

VERS L'INVENTAIRE FORESTIER AUTOMATISÉ: RECONNAÎTRE L'ARBRE OU LA FORÊT?

François A. Gougeon

Service canadien des forêts, Institut forestier national de Petawawa[†]

C.P. 2000, Chalk River (Ontario), Canada, K0J 1J0

Tel.: (613)589-3032, FAX: (613)589-2275, Réseaux: fgougeon@pnfi.forestry.ca

RÉSUMÉ

Cet article décrit brièvement une approche novatrice à l'analyse d'images forestières de haute résolution spatiale et présente certains résultats préliminaires. L'approche consiste à séparer les couronnes d'arbres les unes des autres, à reconnaître une par une leurs espèces et, au besoin, à regrouper ces cimes en peuplements forestiers. Cette approche offre la possibilité de produire semi-automatiquement des inventaires où la répartition en espèces des peuplements forestiers sera connue de manière précise. Plusieurs autres paramètres forestiers tels les diamètres des couronnes d'arbre, la fermeture du couvert et la densité des peuplements sont aussi facilement disponibles. Par contre, si l'on opte de préserver l'information "à l'arbre près", des inventaires très détaillés utiles à une gestion plus polyvalente de nos forêts seront disponibles. Un progiciel fut développé et testé en utilisant des images MEIS de haute résolution spatiale (~30 cm/pixel). Des tests subséquents à 70 et 100 cm/pixel ont illustré la robustesse de cette approche et son utilité potentielle pour l'analyse d'images provenant de la prochaine génération de satellites d'observation terrestre (à 1 m/pixel). Le système produit aussi des résultats prometteurs avec des photographies aériennes infrarouge couleur (1:19 000) qui furent numérisées à une résolution équivalente à 60 cm/pixel. Son application à une région de régénération forestière comprenant des peuplements d'âges et de densités variés est aussi présentée.

ABSTRACT

This paper describes briefly a new approach to the analysis of high spatial resolution forest images and presents some preliminary results. The approach is based on separating tree crowns from one another, recognizing one by one their species and, if needed, regrouping the crowns into forest stands. This approach has the potential for a semi-automatic production of forest inventories in which the species composition of stands would be obtained with precision. Many other forestry parameters such as tree crown diameters, canopy closure and stand density are also easily obtained. On the other hand, if one decides to keep the individual tree-based information, very detailed inventories, presumably more useful to the integrated management of our forests, will be available. A system was developed and tested using high spatial resolution (~30 cm/pixel) MEIS images. Subsequent tests at 70 and 100 cm/pixel have illustrated the robustness of this approach and its potential usefulness for the analysis of images from the next generation of earth observation satellites (at one m/pixel). The system has already lead to promising results with colour infrared aerial photographs (1:19 000) which were digitized to a resolution of 60 cm/pixel. An application to a forest regeneration area containing stands of various ages and densities is also presented.

[†] Bientôt à: Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, 506 West Burnside Rd., Victoria, Colombie-Britannique, V8Z 1M5. Tél.: (604)363-0600, FAX: (604)363-0775, Réseaux: fgougeon@pfc.forestry.ca

• Présenté au 9ème Congrès de L'Association québécoise de télédétection, Québec, 1-3 mai, 1996.

INTRODUCTION

La facilité relative avec laquelle nous pouvons interpréter des photographies aériennes en peuplements forestiers distincts s'explique par ce que nous appelons avoir "une vue d'ensemble". C'est cette vue d'ensemble qui fait généralement défaut aux ordinateurs. Plutôt que d'essayer de donner cette capacité aux ordinateurs, pourquoi ne pas mettre à profit leur force à examiner les détails?

En effet, pour les images de télédétection de basses résolutions telles celles provenant du Landsat MSS, Landsat TM ou du SPOT, une approche de classification pixel-par-pixel est encore justifiable. Plus la résolution spatiale augmente, plus l'on voit la texture présente dans les peuplements forestiers. L'apport de mesures de texture peut alors améliorer la classification par pixel (Marceau *et al.*, 1990). Pour les images de moyenne résolution (1-10 m/pixel), il est souvent plus approprié de se servir directement de la texture pour séparer les peuplements forestiers en utilisant des procédés de segmentation d'image (Gougeon et Wong, 1986; St-Onge et Cavayas, 1991). Par contre, dans les images de haute résolution (cm/pixel) provenant de capteurs tels que le MEIS ou le CASI, ou obtenues à partir d'une numérisation de photographies aériennes, les couronnes d'arbres deviennent bien visibles et constituent indubitablement les principaux éléments structurants de l'image (Gougeon, 1993).

