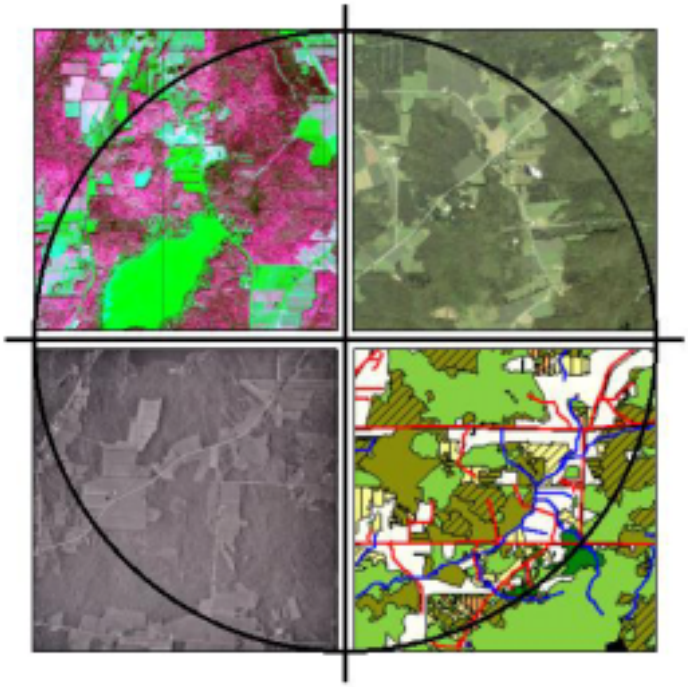
DÉTECTION ET CARACTÉRISATION DES FRICHES POUR LEUR MISE EN VALEUR FORESTIÈRE EN MONTÉRÉGIE



Rapport de recherche présenté au
Ministère des Ressources naturelles du Québec
Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier
Volet II — Projet # 2-03-63-48

Par

Marc Delage[1], Nicolas Soucy-Gonthier[2], Danielle Marceau[2], Lie Nicaise Mezui[2], Alain Cogliastro[3] et André Bouchard[3]

[1] Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) et Réseau Ligniculture Québec (RLQ)
[2] Laboratoire de géomatique et d'analyse spatiale du Département de géographie (Université de Montréal)
[3] Institut de recherche en biologie végétale (IRBV)

Septembre 2005

Laboratoire
de Géomatique
et d'Analyse Spatiale

DÉTECTION ET CARACTÉRISATION DES FRICHES POUR LEUR MISE EN VALEUR FORESTIÈRE EN MONTÉRÉGIE

Rapport de recherche
présenté au
Ministère des Ressources naturelles du Québec
Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier - Volet II

Projet # 2-03-63-48

Par

Marc Delage[1], Nicolas Soucy-Gonthier[2], Danielle Marceau[2],
Lie Nicaise Mezui[2], Alain Cogliastro[3] et André Bouchard[3]

Septembre 2005

[1] Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) et Réseau Ligniculture Québec (RLQ) ; [2] Laboratoire de géomatique et d'analyse spatiale du Département de géographie (Université de Montréal) ; [3] Institut de recherche en biologie végétale (IRBV)

Table des matières

Page

Liste des tableaux et des figures..... ii
Résumé..... 1
Introduction..... 2
Choix des sites d'étude..... 2
Qu'est-ce qu'une friche ? pour les utilisateurs ? pour un satellite ?..... 3
Méthodologie..... 7
Cueillette des données 7
Photo-interprétation..... 10
Analyse des images satellitaires..... 12
A) Description des données et géoréférence..... 12
B) Amélioration des images..... 12
a) application d'un indice de végétation..... 13
b) application d'un composé fausses couleurs..... 13
c) application d'un rehaussement..... 13
d) application d'un filtre 14
C) Interprétation et classification visuelle 14
Production de cartes détaillées d'utilisation du sol 18
Validation sur le terrain..... 18
Résultats et discussion..... 23
Cartes d'utilisation du sol..... 23
A) Analyse de la structure spatiale des classes d'utilisation du sol 23
B) Exemples-types des classes d'utilisation du sol 26
Validation et fiabilité des résultats : images satellitaires 34
A) Problèmes résiduels..... 37
B) Autres observations..... 41
Validation et fiabilité des résultats : photos aériennes 42
Trois dimensions *vs* signature spectrale : comparaison entre les méthodes et niveau de précision..... 44
Classification automatisée ou du pixel au polygone d'utilisation du sol 48
Conclusion..... 50
Remerciements..... 51
Références..... 52

Annexe 1 : Couverture de photos aériennes 55

Liste des tableaux

Page

Tableau I : Critères de classification visuelle 17

Tableau II : Analyse de la structure spatiale du médaillon d'Acton 23

Tableau III : Analyse de la structure spatiale du médaillon de Brome-Missisquoi 26

Tableau IV : Validation du médaillon d'Acton interprété à partir de l'image satellitaire IKONOS 34

Tableau V : Validation du médaillon de Brome-Missisquoi interprété à partir de l'image satellitaire IKONOS 35

Tableau VI : Validation du médaillon d'Acton interprété à partir des photographies aériennes 43

Tableau VII : Validation du médaillon de Brome-Missisquoi interprété à partir des photographies aériennes 43

Tableau VIII : Comparaison des deux méthodes (photos aériennes *versus* images satellitaires) pour le médaillon d'Acton 45

Tableau IX : Comparaison des deux méthodes (photos aériennes *versus* images satellitaires) pour le médaillon de Brome-Missisquoi 45

Liste des figures

Figure 1. Localisation des MRC d'Acton et de Brome-Missiquoi dans la Montérégie ... 4

Figure 2. Médaillons d'Acton et de Brome-Missisquoi localisés sur les cartes topographiques 8

Figure 3. Images IKONOS d'Acton et de Brome-Missisquoi 9

Figure 4. Étapes de la photo-interprétation 11

Figure 5. Image améliorée pour une portion de la MRC d'Acton (coin sud-ouest) 15

Figure 6. Les deux médaillons étudiés version améliorée en fausses couleurs 16

Figure 7. Interprétation visuelle du secteur de la figure 5 19

Figure 8. Planche préparée pour la validation sur le terrain avec les polygones sélectionnés à cette fin 21

Figure 9. Schématisation des étapes méthodologiques de l'analyse des images satellitaires 22

Figure 10. Carte d'utilisation du sol du médaillon d'Acton 24

Figure 11. Carte d'utilisation du sol du médaillon de Brome-Missisquoi 25

Figures 12 à 17. Illustration du lien entre les méthodes employées et l'utilisation du sol sur le terrain pour chacune des classes :
Figure 12 : Classe agricole 28
Figure 13 : Classe forêt 29
Figure 14 : Classe friche herbacée 30
Figure 15 : Classe friche ligneuse basse 31
Figure 16 : Classe friche ligneuse haute..... 32
Figure 17 : Classe plantation de conifères 33

Figure 18. Corrélation remarquable entre l'interprétation de l'image IKONOS et le terrain 36

Figure 19. Confusion dans l'interprétation entre la signature spectrale de la classe ligneuse haute et celle de certaines forêts mixtes mature 40

Figure 20. La photographie aérienne traditionnelle est plus précise que la classification visuelle de l'imagerie satellitaire..... 47

Figure 21. Essai de classification automatisée basée sur l'objet grâce à l'algorithme MOSS (*Multiscale Object-Specific Segmentation*) dans la MRC Le Haut-Saint-Laurent..... 49

Référence du présent rapport :

Delage, M., Soucy-Gonthier, N., Marceau, D., Mezui, L. N., Cogliastro, A. et Bouchard, A., 2005. Détection et caractérisation des friches pour leur mise en valeur forestière en Montérégie. Rapport de recherche, Institut de recherche en biologie végétale (IRBV), Réseau Ligniculture Québec et Département de géographie de l'Université de Montréal, 55 p.

RÉSUMÉ

DÉTECTION ET CARACTÉRISATION DES FRICHES POUR LEUR MISE EN VALEUR FORESTIÈRE EN MONTÉRÉGIE

Ce projet s'inscrit en continuité avec des travaux entrepris en 2003 dans le but de développer un système spatial d'aide à la décision permettant de déterminer les sites potentiels les plus prometteurs pour la mise en valeur forestière en Montérégie. Le développement d'un tel système comporte la production de cartes détaillées d'utilisation du sol à partir d'imagerie satellitaire à haute résolution spatiale IKONOS.

Deux secteurs expérimentaux ont été sélectionnés : un premier dans la région d'Acton, un second dans celle de Brome-Missisquoi. Ces secteurs sont caractérisés par une mosaïque paysagère très complexe où différents types de friche cohabitent avec des secteurs agricoles et forestiers en évolution. Une méthodologie particulière a dû être mise au point en vue de produire des cartes d'utilisation du sol comprenant six différentes classes (dont trois de friche) à partir de deux images IKONOS d'excellente qualité. L'interprétation de l'imagerie satellitaire a été comparée à la photo-interprétation traditionnelle. Les avantages et désavantages des deux méthodes sont présentés.

La perspective d'étendre l'analyse satellitaire à de grands territoires est évoquée à la lumière d'une toute nouvelle méthode de classification automatisée.

INTRODUCTION

L'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) et le Réseau Ligniculture Québec (RLQ) ont travaillé conjointement en vue d'acquérir des connaissances et de développer une expertise québécoise en ligniculture qui soit adaptée aux régions. La ligniculture peut être définie comme une culture intensive des arbres en plantation de courte révolution en vue d'obtenir le maximum de rendement de matière ligneuse.

Parmi les cinq champs de recherche visés par le RLQ, le volet 5 concerne la stratégie de déploiement et d'implantation des plantations et l'analyse des impacts aux plans environnemental et socio-économique. La mise en place d'un réseau de dispositifs expérimentaux est un des éléments clefs du volet de recherche. À cette fin, l'IRBV a, jusqu'à maintenant, proposé un modèle de populiculture pratiquée selon une sylviculture qui vise une double production de peupliers et de feuillus nobles (Paquette et Cogliastro, 2003 ; Réseau Ligniculture Québec, 2005).

Dans le but d'optimiser le déploiement des plantations, il est essentiel de connaître précisément les sites potentiellement disponibles ainsi que les rendements des espèces choisies en fonction des différentes conditions abiotiques et biotiques régionales. Le présent projet a pour objectif de répondre à la première de ces étapes en cherchant à développer des modèles informatiques d'analyse du territoire afin d'identifier d'abord les différentes utilisations du sol. Cette étape est fondamentale car le type d'aménagement forestier est notamment fonction de l'état biophysique des sites. Il est également important de prévenir les conflits possibles avec d'autres usages du territoire.

Les friches ont ainsi été visées en priorité car elles constituent des cibles accessibles de choix pour la plantation en milieu ouvert ou l'enrichissement assisté de jeunes strates arbustives ou arborées en évolution.

Choix des sites d'étude

La détection et la cartographie des friches via l'approche satellitaire est une technique relativement nouvelle. Il est donc indispensable avant de pouvoir couvrir de grands territoires, ce qui demeure l'objectif ultime de notre démarche, que la méthode choisie soit évaluée sur des portions territoriales réduites répondant à un certain nombre de critères. Parmi ceux-ci, il y a l'aspect économique (coûts d'acquisition des

données et temps d'analyse) et la « compétition d'usage ». Il serait en effet illusoire de planifier une mise en valeur forestière dans des zones déjà utilisées ou convoitées par d'autres usages tels l'agriculture et l'urbanisation.

La méthode ayant déjà été utilisée une première fois en secteur plus agricole dans la Municipalité régionale de comté (MRC) Le Haut-Saint-Laurent (Soucy-Gonthier, 2003), il a été convenu de la tester en zones plus forestières, mais toujours en Montérégie. Le choix s'est donc arrêté sur la MRC Brome-Missisquoi qui est, parmi les 15 MRC montérégiennes, la plus forestière avec 93 142 ha de forêt sur une superficie totale de 158 625 ha, soit 58,72 % de l'ensemble de la MRC et sur la MRC d'Acton qui vient au 3e rang des MRC avec la plus forte proportion de forêt par rapport à l'ensemble de son territoire (24 077 ha sur 58 201 ha ou 41,37 %)[1] (fig. 1).

Comparés au Haut-Saint-Laurent, les secteurs d'Acton et de Brome-Missisquoi sont caractérisés par une mosaïque paysagère beaucoup plus complexe où différents types de friche cohabitent avec des secteurs agricoles et forestiers. La grande variété dans les dépôts de surface et les sols a également constitué un critère de sélection.

Il est fondamental d'obtenir des données précises sur les zones les plus susceptibles de soutenir une vocation forestière, c'est-à-dire celles qui présentent des conditions biophysiques et spatiales les rendant moins sujettes à subir la pression du développement urbain ou agricole. À cela on pourrait ajouter les superficies qui permettraient une meilleure distribution des écosystèmes forestiers dans la trame agroforestière. Une planification en fonction de ce critère est possible, mais les conditions socio-politiques sont prépondérantes pour en assurer la réalisation. Selon les régions, les friches sont susceptibles de constituer des espaces tout désignés. Mais qu'est-ce qu'une friche ?

Qu'est-ce qu'une friche ? pour les utilisateurs ? pour un satellite ?

S'il y a bien une structure végétale dont la définition est variable, c'est bien celle de la friche. L'état de non-culture (agricole) et d'abandon est fréquemment évoqué pour la définir (Parent, 1990 ; George, 1993 ; Le Nouveau Petit Robert,

[1] Données pour 2002 d'après Soucy-Gonthier *et al.* (2003).

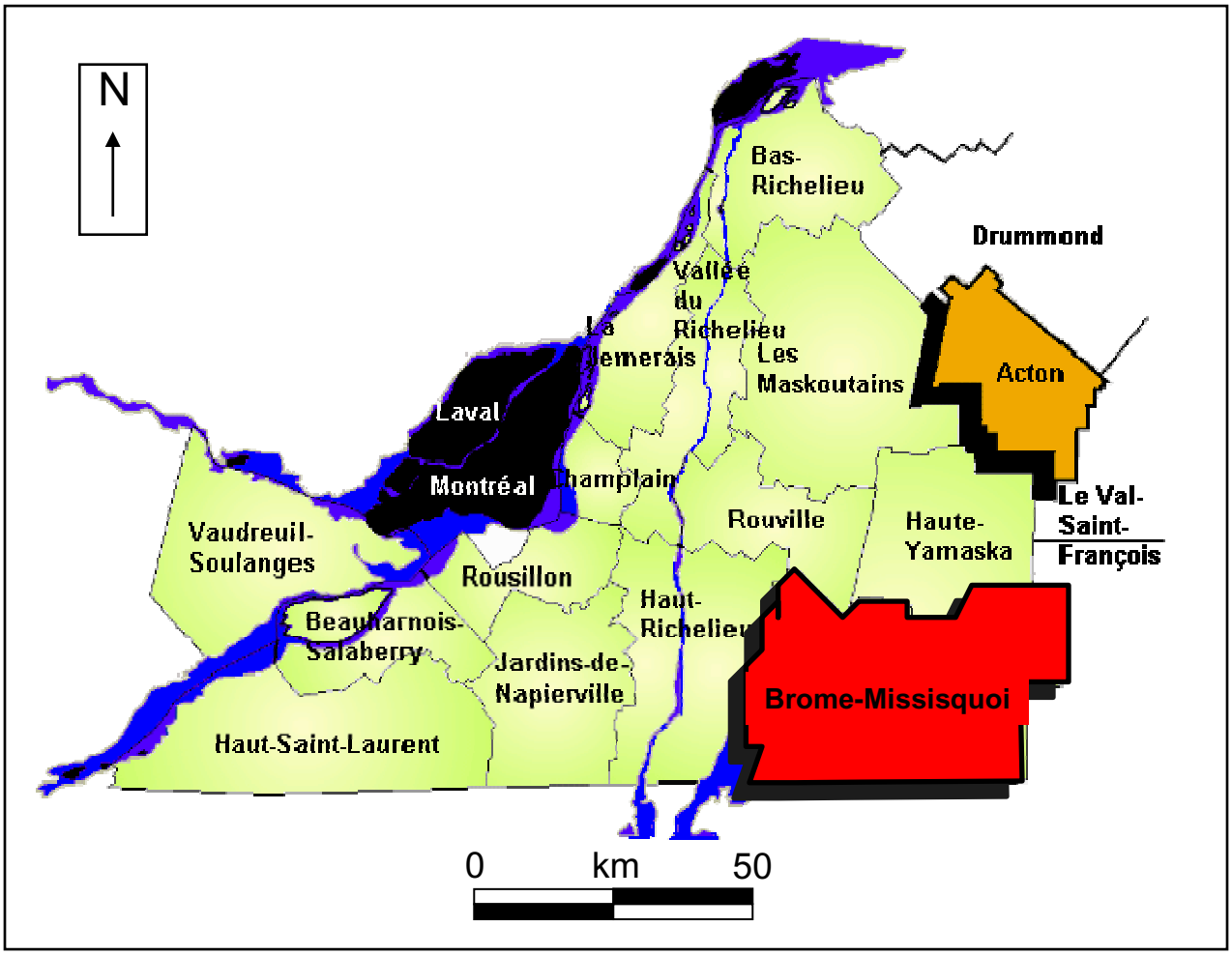


Figure 1. Localisation des MRC d'Acton et de Brome-Missiquoi dans la Montérégie.

1994 ; Le Petit Larousse illustré, 1995 ; Ressources Canada, 1995). Bien que le terme friche paraisse exclusivement rattaché au domaine agricole, on rencontre également les termes de friche forestière. Ces derniers termes semblent regrouper des réalités aussi diverses que des zones coupées aux premiers stades de la régénération ou le fait qu'un site est aujourd'hui sous un couvert forestier développé depuis l'abandon de l'activité agricole. Pour d'autres utilisateurs, tels les botanistes, l'historique de son évolution et sa composition floristique sont deux aspects incontournables de la friche.

Comme la présente étude a d'abord pour but de servir à des utilisateurs intéressés par la sylviculture et que les outils de perception à distance, telles les capteurs satellitaires, comportent des limitations quant à la précision de ce qui est possible de détecter, nous utiliserons un concept simple qui permette un usage multiple. D'ailleurs, la signature spectrale étant sensiblement la même entre les deux, comment les capteurs satellitaires peuvent-ils faire la différence entre un stade successionnel d'une jeune tremblaie dense ayant envahi un ancien champ agricole et une régénération dense (également de trembles) recolonisant le site d'une coupe totale ? À partir du contexte l'analyste peut, bien sûr, arriver à déduire certains éléments de l'historique de la communauté, mais cette information demeure spéculative. C'est pourquoi nous donnerons une seule dénomination pour une même structure végétale qu'elle soit d'origine agricole (colonisation végétale d'un champ abandonné) ou forestière (régénération suite à une coupe).

