

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

par

NATHALIE LAPRISE

UTILISATION DE L'IMAGERIE NUMÉRIQUE AÉROPORTÉE
(CAPTEURS DAEDALUS ET MEIS) POUR IDENTIFIER DIFFÉRENTS NIVEAUX DE
PERTURBATIONS D'UN FEU DE FORÊT

18 DÉCEMBRE 1997



Mise en garde/Advice

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

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

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

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

*"Le langage est source de malentendu."
Le Petit Prince
Antoine de Saint-Exupéry*

RÉSUMÉ

Les feux détruisent de vastes superficies de forêt. La mise à jour des cartes forestières ne se fait pas nécessairement après un incendie mais plutôt à tous les dix ans. Pour disposer d'information récente, les gestionnaires des milieux forestiers achètent les photographies aériennes touchant le territoire perturbé. Cependant, il existe depuis quelques décennies une autre source d'information qui ressemble à la photographie aérienne soit l'imagerie numérique aéroportée.

À travers ce projet, nous allons étudier la possibilité d'utiliser l'imagerie numérique aéroportée pour cartographier les secteurs perturbés lors d'un feu de forêt. Deux sources d'information, issues du capteur Daedalus et MEIS, ont été utilisées pour obtenir une nouvelle cartographie du territoire après feu. Comme les données numériques ont été enregistrées simultanément lors d'un survol, elles deviennent intéressantes à comparer.

Les données numériques aéroportées ont d'abord été corrigées radiométriquement afin d'atténuer l'effet de réflectance bidirectionnelle. La méthode de correction consiste à normaliser les données numériques à partir d'une équation de type polynomial et par la suite de repositionner l'histogramme modifié en fonction de l'histogramme original.

La classification des données a permis d'identifier 11 groupements distincts: les milieux humides (tourbières claire et foncée), les milieux dénudés, la végétation résineuse (épinette noire, pin gris, végétation résineuse basse), la végétation feuillue (peupleraie et végétation feuillue), la régénération feuillue, la végétation résineuse partiellement brûlée et les brûlis.

Les résultats obtenus par les deux capteurs sont comparables en terme de superficies couvertes par les groupements. Un regroupement des classes permet de procéder à une comparaison des résultats avec la carte forestière après feu. Dans l'ensemble, les résultats sont assez concluants. Nous dénotons une sous-évaluation des brûlis et des résineux au profit des résineux partiellement brûlés.

Les résultats obtenus à travers cette recherche montrent que les données numériques aéroportées peuvent caractériser différentes intensités de perturbations d'un feu.

REMERCIEMENTS

Je tiens, avant tout, à exprimer ma gratitude envers mon directeur de mémoire, le Dr Gilles Lemieux, qui m'a proposé ce projet de recherche et qui a su me diriger dans ce travail. De même, je tiens à remercier Gilles Vachon, Raymond Bégin, Daniel Bégin et Réal Beauregard pour leur aide technique et leurs conseils tout au long de cette recherche. Je désire également exprimer mes sincères remerciements à Brigitte Boucher, pour m'avoir conseillée et éclairée sur certains points obscurs tout au long de ce projet. Je ne pourrais oublier Ghislain Laprise qui a lu et corrigé la version préliminaire de ce travail. Je tiens à remercier la MRC de Maria-Chapdelaine qui m'a libérée au cours des derniers mois afin d'achever ce projet. De plus, ce travail n'aurait pu être mis à terme sans toutes les personnes qui ont collaboré de près ou de loin à celui-ci.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
 CHAPITRE I.....	 1
 CHAPITRE II	 6
2.1 LE FEU DE 1983 DANS LE SECTEUR DU LAC BOURGAT (LAC-SAINT-JEAN).....	7
2.2 L'ACQUISITION DES IMAGES NUMÉRIQUES AÉROPORTÉES	10
2.2.1 <i>Les caractéristiques des données du capteur Daedalus.....</i>	<i>10</i>
2.2.2 <i>Les caractéristiques des données du capteur MEIS.....</i>	<i>11</i>
2.3 LA DÉLIMITATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE	13
2.4 LE TERRITOIRE À L'ÉTUDE	13
2.4.1 <i>L'information disponible pour caractériser le territoire.....</i>	<i>14</i>
2.4.2 <i>La description du territoire à l'étude.....</i>	<i>16</i>
 CHAPITRE III.....	 21
3.1 LES CORRECTIONS RADIOMÉTRIQUES.....	22
3.1.1 <i>L'effet de réflectance bidirectionnelle.....</i>	<i>22</i>
3.2 LA CORRECTION DE L'EFFET DE RÉFLECTANCE BIDIRECTIONNELLE... 23	
3.2.1 <i>La correction de l'effet de réflectance bidirectionnelle suivant une courbe polynomiale.....</i>	<i>26</i>
3.3 LE RAJUSTEMENT DES IMAGES CORRIGÉES PAR RAPPORT À LA MOYENNE DES IMAGES ORIGINALES	34

CHAPITRE IV	40
4.1 LA CLASSIFICATION	41
4.1.1 <i>Le choix des bandes spectrales</i>	42
4.1.2 <i>Le choix des sites échantillons</i>	44
4.2 L'ANALYSE DES CLASSIFICATIONS	55
4.2.1 <i>Les matrices de confusion</i>	55
4.2.2 <i>Les images classifiées</i>	59
 CHAPITRE V	 70
 CONCLUSION	 75
BIBLIOGRAPHIE	78

ANNEXE 1: Les acétates des cartes forestières

ANNEXE 2: L'intensité moyenne des sites échantillons pour les corrections de la réflectance bidirectionnelle

ANNEXE 3: Les équations permettant de réaliser les corrections de l'effet de réflectance bidirectionnelle

ANNEXE 4: Les composantes images non corrigées et corrigées pour les capteurs Daedalus et MEIS

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Caractéristiques spectrales des bandes du capteur Daedalus	11
Tableau 2	Caractéristiques spectrales des bandes du capteur MEIS	12
Tableau 3	La matrice de confusion de la classification des bandes spectrales 3, 7 et 9 du capteur Daedalus	56
Tableau 4	La matrice de confusion de la classification des bandes spectrales 2, 5, et 7 du capteur MEIS	57
Tableau 5	Superficie couverte selon les regroupements pour la carte forestière après feu et les classifications.....	63
Tableau 6	Le regroupement des catégories afin de les comparer à la carte forestière après feu	64
Tableau 7	Différence de proportion entre les classifications et la carte forestière après feu	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Localisation du territoire à l'étude	8
Figure 2	Localisation des lignes de vol des capteurs Daedalus et MEIS.....	9
Figure 3	Territoire à l'étude.....	17
Figure 4	Localisation de la coupe forestière entre 1983 et 1993	19
Figure 5	Schématisation de l'effet de réflectance bidirectionnelle.....	24
Figure 6	Bande spectrale 3 (450-500 nm) avant correction pour le capteur Daedalus	25
Figure 7	Schématisation des hypothèses	27
Figure 8	Représentation des sites échantillons de la forêt résineuse saine utilisés pour faire les corrections radiométriques pour les données Daedalus.....	29
Figure 9a	Représentation des sites échantillons de la forêt résineuse saine utilisés pour faire les corrections radiométriques pour les données MEIS	30
Figure 9b	Représentation des sites échantillons de la forêt résineuse saine utilisés pour faire les corrections radiométriques pour les données MEIS.....	31
Figure 10	Schématisation de la procédure pour corriger l'effet de réflectance bidirectionnelle.....	32
Figure 11	Représentation de l'histogramme avant et après correction	34
Figure 12	Histogramme de la réflectance spectrale avant et après correction de l'effet de réflectance bidirectionnelle pour les différentes bandes spectrales des données Daedalus	35
Figure 13a	Histogramme de la réflectance spectrale avant et après correction de l'effet de réflectance bidirectionnelle pour les différentes bandes spectrales des données MEIS.....	36

Figure 13b	Histogramme de la réflectance spectrale avant et après correction de l'effet de réflectance bidirectionnelle pour les différentes bandes spectrales des données MEIS.....	37
Figure 14	Schématisation de l'élaboration d'une signature spectrale.....	45
Figure 15	Représentation de l'intensité moyenne des catégories pour le capteur Daedalus.....	47
Figure 16	Représentation de l'intensité moyenne des catégories pour le capteur MEIS.....	48
Figure 17	Classification par maximum de vraisemblance avec un filtre modal de 3X3, avec bandes spectrales 3, 7 et 9 pour le capteur Daedalus.....	60
Figure 18	Classification par maximum de vraisemblance avec un filtre modal de 3X3, avec bandes spectrales 2, 5 et 7 pour le capteur MEIS.....	61

LISTE DES PHOTOS

Photo 1	Vue aérienne vers le nord de la vallée près du lac Bluche montrant la récupération de bois après feu, 1993.....	20
Photo 2	Secteur non récolté montrant la régénération après feu d'une parcelle de pin gris, 1993.....	20

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Au Québec, l'écosystème boréal couvre une superficie de plus de 700 000 km² et se localise entre le 48^{ième} et le 53^{ième} parallèle. Il est caractérisé par une dominance d'épinette noire (*Picea mariana*) accompagnée par d'autres essences telles que le sapin baumier (*Abies balsamea*), le pin gris (*Pinus divaricata*), le bouleau à papier (*Betula papyrifera*), le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloïdes*).

L'écosystème boréal est affecté régulièrement par les feux. Malgré des moyens de plus en plus sophistiqués pour les détecter, les contrôler et les combattre, ils détruisent en moyenne annuellement 80 000 hectares de forêt (SOPFEU).

La disponibilité des sources d'information caractérisant un territoire incendié demeure problématique. Les cartes forestières ne sont pas nécessairement disponibles après un incendie. La mise à jour de celles-ci ne se fait pas systématiquement après un feu de forêt. La réédition des cartes forestières se fait généralement à chaque période de dix ans. Il faut donc se tourner vers d'autres sources pour obtenir des informations relatives aux périmètres brûlés.

Actuellement, la photographie aérienne est abondamment utilisée pour caractériser un territoire. Depuis plusieurs années, un autre outil a fait son apparition soit l'imagerie numérique (aéroportée ou satellitaire); l'imagerie satellitaire est la plus utilisée. Elle a déjà été employée pour cartographier ou évaluer les superficies affectées par les feux de forêt

(Husson 1982, Tanaka et al. 1983, Milne 1986, Jakubauskas et al. 1990, Lopez Garcia et Casselles 1991). De plus au cours des dernières années, la Direction de la gestion des stocks forestiers du MRN (SOPFEU) se sert de l'imagerie satellitaire pour obtenir un portrait exact et rapide des dommages causés à la forêt lors de grands feux comme celui près de Parent en Abitibi (1995). Avec cet outil, ils peuvent produire un contour préliminaire des brûlis partiels et des brûlis totaux.

À prime abord, l'utilisation de l'imagerie aéroportée (Daedalus et MEIS) peut paraître peu originale, puisqu'elle a été employée à différentes fins telles que la cartographie forestière (Lemieux et al. 1987, Hermann et al. 1988, Barnsley et Kay 1990, Brunelle et al. 1990, Gemmel et al. 1990, Matejek et al. 1990, Brand et al. 1991, Leckie et al. 1993), le suivi des épidémies de tordeuses de bourgeons de l'épinette (Ahern et al. 1986, Leckie 1987, Leckie et Ostaff 1988, Dupont et al. 1991), le suivi de feux actifs (Ambrosia 1990, Kaufman 1992), l'évaluation des températures de surface (Schmugge et al. 1991). Mais il n'en demeure pas moins qu'elle est peu utilisée. Malgré la bonne résolution spatiale des données, certains problèmes techniques (corrections radiométriques) et logistiques (coût d'acquisition des images, de l'équipement) empêchent son utilisation sur de grandes superficies.

L'imagerie numérique offre certaines possibilités comparativement à la photographie aérienne. Entre autres, elle dispose de plusieurs bandes spectrales représentant un

large éventail de longueurs d'onde dans plusieurs domaines du spectre électromagnétique. De plus, l'interprétation peut se réaliser de façon semi-supervisée, c'est-à-dire qu'un logiciel classifiera le territoire en fonction de catégories définies par l'interprète.

Par ce projet, nous voulons démontrer la pertinence d'utiliser l'imagerie numérique aéroportée comme source d'information pour caractériser un territoire après feu. Pour ce faire, nous disposons de deux sources d'information soit les données numériques du capteur aéroporté Daedalus et celles du capteur aéroporté MEIS. Ces capteurs possèdent des caractéristiques distinctes dont les principales sont la résolution spatiale des données et un certain nombre de bandes spectrales. Comme les données numériques ont été enregistrées simultanément lors d'un survol, elles deviennent intéressantes à comparer.

