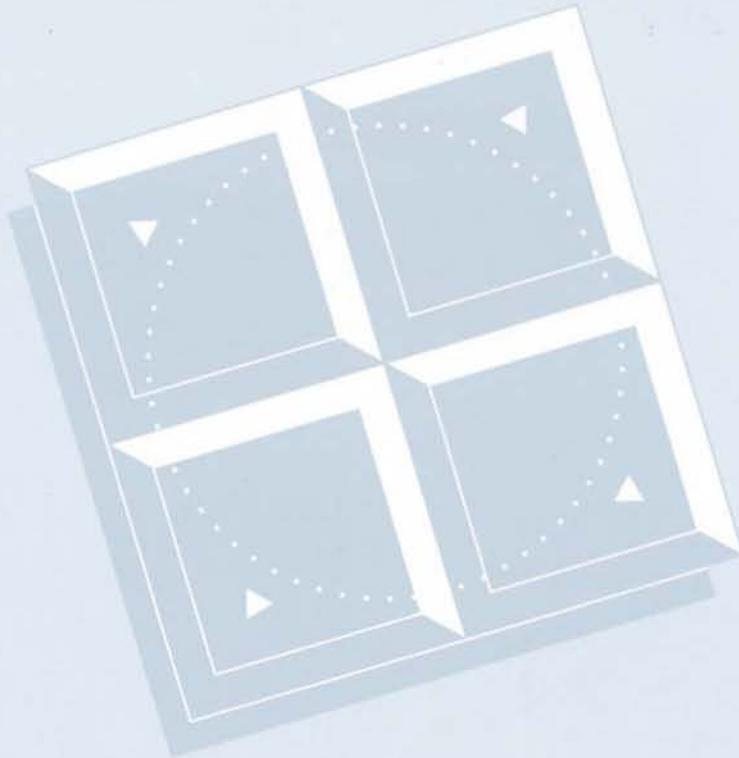


Mémoire de recherche forestière n° 137

RADARSAT RSO
et la mise à jour des cartes forestières

par S. MATEJEK, G. DÉSAULNIERS
M. HINSE, J.-P. LÉTOURNEAU
et P. LAFRAMBOISE

Ce mémoire contient un errata
à la fin du document



Sébastien MATEJEK est ingénieur forestier depuis avril 1992. Il détient une maîtrise en génie forestier (1976) de l'Académie d'Agriculture de Cracovie (Pologne) et une M.Sc. en géographie-télédétection (1989) de l'Université de Sherbrooke. Il a travaillé comme spécialiste en aménagement et protection de la forêt pour la Société nationale des produits forestiers de Pologne, puis comme chercheur-enseignant à l'Institut national de recherche forestière et à l'Université de Tizi-Ouzou en Algérie. En 1989, il entre à la Direction de la recherche forestière à titre de chargé de recherche en télédétection. Il travaille à la mise au point des méthodes de cartographie forestière basées sur l'utilisation des données de capteurs satellites et aéroportés. En avril 1999, il est transféré à la Direction des inventaires forestiers.



Gilles DÉSAULNIERS est B.Sc. (math. stat., 1970), M.Sc. (dendrométrie, 1973) et *Ph.D.* (dendr. et entom., 1987) de l'Université Laval. D'abord statisticien occasionnel de 1970 à 1975 au Ministère – période pendant laquelle il a aussi enseigné – il est depuis 1976 à l'emploi de la Direction de la recherche forestière, comme conseiller dans l'utilisation de la mathématique en foresterie et chargé de recherches en dendrométrie. Il a créé le système de cubage individuel des tiges *DÉBUTRONC*, a participé à l'élaboration de vergers à graines en instaurant un processus original de répartition aléatoire des familles d'une essence, a établi un procédé cohérent du traitement des observations par la structure d'arborescences et a réalisé un logiciel de comptabilité. Il a aussi collaboré à la mise sur pied de méthodes en mesurage, cubage, échantillonnage, sondage, contrôle de la qualité et modélisation, se spécialisant dans les modèles non linéarisables et leurs mesures. Depuis août 1999, il continue ce travail à la Direction de l'assistance technique. (Suite en C4 ⇒)

Depuis de nombreuses années, chacun des Mémoires et des autres rapports publiés par la Recherche forestière est révisé par un comité *ad hoc* d'au moins trois membres recrutés aussi bien à l'intérieur du Ministère que dans le milieu universitaire, la fonction publique du Canada ou les autres milieux de la recherche. Les responsables de la Recherche forestière remercient les scientifiques qui ont accepté bénévolement de revoir le texte présenté ici et de participer ainsi à la diffusion des résultats des recherches menées au Ministère des Ressources naturelles.

Les publications de la Recherche forestière sont produites et diffusées à même les budgets de recherche et de développement, comme autant d'étapes essentielles à la réalisation de chaque projet ou expérience. En conséquence, ces documents sont, par définition, à **tirage limité** et à **diffusion restreinte**.

Adresser toute demande à :

Publications
Direction de la recherche forestière
Forêt Québec, MRN
2700, rue Einstein
SAINTE-FOY (Québec) G1P 3W8 Canada
Courriel : rech.for@mrn.gouv.qc.ca

***RADARSAT RSO* et la mise à jour des cartes forestières**

***RADARSAT RSO* et la mise à jour des cartes forestières**

par

Sebastian MATEJEK, ing.f., M.Sc.¹,
Gilles DÉSAULNIERS, Ph.D.¹,
Mario HINSE, M.Sc.²,
Jean-Pierre LÉTOURNEAU, ing.f.³

et

Pierre LAFRAMBOISE, géogr., M.Sc.Env.³

Mémoire de recherche forestière n° 137

Gouvernement du Québec
Ministère des Ressources naturelles
Forêt Québec
Direction de la recherche forestière
2000

¹ Direction de la recherche forestière.

² Direction des relevés techniques.

³ Direction des inventaires forestiers.

Ce texte est un rapport partiel du projet de recherche n° 0901 3080 :
« Étude des possibilités des capteurs *TM*, *HRV*, *RSO* et *QB* satellites pour la cartographie forestière ».

2000-3059

ISBN 2-550-35819-8

Dépôt légal 2000

Bibliothèque nationale du Québec

Bibliothèque nationale du Canada

© 2000 Gouvernement du Québec

Remerciements

Nous exprimons notre reconnaissance à toutes les personnes de différents organismes qui ont collaboré à ce projet, en particulier à l'Agence spatiale canadienne (ASC) pour les démarches nécessaires à l'acquisition des images numériques de *RADARSAT*. Nous remercions aussi le personnel de la section de biométrie de la Direction de la recherche forestière, en particulier M. Louis Blais, statisticien, pour ses efforts dans l'analyse statistique des données.

Nous sommes tout aussi reconnaissants envers les membres du comité de lecture : MM. Jacques Bélanger, *Ph.D.*, Claude Duguay, *Ph.D.*, et Patrice Tardif, *M.Sc.*, dont les commentaires et les suggestions ont grandement contribué à améliorer la version finale de ce document.

Nos remerciements s'adressent également à M. Fabien Caron, pour la révision et l'édition de ce mémoire.

Résumé

La mise à jour des cartes forestières consiste à cartographier les différentes perturbations qui affectent le territoire forestier du Québec. Elle constitue une tâche considérable dans la comptabilité de cette ressource. De plus, elle doit être effectuée chaque année par la Direction des inventaires forestiers (DIF) de Forêt Québec, ministère des Ressources naturelles (MRN). Cette cartographie, qui repose sur la photo-interprétation et sur les levés du terrain, est un processus long et coûteux. La recherche d'outils plus économiques et mieux adaptés à cette activité devient donc un objectif important pour le MRN. L'utilisation des images optiques *Landsat TM* et *Spot HRV* se trouve souvent restreinte en forêt boréale par la présence régulière de nuages. Par contre, les images radar, exemptes de cette contrainte, représentent une solution de remplacement car elles peuvent être prises sous diverses conditions d'illumination. Nous avons analysé les images de *RADARSAT RSO*, *Landsat TM* et *Spot HRV* ainsi que les photographies aériennes d'une forêt de l'Abitibi dans le nord-ouest du Québec. Ainsi, nous avons évalué les possibilités de délimiter et d'estimer la superficie des coupes forestières au moyen des images *RADARSAT RSO* ainsi que les avantages offerts par ces images en comparaison des images optiques et des photographies aériennes conventionnelles. La correction géométrique des images radar et optiques à l'aide d'un modèle numérique d'élévation (MNE), de même que l'accentuation du contraste ont précédé l'interprétation visuelle et la classification des images radar et optiques. Les superficies et les contours de coupes extraits des images satellites ont été comparés à la carte forestière et aux photographies aériennes conventionnelles du MRN afin d'évaluer la précision d'estimation des superfi-

cies et celle du traçage des contours de coupes pour chaque série de données. Ainsi, nous avons obtenu sur l'image *RSO* des coupes récentes, une *précision* moyenne d'estimation de superficie de 97,3 %. Celle des images *TM* et *HRV* atteint respectivement 97,1 % et 96,3 %. Quant à la concordance des polygones exprimée par la somme de l'*Excès* moyen et du *Manque* moyen de recouvrement, elle s'établit à 3,68 ha pour *RSO*, 4,65 ha pour *TM* et 3,41 ha pour *HRV*. Enfin, le *vecteur (valeur absolue)* moyen de déplacement des polygones est faible à 11,7 m pour *RSO*, 17,0 m pour *TM* et 12,5 m pour *HRV*. L'analyse de la variance suivie du test de Scheffé indique que l'utilité de l'image *RSO* pour une discrimination des coupes est égale à celle de l'image *HRV*. Cependant, les résultats démontrent qu'une seule image (5 avril), parmi les six images *RADARSAT RSO* analysées, permet de détecter des coupes récentes, mais aussi des coupes de quelques années avec une précision satisfaisante en forêt boréale. La qualité de l'enregistrement d'images *RADARSAT RSO* dépend des paramètres du milieu. Ainsi, la pluie tombée quelques heures avant le passage du satellite, une température oscillant autour du point de congélation et une couche de neige d'un mètre semblent constituer des conditions idéales qui assurent une très bonne détection des coupes. Une procédure rigoureuse de l'acquisition de données qui prendrait en compte les conditions environnementales et qui mettrait en place un système autant de commande que de prix, constitue une approche essentielle à leur utilisation opérationnelle. De plus, ce processus permettrait aux usagers d'inspecter les images avant l'achat et de ne payer que pour les images acquises sous de bonnes conditions.

Mots-clefs : *RADARSAT*, cartographie, forêt, coupe.

Abstract

RADARSAT SAR and the updating of forest maps. In Québec, forest maps are updated on an annual basis using conventional methods : photo-interpretation and field surveys. It is a fairly long and costly process carried out by the Direction des inventaires forestiers (DIF), Forêt Québec, Ministère des Ressources naturelles (MRN). There is a clear interest in finding more economical and better ways of doing this work. Use of Landsat TM and Spot HRV is restricted by cloudiness. RADARSAT SAR images are taken under various illumination conditions, independently of cloud cover. Six RADARSAT SAR images were obtained in 1997 for the project. RADARSAT SAR images were compared with Landsat TM, Spot HRV, and aerial photographs over a forested area in Abitibi, Québec. Geometric correction (with a DEM) and contrast stretch on radar and optical images were carried out prior to visual interpretation and classification. Results were compared to current DIF map updating standards. On the SAR image of April the 5th, we obtained an average precision of 97.3 % for the area estimate of recent cuts. With the TM and HRV images, the average precision is respectively 97.1 % and 96.3 %. As for the overlap of polygons expressed by the sum of Excess (Excès) means and Lack (Manque) means, it is established at

3.68 ha for SAR, 4.65 ha for TM, and 3.41 ha for HRV. The average (absolute value) displacement of polygon is weak with 11.7 m for the SAR image, 17.0 m for TM, and 12.5 m for HRV. The variance analysis followed by the Scheffé test indicates that the precision for the discrimination of cutovers obtained with the SAR image is the same as the one obtained with the HRV image. However; the results show the capacity of only one image (April 5), among six SAR images studied, to detect annual and recent cutovers with a satisfactory precision in the boreal forest. The quality of the SAR images depends on environmental ground conditions prevailing during a satellite pass. Rainfall a few hours before the satellite overpass, a temperature oscillating around the freezing point and a 1-meter snow layer seem to be ideal conditions which ensure a very good cutover detection. Rigorous procedure in data acquisition which would consider environmental conditions and would help defining availability rules and ordering information, constitutes an essential approach for the operational use of such data. This process would allow users to verify the images prior to purchase and to pay only for the images acquired under good conditions.

Keywords : RADARSAT, cartography, forest, cutover.

Table des matières

Remerciements	v
Résumé	vii
<i>Abstract</i>	viii
Liste des tableaux	xi
Liste des figures	xiii
Introduction	1
Chapitre premier	
Cadre biophysique	5
1.1 Situation géographique et milieu physique	5
1.2 Végétation et influence humaine	5
Chapitre deux	
Matériel	7
2.1 Données de télédétection spatiale	7
2.2 Conditions d'acquisition d'images radar	7
2.3 Données auxiliaires	7
Chapitre trois	
Méthode	11
3.1 Correction géométrique : production d'ortho-images et d'ortho-photos	11
3.2 Création et accentuation d'une mosaïque d'ortho-photos	11
3.3 Accentuation et classification des images satellites	11

3.4 Interprétation des images :	
traçage des polygones	13
3.5 Évaluation quantitative	
des aires des coupes	13
3.5.1 Analyse de la précision d'estimation	
des superficies	13
3.5.2 Analyse de la précision du traçage	
des contours	15
Chapitre quatre	
Résultats	17
4.1 Correction géométrique	17
4.2 Évaluation quantitative	
des aires des coupes	17
4.2.1 Précision du calcul des superficies	17
4.2.2 Précision du traçage des contours	17
4.2.2.1 <i>Vecteur de déplacement</i>	
des contours	21
4.2.2.2 <i>Intersection des polygones</i>	21
4.2.3 Analyse de variance	24
Chapitre cinq	
Discussion	27
Conclusion	29
Références	31
Annexe A	
Relief de la zone d'étude	35
Annexe B	
Carte forestière (feuille 32E02 NE)	39
Annexe C	
Mosaïque de 24 ortho-photos	43
Annexe D	
Carte de référence (répartition	
des 53 coupes sélectionnées)	47
Annexe E	
Ortho-images radar et optiques	51
Annexe F	
Statistiques descriptives	
pour les 17 coupes récentes	61
Annexe G	
Intersection des polygones	65

Liste des tableaux

Tableau 1. Description des données de télédétection spatiale	8
Tableau 2. Statistiques descriptives : estimation des superficies de 53 coupes	18
Tableau 3. Statistiques descriptives : estimation du déplacement de 53 contours	20
Tableau 4. Test de comparaison multiple des moyennes	25
Tableau 5. Statistiques descriptives : estimation des superficies de 17 coupes (en annexe)	63
Tableau 6. Statistiques descriptives : estimation du déplacement de 17 contours (en annexe)	64

Liste des figures

Figure 1.	Localisation de la zone d'étude	9
Figure 2.	Comparaisons des images spatiales et des photographies aériennes	10
Figure 3.	Conditions climatiques lors des survols (5 et 29 avril de 1997) par RADARSAT	10
Figure 4.	Conditions climatiques lors des survols (5 et 12 mars de 1997) par RADARSAT	12
Figure 5.	Schéma de la méthode	14
Figure 6.	Mesure de déplacement des contours de coupes : a) par l'analyse vectorielle, b) par la théorie des ensembles	14
Figure 7.	<i>Précision, Intersection, Manque et Excès</i> de recouvrement en relation avec la superficie de la coupe sur la <i>carte de référence</i>	19
Figure 8.	Superficie de la coupe sur la <i>carte de référence</i> en fonction de la <i>superficie</i> de la coupe sur les images	19
Figure 9.	Histogrammes des fréquences du <i>vecteur (algébrique)</i>	22
Figure 10.	Histogrammes des fréquences du <i>vecteur (valeur absolue)</i>	22
Figure 11.	Histogrammes des fréquences de la <i>Différence (Excès - Manque)</i>	23
Figure 12.	Histogrammes des fréquences de la <i>Somme (Excès + Manque)</i>	23
Figure 13.	Comparaison des trois variables soumises à l'analyse de la variance	24

(Annexes)			
Figure 14. Relief de la zone d'étude	37	Figure 25. Image <i>Spot HRV</i> du 20 juillet 1996 classifiée (HRV_c)	60
Figure 15. Carte forestière (feuille 32E02 NE)	41	Figure 26. <i>Excès et Manque</i> , cas de l'image <i>RADARSAT RSO</i> du 5 avril 1997 (RSO1)	67
Figure 16. Mosaïque de 24 ortho-photos en noir et blanc de 1996	45	Figure 27. <i>Excès et Manque</i> , cas de l'image <i>Landsat TM</i> du 25 août 1993 et du 10 juillet 1997 (TM)	68
Figure 17. Carte de référence (répartition des 53 coupes sélectionnées pour l'analyse quantitative)	49	Figure 28. <i>Excès et Manque</i> , cas de l'image <i>RADARSAT RSO</i> du 12 mars 1997 (RSO2)	69
Figure 18. Image <i>RADARSAT RSO</i> du 5 avril 1997 (RSO1)	53	Figure 29. <i>Excès et Manque</i> , cas de l'image <i>RADARSAT RSO</i> du 5 mars 1997 (RSO3)	70
Figure 19. Image <i>Landsat TM</i> du 25 août 1993 (TM1)	54	Figure 30. <i>Excès et Manque</i> , cas de l'image <i>Spot HRV</i> du 20 juillet 1996 (HRV)	71
Figure 20. Image <i>Landsat TM</i> du 10 juillet 1997 (TM2)	55	Figure 31. <i>Excès et Manque</i> , cas de l'image <i>RADARSAT RSO</i> du 05 avril 1997 (RSO1_c)	72
Figure 21. Image <i>RADARSAT RSO</i> du 12 mars 1997 (RSO2)	56	Figure 32. <i>Excès et Manque</i> , cas de l'image <i>Spot HRV</i> du 20 juillet 1996 (HRV_c)	73
Figure 22. Image <i>RADARSAT RSO</i> du 5 mars 1997 (RSO3)	57		
Figure 23. Image <i>Spot HRV</i> du 20 juillet 1996 (HRV)	58		
Figure 24. Image <i>RADARSAT RSO</i> du 5 avril 1997 classifiée (RSO1_c)	59		

Introduction

La Direction des inventaires forestiers (DIF) du ministère des Ressources naturelles (MRN) a le mandat de cartographier le territoire forestier du Québec à l'échelle 1 : 20 000. Depuis 1991, elle poursuit le troisième programme de connaissance de la ressource forestière et rajuste chaque année cette banque de données. La confection de la carte, tout comme sa mise à jour annuelle qui consiste à cartographier les différentes perturbations qui affectent le territoire forestier : *coupes totales, coupes partielles, brûlis, chablis, épidémies, voies d'accès, lignes de transport d'énergie, etc.* (BARD *et al.* 1984, TREMBLAY 1993), est basée sur les photographies aériennes en noir et blanc au 1 : 15 000 et sur le rapport annuel des interventions forestières dans les territoires des contrats d'aménagement et d'approvisionnement forestier (CAAF). Environ 1 000 cartes sont ainsi ajustées chaque année. Étant donné le vaste territoire à couvrir par la prise de vues aériennes et l'accès difficile de certains sites, l'inventaire selon les méthodes traditionnelles (photo-interprétation et levés sur le terrain) est long et coûteux (700 000 \$ par an pour la prise de photographies aériennes). La recherche d'outils plus économiques et mieux adaptés à cette activité devient donc un défi pour le MRN.

L'utilisation des images optiques *Landsat TM* et *Spot HRV* se trouve souvent restreinte en forêt boréale par la présence régulière de nuages (LAFRAMBOISE et LÉTOURNEAU 1995). Par contre, les images *du radar à synthèse d'ouverture (RSO)*, exemptes de cette contrainte, représentent une solution de remplacement car elles peuvent être prises sous diverses conditions d'illumination.

Les intervenants de la DIF s'intéressent aux images radar comme outil potentiel de remplacement de la photographie aérienne pour actualiser leurs cartes à la suite des interventions en forêt. Un projet (COULOMBE et HINSE 1994) a été réalisé en Gaspésie dans le programme de développement des données

radar (PDDR). Ce projet, ainsi que de nombreuses autres études sur la capacité du *RSO-bande-C* aéroporté à détecter les interventions en forêt boréale ou tempérée effectuées au cours des dernières années, apportent un nouvel éclairage sur les nombreux facteurs qui influencent la qualité des images radar. Les résultats qui y sont présentés montrent de fréquentes contradictions. À titre d'exemple, on mentionne que des confusions considérables apparaissent entre les coupes et d'autres terrains, autant forestiers improductifs – dénudé sec ou humide et aulnaie – que non forestiers – rivières, lacs, lignes de transport d'énergie, terrains agricoles et autres (CHURCHILL et KEECH 1984, DRIEMAN *et al.* 1989a, LACKIE 1990, AHERN *et al.* 1993). La présence de la végétation dans les zones de coupe contribue à cette confusion (LECKIE 1983, MOULTON et PEDDLE 1989, AHERN *et al.* 1993). La détection et le traçage du contour des coupes récentes avec peu de végétation (régénération) sont facilités.

La capacité du satellite *RSO-bande-C* à détecter les coupes est elle aussi peu claire. Les nombreuses études des données d'*ERS-1*, l'un des prédécesseurs du *RADARSAT*, relatent des résultats divergents (LETOAN 1992, BROWN *et al.* 1992, WAY *et al.* 1992, DOBSON 1992). AHERN et RANEY (1993), puis COULOMBE et HINSE (1994), concluent que *ERS-1* présente un faible intérêt pour la détection des coupes.

Sur les images radar, le contraste entre les coupes et la forêt mûre dépend de l'impact des phénomènes météorologiques sur la cible : sol humide ou sec, végétation humide ou sèche, sol sous couvert de neige sèche ou de neige humide, etc. (WAY *et al.* 1990, DOBSON *et al.* 1991, YATABE et LECKIE 1991, AHERN *et al.* 1993, KASISCHKE *et al.* 1994, LECKIE et YATABE 1994, RIGNOT *et al.* 1994). Ainsi, autant DRIEMAN *et al.* (1989b) qu'AHERN *et al.* (1993) rapportent une meilleure discrimination des coupes sur les images captées en hiver (présence de neige au sol) que sur celles prises en d'autres saisons. Cependant, COULOMBE et HINSE (1994) signalent que les conditions de neige au sol, lors de l'acquisition des images radar, affectent considérablement leur qualité. LECKIE (1993) suggère l'utilisation successive d'images captées en hiver afin d'obtenir une meilleure discrimination entre les anciennes coupes et les aires récemment exploitées de même que les terrains non forestiers comme les champs, lacs, marais et autres. L'examen de ces travaux montre que l'utilisation d'images d'hiver captées à diverses dates constitue l'approche la plus appropriée pour cartographier les coupes à partir de données radar. Cependant, JANO (1990) mentionne

les difficultés de cartographier les zones de coupes récentes où les déchets sont encore présents ou quand la neige et la terre ont été retournées par la machinerie.

Quant à la détection des brûlis, il semble que leur âge joue un rôle important. Selon KNEPPECK et AHERN (1989), même si les anciens brûlis sont facilement identifiables sur les images d'une résolution de 6 m du *RSO-bande-C* aéroporté, une étude plus récente (WERLE *et al.* 1991) montre que les brûlis sont presque invisibles sur des images prises une semaine après le passage du feu. Cependant, une étude subséquente sur les mêmes territoires indique que les brûlis peuvent être détectés et cartographiés au moyen d'images acquises un an après le feu (LANDRY *et al.* 1995).

Des études antérieures, qui portaient sur l'évaluation de l'état de la régénération forestière à partir des données du radar aéroporté, montrent des résultats très médiocres de l'utilisation de ce genre de données dans ce domaine d'application. Ainsi, KNEPPECK et AHERN (1989) concluent que l'évaluation de différentes classes de régénération s'avère difficile principalement en raison de la présence de végétation compétitive (arbustes, herbes), des déchets de coupes, du sol nu et des effets de pente. LECKIE (1983) rapporte qu'on ne peut tirer des images du *RSO-bande-C* que de l'information générale sur la régénération ; il est impossible de différencier les essences désirables des indésirables.

La précision de la cartographie des zones de coupes et les sources d'erreurs ont été étudiées, entre autres par AHERN et DRIEMAN (1988) dans une forêt boréale au centre de l'Alberta. Les résultats indiquent que les données obtenues par *RSO-bande-C* aéroporté d'une résolution de 6 m ne répondent pas aux exigences de la plupart des provinces du Canada en matière de précision des inventaires forestiers. Plusieurs sources d'erreurs, qui rendent difficile la localisation des limites de coupe, sont signalées, erreurs liées notamment aux déformations géométriques subtiles des images. Il serait possible de réduire ces erreurs en utilisant des données provenant de dates multiples et des directions de visée multiples et en améliorant l'intégrité géométrique des données *RSO* par l'utilisation des modèles numériques de terrain (MNE). De plus, la résolution spatiale optimale des images radar utilisées pour détecter les interventions en forêt devrait être d'au moins 25 m ; les données devraient être prises avec un angle d'incidence supérieur à 35° (ROSSIGNOL et AHERN 1992, AHERN et RANEY 1993).

