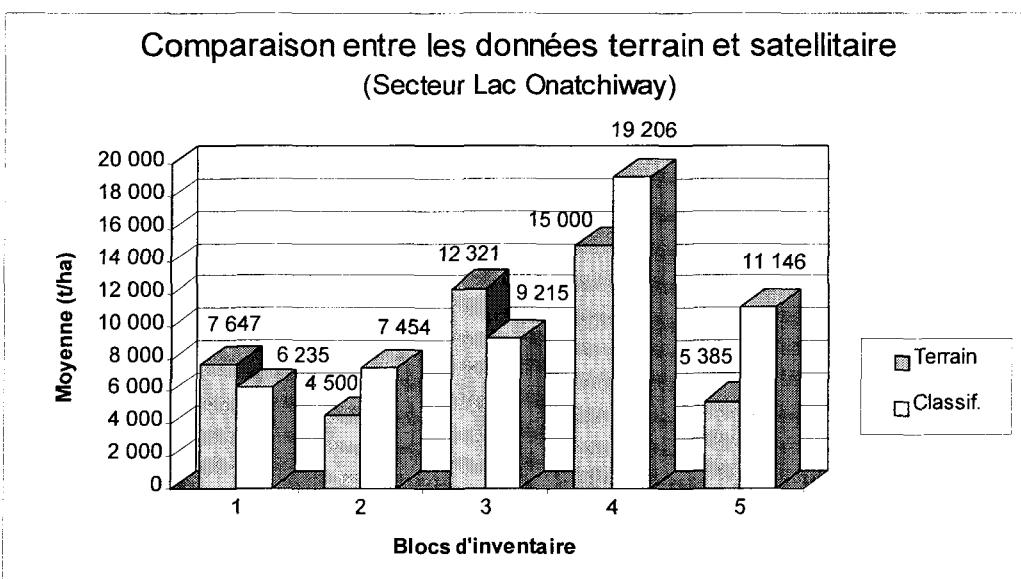


Figure 16. Comparaison entre les données terrain et les données de la classification satellitaire pour le secteur du Lac Onatchiway.

Tableau XVIII. Données des essences résineuses inventoriées sur le terrain pour le secteur du Lac Onatchiway

Bloc	Tiges de résineux	Tiges totales	Moyenne terrain	Moyenne classification	différence + / -
1	52	130 000	7 647	6 235	- 1 412 (18,5 %)
2	27	67 500	4 500	7 454	+ 2 954 (65,6 %)
3	69	172 500	12 321	9 215	- 3 106 (25,2 %)
4	36	90 000	15 000	19 206	+ 4 206 (28,0 %)
5	28	70 000	5 385	11 146	+ 5 761 (107,0 %)
Total	212	530 000	44 853	53 256	+ 8 403 (18,7 %)

Source: Inventaire 1995 et classification forestière de l'image LANDSAT du 29 mai 1991.

Tableau XIX. Données d'inventaire, secteur Lac Houlière

Bloc	Virée	Distance (mètres)	Tiges dénombrées	Résineux	Feuillus	Tiges totales	Moyenne totale	Tiges de résineux	Moyenne résineux
1	1	600	180	114	66	450 000	37 500	285 000	23 750
2	1	350	100	48	52	250 000	35 714	120 000	17 143
2	2	300	63	31	32	157 500	26 250	77 500	12 917
3	1	350	52	51	1	130 000	18 571	127 500	18 214
3	2	900	167	147	20	417 500	23 194	367 500	20 417
4	1	450	74	70	4	185 000	20 556	175 000	19 444
4	2	600	131	90	41	327 500	27 292	225 000	18 750

Source: Inventaire 1993.

Tableau XX. Regroupement des blocs inventoriés, secteur Lac Houlière

Bloc	Distance (mètres)	Tiges dénombrées	Résineux	Feuillus	Tiges totales	Moyenne totale	Tiges de résineux	Moyenne résineux
1	600	180	114	66	450 000	37 500	285 000	23 750
2	650	163	79	84	407 500	31 346	197 500	15 192
3	1 250	219	198	21	547 500	21 900	495 000	19 800
4	1 050	205	160	45	512 500	24 405	400 000	19 048

Source: Inventaire 1993.

Tableau XXI. Données des essences résineuses inventoriées sur le terrain pour le secteur du Lac Houlière

Bloc	Tiges de résineux	Tiges totales	Moyenne terrain	Moyenne classification	différence + / -
1	114	285 000	23 750	23 650	- 50 (0,2 %)
2	79	197 500	15 192	9 688	- 5 504 (36,2 %)
3	198	495 000	19 800	21 463	+ 1 663 (8,4 %)
4	160	400 000	19 048	20 745	+ 1 697 (8,9 %)
Total	551	1 377 500	77 790	75 546	- 2 244 (2,9 %)

Source: Inventaire 1993 et classification forestière de l'image LANDSAT du 29 mai 1991.

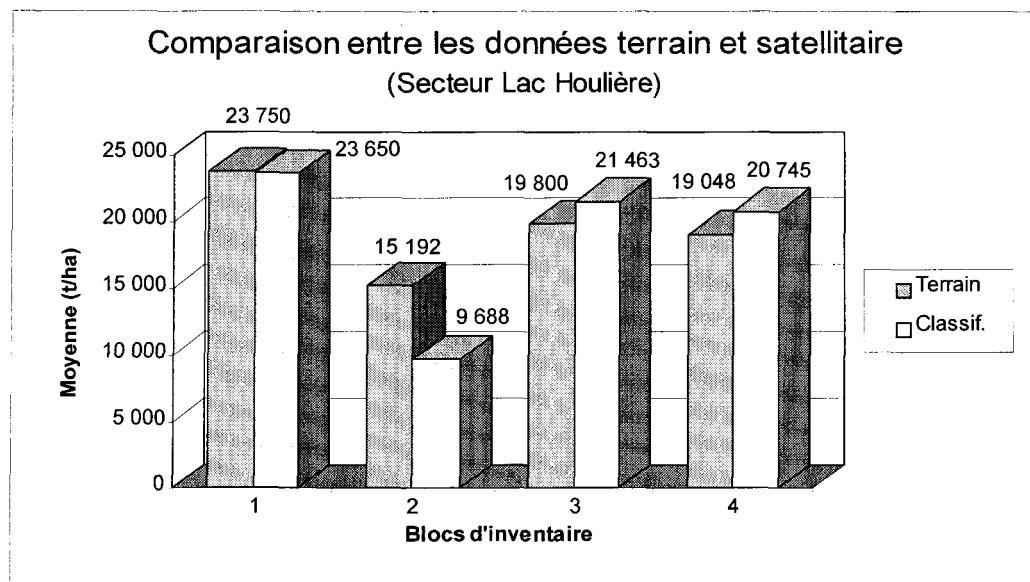


Figure 17. Comparaison entre les données terrain et les données de la classification satellitaire pour le secteur du Lac Houlière.

## VÉRIFICATION DE TERRAIN (SECTEUR LAC ONATCHIWAY)

Classification forestière

A

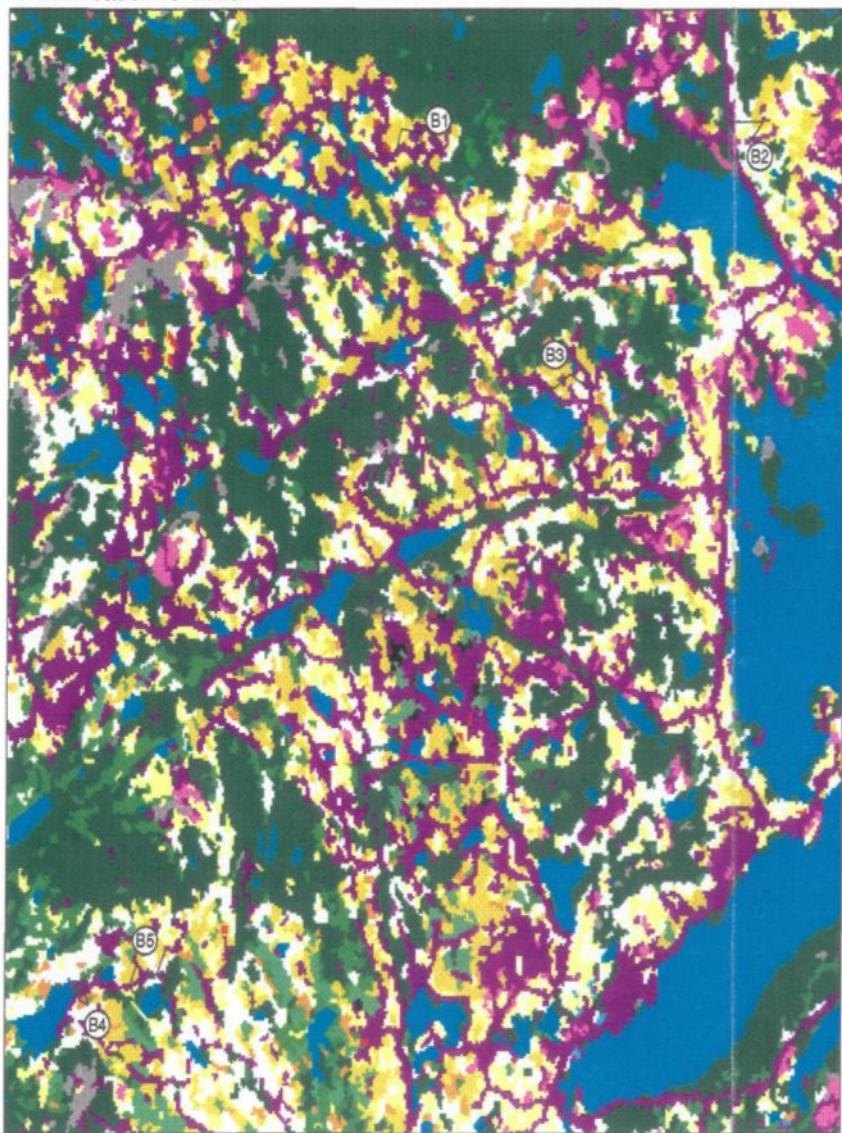
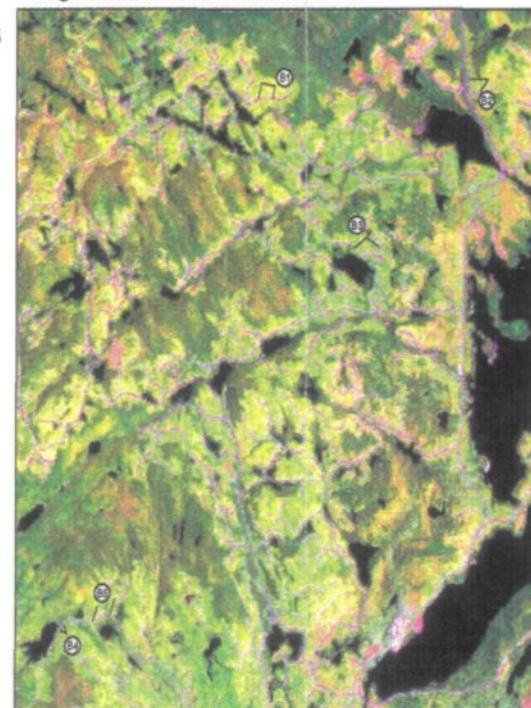


Image multibande LANDSAT-TM

B



Légende de la classification

■ 2 000 à 5 000 t/ha	Forêt résineuse dense	Hydrographie
■ 5 000 à 10 000 t/ha	Forêt mélangée à tendance résineuse	Tourbière, marécage
■ 10 000 à 25 000 t/ha	Forêt mélangée à tendance feuillue	Épidémie
■ 25 000 à 35 000 t/ha	Coupe, brûlé	Aire non-classifiée
■ 35 000 t/ha et plus	Chemin, espace dénudé	

(B1) Bloc

— Virée

Sylvain Quesy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

Carte 9. Validation de la classification pour le secteur Lac Onatchiway (22E/03 S.E.).

## VÉRIFICATION DE TERRAIN (SECTEUR LAC HOUILIÈRE)

Classification forestière

A

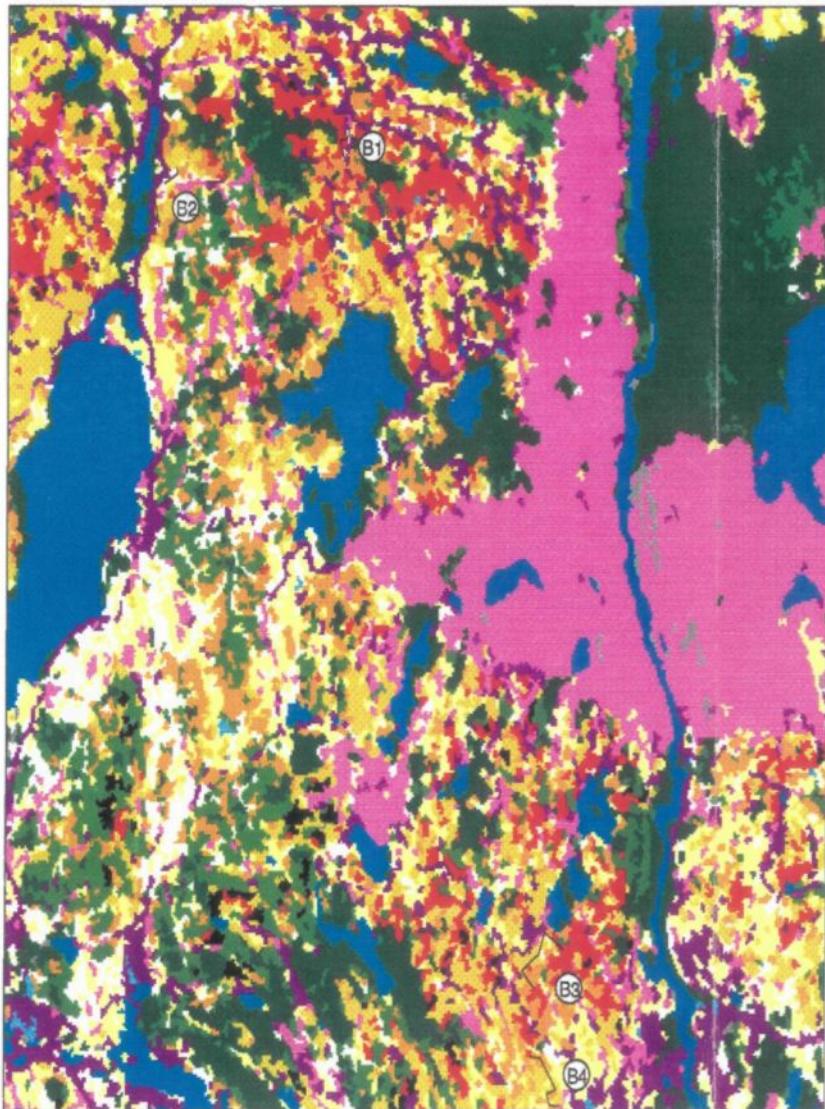


Image multibande LANDSAT-TM

B



Légende de la classification

2 000 à 5 000 t/ha	Forêt résineuse dense	Hydrographie
5 000 à 10 000 t/ha	Forêt mélangée à tendance résineuse	Tourbière, marécage
10 000 à 25 000 t/ha	Forêt mélangée à tendance feuillue	Épidémie
25 000 à 35 000 t/ha	Coupe, brûlé	Aire non-classifiée
35 000 t/ha et plus	Chemin, espace dénudé	

(B1) Bloc

— Virée

Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

Carte 10. Validation de la classification pour le secteur Lac Houlière (22E/14 S.E.).