Le concept utilisé ici est inspiré de l'article de Payette et Gauthier (1972). Ces derniers considèrent trois critères pour la classification des structures de végétation : 1. les <u>formes de croissance</u> (ligneuse, herbacée et muscinale), 2. la <u>stratification</u> (arborescente, arbustive, herbacée et muscinale) et 3. le <u>recouvrement</u> des strates. Le pourcentage de recouvrement est basé sur les strates à découvert pour un observateur aérien (les strates ombragées étant ignorées). Lorsque l'ouverture de la strate dominante est supérieure à 20 % (sur un total de 100 %), la terminologie tient compte de la strate sous-dominante et est alors basée sur les deux principales strates (dominante et sous-dominante) au point de vue recouvrement spatial, ces strates déterminant ensemble le type de structure de la végétation.

À la différence de Payette et Gauthier (1972) dont la terminologie de classification exclut ce qui est lié à la genèse, la présente étude retient tout de même

le terme de friche dont l'usage est généralisé. Trois classes de friches sont considérées. Celles-ci sont basées sur les formes de croissance (ligneuse ou herbacée – la forme et la strate muscinales étant exclues) et la hauteur des strates et devaient être distinguables par télédétection à haute résolution (images IKONOS dont la résolution est de 4 m) (Marceau *et al.*, 2002 ; Soucy-Gonthier, 2003). La friche herbacée est composée majoritairement d'herbacées quelle que soit leur hauteur. La friche ligneuse basse inclut tout ce qui est ligneux (arbres ou arbustes) dont la hauteur se situe entre 0 et 5 m. La friche ligneuse haute est composée d'arbres dont la hauteur se situe entre 5 et 10 m. Au-delà de 10 m, c'est la classe forêt.

Cette classification diffère une fois de plus de celle employée par Payette et Gauthier (1972) en ce sens que plutôt que de qualifier les strates par les termes arbustif (arbustaie) et arboré ou arborescent (arboraie), nous leur préférons ceux de ligneux bas et ligneux hauts. Ces termes nous permettent de cerner la hauteur des espèces ligneuses sans faire référence à une architecture spécifique aux arbustes ou aux arbres. En d'autres mots, un groupe de jeunes arbres dont la taille est inférieure à 5 m mais dont l'architecture les différencie de la définition botanique d'arbuste peuvent aisément former une classe de ligneux bas alors qu'il eut été incorrect de les placer dans une classe « arbustive ».

MÉTHODOLOGIE

La méthodologie comporte les étapes suivantes : 1) la cueillette des données, 2) la photo-interprétation, 3) l'analyse des images satellitaires, 4) la production de cartes détaillées d'utilisation du sol et 5) la validation sur le terrain. L'approche générale utilisée pour chacune de ces étapes est décrite dans cette section.

Cueillette des données

La superficie territoriale couverte par chacune des deux nouvelles zones d'études est la même que pour l'image du Haut-Saint-Laurent, soit 11 km par 11 km ou 121 km^2. Parce que chacune d'elles ne représentent qu'une portion de feuillet cartographique à 1/50 000 nous les nommerons « médaillons »[2].

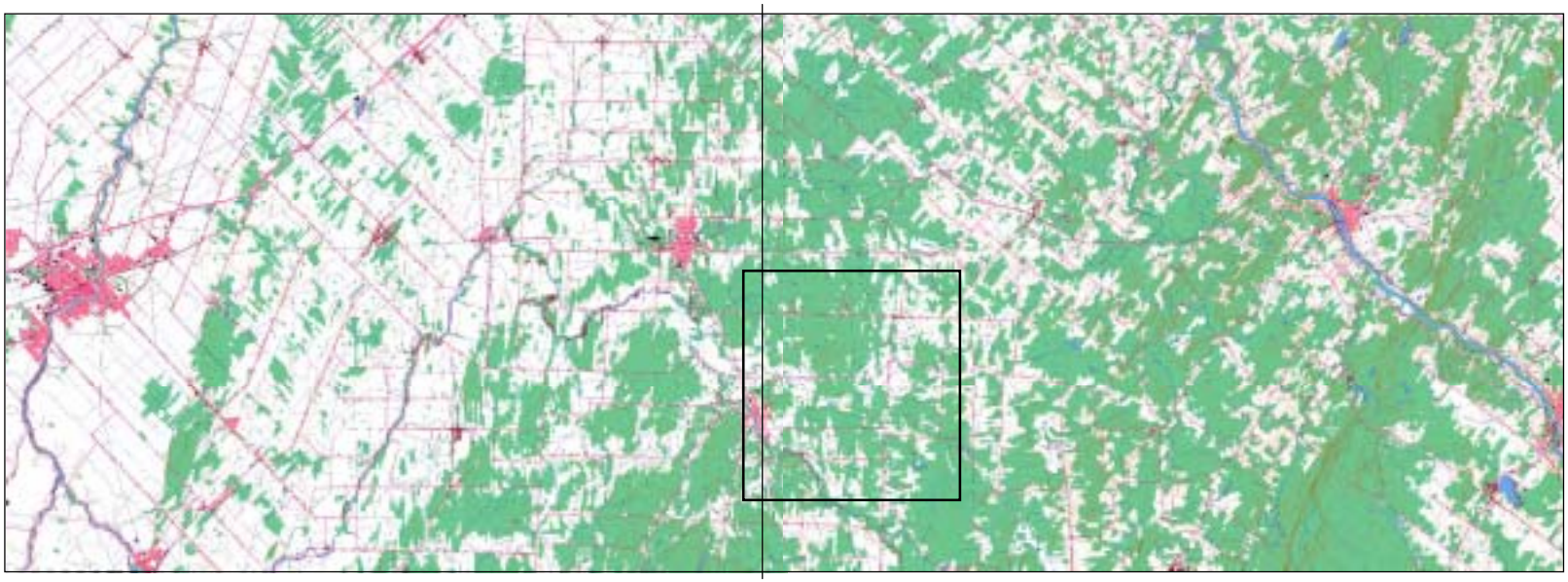
Le cadre des coordonnées géographiques du médaillon de la MRC d'Acton est compris entre les 45° 32' 00" et les 45° 38' 00" de latitude N. et les 72° 23' 00" et les 72° 31' 30" de longitude O. Celui du médaillon de Brome-Missisquoi est borné par les 45° 03' 30" et les 45° 09' 30" de latitude N. et les 72° 41' 30" et les 72° 50' 00" de longitude O. Les feuillets topographiques à 1/50 000 touchés par les médaillons sont respectivement ceux de Richmond (feuillet 31 H/9) et de Saint-Hyacinthe (feuillet 31 H/10) pour Acton, et celui de Cowansville (feuillet 31 H/2) pour Brome-Missisquoi (Ressources naturelles Canada, 1998, 2000a, 2000b) (fig. 2).

Le but de cette démarche méthodologique est ultimement de pouvoir couvrir rapidement de grands territoires avec les données disponibles les plus récentes. Dans cette optique, deux méthodes ont été comparées : l'analyse d'images satellitaires à haute résolution IKONOS *versus* celle par photographies aériennes.

Ainsi, deux images IKONOS multispectrales à 4 m de résolution spatiale ont été acquises en août 2003 couvrant chacune 121 km^2 (11 km X 11 km) (fig. 3). Les photographies aériennes panchromatiques à 1/15 000 datent de 1997 pour la région d'Acton et de 1998 pour celle de Brome-Missisquoi. L'annexe 1 donne plus de détails sur la couverture de photographies aériennes.

---

[2] Et ce, en dépit du fait que ces zones soient carrées plutôt que rondes ou ovales.



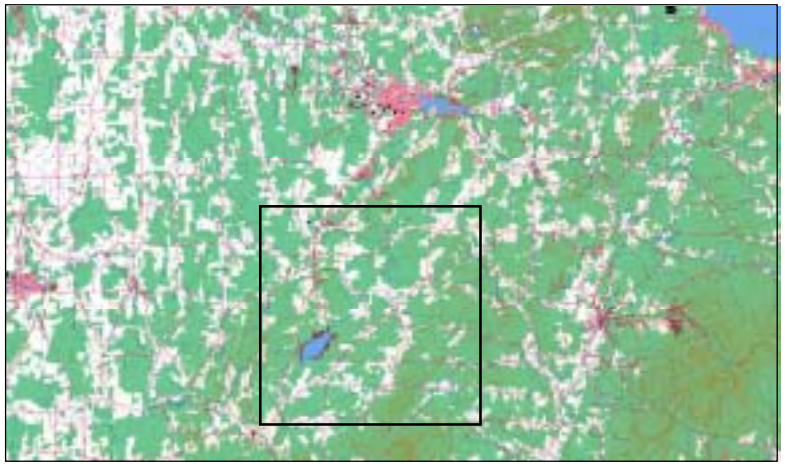
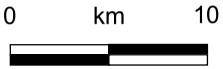
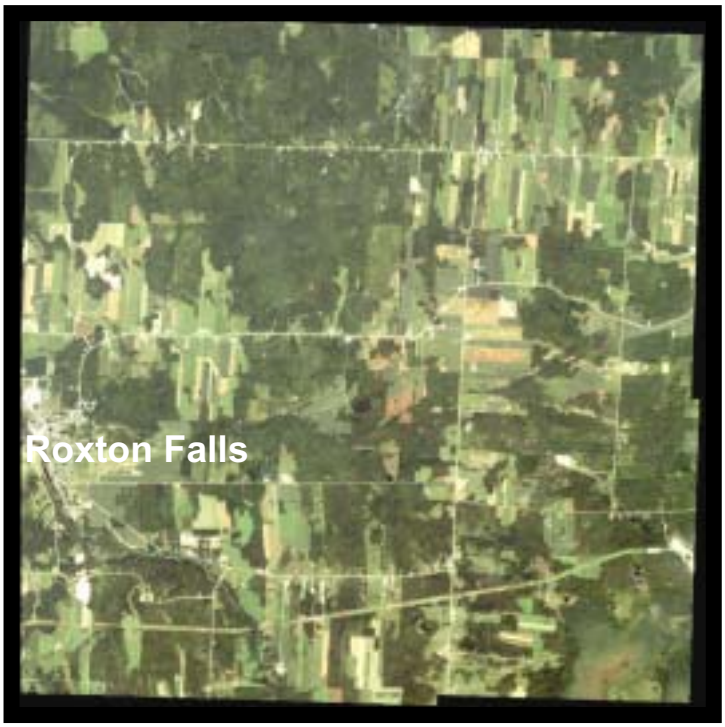
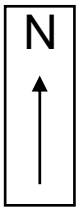


Figure 2. Localisation des médaillons. En haut, le médaillon d'Acton chevauchant les feuillets topographiques de Saint-Hyacinthe (31 H/10, à gauche) et de Richmond (31 H/09, à droite). En bas, le médaillon de Brome-Missisquoi dans la partie centrale du feuillet topographique de Cowansville (31H/02). La reproduction des cartes est une courtoisie du ministère des Ressources naturelles du Canada. [© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, ministère des Ressources naturelles. Tous droits réservés]





Acton



Brome-Missisquoi

Figure 3. Images IKONOS d'Acton et de Brome-Missisquoi. Chaque image fait 11 km de côté, soit 121 km^2.

Photo-interprétation

La photo-interprétation a joué un double rôle. Ainsi, outre le fait que nous désirions comparer cette méthode avec la télédétection satellitaire, les photographies aériennes ont servi à déterminer les sites d'entraînement pour l'interprétation des images IKONOS.

La photo-interprétation a été réalisée grâce à un stéréoscope à miroirs de type TOPCON. Les binoculaires ont été systématiquement utilisés afin d'obtenir le maximum de détail. Seize photos ont été interprétées sur un total de 21[3] dans le médaillon d'Acton ce qui nous permettait de mieux évaluer le temps nécessaire à réaliser une couverture complète en plus d'identifier des sites d'entraînement pour cette image. Seules trois photos ont été interprétées dans le médaillon de Brome-Missisquoi, celles-ci servant exclusivement à identifier des sites d'entraînement.

À l'échelle du 1/15 000, la puissance de résolution obtenue grâce aux binoculaires a permis une division très fine (des parcelles aussi petites que 225 m^2 ont été cartographiées), en particulier des parcelles de friches (figure 4). Pour chacune de celles-ci, les trois classes de friches ont été relevées en fonction de l'importance de leur répartition spatiale. Lorsque les trois étaient présentes, l'importance relative de chacune était notée. Outre les friches, nous avons également relevé les pâturages, les vergers et les vignobles en zone agricole ainsi que différentes observations en zone forestière : la forêt mature, la forêt jeune, les plantations (conifères et feuillus), différents types de coupes (totale, par bandes, partielle, en régénération). Quelques observations accessoires ont aussi été notées telles que les types de tourbière et la présence d'andains.

Cet exercice était indispensable à titre de référence pour la personne en charge de l'interprétation satellitaire afin qu'elle puisse compter sur des données de base aussi précises que possible, surtout dans le contexte où nous cherchions à connaître les limites de précision de chaque approche. Mentionnons toutefois qu'une des principales difficultés de ce genre de travail est d'arriver à uniformiser la perception durant la durée totale de l'exercice.

---

[3] Nombre des photos interprétées seulement, à l'exclusion des photos intermédiaires permettant le recouvrement stéréoscopique.

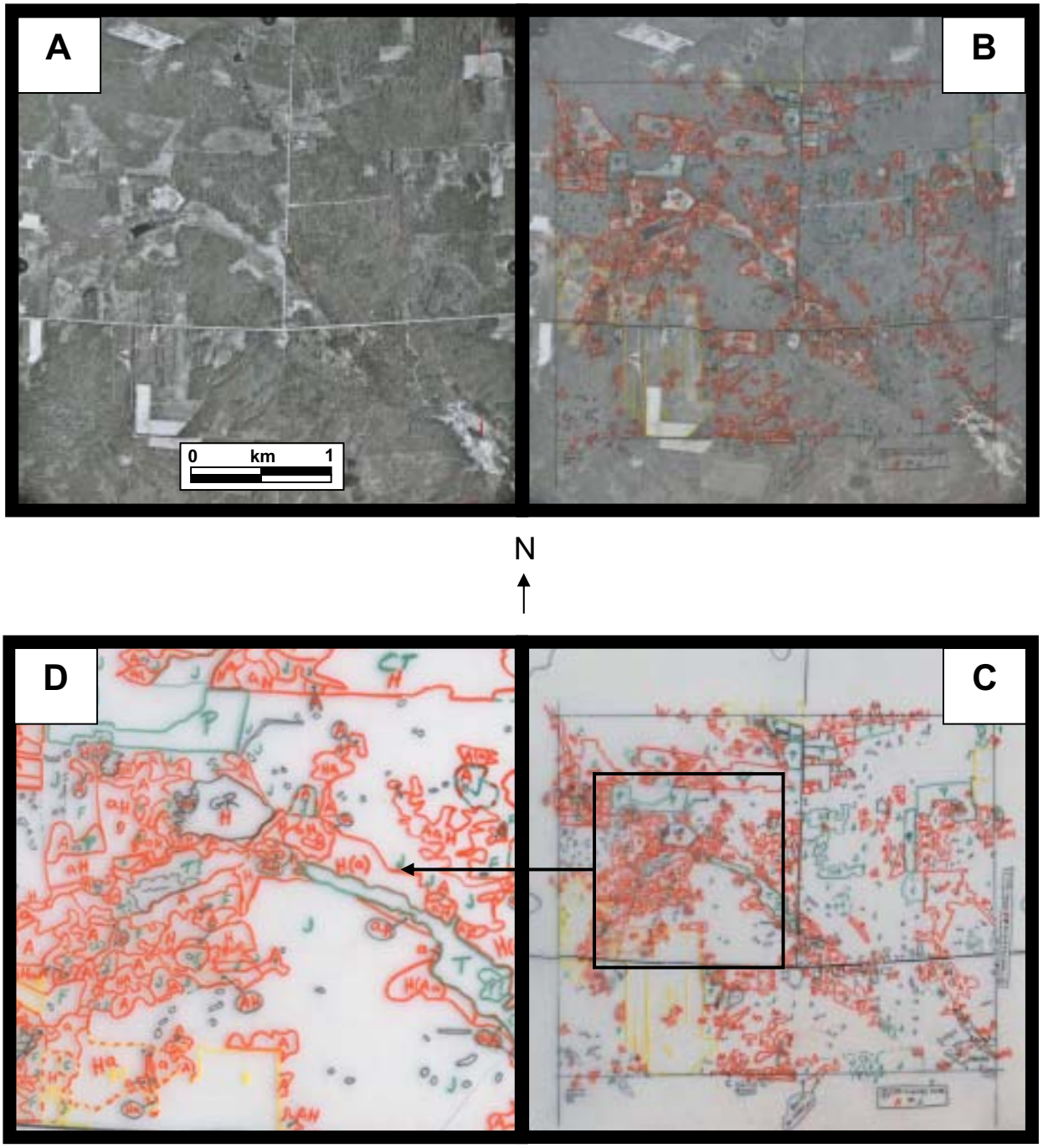


Figure 4. Étapes de la photo-interprétation (ici pour la région d'Acton) : A. Photo aérienne seule (échelle 1/15 000), B. Interprétation sur acétate de la photo aérienne, C. Acétate interprété seul, D. Portion agrandie de l'acétate montrant le niveau de précision. Photo reproduite grâce à la courtoisie du Groupe Alta – filiale Hauts-Monts inc.

Analyse des images satellitaires

La méthode utilisée est principalement dérivée de l'article de Soucy-Gonthier *et al.* (soumis en 2004) et comporte elle-même trois étapes principales, soit A) la description des données et la géoréférence, B) l'amélioration des images et C) l'interprétation et la classification visuelle.

A- DESCRIPTION DES DONNÉES ET GÉORÉFÉRENCE

Les données proviennent de deux images multispectrales du satellite IKONOS-2 captées le 18 août 2003 à 16h11 (GMT) lors d'excellentes conditions atmosphériques (fig. 3). Afin d'assurer l'intégration des résultats avec le Système québécois de référence cartographique (SQRC), les deux images ont fait l'objet d'une géoréférence à partir de la carte routière vectorielle de la Base de données topographiques du Québec (BDTQ) dans le système de coordonnées MTM (NAD 83) zone 8 selon une interpolation spatiale polynomiale de deuxième degré et un rééchantillonnage du plus proche voisin. Les images d'Acton et de Brome-Missisquoi ont nécessité 33 points de contrôle pour obtenir un indice de distorsion (*Root Mean Square*) de 0.97 et 0.99.