L'approche préconisée pour l'analyse d'images forestières de hautes résolutions est la suivante. D'abord, les couronnes d'arbres sont isolées les unes des autres en utilisant les vallées d'ombre entre leurs cimes. Puis, selon un processus de classification dirigée, des échantillons de couronnes d'arbres spécifiées individuellement (p. ex., pour les peuplements naturels) ou faisant partie d'une région donnée (p. ex., pour les plantations d'une même espèce) permettent à l'utilisateur de créer des signatures représentant les espèces forestières. Un algorithme de classification par vraisemblances maximales compare alors la signature de chaque cime aux signatures obtenues pour les espèces forestières. L'inventaire ainsi obtenu (dit "à l'arbre près") peut être utilisé tel quel si le besoin s'en fait sentir (p. ex., coupes sélectives), ou les cimes peuvent faire l'objet d'un regroupement en peuplements (p. ex., inventaire conventionnel).

DÉLINÉATION DES COURONNES D'ARBRES

Dans la plupart des peuplements de conifères matures, il est généralement possible d'isoler les couronnes d'arbres les unes des autres et même de les délinéer de façon relativement précise en utilisant les zones ombragées entre elles. Ces zones correspondent généralement à des parties ombragées des couronnes ou, au sous-bois ou au sol, complètement dans l'ombre. En utilisant seulement une des bandes spectrales, le procédé d'isolation des couronnes (ITCVFOL, Figure 1) trouve d'abord tous les points d'intensité locale minimale. Puis, à partir de ces points, il suit systématiquement toutes les vallées d'ombre qui séparent les arbres. L'isolation n'étant souvent pas complète, un procédé de délinéation (ITCISOL, Figure 1), qui suit pas à pas le pourtour de chaque couronne en utilisant des instructions sous forme de règles, est utilisé pour obtenir des couronnes bien distinctes. Cette méthode fut décrite en détails et testée sur une image MEIS de 31 cm/pixel (Gougeon, 1995b). Elle produisit un décompte automatique des couronnes à 7.7% près de celui fait au sol. Elle fut récemment améliorée pour être plus adaptable à d'autres résolutions spatiales. De plus, les clairières très ouvertes et très éclairées, de même que les chemins forestiers peuvent maintenant être éliminés par

l'utilisation d'un masque généré lors d'un pré-traitement de l'image.

CLASSIFICATION DES COURONNES D'ARBRES

Une fois les couronnes d'arbres bien séparées, une signature spectrale peut être calculée pour chaque arbre. Le système de classification permet l'utilisation de plusieurs types de signatures spectrales (Gougeon 1995a). Ici, la moyenne multispectrale de la cime fut utilisée. Pour une classification dirigée, l'utilisateur crée une signature pour chaque espèce d'arbre à considérer, soit en entourant une région uniformément peuplée par cette espèce (DCP, Figure 1), soit en pointant à certaines cimes spécifiques qui sont connues (DCPE). Quel que soit le type de signature utilisé, la signature de l'espèce ainsi générée correspond à la moyenne (et la covariance) des signatures des cimes de cette espèce (ITCSSG). Durant la procédure d'entraînement, des cimes échantillons sont aussi mises de côté pour pouvoir faire une bonne estimation de l'exactitude de la classification (ITCCA). Une fois l'entraînement terminé, les cimes de l'image sont assignées à une espèce par un algorithme de classification par vraisemblance maximale (ITCSC).

REGROUPEMENT EN PEUPEMENTS FORESTIERS

Pour la production d'inventaires forestiers de type conventionnel, c'est-à-dire composé de peuplements forestiers "jugés" uniformes et dont la composition en espèce est évaluée en pourcentage, un regroupement des cimes s'impose. Traditionnellement, un interprète trace les contours des peuplements forestiers sur des photographies aériennes en se fiant sur son expérience, quelques règles de base, et cette faculté bien humaine de percevoir facilement des formes (même où il n'y en a pas, p.ex., taches d'encre de Rorschach). Sans vouloir imiter directement cette faculté, il nous faut trouver une manière de regrouper les cimes en peuplements raisonnables. Des résultats préliminaires semblent indiquer que des facteurs simples telles, la densité du peuplement et la fermeture du couvert dans une région donnée, peuvent être très utiles.

Un premier programme (CCLOSURE.c) produit une image dont les valeurs de chaque pixel correspondent à la quantité de pixels faisant partie de couronnes dans une région de grandeur fixe (60x60) du bitmap de couronnes produit par ITCISOL. Un deuxième programme (STEMDENS.c), qui utilise ce même bitmap, trouve le centre de chaque couronne et compte le nombre de couronnes dans cette même région (60x60), produisant ainsi une image dont les valeurs de chaque pixel correspondent à la densité du peuplement. Les deux images résultantes (fermeture et densité) sont employées dans un procédé de classification non-dirigé produisant des regroupements influencés par ces deux facteurs. Les résultats (typiquement de 2 à 5 classes) peuvent être présentés sous forme d'image, d'information thématique, ou de polygones (avec un post-traitement).