## **CHAPITRE V**

### **PRÉPARATION DE L'INFORMATION À L'INTÉRIEUR DU SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE**

Dans ce chapitre, nous verrons comment l'information a été traitée à l'intérieur du système d'information géographique. Comment a-t-on élaborer les couvertures de pente et de densité des tiges afin qu'elles puissent se superposer géométriquement aux autres.

## 5.1 Le système d'information géographique

Depuis quelques années, plusieurs industries et établissements institutionnels ont acquis des systèmes d'information géographique. Ces systèmes sont devenus indispensables dans le monde d'aujourd'hui pour aider la prise de décisions. Que cela concerne l'environnement, l'agriculture, les municipalités ou autres, ces systèmes aident à analyser les divers problèmes et à créer des modèles instructifs. Ces logiciels traitent et analysent rapidement l'information toujours grandissante. Bonn & Rochon (1993) définissent les systèmes d'information géographique comme suit: "Un système d'information géographique réunit les techniques et méthodes d'acquisitions d'informations spatialement référencées, de leur codage sous forme vectorielle ou matricielle, leur organisation en banque de données ainsi que les divers traitements et procédures destinés à les adapter à leur utilisation." Voici une autre définition qui s'applique bien à notre sujet: "Un système d'information géographique a pour but de fournir, aux planificateurs et gestionnaires du milieu, les informations nécessaires à la prise de décision" (Caloz, 1990). C'est avec ce type de système que nos données ont été traitées et les cartes produites.

Avec les systèmes d'information géographique (SIG), il est possible d'effectuer plusieurs applications d'ordre spatial. Les SIG permettent de numériser, éditer, transformer, superposer, analyser, simuler et cartographier les phénomènes dans l'espace géographique. Ils supportent toutes sortes de données géographiques autant les données de réseaux, de surface ou d'échantillonnage et des mesures faites sur l'espace réel peuvent être incluses dans une base de données. Les systèmes d'information géographique permettent de gérer de grandes bases de données, de sélectionner les données voulues, de les analyser et d'en faire une synthèse. Les SIG offrent la possibilité de simuler des scénarios d'intervention par la création de modèles intégrés. Ces systèmes permettent également de produire des modèles d'élévation terrain avec lesquelles il est possible d'évaluer les pentes et la forme du relief terrain. Les SIG supportent autant les données vectorielles (lignes) que les données matricielles (pixels) et ainsi, il devient très facile d'introduire des données de télédétection que ce soit satellitaire, radar ou aéroporté.

Pour l'étude, le système d'information géographique a permis d'élaborer un modèle intégré en passant par l'introduction des données de la télédétection, la construction d'un modèle d'élévation terrain (DEM) et la confection de cartes de pente, le tout géoréférencé dans l'espace (figure 2). Chacune des couvertures, c'est-à-dire chacun des feuillets cartographiques à l'échelle 1: 20 000, a été numérisée, traitée et interprétée avec l'aide du système d'information géographique.

### **5.1.1 Logiciel d'analyse spatiale (SIG)**

Le traitement de l'information et l'analyse spatiale ont été effectués avec le système d'information géographique ARC/INFO (version 7.0.2). Il est conçu pour manipuler toutes données relatives aux cartes, c'est-à-dire, les données d'entités géographiques, leurs attributs et les liens existants entre elles. Le logiciel était installé sur une station de travail SUN SPARC 10, utilisant l'environnement SOLARIS sur un système d'exploitation UNIX.

### **5.1.2 Paramètres biophysiques utilisés**

Pour effectuer une recherche dans le domaine forestier, il existe plusieurs données biophysiques, telles le type de peuplement forestier, la topographie, la structure et la composition des sols, etc. La plupart des données qui servent à cette étude proviennent de l'inventaire effectué par le ministère des Forêts du gouvernement provincial publié en 1988 à partir des photographies aériennes captées en 1987. L'utilisation de ces paramètres a été nécessaire dans l'élaboration du modèle final créé à l'aide du système d'information géographique.

### 5.1.3 Données forestières

Chaque couverture incluse dans la base de données comprend plusieurs items qui sont nécessaires pour bien gérer la forêt. Le tableau XXII présente certains paramètres disponibles sur la couverture forêt. Cette couverture comprend tous les polygones de peuplements forestiers. Chacune de ces données était incluse dans les couvertures forêt des deux secteurs. Les polygones sont définis par les limites de peuplements forestiers, de terrains dénudés, de lacs et de rivières. Les données numériques de la couverture forêt consistent en la base numérisée des données forestières du MFO, c'est-à-dire, toute l'information territoriale et forestière se rapportant à chaque contour de peuplement forestier numéroté sur la carte manuscrite (Abitibi-Price Inc., Normes de numérisation de cartes forestières à l'échelle 1: 20 000).

Tableau XXII. Exemple de quelques données disponibles sur la couverture forêt

Périmètre	Terrain
Superficie	Densité
Unité de gestion	Hauteur
Unité de sondage	Âge
Région écologique	Pente
Type	Perturbation
Origine	Groupement d'essences

### **5.1.4 Données topographiques**

Les données topographiques sont utiles pour avoir une bonne représentation du relief. Pour l'élaboration du projet, nous avions la possibilité d'utiliser la couverture topographique pour les deux secteurs d'étude. Les feuillets au nord du 49e parallèle ne sont pas disponibles à l'échelle 1: 20 000. Le fond topographique a alors été numérisé à l'échelle 1: 50 000 avec l'agrandissement des cartes topographiques du ministère de l'Énergie, Mines et Ressources à Ottawa. La base de données de la couverture topographique correspond aux courbes de niveau inscrites sur les cartes manuscrites. Les courbes à équidistance de ces cartes au 1: 50 000 sont de 50 pieds (15,24 m).

### **5.1.5 Autres paramètres**

Plusieurs couvertures numérisées contenant toutes les données numériques nécessaires à l'élaboration de ce travail ont été utilisées. Les couvertures forêt (polygones) et topographie (lignes) ont déjà été décrites. Cependant, d'autres couvertures toutes aussi importantes ont servi à l'élaboration de ce projet. La couverture hydrographie (lignes), la couverture route (lignes), la couverture pente (polygones triangulés) et la couverture densité (polygones), ont été utiles pour la planification des aires se prêtant à la coupe d'éclaircie précommerciale. La

couverture densité venait directement de l'image satellitaire LANDSAT-TM, c'est-à-dire de la classification des jeunes peuplements selon la densité des tiges.

## **5.2 Intégration et traitement de l'information de l'image satellitaire et des paramètres biophysiques à l'intérieur du logiciel d'analyse spatiale**

Pour utiliser les données de l'image satellitaire, il fallait les introduire dans le système d'information géographique pour que toutes les données transférées aient la même correspondance géométrique. Cette étape est importante, car c'est elle qui mettra en valeur la précision géographique et permettra de questionner la base de données pour la prise de décision finale. L'intégration consiste à importer, à partir du logiciel de traitement d'image, les vecteurs de la classification ainsi que les centroïdes de chacun des polygones, c'est-à-dire, les codes reliés à chacune des classes obtenues lors de la classification. À partir du moment où les données provenant de l'image satellitaire ont été transférées dans le SIG, la carte de densité des tiges a été élaborée à l'intérieur du logiciel d'analyse spatiale.

### **5.2.1 Construction des couvertures de densité des tiges provenant des données satellitaires**

Une fois les données importées dans le système, il faut procéder à la construction topologique de la couverture. Le tout est réalisé à partir des coordonnées de la couverture forêt. Toutes les données provenant de la classification de l'image satellitaire ont été

conservées. Les classes sont les mêmes et la couverture créée peut maintenant être interrogée comme toutes les autres couvertures numérisées. La classification de l'image satellitaire a généré une quantité énorme d'informations, ce qui rend les nouvelles couvertures très volumineuses. Pour chacune des couvertures de densité construites, nous avons obtenues 7 626 polygones pour le feuillet catégraphique 22E/03 S.E. et 8 650 polygones pour le feuillet cartographique 22E/14 S.E. (cartes 11 et 12). C'est une quantité d'information énorme à comparer à une couverture numérisée.

Les couvertures sur la densité des tiges ont été corrigées géométriquement pour correspondre aux mêmes coordonnées que les couvertures numérisées. Les couvertures numérisées l'ont été selon les conventions de numérisation des cartes à l'échelle 1: 20 000 de la compagnie Abitibi-Price Inc. La projection cartographique utilisée pour la numérisation est la projection MTM (Modified Transverse Mercator). Le modèle terrestre utilisé est celui de Clarke 1866 (NAD27). La largeur des fuseaux est de 3 degrés de longitude (Abitibi-Price Inc., 1994).

### 5.2.2 Conception des couvertures de pente avec les données topographiques

Les données topographiques décrivent le relief dans le territoire. Avec les données de la couverture topographique, c'est-à-dire les courbes de niveau, nous avons procédé à la construction d'une carte des pentes avec comme guide le cadre écologique de référence de Veillette et Gérardin, (1985). En observant la couverture forêt, nous avions déjà une idée des pentes, mais classées grossièrement comme fortes, moyennes, ou faibles. L'indication des pentes en pourcentage était un des facteurs importants pour le projet et le système d'information géographique a permis de construire ce genre de cartes. Les pentes ont été mises en cinq classes soit de 0 à 5 %, de 5 à 10 %, de 10 à 15%, de 15 à 30 % et finalement les pentes de plus de 30 % (carte 13 et 14).

L'élaboration de couvertures de pente en pourcentage a été nécessaire pour former ou construire le modèle intégré. Tout comme la construction des couvertures de densité des tiges, la procédure suivie pour créer les couvertures de pente a généré plusieurs polygones. En tout, 78 391 polygones pour le feuillet cartographique 22E/03 S.E. et 50 407 polygones pour le feuillet 22E/14 S.E. ont été créés par l'élaboration de ces couvertures avec les données topographiques de terrain (tableaux XXIII et XXIV). Maintenant, nous avons tous les outils disponibles pour élaborer le modèle intégré, c'est-à-dire les couvertures cartographiques géoréférencées et les données numériques.

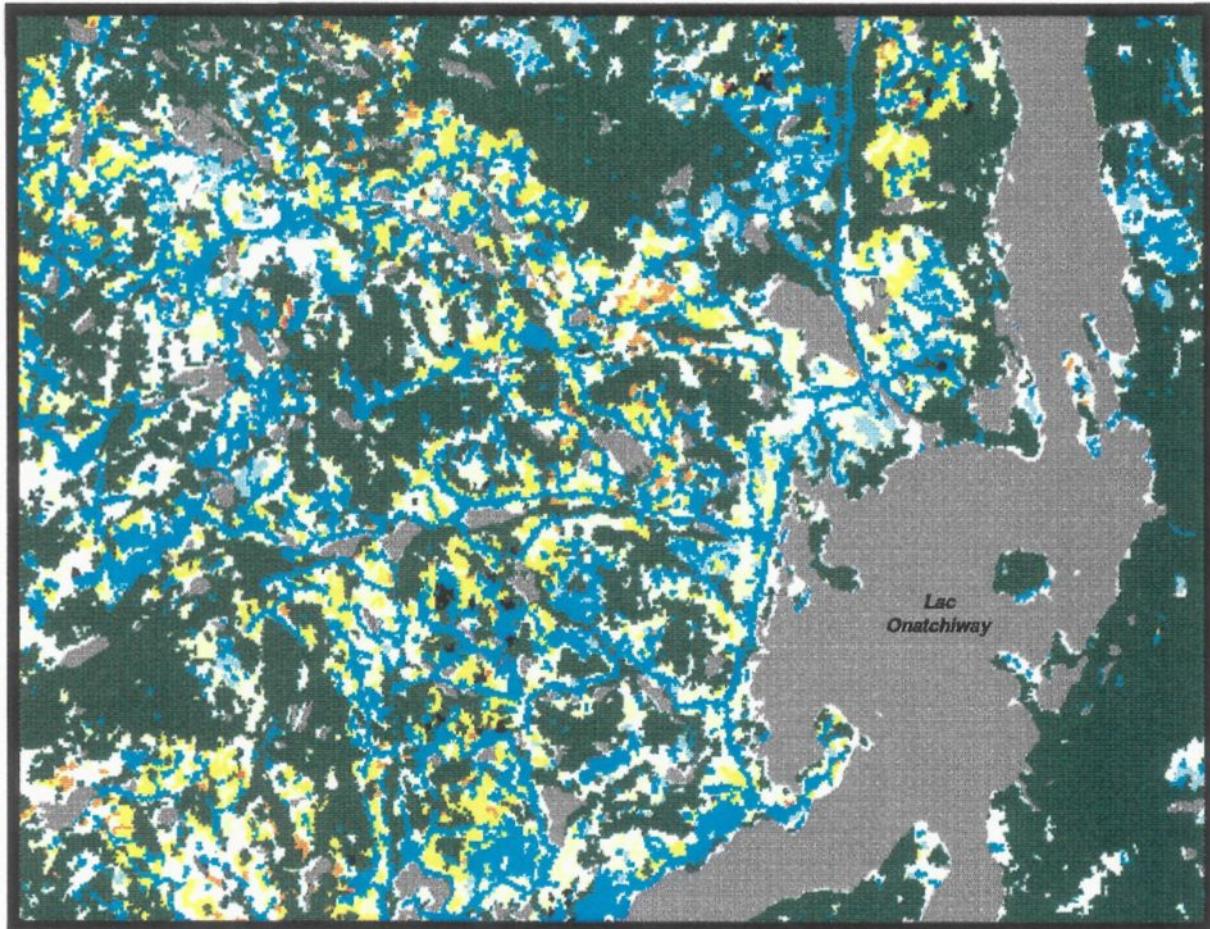
Tableau XXIII. Nombre de polygones pour chaque couverture utilisée pour le secteur du Lac Onatchiway