À l'examen des travaux antérieurs, on constate que les chercheurs ont eu recours à diverses méthodes d'analyse qui passent par l'interprétation visuelle, l'analyse densimétrique de films-images, la visualisation par l'ajout de fausses couleurs et l'analyse numérique des photographies (numérisées) et des données du *RSO*. Certains chercheurs canadiens ont fréquemment utilisé, avec les données du *RSO-bande-C*, des méthodes sophistiquées d'analyse comprenant des prétraitements qui améliorent la qualité des images numériques. Les corrections radiométriques et géométriques ainsi que l'accentuation du contraste précédaient l'analyse visuelle rigoureuse des images. On constate que cette accentuation des images améliore grandement les résultats de l'analyse. L'extraction d'information sur les textures s'est avérée fort utile, car la seule analyse des intensités de gris ne donnait pas de résultats fiables lors de l'interprétation. Il y a aussi perte d'information sur les textures lorsqu'on réduit la résolution ou qu'on utilise exclusivement un programme de classification par pixel.

Les études menées jusqu'à présent sur le potentiel des données du satellite *RADARSAT RSO* (BANNER et AHERN 1995, LECKIE 1997, AHERN *et al.* 97) semblent présager que ce dernier n'apportera probablement pas d'amélioration significative dans le domaine de la télédétection par radar.

Afin de mieux connaître la capacité du *RADARSAT RSO* à télédétection différents milieux, l'Agence spatiale canadienne (ASC) lançait en 1995 un Programme de recherche et de développement des possibilités

des applications (ADRO) dans lequel s'intègre le présent projet (ADRO, projet 233). L'objectif principal poursuivi par ce projet est d'évaluer le potentiel des images *RADARSAT RSO* pour la mise à jour annuelle de l'information cartographique sur les interventions en milieu forestier. Ses objectifs spécifiques sont les suivants :

- 1) évaluer le potentiel des images radar à détecter les interventions en forêt ;
- 2) déterminer les conditions climatiques propices à l'acquisition d'images de qualité ;
- 3) évaluer la précision d'estimation des coupes en comparant les images radar aux images optiques (*Landsat TM* et *Spot HRV*) et par rapport aux normes cartographiques de la DIF.

Ce document fait état des possibilités offertes par *RADARSAT RSO* pour la détection et la cartographie à l'échelle 1 : 20 000 des interventions en milieu forestier. Les corrections géométriques au moyen des MNE, ainsi que l'accentuation du contraste ont précédé l'analyse visuelle et la classification autant des images satellites (*RADARSAT RSO*, *Landsat TM* et *Spot HRV*) que des photographies aériennes en noir et blanc au 1 : 15 000. En outre, les résultats d'interprétation de ces documents ont fait l'objet d'une étude comparative.

Chapitre premier

Cadre biophysique

1.1 Situation géographique et milieu physique

La zone d'étude, qui correspond à la carte forestière 32E02 NE, est située en Abitibi, entre 49°07'30" et 49°15'00" de latitude nord et entre 78°30'00" et 78°45'00" de longitude ouest (figure 1). Cette zone de faible relief (Annexe A), dont l'altitude varie de 280 à 550 m, fait partie de l'unité de gestion de Lac-Abitibi (85) du MRN. L'ensemble du territoire se caractérise par un climat continental froid ; les conditions climatiques de la localité de Joutel, qui est située à environ 20 km de la zone d'étude, peuvent être considérées comme représentatives.

1.2 Végétation et influence humaine

Selon la *Carte des régions écologiques du Québec méridional* de THIBAULT (1985), le territoire étudié fait partie de la région écologique de l'Abitibi (12a), correspondant au domaine de la pessière noire à mousse. Ce territoire facilement accessible est surtout dominé par les essences résineuses (épinette noire, pin gris, sapin baumier), avec une présence de feuillus (peuplier faux-tremble et bouleau blanc). Les peuplements résineux présentent des indices d'une énorme perturbation causée par les activités forestières, comme par exemple les coupes totales (ct), les coupes totales avec protection de la régénération (cpr), les plantations (p) et autres. Il s'agit ici d'une forêt du domaine public.

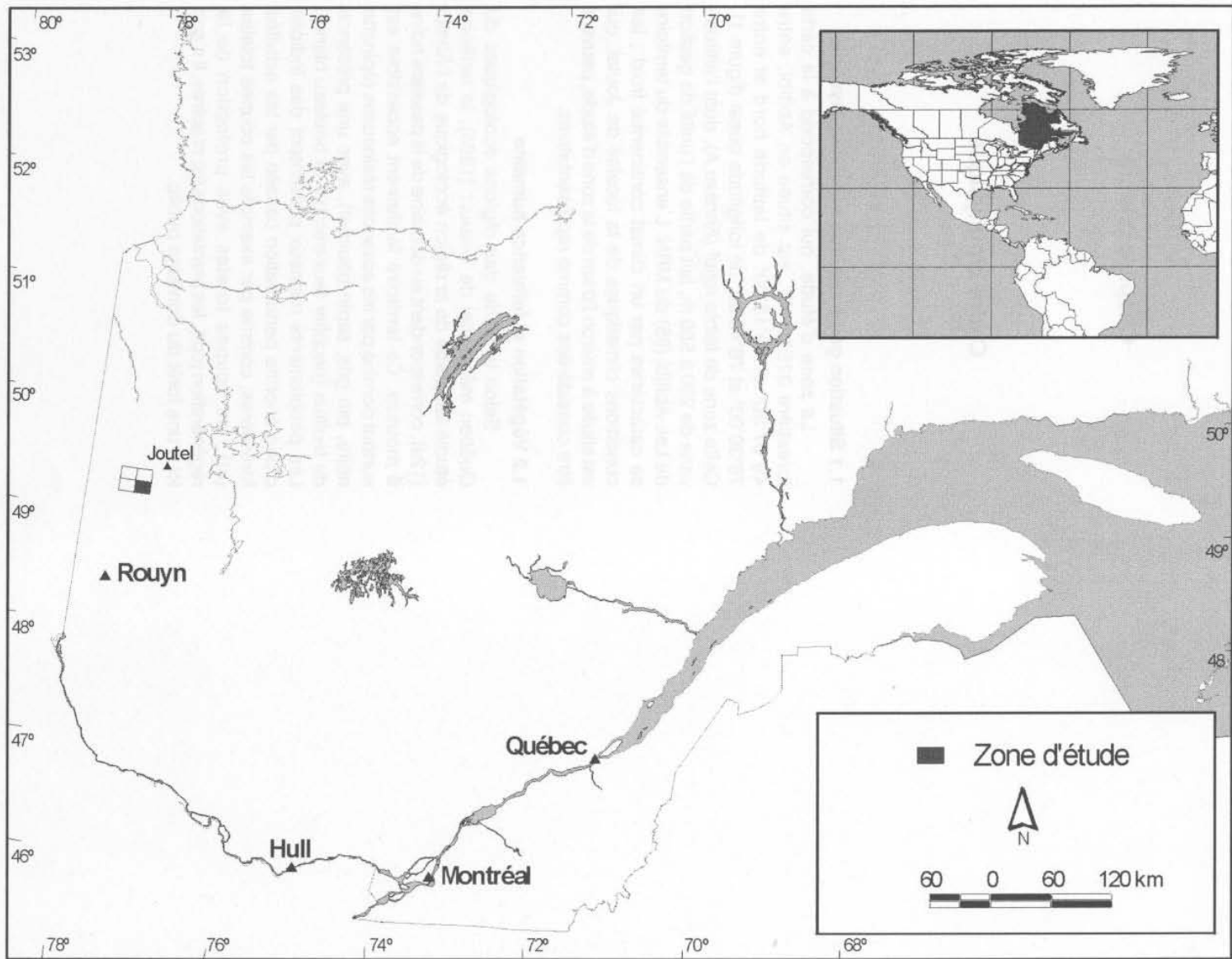


Figure 1. Localisation de la zone d'étude.

Chapitre deux

Matériel

2.1 Données de télédétection spatiale

Parmi six images *RADARSAT RSO* (figure 2 et Annexe E) acquises durant l'hiver 1997, nous avons retenu seulement trois images pour une analyse détaillée ; les trois autres ont été rejetées car elles fournissaient peu d'information. Ainsi, nous avons sélectionné deux images F4 (résolution fine) et une image S7 (résolution standard) montrant un certain potentiel pour la discrimination des coupes. Les images radar ont été comparées à trois images optiques, deux provenant du satellite *Landsat TM* et une du satellite *Spot HRV* (figure 2 et Annexe E). Les paramètres de chacune de ces images sont présentés au tableau 1.

2.2 Conditions d'acquisition d'images radar

Selon le sommaire climatique (figure 3) du mois d'avril à la station de Joutel proche de la zone d'étude, au moment de la saisie des données à 23 h 12 le 5 avril 1997, le sol était totalement couvert par environ un mètre de neige. Quelques heures avant le survol, une chute de pluie de 17,2 mm a été enregistrée, avec une variation de température de - 5,5° à 6,5 °C.

En ce qui concerne les survols du 5 mars et du 12 mars 1997 (figure 4), on rapporte une couverture de neige de 102 et de 111 cm respectivement, couverture comparable à celle du 5 avril. Par contre, aucune précipitation n'a été enregistrée, ni la veille ni au moment de ces survols. De plus, le temps était beaucoup plus froid ces deux jours : de - 20 °C à - 7 °C et de - 26,5 °C à - 14,5 °C.

Ce contexte climatique est très important pour l'acquisition et l'interprétation des images radar, car la réponse du signal radar est fortement dépendante des conditions d'humidité et de l'épaisseur de neige au sol (HINSE et COULOMBE 1994, LECKIE 1997, AHERN *et al.* 1997).

2.3 Données auxiliaires

Les documents utilisés pour valider les traitements numériques des images satellites sont les suivants :

- carte forestière au 1 : 20 000 (feuille 32E02 NE) établie à partir de photographies aériennes (1 : 15 000) en noir et blanc, prises en 1984 et mises à jour chaque année, dont la dernière en avril 1995 (Annexe B) ;
- 24 photographies aériennes (1 : 15 000) en noir et blanc de 1997, utilisées pour la production de la mosaïque des ortho-photos (Annexe C) ;
- photographies aériennes (1 : 15 000) en noir et blanc de 1995, de 1994 et de 1993, utilisées pour l'actualisation de la carte forestière ;
- photographies aériennes (1 : 15 000) infrarouge en couleurs de 1992 ;
- carte topographique au 1 : 20 000 (feuille 32E02 NE) numérisée (projection Mercator transverse modifiée [MTM], NAD 1983).

Les données ont été complétées par des observations réalisées sur le terrain durant les années 1996 et 1997.

Tableau 1. Description des données de télédétection spatiale

Para. Image	Date d'acquisition	Angle d'inci- dence (deg.)	Mode	Polari- sation	Bande	Résolution		Conditions d'acquisition					Note (1)	
						initiale (mxm)	géo- codée (mxm)	temp. (°C)	précipitations		neige au sol (cm)	vent(8 h 00)		
									pluie (mm)	neige (cm)		dir.		vit. (km/h)
radar														
<i>RADARSAT RSO</i>		(Ascendant)												
RSO4	1997-02-16	43-46	F4	HH	C	10x10	10x10	-42 à -19	0	0	89	0	0	C
RSO3	1997-03-05	45-49	S7	HH	C	25x25	25x25	-20 à -7	0	0	102	NNW	5	B
RSO2	1997-03-12	43-46	F4	HH	C	10x10	10x10	-27 à -15	0	0	111	NW	16	B
RSO1	1997-04-05	43-46	F4	HH	C	10x10	10x10	-5 à 7	17,2	0	96	S	4	A
RSO5	1997-04-29	43-46	F4	HH	C	10x10	10x10	-2 à 14	0	0,2	10	S	3	C
RSO6	1997-05-23	43-46	F4	HH	C	10x10	10x10	-	-	-	-	-	-	C
optiques														
<i>Landsat TM</i>														
TM1	1993-08-25					3-4-5	30x30	25x25						A*
TM2	1997-07-10					3-4-5	30x30	25x25	présence des nuages					A*
<i>Spot HRV</i>														
HRV	1996-07-20					XP	10x10	10x10						A
(1) A - Identification facile des coupes ; image retenue pour une évaluation détaillée. B - Identification difficile des coupes ; image retenue pour une évaluation détaillée. C - Identification très difficile des coupes, voire impossible ; image rejetée. A* - Identification facile des coupes ; Interprétation combinée de deux images TM1 et TM2 dans le but de contourner le problème des nuages qui affectent l'image TM2 ; création d'une image TM.														

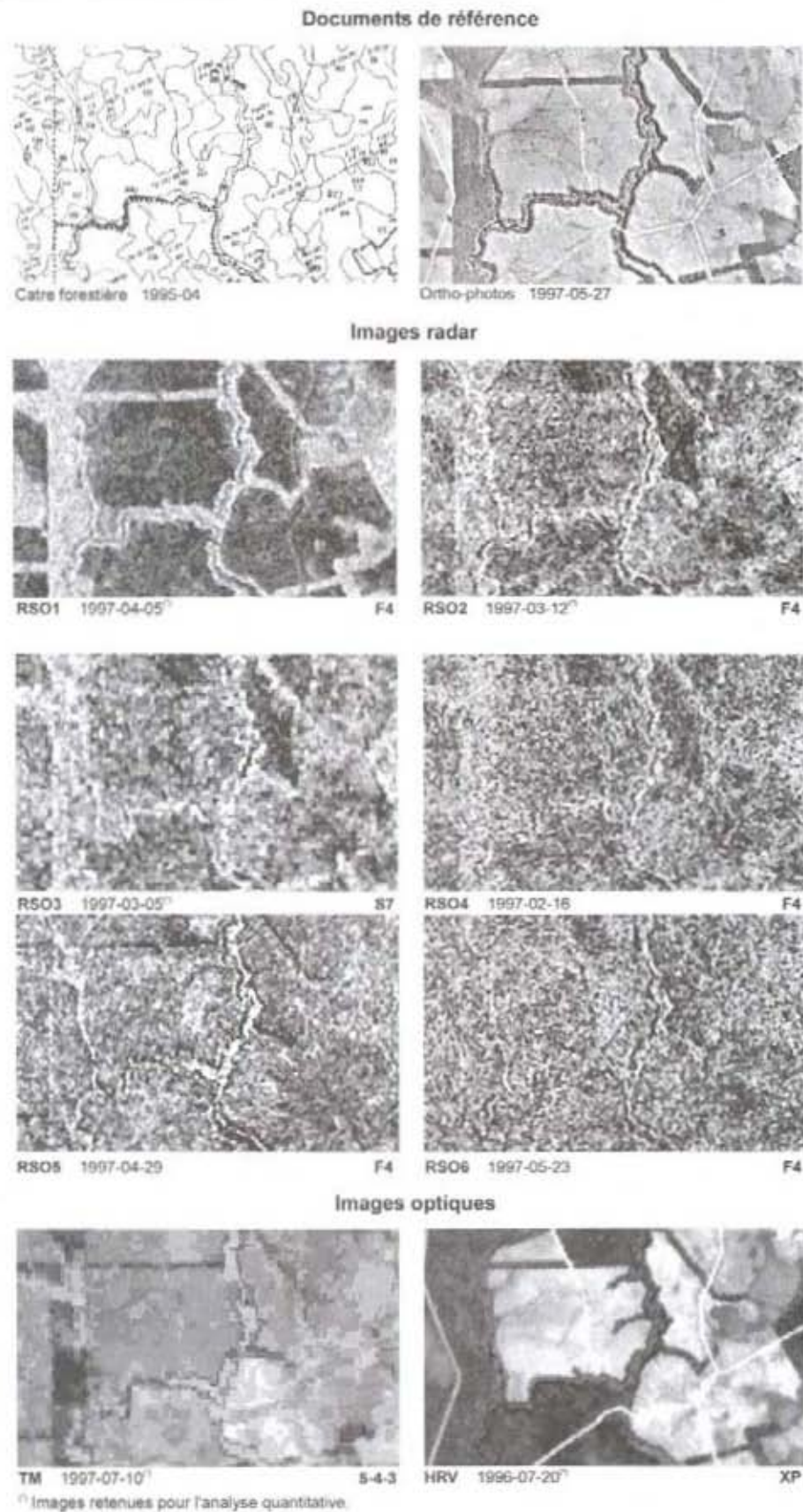


Figure 2. Comparaisons des images spatiales et des photographies aériennes (en bas à gauche, original en couleurs).

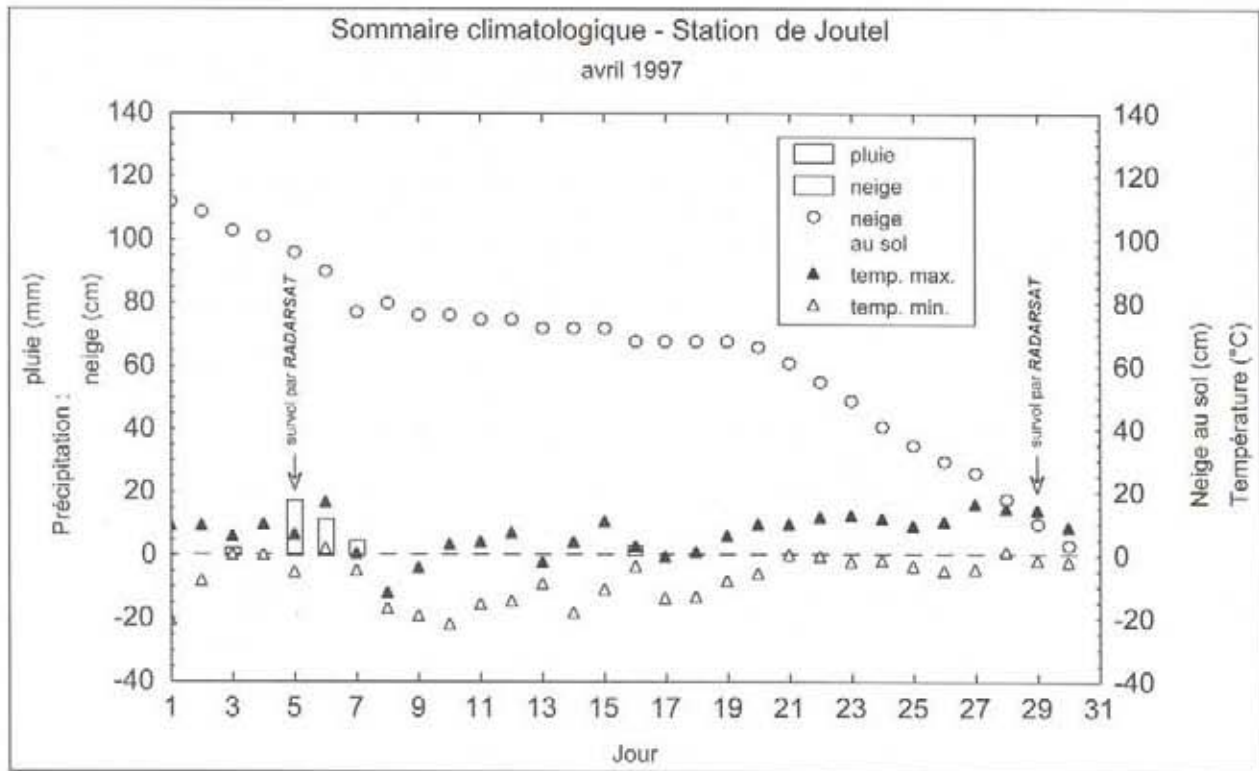


Figure 3. Conditions climatiques lors des survols (5 et 29 avril de 1997) par RADARSAT.

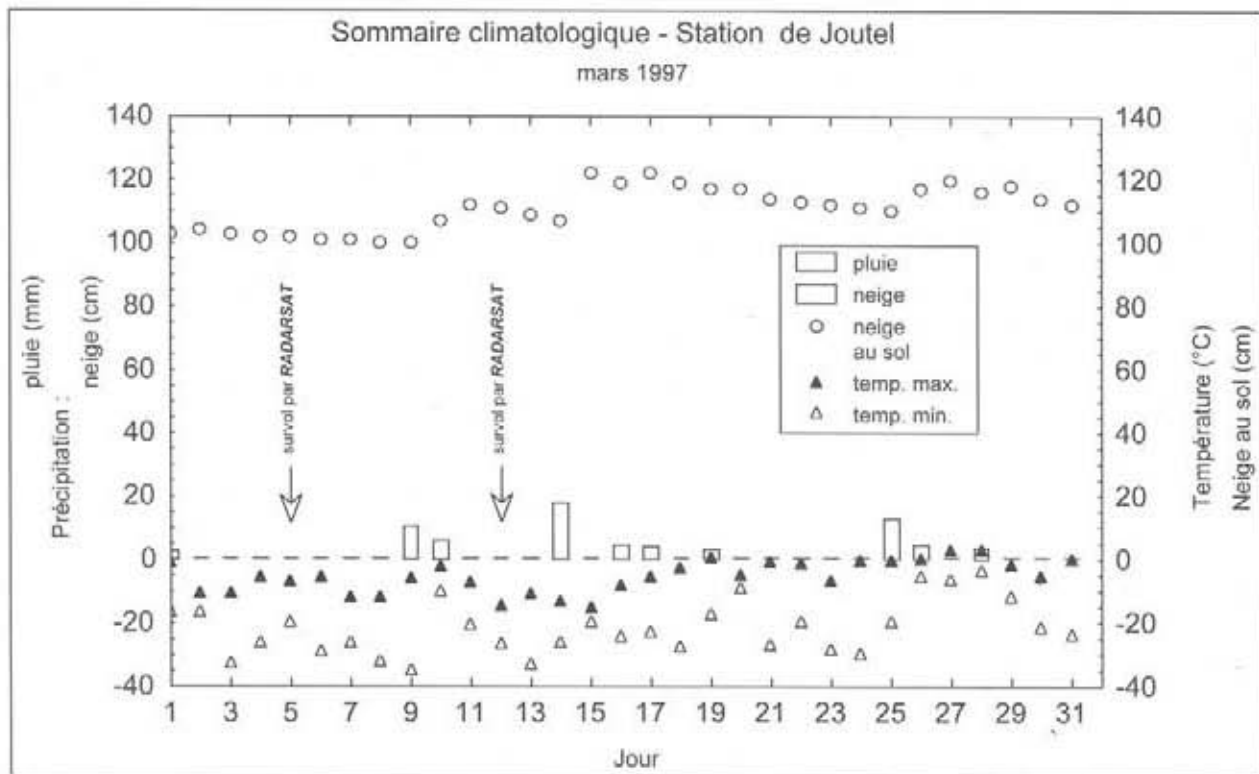


Figure 4. Conditions climatiques lors des survols (5 et 12 mars de 1997) par RADARSAT.

Chapitre trois

Méthode

L'approche utilisée, dont les cinq grandes étapes apparaissent à la figure 5, se résume aux travaux suivants : 1) correction géométrique des images radar, des images optiques et des photographies aériennes de 1997 et la production d'ortho-images et d'ortho-photos à l'aide d'un modèle numérique d'élévation, 2) création et l'accentuation d'une mosaïque d'ortho-photos 3) accentuation et classification des images satellites, 4) interprétation des images et des photographies (traçage des polygones) et 5) évaluation quantitative des aires de coupe.

3.1 Correction géométrique : production d'ortho-images et d'ortho-photos

Une attention particulière a été portée à la correction géométrique des images (radar et optiques) et des photographies aériennes afin d'atteindre une précision optimale dans la discrimination des aires de coupe et d'assurer l'intégration des résultats d'interprétation de ces données au système d'information éco-forestière (SIEF). L'application rigoureuse de la correction géométrique est essentielle à l'évaluation des données *RADARSAT RSO* en raison de la topographie du secteur d'étude et de la comparaison des images radar avec les images optiques (*Landsat TM* et *Spot HRV*) et avec les photographies aériennes. Ainsi, en utilisant le logiciel *SRIT* (TOUTIN 1985, TOUTIN et CARBONNEAU 1989, TOUTIN *et al.* 1992), implanté sur le système EASI/PACE de *PCI*, nous avons corrigé six images : RSO1, TM1, TM2, RSO2, RSO3 et HRV et 24 photographies aériennes (1 : 15 000) en noir et blanc de 1997. Ce logiciel permet de rectifier géométriquement des images de télédétection de sources diverses, à l'aide d'un modèle mathématique rigoureux. Le modèle numérique d'élévation (MNE) et des points d'appui, utilisés dans cette correction, ont été extraits de la carte topographique numérique au 1 : 20 000 (feuille 32E02 NE) (projection Mercator transverse modifiée [*MTM*], NAD 1983).

3.2 Création et accentuation d'une mosaïque d'ortho-photos

Pour faciliter leur manipulation et leur interprétation, nous avons regroupées les 24 ortho-photos en un seul tenant pour former une mosaïque (Annexe C). Les données de la mosaïque ont été ensuite étalées pour accentuer les contrastes entre la forêt et les coupes.