IMAGES UTILISÉES ET RÉGIONS ÉTUDIÉES

Trois images différentes furent utilisées pour obtenir les résultats préliminaires présentés dans cet article. La première est une image MEIS-II de plantations forestières faisant parties de la Forêt expérimentale de Petawawa (FEP). L'image fut acquise le 29 octobre 1985 d'une altitude de 1070 m, lui donnant une résolution spatiale de 70 cm/pixel. Elle fut rééchantillonnée à un m/pixel, lui donnant

quelque peu l'apparence des images satellitaires de l'avenir (Fritz, 1996). La région se compose de peuplements uniformes matures d'épinettes blanches, de pins et d'épinettes rouges, et de pins de Norvège, à gauche; d'un peuplement mixte de pins blancs et rouges à droite; et d'un peuplement mixte de pins rouges et d'épinettes blanches au centre supérieur de l'image (Figure 2a). La deuxième image provient d'une numérisation d'une photo aérienne couleur infrarouge (originellement à 1:19 000) de la région nommée China Creek, près de Nanaïmo en Colombie-Britannique (Figure 3a). Telle qu'utilisée, elle a une résolution spatiale approximative de 60 cm/pixel. Elle couvre principalement un peuplement naturel mature composé de sapins de Douglas, de pruches de l'Ouest, et de cèdres de l'Ouest, entouré de zones en régénération. La troisième image fut captée par le MEIS-II, en Novembre 1982, d'une altitude de 430 mètres, lui donnant une résolution spatiale de 30 cm/pixel (Figure 4a). Elle couvre de jeunes plantations de la FEP, principalement composées de pins gris d'âge, de hauteur et de densité différents, sur un terrain sablonneux légèrement ondulé.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Bien que le système de délimitation et de classification des couronnes d'arbres fut développé avec des images de résolution spatiale de l'ordre de 30 cm/pixel, des résultats préliminaires à 70 et 100 cm/pixel (Gougeon 1995c) ont illustré la robustesse de cette approche et son utilité potentielle à ces résolutions. L'amélioration du logiciel (décrite ci-dessus) permet maintenant une meilleure détection des arbres dominants qui, à un m/pixel, peuvent n'occuper que quelques pixels. De plus, l'utilisation d'un masque peut maintenant prévenir (si l'on désire) la détection de bosquets dans les clairières ou la création de pseudo-arbres sur des surfaces sans aucune végétation (Figure 2b). Les épinettes blanches (en rouge), les pins rouges (en vert), et les épinettes rouges (en bleu) semblent bien reconnus, malgré l'exactitude de classification faible (57.4%) de ces derniers (Tableau 1), probablement due au choix des zones de vérifications. Les épinettes de Norvège ne furent pas considérées étant donné leur petit nombre. Les pins blancs (en jaune), qui pourtant ont eu le bénéfice d'un entraînement et d'une vérification de classification par l'identification de couronnes individuelles (i.e., des "aires" d'entraînement et de vérification furent utilisées pour les autres espèces), ont une exactitude de classification plutôt faible (62.2%). De plus, la deuxième espèce dominante de ce peuplement (à droite de l'image) devrait être le pin rouge (en vert) et non pas l'épinette rouge (en bleu). En effet, les pins rouges en peuplements de faible densité présentent des couronnes beaucoup plus ouvertes et ont une signature différente de ceux en peuplements denses dont on ne voit que la partie supérieure de la cime. Ce test n'est évidemment que partiellement représentatif, mais cela augure bien pour l'analyse d'images provenant de la prochaine génération de satellites d'observation terrestre (à 1 m/pixel).

Le système semble bien fonctionner même avec une photographie aérienne numérisée (Figure 3b). L'information au sol n'étant pas disponible à l'arbre près (pour le moment), cette classification fut réalisée à l'aveuglette (c.-à-d., un peu comme une classification non dirigée). Il est donc impossible d'en vérifier l'exactitude. Par contre, les deux espèces principales du peuplement central (sapins de Douglas et pruches de l'Ouest) semblent bien séparées et dans des proportions représentatives. De plus, il semble y avoir très peu de confusion entre les espèces matures et la régénération. Celle-ci semble assez bien séparée en trois groupes.

La figure 3c illustre un premier effort de regroupement en peuplements forestiers basé sur la méthode décrite plus haut. Ce regroupement semble manquer de précision par rapport au facteur "densité du

peuplement". En effet, le peuplement mature, considéré comme ayant une faible densité par rapport aux régions en régénération, englobe aussi des aires dépourvues de toute végétation. Par contre, on peut facilement entrevoir comment la création et l'application de règles par rapport aux surfaces minimales à considérer, telles qu'elles existent pour tous les inventaires actuels, pourront améliorer un tel regroupement. Pour des situations plus complexes, il sera probablement opportun d'introduire un troisième facteur: la densité du peuplement de chaque espèce forestière. Pour l'instant, les résultats actuels et d'autres travaux en cours semblent offrir des regroupements intéressants.