Couvertures	Nombre de polygones
Forêt (origine et âge)	1 793
Densité	7 626
Pente	78 391
Modèle intégré	192 936

Tableau XXIV. Nombre de polygones pour chaque couverture utilisée pour le secteur du Lac Houlière

Couvertures	Nombre de polygones
Forêt (origine et âge)	884
Densité	8 650
Pente	50 407
Modèle intégré	143 913

## CLASSES DES DENSITÉS EN NOMBRE DE TIGES À L'HECTARE



2 000 à 5 000 t/ha (1 974 ha)
5 000 à 10 000 t/ha (2 175 ha)
10 000 à 25 000 t/ha (1 166 ha)
25 000 à 35 000 t/ha (152 ha)
35 000 t/ha et plus (24 ha)
Coupe, brûlé (438 ha)
Chemin, espace dénudé (3 862 ha)
Forêt mature (10 267 ha)
Autres

**Secteur  
Lac Onatchiway  
22E/03 sud-est**

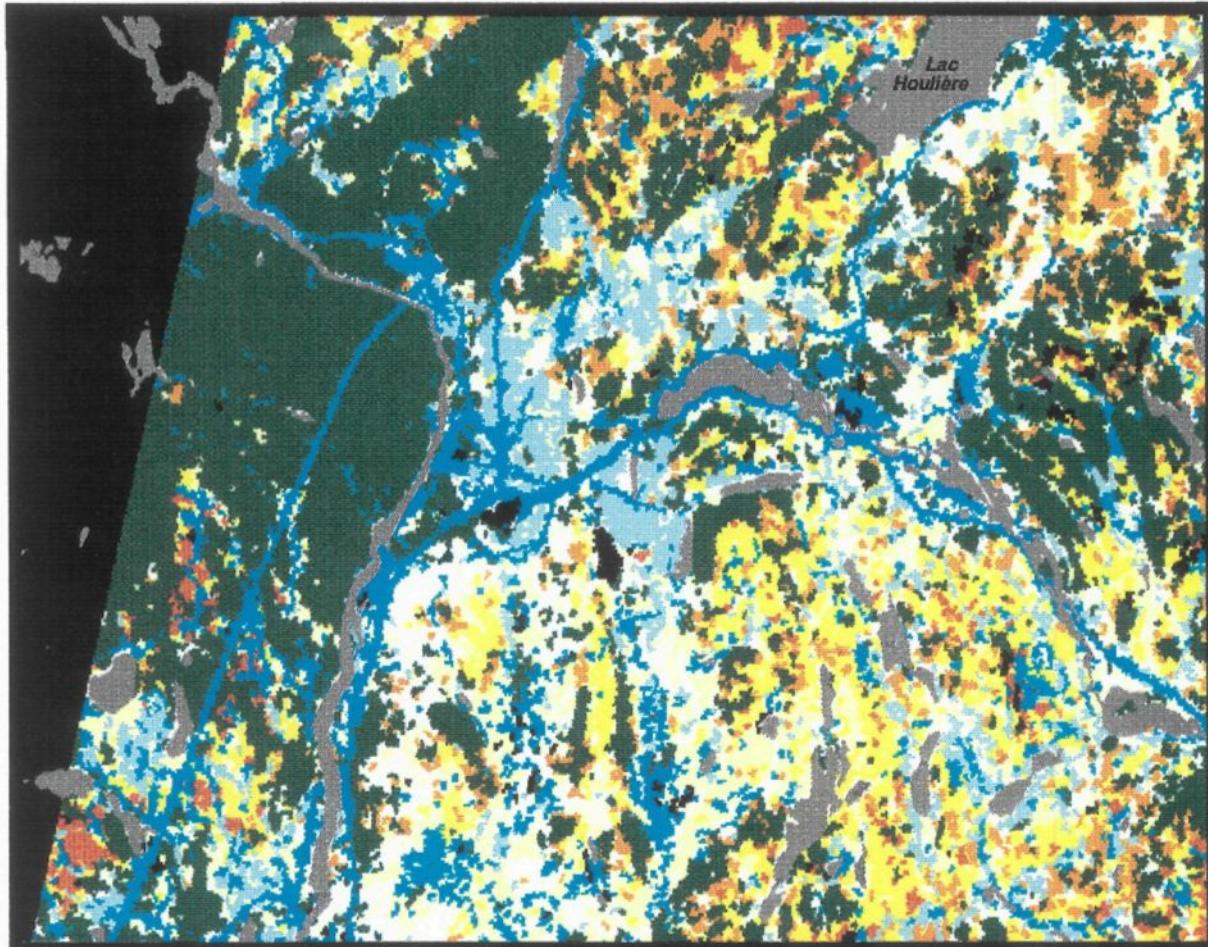
0 2 km

Source: Image satellitaire LANDSAT-TM du 29 mai 1991, classification par maximum de vraisemblance

Carte 11. Densité des tiges déterminée à partir de l'image LANDSAT pour le secteur Lac Onatchiway.

Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

## CLASSES DES DENSITÉS EN NOMBRE DE TIGES À L'HECTARE



□	2 000 à 5 000 t/ha (2 223 ha)
□	5 000 à 10 000 t/ha (3 386 ha)
□	10 000 à 25 000 t/ha (2 070 ha)
□	25 000 à 35 000 t/ha (1 277 ha)
□	35 000 t/ha et plus (429 ha)
□	Coupe, brûlé (1 721 ha)
□	Chemin, espace dénudé (2 687 ha)
□	Forêt mature (6 841 ha)
□	Autres

**Secteur  
Lac Houlière  
22E/14 sud-est**

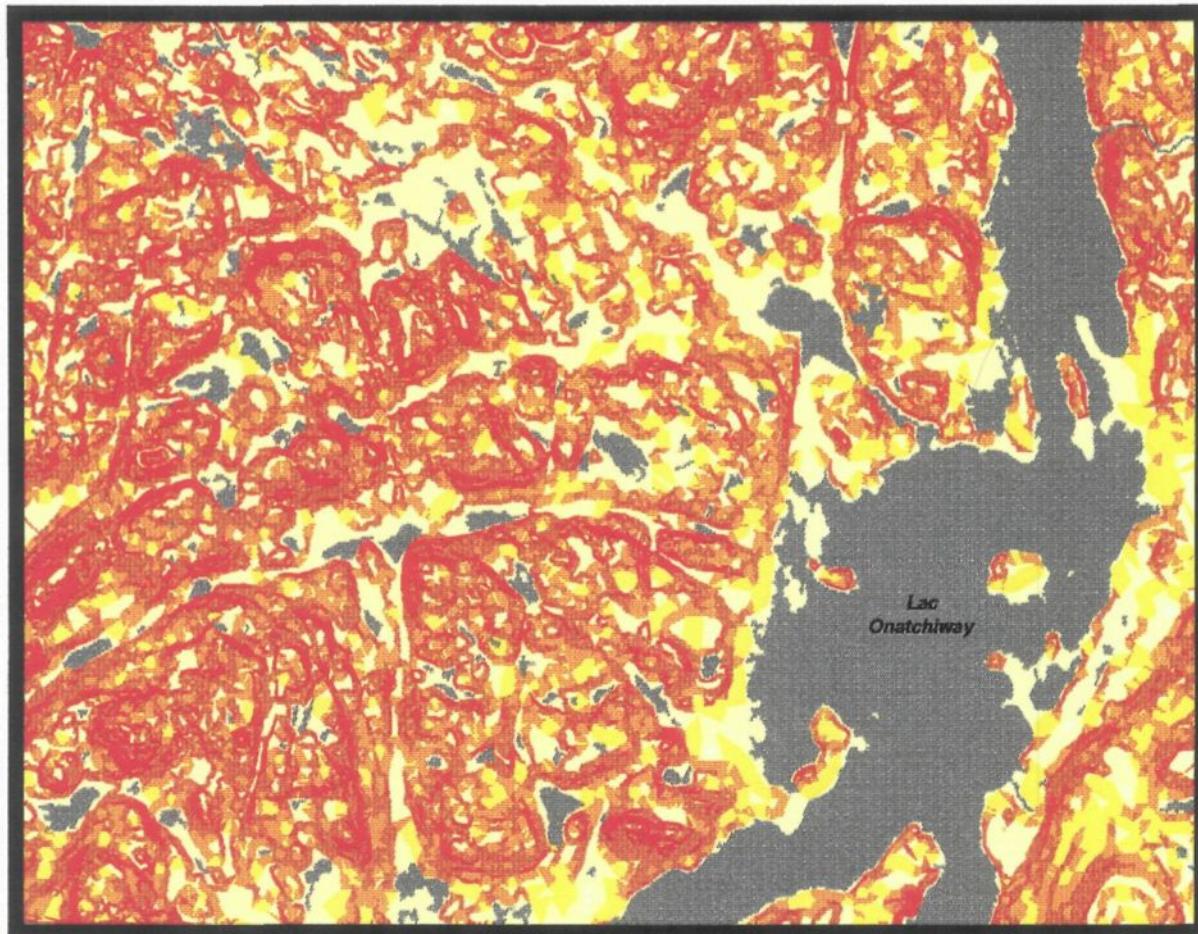
0 \_\_\_\_\_ 2 km

Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

Source: Image satellitaire LANDSAT-TM du 29 mai 1991, classification par maximum de vraisemblance

Carte 12. Densité des tiges déterminée à partir de l'image LANDSAT pour le secteur Lac Houlière.

## CLASSES DES PENTES EN POURCENTAGE (%)

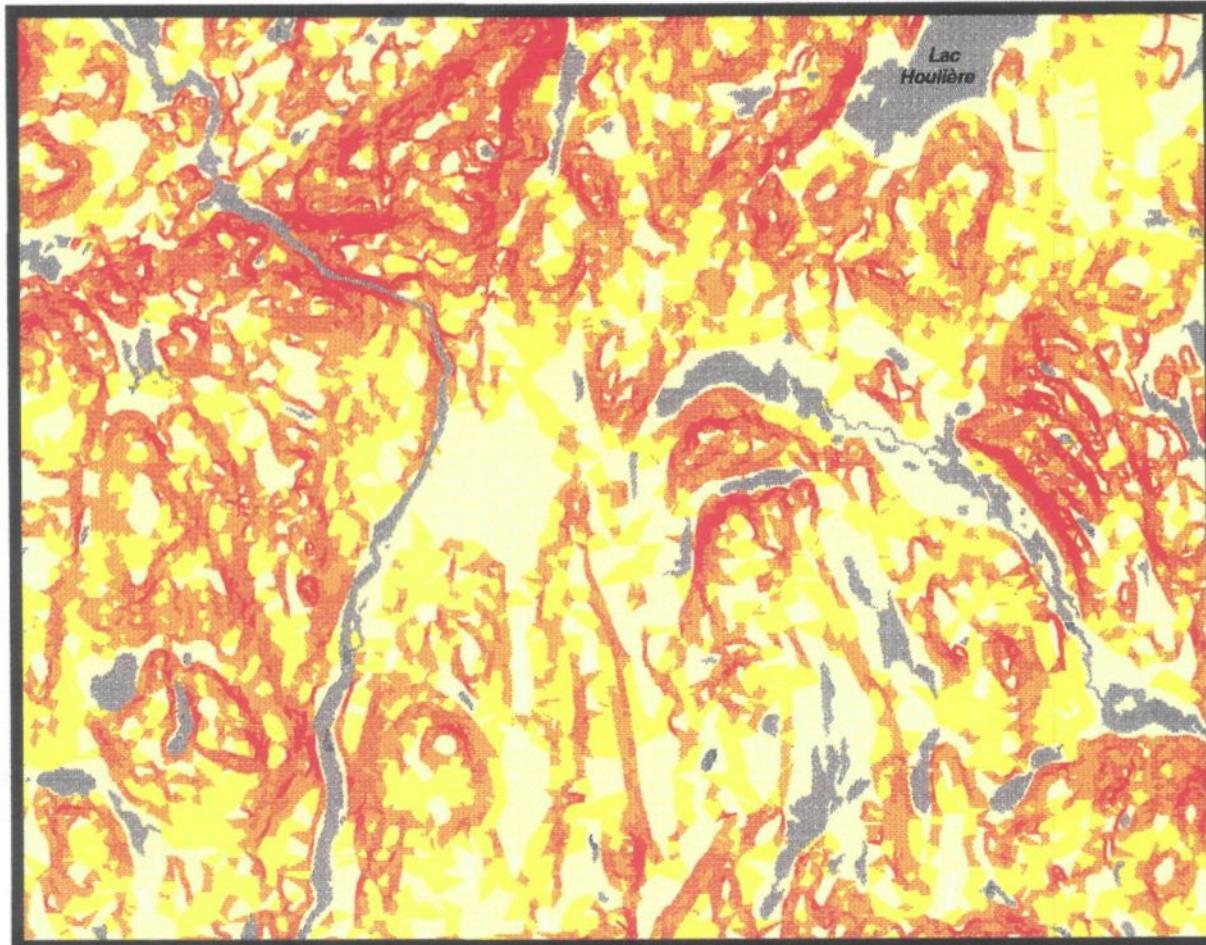


Source: Gouvernement du Canada, Énergie, Mines et Ressources, 1987

Carte 13. Classe des pentes en pourcentage pour le secteur Lac Onatchiway.

Sylvain Quesey, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

## CLASSES DES PENTES EN POURCENTAGE (%)



Source : Gouvernement du Canada, Énergie, Mines et Ressources, 1987

Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

Carte 14. Classe des pentes en pourcentage pour le secteur Lac Houlière.

## **CHAPITRE VI**

### **UTILISATION DU SIG POUR L'ÉLABORATION DU MODÈLE INTÉGRÉ**

Dans ce chapitre, nous verrons quels sont les critères utilisés pour l'élaboration du modèle intégré et la façon avec laquelle le SIG y a contribué.