B- AMÉLIORATION DES IMAGES

Afin de réduire la confusion spectrale entre les classes de végétation et de synthétiser l'information, deux composés fausses couleurs non conventionnels ont été élaborés dans le but de faciliter l'interprétation visuelle des principales classes d'utilisation du sol. Pour ce faire, quatre étapes de traitement ont été réalisées, soit l'application :

a) d'un indice de végétation

b) d'un composé fausses couleurs

c) d'un rehaussement

d) d'un filtre.

a. Application d'un indice de végétation

Un indice de végétation par différence normalisée a été employé pour augmenter la sensibilité à la végétation et améliorer la discrimination des terres agricoles, des friches et de la forêt. Parmi les huit indices les plus populaires décrits par Richardson et Everitt (1992), le *Normalized Difference Vegetation Index* est de loin celui qui est le plus employé (Sabins, 1997). Le NDVI se calcule comme suit (Rouse *et al*., 1974) :

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{PIR} - \mathrm{R}}{\mathrm{PIR} + \mathrm{R}}$$

où PIR correspond à la valeur d'un pixel X dans la bande spectrale du proche-infrarouge et R est la valeur de ce même pixel X dans la bande du rouge. Le dénominateur a un effet compensateur sur les changements liés aux conditions d'illumination, à la pente et à la géométrie de visée (Avery et Berlin, 1999). Les résultats obtenus se situent entre –1 et 1 où les valeurs les plus fortes représentent une grande concentration de végétation verte. À l'opposé, les valeurs qui gravitent autour de –1 indiquent les secteurs où il y a absence de végétation (ex : cours d'eau, glace, nuage, etc.).

b. Application d'un composé fausses couleurs

Une fois cette opération terminée, les bandes du vert, du proche-infrarouge et du NDVI ont été sélectionnées afin de créer un composé fausses couleurs. Parmi les neuf combinaisons possibles (3 couleurs primaires * (2 bandes spectrales + NDVI)), la meilleure option a été d'associer le proche-infrarouge avec le bleu, le vert avec le vert et le NDVI avec le rouge.

c. Application d'un rehaussement

Par la suite, un rehaussement des trois bandes a été réalisé. Notre choix s'est arrêté sur l'algorithme par égalisation d'histogramme proposé par Gonzalez et Wintz (1977) :

$$b_i = \mathrm{ent}\left[\frac{\left(\sum_{k=1}^{i-1} f_k\right) + \frac{f_i}{2}}{m}\right]$$

où b_i, f_i et m correspondent respectivement à la valeur numérique i à laquelle la fréquence de la valeur numérique i doit être affectée, à la fréquence de la valeur numérique i et à la fréquence moyenne. Ce traitement a permis de changer les valeurs numériques initiales de l'image de façon à utiliser toute l'étendue dynamique des valeurs radiométriques pour augmenter les contrastes entre les classes.

d. Application d'un filtre

Une dernière étape devait permettre de faciliter la détection des écotones. Ainsi, un filtre de texture basé sur la moyenne a été appliqué sur les bandes rehaussées du vert, du proche-infrarouge et du NDVI. La fenêtre de convolution avait une taille de 3*3 pixels où le pixel central se voyait attribuer la valeur moyenne des neufs pixels voisins. L'image résultante a été enregistrée en format Tiff/Geotiff pour conserver les coordonnées géographiques. La figure 5 montre un exemple d'image améliorée pour une portion de la MRC d'Acton et la figure 6 le résultat pour les deux images complètes.

C- INTERPRÉTATION ET CLASSIFICATION VISUELLE

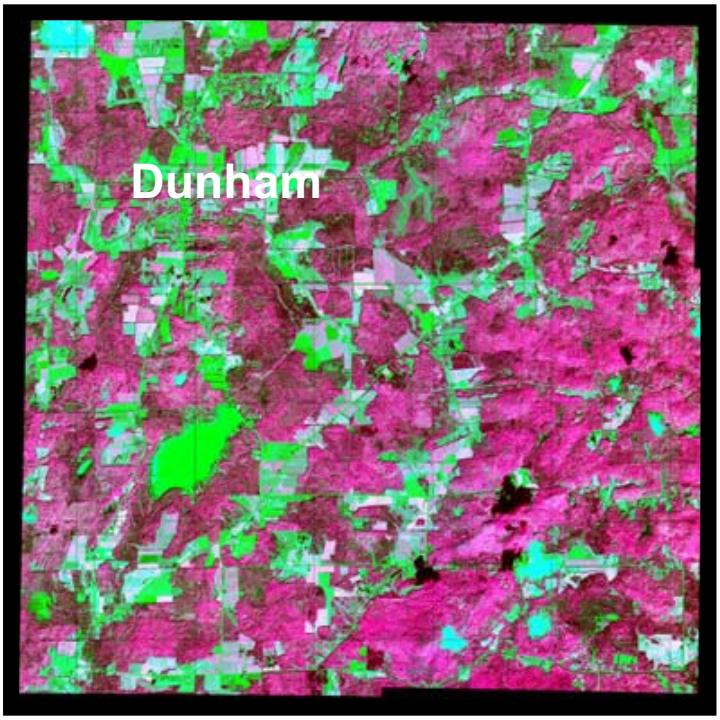
Le schéma de classification comporte six classes principales :

1) agricole et autres
2) forêt
3) friche herbacée
4) friche ligneuse basse
5) friche ligneuse haute
6) plantation de conifères

La classe agricole et autres comprend les terres agricoles, les zones urbaines, les gravières, les cours à ferraille et toutes autres terres dont l'utilisation diffère des classes établies. La classe forêt regroupe tous les types de forêts (feuillue, coniférienne ou mixte) de plus de 10 m de hauteur. Tel que mentionné plus haut, les friches ont été subdivisées en trois classes distinctes d'après les formes de croissance et la hauteur des strates (ceci correspondant souvent à des stades successionnels), soit : 1) les friches herbacées, 2) les friches dominées par la végétation ligneuse basse que nous condenserons sous les termes de ligneux bas

Figure 5. Image améliorée pour une portion de la MRC d'Acton (coin sud-ouest).

Acton



Brome-Missisquoi

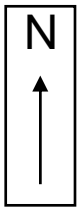


Figure 6. Les deux médaillons étudiés version améliorée en fausses couleurs.

(de 0 à 5 m), et 3) celles dominées par la végétation ligneuse haute (ligneux hauts de 5 à 10 m). Lorsque c'était possible, la structure (ou classe) sous-dominante a été identifiée pour chacune des classes de friches. Les terres en pâturage ont été incorporées à l'intérieur des friches herbacées. Du fait de ses attributs particuliers, une classe plantation de conifères a aussi été créée. D'autres éléments tels le réseau hydrographique et les milieux humides de même que le réseau routier ne représentent qu'une faible proportion du territoire et n'ont pas été considérés dans cette classification.

Les sites d'entraînement ont été sélectionnés à partir de l'interprétation des photographies aériennes de façon à obtenir une bonne représentativité spatiale des images IKONOS. Lors du choix des sites d'entraînement pour le médaillon d'Acton, une classe inconnu (temporaire) a aussi été constituée lorsqu'une utilisation du sol était impossible à déterminer.

Afin d'effectuer l'interprétation et la classification visuelle, le composé fausses couleurs non conventionnel a été importé dans le logiciel MapInfo Professional 6.5. Les couches du réseau routier, du réseau hydrographique et des milieux humides de la BDTQ superposaient le composé fausses couleurs en tout temps de manière à s'assurer de la compatibilité des résultats des différentes sources. L'interprétation des classes a été effectuée selon six critères de photo-interprétation, soit le ton, la forme, la taille, le patron, la texture et le contexte (tabl. I).

TABLEAU I

Critères de classification visuelle

Critères/Classes	Terre agricole	Forêt	Friche herbacée	Friche ligneuse basse	Friche ligneuse haute	Plantation de conifères
Ton	Mauve / Vert pâle / Rose pâle	Rose foncé	Vert foncé / Mauve	Vert foncé / Rose foncé	Rose foncé / Vert foncé	Rouge foncé
Forme (complexité)	Faible	Forte	Faible	Moyenne	Forte	Moyenne
Taille	Grande	Grande	Petite	Petite	Moyenne	Moyenne
Patron	Rectangulaire	Irrégulier	Rectangulaire	Irrégulier	Irrégulier	Généralement rectangulaire
Texture	Fine	Grossière	Fine	Poreuse	Grossière	Grossière
Contexte	N/A	N/A	Zones agricoles	Zones agricoles et forestières	Zones forestières	Zones agricoles et forestières

Pour le même secteur que celui de la figure 5, la figure 7 précise l'interprétation visuelle. La discrimination des trois classes de friches repose en grande partie sur des critères de couleur, de texture et de recouvrement. Ainsi, plus le stade successionnel est avancé, plus les teintes de vert (sol) et de rose (végétation) deviennent foncées et dominantes. La texture est, quant à elle, reliée à la stratification de la végétation et sert à identifier la strate dominante des friches. Généralement, une texture fine indique la présence d'une seule strate dominante alors qu'une structure grossière signifie qu'il y a plus d'une strate. Enfin, comme nous l'avons vu en introduction, la question du recouvrement était considérée lorsque l'ouverture de la strate dominante était supérieure à 20 % (sur un total de 100 %). Dans ce cas, une strate sous-dominante pouvait être indiquée.

La classification a été effectuée de manière interactive dans le logiciel MapInfo et ce, à partir des composés fausses couleurs résultant des opérations précédentes. Les trois classes de friches ont été numérisées et identifiées selon leur nature, leur origine et leur dominance. Une attention spéciale a été apportée au respect des relations topologiques. Ainsi, les polygones des classes principales retenues sont limités par les frontières naturelles ou anthropiques telles les cours d'eau, les routes et les lignes hydroélectriques.

Production de cartes détaillées d'utilisation du sol

Le rendu de cette interprétation visuelle est une carte d'utilisation du sol pour chacun des médaillons d'Acton et de Brome-Missisquoi. Ces cartes sont présentées en détail dans la section Résultats et discussion.

Validation sur le terrain

La proportion de polygones à valider a été fixée à 10 % du total. Ont été validés des polygones appartenant aux six classes principales : 1) agricole, 2) forêt, 3) friche herbacée, 4) friche ligneuse basse, 5) friche ligneuse haute, 6) plantation de conifères, de même que ceux placés dans la classe temporaire inconnu . Pour fins de représentativité spatiale et de rapidité d'exécution, une première discrimination a été effectuée selon la distance entre les polygones (des classes) et le réseau routier. Seuls les polygones situés à une distance maximale de 10 mètres par rapport aux

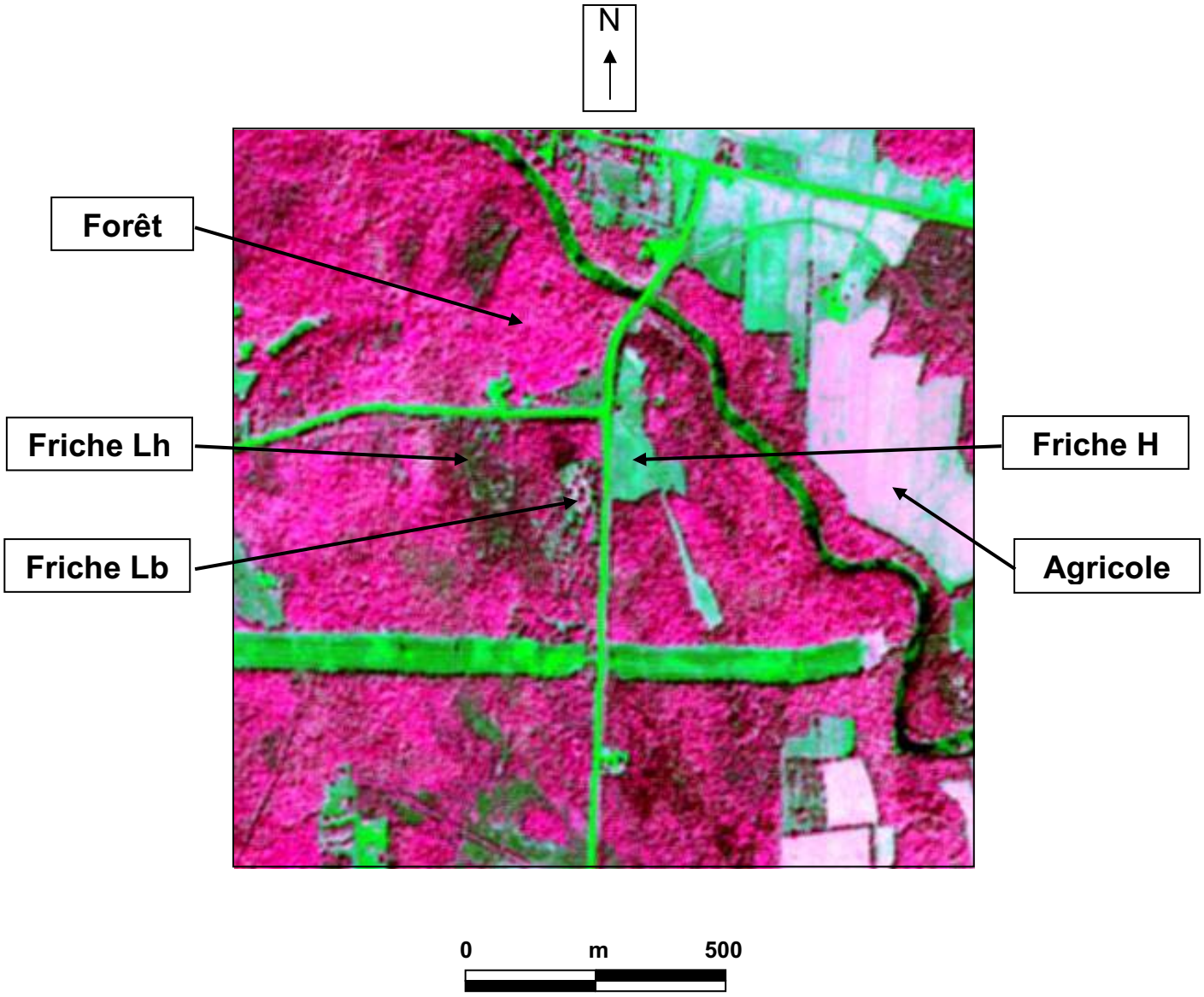


Figure 7. Interprétation visuelle du secteur de la figure 5.
H = herbacée, Lb = ligneux bas, Lh = ligneux hauts

routes étaient conservés. La méthode d'échantillonnage par voie aléatoire stratifiée a ensuite permis de faire une deuxième sélection qui respectait à la fois la proportion relative de chacune des classes et le nombre total de sites de validation fixé.

Sur le terrain, des planches cartographiques en couleurs sur lesquelles les polygones à valider étaient numérotés (figure 8) de même que les images satellitaires fausses couleurs ont été utilisées. Sur les feuilles de validation mêmes, on retrouvait pour chaque polygone sélectionné : le numéro séquentiel pour la validation, le numéro d'identification unique à chaque polygone, la classe, la dominance et la sous-dominance (pour les friches), la validation proprement dite, une case pour enregistrer les numéros de photos prises sur le terrain et une autre pour ajouter une note descriptive. Des photos numériques ont été prises en guise de référence.

La figure 9 illustre les étapes méthodologiques de l'analyse des images satellitaires.

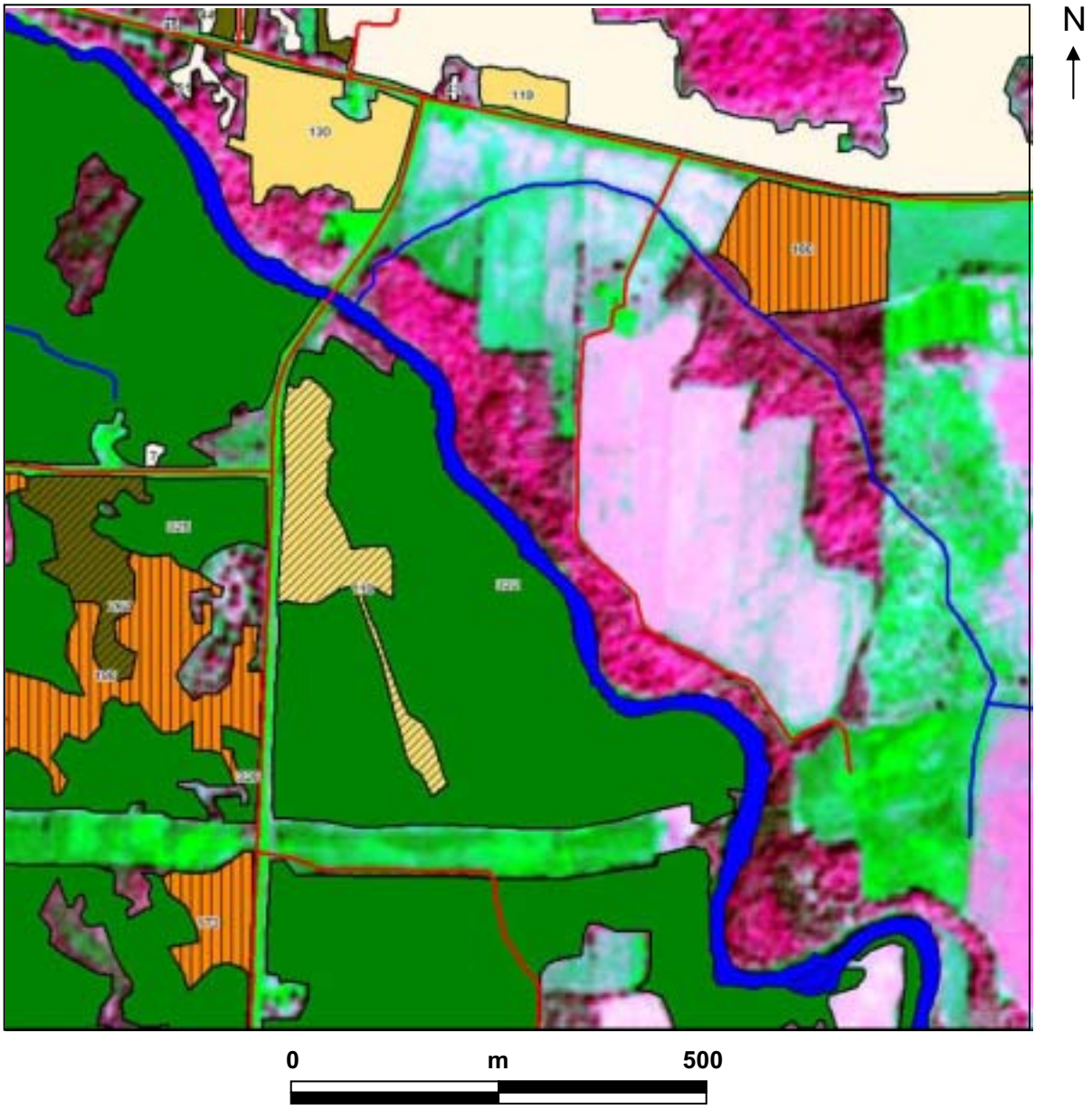


Figure 8. Planche préparée pour la validation sur le terrain avec les polygones sélectionnés à cette fin. Cet extrait couvre une bonne partie du même secteur que celui des figures 5 et 7. Couleur des classes : Agricole = blanc, Forêt = vert, Friche herbacée = jaune pâle, Friche ligneuse basse = orange, Friche ligneuse haute = brun, ce qui n'est pas coloré = image fausse couleur (la classe plantation de conifères est absente de ce secteur). Les trames hachurées indiquent les classes sous-dominantes : lignes obliques = ligneux bas, lignes verticales = ligneux hauts (et, n'apparaissant pas sur cet exemple, lignes horizontales = herbacée).