Les programmes de délimitation des couronnes semblent aussi produire des résultats préliminaires intéressants pour l'évaluation du succès de la régénération (Figure 4b). Les peuplements de pins gris âgés de plus de cinq ans semblent présenter peu de problèmes, bien que les plus ouverts souffrent d'une exagération de la grosseur de leurs couronnes quand les arbres sont sur un fond très bien éclairé. Pour ceux de moins de cinq ans (en haut, à gauche), les cimes sont plus difficile à détecter systématiquement. De plus, les régions où il n'y a pas de régénération coniférienne (en-bas, à droite) apparaissent quand même couvertes de pseudo-arbres. L'utilisation d'un masque éliminant ces régions de prime abord ou d'un post-traitement reconnaissant leurs formes irrégulières (allongées), pourrait remédier à ce problème. En général, à partir de tels résultats, il y a de bons espoirs de pouvoir établir des critères servant à quantifier le succès de la régénération. Il est à noter que probablement seule la saison automnale peut nous permettre de tels résultats.

L'approche "à l'arbre près" et les résultats présentés ici et ailleurs (Gougeon 1995a, b, c) représentent un pas important vers l'inventaire forestier automatisé. En effet, une délimitation précise des couronnes d'arbres suivie d'une identification de leurs espèces et d'un regroupement en peuplements forestiers devraient nous donner une information sur l'étendue et le contenu de ces peuplements d'une précision assez similaire à celle des inventaires de gestion actuels. Pour compléter le tout, il nous faudra aussi obtenir de l'information sur la hauteur des arbres ou des peuplements, ou trouver de nouvelles façons moins directes d'obtenir le volume de matière ligneuse ou la valeur marchande de ces peuplements. Il faudra aussi que les agences provinciales approuvent l'utilisation de cette approche numérique, surtout si elle devait un jour être presque complètement automatique.

Pour la création d'un système d'inventaire complet, plusieurs facteurs doivent encore être analysés, par exemple: la délimitation et la classification des feuillus, les effets bidirectionnels sur les signatures spectrales, l'apport de signatures quantifiant la texture et la structure d'une couronne, l'apport d'information contextuelle, etc. L'approche "à l'arbre près" peut aussi faire l'objet de nombreuses applications autres que l'inventaire de gestion. La disponibilité d'information arbre-par-arbre peut aussi être utile aux évaluations de biodiversité, de succès de régénération, de dommages dus aux maladies ou aux insectes, etc.

CONCLUSION

L'utilisation de systèmes d'information géographique pour emmagasiner et gérer les inventaires forestiers rend de plus en plus pertinente toute approche numérique à l'acquisition de ces inventaires. De plus, toute approche numérique tend à donner l'espoir d'obtenir ces inventaires d'une façon très automatisée. Mais, pour parvenir à ce but, doit-on considérer l'arbre ou la forêt?

Les peuplements forestiers sont encore la base des inventaires actuels. Il existe donc des systèmes de segmentation d'images en peuplements forestiers qui ont un bon potentiel. Mais, pour être utile, cette segmentation doit nécessairement être suivie d'une identification du contenu forestier de ces peuplements. C'est cette identification qui pose encore de nombreux problèmes.

Par contre, l'approche novatrice présentée, qui consiste à séparer les couronnes d'arbres les unes des autres, à reconnaître une par une leurs espèces et, au besoin, à regrouper les cimes en peuplements forestiers, semble pleine de promesses. De prime abord, l'extraction d'une information forestière "à l'arbre près" peut être perçue seulement comme une étape intermédiaire par laquelle l'ordinateur doit passer pour compenser pour ses faiblesses à reconnaître de la même manière que nous les objets qui nous intéressent (i.e, les peuplements et leur contenu). Éventuellement, le virage vers une utilisation plus polyvalente de l'information végétale pour un aménagement intégré du domaine forestier va probablement nous inciter à garder toute cette information détaillée. En effet, celle-ci pourrait être très utile pour la planification de coupes sélectives, la gestion d'habitats fauniques, les études de biodiversité, la création de puissants modèles de compétition, le suivi et la comptabilité de la régénération, etc. D'une manière comme de l'autre, l'approche "à l'arbre près" devrait être utile à une majorité d'applications forestières. Elle produit déjà des résultats très intéressants à partir d'images MEIS, CASI, et de photos aériennes numérisées, et pourrait donc être utilisée dans un programme d'échantillonnage. Elle sera d'autant plus utile lorsque, dans un avenir rapproché, des images satellitaires d'un mètre de résolution seront couramment disponibles.