## 6.1 Critères utilisés

Pour l'élaboration du modèle intégré, qui servira à présenter des sites potentiels pour la coupe d'éclaircie précommerciale, quatre critères ont été sélectionnés. Chacun de ces critères est un facteur déterminant dans le choix des secteurs à intervenir.

Le premier critère était la densité des tiges de résineux recherchée. Pour qu'il y ait éclaircie dans un territoire donné, il faut que le nombre de tiges résineuses à l'hectare soit plus élevé que 5 000 (Houde, 1987). L'intervention dans les peuplements de moins de 5 000 tiges résineuses à l'hectare ne se trouve pas appropriée car les tiges sont suffisamment dégagées pour croître rapidement, c'est-à-dire qu'il n'y a pas trop de compétition entre les espèces pour justifier une intervention. Les valeurs accordées à la densité sont réduites en quatre classes de tiges résineuses à l'hectare; les classes proviennent de la classification forestière que nous retrouvons sur la couverture densité des tiges LANDSAT soit les classes: 5 000 à 10 000 t/ha, 10 000 à 25 000 t/ha, 25 000 à 35 000 t/ha et 35 000 t/ha et plus. Les autres classes n'ont pas été considérées puisqu'elles n'entraient pas dans le questionnement du modèle. Les superficies calculées offrent un total de 9 385 ha de territoire à l'intérieur des classes de densité pour le secteur du Lac Houlière contre 5 491 ha pour le secteur du Lac

Onatchiway. Chacune des classes est représentée par une gradation de couleur, du blanc au rouge, pour les deux secteurs aux cartes 11 et 12.

Le deuxième critère était la pente du terrain. Selon les recommandations gouvernementales, pour qu'il y ait intervention sur un territoire forestier, la pente ne doit pas excéder 40 %, mais pour le modèle, nous avons retenu les pentes se situant entre 0 et 30 % seulement. Entre les pentes de 30 % et 40 %, il est possible de faire des traitements sylvicoles mais à condition d'avoir des mesures de mitigation pour la protection des sols. Ne possédant pas ces données, nous nous sommes concentré sur les pentes de moins de 30 %. La superficie touchée (30 à 40 %) n'est pas significative et intervient peu dans les statistiques. Pour le secteur du Lac Onatchiway, 23 188 ha sur 25 405 ha (91,3 %) du territoire comprenaient des terres à moins de 30 % d'inclinaison. Pour l'autre secteur, celui du Lac Houlière, le territoire compris dans les classes de moins de 30 % est de 23 891 ha sur 24 972 ha (95,7 %). Donc, seulement 1 081 hectares ne peuvent être accessibles par la machinerie forestière (cartes 13 et 14). Dans ce travail, c'est surtout la recherche des pentes inférieures ou égales à 30 % à l'intérieur des zones d'épidémie sévère qui nous préoccupait; car, on ne peut pas, comme dans les aires ayant été récoltées, déduire que la pente est inférieure au seuil retenu.

Le troisième critère pour l'élaboration du modèle était l'origine de la perturbation. Après une perturbation, la poussie naturelle peut varier de densité et c'est dans ces endroits qu'il

sera important d'intervenir. Ce sont les aires provenant de coupes totales ou d'épidémies sévères qui ont été sélectionnées. Pour le secteur du Lac Onatchiway, 8 912 hectares de territoire font partie du critère de sélection tandis que pour le secteur du Lac Houlière, 13 373 ha en font partie (cartes 15 et 16). Il est à noter que pour le secteur du Lac Houlière, il n'y a aucun polygone du critère épidémie sévère. Seul le critère coupe totale intervient dans ce secteur.

Le quatrième et dernier critère sélectionné était l'âge des peuplements après la perturbation. Pour avoir une hauteur et un diamètre raisonnable pour la coupe d'éclaircie précommerciale, la perturbation ne doit pas avoir plus de 20 ans et doit avoir au moins 5 ans d'âge. La sélection des peuplements âgés de 0 à 20 ans après perturbations empêchera le modèle de sélectionner les espaces considérés matures. Les cartes 17 et 18 montrent l'âge des peuplements par classe. La classe 10 inclut tous les peuplements de 0 à 20 ans. La classe 30 (20 à 40 ans), la classe 50 (40 à 60 ans), la classe 70 (60 à 80 ans), la classe 90 (80 à 120 ans) et la classe 120 (120 ans et plus) sont les autres classes d'âge des peuplements.

Seule la classe d'âge 10 a été utilisée pour le modèle et chacun des secteurs possède 4 852 ha pour le secteur du Lac Onatchiway et 9 096 ha pour le secteur du Lac Houlière.

## 6.2 Élaboration du modèle

Généralement, un système d'information géographique permet de superposer les données acquises pour la construction des couvertures. La construction des modèles par la superposition des critères a été faite dans les mêmes conditions que les autres couvertures, c'est-à-dire par l'utilisation de la projection transversale modifiée de Mercator (MTM). Le tableau XXV indique les coordonnées en mètres des quatre coins de chacune des couvertures. Pour obtenir les coordonnées MTM à partir de l'image satellitaire, qui elle était en coordonnées pixels (30 m), une transformation des coordonnées fût réalisée et c'est le système d'information géographique qui a permis de faire cette manipulation.

La construction du modèle s'est faite en trois étapes (figure 18). La première consistait à combiner par superposition l'item "origine" de la couverture forêt et de l'item "âge" également de la couverture forêt pour en faire une couverture distincte. La deuxième étape était de prendre les deux derniers critères et de les superposer. C'est ce qui a été fait par la construction d'une couverture avec les critères "pente" et "densité". La troisième étape était de superposer les deux couvertures créées pour en faire une seule.

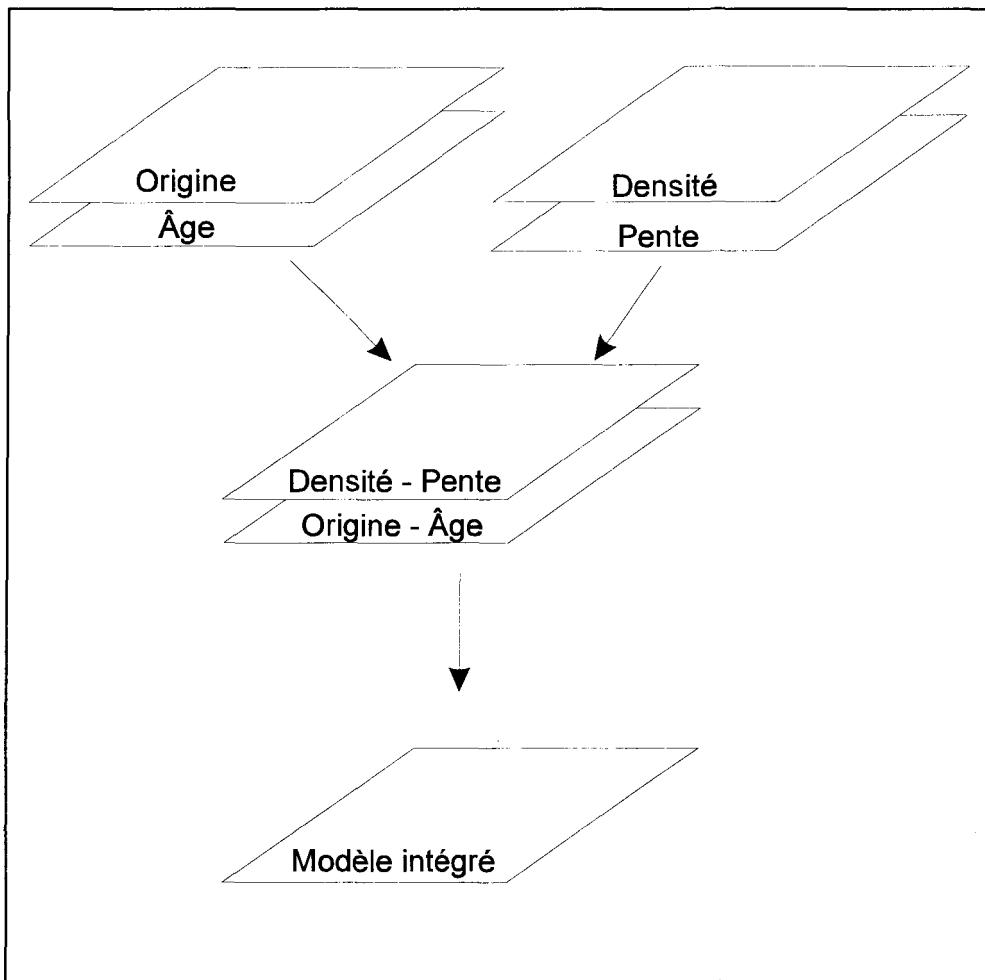


Figure 18. Schéma de la superposition.

La superposition des critères de cette façon a permis de créer un modèle où seules les zones sélectionnées ou désirées apparaissent sur les cartes. Un des inconvénients majeurs de l'élaboration d'un modèle comme celui-ci est la multiplication des polygones. Pour remédier à ce problème, les polygones non représentatifs, ceux qui ont une superficie inférieure à 50 mètres carrés, ont été éliminés; c'est le traitement qui était suggéré par le logiciel ARC/INFO. Ces polygones ont été redistribués dans les plus grands polygones. Cette opération a permis d'éliminer 43 360 polygones pour le modèle du secteur Lac

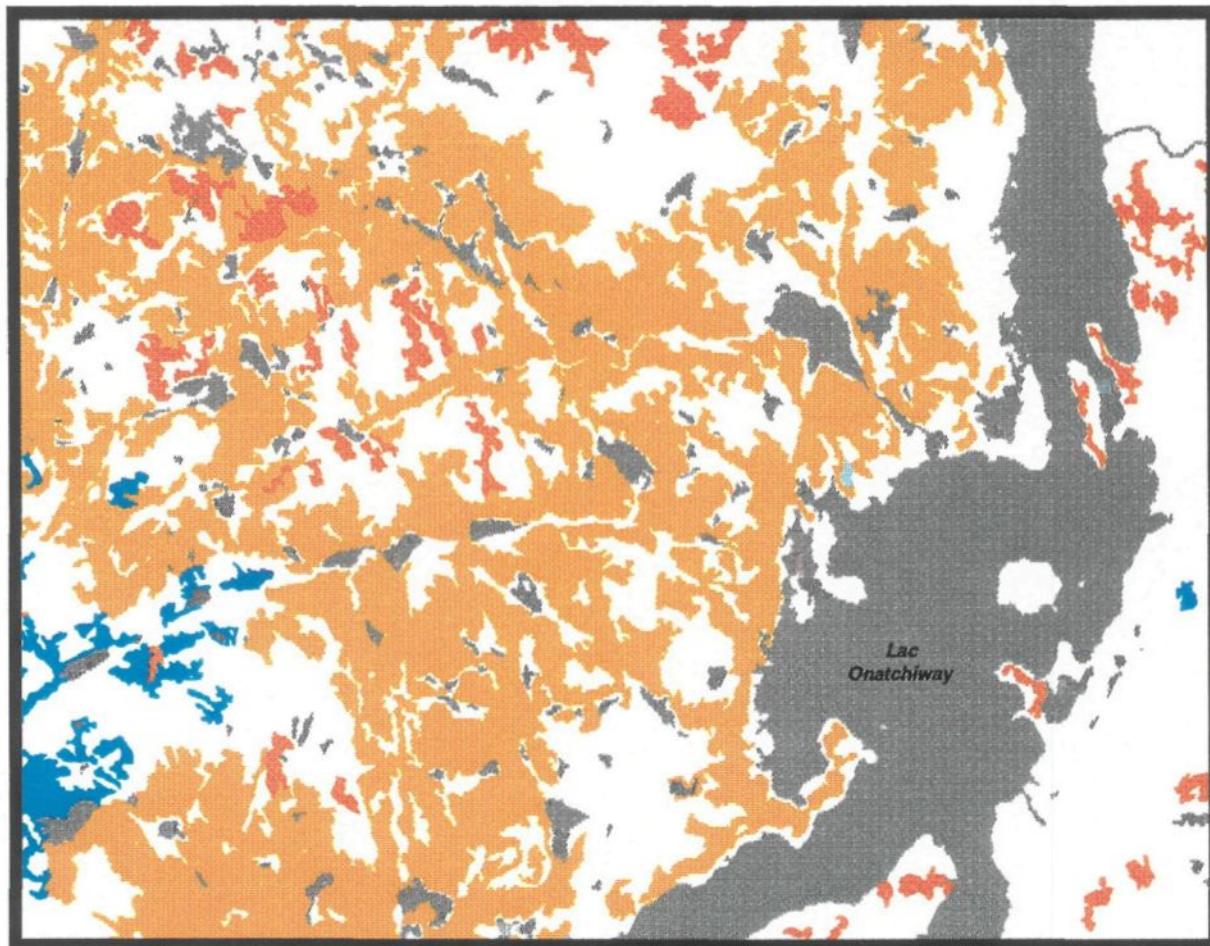
Onatchiway et 22 631 polygones pour le modèle du secteur Lac Houlière. Le résultat final des modèles donne 192 936 polygones pour le secteur du Lac Onatchiway (22E/03 S.E.) et 143 913 polygones pour le secteur du Lac Houlière (22E/14 S.E.). Le très grand nombre de polygones est dû à la transformation de la classification forestière sous la forme de vecteurs et la construction de la couverture pente.

Tableau XXV. Coordonnées géographiques (MTM) des couvertures

Feuillet 22E/03 S.E.		
"TICS"	x (mètres)	y (mètres)
1	249925,09700	5428986,06500
2	249925,09700	5443037,06151
3	268308,28600	5443037,06151
4	268308,28600	5428986,06500
Feuillet 22E/14 S.E.		
"TICS"	x (mètres)	y (mètres)
1	250753,76100	5512390,03500
2	250753,76100	5526440,70436
3	268861,76000	5526440,70436
4	268861,76000	5512390,03500

Source: Base de données ARC/INFO, couverture forêt.