3.3 Accentuation et classification des images satellites

Afin de réduire le chatouement inhérent aux images *RADARSAT RSO* (codées à l'origine en 16 bits), nous les avons filtrées (filtre Gamma 5 x 5), puis converties en 8 bits et ensuite étalées sur 256 niveaux de gris. Dans le cas des images *Landsat TM*, des composés colorés ont été formés des bandes spectrales 5, 4 et 3 corrigées et étalées dans l'espace chromatique Rouge, Vert et Bleu (RVB). Enfin, l'étalement de la bande panchromatique corrigée de *Spot HRV* a précédé l'interprétation de cette image. L'étalement des données numériques a servi à accentuer les contrastes entre la forêt et les coupes et donc à favoriser leur discrimination optimale.

Dans le but d'évaluer la possibilité d'extraire automatiquement les contours des coupes, nous avons classifié des images à l'aide du système EASI/PACE de *PCI*. Seuls ont été retenus les résultats de classification RSO1_c et HRV_c pour les images RSO1 et HRV respectivement (Annexe E). Les résultats des essais de classification pour d'autres images se sont révélés médiocres, en raison de la présence de nuages sur l'image TM2 (*Landsat TM* de 1997) et de la texture spécifique (moucheture) des images RSO2 et RSO3.

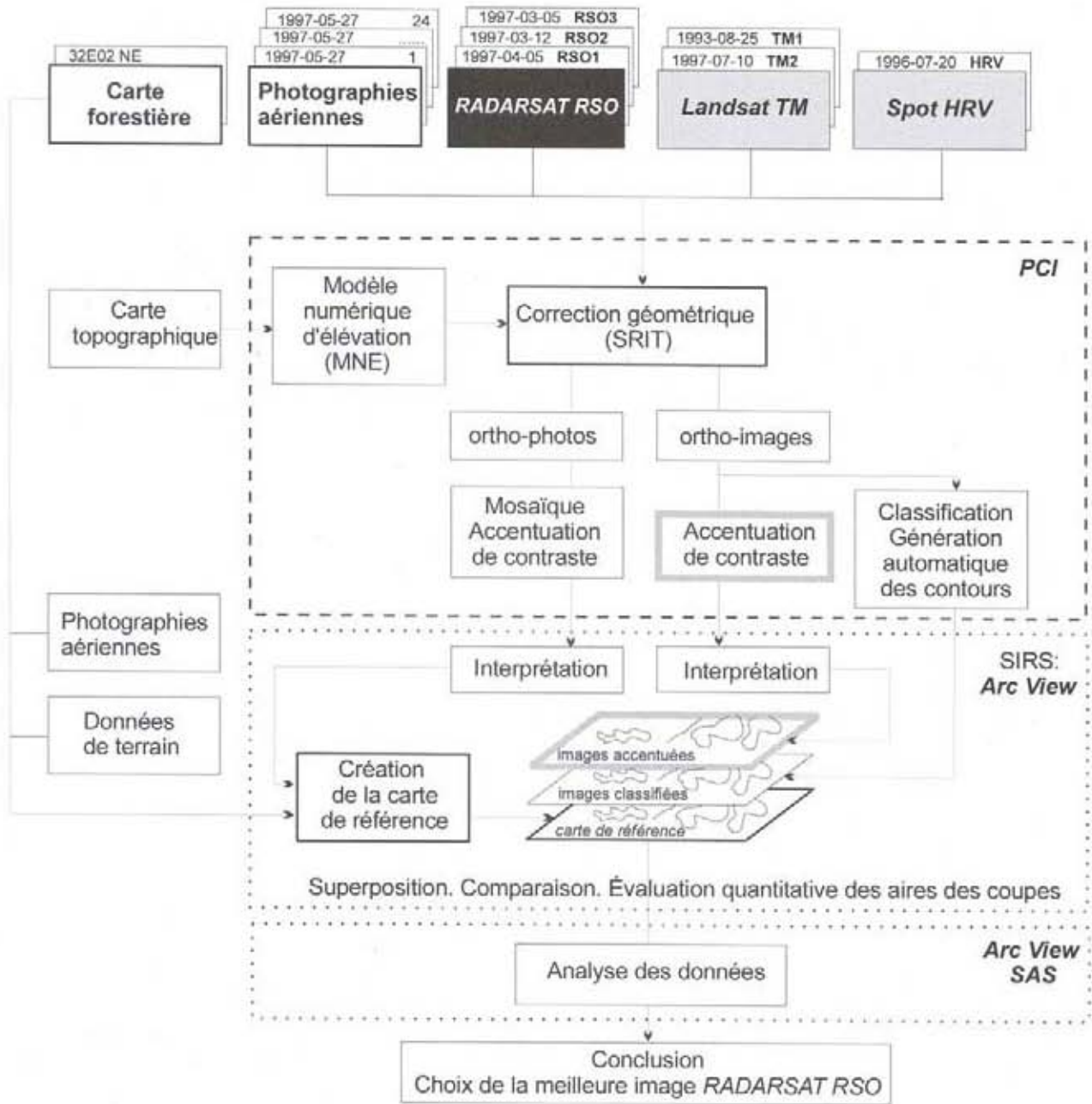


Figure 5. Schéma de la méthode.

3.4 Interprétation des images : traçage des polygones

Avant de procéder à l'interprétation des images sélectionnées pour cette étude, nous avons élaboré un document de référence. Tout d'abord à l'aide du logiciel *Descartes* sur *Micro-station*, nous avons numérisé les contours de toutes les anciennes coupes qui avaient été cartographiées par la DIF de 1992 à 1995 et qui figurent sur la carte forestière. Puis, en utilisant la mosaïque d'ortho-photos de 1997 (Annexe C), nous avons complété ce document en y ajoutant les contours de coupes récentes (1995 à 1996) pour créer la *carte de référence* (Annexe D).

Ensuite, les six images accentuées : RSO1, TM1, TM2, RSO2, RSO3 et HRV, deux images classifiées : RSO1_c et HRV_c, ainsi que la *carte de référence* ont été transférées au SIRS (*Arc View*). Une brève comparaison de la *carte de référence* avec chacune des huit images a révélé que certaines coupes n'apparaissaient pas sur l'image HRV (date d'acquisition : 1996) et sur l'image TM2 de 1997 (couverture nuageuse). Devant cette réalité et dans le but de créer une base de comparaison, nous avons procédé à une sélection des coupes communes aux huit images et à la *carte de référence*. L'évaluation quantitative a donc porté sur 53 coupes (Annexe D) : 36 coupes anciennes (9 de 1992, 15 de 1993 et 12 de 1994) et 17 coupes récentes (1996).

Une fois la base de comparaison établie, nous avons procédé à l'interprétation des images, par le traçage des contours des 53 coupes sur chacune des images retenues pour l'analyse, sauf les images classifiées RSO1_c et HRV_c où la classification était suivie d'une extraction automatique des contours.

L'interprétation combinée de deux images : TM1 et TM2, dans le but de contourner le problème des nuages et de leur ombre qui affectent l'image TM2 (*Landsat TM* de 1997), a permis la création d'une image TM.

3.5 Évaluation quantitative des aires de coupe

Tous les calculs qui ont suivi l'interprétation des images : évaluation de la superficies des coupes interprétées et réelles (*carte de référence*), estimation de l'intersection des polygones ainsi qu'évaluation de la magnitude du vecteur de déplacement des contours (périmètre), ont été réalisés en utilisant le logiciel *Arc View*.

3.5.1 Analyse de la précision d'estimation des superficies

Pour évaluer la précision d'estimation des superficies des coupes sur les différentes images, nous avons utilisé deux mesures relatives complémentaires : 1) l'erreur et 2) la précision.

Soit :

A_j : **superficie** de la coupe (j) sur la *carte de référence*

B_j : **superficie** de la coupe (j) sur l'image (i)

$$i \in \{1, 2, \dots, 7\}$$

où 1 : RSO1; 2 : TM ; 3 : RSO2 ; 4 : RSO3 ;
5 : HRV ; 6 : RSO1_c ; 7 : HRV_c

$$j \in \{1, 2, \dots, n\}$$

où $n = 53$ (nombre de coupes) ;

donc,

moyenne des A_j de la *carte de référence*

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n A_j \quad (1)$$

moyenne des B_{ij} de l'image (i)

$$\bar{B}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n B_{ij} \quad (2)$$

erreur d'estimation de superficie
de la coupe (j) de l'image (i)

$$\varepsilon_{ij} = \frac{|\Delta_{ij}|}{A_j} \times 100\% \quad \text{où } |\Delta_{ij}| = |B_{ij} - A_j| \quad (3)$$

moyenne des ε_{ij} pour les n coupes de l'image (i)

$$\bar{\varepsilon}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij} \quad (4)$$

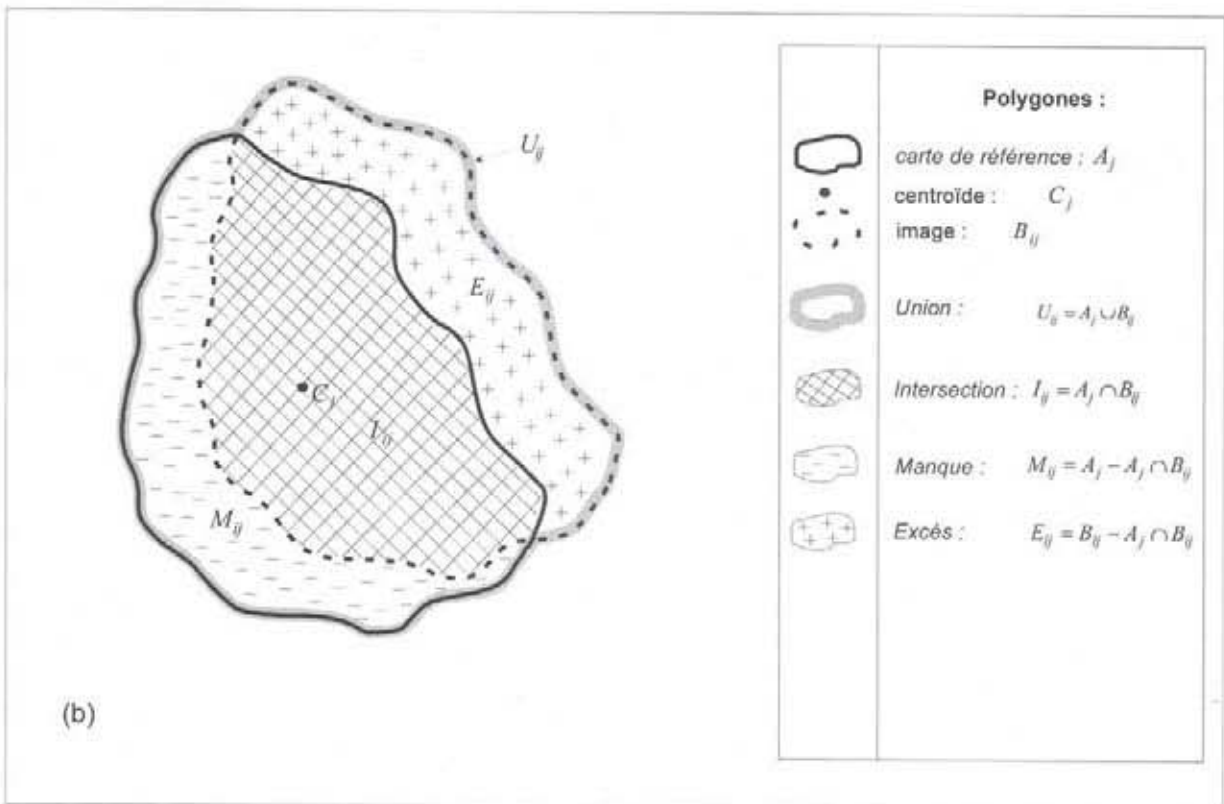
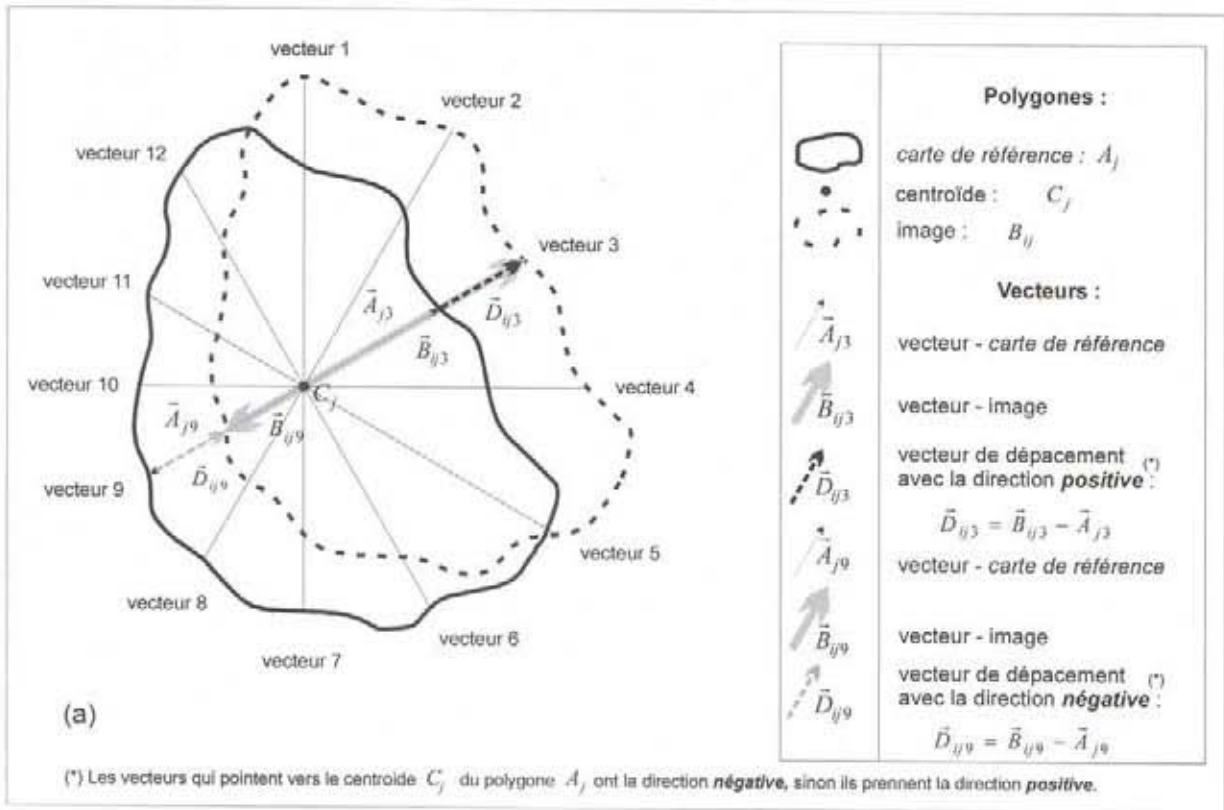


Figure 6. Mesure de déplacement des contours des coupes : a) par l'analyse vectorielle, b) par la théorie des ensembles.

précision d'estimation de superficie de la coupe (j) de l'image (i)

$$p_{ij} = (100\% - \varepsilon_{ij}) \quad (5)$$

moyenne des p_{ij} pour les n coupes de l'image (i)

$$\bar{p}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n p_{ij} \quad (6)$$

3.5.2 Analyse de la précision du traçage des contours

Pour analyser la précision du traçage des contours de 53 coupes, nous avons superposé et comparé les contours des coupes saisis sur les différentes images à ceux de la *carte de référence*. Puis, en utilisant deux mesures (figure 6, ci-contre), une basée sur l'*analyse vectorielle* et l'autre inspirée de la *théorie des ensembles* (HADLEY 1963), nous avons quantifié cette comparaison.

La première méthode (figure 6a), développée par ARCHIBALD et AHERN (1985), consiste à mesurer le vecteur de déplacement du contour de chaque coupe (j) saisi sur l'image (i) (dans ce cas, les $i \in \{1, 2, \dots, 5\}$ où 1 : RSO1 ; 2 : TM ; 3 : RSO2 ; 4 : RSO3 ; 5 : HRV) par rapport au contour de la même coupe obtenu à partir de la *carte de référence*. Ainsi, 12 lignes ordonnées le long des radiaux 30° d'un point central C_j du polygone de référence A_j , ont été utilisées comme vecteur de lignes. En superposant ces 12 lignes au contour B_{ij} et à celui de référence A_j , on calcule la valeur et la direction de 12 vecteurs individuels de déplacement relative au centroïde C_j ; la moyenne de ces 12 vecteurs représente le déplacement moyen du contour B_{ij} par rapport au centroïde C_j mais constitue un estimateur biaisé du déplacement réel :

vecteur (algébrique) de déplacement du contour de la coupe (j) de l'image (i)

$$\bar{D}_{ij} = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} \hat{D}_{ijk} \quad \text{où } \hat{D}_{ijk} = (\hat{B}_{ijk} - \hat{A}_{jk}) \quad (7)$$

moyenne des \bar{D}_{ij} pour les n coupes de l'image (i)

$$\bar{D}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \bar{D}_{ij} \quad (8)$$

Le signe du vecteur individuel de déplacement \hat{D}_{ijk} est positif quand le contour de la coupe saisi sur l'image B_{ij} est en dehors du contour de référence A_j et négatif quand le contour B_{ij} est à l'intérieur. Cette erreur de déplacement (équation 7) incorpore cependant les effets compensateurs relatifs au déplacement du contour B_{ij} autant à l'intérieur qu'à l'extérieur de A_j . La moyenne des valeurs absolues de 12 vecteurs individuels de déplacement :

vecteur (valeur absolue) de déplacement de la coupe (j) de l'image (i)

$$|\bar{D}_{ij}| = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} |\hat{D}_{ijk}| \quad (9)$$

moyenne des $|\bar{D}_{ij}|$ pour les n coupes de l'image (i)

$$|\bar{D}_i| = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\bar{D}_{ij}| \quad (10)$$

est plus représentative des erreurs de déplacement en B_{ij} parce que les directions des déplacements ne se compensent pas.

La seconde approche (figure 6b) consiste à évaluer l'intersection, l'excès et le manque de recouvrement de chaque polygone (j) provenant de l'image (i) (dans ce cas $i \in \{1, 2, \dots, 7\}$ où 1 : RSO1 ; 2 : TM ; 3 : RSO2 ; 4 : RSO3 ; 5 : HRV ; 6 : RSO1_c ; 7 : HRV_c) avec son correspondant de la *carte de référence*. Les équations suivantes illustrent ce concept :

Intersection de la coupe (j) de l'image (i) avec la coupe (j) sur la *carte de référence*

$$RI_{ij} = \frac{I_{ij}}{U_{ij}} = \frac{A_j \cap B_{ij}}{A_j \cup B_{ij}} \times 100\%$$

si $I_{ij} = A_j \cap B_{ij}$

et $U_{ij} = A_j \cup B_{ij}$ (11)

$$\bar{RI}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n RI_{ij} \quad (12)$$

Excès de recouvrement de la coupe (j) de l'image (i) en rapport à la coupe (j) sur la *carte de référence*

$$\text{si} \quad E_{ij} = B_{ij} - A_j \cap B_{ij} \quad (13)$$

$$\overline{RE}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n RE_{ij} \quad (14)$$

Manque de recouvrement de la coupe (j) de l'image (i) en rapport à la coupe (j) sur la *carte de référence*

$$RM_{ij} = \frac{M_{ij}}{U_{ij}} = \frac{A_j - A_j \cap B_{ij}}{A_j \cup B_{ij}} \times 100\%$$

$$\text{si} \quad M_{ij} = A_j - A_j \cap B_{ij} \quad (15)$$

$$\overline{RM}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n RM_{ij} \quad (16)$$

Différence (Excès – Manque)

$$RD_{ij} = RE_{ij} - RM_{ij} \quad (17)$$

$$\overline{RD}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n RD_{ij} \quad (18)$$

Somme (Excès + Manque)

$$RS_{ij} = RE_{ij} + RM_{ij} \quad (19)$$

$$\overline{RS}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n RS_{ij} \quad (20)$$

Chapitre quatre

Résultats

4.1 Correction géométrique

La précision moyenne de la correction géométrique obtenue pour les images optiques TM et HRV est respectivement de 10,2 et 3,7 m, soit l'équivalent d'un tiers de pixel. Quant aux images radar à résolution fine RSO1 et RSO2, leur précision moyenne est respectivement de 10,7 m (environ un pixel) et 15,3 m (environ un pixel et demi). Pour ce qui est de l'image RSO3 (résolution standard), cette précision atteint 25,6 m, soit environ un pixel.

4.2 Évaluation quantitative des aires des coupes

Chacune des coupes sélectionnées, communes aux sept images (cinq images accentuées et deux images classifiées) et à la *carte de référence*, a fait l'objet d'une évaluation en fonction de la méthode décrite au chapitre trois. Les résultats de ces calculs effectués sur les 53 coupes : les anciennes (36) et les récentes (17), sont présentées aux tableaux 2 et 3. En revanche, aux tableaux 5 et 6 de l'Annexe F apparaissent les résultats de ces mêmes calculs, réalisés cette fois en ne prenant en compte que les 17 coupes récentes.

4.2.1 Précision du calcul des superficies

Les statistiques descriptives de 53 coupes pour en estimer les superficies sont présentées au tableau 2.

Les superficies des coupes de la *carte de référence*, variant de 1,95 à 231,92 ha, ont été en général surévaluées (voir *écart*, tableau 2) sur toutes les images à l'exception de l'image RSO1_c. La *précision* moyenne d'estimation des superficies des 53 coupes sur les images : RSO1, TM, HRV, RSO1_c

et HRV_c, est élevée : 95,4, 94,4, 95,6, 92,8 et 92,7 % respectivement. Elle devient inférieure pour les images RSO2 et RSO3, quoiqu'encore assez intéressante : 89,1 % et 90,4 %. Bien que ces valeurs soient élevées, elles fournissent peu d'indication sur le rapport entre la *précision* et la taille de la coupe. Cette relation est mise en évidence par les graphiques de dispersion (figure 7).

À leur examen, on constate l'accroissement de la *précision* d'estimation à mesure que la taille de coupe augmente et ceci, pour toutes les images. Cette tendance s'explique par une augmentation relative du nombre de pixels lorsque les dimensions de la coupe augmentent, menant ainsi à une interprétation plus facile et plus précise des images.

Les graphiques de la régression par les moindres carrés (figure 8) montrent une forte relation linéaire entre les superficies des coupes sur la *carte de référence* et sur les images RSO1, TM et HRV. Le tout est confirmé par la corrélation linéaire ($r = 0,999$). Cette relation linéaire reste assez forte pour les images RSO2 et RSO3 ($r = 0,997$ et $r = 0,996$). Cette corrélation linéaire élevée suggère qu'une régression linéaire pourrait être utilisée pour améliorer l'évaluation des superficies des coupes (voir les équations de la figure 8).

4.2.2 Précision du traçage des contours

Les résultats des calculs selon les deux méthodes de mesure décrites au paragraphe 3.5.2, la première basée sur l'*analyse vectorielle* et la seconde sur la *théorie des ensembles*, sont présentés au tableau 3.