REMERCIEMENTS

Je remercie Dennis Paradine de MacMillan Bloedel Limité, Nanaïmo, Colombie-Britannique, pour l'intérêt porté à mes travaux et pour m'avoir fourni la photographie aérienne numérisée.

RÉFÉRENCES

- Fritz, L.W., 1996. The era of commercial earth observation satellites. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. LXII(1):39-45.
- Gougeon, F.A., 1993. Individual tree identification from high resolution MEIS images. Pages 117-128 in Leckie, D.G.; Gillis, M.D., eds. Intl. Forum Airborne Multispectral Scanning for Forestry and Mapping (with Emphasis on MEIS). Val-Morin, Québec, Canada, 13-16 avril, 1992. Inf. Rep. PI-X-113, Petawawa Natl. For. Inst.
- Gougeon, F.A., 1995a. Comparison of possible multispectral classification schemes for tree crowns individually delineated on high spatial resolution MEIS Images. *Journal Canadien de Télédétection*. 21(1):1-9.
- Gougeon, F.A., 1995b. A crown-following approach to the automatic delineation of individual tree crowns in high spatial resolution aerial images. *Journal Canadien de Télédétection*. 21(3):274-284.
- Gougeon, F.A., 1995c. A system for individual tree crown classification of conifer stands at high spatial resolution. Pages 635-642 in Epp, H. et C. Taylor (éds), 17^e Symp. can. sur la télédétection, Saskatoon, Saskatchewan, juin 1995.
- Gougeon, F.A. et A.K.C. Wong, 1986. Spectral and textural segmentation of multispectral aerial images. Pages 291-300 in Thompson, D. et R.J. Brown (éds), 10^e Symp. can. sur la télédétection, Edmonton, Alberta, 5-8 mai, 1986.
- Marceau, D.J., P.J. Howarth, J.-M. M. Dubois, et D. J. Gratton, 1990. Evaluation of the grey-level co-occurrence matrix method for land-cover classification using SPOT imagery. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. 28(4):513-519.
- St-Onge, B.A. et F. Cavayas, 1991. La segmentation d'images de forêt de haute résolution à l'aide de mesures de texture basées sur le demi-variogramme. Pages 219-225 in Paul Gagnon (éd.), 7^e Congrès de L'Association québécoise de télédétection, Montréal, Québec, 23-25 oct., 1991.