## ORIGINE DES PERTURBATIONS



- Coupe totale (8 139 ha)
- Épidémie sévère (773 ha)
- Brûlis (354 ha)
- Plantation (7 ha)
- Non classé

**Secteur  
Lac Onatchiway**

**22E/03 sud-est**

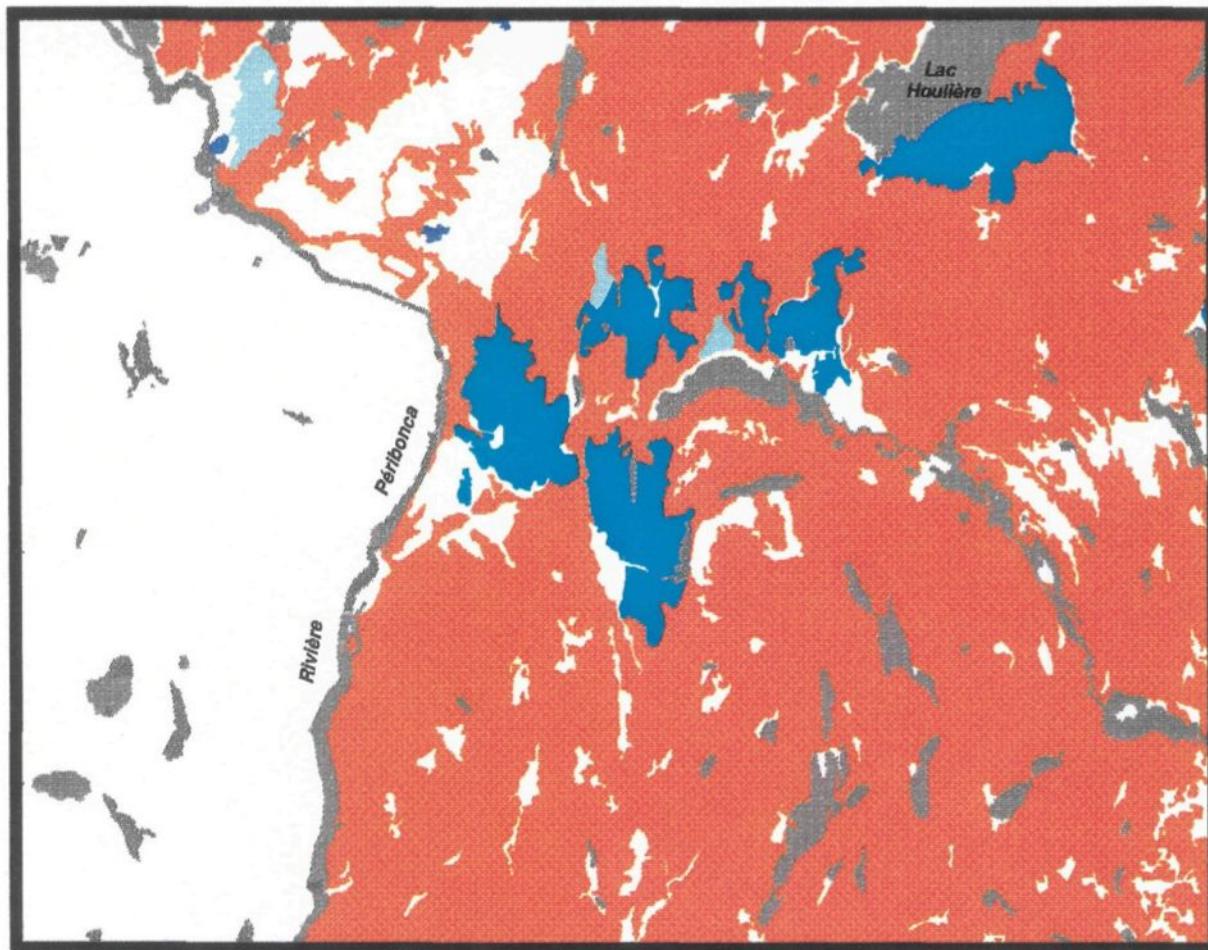
0 2 km

Source: Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, 1987

Carte 15. Origine des perturbations, secteur, Lac Onatchiway.

Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

## ORIGINE DES PERTURBATIONS

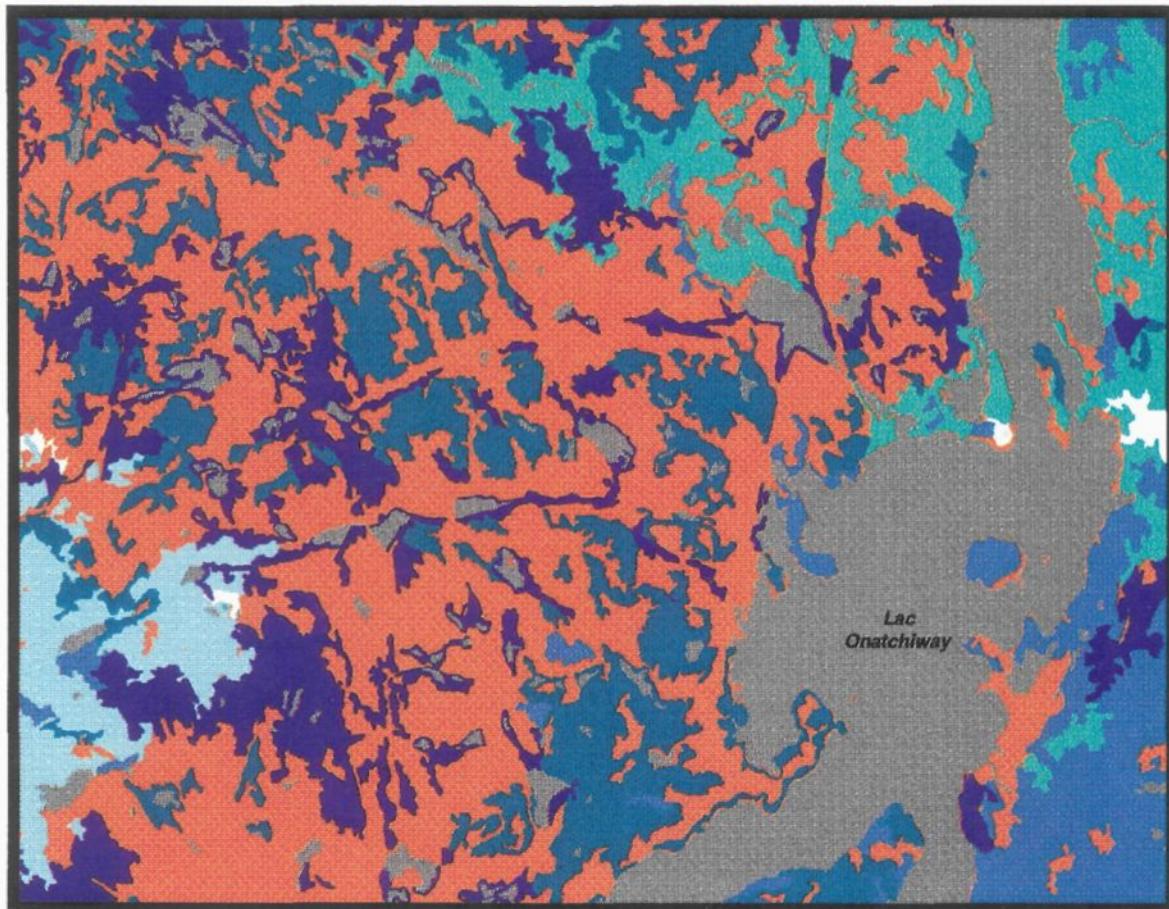


Source: Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, 1987

Carte 16. Origine des perturbations, secteur Lac Houlière.

Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

## ÂGE DES PEUPLEMENTS

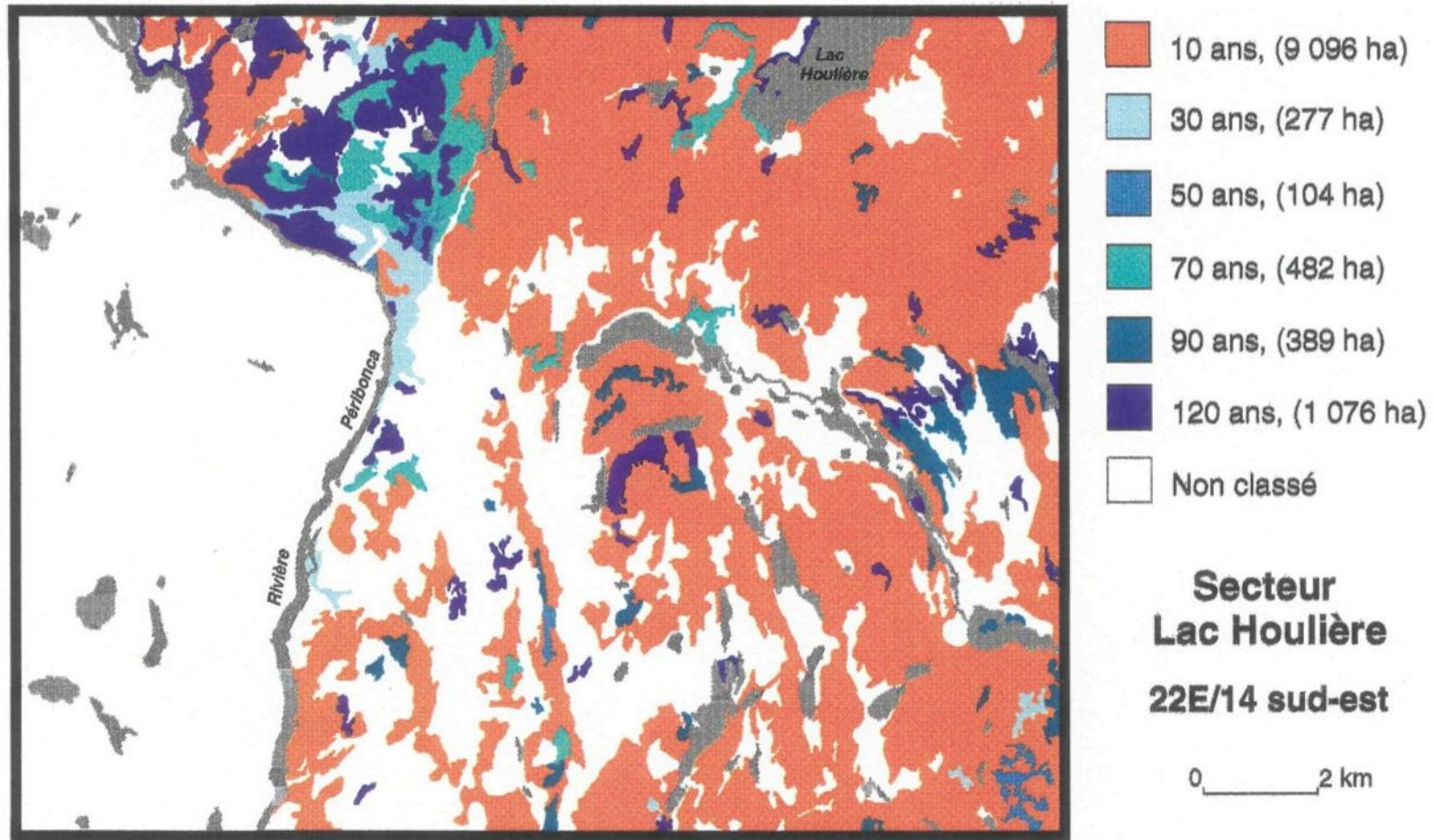


Source: Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, 1987

Carte 17. Âge des peuplements, secteur Lac Onatchiway.

Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

## ÂGE DES PEUPLEMENTS



Source: Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, 1987

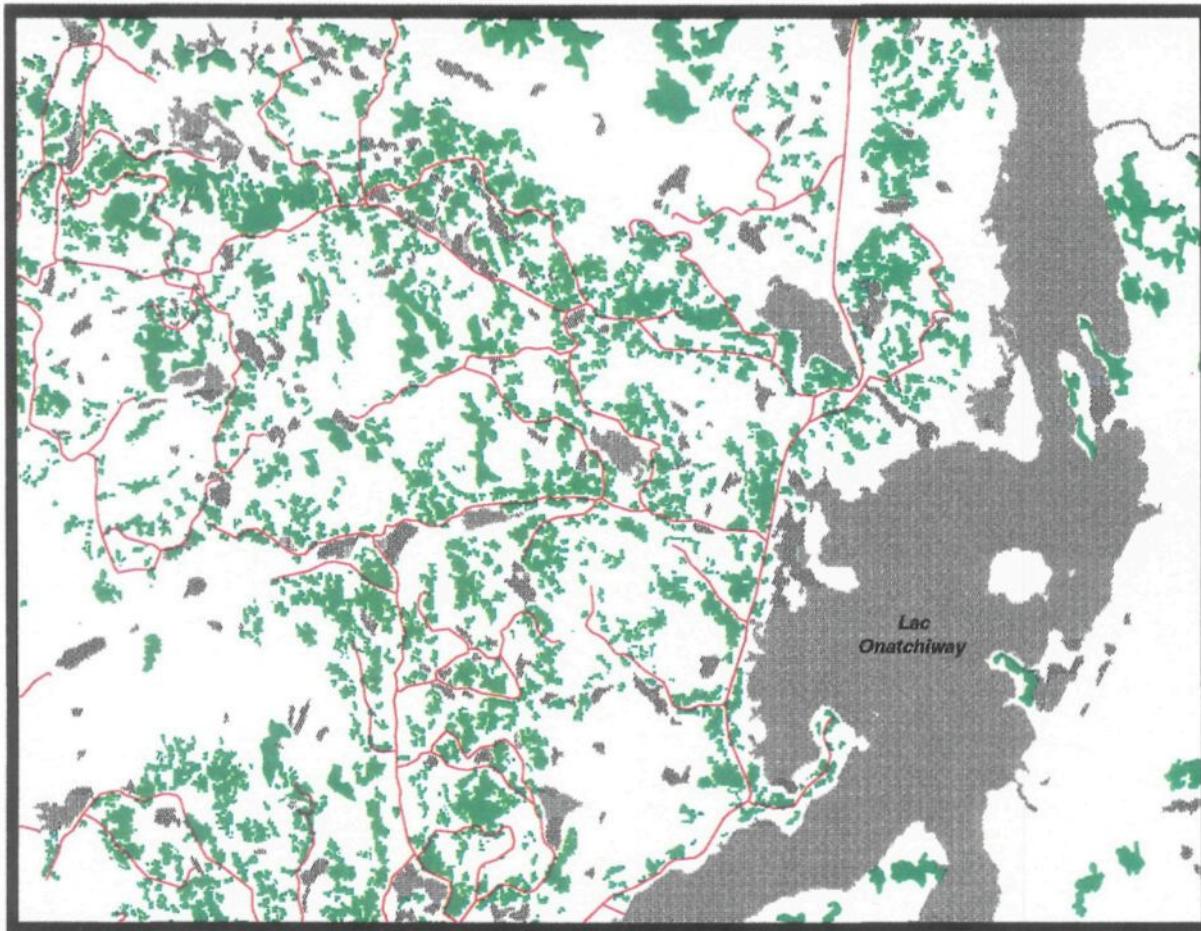
Carte 18. Âge des peuplements, secteur Lac Houlière.

Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

### **6.3 Résultat final du modèle intégré**

Les résultats sont très explicites car, comme le démontrent les cartes des modèles numériques (cartes 19 et 20), plusieurs hectares de forêt offrent une possibilité d'intervention et ce, pour les deux territoires. Pour le secteur du Lac Onatchiway, le modèle dégage 3 317 hectares de superficie de forêt où il est possible d'intervenir pour la coupe d'éclaircie précommerciale. Pour le secteur du Lac Houlière, où la présence de jeunes peuplements était beaucoup plus abondante, la superficie déterminée est plus importante avec 5 796 hectares de forêt prête à l'intervention. On peut remarquer la présence importante de chemins forestiers près des secteurs à traiter puisque les territoires concernés ont déjà subi des interventions forestières au cours des trois dernières décennies. Selon les calculs obtenues à l'aide du système d'information géographique, la superficie totale des deux secteurs aptes à l'intervention forestière pour la coupe d'éclaircie précommerciale est de 9 113 hectares (21 %) sur une possibilité de 42 971 hectares, et ce en ne considérant pas les lacs et les autres terrains improductifs.

## MODÈLE INTÉGRÉ DES SITES POTENTIELS POUR LA COUPE D'ÉCLAIRCIE PRÉCOMMERCIALE



Superficie totale  
3 314 ha

— Chemin

Secteur  
Lac Onatchiway

22E/03 sud-est

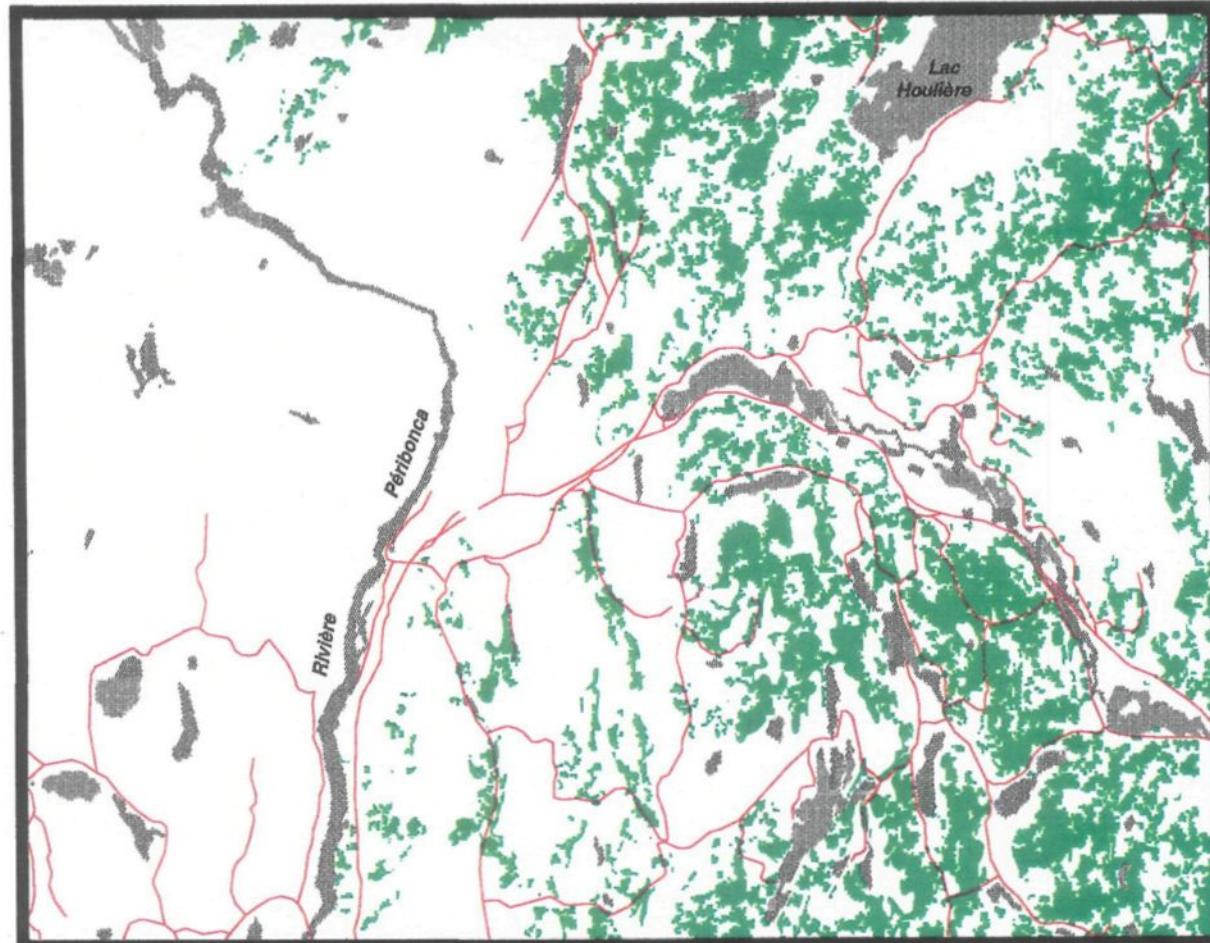
0 2 km

Source: Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, 1987  
Gouvernement du Canada, ministère de l'Énergie, Mines et Ressources, 1987  
Image satellitaire LANDSAT-TM, 29 mai 1991

Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

Carte 19. Modèle intégré, secteur Lac Onatchiway.

## MODÈLE INTÉGRÉ DES SITES POTENTIELS POUR LA COUPE D'ÉCLAIRCIE PRÉCOMMERCIALE



Source: Gouvernement du Québec, ministère des Forêts, 1987  
Gouvernement du Canada, ministère de l'Énergie, Mines et Ressources, 1987  
Image satellitaire LANDSAT-TM, 29 mai 1991

Superficie totale  
5 796 ha

— Chemin

**Secteur  
Lac Houlière**

**22E/14 sud-est**

0 2 km

Sylvain Quessy, UQAC, 1996  
Laboratoire de géomatique

Carte 20. Modèle intégré, secteur Lac Houlière.

## DISCUSSION

La coupe d'éclaircie précommerciale est un traitement sylvicole important dans l'optique de l'amélioration du rendement soutenu. Plusieurs milliers d'hectares de forêt sont traités par éclaircie précommerciale chaque année. Il devient de plus en plus crucial de bien aménager la forêt dans les années à venir. Les outils tels la télédétection et les systèmes d'information géographique viennent en aide à la gestion de l'aménagement forestier.

Pour réaliser l'étude, deux feuillets cartographiques à l'échelle 1: 20 000 ont été choisis dans le but de faire plus facilement la superposition entre les cartes car elles seront utilisées pour la confection de plans annuels et quinquennaux. La précision des cartes à cette échelle est grande mais ces dernières couvrent très peu de territoire. La raison pour laquelle deux territoires distincts de la forêt boréale ont été étudiés, repose sur une volonté de les comparer car ils appartiennent à des régions écologiques différentes. L'un des territoires est dominé par le sapin baumier (*Abies balsamea*), l'autre par l'épinette noire (*Picea mariana*). Nous avons sélectionné des territoires possédant de fortes superficies de jeunes peuplements.

La première partie de la méthodologie qui était l'utilisation d'une image satellitaire pour identifier un nombre de tiges de résineux à l'hectare sur un territoire, a donné de bons résultats. Il existe plusieurs raisons à l'utilisation d'une image de type LANDSAT-TM.

Tout d'abord, sa résolution. Le capteur TM (thematic mapper) installé sur le satellite Landsat 5 possède une résolution de 30 m au sol ce qui est une précision très acceptable pour une image qui recouvre 34 225 km<sup>2</sup>. Une autre propriété importante de ce capteur est le grand nombre de bandes offertes (7) et les longueurs d'onde liées à celles-ci. Les bandes de ce capteur sont situées entre 0,45 et 2,35 µm pour les bandes à 30 m de résolution. Le capteur possède une seule bande thermique à 120 m de résolution. Ces bandes qui ont des longueurs d'onde différentes sur le spectre électromagnétique ont chacune leur propriété pour identifier les objets différents sur l'espace terrestre. Un autre facteur important du choix d'une image LANDSAT-TM est le coût assez abordable de ce type d'image.

L'utilisation des bandes 3, 4 et 5 du capteur TM a donné les résultats escomptés. Ces bandes ont bien différencié les objets présents au sol. Chacune des bandes avait sa propre qualité de détection soit en ce qui a trait à la réflexion ou à l'absorption de l'énergie en provenance des objets. À l'écran, l'application d'un étalement linéaire sur chaque bande a permis une présentation couleur multibande qui a facilité l'interprétation.

Pour la création des zones d'entraînement, on a utilisé un inventaire par placettes-échantillons de 1,13 m de rayon, ce qui a permis d'interpréter des moyennes en nombre de tiges à l'hectare pour tracer les sites d'entraînement qui ont servi à bâtir la classification. La méthodologie des placettes-échantillons se base sur des normes gouvernementales puisque c'est de cette façon que sont réalisés les inventaires de régénération naturelle en forêt.

Selon cette méthodologie, les sites autour des placettes-échantillons devraient avoir une moyenne semblable à l'inventaire relevé. C'est pour cette raison que nous avons utilisé une série de pixels pour chaque site compris dans ces secteurs où les moyennes devaient être semblables. Il fallait utiliser une méthodologie stricte pour classifier les aires par classes de densité des tiges car cela faisait partie de la précision de l'information. Pour les autres aires, la précision était moins importante et c'est pour cela que nous nous sommes basés seulement sur les cartes forestières pour tracer les sites d'entraînement. Nous avons utilisé les classes de la compagnie Abitibi-Price Inc. car l'intervalle des classes est fait selon les contrats attribués pour les traitements d'éclaircie précommerciale. Les classes déterminées par le ministère des Ressources naturelles n'étaient pas idéales pour cette étude; l'intervalle des classes (5 000 à 10 000 t/ha, 10 000 à 15 000 t/ha, 15 000 à 20 000 t/ha, etc) était différente de celles utilisées pour l'étude. Deux facteurs nous ont fait rejeter les classes du MRN. Le premier est que les classes du ministère des Ressources naturelles étaient plus nombreuses et l'intervalle plus restreint que celles de la compagnie Abitibi-Price Inc. Le deuxième repose sur le fait que la densité des tiges est établie selon une hauteur différente (1,5 m résineux et 2,2 m feuillues) pour le MRN et les tiges de plus de 60 cm pour Abitibi-Price Inc.

La classification dirigée faite par l'algorithme de maximum de vraisemblance s'est avérée utile. Elle a permis de classer les milliers de pixels présents sur l'image en seulement quelques classes. La classification a introduit chacun des pixels dans la classe la plus près

et déterminé les statistiques de superficie, de pourcentage de recouvrement et de nombre de pixels traités. La classification nous a donné 6 303,78 ha (24,82 % du secteur) du feuillet cartographique 22E/03 S.E. pour les classes de densité des tiges, donc les aires de jeunes peuplements, et 9 710,28 ha (42,67 % du secteur) de ces mêmes aires pour le feuillet cartographique 22E/14 S.E. Il y a beaucoup plus d'aires de jeunes peuplements dans le secteur du Lac Houlière en raison des deux facteurs suivants. Le premier est que c'est un secteur qui a fait l'objet de travaux sylvicoles depuis beaucoup moins d'années que l'autre secteur; moins d'arbres ont atteint la maturité. Le second facteur est que le secteur du Lac Houlière est moins accidenté, donc presque tout le territoire est accessible à l'intervention. Dans le secteur du Lac Onatchiway, une bonne partie du territoire est inaccessible en raison des pentes trop fortes.

La classification dirigée a démontré selon ses statistiques, une certaine confusion dans les classes de densité des tiges. Malgré cette confusion, la vérification image satellite versus terrain a donné des résultats très probants, avec un bon pourcentage de vérité.

Pour réaliser la vérification ou la validation de la classification dirigée, nous avons inventorié sur le terrain des peuplements jeunes compris dans les secteurs d'étude. Lors de l'inventaire terrain, toutes les tiges debout étaient comptées, semis et gaulis, feuillus ou résineux. Il faut mentionner également que la densité des tiges révélée par la télédétection se fait sur la réflectance des pigments photosynthétiques des aiguilles et des feuilles des

arbres et non sur l'arbre comme tel, c'est-à-dire la tige. Donc, la densité des tiges à l'hectare n'est qu'une interprétation du volume de feuillage rassemblé dans une superficie donnée. Ce facteur peut influencer les données d'interprétation.

Les résultats de la vérification démontrent une bonne correspondance entre la classification numérique et la vérité terrain, mais le secteur du Lac Onatchiway semble posséder des résultats moins probants que ceux du Lac Houlière. Pour le secteur du Lac Houlière, la classification a résulté en une différence totale des moyennes de tiges de résineux inférieure à 2 244 tiges (2,9 %), ce qui sous-évalue légèrement la validation sur le terrain. Dans le secteur du Lac Onatchiway, la différence totale des moyennes entre le terrain et la classification s'est chiffrée à 8 403 tiges (18,7 %). Donc, la classification a surévalué la densité au sol. La différence entre les moyennes des résultats terrain est beaucoup plus élevée pour le secteur du Lac Onatchiway. L'explication retenue serait liée à une plus grande présence d'espèces feuillues à cette latitude, à cette période de l'année. Il faut rappeler que l'image date du 29 mai 1991, donc vers la fin du printemps. À cette latitude le débourrement des bourgeons des feuilles des espèces feuillues a probablement débuté; ceci a pu influencer les données du capteur lors de son passage. Dans le secteur du Lac Onatchiway, les valeurs de la classification semblent être légèrement surévaluées (voir figure 17). La visite sur le terrain a permis de constater une présence importante d'arbustes au sol. On a remarqué un bon nombre de plantes arbustives comme les Éricacées, surtout le Lédon du Labrador (*Ledum groenlandicum*) et le Kalmia à feuilles

étroites (*Kalmia angustifolia*). Ces arbustes ont des feuilles très persistantes ce qui démontre que la présence de ces feuilles à cette période de l'année peut avoir influencé la signature spectrale au sol.