Tableau 2. Statistiques descriptives : estimation des superficies de 53 coupes

Variable	Nombre de coupes	Moyenne	Variance	Écart-type	Écart-type de la moyenne	Minimum	Maximum
superficie (ha) : <i>carte de référence</i>	53	57,50	2382,42	48,81	6,70	1,95	231,92
superficie (ha) :							
RSO1	53	58,59	2482,51	49,82	6,84	2,28	234,96
TM	53	58,57	2519,74	50,20	6,90	1,83	236,99
RSO2	53	61,05	2556,54	50,56	6,95	2,54	241,82
RSO3	53	59,12	2533,99	50,34	6,91	2,56	229,67
HRV	53	58,00	2465,38	49,65	6,82	1,81	234,77
RSO1_c	53	56,41	2443,90	49,44	6,79	1,47	232,20
HRV_c	53	57,53	2531,88	50,32	6,91	1,00	243,15
écart (ha):							
RSO1	53	1,09	3,30	1,82	0,25	-2,16	5,67
TM	53	1,07	6,32	2,51	0,35	-4,33	9,58
RSO2	53	3,54	17,44	4,18	0,57	-6,15	12,93
RSO3	53	1,62	21,29	4,61	0,63	-7,92	15,27
HRV	53	0,50	3,98	2,00	0,27	-6,23	4,92
RSO1_c	53	-1,09	6,13	2,48	0,34	-6,76	3,51
HRV_c	53	0,03	8,80	2,97	0,41	-6,52	11,23
écart (valeur absolue) (ha) :							
RSO1	53	1,53	2,12	1,46	0,20	0,03	5,67
TM	53	1,95	3,59	1,90	0,26	0,04	9,58
RSO2	53	4,07	13,35	3,65	0,50	0,04	12,93
RSO3	53	3,58	10,90	3,30	0,45	0,00	15,27
HRV	53	1,55	1,78	1,33	0,18	0,00	6,23
RSO1_c	53	2,04	3,12	1,77	0,24	0,06	6,76
HRV_c	53	2,03	4,60	2,14	0,29	0,00	11,23
erreur (%) :							
RSO1	53	4,65	30,71	5,54	0,76	0,09	29,35
TM	53	5,60	52,77	7,26	1,00	0,07	33,84
RSO2	53	10,90	120,93	11,00	1,51	0,40	58,67
RSO3	53	9,60	78,90	8,88	1,22	0,01	33,74
HRV	53	4,38	15,33	3,92	0,54	0,00	17,75
RSO1_c	53	7,21	63,09	7,94	1,09	0,07	35,15
HRV_c	53	7,28	114,15	10,68	1,47	0,00	63,90
précision (%) :							
RSO1	53	95,35	30,71	5,54	0,76	70,65	99,92
TM	53	94,40	52,77	7,26	1,00	66,16	99,93
RSO2	53	89,10	120,93	11,00	1,51	41,33	99,60
RSO3	53	90,40	78,90	8,88	1,22	66,26	99,99
HRV	53	95,62	15,33	3,92	0,54	82,25	100,00
RSO1_c	53	92,79	63,09	7,94	1,09	64,85	99,93
HRV_c	53	92,72	114,15	10,68	1,47	36,10	100,00

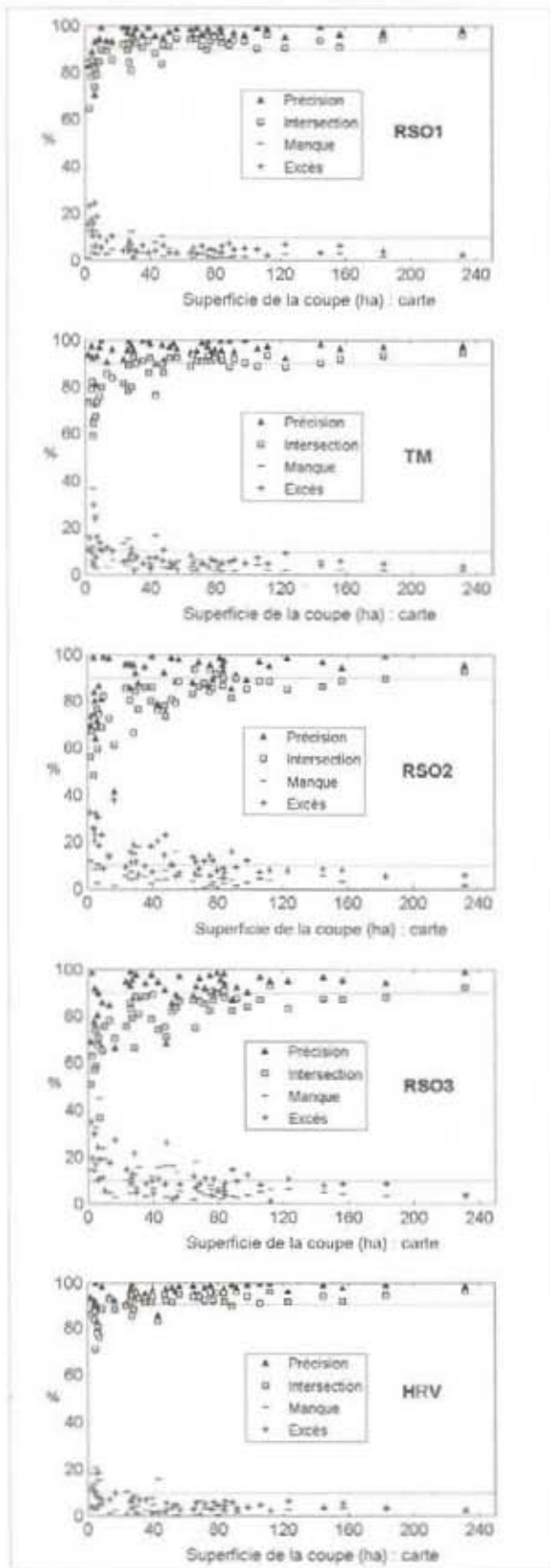


Figure 7. Précision, Intersection, Manque et Excès de recouvrement en relation avec la superficie de la coupe sur la carte de référence.

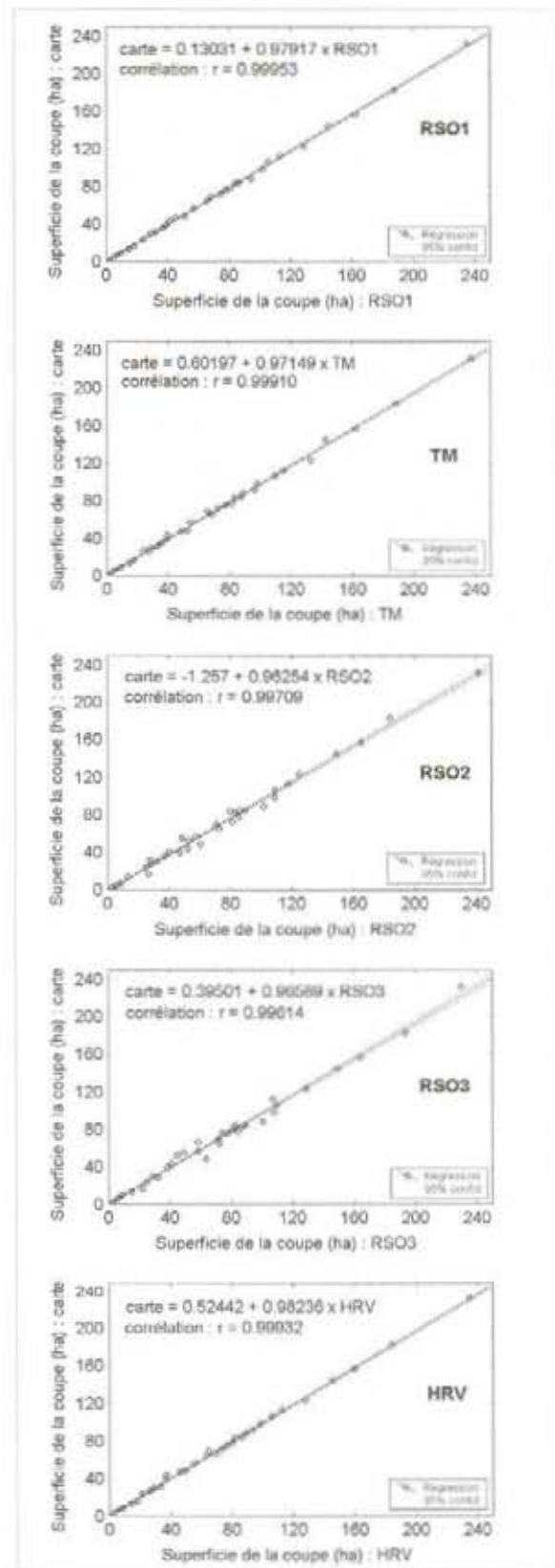


Figure 8. Superficie de la coupe sur la carte de référence en fonction de la superficie de la coupe sur les images.

Tableau 3. Statistiques descriptives : estimation du déplacement de 53 contours

Variable	Nombre de coupes	Moyenne	Variance	Écart-type	Écart-type de la moyenne	Minimum	Maximum
Intersection (ha) :							
RSO1	53	55,82	2301,78	47,98	6,59	1,93	228,64
TM	53	55,12	2292,96	47,88	6,58	1,60	227,81
RSO2	53	54,67	2248,59	47,42	6,51	1,62	228,10
RSO3	53	53,58	2213,12	47,04	6,46	1,52	221,64
HRV	53	55,57	2287,33	47,83	6,57	1,74	228,46
RSO1_c	53	54,05	2261,44	47,55	6,53	1,42	225,50
HRV_c	53	54,87	2302,07	47,98	6,59	0,97	230,05
Excès (ha) :							
RSO1	53	2,77	4,94	2,22	0,31	0,35	10,28
TM	53	3,45	7,15	2,67	0,37	0,22	12,42
RSO2	53	6,37	17,81	4,22	0,58	0,92	16,40
RSO3	53	5,54	20,94	4,58	0,63	0,49	17,08
HRV	53	2,43	4,65	2,16	0,30	0,07	8,85
RSO1_c	53	2,36	5,05	2,25	0,31	0,06	10,08
HRV_c	53	2,66	6,99	2,64	0,36	0,03	13,10
Manque (ha) :							
RSO1	53	1,68	1,95	1,40	0,19	0,02	5,79
TM	53	2,38	3,02	1,74	0,24	0,23	8,47
RSO2	53	2,83	6,34	2,52	0,35	0,09	9,68
RSO3	53	3,92	8,07	2,84	0,39	0,43	12,88
HRV	53	1,93	2,70	1,64	0,23	0,13	6,84
RSO1_c	53	3,45	4,82	2,20	0,30	0,21	8,77
HRV_c	53	2,63	4,47	2,11	0,29	0,13	7,39
Différence (Excès - Manque) (ha) :							
RSO1	53	1,09	3,30	1,82	0,25	-2,16	5,67
TM	53	1,07	6,32	2,51	0,35	-4,33	9,58
RSO2	53	3,54	17,44	4,18	0,57	-6,15	12,93
RSO3	53	1,62	21,29	4,61	0,63	-7,92	15,27
HRV	53	0,50	3,98	2,00	0,27	-6,23	4,92
RSO1_c	53	-1,09	6,13	2,48	0,34	-6,76	3,51
HRV_c	53	0,03	8,80	2,97	0,41	-6,52	11,23
Somme (Excès + Manque) (ha) :							
RSO1	53	4,45	10,47	3,24	0,44	0,37	15,27
TM	53	5,83	14,02	3,74	0,51	0,58	15,25
RSO2	53	9,20	30,87	5,56	0,76	1,24	21,49
RSO3	53	9,47	36,75	6,06	0,83	1,28	23,85
HRV	53	4,37	10,72	3,27	0,45	0,28	14,34
RSO1_c	53	5,80	13,61	3,69	0,51	0,59	16,65
HRV_c	53	4,59	14,16	3,76	0,52	0,25	16,55
vecteur (algébrique) (m) :							
RSO1	53	2,90	77,84	8,82	1,21	-18,57	24,20
TM	53	1,82	132,53	11,51	1,58	-33,98	26,55
RSO2	53	12,71	244,76	15,64	2,15	-39,22	53,82
RSO3	53	1,88	372,65	19,30	2,65	-39,59	74,54
HRV	53	1,77	83,29	9,13	1,25	-22,17	16,33
vecteur (valeur absolue) (m) :							
RSO1	53	14,53	36,86	6,07	0,83	6,63	36,03
TM	53	19,91	60,90	7,80	1,07	7,43	46,33
RSO2	53	31,85	150,87	12,28	1,69	9,23	64,82
RSO3	53	33,13	256,78	16,02	2,20	11,89	83,12
HRV	53	13,76	30,57	5,53	0,76	5,51	25,15

4.2.2.1 Vecteur de déplacement des contours

Le vecteur (*algébrique*) moyen (tableau 3) du déplacement des contours des coupes sur les images RSO1, TM, RSO2, RSO3 et HRV atteint 2,90, 1,82, 12,71, 1,88, et 1,77 mètres respectivement. Ceci confirme la surévaluation des superficies des coupes sur ces images, qui se traduit par des écarts de 1,09, 1,07, 3,54, 1,62 et 0,50 hectares respectivement (tableau 2).

Pour ces mêmes images, le vecteur (*valeur absolue*) moyen (tableau 3), affiche des valeurs de 14,53, 19,91, 31,85, 33,13 et 13,76 mètres respectivement.

Dans le cas des images RSO1, TM et HRV, la plupart (environ 80 %) des vecteurs (*algébriques*) se trouvent dans les classes centrales -2,5, 2,5, 7,5 et 12,5 mètres (figure 9), tandis qu'environ 85 % des vecteurs (*valeur absolue*) appartiennent aux classes de 5 et de 15 mètres pour les images RSO1 et HRV, ainsi qu'aux classes de 15 et de 25 mètres pour l'image TM (figure 10). Quant aux images RSO2 et RSO3, la majorité (environ 80 %) des vecteurs (*algébriques*) sont regroupés dans les classes de -5, 5, 15 et 25 mètres, alors que les classes de 15, 25, 35 et 45 mètres contiennent environ 90 % des vecteurs (*valeur absolue*).

4.2.2.2 Intersection des polygones

Les résultats d'évaluation de la concordance des 53 polygones (coupes) sur chacune des images avec le contour correspondant sur la *carte de référence* sont rassemblés au tableau 3 ainsi qu'à l'Annexe G. Ainsi, l'*intersection* moyenne des coupes (tableau 3) est élevée dans le cas de toutes les images RSO1, TM, RSO2, RSO3, HRV, RSO1_c et HRV_c ; elle atteint 55,82, 55,12, 54,67, 53,58, 55,57, 54,05 et 54,87 hectares respectivement. Ses valeurs, comparées à la superficie moyenne (**57,50** hectares) des coupes sur la *carte de référence*, indiquent un très fort recouvrement entre les coupes sur chacune de ces images et celles de la *carte de référence*. Même si ce chevauchement est très important, il ne fournit pas suffisamment d'information sur leur concordance. Afin de mieux évaluer celle-ci, nous avons fait appel à d'autres mesures comme l'*Excès* et le *Manque* de recouvrement.

Ainsi, l'*Excès* moyen de recouvrement (tableau 3) est faible à 2,77, 3,45, 2,43, 2,36 et 2,66 hectares pour les images RSO1, TM, HRV, RSO1_c et HRV_c. Il atteint une valeur approximativement deux fois plus grande (6,37 et 5,54) pour les images RSO2 et RSO3. Quant au *Manque* moyen de recouvrement (tableau 3), il varie de 1,68 à 3,92 hectares.

De plus, la différence entre l'*Excès* et le *Manque* : *Différence (Excès - Manque)* ainsi que leur somme : *Somme (Excès + Manque)* (tableau 3), ont été calculées. Il s'agissait d'estimer l'erreur totale du déplacement des polygones afin de comparer les deux méthodes d'analyse pour ce qui est de la précision du traçage des contours des coupes.

La *Différence (Excès - Manque)* moyenne (tableau 3) qui représente l'*écart* moyen (tableau 2) reste faible pour toutes les images RSO1, TM, RSO2, RSO3, HRV, RSO1_c et HRV_c : 1,09, 1,07, 3,54, 1,62, 0,50, -1,09 et 0,03 hectares. Ces valeurs confirment la surévaluation des superficies des coupes sur ces images, à l'exception de l'image RSO1_c (-1,09 hectares).

Sur ces mêmes images, la *Somme (Excès + Manque)* moyenne de recouvrement (tableau 3) atteint 4,45, 5,83, 9,20, 9,47, 4,37, 5,80 et 4,59 hectares respectivement.

Les histogrammes des fréquences de la *Différence (Excès - Manque)* ainsi que de la *Somme (Excès + Manque)*, établis pour les images RSO1, TM, RSO2, RSO3, HRV, se retrouvent aux figures 11 et 12. L'analyse de ces histogrammes permet de dégager les mêmes conclusions que l'examen des histogrammes de fréquence du vecteur (*algébrique*) et du vecteur (*valeur absolue*) (figures 9 et 10) : elle suggère le choix des mêmes images pour une discrimination optimale des coupes.

Bien que l'*Intersection*, l'*Excès* et le *Manque* de recouvrement, exprimés en hectares, soient très intéressants, ces indices n'indiquent pas pleinement le rapport entre eux et la taille de la coupe. Cette relation se révèle par les graphiques de dispersion (figure 7) où ces indices sont désormais exprimés en valeur relative.

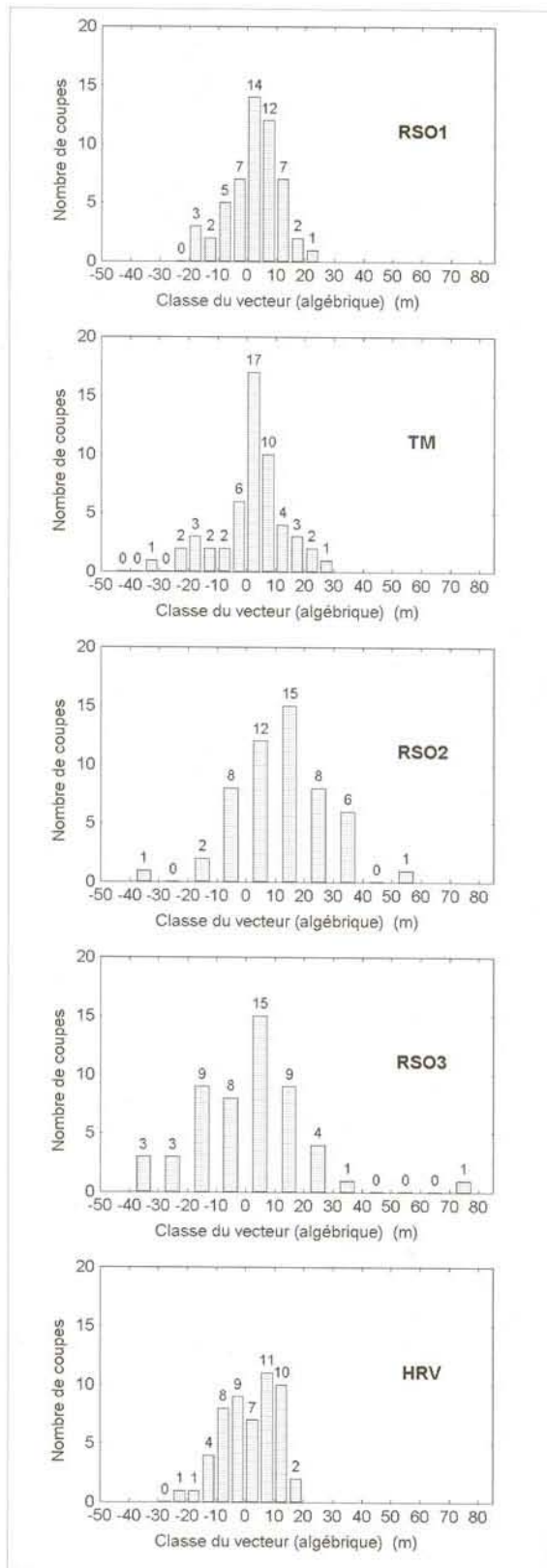


Figure 9. Histogrammes des fréquences du vecteur (algébrique).

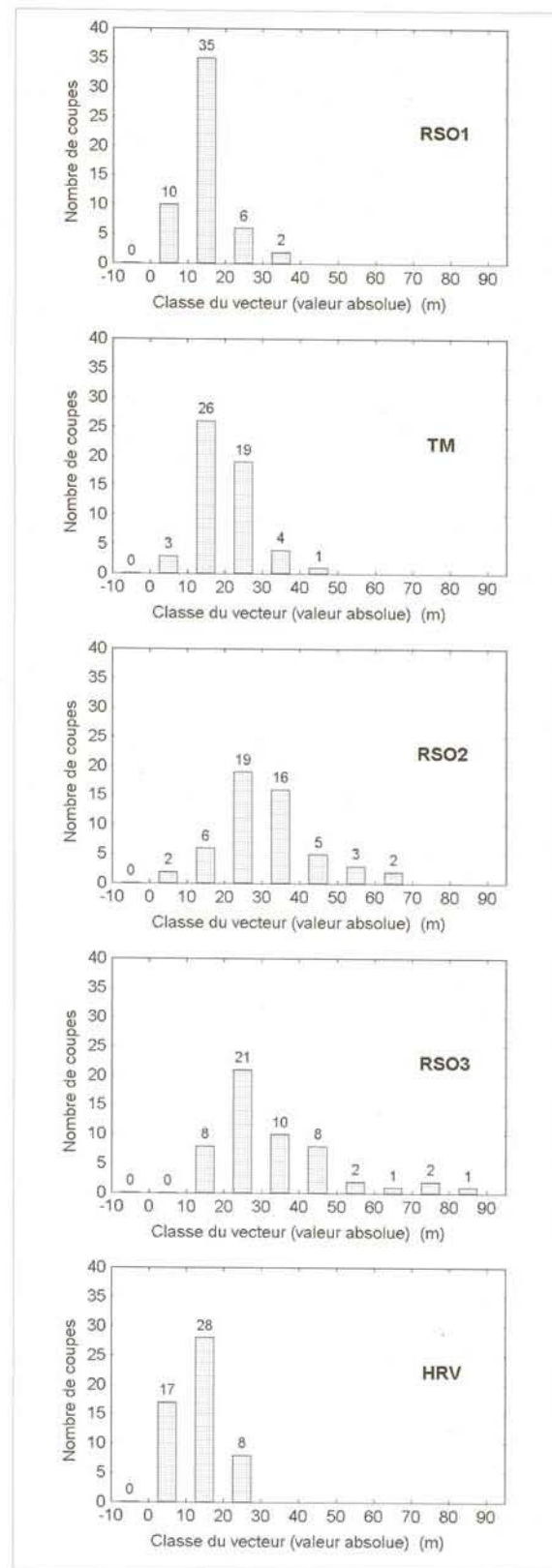


Figure 10. Histogrammes des fréquences du vecteur (valeur absolue).

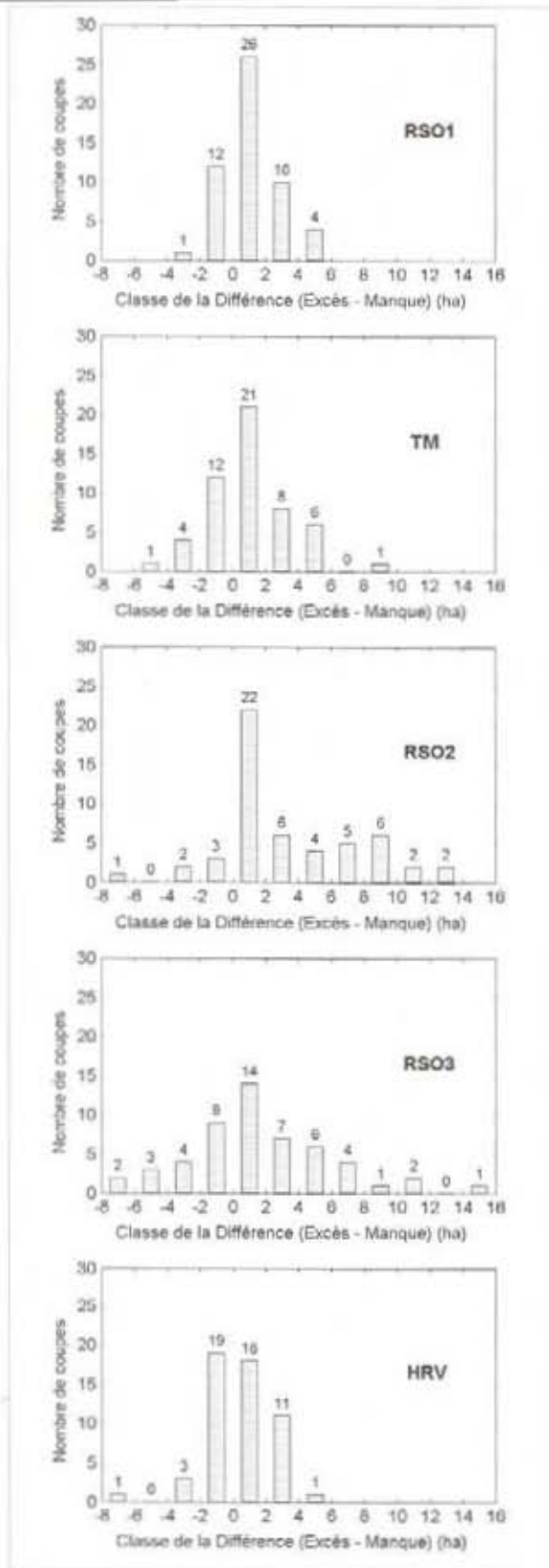


Figure 11. Histogrammes des fréquences de la *Différence (Excès - Manque)*.

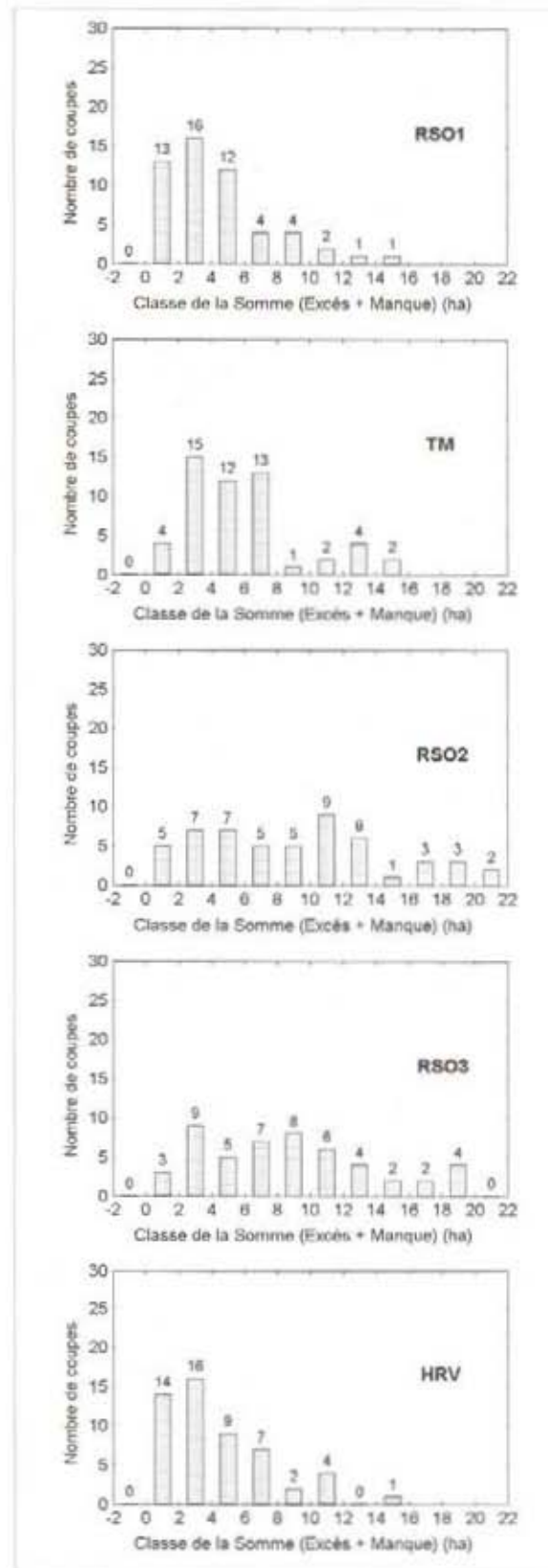


Figure 12. Histogrammes des fréquences de la *Somme (Excès + Manque)*.