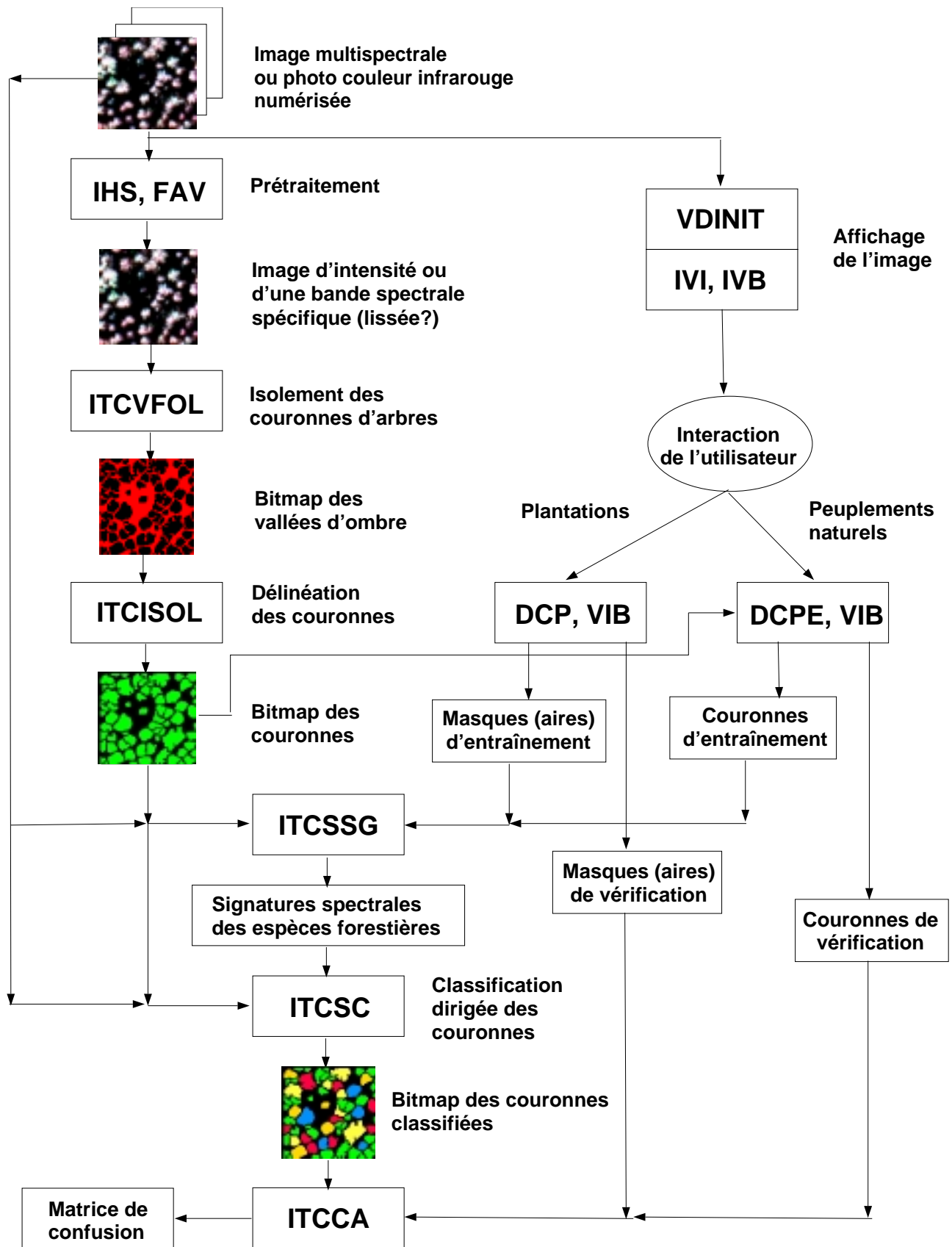


Figure 1 - Procédé de classification dirigée des couronnes d'arbres (adapté de Gougeon, 1995c)

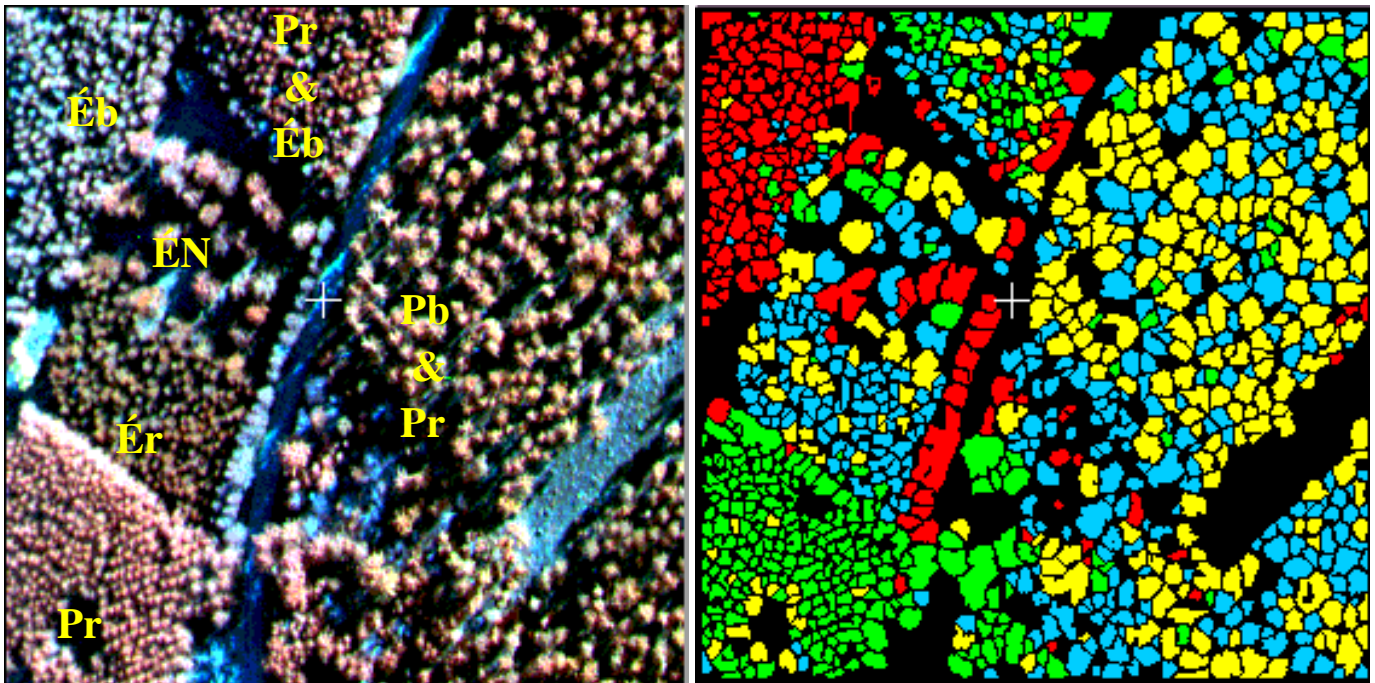


Figure 2a (à gauche) - Section d'une image MEIS-II (280 lignes x 280 pixels) de plantations de la Forêt expérimentale de Petawawa acquise le 29 octobre 1985 à une résolution spatiale de 70 cm/pixel et rééchantillonnée à une résolution de 100 cm/pixel pour simuler grossièrement les images qui seront disponibles à l'avenir à partir de satellites d'observation terrestre (Éb = épinette blanche, Ér = épinette rouge, ÉN = épinette de Norvège, Pr = pin rouge, Pb = pin blanc).