Un tel projet de recherche implique la réalisation d'un certain nombre d'objectifs, lesquels peuvent être formulés comme suit:

1. Corriger l'effet de réflectance bidirectionnelle sur les bandes spectrales des capteurs Daedalus et MEIS.
2. Identifier les caractéristiques spectrales des différentes entités du territoire.
3. Caractériser le territoire à l'aide de la classification semi-supervisée.
4. Souligner les forces et les faiblesses des capteurs Daedalus et MEIS pour la caractérisation d'un feu.

Ce projet est donc divisé en deux parties soit les corrections des données numériques et la classification des images. Il est nécessaire de procéder à des corrections radiométriques des images pour en faciliter leur analyse. La classification permet d'obtenir une généralisation des différents écosystèmes du territoire. Mais auparavant, une description des caractéristiques du territoire et des données numériques facilitera la compréhension du projet et permettra de découvrir certaines difficultés rencontrées au cours de ce travail.

CHAPITRE II

LE TERRITOIRE À L'ÉTUDE ET LES DONNÉES NUMÉRIQUES

2.1 LE FEU DE 1983 DANS LE SECTEUR DU LAC BOURGAT (LAC-SAINT-JEAN)

Le 23 juin 1983, la foudre déclenche un feu de forêt le long de la rivière du Sapin Croche à l'ouest du secteur du lac Bourgat (figure 1). Celui-ci se situe aux limites des MRC de Maria-Chapdelaine et du Domaine du Roy, près de la rivière du Chef. Il se localise à environ 100 kilomètres au nord-ouest de la municipalité de Girardville (Lac-Saint-Jean). Pendant 44 jours, le feu ravage une superficie de plus de 44 750 hectares ce qui occasionne pour la compagnie forestière Donohue inc. des pertes de 9 568 000\$ de bois¹.

Lors du feu, la majorité de la forêt était mature et prête à être exploitée. Au cours de la même année (1983), la compagnie forestière Donohue inc. a commencé à récupérer le bois affecté. Elle a tout d'abord débuté aux limites sud du territoire dévasté pour se diriger année après année vers le nord. Lors du survol en 1985, la compagnie forestière Donohue inc. avait récolté la forêt jusqu'au lac Bourgat.

¹ Données fournies par la Société de Conservation

FIGURE 1: Localisation du territoire à l'étude

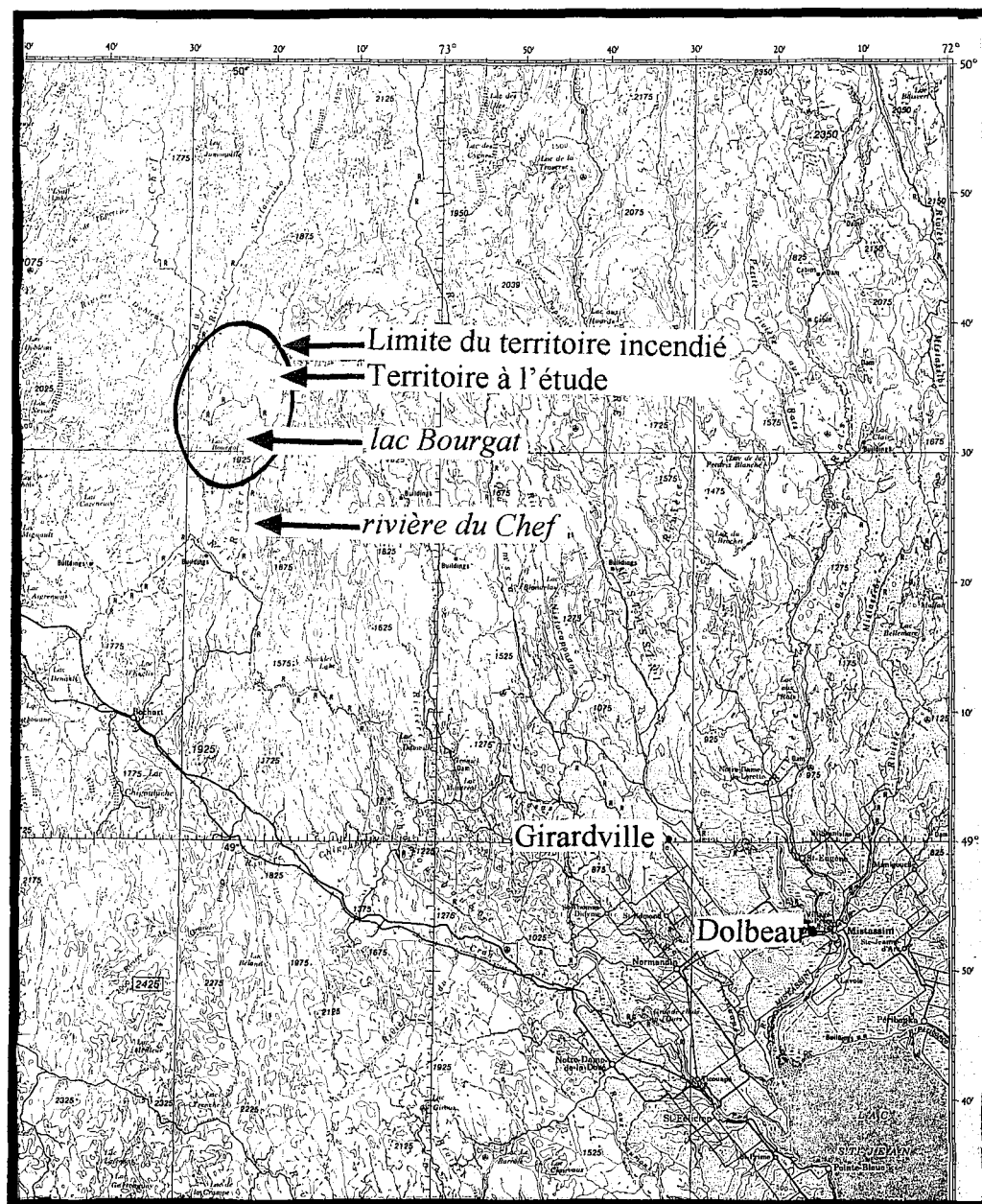
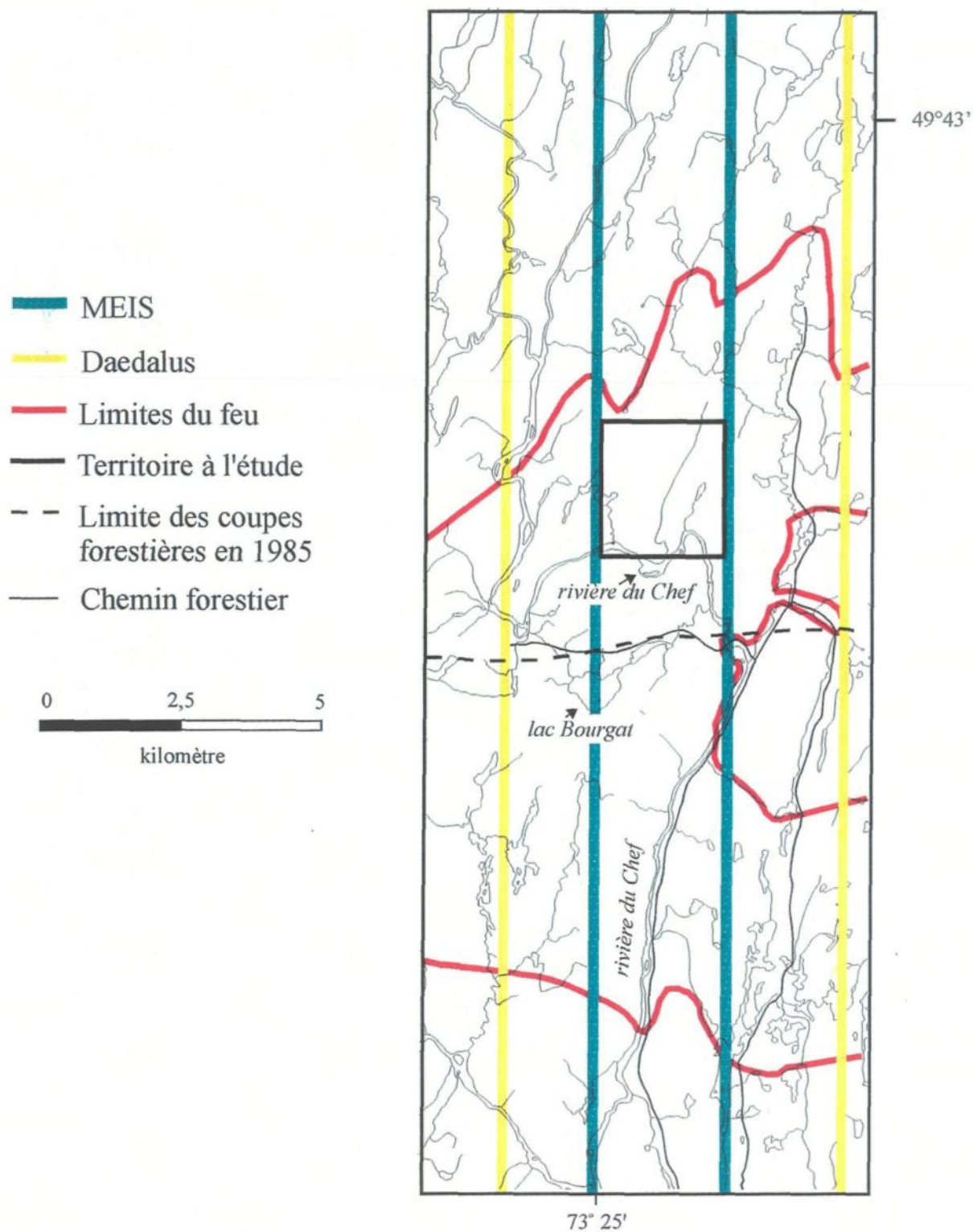


Figure 2: Localisation des lignes de vol des capteurs Daedalus et MEIS



2.2 L'ACQUISITION DES IMAGES NUMÉRIQUES AÉROPORTÉES

Deux ans après le feu, soit en 1985, le laboratoire de télédétection de l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) demande au Centre Canadien de Télédétection un survol des capteurs aéroportés Daedalus et MEIS pour une partie de ce secteur. Le 7 juin 1985 à 9:04 (heure locale), l'avion du Centre Canadien de Télédétection (CCT), ayant à son bord les capteurs Daedalus et MEIS, survole le secteur du lac Bourgat. Il passe à une altitude de 25 000 pieds (7 620 m) à une vitesse de 413 noeuds. Il fait un seul passage survolant le territoire du sud au nord. Les données numériques recueillies couvrent la partie centrale du territoire incendié (figure 2).

2.2.1 Les caractéristiques des données du capteur Daedalus

Le capteur Daedalus (Daedalus / MDA DS1260) est un balayeur multispectral (MSS) à miroir rotatif avec un angle de visée d'une largeur de 85,9° perpendiculaire à la direction de vol¹. Il dispose d'onze bandes spectrales. Les dix (10) premières bandes spectrales couvrent les longueurs d'onde du visible au proche infrarouge (380 à 900 nm). La onzième bande spectrale se trouve dans la région de l'infrarouge (IR) thermique.

¹ H.H.Zwick, W.D. Mccoll, H.R. Edel, «The CCRS DS1260 Airborne multispectral scanner (MSS) », The 6th Canadian Symposium on Remote Sensing, Halifax, Nova Scotia, May 21-23, 1980, p. 644

Pour le survol, seules les bandes spectrales impaires (3, 5, 7, 9 et 11) ont été sélectionnées (tableau 1). Selon l'altitude de l'avion et la résolution angulaire du capteur, les pixels (la plus petite unité homogène enregistrée) couvrent en moyenne une superficie de 16 m par 16 m. La largeur du champ balayé (largeur de l'image) par le capteur Daedalus est de 716 pixels soit environ 11,5 km.

Tableau 1: Caractéristiques spectrales des bandes du capteur Daedalus

Bande spectrale Capteur Daedalus	Longueur d'onde nm	Région spectrale
3	450 - 500	bleu
5	550 - 600	vert
7	650 - 690	rouge
9	800 - 890	proche infrarouge (IR)
11	9 000 - 13 000	infrarouge (IR) thermique

2.2.2 Les caractéristiques des données du capteur MEIS

Le capteur électro-optique multispectral MEIS (Multi-detector Electro-optical Image Scanner) est un capteur à barrette multicanal. Le principe de l'enregistrement à barrette se révèle beaucoup plus avantageux en ce qui a trait à la sensibilité et à la résolution spatiale que celui des balayeurs utilisant des miroirs tournants ou d'autres dispositifs.¹ Lors

¹ Division de l'acquisition de données CCT, Énergie, Mines et Ressources Canada «MEIS II Workshop», avril 1984, p.1

du survol, le capteur MEIS enregistrerait huit bandes spectrales. Elles couvrent le spectre du bleu au proche infrarouge, c'est à dire des longueurs d'onde 430 à 1 068 nm (tableau 2). La largeur du champ balayé (largeur de l'image) pour le capteur MEIS est de 1 024 pixels. Comme la superficie des pixels est variable selon l'altitude de l'avion et la résolution du capteur, dans notre cas, le pixel couvre en moyenne une superficie de 5,58 m par 5,58 m.