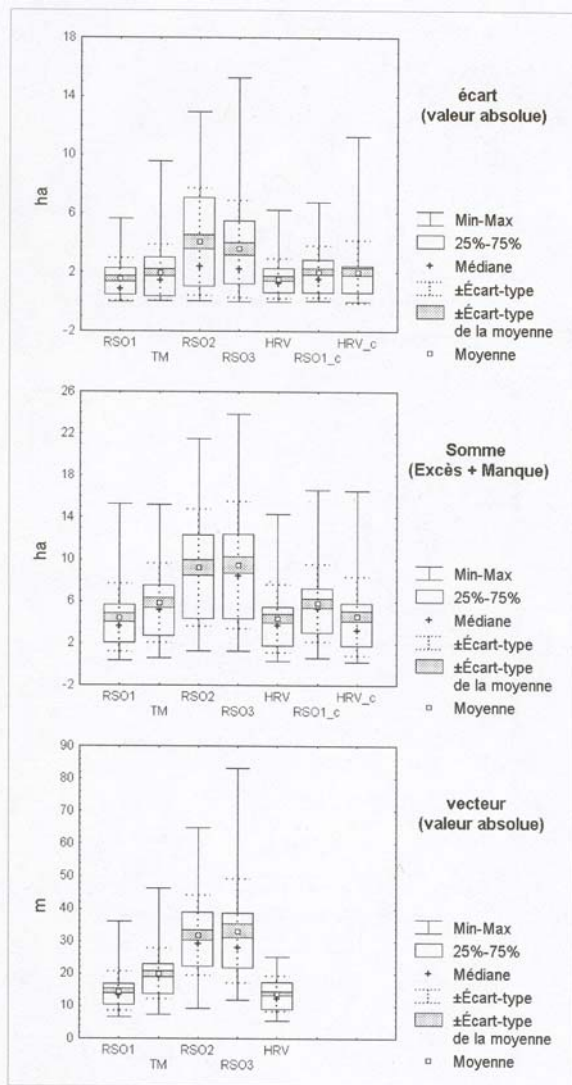


Figure 13. Comparaison des trois variables soumises à l'analyse de la variance.

À l'examen de ces graphiques, on constate l'accroissement de l'*Intersection*, mais aussi la diminution de l'*Excès* et du *Manque* à mesure que la taille de la coupe augmente et ceci, pour toutes les images. Cette tendance s'explique par une augmentation relative du nombre de pixels lorsque les dimensions de la coupe augmentent, permettant ainsi une interprétation plus facile et plus précise des images.

4.2.3 Analyse de variance

L'analyse de variance en bloc complet où chaque coupe correspond à un bloc, suivie du test de Scheffé pour la comparaison multiple des moyennes, permet de déterminer si des différences statistiques significatives existent entre les résultats de l'interprétation des coupes sur les images étudiées. Les résultats obtenus sont présentés au tableau 4.

Trois variables : 1) l'*écart (valeur absolue)* (tableau 2 et figure 13), 2) la *Somme (Excès + Manque)* (tableau 3 et figure 13) et 3) le *vecteur (valeur absolue)* (tableau 3 et figure 13) ont été soumis à cette analyse. Le fait de choisir les variables exprimées en valeur absolue a permis d'éliminer de l'analyse les effets compensateurs (voir paragraphe 3.5.2).

Dans chaque cas, les images RSO2 et RSO3 forment un groupe distinct en présentant une différence significative avec le reste des images. Dans le cas de l'analyse de variance de l'*écart (valeur absolue)*, on constate une répartition des images en deux catégories significativement différentes : RSO1, TM, HRV, RSO1_c et HRV_c dans un premier groupe, RSO2 et RSO3 dans un second. Dans les deux autres cas : *Somme (Excès + Manque)* et *vecteur (valeur absolue)*, ce groupement est plus fin puisqu'on observe l'apparition d'une troisième catégorie. L'analyse de variance montre de façon significative que le potentiel des images RSO1, HRV et HRV_c pour une discrimination des coupes est plus grand que celui des images TM et RSO1_c. Quant aux images RSO2 et RSO3, leur utilité apparaît négligeable à cause des grandes erreurs associées à leur interprétation.

Tableau 4. Test de comparaison multiple des moyennes

Variable	Nombre de coupes	Moyenne	Groupement de Scheffé ⁽¹⁾
écart (valeur absolue) (ha) :			
RSO1	53	1,53	A
TM	53	1,95	A
RSO2	53	4,07	B
RSO3	53	3,58	B
HRV	53	1,55	A
RSO1_c	53	2,04	A
HRV_c	53	2,03	A
Somme (Excès + Manque) (ha) :			
RSO1	53	4,45	A
TM	53	5,83	B
RSO2	53	9,20	C
RSO3	53	9,47	C
HRV	53	4,36	A
RSO1_c	53	5,80	B
HRV_c	53	4,59	A
vecteur (valeur absolue) (m) :			
RSO1	53	14,53	A
TM	53	19,91	B
RSO2	53	31,85	C
RSO3	53	33,13	C
HRV	53	13,76	A

⁽¹⁾ La même lettre indique qu'il n'y a pas de différence significative au niveau de probabilité de 95 % entre les moyennes.

Chapitre cinq

Discussion

Parmi les trois images radar captées durant l'hiver de 1997 : RSO1 (5 avril), RSO2 (12 mars) et RSO3 (5 mars), que nous avons comparées aux deux images optiques TM et HRV et à la *carte de référence*, seule l'image du 5 avril (figure 18 de l'Annexe E), enregistrée par temps doux au moment où le sol était couvert d'environ un mètre de *neige humide*, a permis une bonne discrimination des coupes. Elle s'est avérée utile pour la mise à jour de la carte forestière.

Ainsi, la *précision* moyenne d'estimation pour les superficies des 53 coupes sur l'image RSO1 atteint 95,4 %, celle des images TM et HRV est de 94,4 % et 95,6 % respectivement. Ceci est confirmé par la forte corrélation ($r = 0,999$) entre les coupes sur la *carte de référence* et celles des images RSO1, TM et HRV. Même l'image classifiée RSO1_c affiche une précision élevée à 92,8 % ; elle est presque équivalente à celle de HRV_c (image HRV classifiée) à 92,7 %. De plus, on constate un accroissement de la précision à mesure que la taille de coupe augmente et ceci, pour toutes les images. Quant au déplacement des polygones, exprimé par la somme de l'*Excès* et du *Manque* de recouvrement, il est assez faible à 4,45 ha pour RSO1, à 5,83 ha pour TM et à 4,36 ha pour HRV. Enfin, le *vecteur (valeur absolue)* moyen de déplacement reste faible à 14,5 m pour RSO1, à 19,9 m pour TM et à 13,8 m pour HRV. Il devient alors très important de noter que ce vecteur ne dépasse pas 20 m (1 mm sur la carte forestière au 1 : 20 000), qui est la limite acceptable pour la DIF.

Les erreurs inhérentes à la correction géométrique des images, la reproduction des cartes, la largeur des traits de crayon et le dessin des cartes assisté par ordinateur s'approchent déjà du seuil de 20 m. La précision absolue avec laquelle les contours des coupes ont été tracés sur les images utilisées dans cette étude a donc été influencée par les techniques de correction géométrique des images, par les techniques cartographiques et par l'échelle employée. Quant au *vecteur (algébrique)* moyen, il affiche dans tous les cas une valeur positive : de 2,90 m pour RSO1, de 1,82 m pour TM et de 1,77 m pour HRV, ce qui vient encore confirmer la surévaluation des superficies des coupes sur ces images, dont les écarts atteignent 1,09, 1,07 et 0,50 hectares.

À l'analyse des résultats pour les calculs effectués uniquement sur les 17 coupes récentes (tableaux 5 et 6 de l'Annexe F), on constate que leur discrimination s'effectue avec beaucoup plus de précision que la détection des coupes anciennes. Ainsi, la *précision* moyenne d'estimation des superficies des 17 coupes sur l'image RSO1 s'élève à 97,3 % et celle des images TM et HRV à 97,1 % et à 96,3 % respectivement. Quant au *vecteur (valeur absolue)* moyen de déplacement, sa valeur plafonne à 11,7 m pour RSO1, à 17,0 m pour TM et à 12,5 m pour HRV. De plus, on observe une diminution de l'écart-type de ces variables.

Même si les résultats d'interprétation de l'image RSO1 diffèrent quelque peu de ceux qu'on a obtenus avec les images optiques TM et HRV, l'analyse de la variance, suivie du test de Scheffé, montre de façon significative que l'image RSO1 permet une discrimination optimale des coupes au même titre que les images HRV et HRV_c. Quant aux images RSO2 et RSO3, elles ne peuvent pas être utilisées pour la mise à jour des coupes car les erreurs associées à leur interprétation dépassent les normes en vigueur à la DIF.

Toutes les anciennes coupes (coupes totales [ct] et coupes avec protection de la régénération [cpr]) qui avaient été cartographiées par la DIF entre 1992 et 1995, ainsi que les coupes récentes (coupes avec protection de la régénération [cpr]) ont pu être détectées sur l'image RSO1 du 5 avril 1997. Les contrastes de teinte et de texture entre les coupes et la forêt avoisinante y sont très bien définis. La neige humide aplanit tout en masquant autant les déchets de coupe que la régénération. Elle agit comme une surface spéculaire en permettant ainsi une bonne localisation des coupes (confirmée par les photographies aériennes et par les données de terrain) et une délimitation très précise de leurs contours, à condition que la végétation adjacente aux coupes soit une forêt mûre. Dans le cas où cette

végétation est composée de buissons, d'herbes ou autres, le traçage des périmètres des coupes devient plus difficile. L'identification des limites des coupes n'occasionne aucune difficulté majeure liée soit à la direction de visée, soit aux effets du relief sur la réponse radar. La principale difficulté vient plutôt de la présence d'une végétation plus basse adjacente aux coupes. Ainsi, dans le cas de coupes contiguës, il devient souvent plus difficile de tracer la limite exacte entre l'ancienne et la nouvelle coupe.

La capacité des images *RADARSAT RSO* à détecter les *brûlis* n'a pas été évaluée dans ce projet ; il semble cependant que l'âge de ceux-ci joue un rôle important. Même si les anciens brûlis ont pu être facilement identifiés sur les images *RSO-bande-C* aéroporté d'une résolution de 6 m par KNEPPECK et AHERN (1989), une étude plus récente (WERLE *et al.* 1991) montre que les brûlis sont presque invisibles sur des images radar acquises une semaine après le passage du feu.

Enfin, l'identification des chemins d'accès ainsi que des traitements sylvicoles qui affectent partiellement le couvert forestier (coupes partielles, chablis, épidémies et autres), dont les réponses radar se confondent avec celle de la forêt, devient très difficile, voire impossible.

Conclusion

Cette étude montre la capacité des images *RADARSAT RSO* à détecter, en forêt boréale, tant des coupes récentes avec protection de la régénération que des coupes anciennes de quelques années. La *précision* moyenne d'estimation des superficies obtenues à partir de l'interprétation des coupes sur l'image radar du 5 avril 1997 est de 95,4 % sans considérer l'âge des coupes ; elle atteint 97,3 % dans le cas des coupes récentes. Cette constatation est confirmée par la forte corrélation ($r = 0,999$) entre les superficies des coupes sur la *carte de référence* et sur l'image radar. Quant au déplacement moyen des périmètres des coupes qui est exprimé par *vecteur (valeur absolue)* moyen, il est assez faible à 14,5 m pour toutes les coupes, mais ne dépasse pas 11,7 m dans le cas des coupes récentes. Dans les deux cas, ce déplacement est inférieur au seuil de 20 m (1 mm sur la carte forestière au 1 : 20 000) établi par la DIF.

Une telle précision est principalement attribuable à l'utilisation d'une ortho-image radar résultant d'une correction géométrique rigoureuse de l'image à haute résolution 10 m (résolution fine : F4) basée sur l'utilisation de MNE et des points d'appuis en projection *MTM*, à la présence d'un assez faible relief du terrain et, enfin, à l'interprétation assistée par ordinateur de l'image radar.

L'utilisation de l'image radar prise durant l'hiver par temps doux, au moment où la neige humide d'une épaisseur d'un mètre couvre le territoire forestier, a permis d'effectuer une discrimination optimale des interventions en forêt. Le couvert de neige aplanit et masque les déchets de coupe ainsi que la régénération sous-jacente (c'est le cas de coupes récentes) en permettant une bonne discrimination des surfaces exploitées. Cependant, si la végétation (régénération) des aires de coupe émerge de la neige, comme dans le cas des coupes anciennes, celle-ci agit comme des

diffuseurs multiples du signal radar et fausse la détection des limites des coupes. Quant à l'importance de la résolution des images radar, elle n'a pas pu être évaluée en profondeur à cause de la qualité médiocre de l'image de résolution standard de 25 m. Il semble cependant que le fait de passer d'une résolution de 10 m à une de 25 m affecte peu le type d'information contenue dans une image radar.

Cette étude montre la capacité de *RADARSAT RSO* à détecter des coupes lorsque l'image est prise dans des conditions environnementales adéquates. C'est le cas de l'image du 5 avril 1997 qui permet de réaliser la mise à jour de la carte forestière selon les normes existantes. L'usage opérationnel des images *RADARSAT RSO* dépend donc de la possibilité de les obtenir dans ces conditions. C'est pourquoi les recherches et les développements suivants sont nécessaires :

- déterminer l'étendue des conditions environnementales nécessaires pour obtenir de bonnes images (données météorologiques ou indices à développer) ;
- situer la période de captage pour chaque région en fonction de celles-ci et de l'historique des données météorologiques ;
- mettre en place un mécanisme permettant d'évaluer la qualité des images pour la mise à jour de la carte forestière au moment même de leur acquisition (évaluation d'indices calculés). Si la qualité de l'image ne répond pas au besoin, son traitement devrait être abandonné sans qu'on doive l'acheter. L'évaluation rapide des images devient alors essentielle pour accorder suffisamment de temps à la programmation de la prise de photographies aériennes.

Références

- AHERN, F.J. et J. DRIEMAN, 1988. *Assessment of clearcut mapping accuracy with C-band SAR*. Proceedings, IGARSS 88 Symposium, Edimbourg, Écosse, 12-16 septembre : 1335-1338.
- AHERN, F.J. et R.K. RANEY, 1993. *An Almaz/ERS1 comparison demonstrates incidence angle effects in orbital SAR imagery*. Canadian Journal of Remote Sensing 19(3) : 250-262.
- AHERN, F.J., D.G. LECKIE et J.A. DRIEMAN, 1993. *Seasonal changes in relative C-band backscatter of northern forest cover types*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 31 : 668-680.
- AHERN, F.J., R. LANDRY, I. MCKIRDY, V. JANUSAUSKAS, A. BANNER, J. RUSSELL et T. BALCE, 1997. *Factors affecting clearcut mapping accuracy from single-date RADARSAT images*. Proceedings (CD-ROM) of the International Symposium : Geomatics in the era of RADARSAT (GER 97), Ottawa, 25-30 mai, Paper 358. 5 p.
- ARCHIBALD, P.D. et F.J. AHERN, 1985. *A statistical analysis of forest harvest depletion mapping accuracy using Landsat MSS data*. Proceedings, 19th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, 21-25 octobre : 697-709.
- BANNER, A.V. et F.J. AHERN, 1995. *Forest clearcut mapping using airborne C-band SAR and simulated RADARSAT imagery*. Canadian Journal of Remote Sensing 21(2) : 124-137.
- BARD, A., D. DEMERS, J. FORTIN, R. LETARTE, J.-P. LÉTOURNEAU, R. LORD, J.-Y. PERRON, R. ROULEAU, M. TANGUAY et R. TREMBLAY, 1984. *Normes d'inventaire forestier*. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Service de l'inventaire forestier. 177 p.

- BROWN, R.J., B. BRISCO, F.J. AHERN, S. YATABE et J. DRIEMAN, 1992. *Preliminary ERS-1 assessment for Canadian agriculture and forestry applications*. Proceedings of the First ERS-1 Symposium, Cannes, France, 4-6 novembre.
- CHURCHILL, P. et M.A. KEECH, 1984. *Multi-frequency analysis of SAR-580 imagery for woodland determinations in Thetford forest, England*. Proceedings of the SAR-580 Investigators Workshop, Ispra, Italie.
- COULOMBE, A. et M. HINSE, 1994. *Évaluation des images radar aéroportées pour la mise à jour des cartes forestières pour les interventions*. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Service de la comptabilité forestière et Service des technologies à référence spatiale. Rapport n° H9407R03. 25 p.
- DOBSON, M.C., L. PIERCE, K.C. McDONALD et T. SHARIK, 1991. *Seasonal change in radar backscatter from mixed conifer and hardwood forests in northern Michigan*. Proceedings, International Symposium on Geoscience and Remote Sensing : 1121-1124.
- DOBSON, M.C., 1992. *ERS-1 SAR studies of mid-latitude coniferous and deciduous forests of Michigan*. Proceedings of the First ERS-1 Symposium, Cannes, France, 4-6 novembre.
- DRIEMAN, J.A., F.J. AHERN et I.G.W. CORNS, 1989a. *Visual interpretation results of multipolarization C-SAR imagery of Alberta boreal forest*. Proceedings of IGARSS 89/12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, Colombie-Britannique, 10-14 juillet : 1401-1405.
- DRIEMAN, J.A., D.G. LECKIE et F.J. AHERN, 1989b. *Multitemporal C-SAR for forest typing in eastern Ontario*. Proceedings of IGARSS 89/12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, Colombie-Britannique, 10-14 juillet : 1376-1378.
- HALEY, G. et T.M. WHITIN, 1963. *Analysis of inventory systems*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. 452 p.
- JANO, A.P., 1990. *Forest depletion monitoring with C-band synthetic aperture radar*. Proceedings of the 3rd Forest Service Remote Sensing Application Conference : Protecting natural resources with remote sensing, Tucson, Arizona, 9-13 avril : 299-306.
- KASISCHKE, E., L. BOURGEOU-CHAVEZ et N. FRENCH, 1994. *Observations of variations in ERS-1 SAR image intensity associated with forest fires in Alaska*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 31(1) : 206-210.
- KNEPPECK, I.D. et F.J. AHERN, 1989. *Stratification of a regenerating burned forest in Alberta using Thematic Mapper and C-SAR images*. Proceedings of IGARSS 89/12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, Colombie-Britannique, 10-14 juillet : 1391-1396.
- LAFRAMBOISE, P. et J.-P. LÉTOURNEAU, 1995. *Évaluation des images TM et SPOT pour la mise à jour de la carte forestière en forêt résineuse (projet pilote réalisé en Abitibi)*. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Direction de la gestion des stocks forestiers.
- LANDRY, R., F.J. AHERN et R. O'NEIL, 1995. *Forest burn visibility on C-HH radar images*. Canadian Journal of Remote Sensing 21 : 204-206.
- LE TOAN, T., 1992. *Preliminary result of ERS-1 observations of forest ecosystems*. Proceedings of the First ERS-1 Symposium, Cannes, France, 4-6 novembre.
- LECKIE, D.G., 1983. *Preliminary results of an examination of Synthetic Aperture Radar and visible/infrared data for forestry applications*. Proceedings of the 8th Canadian Symposium on Remote Sensing, Montréal, Québec : 151-164.
- LECKIE, D.G., 1990. *Synergism of Synthetic Aperture Radar and visible/infrared data for forest type discrimination*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 56 : 1237-1246.
- LECKIE, D.G. et S.M. YATABE, 1994. *Discriminating forest cuts with ERS-1 radar imagery*. Proceedings, European Symposium on Satellite Remote Sensing : 415-428.
- LECKIE, D.G., 1997. *The effect of environmental influences on RADARSAT images of forest land*. Proceedings (CD-ROM) of the International Symposium : Geomatics in the era of RADARSAT (GER 97), Ottawa, 25-30 mai, Paper 224.12 p.

- MOULTON, J.E. et D.R. PEDDLE, 1989. *Assessment of the information content of C-band SAR for forest monitoring activities*. Proceedings of IGARSS 89/12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, Colombie-Britannique, 10-14 juillet : 1406-1409.
- RIGNOT, E., J. WAY, K. McDONALD, L. VIERECK, C. WILLIAMS, P. ADAMS, C. PAYNE, W. WOODS et J. SHI, 1994. *Monitoring of environmental conditions in taiga forests using ERS-1 SAR*. Remote Sensing of Environment : 145-154.
- ROSSIGNOL, S.G. et F.J. AHERN, 1992. *Synergism of simulated RADARSAT SAR and LANDSAT TM for multitemporal forest change detection and clearcut delineation*. Proceedings of the 15th Canadian Symposium on Remote Sensing, Toronto, Ontario : 153-156.
- THIBAUT, M., 1985. *Les régions écologiques du Québec méridional (deuxième approximation)*. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, Service de la recherche forestière et Service de la cartographie. Carte au 1 : 1 250 000.
- TOUTIN, T., 1985. *Analyse mathématique des possibilités cartographiques du système SPOT*. Thèse de Docteur-Ingénieur en sciences géodésiques, ENSG, Paris, France. 163 p.
- TOUTIN, T. et Y. CARBONNEAU, 1989. *La multi-stéréoscopie pour les corrections d'images SPOT-HRV*. Journal canadien de télédétection 15(2) : 110-118.
- TOUTIN, T., Y. CARBONNEAU et L. ST-LAURENT, 1992. *An Integrated method to rectify airborne radar imagery using DEM*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 58(4) : 417-422.
- TREMBLAY, M.J.H., 1993. *Aide-mémoire de comptabilité forestière. Mise à jour cartographique*. Ministère des Forêts du Québec. 122 p.
- WAY, J., J. PARIS, E. KASISCHKE, C. SLAUGHTER, L. VIERECK, N. CHRISTENSEN, M.C. DOBSON, F.T. ULABY, J. RICHARDS, A. MILNE, A. SIEBER, F.J. AHERN, D.S. SIMONETT, R. HOFFER, M. IMHOFF et J. WEBER, 1990. *The effect of changing environmental conditions on forest ecosystems : preliminary results of the march 1988 Alaskan aircraft SAR experiment*. Int. Journal of Remote Sensing 11(7) : 1119-1144.
- WAY, J., RIGNOT, K. McDONALD, L. VIERECK, C. WILLIAMS, P. ADAMS, C. PAYNE et W. WOOD, 1992. *Monitoring seasonal change in Alaska with ERS-1 SAR*. Proceedings of the First ERS-1 Symposium, Cannes, France, 4-6 novembre.
- WERLE, D., J. DRIEMAN, F.J. AHERN et R. O'NEIL, 1991. *Synthetic Aperture Radar (SAR) : a promising tool for assessing recently burned forest in Canada*. Proceedings of the 14th Canadian Symposium on Remote Sensing, Calgary, Alberta : 470-475.
- YATABE, S.M. et D.G. LECKIE, 1991. *Assessment of multi-data and multiple incidence angle airborne SAR for conifer regeneration*. Proceedings of the 14th Canadian Symposium on Remote Sensing, Calgary, Alberta : 248-253.