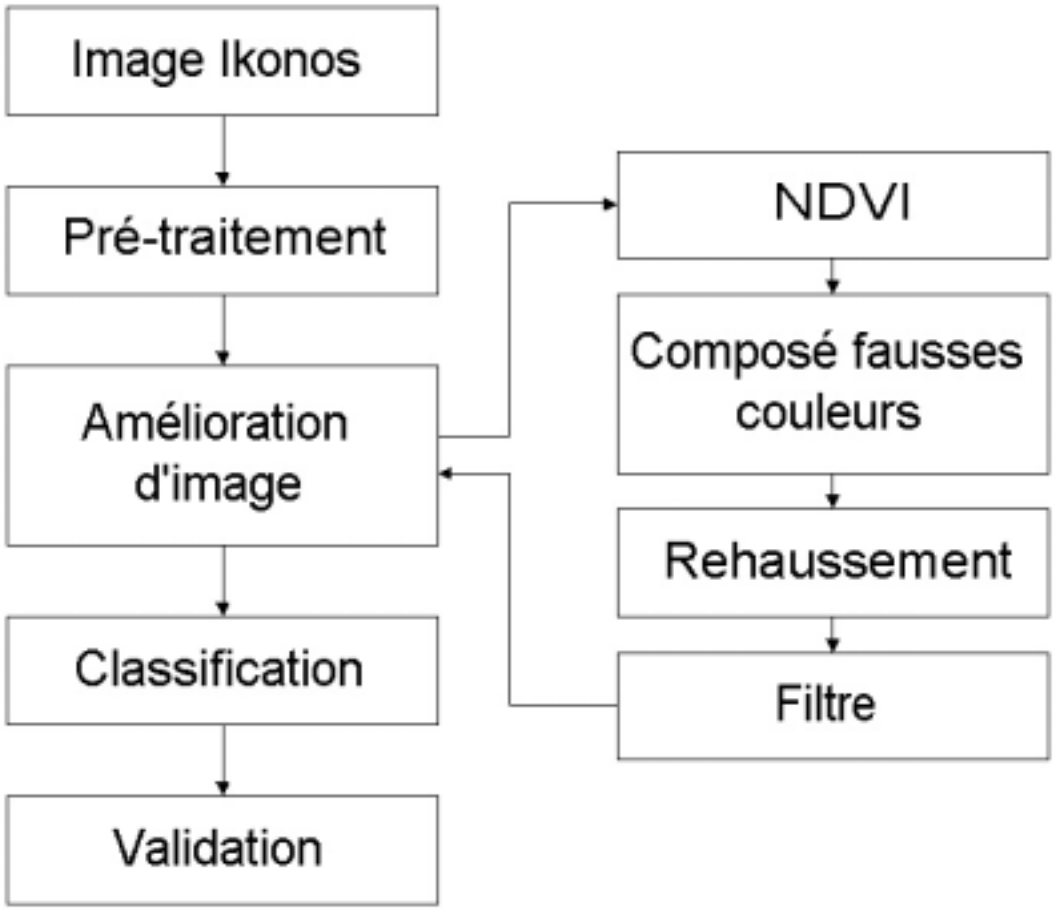


Figure 9. Schématisation des étapes méthodologiques de l'analyse des images satellitaires.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cartes d'utilisation du sol

Les figures 10 et 11 présentent le résultat final de l'interprétation pour chacun des médaillons. Ces derniers sont à l'image de leur MRC respective. Ainsi celui d'Acton est plutôt agroforestier, alors que celui de Brome-Missisquoi est nettement plus forestier. Ces cartes montrent pour les deux territoires une mosaïque complexe d'utilisation du sol.

A- ANALYSE DE LA STRUCTURE SPATIALE DES CLASSES D'UTILISATION DU SOL

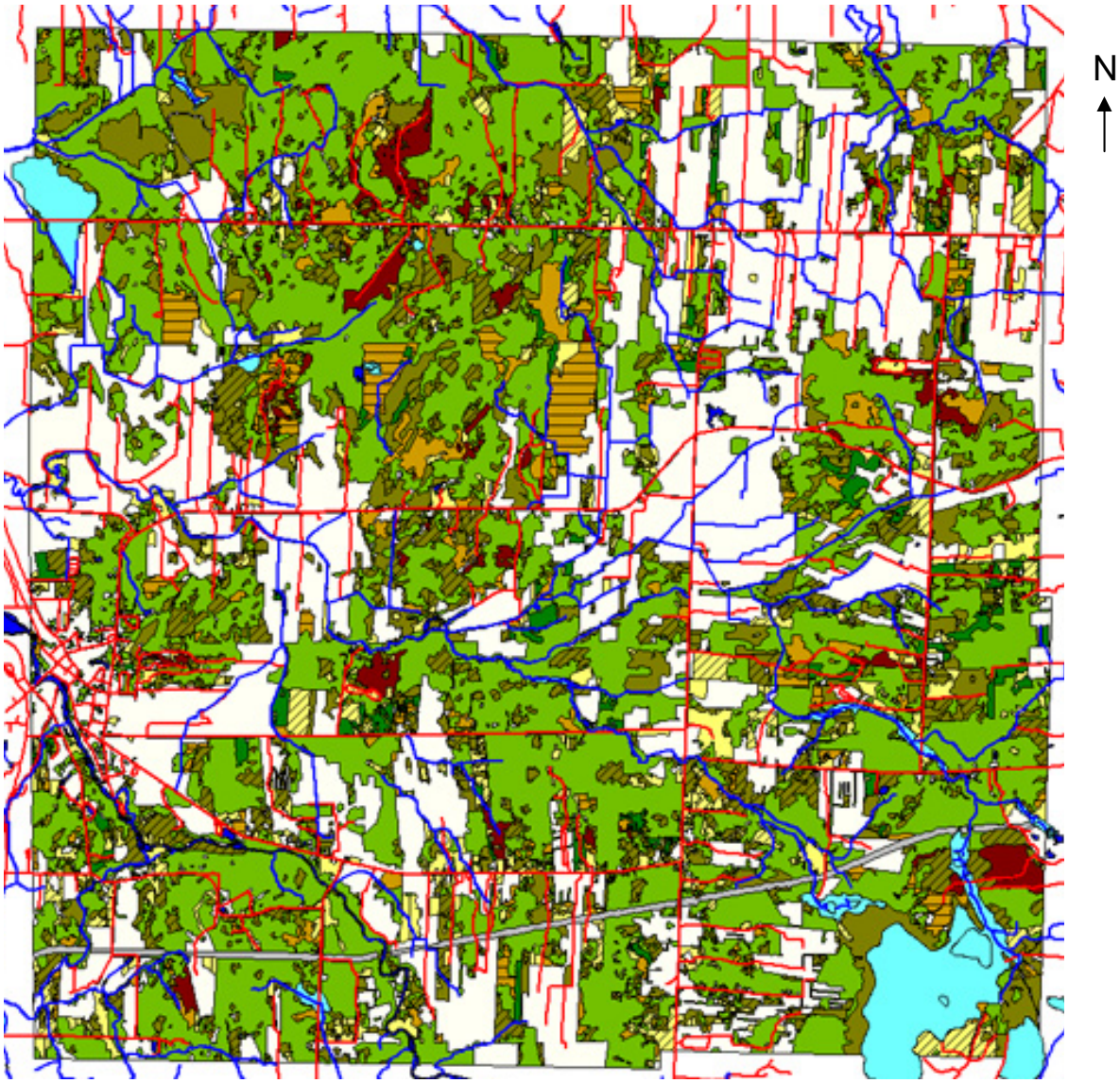
Pour le médaillon d'Acton, un total de 3940 polygones divisés en six classes ont été identifiés. Les trois classes regroupées des terres en friche représentent environ 26,2% du territoire (31,4 km^2), les friches ligneuses hautes comptant pour plus de la moitié avec 15,53 % du territoire total (tabl. II). La vocation agroforestière du secteur se reflète dans la proportion relative de la classe agricole (32,7 %) *versus* 39,7 % pour la classe forestière.

TABLEAU II

Analyse de la structure spatiale du médaillon d'Acton

Classe/indice	Nb polygones	% nb poly/total	Superficie en ha	Superficie moyenne (ha)	% ha/total	Km^2	Périmètre (m)
Agricole	753	19,11	3909,0	5,2	32,65	39,09	746 900
Forêt	1064	27,01	4750,0	4,5	39,67	47,50	1 048 000
Friche herbacée	721	18,30	739,6	1,0	6,18	7,40	364 700
Friche ligneuse basse	263	6,68	537,4	2,0	4,49	5,37	189 100
Friche ligneuse haute	1029	26,12	1859,0	1,8	15,53	18,59	729 600
Plantation de conifères	110	2,79	178,5	1,6	1,49	1,79	75 260
Total[4]	3940	100,00	11 973,5	3,0	100,00	119,74	3 153 560

[4] À l'exclusion de l'hydrographie, des routes et des milieux humides.

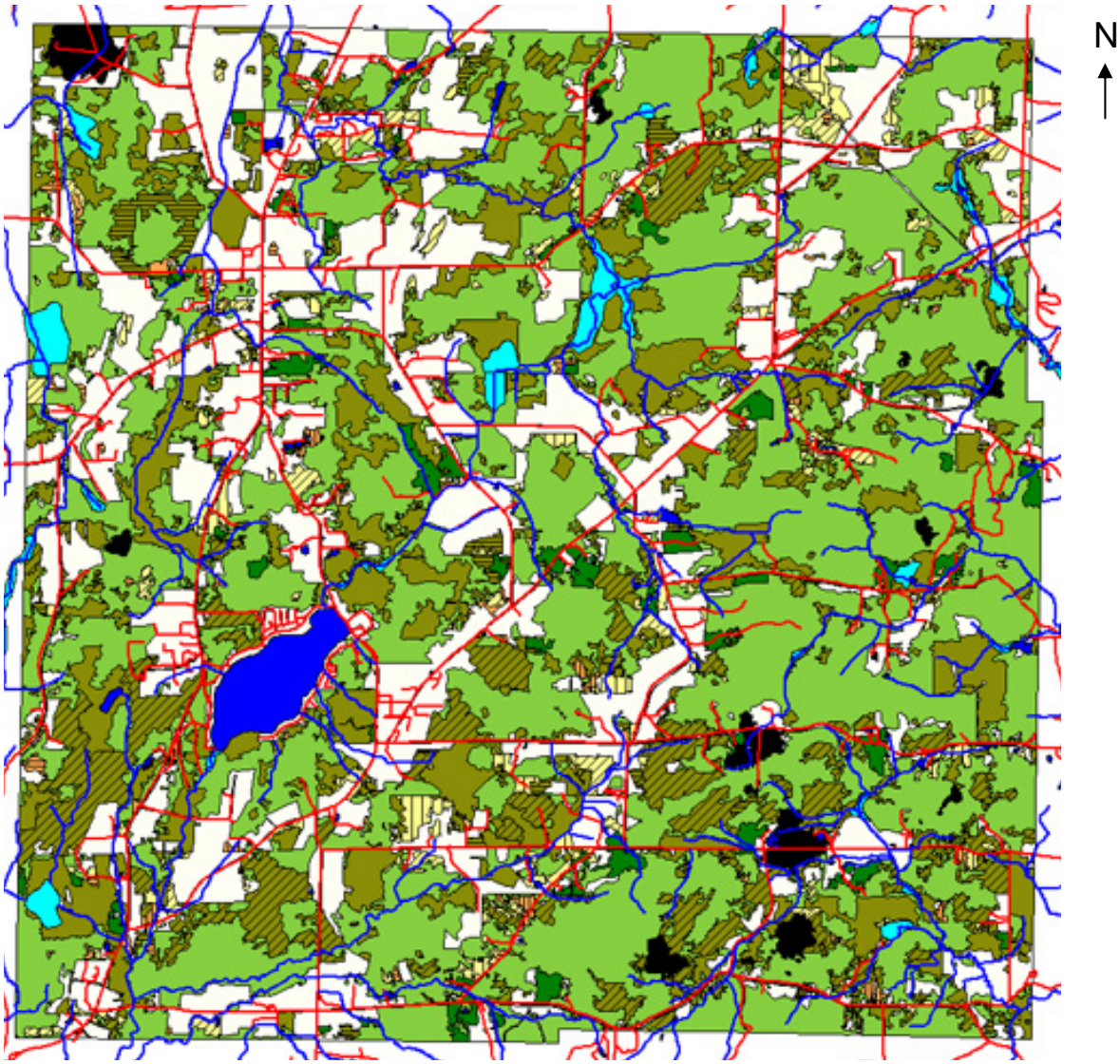


Acton

Légende

- Agricole et autres
- Friche - H
- Friche - Lb
- Friche - Lh
- Forêt
- Plantation conifères
- Inconnu

Figure 10. Carte d'utilisation du sol du médaillon d'Acton (11 km X 11 km).
Sous-classes des friches :
Ligné horizontal = Friche herbacée
Ligné oblique = Friche ligneuse basse
Ligné vertical = Friche ligneuse haute



Brome-Missisquoi

Légende

- Agricole et autres
- Friche - H
- Friche - Lb
- Friche - Lh
- Forêt
- Plantation conifères

Figure 11. Carte d'utilisation du sol du médaillon de Brome-Missisquoi (11 km X 11 km).
Sous-classes des friches :
Ligné horizontal = Friche herbacée
Ligné oblique = Friche ligneuse basse
Ligné vertical = Friche ligneuse haute

Le médaillon de Brome-Missisquoi est beaucoup moins morcelé que celui d'Acton. Il ne compte en effet que 2108 polygones soit à peine plus de la moitié de celui d'Acton. Ici, les trois classes de friche regroupées totalisent environ 27,5% du territoire (33,5 km^2), soit sensiblement la même superficie que pour le médaillon d'Acton. Les friches ligneuses hautes dominent nettement les deux autres classes de friches avec près de 23 % de l'ensemble du territoire contre 3,8 % pour les friches herbacées et 0,8 % pour les friches ligneuses basses (tabl. III). La vocation forestière du secteur est évidente avec plus de 45 % de forêt contre 25 % pour la classe agricole et autres.

TABLEAU III

Analyse de la structure spatiale du médaillon de Brome-Missisquoi

Classe/indice	Nb polygones	% nb poly/total	Superficie en ha	Superficie moyenne (ha)	% ha/total	Km^2	Périmètre (m)
Agricole	515	24,43	3044,0	5,9	25,04	30,44	596 900
Forêt	510	24,19	5524,0	10,8	45,45	55,24	876 200
Friche herbacée	317	15,04	460,9	1,5	3,79	4,61	210 100
Friche ligneuse basse	105	4,98	98,1	0,9	0,81	0,98	58 390
Friche ligneuse haute	559	26,52	2788,0	5,0	22,94	27,88	716 900
Plantation de conifères	102	4,84	239,8	2,4	1,97	2,40	81 970
Total[5]	2108	100,00	12 154,8	5,8	100,00	121,55	2 540 460

B- EXEMPLES-TYPES DES CLASSES D'UTILISATION DU SOL

Afin d'illustrer le lien entre les méthodes employées et l'utilisation du sol, les figures 12 à 17 montrent pour chacune des classes :

- sa localisation sur la carte topographique 1/50 000
- ce même secteur extrait de la photographie aérienne
- l'interprétation de cette partie de photo
- l'image satellitaire du secteur en couleurs réelles

[5] À l'exclusion de l'hydrographie, des routes et des milieux humides.

- l’image satellitaire du secteur en fausses couleurs
- l’interprétation de l’image satellitaire
- une photo prise sur le terrain.

Ces exemples proviennent des deux médaillons. Dans certains cas, le grossissement a dû être tel que le rendu est flou sur les figures.