Tableau 2. Caractéristiques spectrales des bandes du capteur MEIS

Bande spectrale Capteur MEIS	Longueur d'onde nm	Région spectrale
1	430 - 459	bleu
2	507 - 525	vert
3	555 - 565	vert - jaune
4	573 - 606	jaune
5	658 - 687	jaune - rouge
6	672 - 703	rouge
7	843 - 897	proche infrarouge (IR)
8	973 - 1 068	proche infrarouge (IR)

2.3 LA DÉLIMITATION DU TERRITOIRE À L'ÉTUDE

Lors de la sélection du territoire à l'étude, nous avons privilégié les secteurs ayant une certaine diversité, tant par les essences en place que par le niveau de perturbation (végétation saine et brûlée). Les territoires présentant des perturbations anthropiques, comme la coupe, ont été évités.

Afin de mieux comparer les classifications des capteurs aéroportés Daedalus et MEIS, le territoire à l'étude couvre la même superficie, soit environ 3 249 hectares (figure 2). Cependant, en raison de la résolution spatiale de chacun d'eux, le nombre de pixels pour les images n'est pas le même.

2.4 LE TERRITOIRE À L'ÉTUDE

Le site à l'étude se localise à l'intérieur du territoire incendié n'ayant pas eu d'intervention en 1985 (figure 2). Le site choisi offre un milieu hétérogène comme des milieux humides, une végétation diversifiée (résineuse et feuillue), de nombreux lacs et des brûlis semblant présenter différentes intensités.

2.4.1 L'information disponible pour caractériser le territoire

Lors du survol, il n'y a pas eu de prises de données terrain à l'intérieur du territoire concerné qui auraient permis de caractériser certaines entités. Depuis, le territoire a subi de nombreuses perturbations anthropiques (coupes forestières). En 1992, les seules sources fiables pour valider nos données demeurent la carte forestière (1984) et les photographies aériennes (1990).

La mise à jour de la carte forestière de ce territoire s'est faite relativement rapidement puisque lors du feu, le ministère des Ressources Naturelles secteur Forêt procédait à la révision de celle-ci. Nous pensions donc pouvoir disposer de photographies aériennes après feu. Cependant, elles ont été prises le 29 juin 1983. À cette date, le feu n'avait pas fini de se propager et le territoire ciblé par notre étude était à peine atteint. Les photos se rapprochant de l'année du survol sont celles du décennal de 1990. Elles ont permis de localiser la forêt brûlée puisqu'en 1990 seulement la matière ligneuse saine ou peu perturbée par le feu avait été récoltée.

Pour compléter nos informations, nous avons utilisé les photographies aériennes et la carte forestière avant feu. Les photographies couleurs ont été prises le 7 octobre 1982. Elles permettent de localiser assez facilement les peuplements feuillus. Nous disposons aussi de la carte forestière de 1969. À cette époque, l'information rapportée sur les cartes forestières se limite à l'essence dominante, la densité, la hauteur et à un indice de l'âge du

peuplement. À partir de ces documents, nous avons pu valider les résultats obtenus à partir des images numériques des capteurs aéroportés Daedalus et MEIS.

Nous avons aussi produit une généralisation des cartes forestières sur acétate (annexe 1a et 1b). Ces acétates illustrent la composition végétale du territoire selon les essences principale et secondaire. Nous avons toutefois conservé les mêmes unités que celles des cartes forestières. Une fois celles-ci superposées aux images résultantes, nous obtenons un meilleur aperçu de l'information discriminée par celles-ci. Comme les bandes spectrales ne sont pas corrigées géométriquement à la perfection, nous avons ajusté les cartes forestières en fonction des images numériques. Il arrive parfois que les unités cartographiées soient décalées par rapport à l'image, mais la représentation cartographique permet de constater qu'il s'agit des mêmes unités.

Nous remarquons sur la carte forestière après feu (annexe 1b), deux secteurs contradictoires par rapport aux photographies aériennes de 1990. Nous les avons soulignés par une couleur. Le premier secteur (orange) est situé à droite du lac Bluche. Nous observons sur la carte forestière de 1984 la présence de végétation saine, tandis que les photos de 1990 montrent une végétation brûlée. L'autre secteur (vert) révèle une végétation brûlée sur la carte forestière tandis que les photos montrent que le secteur a été exploité par la compagnie forestière Donohue inc. Comme la compagnie exploitait seulement le bois sain sur le ter-

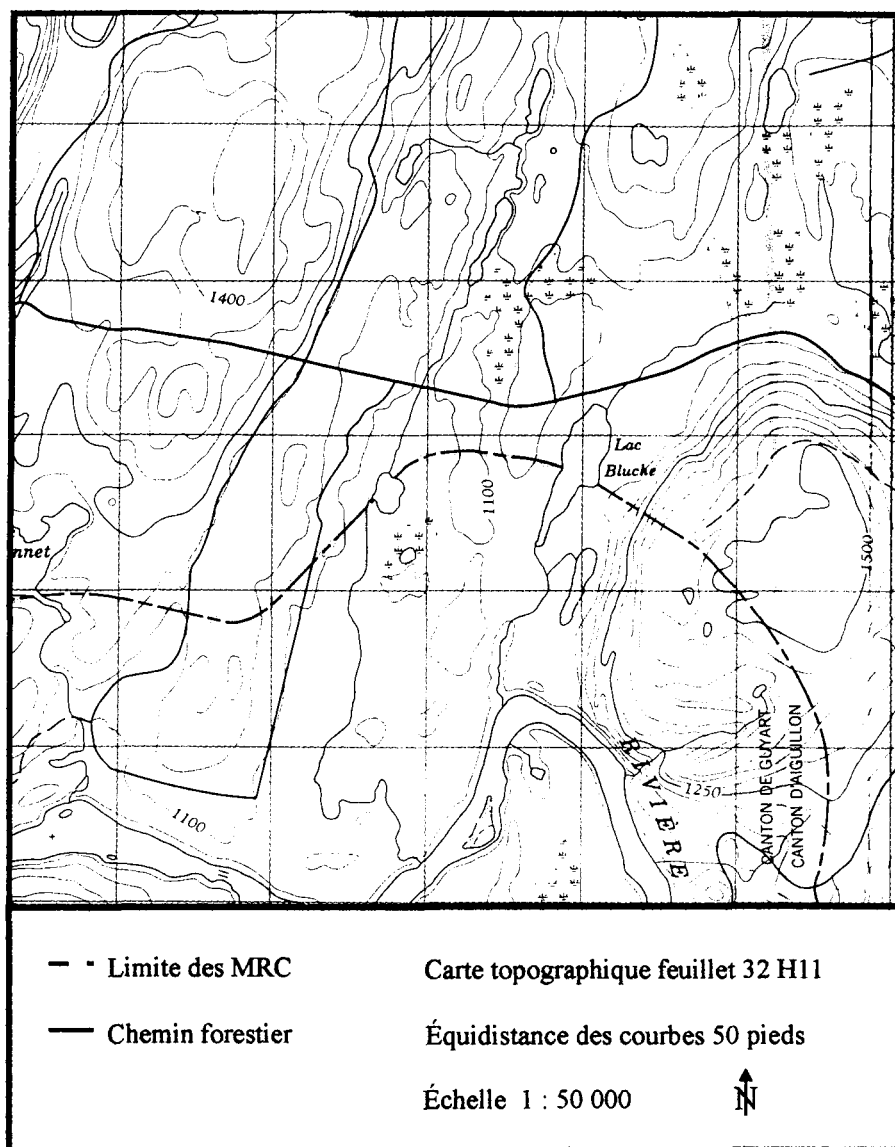
ritoire à l'étude, cela nous laisse croire que la végétation est saine. Nous avons donc privilégié l'interprétation des photographies aériennes.

2.4.2 La description du territoire à l'étude

Le territoire à l'étude est légèrement accidenté (figure 3). Le paysage se compose de deux collines. Celle à l'ouest se caractérise par une élévation graduelle; elle s'oriente dans un axe sud-ouest nord-est. La deuxième colline à l'est du territoire a une forme plutôt circulaire; ses parois sont abruptes, son sommet est légèrement plat et son élévation de 1 550 pieds (472 m) correspond au point le plus élevé du territoire à l'étude. Elle servira souvent de référence pour localiser certains éléments émanant de nos résultats. Entre ces collines, une vallée s'étend du nord au sud.

Le territoire est traversé d'est en ouest par la rivière du Chef. De plus, nous y retrouvons plusieurs lacs (8). La carte forestière de 1984 (révisée en 1987) montre des peuplements matures, dont l'âge varie généralement entre 50 et 120 ans. La composition de la végétation est diversifiée même si l'épinette noire (*Picea mariana*) occupe la majorité du territoire non perturbé. Les autres essences résineuses présentes sont le sapin (*Abies balsamea*) et le pin gris (*Pinus divaricata*). Nous les retrouvons rarement en peuplements purs et ils sont généralement mélangés à l'épinette noire.

Figure 3: Territoire à l'étude



Nous retrouvons aussi la présence de quelques peuplements de peuplier faux-tremble (*Populus tremuloïdes*) et de bouleau à papier (*Betula papyrifera*). Ils sont surtout présents sur les flancs de la colline circulaire. En général, les peuplements de feuillus sont mélangés aux résineux. Comme mentionné précédemment, le survol a eu lieu au début de juin. À cette latitude, la feuillaison printanière commence à peine. Par le fait même, sous ces peuplements, le sol et la végétation en sous-étage sont beaucoup plus apparents.

Comme mentionné ci-dessus, le feu a ravagé 44 750 hectares. Dès 1983 la compagnie forestière Donohue inc. a commencé à récolter le bois. Durant les premières années, de 1983 à 1985, elle a récolté autant le bois sain que le bois incendié mais ce dernier devait répondre à des normes strictes de qualité avant d'être transformé. En 1986, seul le bois sain a été privilégié par la compagnie. Les longicornes diminuant la qualité du bois perturbé, et il a donc été laissé sur place.

Le territoire à l'étude a été sélectionné à l'intérieur du secteur non perturbé en 1985, date du survol. L'historique des coupes forestières sur le territoire à l'étude montre que le bois prélevé a été récolté par la compagnie forestière Donohue inc. durant la saison 1986-1987 (figure 4). Seul le bois sain est récupéré. Par la suite, de 1990 à 1992, la compagnie forestière Cascades East Angus inc. a récolté le bois brûlé restant. Aujourd'hui, seulement quelques parcelles non perturbées sont toujours présentes, ailleurs la régénération se fait de plus en plus apparente (photos 1 et 2).

Figure 4: Localisation de la coupe forestière entre 1983 et 1993



Secteurs coupés par les compagnies forestières
Donohue inc et Cascades East Angus inc

0 0,5 1
kilomètre

E: Épinette noire S: Sapin baumier Pg: Pin gris Bb: Bouleau blanc
Fi: Feuillu intolérant Pe: Peuplier faux-tremble R: Résineux
pbr: Partiellement brûlé br: Brûlis



Photo 1: Vue aérienne vers le nord de la vallée près du lac Bluche montrant la récupération des bois après feu, 1993



Photo 2: Secteur non récolté montrant la régénération après feu d'une parcelle de pin gris, 1993

CHAPITRE III

LES CORRECTIONS DES IMAGES NUMÉRIQUES

3.1 LES CORRECTIONS RADIOMÉTRIQUES

Tel que mentionné précédemment, les données numériques mises à notre disposition ont été enregistrées tôt en matinée ce qui a pour conséquence d'accentuer les problèmes radiométriques à savoir la géométrie de visée et l'effet de réflectance bidirectionnelle. Il est connu que l'inclinaison du soleil par rapport au nadir a une influence sur la réflectance enregistrée par les capteurs aéroportés. Il est donc primordial d'atténuer ces effets sur les bandes spectrales des capteurs Daedalus et MEIS avant de procéder à la caractérisation du territoire.