Plusieurs de ces arbustes ont été observés et ce dans la majorité des parcelles inventoriées. La représentation arbustive pouvait se situer entre 40 et 100 %, et même qu'à certains endroits, les arbustes pouvaient atteindre 60 cm de hauteur. Les seuls endroits où la présence de ces arbustes fût moins importante, étaient là où les arbres dépassaient les quatre mètres de hauteur.

Lors de la classification, nous avons choisi d'éliminer les polygones de moins de six pixels car nous trouvions que la superficie de ces groupes n'était pas assez importante et que cela éliminerait les pixels isolés. L'application de ce traitement a réduit le nombre de polygones pour l'exportation dans le système d'information géographique. Cette application a été faite dans le système d'analyse d'images. Pour l'élaboration des cartes de pentes, la quantité d'information était énorme. Nous avons dû réduire le nombre de polygones. Premièrement, nous avons fusionné les polygones de même classe qui se retrouvaient les uns à côté des autres. Ensuite, on a éliminé les polygones de moins de 50 m<sup>2</sup>. Ces polygones ont été introduits dans la classe la plus proche, ce qui a réduit encore plus le nombre de polygones. Cette application a été faite avec l'aide des fonctions du système d'information géographique. Toutes ces opérations étaient justifiées.

Les traitements réalisés pour généraliser les cartes des densités des tiges ont pu être un facteur déterminant sur la différence des résultats entre la vérité terrain et la classification forestière non seulement dans le secteur du Lac Onatchiway, mais également dans le secteur du Lac Houlière. Le filtrage des données, l'élimination des polygones de moins de six pixels, la précision dans la sélection des zones d'entraînement pour les classes de densité des tiges, sont des traitements qui ont pu tout aussi influencer la précision des données de la classification. La transformation de la classification (matrice) sous la forme de vecteurs a pu modifier quelque peu les superficies des polygones, puisqu'il peut arriver des erreurs lors de la conversion des données du matriciel au vectoriel. Donc, cette technologie peut amener des résultats n'indiquant pas avec exactitude les données réelles, mais apporte quand même une bonne évaluation des phénomènes et ce, sur de grands territoires. Malgré la généralisation de l'information cartographique, la validation sur le terrain a démontré une bonne interprétation des données.

La méthodologie utilisée ne tient pas compte de la hauteur des arbres. Les données du MRN sur la hauteur des arbres n'ont pas été considérées puisqu'en 1988, lors de la production des cartes forestières de ces feuillets cartographiques, une bonne partie du territoire était dotée de la classe de hauteur 0, ce qui aurait diminué la superficie totale du modèle final. En utilisant l'image satellitaire, la hauteur devenait moins importante pour le modèle car avec l'image satellitaire, la densité des tiges est établie selon le pourcentage de recouvrement des feuilles. C'est une des raisons pour laquelle on a utilisé une image de

printemps lorsque les feuillus étaient dépourvues de feuilles. Ces feuillus auraient pu recouvrir les espèces résineuses, ce qui aurait augmenté l'évaluation de la densité des tiges résineuses.

En fait, la principale raison qui veut que nous ayons utilisés une image de printemps sans l'impact des feuillus est que nous voulons traiter et prioriser les résineux. Il faut donc s'assurer qu'ils soient présents en nombre suffisant.

Il demeure néanmoins quelques interrogations sur les informations disponibles. La différence entre les années des données recueillies a pu influencer les statistiques finales du modèle intégré; par exemple, les données numérisées provenant du ministère des Ressources naturelles dataient de 1987. Les données de l'image satellitaire dataient de 1991. Les données d'inventaire pour la réalisation de la classification date de 1993 et les données qui ont servi à la vérification terrain dataient de 1993 et 1995. Les informations disponibles peuvent avoir une différence de huit ans. Ceci représente une bonne marge temporelle entre les données. Depuis 1987, il y a eu des interventions forestières sur les territoires étudiés et la croissance des jeunes peuplements a sûrement évoluée. En effet, une partie du secteur du Lac Houlière a subi à l'été 1991 des interventions en termes de la coupe d'éclaircie précommerciale. Cette section traitée à l'été 1991 fait partie du modèle intégré pour ce secteur. La superficie visée, c'est-à-dire là où il y a eu des interventions forestières,

couvre 418 ha. Ce sont tous des facteurs dont il faut tenir compte et c'est pour cette raison qu'il est suggéré de visiter le terrain avant de prendre la décision finale.

La procédure employée pour l'élaboration du modèle a été de sélectionner quatre critères essentiels, c'est-à-dire quatre conditions favorables à l'intervention sous forme de coupe d'éclaircie précommerciale. Le premier critère est la densité des tiges. Chez Abitibi-Price Inc., les contrats de coupe d'éclaircie se donnent sur le nombre de tiges à l'hectare dans des peuplements supérieures à 5 000 tiges à l'hectare. On a utilisé la télédétection pour évaluer les taux de densité des tiges résineuses (moyenne). Le deuxième critère utilisé est la pente. En forêt, la machinerie lourde ne peut accéder aux territoires de plus de 40 % d'inclinaison de pente. Le système d'information géographique a permis d'élaborer ce type de couverture. Le troisième critère est l'origine des perturbations. Une bonne partie de ces territoires a déjà subi une perturbation que ce soit par coupe totale, feu, épidémie sévère ou autres. Pour la coupe d'éclaircie précommerciale, les territoires perturbés par la récolte et les épidémies sévères ont une bonne régénération naturelle. Ce sont ces territoires qui ont été sélectionnés pour l'intégration au modèle final. Le quatrième critère est l'âge de la perturbation. En effet, l'âge, la dimension de la tige et la hauteur de l'arbre sont des signes importants dans le choix des secteurs possibles à l'intervention. C'est pour cela que l'on a sélectionné la classe d'âge de 10 ans qui inclut les peuplements situés entre 5 et 20 ans d'âge (âge idéal pour l'intervention de la coupe d'éclaircie précommerciale). Le diamètre et la hauteur des arbres des autres classes d'âge sont trop élevés pour la coupe d'éclaircie

précommerciale. Les quatre critères choisis n'avaient pas le même niveau d'importance. Le facteur le plus important de tous était la densité des tiges que nous avons essayé d'identifier avec l'aide de la télédétection. C'était le critère déterminant pour mener le projet à bien. Les trois autres critères étaient importants dans le sens qu'ils venaient encadrer la densité des tiges dans le but de circonscrire des sites potentiels à la coupe d'éclaircie précommerciale.

Donc, la superposition finale de tous les critères nous donne un modèle qui évalue la superficie totale où l'intervention est possible dans un feuillet cartographique. Pour le secteur du Lac Onatchiway, le modèle indique une superficie totale de 3 317 ha de terrain potentiels à la coupe d'éclaircie précommerciale où chacun des critères est respecté. Pour le secteur du Lac Houlière, 5 796 ha d'aires potentiels à la coupe d'éclaircie précommerciale se retrouvent sur le modèle intégré.

Ce modèle intégré s'avère intéressant et utile à double titre. Il est possible de situer ou pointer les endroits d'intervention et d'y observer le morcellement des sites potentiels. Il est possible également de mesurer la superficie des territoires potentiels et bien sûr de voir l'accès à ces territoires quand on fait intervenir le réseau de chemins forestiers. Cependant, une visite des lieux est nécessaire avant la prise de décision finale car la densité des tiges n'est qu'une estimation.

L'utilisation de l'imagerie LANDSAT-TM a démontré qu'il est possible d'interpréter certains phénomènes physiques observables sur un grand territoire et cela à une résolution acceptable. L'utilisation du système d'information géographique a permis de rassembler l'information, d'élaborer des modèles successifs, dont le modèle final qui va aider aux intervenants forestiers à sélectionner les endroits susceptibles d'être l'objet d'éclaircie précommerciale.

## CONCLUSION

Avec les résultats obtenus, on peut conclure que le modèle intégré vient en aide aux décideurs et aux intervenants en forêt pour la conception de plans d'aménagement forestier. Le modèle a été conçu dans le but de visualiser rapidement les secteurs faisant partie des critères de sélection. L'utilisation d'une image satellitaire LANDSAT-TM de printemps à 30 m de résolution est un moyen moderne avec lequel nous avons pu identifier et classifier dans un grand territoire les densités des tiges des jeunes peuplements résineux. La raison pour laquelle l'utilisation de la télédétection semble plus favorable que les techniques traditionnelles est qu'une image satellite couvre beaucoup plus de territoire qu'une photographie aérienne et que la classification des objets ou des phénomènes au sol se fait automatiquement avec l'aide de l'informatique. L'utilisation de la télédétection a permis également de diminuer les coûts de production des inventaires de régénération naturelle de plusieurs milliers de dollars.

L'objectif de déterminer un nombre de tiges de résineux à l'hectare dans les jeunes peuplements a donc été atteint. La vérification terrain a démontré une bonne similitude entre les densités des tiges inventoriées sur le terrain et celles apparues sur la classification de l'image satellitaire. La télédétection devient alors un nouvel apport à la planification forestière. L'intégration des données de la télédétection dans le système d'information géographique a facilité la confection du modèle. Le système d'information géographique a

permis de réaliser, avec l'aide de données thématiques et de données satellitaires, un modèle cartographique pouvant favoriser la prise de décision.

Il est maintenant possible de visualiser les sites potentiels d'intervention pour la coupe d'éclaircie précommerciale dans les secteurs étudiés et également de questionner la base de données que ce soit sur les superficies, périmètres ou autres. La coupe d'éclaircie précommerciale n'est qu'une des interventions possibles à exécuter en forêt. Plusieurs autres traitements sylvicoles sont réalisables et l'utilisation d'une image satellitaire peut servir à tous ces travaux ainsi qu'à l'aménagement du territoire. Le système d'information géographique peut également déterminer des interventions impliquant plusieurs autres types de travaux sylvicoles en forêt comme la scarification, la coupe par bandes, la coupe d'éclaircie commerciale etc. Ceci vient démontrer que de plus en plus, ces outils deviendront indispensables dans la gestion du territoire. Maintenant que le modèle est conçu, il ne reste plus qu'aux décideurs forestiers d'établir leurs secteurs d'intervention pour la coupe d'éclaircie précommerciale. Lors de la sélection des zones à exploiter, les décideurs pourront déterminer avec l'aide du système d'information géographique par l'entremise de zone tampons, la distance des routes par rapport aux sites potentiels dans le but de choisir les sites en fonction des coûts les plus bas. Ce n'est qu'un exemple de ce qu'il est possible de faire avec l'aide du SIG et du modèle réalisé.

Le projet aurait pu aller plus loin. Par exemple nous aurions pu utiliser la télédétection pour tenter de classifier les autres critères de sélection comme la hauteur des peuplements, l'origine et l'âge des perturbations. Nous aurions pu également comparer les résultats d'une image d'été avec celle de printemps, pour voir si la présence des feuilles chez les feuillus aurait pu influencer les données de densité des tiges. Ce sont toutes des questions vers lesquelles pourraient s'orienter les futures recherches, effectuées à l'aide de la télédétection et de la géomatique, sur les différents stades de développement des strates forestières.

## BIBLIOGRAPHIE

- ABITIBI-PRICE INC. 1994. Normes de numérisation de cartes forestières à l'échelle 1: 20 000. 25 p.
- ABITIBI-PRICE INC. 1995. Rapport E.P.C. 1995. 111 p.
- ABITIBI-PRICE INC. 1986. Silviculture Pre-Commercial Thinning Assessment. 18 p.
- AHERN, F.J. and W.J. BENNETT. 1985. Accentuation des images multispectrales pour des applications en foresterie. Centre canadien de télédétection. Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, Canada, Ottawa. Manuel de l'usager, 85: 27 p.
- ARAI, K., D.G. GOODENOUGH, K. FUNG, J. IISAKA and M. ROBSON. 1986. Consideration on an Optimum Treshold for the Maximum Likelihood Classifier for TM Data. *IN* Thompson, D. and R.J. Brown, eds. Compte rendu du 10e Symposium canadien sur la télédétection, Edmonton 5-8 mai 1986, vol. II, pp. 991-993.
- ARANOFF, S., R. MOSHER and R.V. MAHER. 1987. Operational Data Integration : Image Processings to Interface Vector GIS and Remotely Sensed Data. *IN* Proc. GIS 89, ASPRS, ACMS, Falls Church, Virginia, pp. 216-225.
- BAKER, A.B. 1992. Integration of Landsat TM and Airborne Radar Data into an Operational GIS for Forest Inventory Applications. *IN* Hornsby, J.K., King, D.K. and Prout, N.A., eds. Un monde d'applications. Compte rendu du 15e Symposium canadien sur la télédétection, Toronto, 1-4 juin 1992, pp. 119-123.
- BEAUBIEN, J. 1980. La cartographie végétale par satellite. Forêt conservation, vol. 47, no. 1: pp. R7-R10.
- BEAUBIEN, J. 1986. Visual Interpretation of Vegetation Through Digitally Enhanced Landsat-MSS Images. *IN* Cihlar, J., ed. Remote Sensing Reviews. The Use of Landsat Data in Forestry, vol. 2, part 1: pp. 111-143.