Annexe A

Relief de la zone d'étude

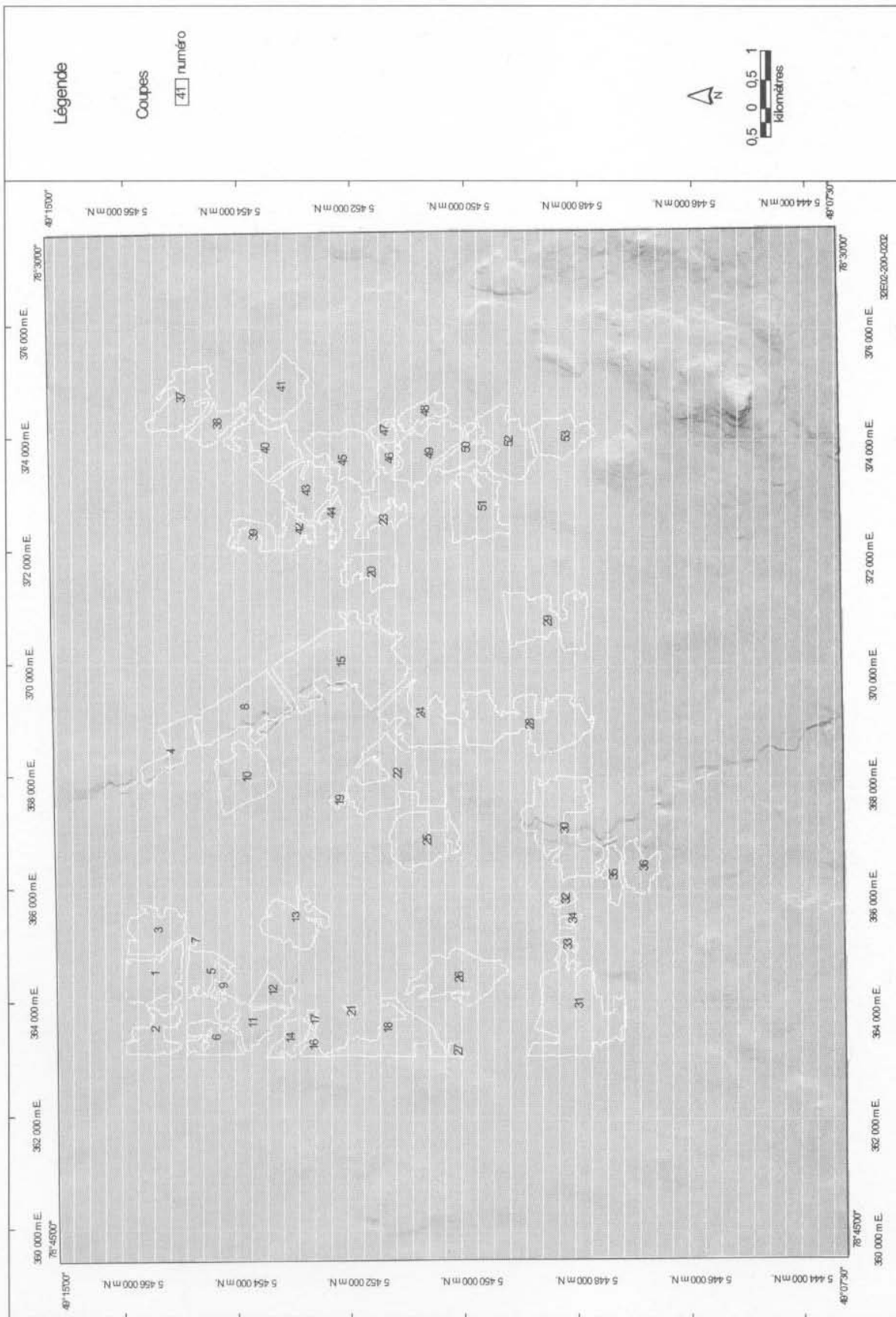


Figure 14. Relief de la zone d'étude.

Annexe B

Carte forestière (feuille 32E02 NE)

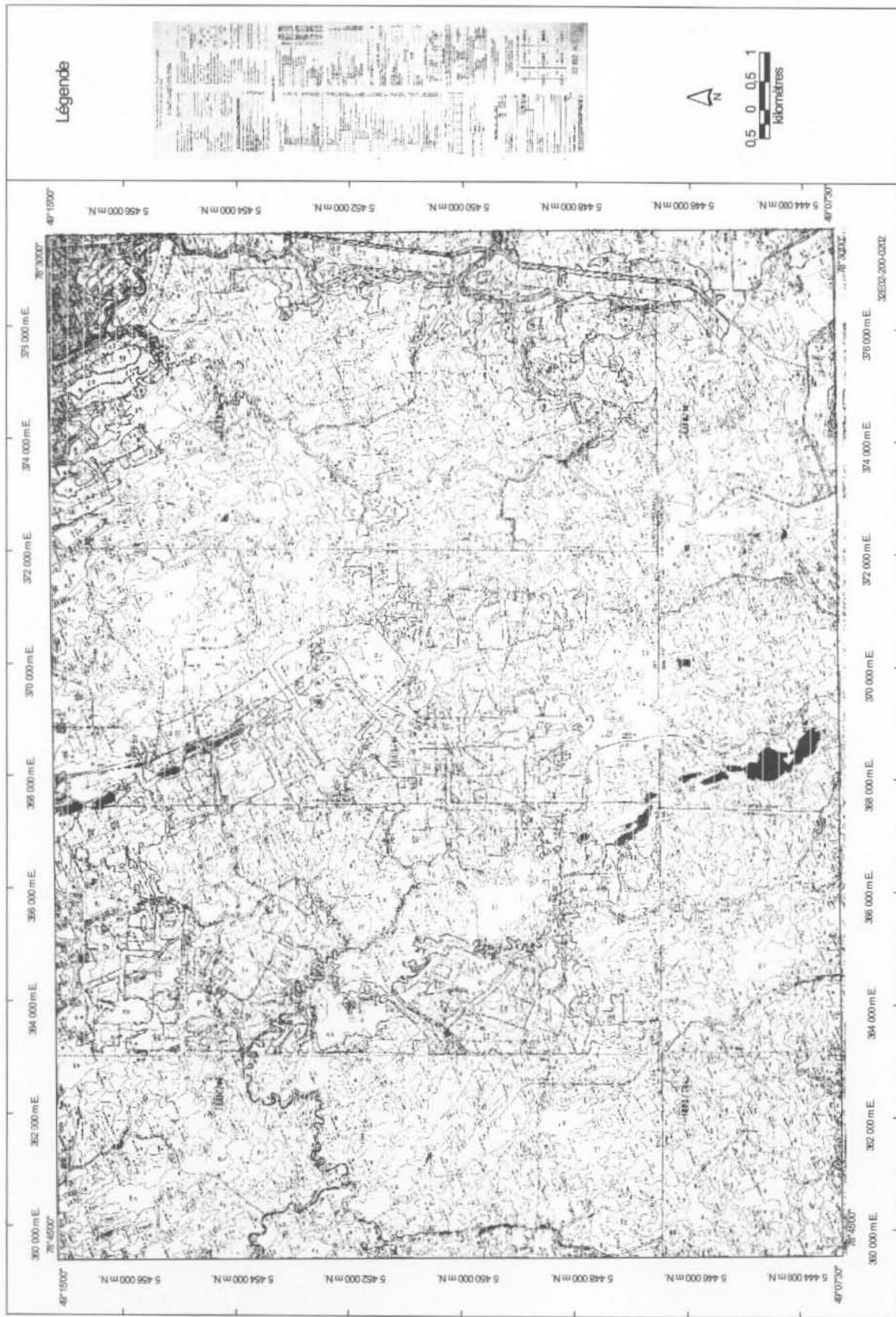


Figure 15. Carte forestière (feuille 32E02 NE).

Annexe C

Mosaïque de 24 ortho-photos

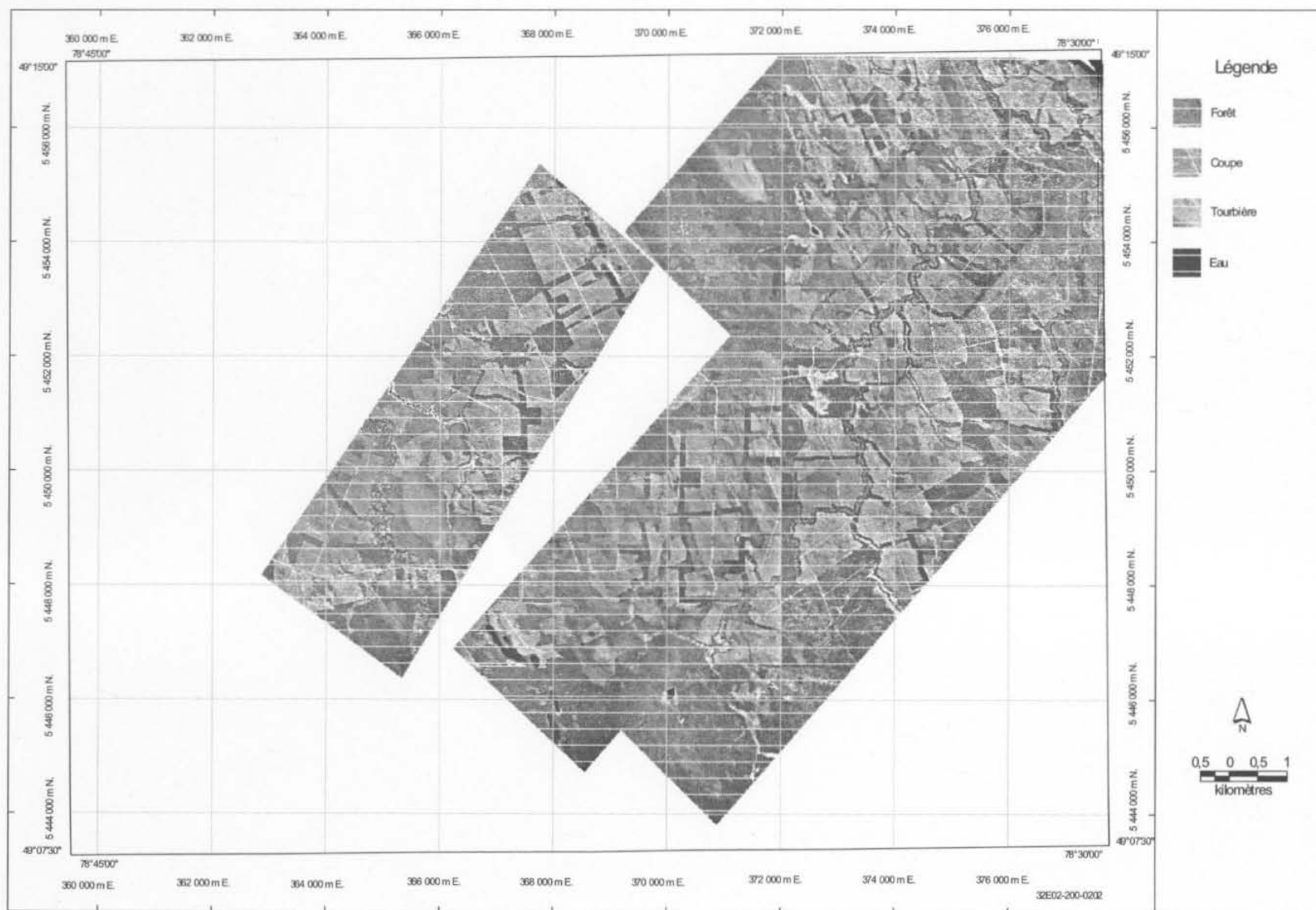


Figure 16. Mosaïque de 24 ortho-photos en noir et blanc de 1997.

Annexe D

Carte de référence (répartition des 53 coupes sélectionnées)

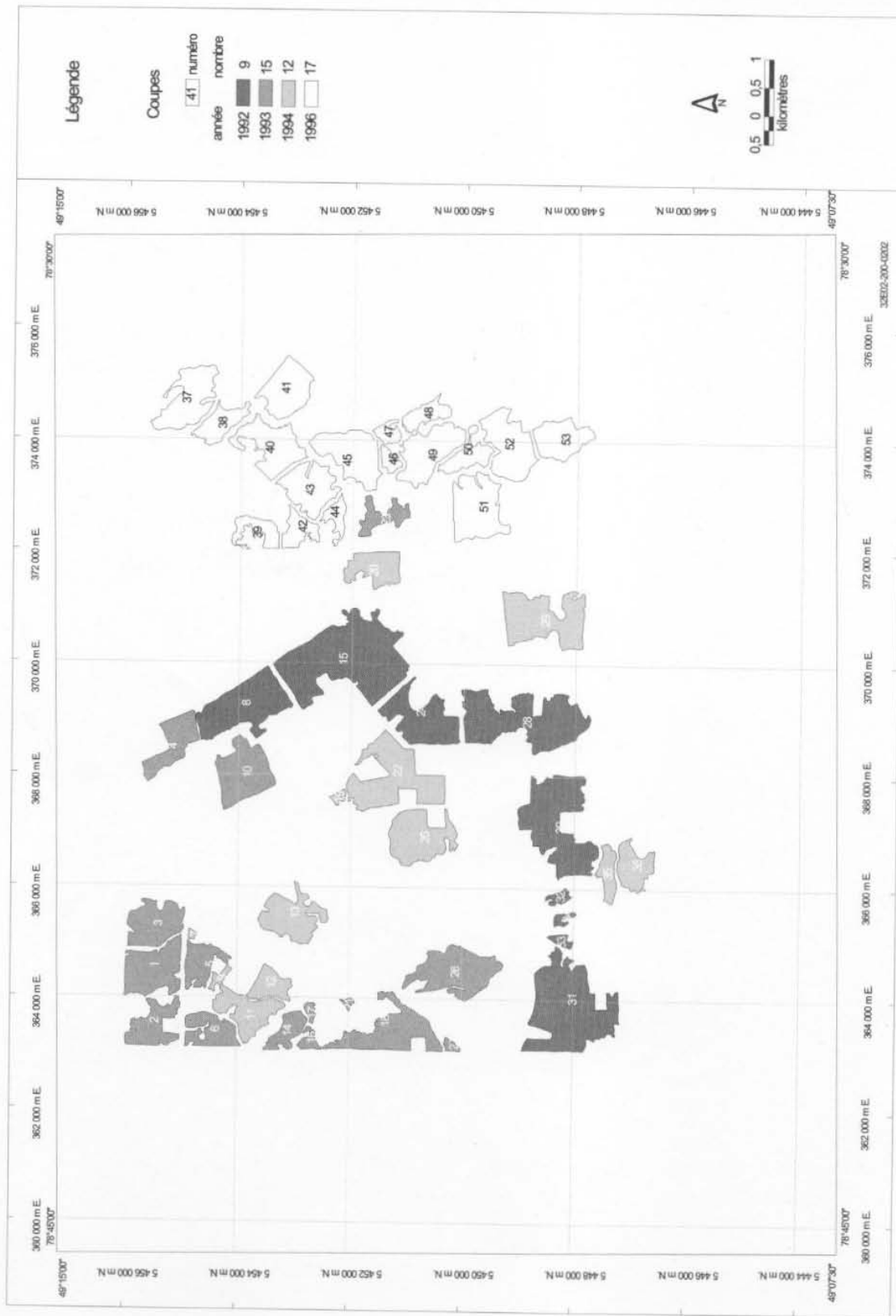


Figure 17. Carte de référence (répartition des 53 coupes sélectionnées pour l'analyse quantitative).

Annexe E

Ortho-images radar et optiques

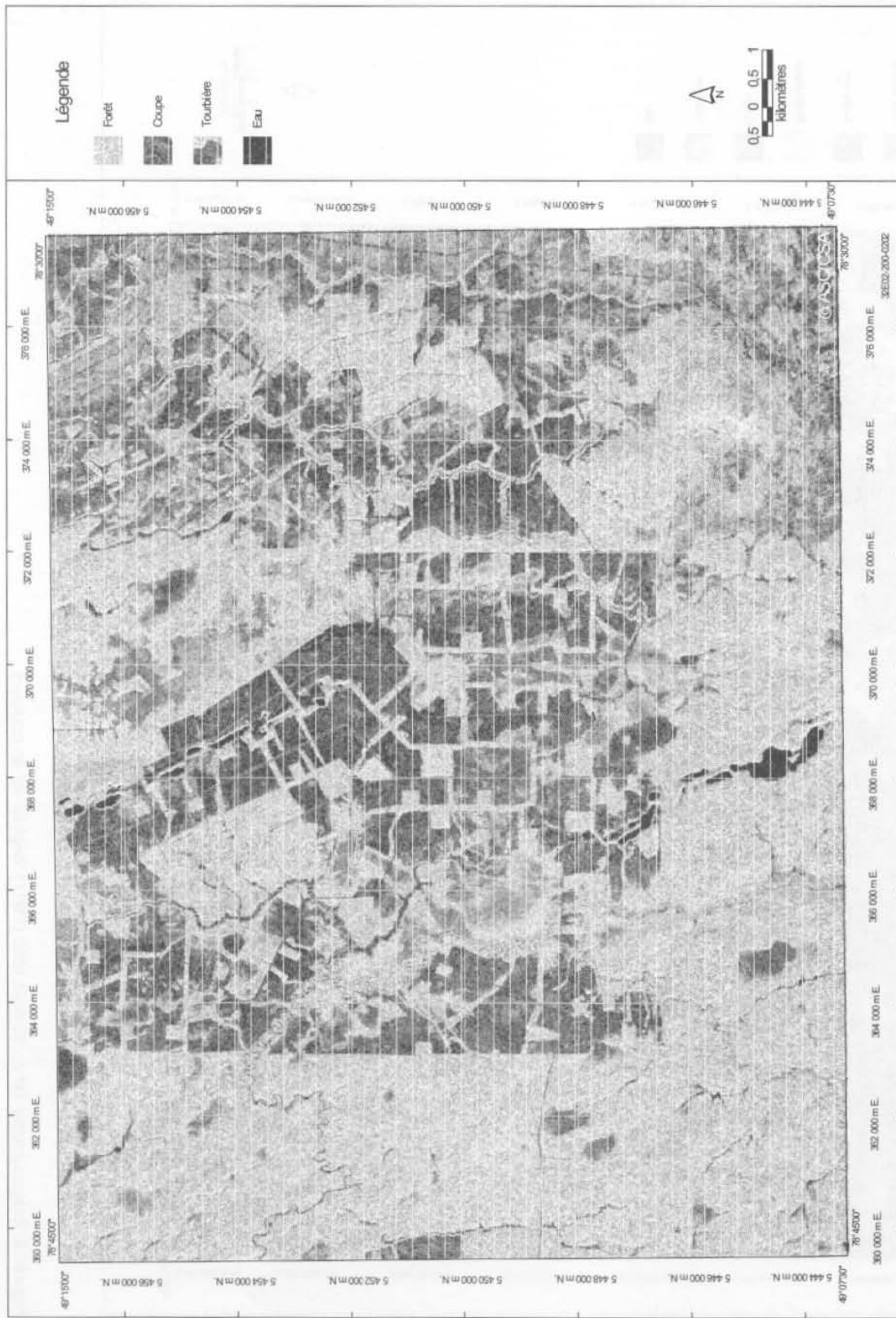


Figure 18. Image RADARSAT RSO du 5 avril 1997 (RSO1).

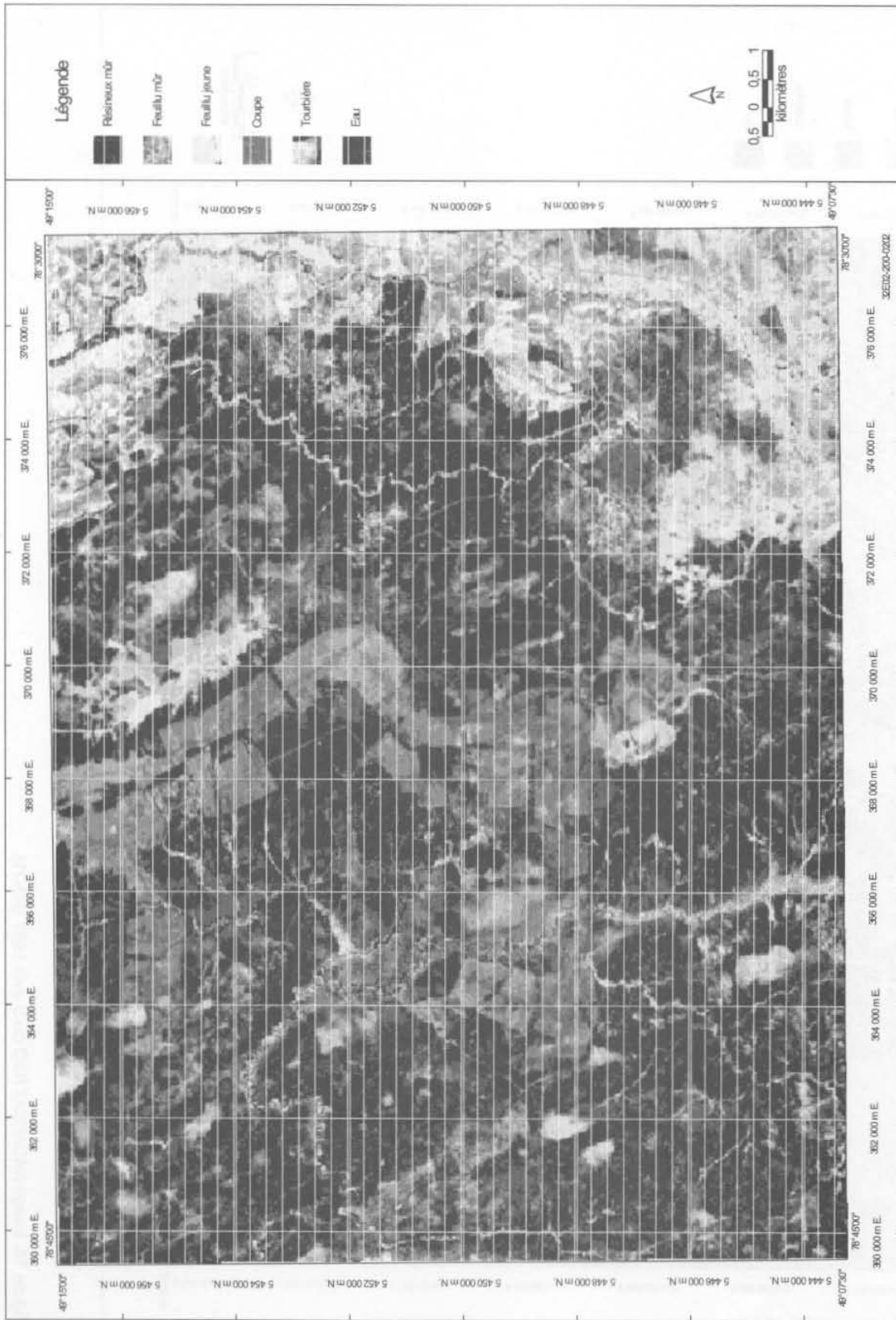


Figure 19. Image Landsat TM du 25 août 1993 (TM1) L'original est en couleurs.

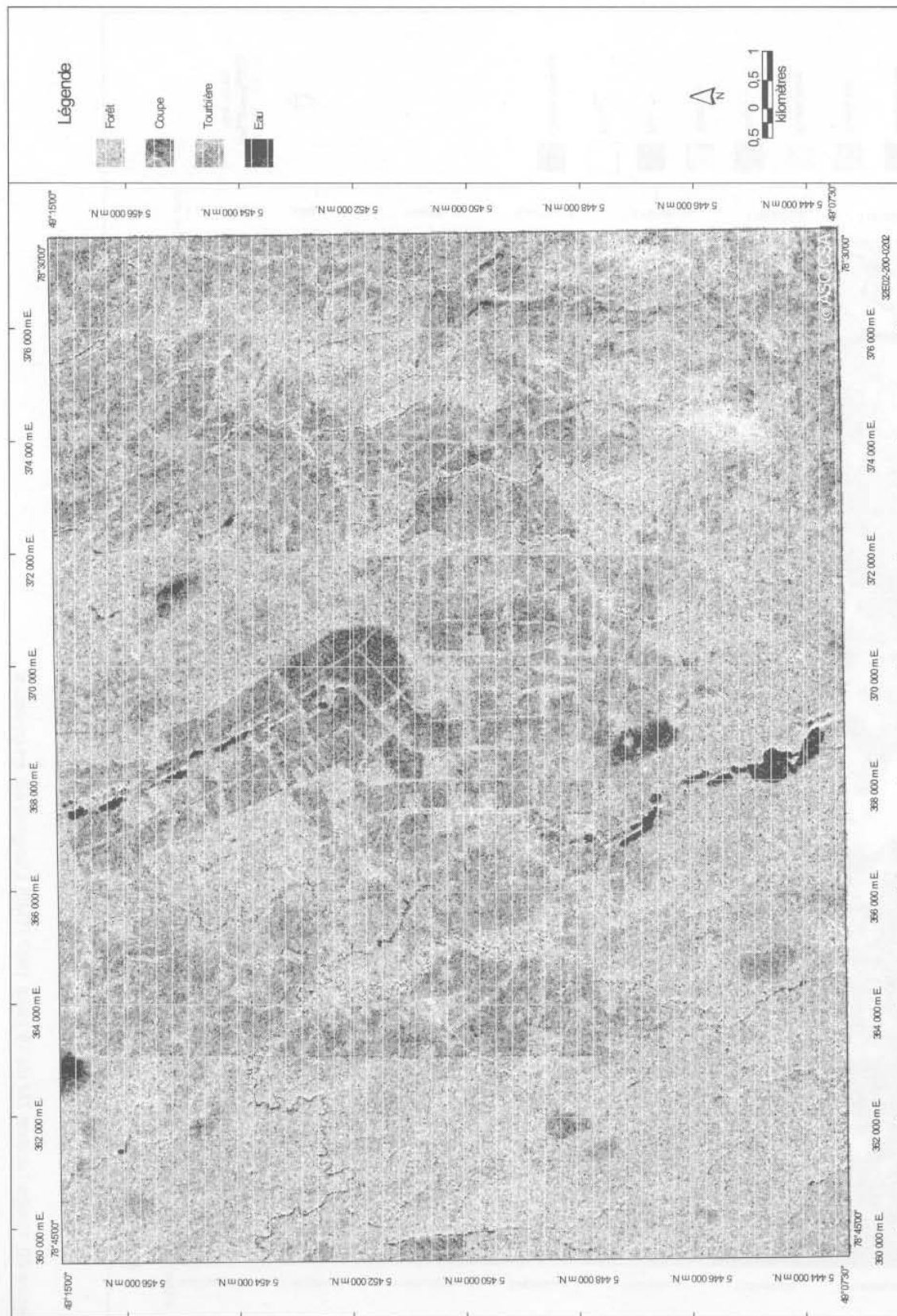


Figure 21. Image RADARSAT RSO du 12 mars 1997 (RSO2).