3.1.1 L'effet de réflectance bidirectionnelle

L'effet de réflectance bidirectionnelle est l'un des problèmes radiométriques auquel sont soumises les données aéroportées. Bonn et Rochon (1992) mentionnent que l'effet de réflectance bidirectionnelle « est sensible sur les images obtenues par des scanners aéroportés à grand angle de balayage quand le soleil se trouve sur le côté de l'avion et qu'il éclaire donc la surface perpendiculaire au nadir ».

Les images du territoire à l'étude ont été captées lors d'un survol d'orientation nord-sud, le 6 juin à 9 heures le matin (voir chapitre II). Le soleil se trouve à cette heure sur le côté de l'avion et éclaire, par conséquent, la surface des objets de façon différentielle.

Les éléments enregistrés du côté est de l'avion sont ombragés tandis que les éléments à l'ouest de l'avion sont éclairés (figure 5). Cet effet se traduit par des images qui sont plus claires d'un côté (ouest) que de l'autre (est). La figure 6, illustrant la bande spectrale 3 (450-500 nm) enregistrée par le capteur Daedalus, représente bien cet effet.

Par conséquent, cet effet empêche la reconnaissance semi-supervisée de deux entités similaires se trouvant aux extrémités de l'image. La classification semi-supervisée étant la méthode utilisée pour classifier les images, il est primordial de disposer de bandes spectrales des plus représentatives de la réalité.

3.2 LA CORRECTION DE L'EFFET DE RÉFLECTANCE BIDIRECTIONNELLE

Les corrections radiométriques à apporter aux images aéroportées sont variables d'un survol à l'autre. Les méthodes de correction que nous pouvons utiliser, ne sont qu'approximatives puisque les propriétés de réflectance bidirectionnelle varient fortement avec la nature de la surface visée, et que la plupart du temps, nous survolons des surfaces hétérogènes (Vincent 1984).

Figure 5: Schématisation de l'effet de réflectance bidirectionnelle

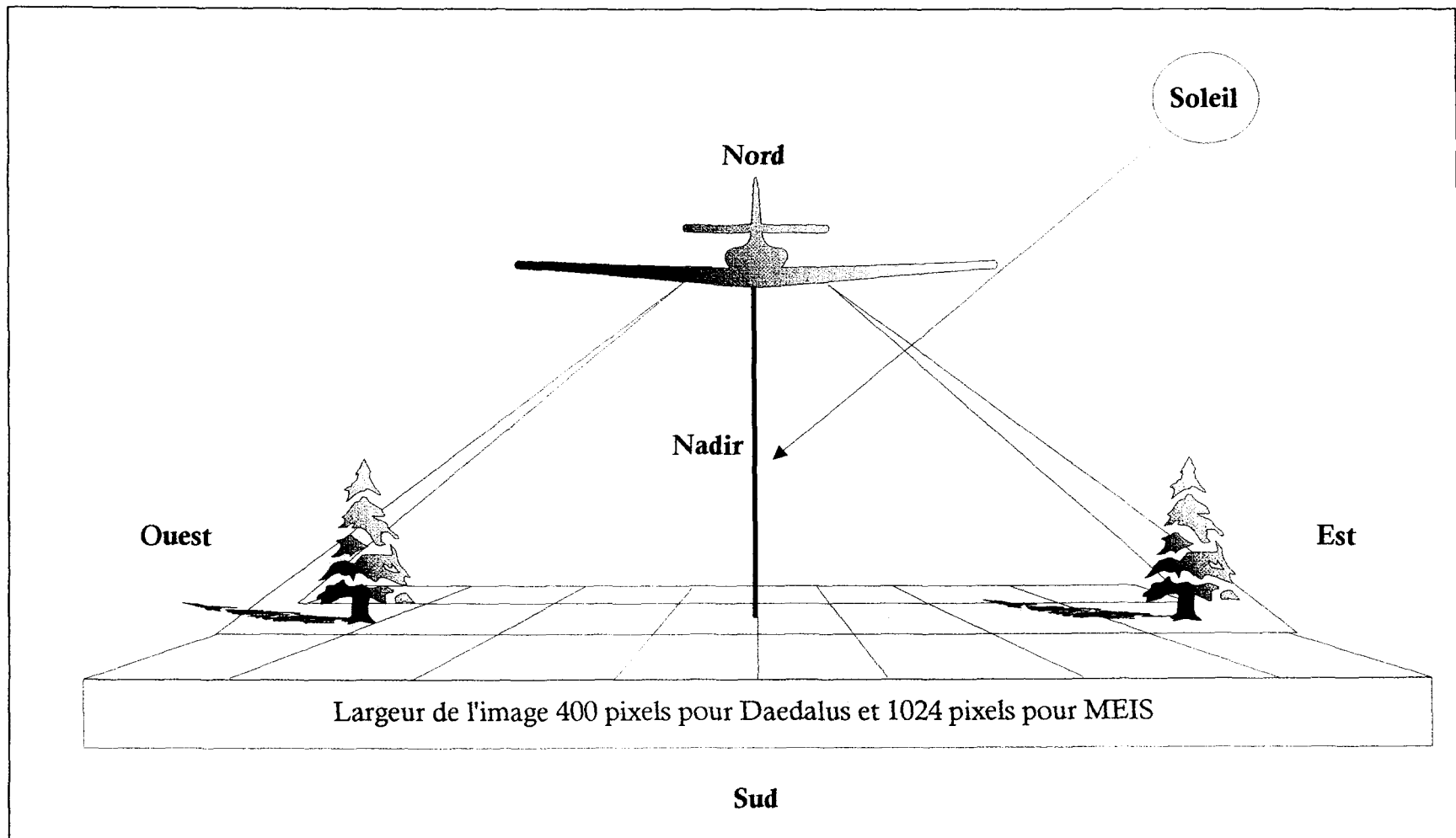


Figure 6. Bande spectrale 3 (450-500 nm) avant correction pour le capteur Daedalus



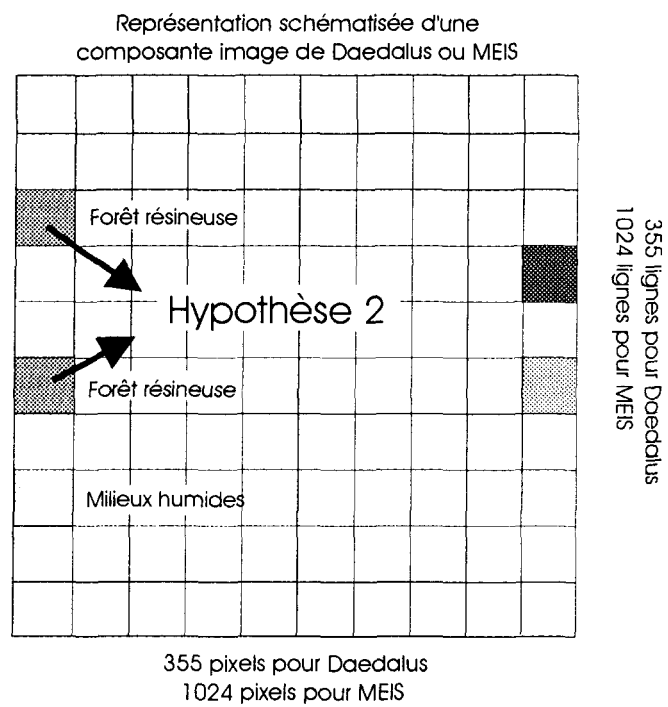
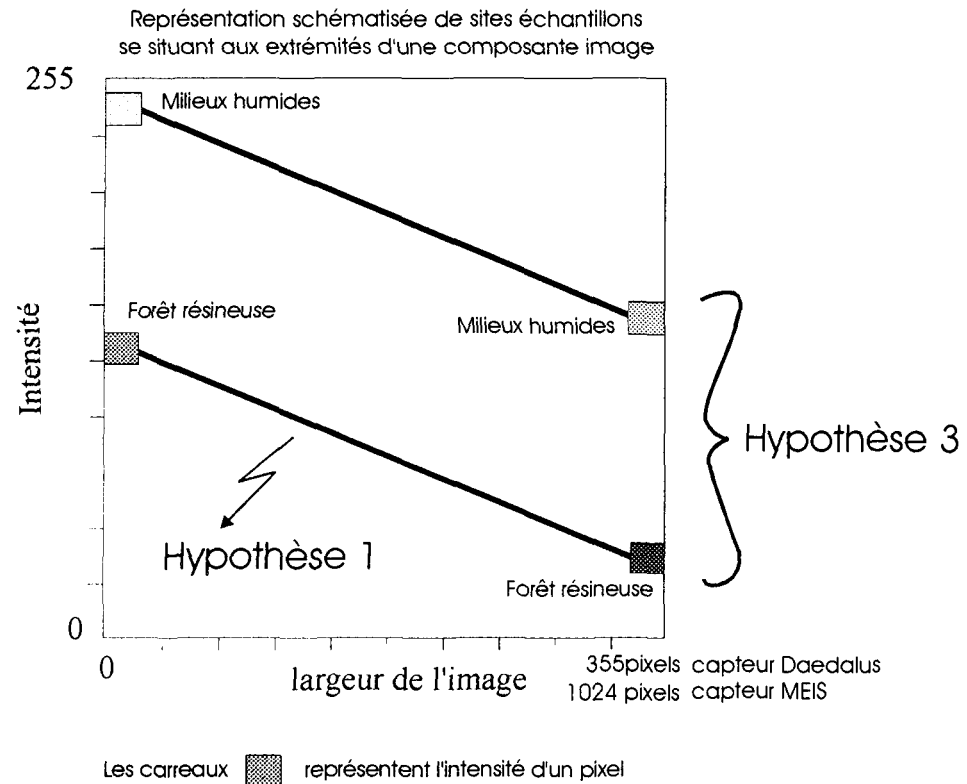
Comme le souligne Gauthier et al. (1992) dans le résumé « Airborne Multispectral Scanning for Forestry and Mapping (with emphasis on MEIS) », les corrections radiométriques sont essentielles lors de l'utilisation de l'imagerie aéroportée pour la classification non-supervisée ou semi-supervisée. Elles sont un des points importants à améliorer pour l'utilisation à grande échelle des images aéroportées.

Pour le moment, l'une des meilleures solutions pour minimiser l'effet de réflectance bidirectionnelle consiste à organiser les lignes de vol de manière à ce que le soleil soit dans l'axe de la ligne de nadir, en avant ou en arrière de l'avion (Bonn et Rochon 1992).

3.2.1 La correction de l'effet de réflectance bidirectionnelle suivant une courbe polynomiale

Comme nous n'avons pu atténuer l'effet de réflectance bidirectionnelle en choisissant la trajectoire des lignes de vol, nous devons procéder aux corrections de cet effet. Nous avons appliqué une méthode simplifiée de correction radiométrique qui consiste à normaliser les données numériques selon une équation de type polynomial. Cette méthode se base sur le signal capté, soit la réflectance. La méthode de correction se fonde sur trois hypothèses:

Figure 7: Schématisation des hypothèses



1. L'intensité d'objets similaires varie en suivant une courbe à l'intérieur d'une même bande spectrale (figure 7);
2. La variation de l'intensité d'objets similaires est constante à l'intérieur d'une même colonne de pixels;
3. Les différents objets se retrouvant à l'intérieur d'une même colonne de pixels, ont une intensité qui évolue de la même manière sur l'ensemble du territoire.

La méthode élaborée normalise les intensités des différentes bandes spectrales en fonction d'une équation polynomiale. Plusieurs zones échantillons (5x5 pixels) ont été identifiés sur le territoire. La forêt saine, particulièrement la pessière, a servi de secteur témoin, puisqu'elle était bien distribuée dans le territoire et facilement identifiable sur la carte forestière. Nous avons localisé pour Daedalus onze (11) sites échantillons et pour MEIS vingt et un (21) sites échantillons. Pour chacune des bandes spectrales, l'intensité moyenne des sites échantillons a été calculée (annexe 2). Comme le démontrent les figures 8, 9a et 9b, nous observons une diminution de l'intensité de l'ouest vers l'est.