Figure 2b (à droite) - Classification dirigée couronne par couronne de l'image en figure 2a réalisée avec le progiciel illustré à la figure 1 (épinette blanche en rouge, épinette rouge en vert, pin rouge en bleu, et pin blanc en jaune).

	Épinette blanche	Pin rouge	Épinette rouge	Pin blanc
Épinette blanche	47 (90.4%)	0	2	0
Pin rouge	1	59 (88.1%)	10	10
Épinette rouge	1	2	31 (57.4%)	6
Pin blanc	1	3	6	28 (62.2%)
Couronnes non-classifiées	2	3	5	1
Exactitude moyenne = 74.5% Exactitude globale = 75.7 % Kappa = 0.725				

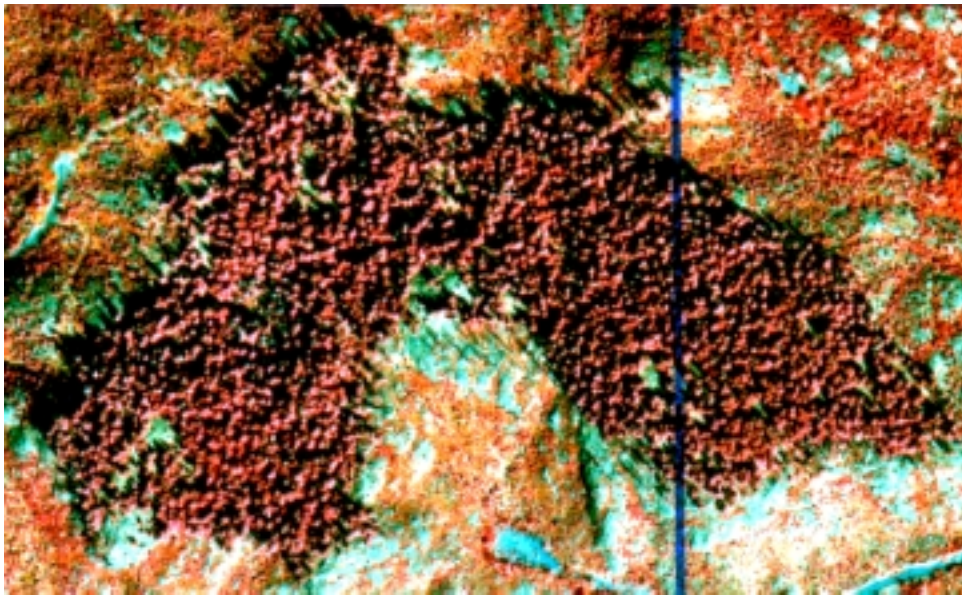


Figure 3a:
Photographie aérienne couleur infrarouge (1:19 000) de la région nommée China Creek, sur l'île de Vancouver en Colombie-Britannique numérisée à une résolution spatiale approximative de 60 cm/pixel.

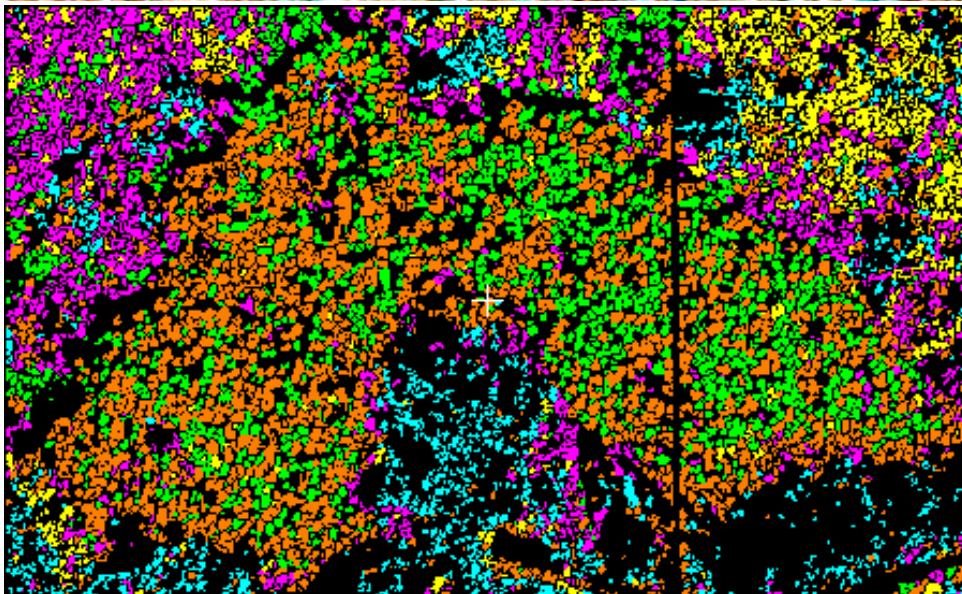


Figure 3b:
Isolement, délimitation et classification des couronnes d'arbres détectées dans l'image en figure 3a.