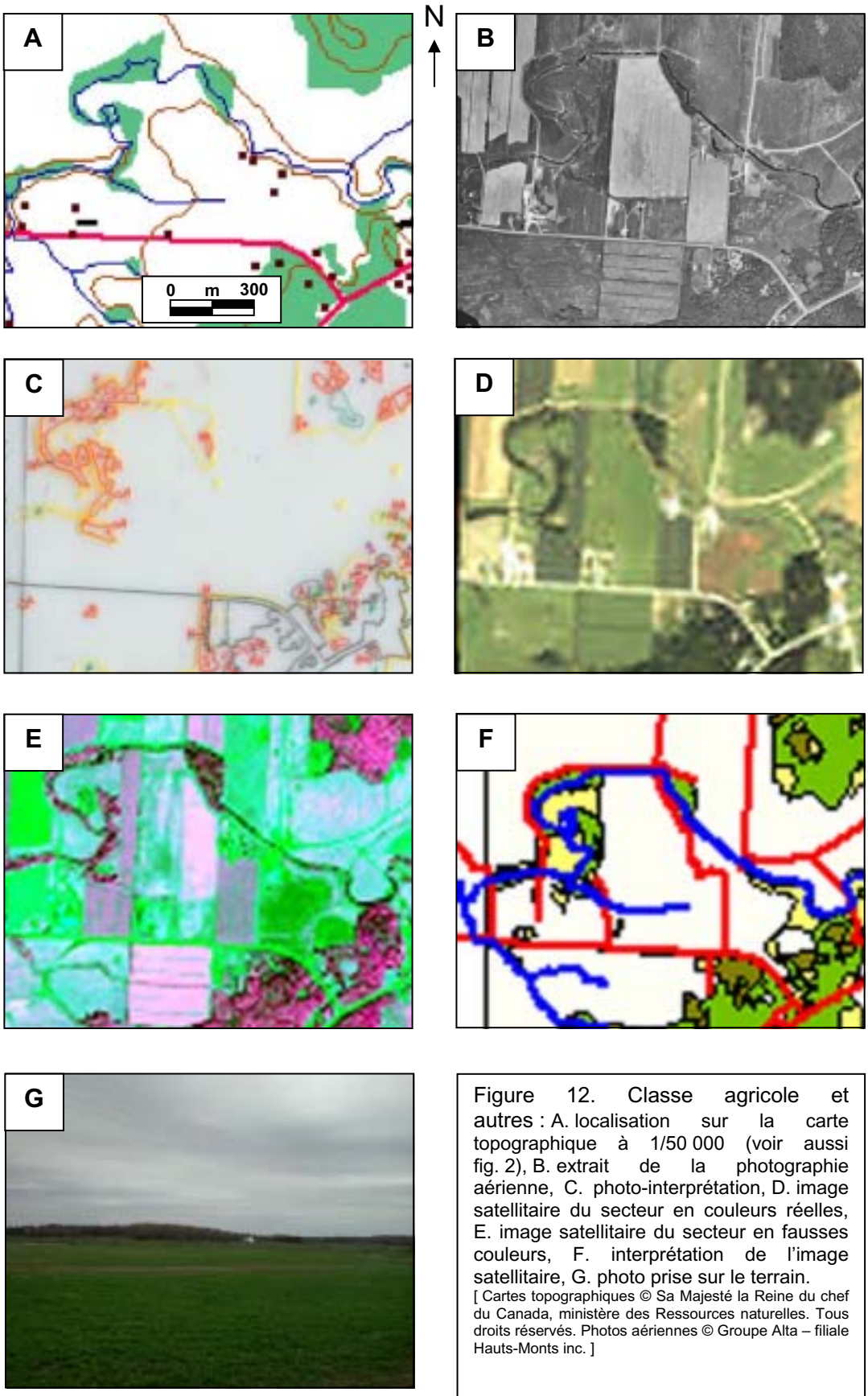


Figure 12. Classe agricole et autres : A. localisation sur la carte topographique à 1/50 000 (voir aussi fig. 2), B. extrait de la photographie aérienne, C. photo-interprétation, D. image satellitaire du secteur en couleurs réelles, E. image satellitaire du secteur en fausses couleurs, F. interprétation de l'image satellitaire, G. photo prise sur le terrain.

[Cartes topographiques © Sa Majesté la Reine du chef du Canada, ministère des Ressources naturelles. Tous droits réservés. Photos aériennes © Groupe Alta – filiale Hauts-Monts inc.]

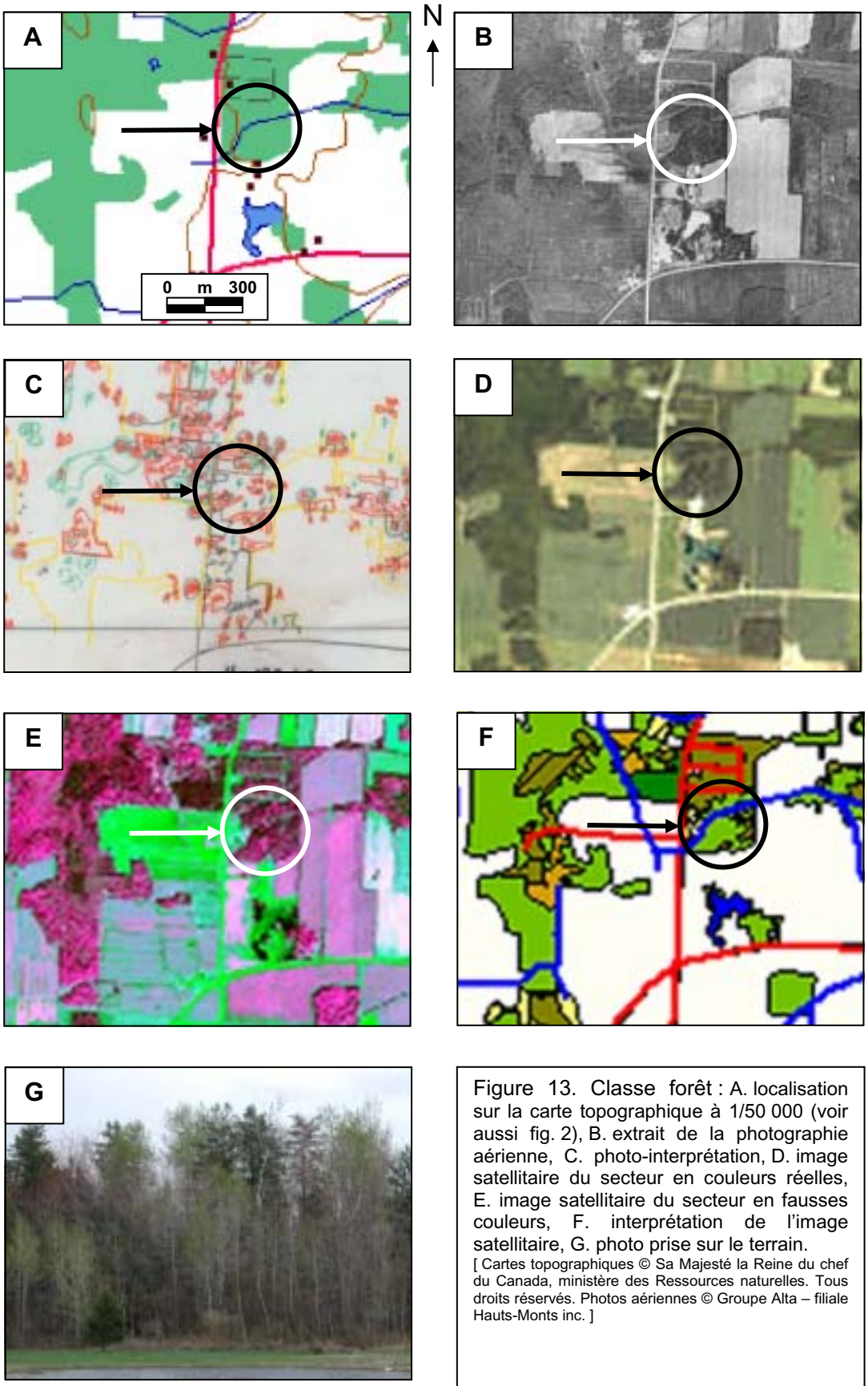


Figure 13. Classe forêt : A. localisation sur la carte topographique à 1/50 000 (voir aussi fig. 2), B. extrait de la photographie aérienne, C. photo-interprétation, D. image satellitaire du secteur en couleurs réelles, E. image satellitaire du secteur en fausses couleurs, F. interprétation de l'image satellitaire, G. photo prise sur le terrain.

[Cartes topographiques © Sa Majesté la Reine du chef du Canada, ministère des Ressources naturelles. Tous droits réservés. Photos aériennes © Groupe Alta – filiale Hauts-Monts inc.]

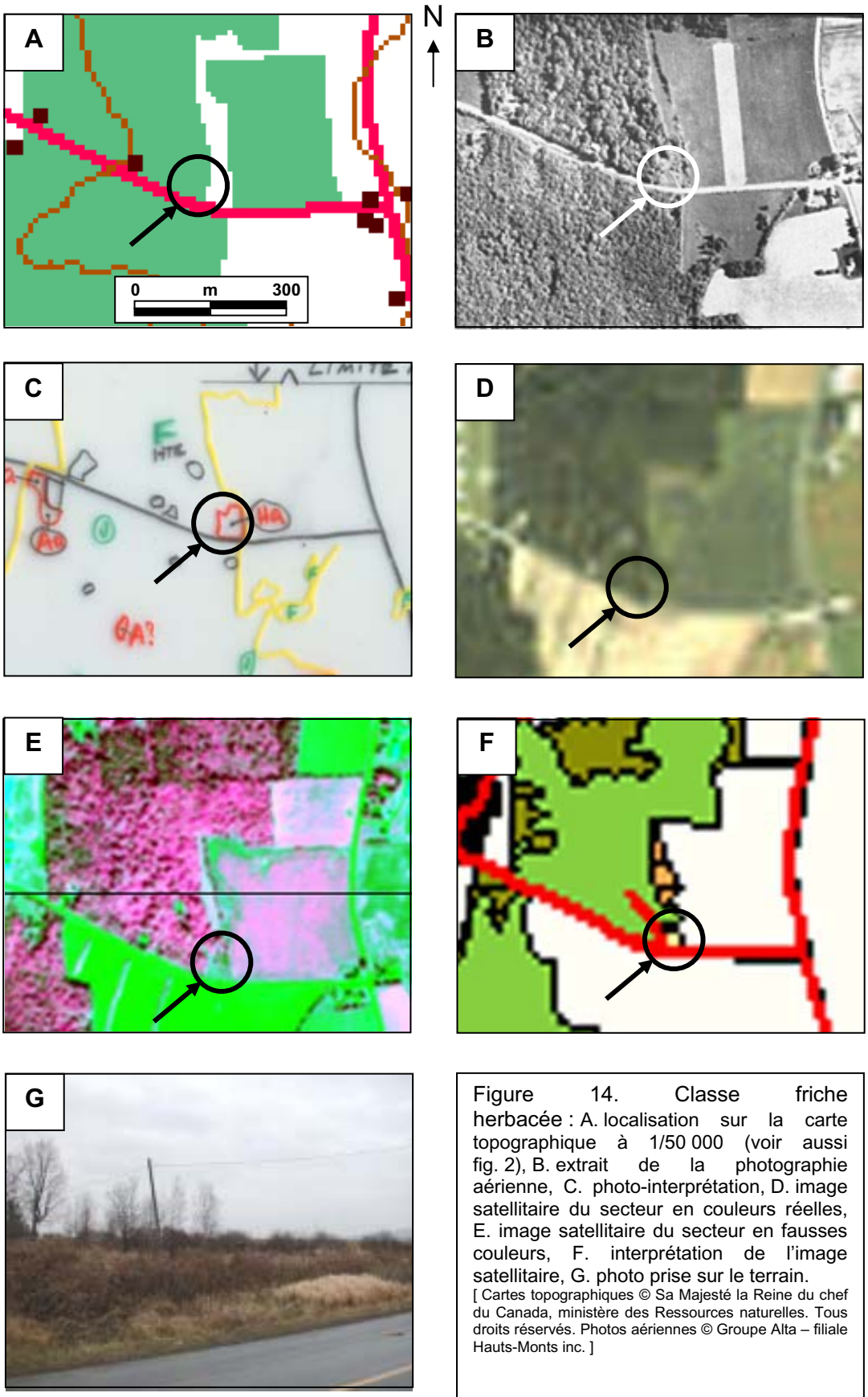


Figure 14. Classe friche herbacée : A. localisation sur la carte topographique à 1/50 000 (voir aussi fig. 2), B. extrait de la photographie aérienne, C. photo-interprétation, D. image satellitaire du secteur en couleurs réelles, E. image satellitaire du secteur en fausses couleurs, F. interprétation de l'image satellitaire, G. photo prise sur le terrain.

[Cartes topographiques © Sa Majesté la Reine du chef du Canada, ministère des Ressources naturelles. Tous droits réservés. Photos aériennes © Groupe Alta – filiale Hauts-Monts inc.]

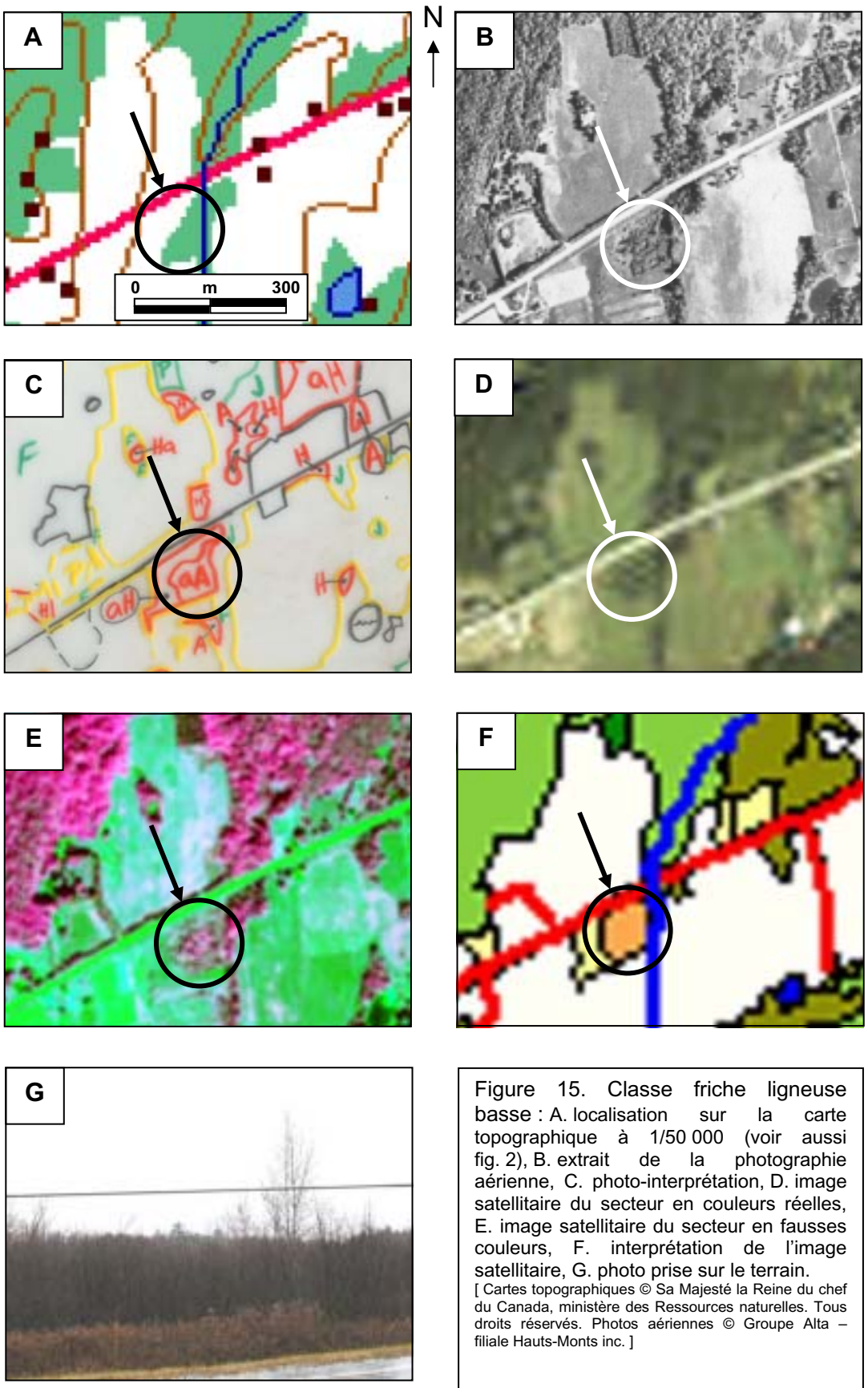


Figure 15. Classe friche ligneuse basse : A. localisation sur la carte topographique à 1/50 000 (voir aussi fig. 2), B. extrait de la photographie aérienne, C. photo-interprétation, D. image satellitaire du secteur en couleurs réelles, E. image satellitaire du secteur en fausses couleurs, F. interprétation de l'image satellitaire, G. photo prise sur le terrain.

[Cartes topographiques © Sa Majesté la Reine du chef du Canada, ministère des Ressources naturelles. Tous droits réservés. Photos aériennes © Groupe Alta – filiale Hauts-Monts inc.]

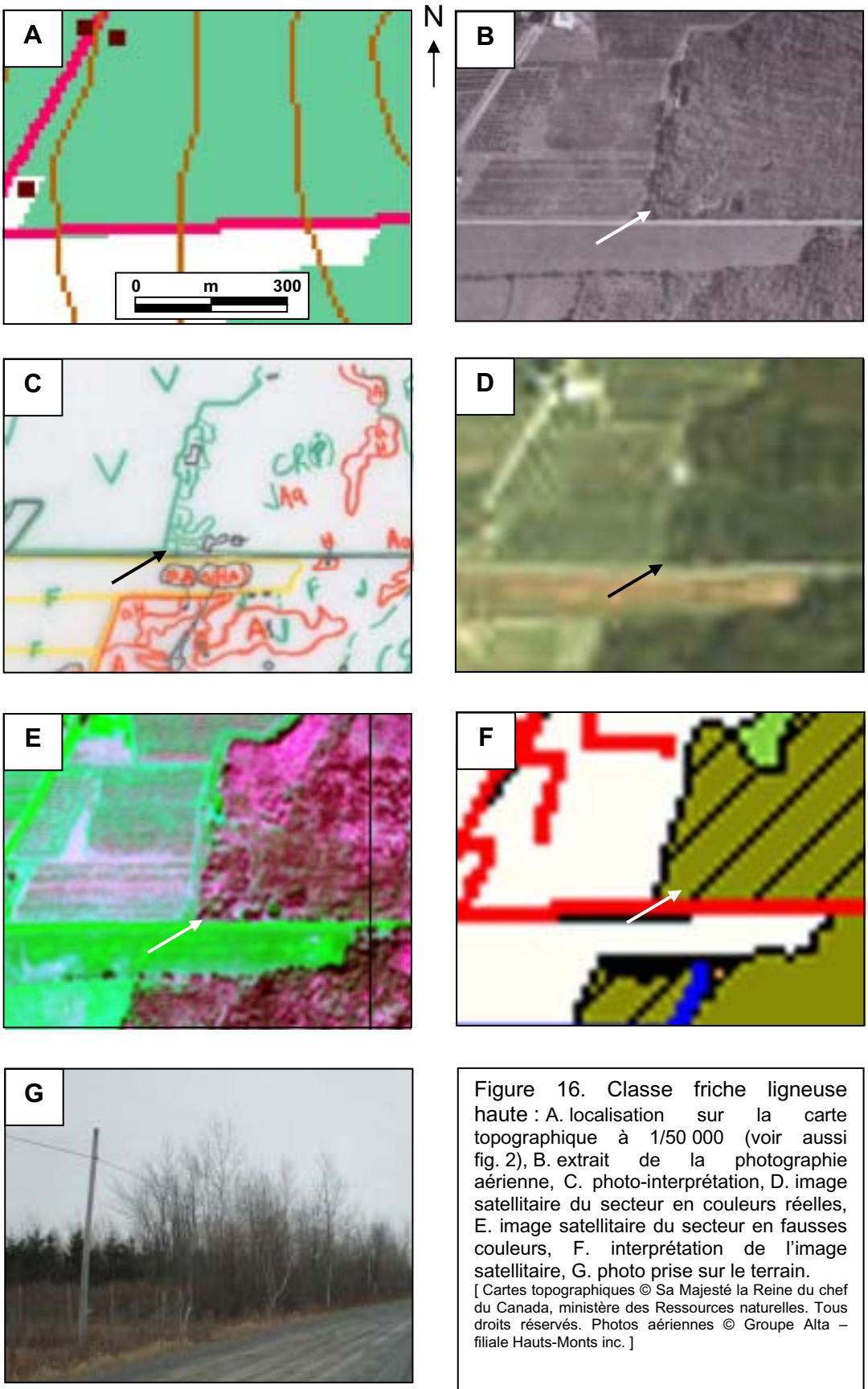


Figure 16. Classe friche ligneuse haute : A. localisation sur la carte topographique à 1/50 000 (voir aussi fig. 2), B. extrait de la photographie aérienne, C. photo-interprétation, D. image satellitaire du secteur en couleurs réelles, E. image satellitaire du secteur en fausses couleurs, F. interprétation de l'image satellitaire, G. photo prise sur le terrain.