Les équations polynomiales corrigeant radiométriquement chacune des bandes spectrales sont définies par les intensités moyennes des sites échantillons. À l'aide du logiciel Statview, il est possible de déterminer une équation polynomiale représentant la distribution des moyennes d'intensité des sites échantillons. À l'aide du progiciel de traitement des données numérique Easy de PCI, nous avons conçu un programme permettant d'atténuer les effets radiométriques des images. Ce programme détermine à l'aide de

Figure 8: Représentation des sites échantillons de la forêt résineuse saine utilisés pour faire les corrections radiométriques des données Daedalus

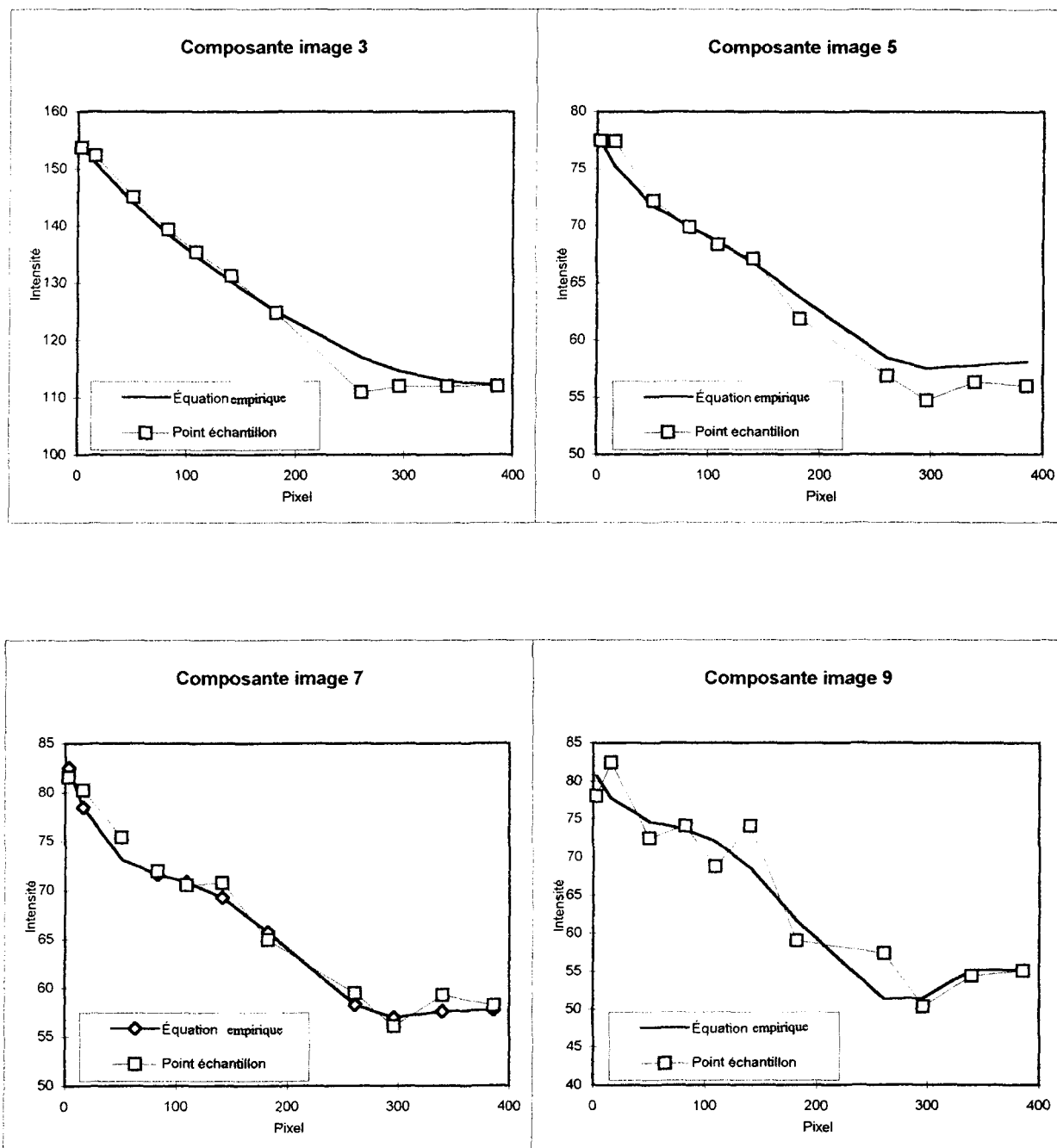


Figure 9a: Représentation des sites échantillons de la forêt résineuse saine utilisés pour faire les corrections radiométriques des données MEIS

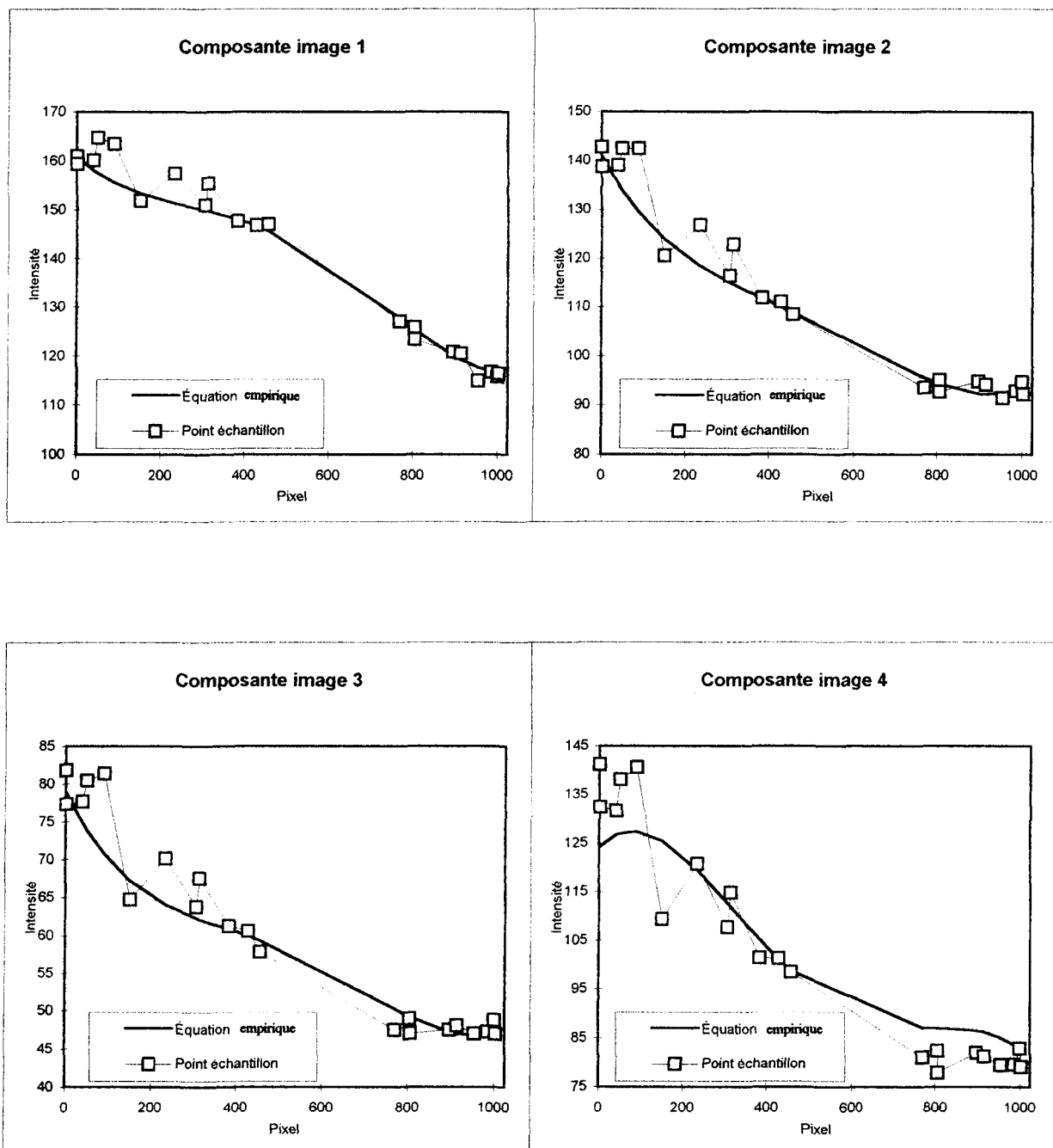
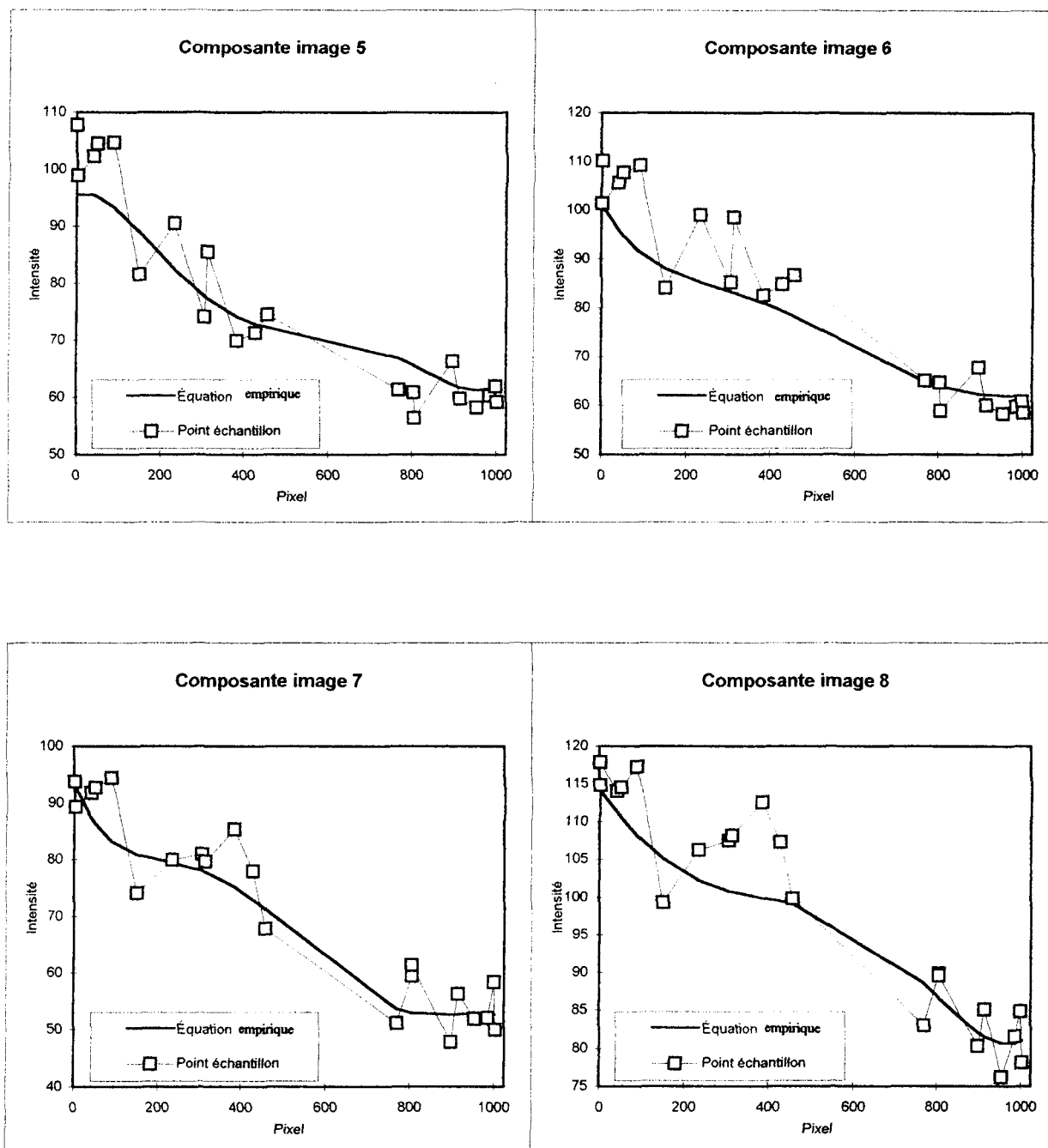
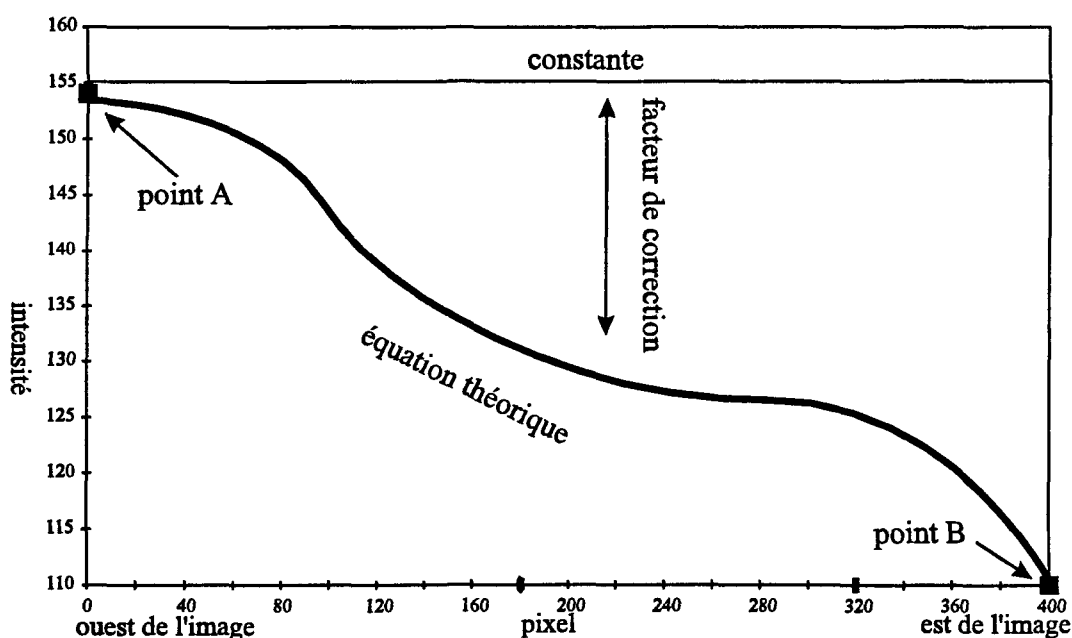


Figure 9b: Représentation des sites échantillons de la forêt résineuse saine utilisés pour faire les corrections radiométriques des données MEIS



l'équation empirique et d'une constante, le facteur de correction à multiplier à l'intensité de chacune des pixels de la bande spectrale. Le facteur de correction se définit comme étant le quotient entre la constante et l'intensité théorique (y) pour une colonne de pixels donnée (x). La procédure, pour corriger une bande spectrale, consiste à multiplier chacune des intensités à l'intérieur d'une colonne de pixels par le facteur de correction déterminé pour celle-ci, afin d'obtenir la même intensité pour un objet similaire situé tant à l'ouest qu'à l'est du territoire (voir figure 10).