Figure 3c:
Regroupement préliminaire des arbres en peuplements forestiers basé uniquement sur la densité du peuplement et la fermeture du couvert.

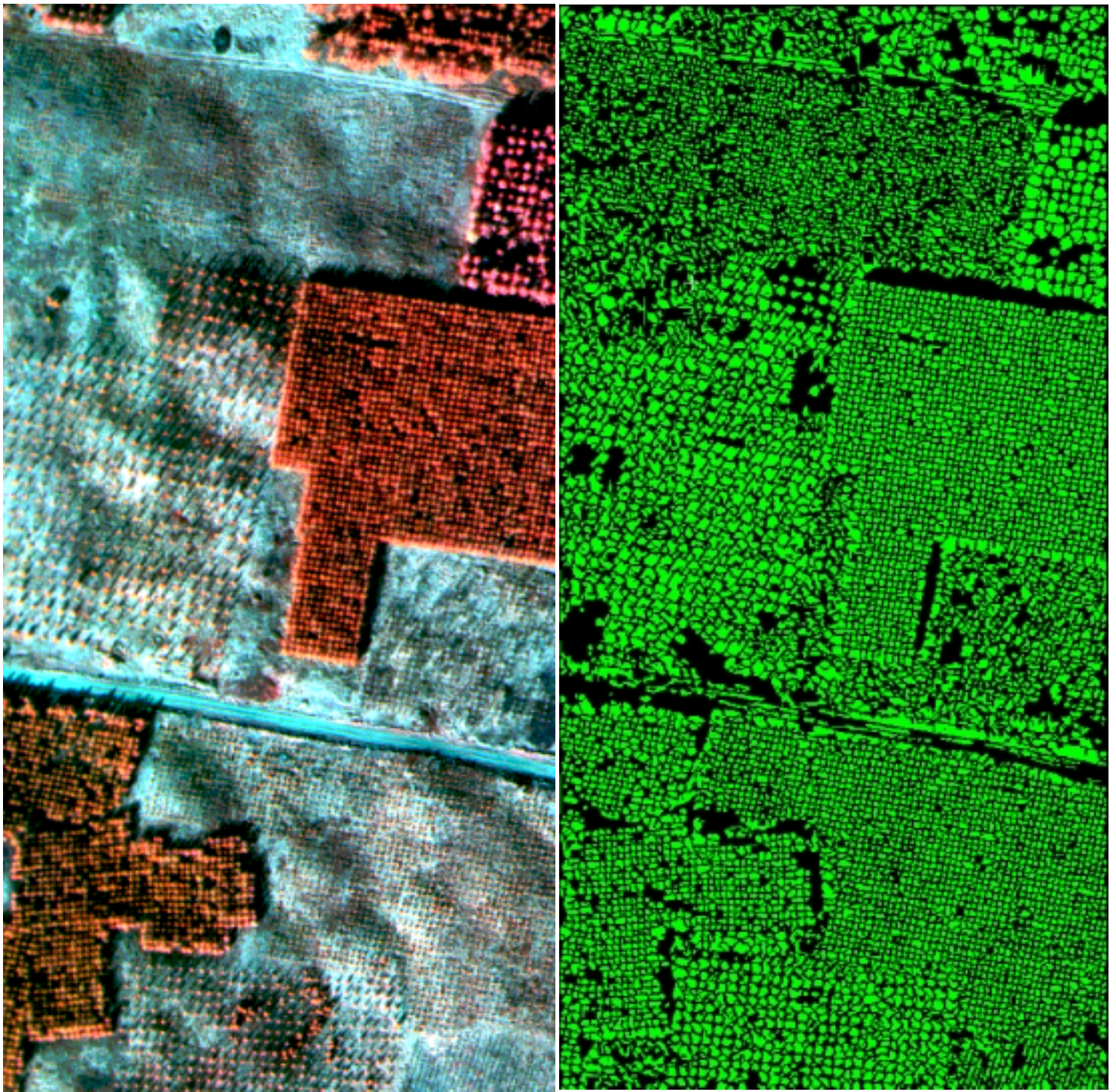


Figure 4a (à gauche) - Section d'une image MEIS-II de plantations de pins gris au lac Sturgeon de la Forêt expérimentale de Petawawa acquise en novembre 1982 à une résolution spatiale de 30 cm/pixel.

Figure 4b (à droite) - Résultats du processus d'isolement et de délimitation des couronnes.