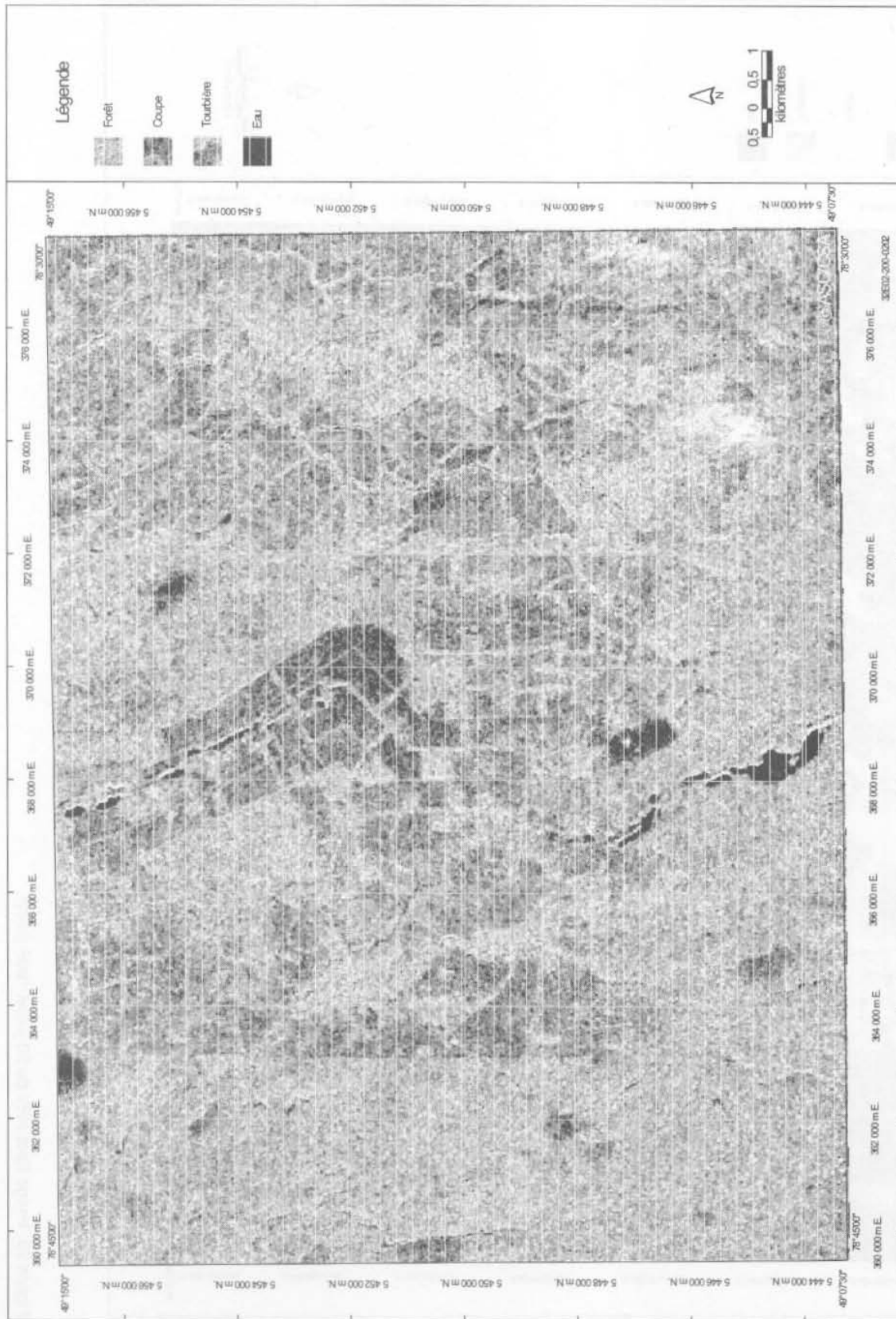


Figure 22. Image RADARSAT RSO du 5 mars 1997 (RSO3).



Figure 23. Image Spot HRV du 20 juillet 1996 (HRV).

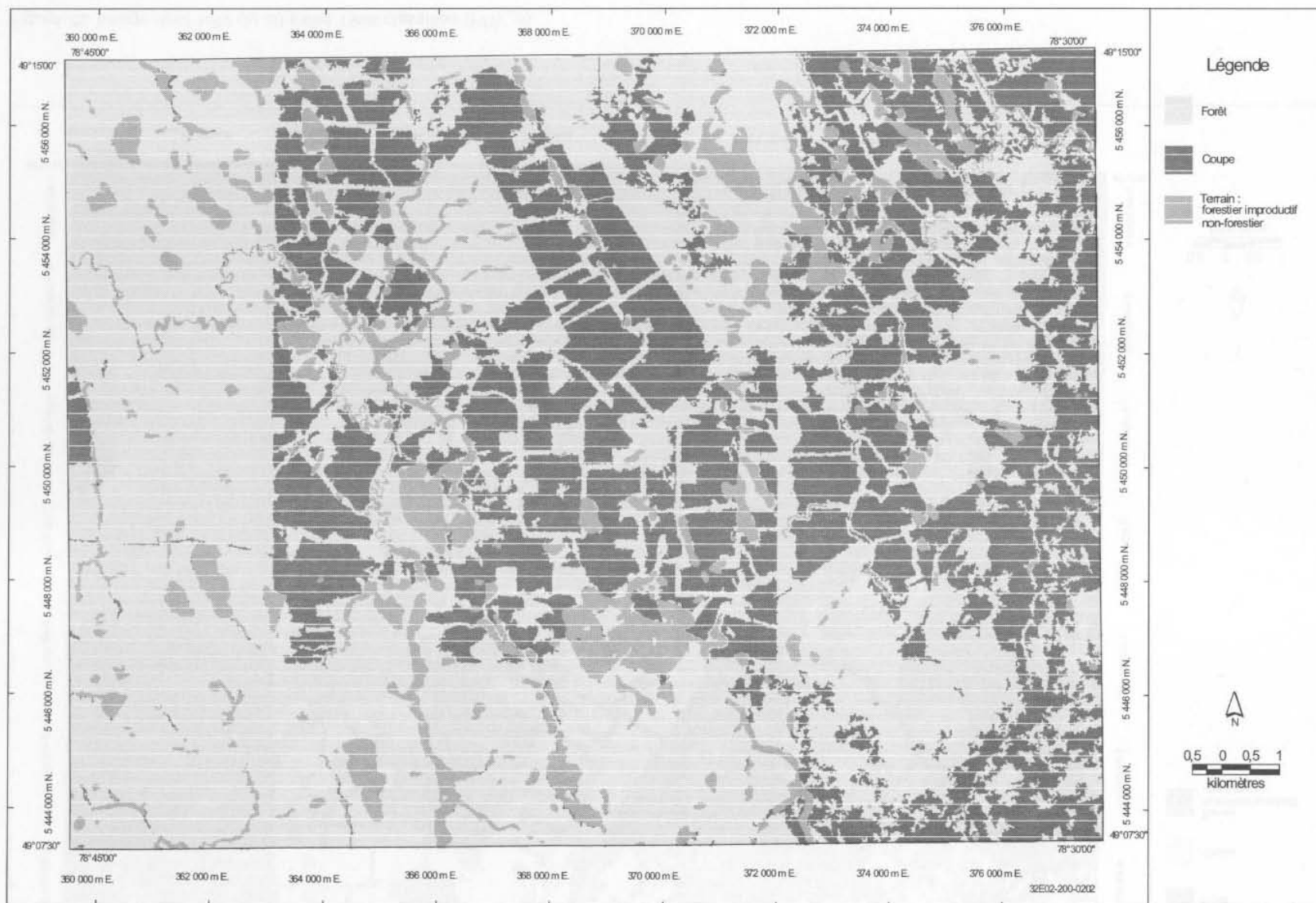


Figure 24. Image RADARSAT RSO du 5 avril 1997 classifiée (RSO1_c).

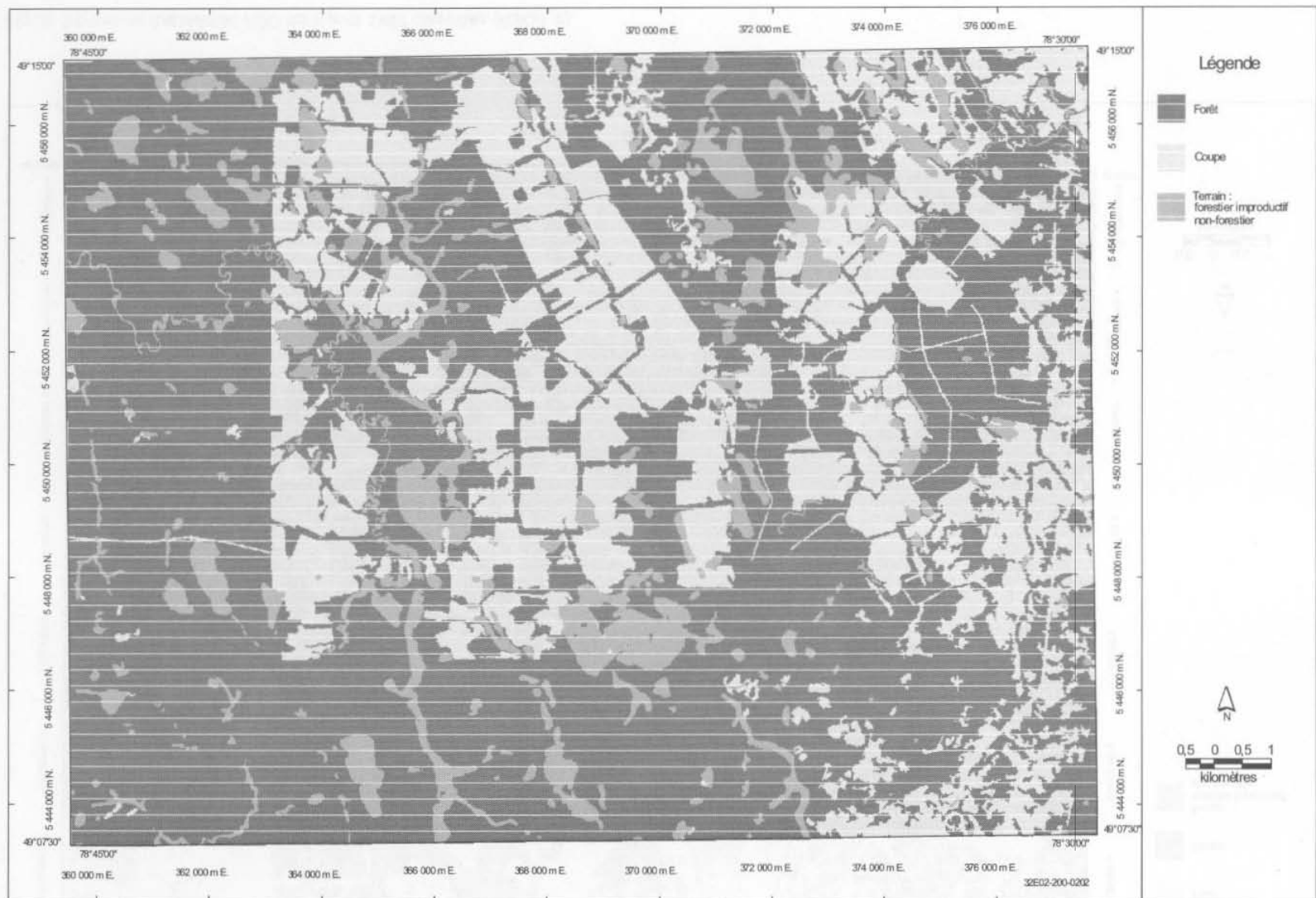


Figure 25. Image Spot HRV du 20 juillet 1996 classifiée (HRV_c).

Annexe F

Statistiques descriptives pour les 17 coupes récentes

Tableau 5. Statistiques descriptives : estimation des superficies de 17 coupes

Variable	Nombre de coupes	Moyenne	Variance	Écart-type	Écart-type p.r. à la moyenne	Minimum	Maximum
superficie (ha) : <i>carte de référence</i>	17	50,10	761,87	27,60	6,69	10,24	91,79
superficie (ha) :							
RSO1	17	51,24	803,72	28,35	6,88	10,27	94,45
TM	17	51,32	806,44	28,40	6,89	10,28	96,34
RSO2	17	53,32	900,66	30,01	7,28	10,17	99,72
RSO3	17	51,06	812,03	28,50	6,91	8,77	98,89
HRV	17	51,75	800,37	28,29	6,86	9,98	93,50
RSO1_c	17	48,26	808,39	28,43	6,90	9,36	93,11
HRV_c	17	50,59	767,57	27,71	6,72	10,59	92,11
écart (ha) :							
RSO1	17	1,14	1,35	1,16	0,28	-0,80	2,70
TM	17	1,22	1,77	1,33	0,32	-0,90	4,55
RSO2	17	3,22	22,70	4,76	1,16	-6,15	10,20
RSO3	17	0,96	16,94	4,12	1,00	-7,92	7,10
HRV	17	1,64	1,30	1,14	0,28	-0,26	3,47
RSO1_c	17	-1,85	5,18	2,28	0,55	-6,75	1,32
HRV_c	17	0,49	2,06	1,43	0,35	-2,66	2,32
écart (valeur absolue) (ha) :							
RSO1	17	1,32	0,86	0,93	0,23	0,03	2,70
TM	17	1,32	1,48	1,22	0,30	0,04	4,55
RSO2	17	4,43	12,88	3,59	0,87	0,07	10,20
RSO3	17	3,41	5,59	2,37	0,57	0,00	7,92
HRV	17	1,68	1,19	1,09	0,27	0,14	3,47
RSO1_c	17	2,25	3,42	1,85	0,45	0,06	6,75
HRV_c	17	1,27	0,60	0,78	0,19	0,18	2,66
erreur (%) :							
RSO1	17	2,71	3,06	1,75	0,42	0,30	6,39
TM	17	2,90	5,80	2,41	0,58	0,20	9,30
RSO2	17	9,87	176,48	13,28	3,22	0,68	58,67
RSO3	17	8,78	61,93	7,87	1,91	0,01	33,74
HRV	17	3,74	5,12	2,26	0,55	0,51	8,19
RSO1_c	17	7,21	71,74	8,47	2,05	0,07	29,84
HRV_c	17	3,52	10,36	3,22	0,78	0,35	12,22
précision (%) :							
RSO1	17	97,29	3,06	1,75	0,42	93,61	99,70
TM	17	97,10	5,80	2,41	0,58	90,71	99,80
RSO2	17	90,13	176,48	13,28	3,22	41,33	99,32
RSO3	17	91,22	61,93	7,87	1,91	66,26	99,99
HRV	17	96,26	5,12	2,26	0,55	91,81	99,49
RSO1_c	17	92,79	71,74	8,47	2,05	70,17	99,93
HRV_c	17	96,48	10,36	3,22	0,78	87,78	99,65

Tableau 6. Statistiques descriptives : estimation du déplacement de 17 contours

Variable	Nombre de coupes	Moyenne	Variance	Écart-type	Écart-type p.r. à la moyenne	Minimum	Maximum
Intersection (ha) :							
RSO1	17	48,83	748,55	27,36	6,64	9,70	90,18
TM	17	48,39	741,59	27,23	6,60	9,10	90,09
RSO2	17	47,77	787,95	28,07	6,81	9,20	90,59
RSO3	17	46,38	705,07	26,55	6,44	8,18	89,03
HRV	17	49,22	749,83	27,38	6,64	9,54	90,54
RSO1_c	17	46,65	764,69	27,65	6,71	8,92	89,45
HRV_c	17	48,53	734,40	27,10	6,57	9,83	89,66
Excès (ha) :							
RSO1	17	2,41	1,80	1,34	0,33	0,57	5,02
TM	17	2,94	1,86	1,36	0,33	1,18	6,25
RSO2	17	5,55	10,78	3,28	0,80	0,97	12,13
RSO3	17	4,69	7,68	2,77	0,67	0,59	9,87
HRV	17	2,53	1,22	1,10	0,27	0,44	4,18
RSO1_c	17	1,61	0,96	0,98	0,24	0,45	3,66
HRV_c	17	2,07	0,82	0,91	0,22	0,55	4,29
Manque (ha) :							
RSO1	17	1,27	0,57	0,76	0,18	0,38	3,18
TM	17	1,72	0,71	0,84	0,20	0,46	3,36
RSO2	17	2,33	5,75	2,40	0,58	0,09	9,06
RSO3	17	3,72	9,28	3,05	0,74	0,56	12,88
HRV	17	0,88	0,66	0,81	0,20	0,13	2,57
RSO1_c	17	3,45	3,01	1,73	0,42	0,62	7,32
HRV_c	17	1,57	1,92	1,39	0,34	0,17	4,91
Différence (Excès - Manque) (ha) :							
RSO1	17	1,14	1,35	1,16	0,28	-0,80	2,70
TM	17	1,22	1,77	1,33	0,32	-0,90	4,55
RSO2	17	3,22	22,70	4,76	1,16	-6,15	10,20
RSO3	17	0,96	16,94	4,12	1,00	-7,92	7,10
HRV	17	1,64	1,30	1,14	0,28	-0,26	3,47
RSO1_c	17	-1,85	5,18	2,28	0,55	-6,75	1,32
HRV_c	17	0,49	2,06	1,43	0,35	-2,66	2,32
Somme (Excès + Manque) (ha) :							
RSO1	17	3,68	3,39	1,84	0,45	1,11	8,20
TM	17	4,65	3,38	1,84	0,45	2,17	7,94
RSO2	17	7,88	10,36	3,22	0,78	2,01	14,05
RSO3	17	8,41	16,96	4,12	1,00	2,65	17,84
HRV	17	3,41	2,45	1,57	0,38	1,11	6,75
RSO1_c	17	5,06	2,76	1,66	0,40	1,63	8,15
HRV_c	17	2,95	2,25	1,50	0,36	1,00	6,86
vecteur (algébrique) (m) :							
RSO1	17	2,97	35,00	5,92	1,43	-11,45	12,03
TM	17	4,31	33,37	5,78	1,40	-5,17	16,62
RSO2	17	9,06	412,86	20,32	4,93	-39,22	53,82
RSO3	17	0,35	407,21	20,18	4,89	-36,79	27,80
HRV	17	5,57	46,16	6,79	1,65	-11,94	14,27
vecteur (valeur absolue) (m) :							
RSO1	17	11,68	13,32	3,65	0,89	6,63	20,97
TM	17	17,04	23,70	4,87	1,18	9,24	27,33
RSO2	17	29,68	196,54	14,02	3,40	9,23	60,26
RSO3	17	31,40	250,12	15,82	3,84	13,21	73,77
HRV	17	12,45	20,45	4,52	1,10	6,93	22,64

Annexe G

Intersection des polygones

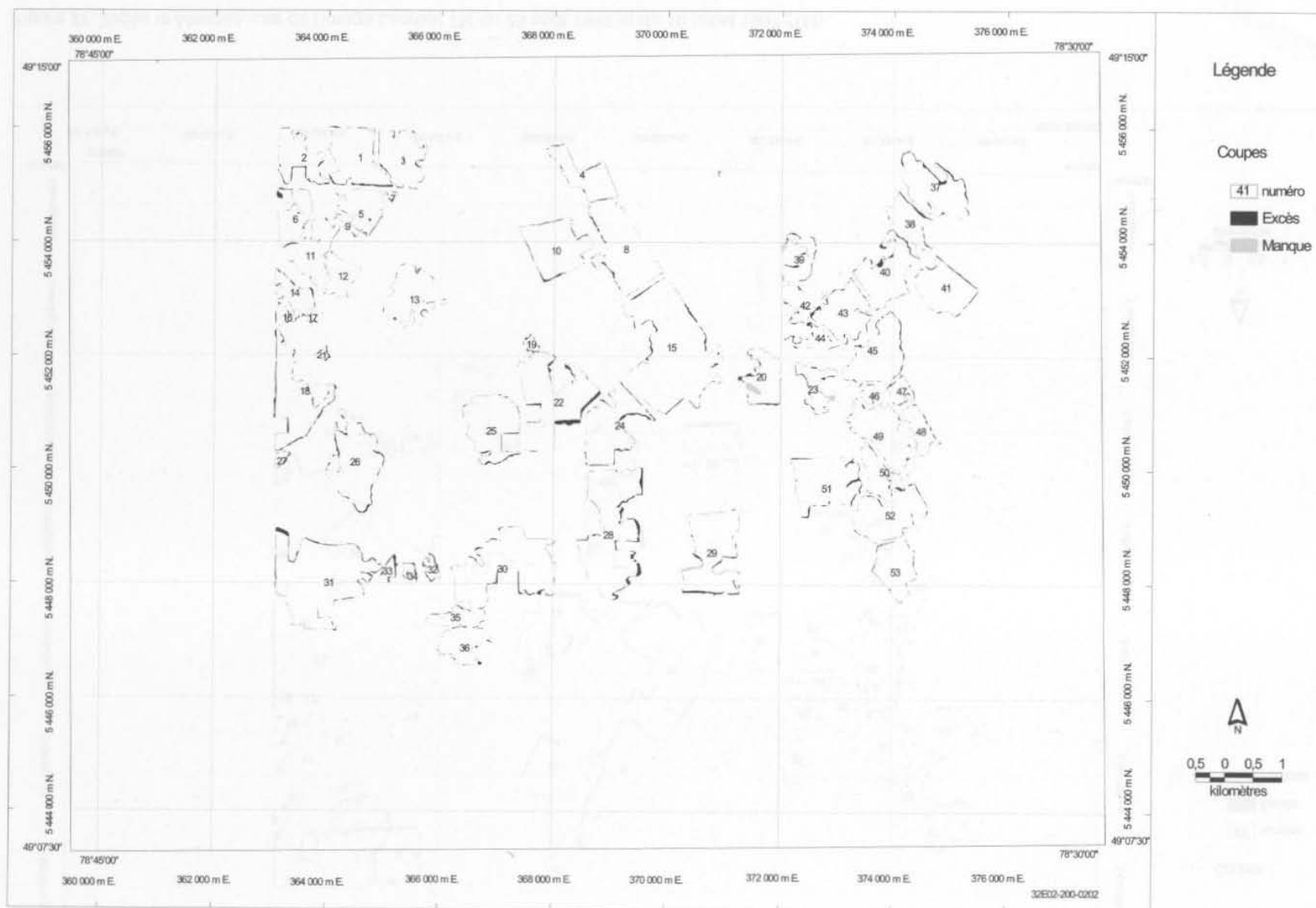


Figure 26. *Excès et Manque*, cas de l'image RADARSAT RSO du 5 avril 1997 (RSO1).

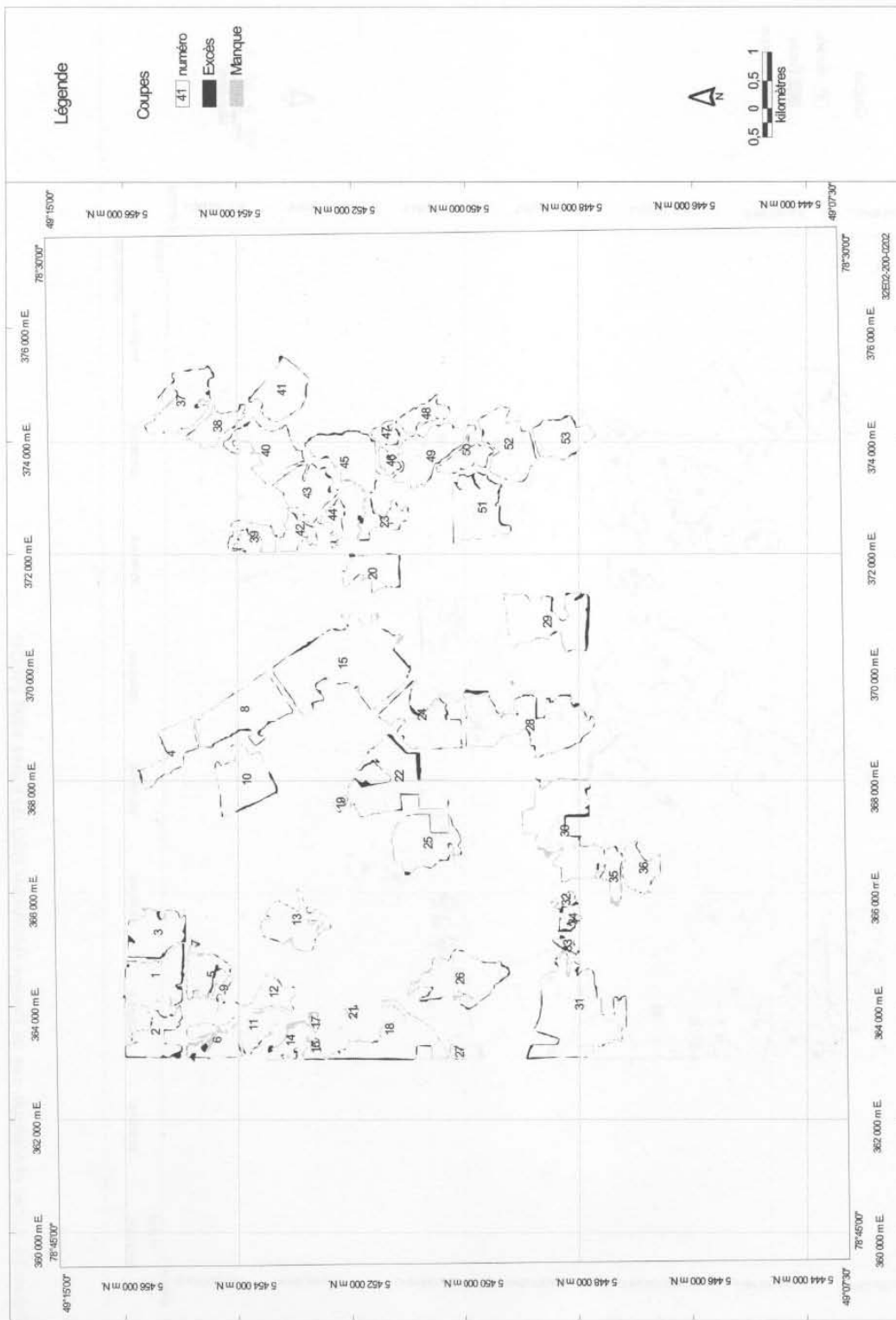


Figure 27. Excès et Manque, cas de l'image Landsat TM du 25 août 1993 et du 10 juillet 1997 (TM).