Figure 10: Schématisation de la procédure pour corriger l'effet de réflectance bidirectionnelle



L'équation empirique de départ offre rarement une correction satisfaisante de l'image. Ce sont généralement des courbes légèrement différentes à celles produites par les sites échantillons qui offrent une homogénéisation des intensités similaires sur le territoire. Cette situation se répète pour toutes les bandes spectrales des capteurs Daedalus et MEIS. Comme le but de ce travail n'est pas d'élaborer une méthode de correction mais bien d'offrir une meilleure représentativité du territoire étudié, les équations retenues sont basées avant tout sur le résultat visuel de l'image résultante. Les équations retenues pour les corrections radiométriques des bandes spectrales sont présentées à l'annexe 3.

Cette méthode a été, tout d'abord, expérimentée avec le capteur Daedalus. Comme le démontre la figure 8, les courbes ayant servi à élaborer les équations ressemblent beaucoup aux points de contrôle. Toutefois, nous remarquons dans le cas de la bande spectrale 9 (le proche infrarouge) que les points de contrôle définissent plus ou moins une courbe. Ce phénomène est encore plus apparent sur les bandes spectrales 5, 6, 7 et 8 du capteur MEIS (figure 9b). Malgré la non apparence d'une courbe naturelle, nous avons tout de même appliqué la même méthode puisque les images résultantes semblaient atténuer l'effet radiométrique (annexe 4).

3.3 LE RAJUSTEMENT DES IMAGES CORRIGÉES PAR RAPPORT À LA MOYENNE DES IMAGES ORIGINALES

Suite aux corrections radiométriques réalisées, l'histogramme des différentes bandes spectrales ne correspond plus à l'original (figure 11) puisque la procédure multiplie les pixels par une constante entraînant ainsi un déplacement de l'histogramme vers la droite. Pour remédier à ce problème, nous avons repositionné l'histogramme corrigé en soustrayant une constante qui est propre à chacune des bandes spectrales.

Figure 11: Représentation de l'histogramme avant et après correction

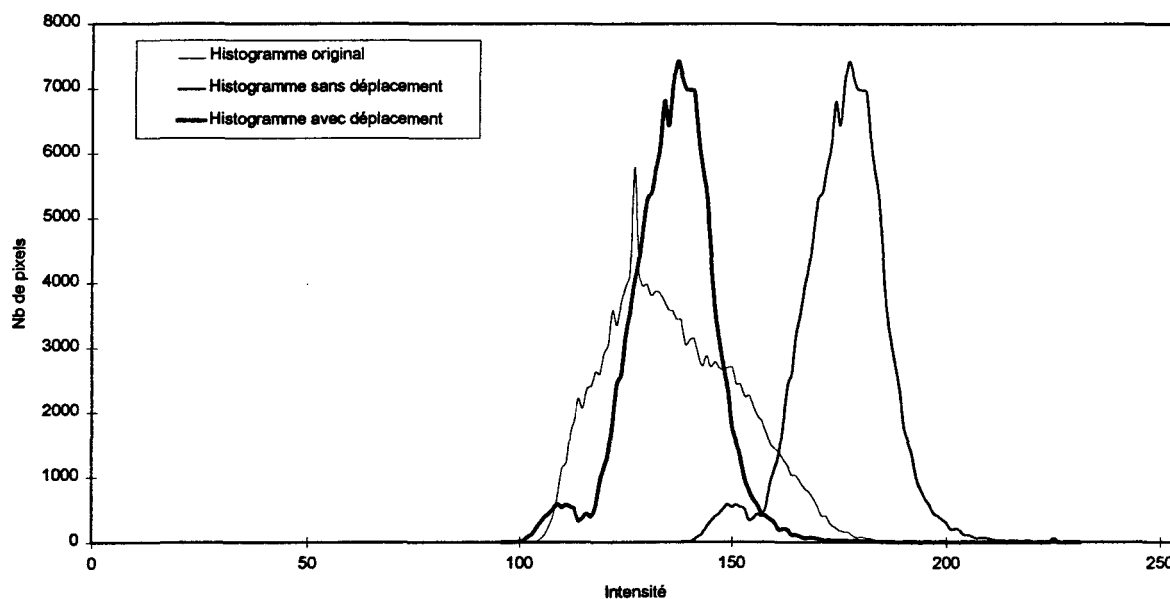


Figure 12: Histogramme de la réflectance spectrale avant et après correction de l'effet de réflectance bidirectionnelle pour les différentes bandes spectrales des données Daedalus

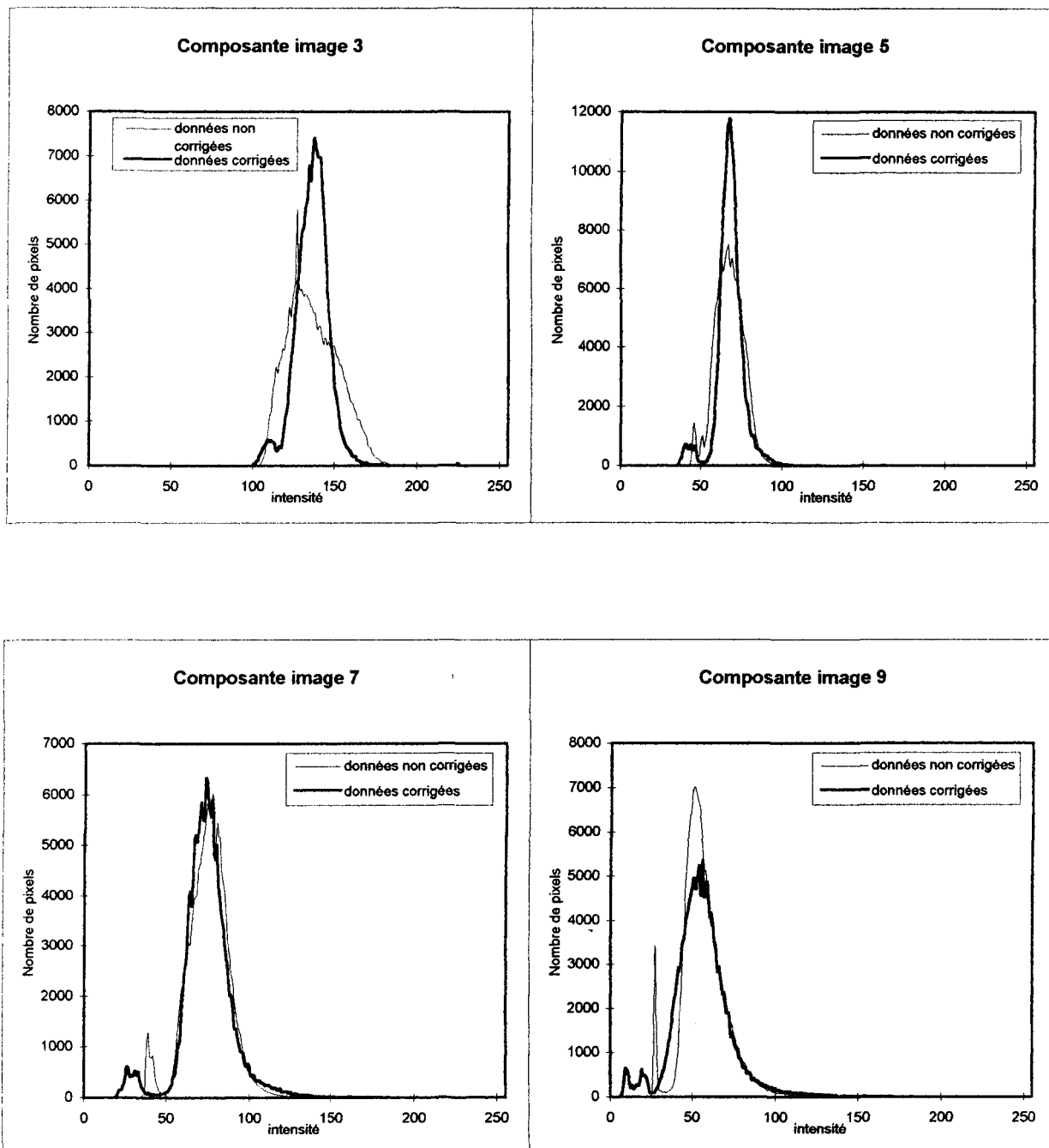


Figure 13a: Histogramme de la réflectance spectrale avant et après correction de l'effet de réflectance bidirectionnelle pour les différentes bandes spectrales des données MEIS