[Cartes topographiques © Sa Majesté la Reine du chef du Canada, ministère des Ressources naturelles. Tous droits réservés. Photos aériennes © Groupe Alta – filiale Hauts-Monts inc.]

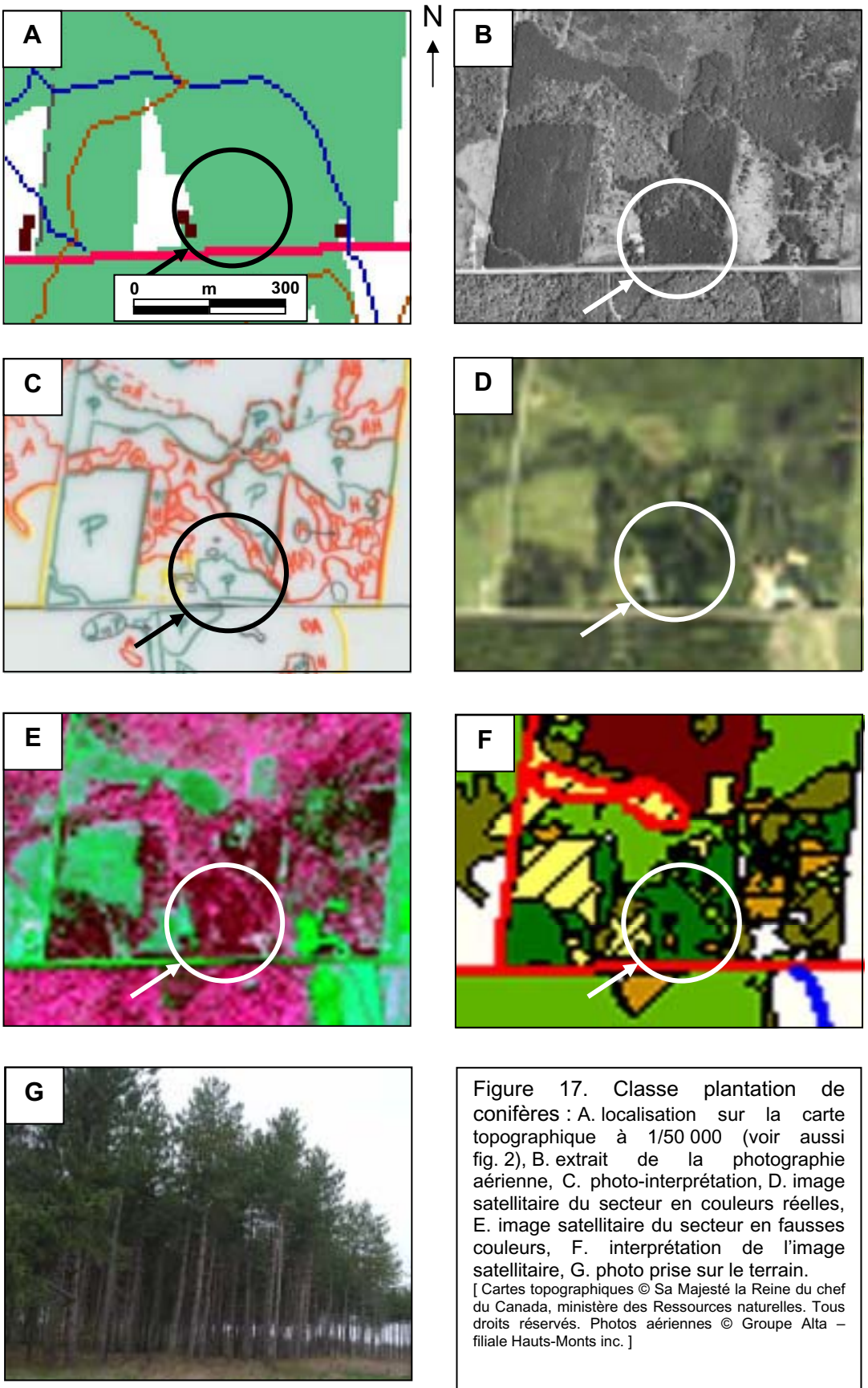


Figure 17. Classe plantation de conifères : A. localisation sur la carte topographique à 1/50 000 (voir aussi fig. 2), B. extrait de la photographie aérienne, C. photo-interprétation, D. image satellitaire du secteur en couleurs réelles, E. image satellitaire du secteur en fausses couleurs, F. interprétation de l'image satellitaire, G. photo prise sur le terrain.

[Cartes topographiques © Sa Majesté la Reine du chef du Canada, ministère des Ressources naturelles. Tous droits réservés. Photos aériennes © Groupe Alta – filiale Hauts-Monts inc.]

Validation et fiabilité des résultats : images satellitaires

Bien que la campagne de validation ait été planifiée en vue de vérifier l'exactitude de l'interprétation rapidement à partir d'une automobile, le réseau routier de la BDTQ, à partir duquel étaient sélectionnés les polygones plus faciles d'accès, incluait une foule de chemins secondaires et plusieurs chemins de ferme qui ont imposé de longues marches. Ce prolongement du temps de validation a cependant permis une meilleure représentation spatiale du territoire en intégrant des zones plus éloignées des routes principales.

Pour le médaillon d'**Acton**, 363 polygones sur un total de 3940, soit 9,2 %, ont été vérifiés, ce qui est légèrement en deçà du seuil de 10 % initialement prévu. La classification de l'image d'Acton s'est révélée exacte à 83 % pour l'ensemble de l'image et à 76,3 % pour les trois classes de friches (tabl. IV).

TABLEAU IV

Validation du médaillon d'Acton interprété à partir de l'image satellitaire IKONOS

Classe d'occupation du sol	Nombre total de polygones	Nombre total de polygones visités	Nombre de polygones bien classifiés	Nombre de polygones incorrectement classifiés	Fiabilité des résultats (%)
Agricole	753	58	58	0	100
Forêt	1064	69	61	8	88,4
Friche herbacée	721	75	71	4	94,7
Friche : ligneux bas	263	53	20	33	37,7
Friche : ligneux haut	1029	87	73	14	83,9
Plantation de conifères	110	11	10	1	90,9
TOTAL	3940	353[6]	293	60	83,0
TOTAL 3 CLASSES FRICHES SEULEMENT	2013	215	164	51	76,3

[6] À l'exclusion des polygones initialement placés dans la classe inconnu.

Dans le cas de **Brome-Missisquoi**, c'est 387 polygones sur un total de 2108, soit 18,4 %, qui ont été visités, ce qui est pratiquement le double du seuil de 10 % fixé au départ. Pour ce médaillon, la classification de l'image s'est avérée exacte à 76,2 % pour l'ensemble de l'image et à 67,6 % pour les trois classes de friches (tabl. V).

TABLEAU V

Validation du médaillon de Brome-Missisquoi

interprété à partir de l'image satellitaire IKONOS

Classe d'occupation du sol	Nombre total de polygones	Nombre total de polygones visités	Nombre de polygones bien classifiés	Nombre de polygones incorrectement classifiés	Fiabilité des résultats (%)
Agricole	515	88	83	5	94,3
Forêt	510	69	62	7	89,9
Friche herbacée	317	68	61	7	89,7
Friche : ligneux bas	105	21	11	10	52,4
Friche : ligneux haut	559	121	70	51	57,9
Plantation de conifères	102	20	8	12	40,0
GRAND TOTAL	2108	387	295	92	76,2
TOTAL 3 CLASSES FRICHES SEULEMENT	981	210	142	68	67,6

La corrélation entre l'interprétation de l'image IKONOS et le terrain est souvent remarquable. La figure 18 en montre un exemple dans Brome-Missisquoi.

Si, en général, l'interprétation de l'ensemble du territoire est très satisfaisante avec des taux de fiabilité supérieurs à 83 % et même à 90 %, des ajustements sont requis pour les classes de friches ligneuses basses dans Acton de même que les classes de friches ligneuses basses et hautes ainsi que celle des plantations de conifères dans Brome-Missisquoi. Dans le but de bien cerner les rectifications à

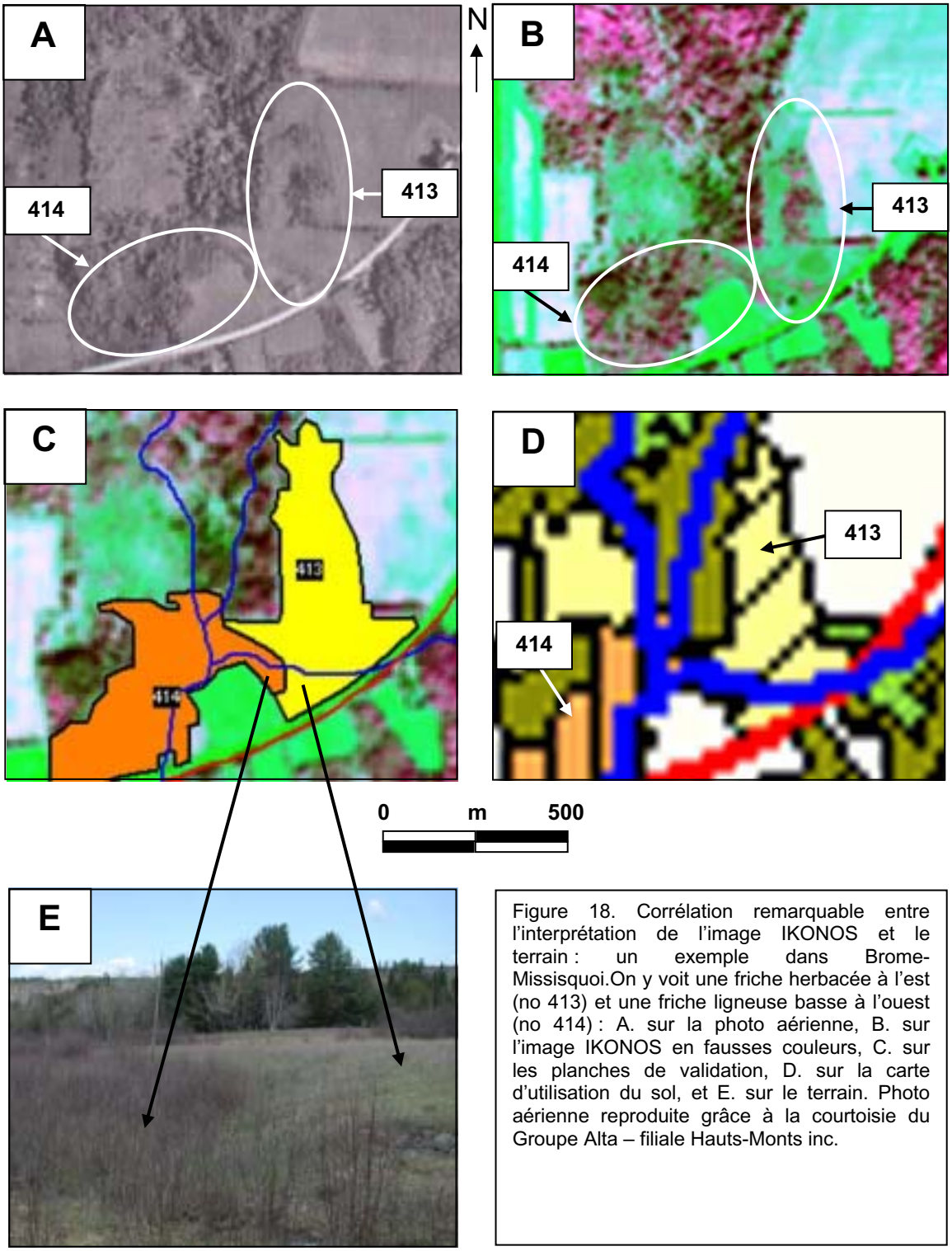


Figure 18. Corrélation remarquable entre l'interprétation de l'image IKONOS et le terrain : un exemple dans Brome-Missisquoi.On y voit une friche herbacée à l'est (no 413) et une friche ligneuse basse à l'ouest (no 414) : A. sur la photo aérienne, B. sur l'image IKONOS en fausses couleurs, C. sur les planches de validation, D. sur la carte d'utilisation du sol, et E. sur le terrain. Photo aérienne reproduite grâce à la courtoisie du Groupe Alta – filiale Hauts-Monts inc.

apporter afin de rendre cet outil d'analyse du territoire encore plus performant, nous précisons dans la section suivante les classes d'interprétation à l'origine de la confusion.

A- PROBLÈMES RÉSIDUELS

Sur l'image d'**Acton**, les erreurs d'interprétation sont principalement dues aux causes suivantes (entre les crochets [ ] = rapport du nombre d'erreurs sur le nombre total de polygones de la classe ; nombre de cas erronés entre parenthèses ; il n'y a eu aucune erreur pour la classe agricole et autres dans Acton) :

- [Forêt : 8 / 69] Les quelques erreurs de classification dans la classe forêt sont dues à une méprise avec les friches ligneuses basses (1 cas sur 8), les friches ligneuses hautes (Lh) avec sous-dominance de friches ligneuses basses (2), les friches Lh (4).
- [Friche herbacée : 4 / 75] Les friches herbacées ont été confondues avec la classe agricole dans 2 cas sur 4, avec la friche ligneuse basse (Lb) dans un cas (1) et avec la friche Lh dans un autre cas (1).
- [Friche ligneuse basse : 33 / 53] Comme nous l'avons vu, la classification des friches ligneuses basses (Lb) a été plus difficile ; elle ne s'est avérée exacte qu'à 37,7 % (20 polygones sur 53). Ces friches été mélangées avec toutes sortes d'autres occupations du sol : agricole et autres (2), friche herbacée avec sous-dominance de Lb (2), friche Lh (15), friche Lh avec sous-dominance d'herbacées (1) et de Lb (8 dont 5 cas charnière entre Lb et Lh), un cas charnière Lh et jeune forêt (1), jeune forêt (1), jeune forêt et érables (1), érablière (2).
- [Friche ligneuse haute : 14 / 87] Comme pour les Lb, les friches ligneuses hautes (Lh) ont été mélangées avec d'autres occupations du sol : agricole et autres (1), friche Lb avec herbaçaie en sous-dominance (1), cas charnière friche Lb et Lh (2), forêt et Lb (1), forêt (5), forêt avec forte présence de conifères (2), pinède blanche (1), cédrière et autres conifères (1). Ces problèmes d'interprétation de la classe Lh ne représentent cependant que 14 des 87 cas.
- [Plantation de conifères : 1 / 11] Les plantations de conifères n'ont été confondues qu'une fois avec une friche Lh (1).
- [Inconnu] Parmi les polygones choisis au hasard pour la validation, il y en avait 7 pour lesquels aucune interprétation n'avait été trouvée. Les visites sur le terrain ont montré qu'il s'agissait de jeunes érablières (4 cas), d'une jeune forêt avec

régénération en érables (1), de jeunes érables au stade de la friche Lh et Lb, d'une friche Lh (1).

Sur l'image de **Brome-Missisquoi**, des polygones dont une partie seulement avait été bien interprétée auraient intérêt à être subdivisés ; nous les nommerons comme tel : cas de subdivision. Ceux-ci ont été rangés parmi les polygones incorrectement classifiés lors de la validation. Dans ce médaillon, les erreurs d'interprétation sont principalement dues aux causes suivantes (nombre de cas entre parenthèses) :

- [Agricole et autres : 5 / 88] La classe agricole et autres a été confondue avec la classe friche Lh à quatre (4) reprises et une fois (1) avec un lac.
- [Forêt : 7 / 69] Les erreurs de classification dans la classe forêt sont dues à une méprise avec la classe agricole et autres (1 cas), les friches Lb (1), les friches Lh (3), une plantation de feuillus (1), une plantation de conifères (1).
- [Friche herbacée : 7 / 68] Les friches herbacées ont surtout (4 cas sur 7) été confondues avec la pelouse de résidences privées (ce qui est un demi-mal car la signature spectrale des pelouses est la même que celle des herbaçaies) ; le contexte devrait aider à trancher. Dans deux cas, elles ont été mélangées avec des friches ligneuses basses dans lesquelles on avait planté de petites épinettes rendues à une hauteur de 3 m, et le dernier cas est un cas de subdivision.
- [Friche ligneuse basse : 10 / 21] Comme pour l'image d'Acton, les friches ligneuses basses (Lb) ont été mélangées avec plusieurs occupations du sol : friche herbacée (1), friche herbacée avec sous-dominance de Lb ou de Lh (ligneux hauts) (2), cas de subdivision (2), résidences (2), friche ligneuse haute (2) et cas non relevé (1).
- [Friche ligneuse haute : 51 / 121] Même chose pour les friches ligneuses hautes (Lh) qui ont été mélangées avec les classes suivantes : friche herbacée avec sous-dominance Lb (1), friche Lb avec sous-dominance de Lh (3), cas limite avec la jeune forêt (5), jeune érablière (4), jeune forêt avec conifères (3), forêt trop haute avec beaucoup de conifères (17), forêt mature (trop haute) (4), forêt de conifères (5), pinède blanche (7), cas de subdivision (1). Dans le dernier cas, la forme du polygone était incorrecte (1).
- [Plantation de conifères : 12 / 20] Les plantations de conifères ont été confondues avec les classes suivantes : agricole et autres (3), friche Lh ou forêt (3) ; forêt de conifères (4), cédrière (1), cas de subdvision (1).