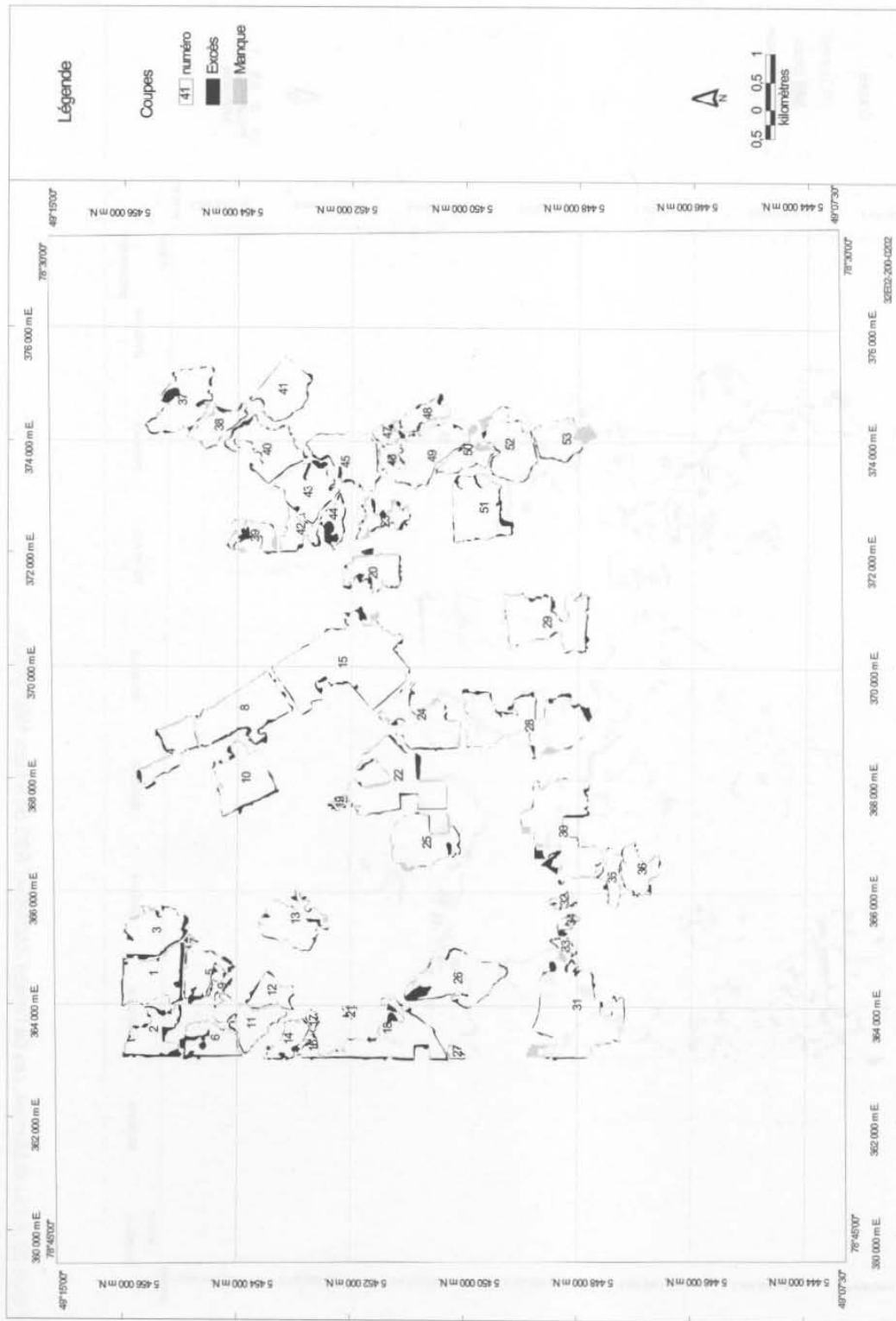


Figure 28. Excès et Manque, cas de l'image RADARSAT RSO du 12 mars 1997 (RSO2).

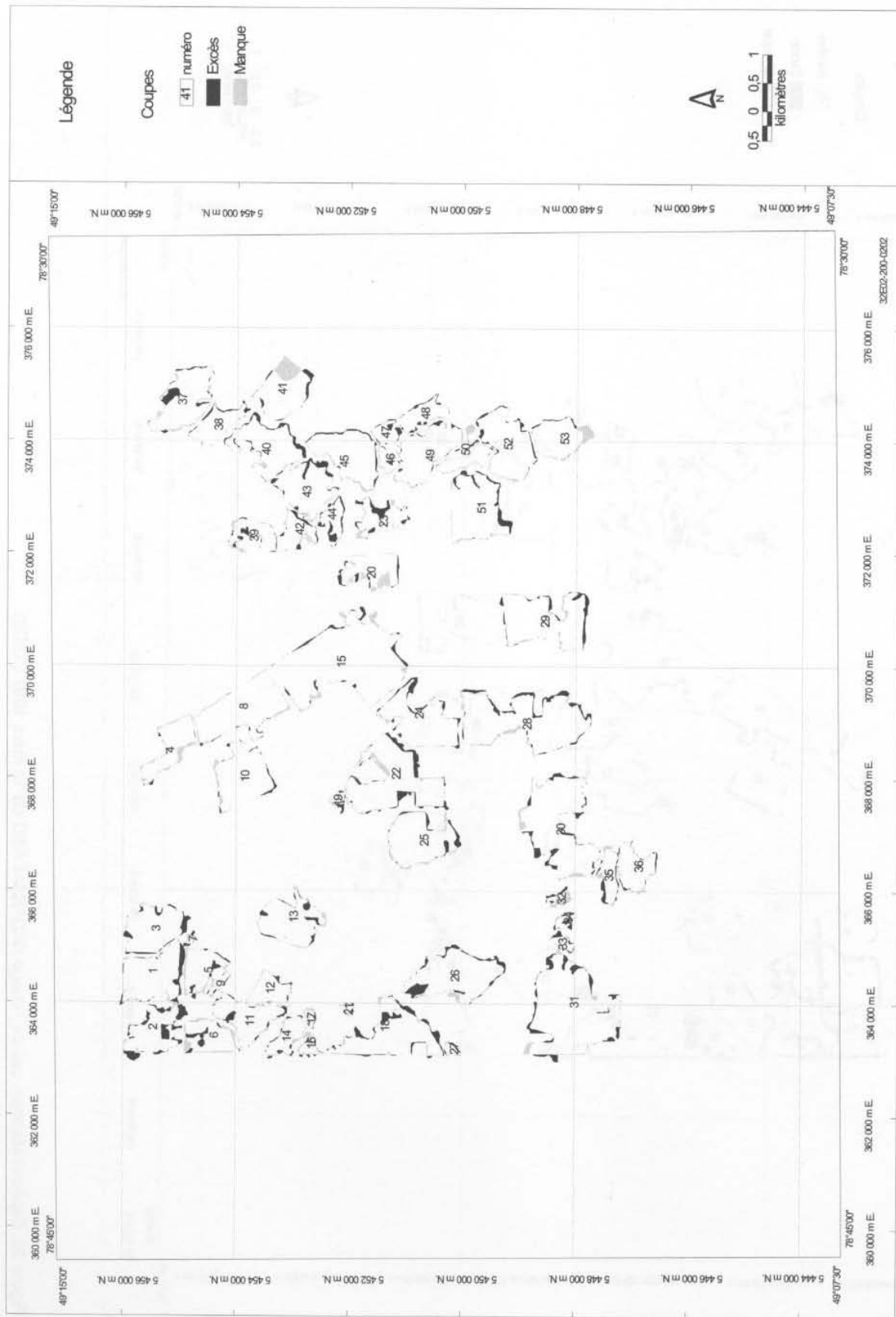


Figure 29. Excès et Manque, cas de l'image RADARSAT RSO du 5 mars 1997 (RSO3).

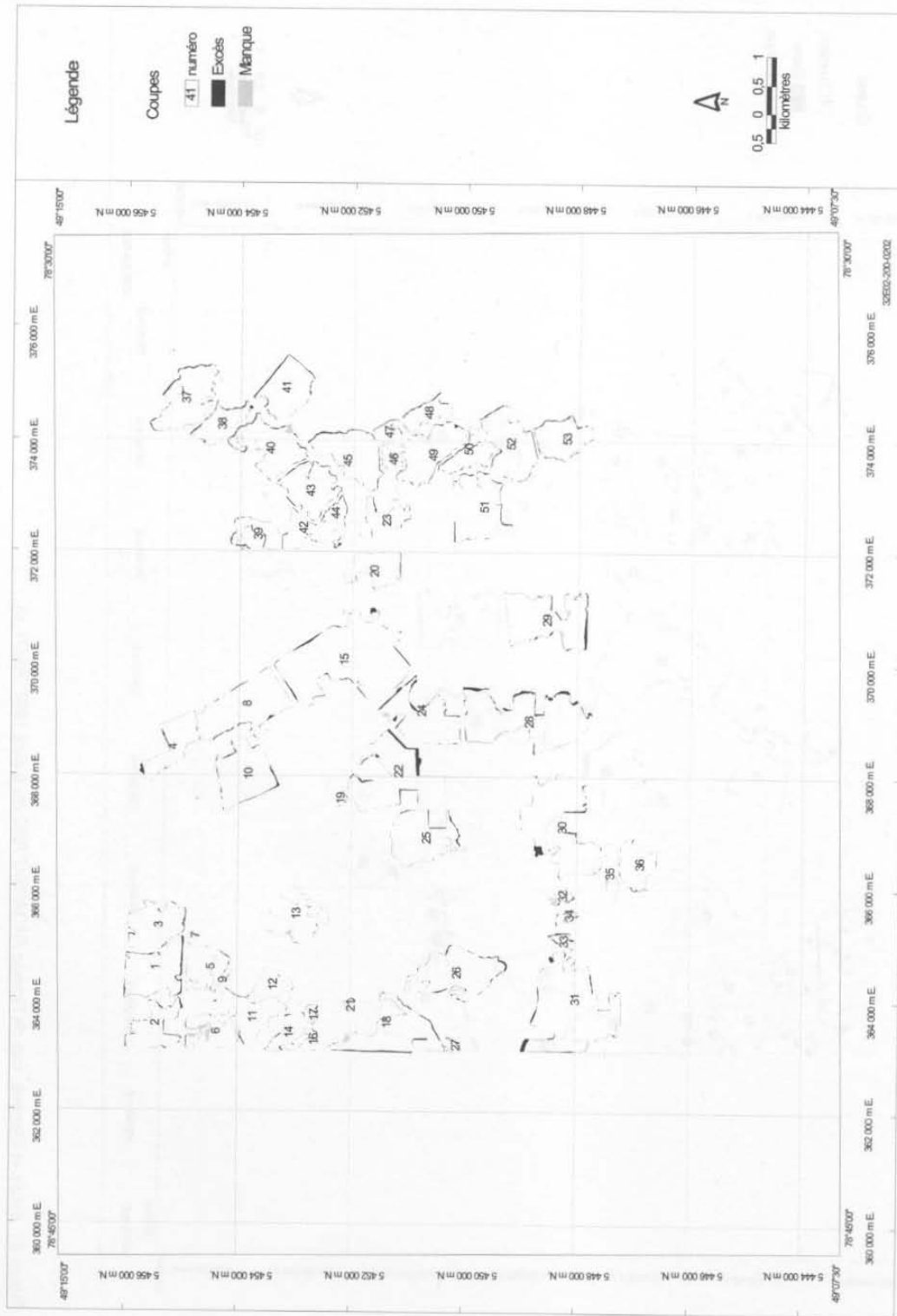


Figure 30. Excès et Manque, cas de l'image Spot HRV du 20 juillet 1996 (HRV).

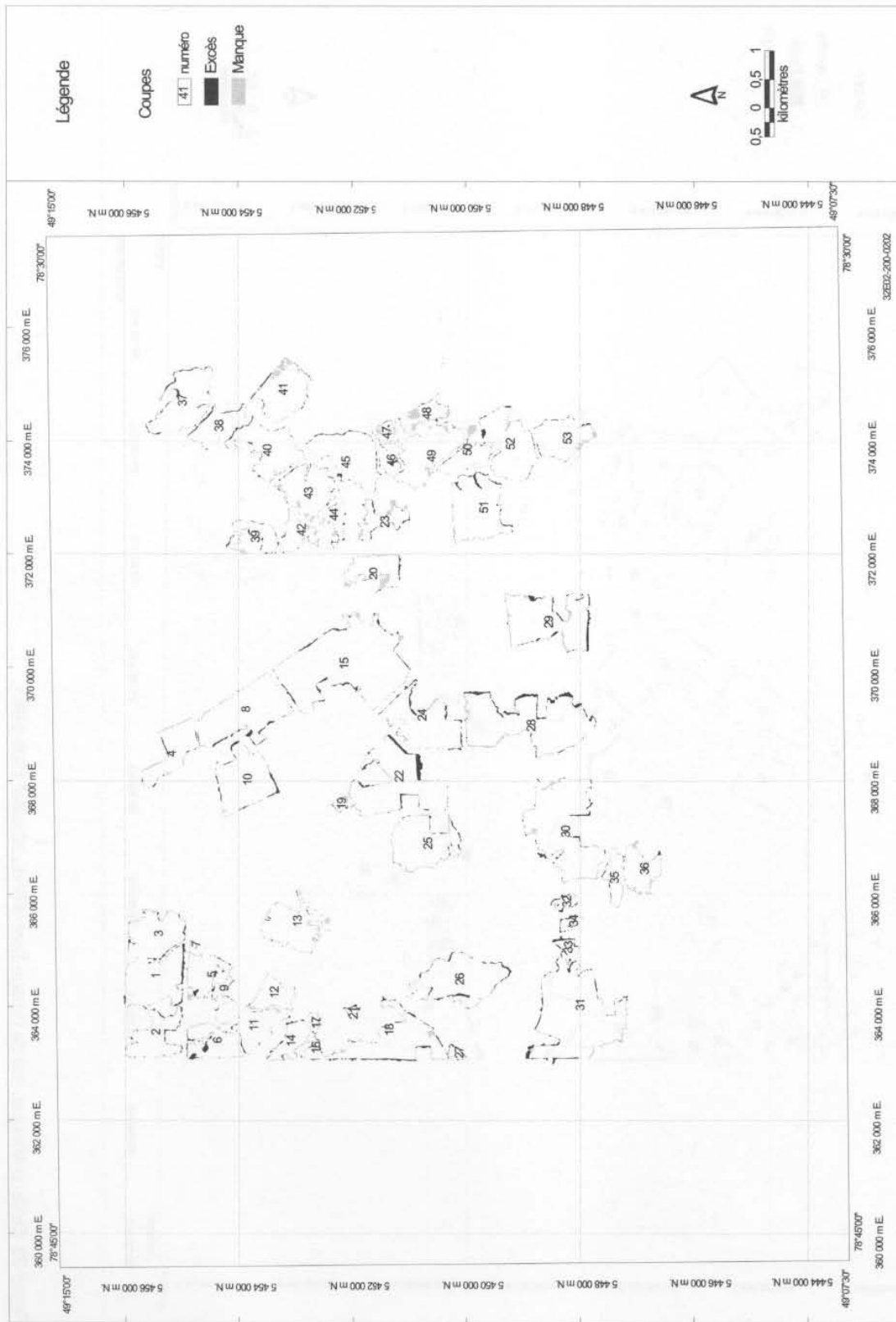


Figure 31. Excès et Manque, cas de l'image RADARSAT RSO du 5 avril 1997 (RSO1_c).

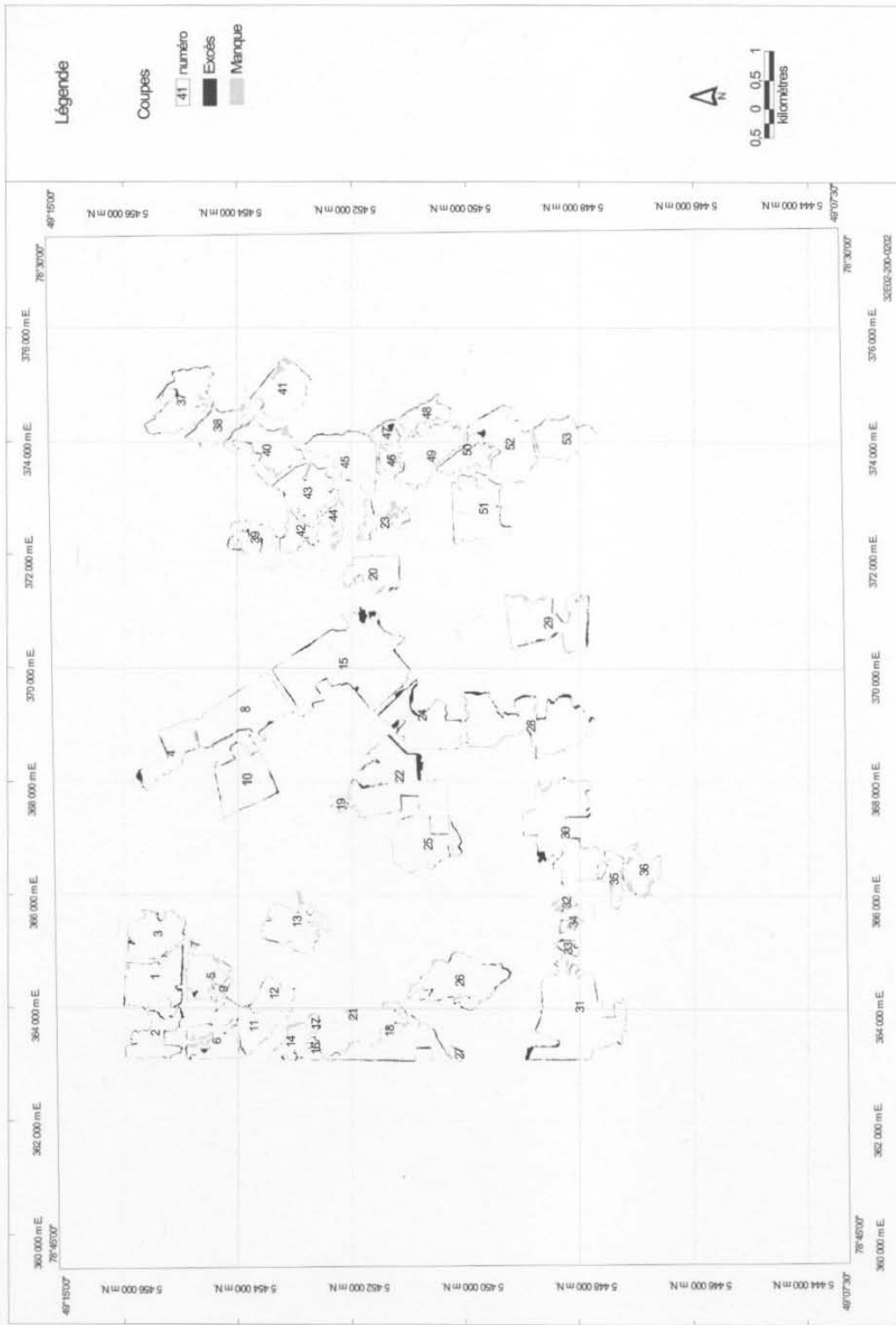


Figure 32. Excès et Manque, cas de l'image Spot HRV du 20 juillet 1996 (HRV_c).

Mario HINSE détient un B.Sc. en géographie (1982) et une M.Sc. en télédétection (1986) de l'Université de Sherbrooke. Il travaille depuis 1992 au Service des technologies à référence spatiale (STARS) du ministère des Ressources naturelles du Québec (MRN), comme chargé de projets. À ce titre, il réalise et coordonne différents projets de télédétection et de géomatique et plus particulièrement de développement des utilisations des données de RADARSAT. Auparavant, il a travaillé pour le compte de Forêt Canada à Edmundston, N.-B., à un projet de télédétection appliquée à la cartographie forestière, de même que pour le Centre d'applications et de recherches en télédétection de l'Université de Sherbrooke (CARTEL) à un projet international de transfert technologique en télédétection avec l'Institut agronomique et vétérinaire Hassan II de Rabat au Maroc.



Jean-Pierre LÉTOURNEAU détient un B.Sc. en génie forestier (1976) de l'Université Laval. Il est depuis 1976 à l'emploi du ministère des Ressources naturelles comme ingénieur forestier. Jusqu'à 1987, il a travaillé en cartographie forestière, comme responsable du développement des applications de la télédétection. En 1987, il devient responsable de la Division de la cartographie forestière puis, en 1990, chef du nouveau Service de la comptabilité forestière, qui doit mettre en place un programme de mise à jour des cartes forestières en partenariat avec les 40 unités de gestion et les industriels forestiers, en utilisant la photographie aérienne, la télédétection spatiale et les relevés de terrain. Il participe présentement à la mise au point et à l'implantation des fonctions de mise à jour dans le système d'information écoforestière (SIEF).

Pierre LAFRAMBOISE détient un B.Sc. en géographie (1975) et une M.Sc. de l'environnement (1979) de l'Université du Québec à Montréal. À la Société de développement de la Baie James de 1975 à 1983, il réalise plusieurs projets de télédétection touchant l'inventaire des ressources et le suivi de l'environnement. Il travaille au Centre québécois de coordination de la télédétection en 1984-1985, puis il fait une scolarité de doctorat à la Faculté de foresterie de l'Université Laval dans le domaine de la gestion du feu et de l'aménagement forestier. Il travaille à partir de 1986 à la Direction de la sylviculture du ministère des Ressources naturelles dans le cadre d'un programme de brûlage dirigé et, depuis 1991, dans le domaine des inventaires forestiers où il réalise plusieurs travaux en télédétection. Il a participé en 1994-1995 à la production des spatio-cartes forestières synthèses. Il est aussi responsable de la diffusion des cartes forestières.



Le ministère des Ressources naturelles est responsable de l'administration et de la gestion des forêts publiques dans l'intérêt général du Québec. Pour bien remplir cette mission, son unité autonome de service **Forêt Québec** doit se préoccuper de connaître les ressources forestières dont elle dispose. Elle réalise donc, tous les dix ans environ, un inventaire forestier qu'elle met ensuite à jour chaque année ; cet inventaire est un processus intégré dans l'acquisition d'informations par la prise de photographies aériennes et par le suivi des interventions forestières en région. Les données d'inventaire constituent des connaissances de base pour exploiter et aménager les forêts dans l'optique du développement durable et de l'utilisation polyvalente du milieu. La Direction de la recherche forestière encourage une meilleure connaissance des ressources forestières en réalisant des études sur les possibilités de la télédétection par satellite en vue de créer des mesures rigoureuses et des outils complémentaires pour acquérir des informations sur le patrimoine forestier.

MATEJEK, S., G. DÉSAULNIERS, M. HINSE, J.-P. LÉTOURNEAU et P. LAFRAMBOISE, 2000. RADARSAT RSO et la mise à jour des cartes forestières. Gouv. du Québec, min. des Ress. nat., Forêt Québec, Dir. de la rech. for. Mémoire de recherche forestière n° 137.

Errata

(Page – Colonne – Parag. – Ligne)

13 2 5

B_{ij}

15 1 8

$$\bar{D}_{ij} = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} \bar{D}_{ijk} \quad \text{où } \bar{D}_{ijk} = (\bar{B}_{ijk} - \bar{A}_{jk})$$

15 2 1 2

\bar{D}_{ijk}

15 2 3

$$|\bar{D}_{ij}| = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} |\bar{D}_{ijk}|$$