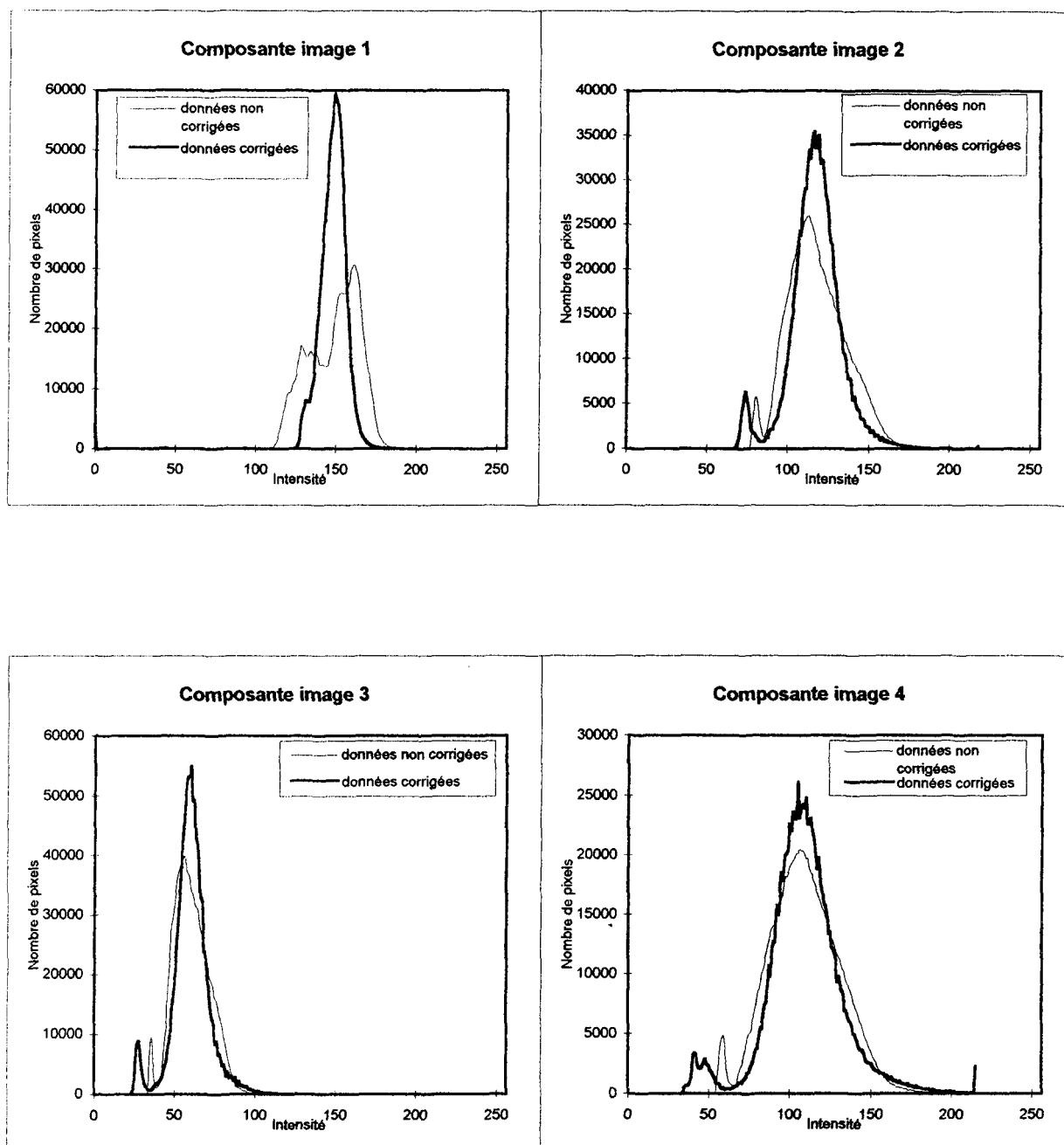
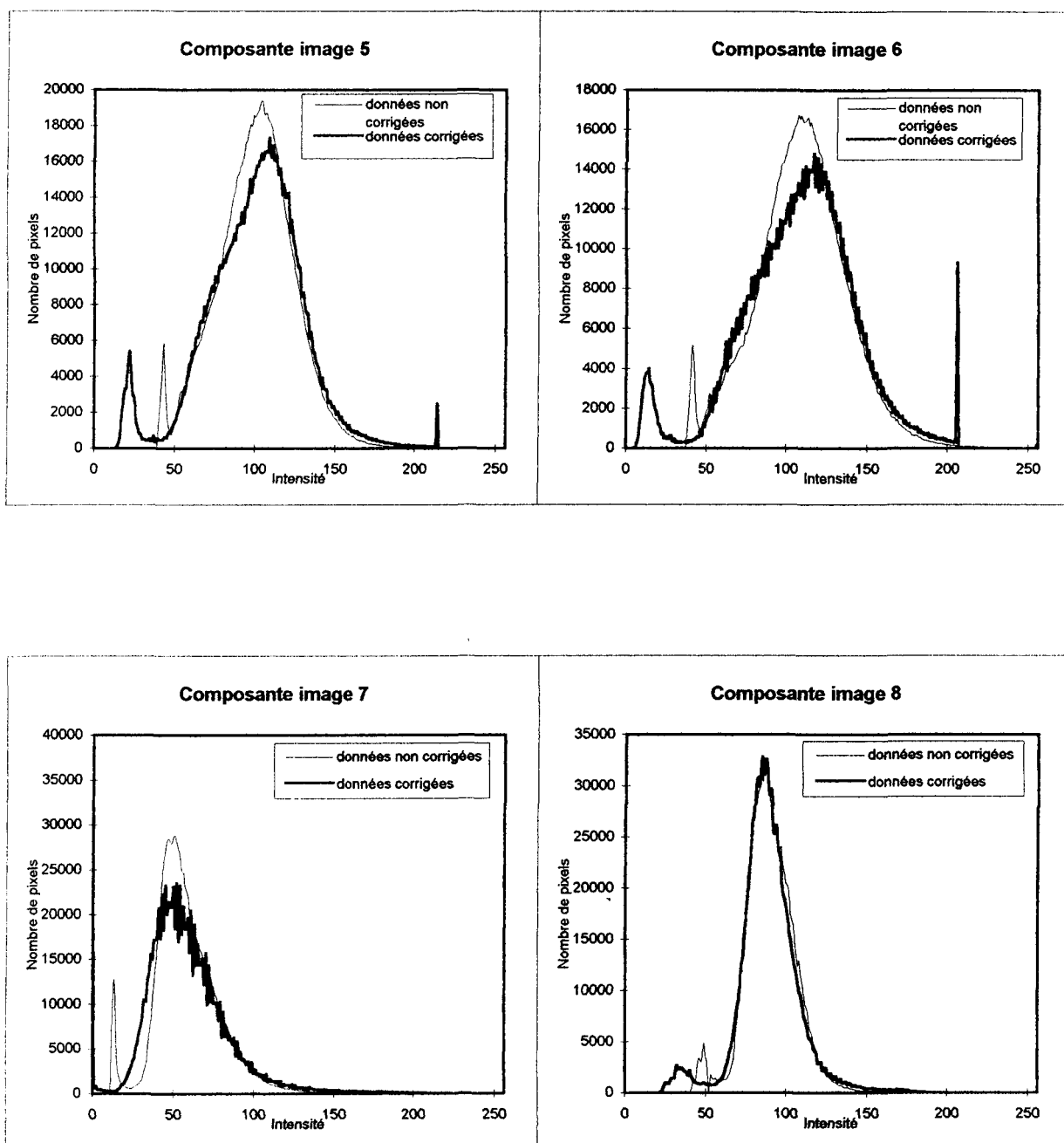


Figure 13b: Histogramme de la réflectance spectrale avant et après correction de l'effet de réflectance bidirectionnelle pour les différentes bandes spectrales des données MEIS



Certains histogrammes des bandes spectrales se retrouvent avec une accumulation de pixels au début ou à la fin de l'histogramme (figures 12, 13a et 13b). Ce phénomène est relié à la méthode de correction et à l'utilisation de nombre entier à 8 bits. Suite à l'application d'un facteur de correction, certains pixels se retrouvent avec une intensité supérieure à 255 ou inférieure à 0. Par conséquent, ils n'ont pu être distribués et ils se sont cumulés. Lors du déplacement de l'histogramme, les pixels se sont déplacés sans pour autant se distribuer.

La distribution des intensités de réflectance des différentes bandes spectrales après correction est semblable à celle obtenue par les capteurs satellitaires. Les histogrammes des bandes spectrales à l'intérieur du visible sont caractérisés par une courbe de distribution étalée, tandis que les histogrammes des bandes spectrales dans l'infrarouge sont caractérisés par une courbe de distribution peu étalée. Par ailleurs, les corrections sur certaines bandes spectrales produisent un effet de bruit à l'intérieur de l'histogramme général. Ces points d'inflexion ne correspondent à aucune information précise; ils sont reliés à la procédure mathématique comme telle.

Le but des corrections radiométriques est d'obtenir une image se rapprochant le plus des caractéristiques spectrales des différents éléments du territoire. Néanmoins, vu l'absence de vérité-terrain et d'information relative au moment de la prise des données numériques, la méthode utilisée offre une représentation acceptable du milieu. Pour les ban-

des spectrales du capteur Daedalus, les données numériques corrigées offrent de bons résultats tandis que pour le capteur MEIS, les bandes spectrales dans le domaine du rouge et de l'infrarouge montrent une dégradation de l'information soit au début ou à la fin de l'histogramme. Les images résultantes donnent visuellement une bonne représentation des milieux en présence, et fournissent maintenant des données numériques plus représentatives du milieu.

CHAPITRE IV

ANALYSE DES IMAGES NUMÉRIQUES

4.1 LA CLASSIFICATION

Les chapitres précédents ont permis de se familiariser avec les caractéristiques physiques du territoire à l'étude et d'obtenir des données numériques plus représentatives de celui-ci. Il est donc possible de procéder à l'identification de certains milieux de ce territoire.

Le principal avantage attribué à l'utilisation des données numériques est de rendre possible l'analyse statistique par regroupement de similarité. Chaque pixel possède des caractéristiques spectrales spécifiques à l'entité qu'il représente. Il est possible, à partir de la valeur des intensité de réflectance, de regrouper les pixels semblables en catégorie. Cette procédure se nomme la classification. Elle peut se faire d'une manière non supervisée c'est-à-dire que les regroupements sont déterminés à partir du fractionnement de l'histogramme des caractéristiques spectrales des différentes bandes spectrales sans intervention de l'opérateur. Pour notre part, nous avons opté pour une classification semi-supervisée qui fait appel tant à l'interprète qu'aux méthodes statistiques de classement des pixels. Elle exige de l'interprète une connaissance du territoire à l'étude afin de bien identifier les sites d'entraînement. En outre, le choix des bandes spectrales est aussi déterminant puisqu'il permet de maximiser les différences spectrales entre les milieux.

Les données numériques peuvent être affichées et traitées de différentes manières. La majorité des auteurs utilisent les composés colorés issus d'une superposition de trois bandes spectrales. Cette technique permet de combiner et de visualiser des données de plusieurs régions spectrales comme le visible, le proche infrarouge, l'infrarouge et l'infrarouge thermique. L'utilisation des composés colorés accentue certaines particularités du milieu. En les visionnant, il est facile de procéder à une première analyse du territoire qui s'apparente à l'interprétation de photographies aériennes. Néanmoins, il est nécessaire de procéder à une accentuation des données numériques tout en optimisant l'échantillonnage afin de faciliter la discrimination des éléments.

4.1.1 Le choix des bandes spectrales

À travers la littérature consultée, les bandes spectrales privilégiées pour caractériser les brûlis sont celles couvrant le proche infrarouge et le moyen infrarouge (Lopez et Caselles 1991, Simpson 1990, Jakubauska et al. 1990, Dargone et al. 1990, Chuvieco et Congalton 1989-1988, Milne 1986, Tanaka et al. 1983, Husson 1982). Ces mêmes bandes spectrales sont aussi employées pour l'évaluation de la production de la biomasse et la caractérisation de la végétation (Ahern et al. 1991, Goel et Reynolds 1989, Cook et al. 1989; Franklin 1986)

Nous avons vu précédemment (chaptire 2) que les bandes spectrales des capteurs Daedalus et MEIS appartiennent en grande partie au domaine du visible et du proche infrarouge, (tableaux 1 et 2). Seul le capteur Daedalus offre une bande infrarouge thermique. Il est donc impossible de reproduire les mêmes combinaisons spectrales que celles de la littérature citée. Néanmoins, les travaux de Marceau et al. (1991) favorisent l'utilisation des bandes spectrales bleue (432-463 nm), rouge (658-674 nm) et proche infrarouge (862-890 nm) du capteur MEIS pour caractériser les couverts forestiers. Une autre étude (Matejek et al. 1990) préconise l'emploi des bandes spectrales dans le domaine du vert, du rouge et du proche infrarouge. De plus, elle souligne aussi de bons résultats lors d'un étalement linéaire avec l'emploi de la bande spectrale bleue en remplacement de la bande spectrale verte.

L'un de nos objectifs étant de comparer les résultats obtenus pour les capteurs Daedalus et MEIS, nous avons jugé important d'effectuer les classifications avec des bandes spectrales similaires. Or, les bandes spectrales du capteur Daedalus mises à notre disposition sont peu nombreuses. Nous avons donc priorisé les trois bandes spectrales les plus décorréélées du capteur Daedalus et nous avons sélectionné celles s'y rapprochant pour le capteur MEIS.