En résumé, les classes de friches ligneuses demeurent les plus difficiles à distinguer : Lb dans Acton et dans Brome-Missisquoi, avec respectivement des taux d'exactitude de 37,7 % et 52,4 %, Lh dans Brome-Missisquoi avec un taux d'exactitude de 57,9 %.

Un examen plus attentif montre cependant que ces résultats doivent être nuancés. En effet, dans la grande majorité des cas de mauvaise classification, l'interprétation qui eut été correcte était une classe voisine immédiate qui comprenait souvent elle-même une sous-dominance de la classe interprétée. Par exemple, une classe incorrectement interprétée comme une friche Lb est en réalité une friche herbacée avec sous-dominance Lb ou une friche Lh avec sous-dominance Lb. Il y a aussi toutes les situations charnières, c'est-à-dire qui sont à la limite entre deux classes. Plusieurs de ces polygones « limites » ont été catalogués « incorrects » du fait qu'ils étaient en voie d'appartenir à un stade forestier légèrement plus mature.

La prise en considération de cette interprétation de classes voisines et charnières donne les résultats suivants pour les deux classes de friches ligneuses :

Acton :

- 26 des 33 polygones de friche Lb considérés incorrectement classifiés appartiennent à une classe voisine ou charnière ;
- Pour la classe Lh, le même constat s'applique à 13 polygones sur 14.

Brome-Missisquoi :

- Pour la classe Lb de ce médaillon, cette situation concerne cinq des dix polygones incorrectement classifiés.
- Quant à la classe Lh, c'est l'exception avec seulement 16 polygones sur 51 touchés par cette constatation.

Ces chiffres montrent qu'avec quelques ajustements, l'outil satellitaire à haute résolution peut répondre aux attentes de caractérisation d'utilisation du sol.

L'exception que constituent les friches Lh dans Brome-Missisquoi s'explique par la difficulté de faire la distinction entre la signature spectrale de la classe ligneuse haute et celle de certaines forêts mixtes matures (fig. 19) où ce type de forêt était nouveau par rapport à ce qui avait été étudié dans les deux médaillons précédents (Acton et Haut-Saint-Laurent). La présence d'une proportion appréciable de conifères

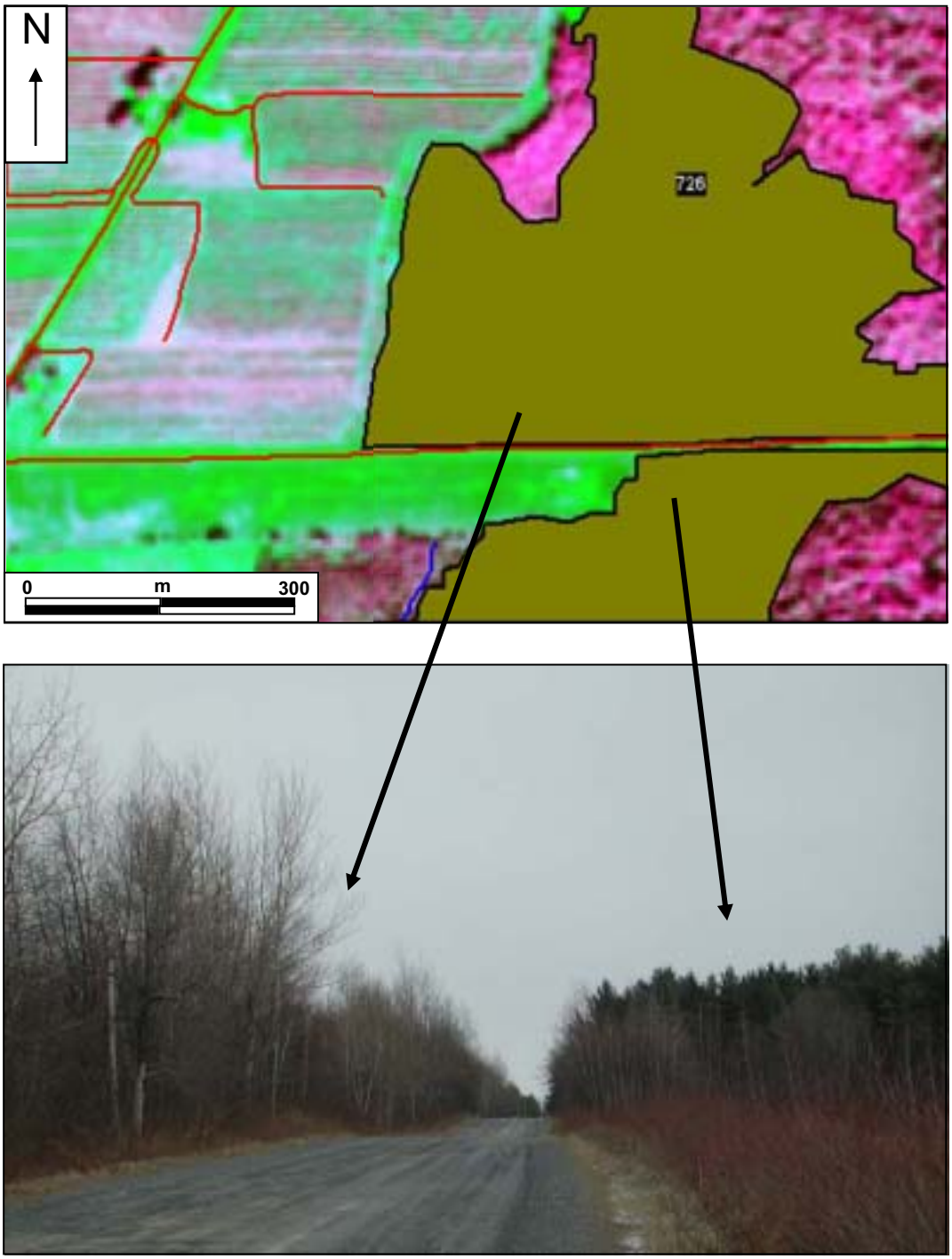


Figure 19. Confusion dans l'interprétation entre la signature spectrale de la classe ligneuse haute et celle de certaines forêts mixtes matures où abondent les conifères. La forêt de conifères à droite a été perçue comme une friche de ligneux hauts. Par contre la formation à gauche (no 726) a été justement interprétée (friche de ligneux hauts).

matures (notamment les pins blancs) semble en être la cause. L'échéance de la fin du projet ainsi que l'épuisement du budget n'ont malheureusement pas permis de régler ce problème. Ce dernier n'est toutefois pas insoluble et pourra être corrigé au cours de projets subséquents permettant de raffiner l'exactitude de la méthode utilisée dans la présente étude.

Finalement, le faible taux d'exactitude de la classe plantations de conifères dans Brome-Missisquoi (40 %) est probablement dû au changement d'interprète à la fin de l'exercice. Il n'y a aucun doute que des ajustements mineurs permettraient de bonifier ce taux de validité.

B- AUTRES OBSERVATIONS

Lors de la validation, nous avons pu constater qu'il existait une certaine confusion entre les classes ligneuses hautes et la jeune forêt. Comme il y a souvent un gradient entre les deux classes, il peut être très difficile, même sur le terrain (et *a fortiori* sur des images satellitaires), de tracer une limite entre une friche de ligneux hauts et, par exemple, une jeune forêt composée de feuillus intolérants. C'est pourquoi il peut être utile de prendre également en considération la composition floristique ainsi que l'âge et la densité des tiges des espèces ligneuses caractéristiques des stades de début de succession. La hauteur relative des formations végétales a aussi servi de critère de démarcation. La hauteur limite pour une friche de ligneux hauts a été établie à 10 m. Les poteaux électriques en bois (petits et grands) ont été très utiles afin d'évaluer rapidement les hauteurs : les petits font généralement 8 m et les grands 12 m.

L'interprétation de l'image satellitaire s'étant faite en plan (*i.e.* une intégration d'éléments spatiaux fait à partir d'une perspective verticale), nous avons apporté une attention particulière aux zones limitrophes des polygones qui souvent n'étaient pas représentatives de l'ensemble (un peu comme un effet de bordure). Conséquemment, les grands polygones d'une même classe s'étendant sur de grandes distances à partir des routes posent un problème particulier de validation. Il était en effet impossible à l'intérieur du mandat du projet de parcourir à pied ces grands polygones. Nous avons dû baser le verdict sur les seules parties visibles. Fort heureusement ces cas sont plutôt l'exception que la règle.

Cette possibilité de pouvoir voir loin est une des raisons pour laquelle la validation doit s'effectuer en dehors de la période de feuillaison. Elle doit aussi impérativement se faire en dehors du couvert nival surtout pour les classes basses telles les classes agricole et friche herbacée.

Les jeunes érablières à sucre « pures » ont posé des difficultés surtout au début dans le médaillon d'Acton. Plusieurs des polygones initialement inclus dans la classe inconnu étaient en fait de ces érablières.

Enfin, en raison de la similarité de leur signature spectrale, il n'a pas été possible de discriminer les pelouses, les pâturages et les friches herbacées.

Validation et fiabilité des résultats : photos aériennes

Dans le but de comparer les deux méthodes — images satellitaires et photo-interprétation — il est indispensable de connaître également le taux de fiabilité de la seconde méthode. Les tableaux VI et VII montrent ces résultats pour les deux médaillons étudiés. La validation a été faite à partir des mêmes polygones que ceux délimités pour la validation des images satellitaires. Cependant, le nombre plus faible de polygones validés par rapport à celui des images satellitaires s'explique du fait que l'interprétation par photos aériennes n'a été réalisée que sur un échantillonnage de quelques portions des médaillons.

La fiabilité de l'interprétation des photos a été déterminée en fonction de l'occupation actuelle du sol (*i.e.* 2004-2005). Ce qui signifie que, si l'occupation du sol a changé ou évolué entre le moment où les photos ont été prises (1997-1998) et la situation actuelle, l'interprétation des photos a été considérée comme incorrecte, et ce même lorsqu'il était clair qu'elle était bonne au moment où les photos ont été prises. Par exemple, si l'interprétation sur les photos indiquait une friche ligneuse basse et que la structure de la végétation actuelle (*i.e.* 2004-2005) a évolué vers une friche ligneuse haute depuis, l'interprétation des photos a été classée inexacte. Nous avons cru éviter ainsi de spéculer sur l'évolution de l'occupation du sol. Ceci explique le faible taux de validité de la classe forêt du médaillon d'Acton où 36 polygones sur les 51 cas inexacts sont en fait liés à des limites de classes et des cas charnières entre les friches ligneuses hautes et la forêt. De même, 11 des 18 cas inexacts de la

TABLEAU VI

Validation du médaillon d'Acton interprété à partir des photographies aériennes

Classe d'occupation du sol	Nombre total de polygones	Nombre total de polygones visités	Nombre de polygones bien classifiés	Nombre de polygones incorrectement classifiés	Fiabilité des résultats (%)
Agricole	753	99	81	18	81,8
Forêt	1064	102	51	51	50,0
Friche herbacée	721	29	17	12	58,6
Friche : ligneux bas	263	13	6	7	46,1
Friche : ligneux haut	1029	32	27	5	84,3
Plantation de conifères	110	12	9	3	75,0
TOTAL	3940	287	191	96	66,6
TOTAL 3 CLASSES FRICHES SEULEMENT	2013	74	50	24	67,6

TABLEAU VII

Validation du médaillon de Brome-Missisquoi interprété à partir des photographies aériennes

Classe d'occupation du sol	Nombre total de polygones	Nombre total de polygones visités	Nombre de polygones bien classifiés	Nombre de polygones incorrectement classifiés	Fiabilité des résultats (%)
Agricole	515	35	31	4	88,6
Forêt	510	39	37	2	94,9
Friche herbacée	317	18	13	5	72,2
Friche : ligneux bas	105	4	1	3	25,0
Friche : ligneux haut	559	11	10	1	90,9
Plantation de conifères	102	4	2	2	50,0
TOTAL	2108	111	94	17	84,7
TOTAL 3 CLASSES FRICHES SEULEMENT	981	33	24	9	72,7

classe agricole dans Acton sont des cas d'abandon où la classe friche herbacée a pris le relais de l'utilisation agricole. Comme pour les images IKONOS, la bonne interprétation eut été la classe voisine des cas incorrectement interprétés.

Ainsi, les cas de non-concordance sont souvent liés au laps de temps écoulé entre la prise des photos (1997 ou 1998) et celle des images satellitaires (2003). Et, tout comme pour ces dernières, la classe de ligneux bas est la plus difficile à interpréter.

Bien sûr, nous sommes conscients qu'il aurait été préférable de comparer des données de même âge (*i.e.* des photos aériennes prises au moment du passage du satellite) ce qui aurait donné une évaluation plus juste des deux approches. La rareté des survols ayant pour but la prise de photos aériennes ainsi que les coûts élevés d'une telle mission ont fait que nous n'avons eu d'autre choix que de composer avec le matériel photographique existant[7]. Nous considérons toutefois que la présente étude répond à l'essentiel des questions sur le choix de l'une ou l'autre méthode et qu'il ne fait pas de doute qu'avec des photos aériennes récentes, le taux d'exactitude de la photo-interprétation aurait été plus élevé. D'autre part, l'analyse des avantages et désavantages relatifs aux deux approches n'était pas le seul but de l'étude. En effet, l'obtention d'un portrait récent de l'utilisation du sol a été davantage atteint par l'outil satellitaire que par la photo aérienne.

Trois dimensions *vs* signature spectrale : comparaison entre les méthodes et niveau de précision

Les tableaux VIII et IX présentent les avantages et désavantages des méthodes utilisées (photo-interprétation et imagerie satellitaire). Ceux-ci sont sensiblement les mêmes pour chacun des deux médaillons étudiés.

Ainsi pour une même superficie, le recouvrement de photographies aériennes traditionnelles (panchromatiques — *i.e.* noir et blanc — à 1/15 000) est en moyenne

[7] Si l'exercice avait été purement méthodologique, il aurait été intéressant de prendre des images satellitaires datant des mêmes périodes que celles où ont été prises les photos aériennes (1997 et 1998). Mais comme le satellite IKONOS n'a été lancé qu'en septembre 1999, il aurait tout de même subsisté un écart de temps.

TABLEAU VIII
Comparaison des deux méthodes (photos aériennes *versus* images satellitaires) pour le médaillon d'Acton

	PHOTOS AÉRIENNES		IMAGES SATELLITAIRES *IKONOS*	
	Avantages	**Désavantages**	**Avantages**	**Désavantages**
Âge des données		1997	2003	
Coût d'acquisition[8] (47 photos)	$ 940			$ 2500
Précision à 1/15 000 *vs* pixel de 4 m X 4 m	Très grande			Moins précis que les photos
Temps d'interprétation	3 à 4 semaines			2 à 3 mois
Qualité géométrique		Distorsion	Supérieure	
Géoréférence		Aucune	Totale	
« Mosaïquage »		Très long	Instantanée dans le cas présent	
Main d'oeuvre		Rare		Rare

TABLEAU IX
Comparaison des deux méthodes (photos aériennes *versus* images satellitaires) pour le médaillon de Brome-Missisquoi

	PHOTOS AÉRIENNES		IMAGES SATELLITAIRES IKONOS	
	Avantages	**Désavantages**	**Avantages**	**Désavantages**
Âge des données		1998	2003	
Coût d'acquisition (36 photos)	$ 720			$ 2500
Précision à 1/15 000 *vs* pixel de 4 m X 4 m	Très grande			Moins précis que les photos
Temps d'interprétation	4 semaines			2 à 3 mois
Qualité géométrique		Distorsion	Supérieure	
Géoréférence		Aucune	Totale	
« Mosaïquage »		Très long	Instantanée dans le cas présent	
Main d'oeuvre		Rare		Rare

[8] Prix pour des photos « externes » (*i.e.* qui ne proviennent pas du Ministère des Ressources naturelles) obtenu sur le site de la Photocartothèque québécoise au début de 2005.

trois fois moins coûteux que le coût d'acquisition d'une image IKONOS. Et, bien que l'interprétation des photos aériennes à l'échelle 1/15 000 soit également beaucoup plus précise (notamment en raison de l'aspect tridimensionnel de l'outil) que celle qu'il est possible de faire à partir de la résolution d'une image IKONOS (fig. 20), le temps nécessaire pour couvrir un même territoire est de deux à trois fois plus rapide par photo-interprétation.

Par ailleurs, il est souvent impossible de se procurer une couverture aérienne suffisamment récente pour qu'elle puisse servir adéquatement aux fins d'une étude comme celle-ci. En effet, les friches sont des structures végétales qui évoluent rapidement et la catégorie de friche a eu le temps de changer si les photos sont antérieures de six ans à l'image satellitaire, comme c'est le cas pour le médaillon d'Acton.

En second lieu, les avantages initiaux de la photo-interprétation diminuent lorsqu'il s'agit d'assembler l'information (*i.e.* de joindre les photos entre elles aussi appelé le « mosaïquage ») et à plus forte raison de l'étendre à de plus grands territoires comme le voudrait l'aboutissement de l'actuel processus de recherche. Ceci est d'autant plus vrai que la superposition de couches d'informations variées qui permettra de mieux définir le potentiel forestier (telles les données topographiques, géomorphologiques, pédologiques, forestières et éventuellement cadastrales) devient ardue du fait de la distorsion inhérente aux photographies aériennes et de l'absence de géoréférence.

Il existe, bien sûr, des photos aériennes géoréférencées et dont la distorsion est minime, mais elles demeurent encore coûteuses et difficiles d'accès. Si une couverture récente n'est pas disponible pour une étude spécifique, il faut aussi prévoir une mission aéroportée et les frais afférents.