- BEAUBIEN, J. 1987. Méthodologie d'accentuation des images TM pour une meilleure discrimination des couverts forestiers. *IN* Howarth, P.J., ed. Compte rendu du 11e Symposium canadien sur la télédétection, Waterloo, 22-25 juin 1987, pp. 227-237.
- BENSON, A.S. and S.D. DEGLORIA. 1985. Interpretation of Landsat-4 Thematic Mapper and Multispectral Scanner Data for Forest Surveys. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, no. 9, sept. 1985: pp. 1281-1289.
- BONN, F. et G. ROCHON. 1993. *Précis de télédétection: vol. 1, principes et méthodes.* 485 p.
- BORDE, V. 1995. Aménagement forestier: les bienfaits de la géomatique. *Interface*, vol. 16, no. 1, janv-fév. 1995, pp. 60-61.
- BRYANT, E., A.G. DODGE jr. and S.D. WARREN. 1980. Landsat for Practical Forest Type Mapping: a Test Case. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 46, no. 12, dec. 1980, pp. 1575-1584.
- CALOZ, R. 1990. Système d'information géographique I et II. Notes de cours, Institut d'aménagement des terres et des eaux, École polytechnique fédérale de Lausanne, 138 p.
- CHALIFOUX, S., F. CAVAYAS et J. GRAY. 1993. Suivi de la ressource forestière à l'aide des images satellites. *S.I.G. et Environnement*, Les dossiers de la revue de géographie alpine, no. 9, pp. 53-58.
- CUSHNIE, J.L. and P. ATKINSON. 1985. Effect of Spatial Filtering on Scene Noise and Boundary Detail in Thematic Mapper Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 51, no. 9, sept. 1985, pp. 1483-1493.
- DEDIEU, J.P. 1993. Télédétection appliquée à l'environnement et Systèmes d'information géographique: le cas des images en zone de montagne. *S.I.G. et Environnement*, Les dossiers de la revue de géographie alpine, no. 9, pp. 59-62.
- EDWARDS, G. 1993. The Integration of Remote Sensing and GIS: Fundamental Questions and New Approaches. *IN* Gagnon, P. and O'Neill, N., eds. Actes du 16e Symposium canadien sur la télédétection et 8e congrès de l'Association québécoise de télédétection, Sherbrooke, 7-10 juin 1993, pp. 873-878.

- EDWARDS, G., Y. B...DARD and M. EHLERS. 1990. Advanced Integration of Remote Sensing Image Analysis with Geographic Information Systems. *IN* Proc. GIS for the 1990s, CISM, Ottawa, pp. 1574-1584.
- ENVIRONNEMENT CANADA. 1982. Normales climatiques du Canada, 1951-1980, Températures et précipitations, Québec. Service de l'environnement atmosphérique, 216 p.
- E.S.R.I. 1991. Arc/Info User's Guide 6.0, Map Display and Query, Arcplot, Symbology, and Plotting. Redlands, CA, USA.
- E.S.R.I. 1991. Arc/Info User's Guide 6.0, Editing Coverages and Tables with Arcedit, Arc/Info's Graphic Editor. Redlands, CA, USA.
- E.S.R.I. 1991. Understanding GIS; The Arc/Info Method, Rev. 6 for Workstations. Redlands, CA, USA.
- E.S.R.I. 1991. Arc/Info User's Guide. Surface Modeling with Tin, Surface Analysis and Display. Redlands, CA, USA.
- E.S.R.I. 1994. Introducing ArcView (version 2.0). Redlands, CA, USA.
- FORELLA, M. and W. J. RIPPLE. 1993. Determining Successional Stage of Temperate Coniferous Forests with Landsat Satellite Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, no. 2, feb. 1993, pp. 239-246.
- FORELLA, M. and W. J. RIPPLE. 1993. Analysis of Conifer Forest Regeneration using Landsat Thematic Mapper Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 59, no. 9, sept. 1993, pp. 1383-1388.
- FORTIER, J.J., A. DUPRAS et B. LACHAPELLE. 1991. La classification des pixels et l'estimation des proportions de chaque classe avec applications à la mesure de la surface des couverts forestiers. *IN* Gagnon P., éd. *Télédétection et Gestion des Ressources*. Compte rendu du 7e congrès de l'Association québécoise de télédétection, Montréal, 23-25 oct. 1991, vol. VII : pp. 195-202.
- GAUTHIER, M.J., C. GIRARD et L. LANGLOIS. 1993. L'inventaire forestier de la forêt Simoncouche, description, cartographie et simulation d'exploitation. Université du Québec à Chicoutimi, Laboratoire de géomatique et Groupe de recherche en productivité végétale. Rapport de recherche, 32 p.

- GAUTHIER, M.J. et L. LANGLOIS. 1993. Exploitation des données de base du cadre écologique de référence de la forêt Simoncouche. Université du Québec à Chicoutimi, Laboratoire de géomatique et Groupe de recherche en productivité végétale. Rapport de recherche, 48 p.
- GAUTHIER, M.J. et L.M. BOUCHARD. 1981. Atlas régional du Saguenay—Lac-Saint-Jean, "À la découverte de la Sagamie". Les Laboratoires de géographie de l'UQAC, Gaëtan Morin, éd. 98 planches.
- GONZALES, J. 1994. GIS Applications Persepective: using Remote Sensing and GIS for Modeling Old-growth Forests. *Remote Sensing and GIS in Ecosystem Management*, V.A. Sample, ed. Island Press, pp. 157-174.
- GOODENOUGH, D.G., G.W. PLUNKETT and J.J. PALIMAKA. 1985. On the Transfer of Remote Sensing Classifications into Polygon Geocoded Data Bases in Canada. *IN Proc. Autocarto 6*, ASPRS, Falls Church, Virginia, pp. 598-606.
- GOUVERNEMENT DU CANADA. 1985. Le Centre canadien de télédétection. Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, 27 p.
- GOUVERNEMENT DU CANADA. 1986. Télédétection et Foresterie. Ministère des Forêts. 5 p.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. 1988. Cartographie des districts écologiques: Normes et Techniques. Service de l'inventaire forestier, Ministère de l'Énergie et des Ressources, 85 p.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. 1989. Modalités d'intervention en milieu forestier. Guide, 81 p.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. 1988. Carte forestière 1: 20 000, 22E/03 S.E. Ministère de l'Énergie et des Ressources. Direction de l'aménagement de la forêt. Service de l'inventaire forestier.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. 1988. Carte forestière 1: 20 000, 22E/14 S.E. Ministère de l'Énergie et des Ressources. Direction de l'aménagement de la forêt. Service de l'inventaire forestier.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. 1991. Un projet de stratégie - Aménager pour mieux protéger les forêts. Ministère de l'Énergie et des Ressources, 160 p.

- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. 1992. Manuel d'aménagement forestier. Ministère des Forêts, 267 p.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. 1993. Instructions relatives à l'application du règlement sur la valeur des traitements sylvicoles admissibles en paiement des droits, exercice 1994-1995. Service des techniques d'intervention forestière, 174 p.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. 1993. Quinze ans de télédétection en foresterie. Numérimage, Bulletin du centre de télédétection du Québec, vol. II, no. 2: 8 p.
- HENCO SOFTWARE. 1991. INFO User's Guide. Redlands, CA, USA.
- HORLER, D.N.H. and F.J. AHERN. 1986. Forestry Information Content of Thematic Mapper Data. International Journal of Remote Sensing, vol. 7, no. 3 : pp. 405-428.
- HOUDE, J. 1990. Les travaux précommerciaux: l'exécution. Colloque sur l'éclaircie commerciale et précommerciale, Abitibi-Price Inc., Chicoutimi, 7 juin 1990, 23 p.
- HOUNGAVOU-MIALOT, P. 1993. Les systèmes d'information géographique pour gérer la forêt: possibilités. S.I.G. et Environnement, Les dossiers de la revue de géographie alpine, no. 9, pp. 47-50.
- LABONTÉ, M. 1988. Cartographie des surfaces forestières en régénération naturelle après exploitation au moyen des données du capteur MEIS II: secteur du Lac Basile, Lac-Saint-Jean, Québec. Mémoire de maîtrise, Département de géographie et de télédétection, Université de Sherbrooke, 1988, 77 p.
- LEPRIEUR, C.E. and J.M. DURAND. 1988. Influence of Topography on Forest Reflectance using Landsat Thematic Mapper and Digital Terrain Data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, no. 4, april 1988, pp. 491-496.
- LETARTE, R. 1982. La télédétection et l'inventaire forestier. IN Bonn, F., éd. Télédétection et Gestion des Ressources. Compte rendu du 3e congrès de l'Association québécoise de télédétection, Université Laval, 1980, vol. 3, pp. 25-31.

- LEVESQUE, A. 1987. Propositions d'utilisation des satellites Landsat 5 (TM) et Spot 1 pour l'inventaire et l'aménagement forestiers: applications en forêts domaniales de Rambouillet, St-Germain et Trappes. Institut d'aménagement et d'urbanisme de la région de l'Île-de-France, École nationale des ingénieurs des travaux des eaux et forêts, 183 p.
- LILLESAND, T.M. and R.W. KIEFER. 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*, Second Edition, John Wiley and Sons Inc., New York, 721 p.
- MADRY, S.L.H. 1989. Geographic Resource Analysis Support System (GRASS), an Integrated, UNIX-based Public Domain GIS and Image Processing System for Resource Analysis and Management. *IN Proc. Challenge for the 1990s*, CISM, Ottawa, pp. 1300-1308.
- MAHER, R.V., D. COLVILLE and D. RIGBY. 1985. Two Days Data Transfer between ARIES Image Analysis System and ARC/INFO Geographic Information System. *IN Proc. Autocarto 6*, ASPRS, Falls Church, Virginia, pp. 588-597.
- MANORE, M. 1990. La télédétection et les SIG - un heureux mariage. *Geos*, vol. 19: 2, printemps 1990, pp. 17-22.
- MARIE-VICTORIN, Fr. 1964. Flore Laurentienne. Deuxième édition, Montréal, Les Presses de l'Université de Montréal, 925 p.
- MAROIS, C. 1993. Environnement et système d'information géographique. *S.I.G. et Environnement*, Les dossiers de la revue de géographie alpine, no. 9, pp. 11-14.
- MATHER, P.M. 1991. *Computers Applications in Geography*. John Wiley and Sons, New York, 257 p.
- MORIN, R.L., E.E. DERENYI, R.W. WEIN and R. YAZDANI. 1986. Comparison of Classification and Enhancement Techniques using Landsat Imagery for the Northern Coniferous Forest. *IN Thompson, D and R.J. Brown, eds. Compte rendu du 10e Symposium canadien sur la télédétection*, Edmonton, 5-8 mai 1986, vol. I, pp. 197-206.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES U.S. 1976. *Resource and Environmental Surveys from Space with the Thematic Mapper in the 1980's*. The National Research Council, Washington D.C., 122 p.

- PAINÉ, S.H. and M.P. MEPHAM. 1986. Spatial Filtering of Digital Landsat Data for the Extraction of Mapping Information. *IN* Thompson, D and R.J. Brown eds. Compte rendu du 10e Symposium canadien sur la télédétection, Edmonton, 5-8 mai 1986, vol. I, pp. 27-40.
- PARENT, S. 1990. Dictionnaire des sciences de l'environnement. Éditions Broquet, 748 p.
- PCI. 1992. Using PCI Software. Easi/Pace, version 5.1. Richmond Hill, Canada.
- PCI. 1993. Easi User's Guide. Version 5.2. Richmond Hill, Canada.
- PCI. 1994. Using PCI Software. Easi/Pace, version 5.3. Richmond Hill, Canada.
- PCI. 1994. Imageworks. Reference Manual, version 5.3. Richmond Hill, Canada.
- PIERCE, R.N., D.B. MAGEE, D.F. SALTER and S.W. HUNSELL. 1992. The Use of Digital Forest Resources Data and Landsat Imagery in an Intergrated Approach for Forest Cover Classification. *IN* Hornsby, J.K., King, D.K. and Prout, N.A., eds. Un monde d'applications. Compte rendu du 15e Symposium canadien sur la télédétection, Toronto, 1-4 juin 1992, pp. 91-95.
- RICHARD, P.J.H. 1987. Le couvert végétal au Québec—Labrador et son histoire postglaciaire. Notes et documents, Département de géographie, Université de Montréal, septembre 1987, 74 p.
- ROBERTSON, S.L. and R.K. NESBY. 1986. TM and MEIS Data for Future Alberta Forest Inventories. *IN* Thompson, D and R.J. Brown, eds. Compte rendu du 10e Symposium canadien sur la télédétection, Edmonton, 5-8 mai 1986, vol. II, pp. 997-1000.
- RYERSON, R., J.L. TAMBAY, R. PLOURDE et J. HARVIE. 1983. Utilisation des données Landsat, des données de terrain et d'un estimateur de régression pour l'estimation des surfaces de culture de la pomme de terre. Centre canadien de télédétection. Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources du Canada, Ottawa, manuel de l'usager 83: 2: 37 p.
- SABINS, F.F., JR. 1987. Remote Sensing: Principles and Interpretation. Second edition, W.H. Freeman and Company, New York, 449 p.

- SAUCHYN, D.J. and Y. XONGCHAO. 1991. Translation of Remote Sensing Data for Integrated use in a Vector GIS. *IN* Franklin, S.E., Thompson, D. and Ahern, F.J., eds. Compte rendu du 14e Symposium canadien sur la télédétection, Calgary, 6-10 mai 1991, pp. 134-137.
- SAYN-WITTGENSTEIN, L. 1986. Forest Information Requirements. *IN* Cihlar, J., ed. Remote Sensing Reviews. The Use of Landsat Data in Forestry, vol. 2, part 1, pp.7-26.
- STEBINS, D.H. and M.S. AKHAVI. 1993. Remote Sensing and GIS Integration for Forestry Applications in the Rocky Mountain Foothills, near Calgary, Alberta. *IN* Gagnon, P. and O'Neill, N., eds. Actes du 16e Symposium canadien sur la télédétection et 8e congrès de l'Association québécoise de télédétection, Sherbrooke, 7-10 juin 1993, pp. 901-902.
- THÉRIAULT, M. 1995. Système d'information géographique: concepts fondamentaux. Notes et documents de cours, numéro 12, LATIG, Département de géographie, Université Laval, janvier 1995, 165 p.
- THIBAULT, M. 1985. Les régions écologiques du Québec méridional. Carte, deuxième approximation. Québec, ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec.
- VEILLETTE, D. et V. GÉRARDIN. 1985. Cadre écologique de référence de l'unité de gestion des Chics-Chocs (partie occidentale). Quelques interprétations pour l'aménagement forestier. Contributions de la division des inventaires écologiques, no. 18, 33 p.
- WELCH, R. et M. REMILLARD. 1992. Integration of GPS, Remote Sensing and GIS Techniques for Coastal Resource Management. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 58, no. 11, nov. 1992, pp. 1571-1578.
- WHITE, J.D., G.C. KROH and J.E. PINDER III. 1995. Forest Mapping at Lassen Volcanic National Park, California, using Landsat TM Data and a Geographical Information System. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 61, no. 3, march 1995, pp. 299-305.