En conséquence, malgré certains avantages indéniables de la photo-interprétation, la méthode par imagerie satellitaire, outre le fait que son niveau de résolution doive répondre aux buts poursuivis, apparaît mieux adaptée aux besoins de caractérisation de l'utilisation du sol sur de grandes surfaces du fait d'une qualité géométrique supérieure, de sa géoréférence et de la non nécessité d'assembler l'information sous forme de mosaïque (l'image IKONOS formant déjà un tout). Il faut

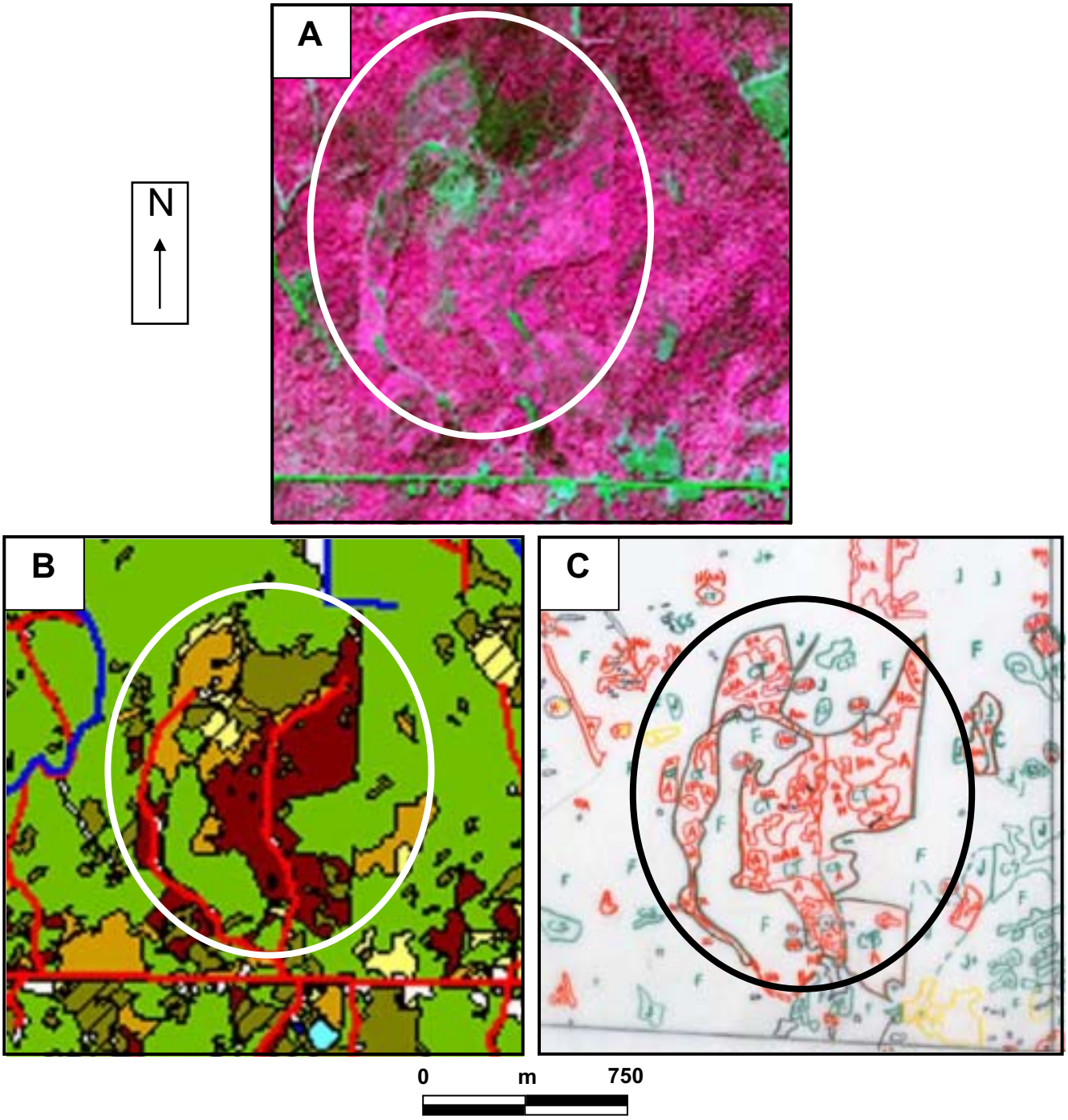


Figure 20. La photographie aérienne traditionnelle est plus précise que la classification visuelle de l'imagerie satellitaire. A. Image satellitaire en fausses couleurs, B. Classification de l'utilisation du sol à partir de l'interprétation visuelle de l'image satellitaire, C. Photo-interprétation des friches à partir de photos aériennes à 1/15 000. Photo reproduite grâce à la courtoisie du Groupe Alta – filiale Hauts-Monts inc.

toutefois trouver des solutions afin de d'améliorer l'efficacité de la méthode satellitaire. À cette fin, la classification automatisée apparaît comme une voie prometteuse.

Classification automatisée ou du pixel au polygone d'utilisation du sol

Comme il n'est pas possible d'avoir une quelconque influence sur le prix d'acquisition des images, c'est donc sur le temps d'analyse et de classification que nos efforts doivent porter.

Tout récemment, Hay *et al*. (2005) ont développé et testé une approche automatisée basée sur l'objet pour l'analyse multi-échelle du paysage. Cet essai de classification automatisée a été réalisé dans le Haut-Saint-Laurent grâce à l'algorithme MOSS (*Multiscale Object-Specific Segmentation*). MOSS est un algorithme automatisé de segmentation d'image qui consiste à regrouper des pixels de l'image qui sont adjacents et possèdent des valeurs numériques de gris qui sont très homogènes par rapport à leurs voisins. Ce sont potentiellement des objets de même utilisation du sol. Le résultat donne des polygones irréguliers (fig. 21). La classification se fait par regroupement des polygones sur la base de leurs similarités géographiques ou écologiques significatives et se rapproche des classes d'utilisation du sol.

L'application d'une telle méthode pour la classification des types de végétation est une approche innovatrice qui commence à attirer l'attention de la communauté internationale. Le succès de cette méthode serait une percée importante en traitement d'images de télédétection ainsi que dans le domaine d'application forestière. Il est certain que si cette approche automatisée donne des résultats satisfaisants, il sera possible d'envisager une cartographie de l'utilisation du sol sur de larges secteurs du Québec.

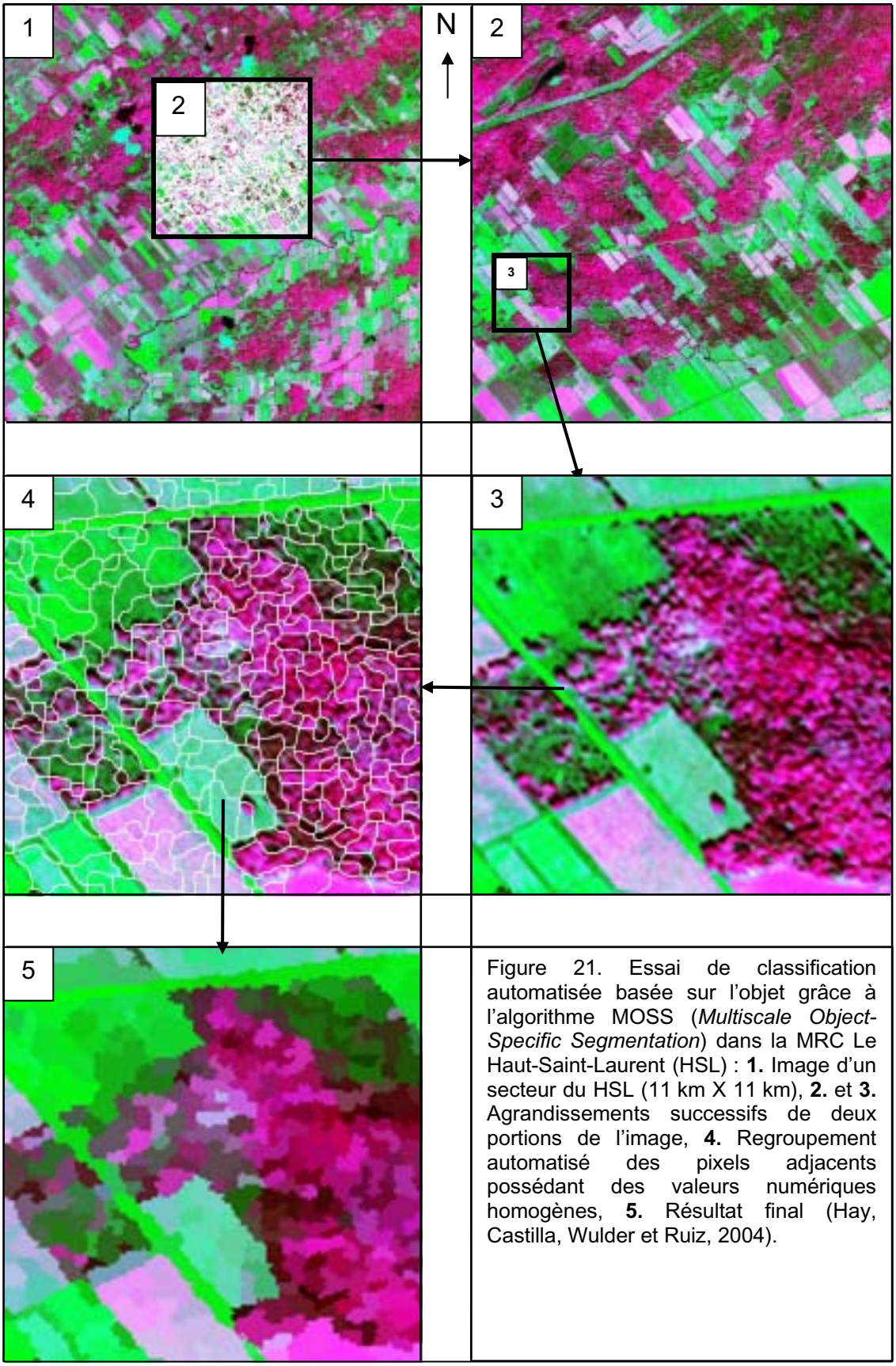


Figure 21. Essai de classification automatisée basée sur l'objet grâce à l'algorithme MOSS (*Multiscale Object-Specific Segmentation*) dans la MRC Le Haut-Saint-Laurent (HSL) : **1.** Image d'un secteur du HSL (11 km X 11 km), **2.** et **3.** Agrandissements successifs de deux portions de l'image, **4.** Regroupement automatisé des pixels adjacents possédant des valeurs numériques homogènes, **5.** Résultat final (Hay, Castilla, Wulder et Ruiz, 2004).

CONCLUSION

Bien que la photographie aérienne présente certains avantages sur l'imagerie satellitaire, cette dernière s'avère plus prometteuse dans la perspective d'un suivi de l'évolution de l'utilisation du sol sur de grandes superficies.

La méthodologie développée à partir de l'imagerie IKONOS dans des paysages dont la mosaïque est complexe a permis d'obtenir un bon niveau de fiabilité pour six classes d'utilisation du sol. Des ajustements sont toutefois requis pour les classes de friches ligneuses basses dans Acton et de friches ligneuses basses et hautes dans Brome-Missisquoi.

L'approche de classification utilisée jusqu'à maintenant fait largement appel à l'expertise humaine, ce qui requiert beaucoup de temps et limite l'applicabilité sur de grands territoires. La méthode de classification automatisée basée sur l'objet qui a été expérimentée sur un secteur du Haut-Saint-Laurent se révèle prometteuse. Il serait souhaitable que cette méthode puisse être testée dans les médaillons d'Acton et de Brome-Missisquoi puis, si les résultats sont concluants, d'évaluer l'applicabilité de généraliser l'approche à l'ensemble de la Montérégie et à d'autres secteurs du Québec.

Au cours d'une prochaine étape, les analyses spatiales complémentaires réalisées à l'aide de systèmes d'information géographiques (SIG) jumelées aux conditions favorables à la croissance des certaines espèces forestières permettront d'identifier et de cartographier les sites offrant un potentiel pour la plantation de divers feuillus, les friches étant ciblées en priorité. Un essai a déjà été conduit par Soucy-Gonthier *et al.* (soumis en 2004) dans Le Haut-Saint-Laurent.

En résumé, une suite à cette étude comporterait trois volets :

1) améliorer l'exactitude de la classification visuelle des médaillons d'Acton et de Brome-Missisquoi, principalement pour les classes de friches basses et hautes ;
2) tester la méthode de classification automatisée sur ces deux mêmes territoires ;
3) compléter les bases de données multicouches des deux médaillons afin de disposer d'informations géoréférencées permettant une meilleure détermination des sites potentiels pour la mise en valeur forestière.

Il serait des plus intéressants qu'un nouveau projet permette de concrétiser la réalisation de ces trois volets. Il est en effet indispensable de disposer d'une information détaillée répondant aux besoins sylvicoles à l'échelle de la forêt morcelée du Québec méridional. Une foresterie tournée vers l'avenir ne peut que bénéficier de la mise au point d'outils d'avant-garde.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'Agence forestière de la Montérégie (AFM) et plus particulièrement son directeur, M. Luc Dumouchel, pour sa collaboration dans la détermination des régions d'étude. Merci également aux étudiants qui ont contribué à la validation sur le terrain, soit Mmes Karyne Benjamin et Valérie Haf-Gagné de même que M. Loïc D'Orangeville. Nous avons pu consulter les photos aériennes nécessaires à ce projet grâce à MM. Michel Robert d'Hydro-Québec, Pierre Roy de la cartothèque de l'Université du Québec à Montréal et Mme Lucie Gendron de la cartothèque de l'Université de Sherbrooke. La permission de reproduire les photographies aériennes dans le rapport est une gracieuseté de M. Raymond Dubé du groupe Alta (filiale Hauts-Monts inc.). Les échanges avec les membres de l'IRBV et du RLQ sur la question des friches ont aussi été très profitables.

Ce rapport de recherche a été rendu possible grâce au financement des programmes, personnes et organismes suivants :

- Le Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier Volet II (MRN)
- Le Réseau Ligniculture Québec (RLQ)
- MM. André Bouchard et Alain Cogliastro de l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV)
- Le Laboratoire de géomatique et d'analyse spatiale du département de géographie de l'Université de Montréal, dirigé par Danielle Marceau
- M. Gérald Domon, de la Faculté de l'aménagement, Université de Montréal

Qu'ils soient tous remerciés pour leur soutien.

RÉFÉRENCES

Avery, T.E. et Berlin, G.L., 1999. Fundamentals of Remote Sensing and Airphoto Interpretation. Macmillan Publishing Company, New York, 472 p.

George, P., 1993. Dictionnaire de la géographie, 5e édition refondue. Presses Universitaires de France, Paris, 498 p.

Gonzalez, R.C. et Wintz, P., 1977. Digital Image Processing. Reading, Massachusetts, Addison-Wesley.

Hay, G. J., Castilla, G., Wulder, M. A. et Ruiz, J. R., 2005. Multiscale Object-Specific Segmentation (MOSS). An automated object-based approach for multiscale high-resolution image segmentation. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (JAG). (Accepté pour publication le 07 avril 2005).

Le Nouveau Petit Robert, 1994. Dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française. Dictionnaires Le Robert, Paris, 2467 p.

Le Petit Larousse illustré, 1995. Dictionnaire encyclopédique. Larousse, Paris, 1777 p.

Marceau, D., Soucy-Gonthier, N. et Bouchard, A. 2002. Détection et caractérisation spatiale des friches dans une région du Haut-Saint-Laurent à l'aide d'une image satellitaire Ikonos. Résumé de conférence, Colloque/atelier sur la ligniculture, 13 et 14 mai 2002, 70e Congrès de l'ACFAS, p. 20.

Paquette, A. et Cogliastro, A., 2003. Une succession de peupliers hybrides et de feuillus nobles. Le Progrès Forestier, Printemps 2003 : 6-11.

Parent, S., 1990. Dictionnaire des sciences de l'environnement. Broquet, Ottawa, 748 p.

Payette, S. et Gauthier, B., 1972. Les structures de végétation : interprétation géographique et écologique, classification et application. Le Naturaliste canadien, 99 (1) : 1-26.

Réseau Ligniculture Québec, 2005. Site internet du RLQ : http://www.unites.uqam.ca/rlq/sitedetudefr.htm, cliquer sur le lien Région de la Montérégie.

Ressources naturelles Canada, 1995. Terminologie de la sylviculture au Canada, 2e éd. Service canadien des forêts, Ottawa, site internet (1999) : http://nfdp.ccfm.org/silviterm/silvi_f/silvitermintrof.htm

Ressources naturelles Canada, 1998. Carte topographique à 1/50 000 de la région de Richmond, feuillet 31 H/9, Ottawa.

Ressources naturelles Canada, 2000a. Carte topographique à 1/50 000 de la région de Cowansville, feuillet 31 H/2, Ottawa.

Ressources naturelles Canada, 2000b. Carte topographique à 1/50 000 de la région de Saint-Hyacinthe, feuillet 31 H/10, Ottawa.

Richardson, A.J. et Everitt, J.H., 1992. Using spectral vegetation indices to estimate rangeland productivity. Geocarto International, 1: 63-69.

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. et Harlan, J.C., 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (Greenwave effect) of natural vegetation. Maryland, USANASA/GSFC, Greenbelt.

Sabins, F.F., 1997. Remote sensing: principles and interpretation. W. H. Freeman and company, New York, 494 p.

Soucy-Gonthier, N., 2003. Cartographie et analyse spatiale des friches dans une région agro-forestière du sud-ouest du Québec à l'aide d'une image du satellite IKONOS. Mémoire de M.Sc., Département de géographie, Université de Montréal, 64 p.

Soucy-Gonthier, N., Marceau, D., Delage, M., Cogliastro, A., Domon, G. et Bouchard, A., 2003. Détection de l'évolution des superficies forestières en Montérégie entre juin 1999 et août 2002 à partir d'images satellitaires Landsat-TM. Laboratoire de Géomatique et d'Analyse Spatiale (dép. de géographie), Institut de recherche en

biologie végétale et Réseau Ligniculture Québec, Université de Montréal, 34 p. et 1 DC (en pochette).

Soucy-Gonthier, N., Poirier, B., Cogliastro, A., Bouchard, A. et Marceau, D.J. (soumis en 2004). Detection and mapping of suitable sites for strategic planning of deciduous tree species plantations in southwest Quebec using remote sensing IKONOS data and GIS spatial analysis. Soumis au The Canadian Geographer/Le Géographe canadien en décembre 2004.

ANNEXE 1

Détails sur la couverture de photos aérienne

Bien que l'interprétation n'ait couvert que partiellement chacun des médaillons, nous donnons ici toutes les photos nécessaires pour couvrir l'ensemble de chaque secteur.

MÉDAILLON D'ACTON

Photos prises le 3 juin 1997

[Disposition : du nord (haut) au sud (bas), et de l'ouest (gauche) à l'est (droite)]

No de la ligne de vol	Nos des photos
HMQ97-108	183 à 193
HMQ97-107	230 à 222
HMQ97-107	199 à 207
HMQ97-106	239 à 231
HMQ97-106	217 à 225

MÉDAILLON DE BROME-MISSISQUOI

Photos prises le 23 mai 1998 pour HMQ98-106 et le 3 juillet 1998 pour HMQ98-125

[Disposition : du nord (haut) au sud (bas), et de l'ouest (gauche) à l'est (droite)]

No de la ligne de vol	Nos des photos
HMQ98-106	49 à 41
HMQ98-125	27 à 34
HMQ98-106	224 à 214
HMQ98-125	24 à 16