C'est ainsi que nous avons retenu deux bandes spectrales dans le visible, l'une correspondant au bleu-vert et l'autre au rouge, la troisième bande spectrale appartient au

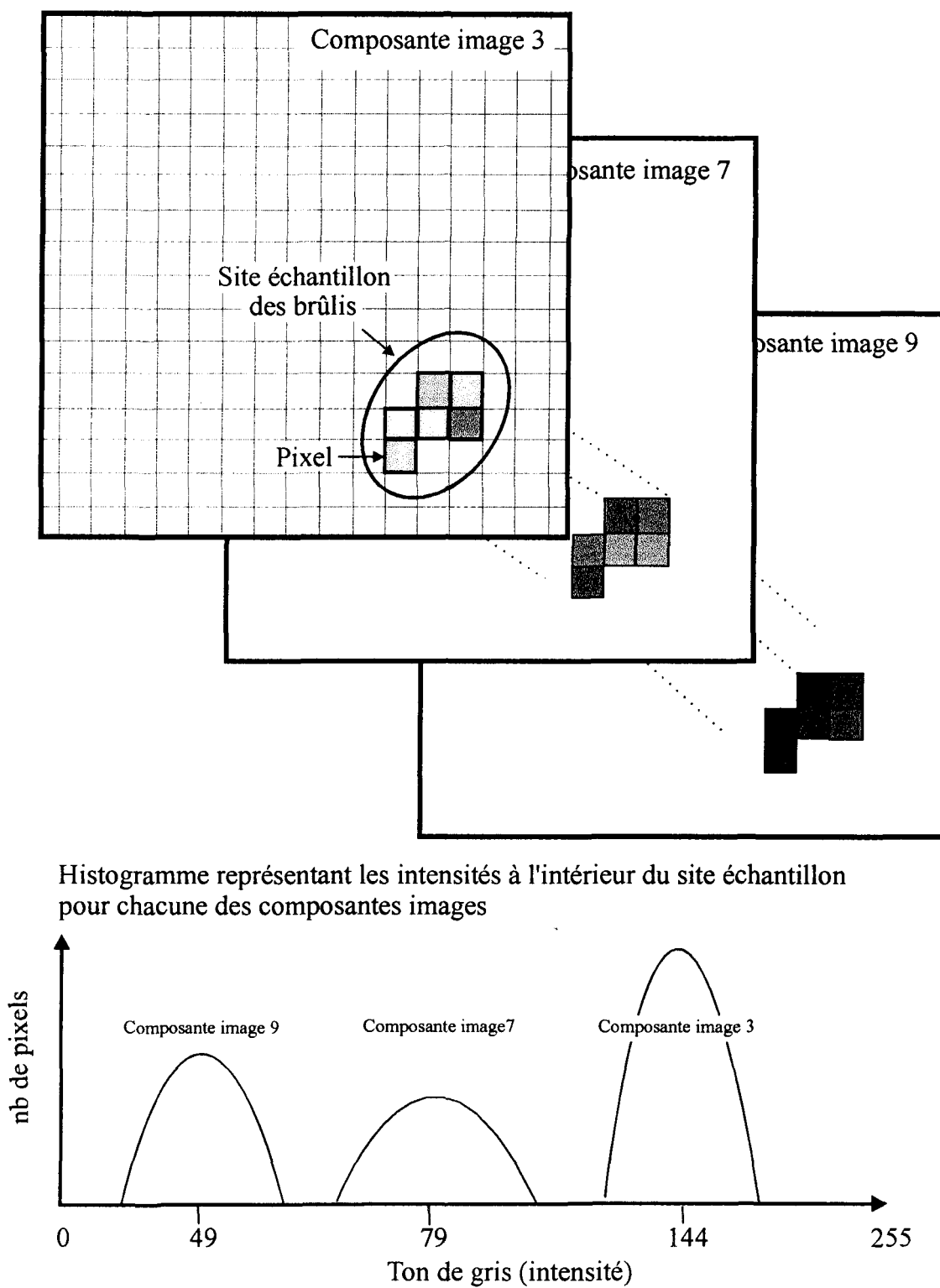
proche infrarouge. Les bandes spectrales pour le capteur Daedalus sont la bande 3 (450-500 nm), la bande 7 (650-690 nm) et la bande 9 (800-890 nm) alors que pour le capteur MEIS, les bandes spectrales choisies sont la bande 2 (507- 525 nm), la bande 5 (658-687 nm) et la bande 7 (843-897 nm). Aucune bande spectrale couvrant le domaine du moyen infrarouge n'a pu être retenue par manque de correspondance à ce niveau entre les deux capteurs.

4.1.2 Le choix des sites échantillons

Les caractéristiques spectrales des écosystèmes vont se traduire à travers les bandes spectrales sélectionnées. Le site d'entraînement se définit comme un regroupement de plusieurs pixels ayant une intensité propre. Il se veut une représentation statistique des caractéristiques spectrales des milieux que nous tentons de distinguer. Le choix des sites d'entraînement associés à ces milieux s'avère une étape primordiale.

La combinaison de plusieurs bandes spectrales permet de diversifier les caractéristiques spectrales des sites d'entraînement. Cette combinaison forme une empreinte statistique se nommant la signature spectrale. Par exemple, dans notre cas, la signature spectrale d'un site échantillon de brûlis est caractérisée par une intensité de réflectance de 49 dans la bande spectrale 3 (450-500 nm), de 79 dans la bande spectrale 7 (650-690 nm) et de 144 dans la bande 9 (800-890 nm) (figure 14). L'identification de sites d'entraînement

Figure 14 : Schématisation de l'élaboration d'une signature spectrale



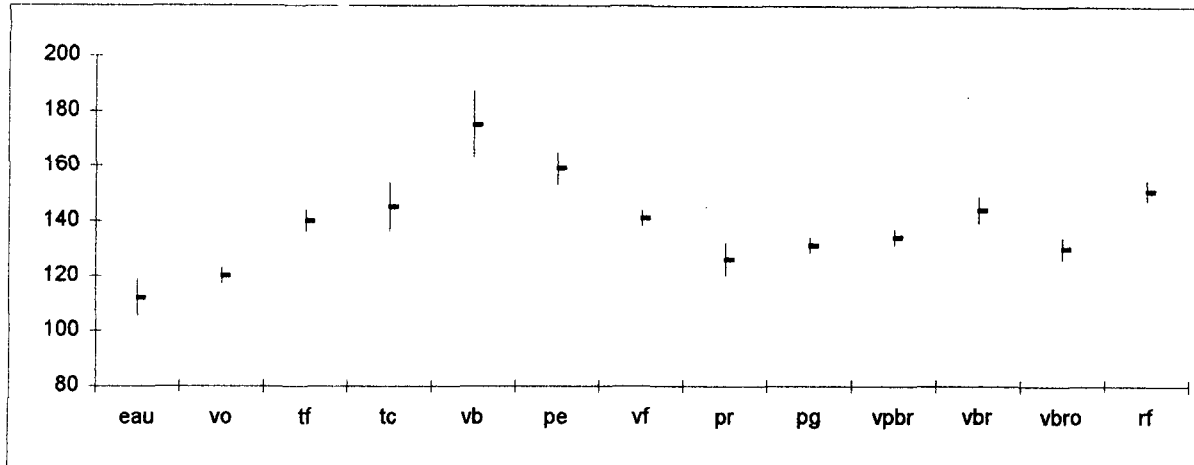
représentatifs constitue donc une étape importante puisqu'elle est la base de la classification semi-supervisée.

Nous avons essayé dans la mesure du possible de créer une classification comparable au regroupement de la carte forestière. Mais, les caractéristiques spectrales des peuplements n'ont pas d'en arriver toujours au même type de regroupement. De plus, il est important de souligner que les images aéroportées présentent une précision plus grande que la source de validation. Ainsi, la plus petite unité cartographiée sur la carte forestière a une superficie de 40 000 m², ce qui représente 156 pixels pour le capteur Daedalus et 1 286 pixels pour le capteur MEIS. Par le fait même, l'imagerie numériques permet de caractériser de plus petite unité territoriale.

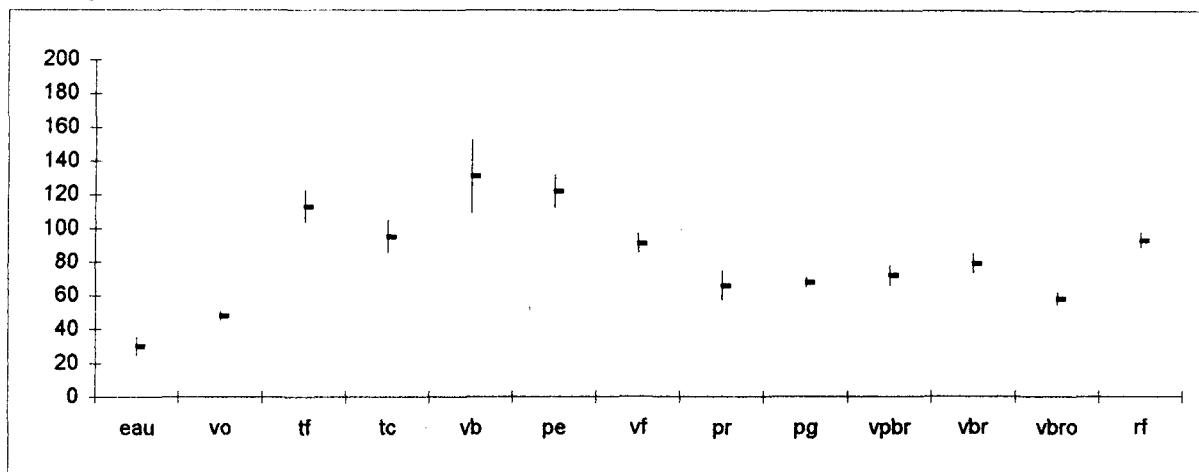
Les catégories déterminées par le processus de classification représentent les grands écosystèmes, c'est-à-dire le réseau hydrographique, la végétation feuillue, la végétation résineuse, les milieux humides et dénudés, la végétation partiellement brûlée et les brûlis. En tout, les classifications ont distingué 12 milieux communs et un milieu propre à chacun des capteurs. Les caractéristiques physiques et spectrales des sites d'entraînement pour chacune des catégories seront décrites ci-dessous. Les figures 15 et 16 présentent sous forme de graphique les caractéristiques spectrales des différentes catégories.

Figure 15: Représentation de l'intensité moyenne des catégories pour le capteur Daedalus

bande spectrale 3 (450-500 nm)



bande spectrale 7 (650-690 nm)



bande spectrale 9 (800-890 nm)

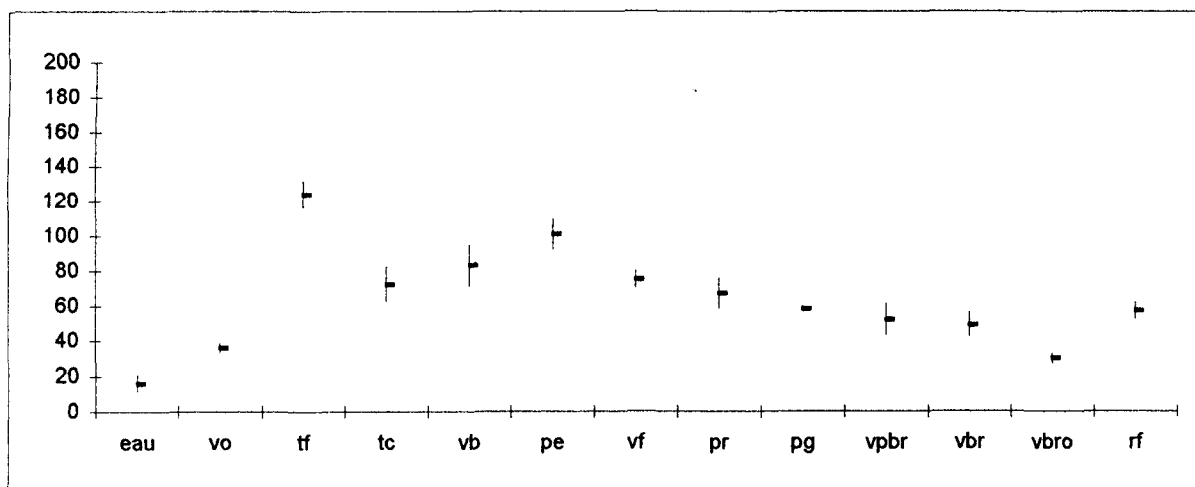
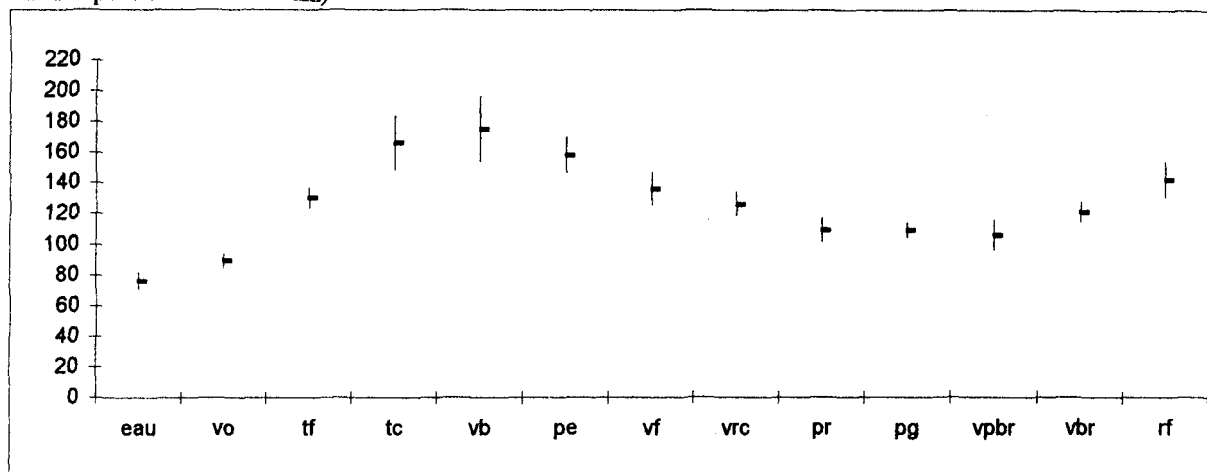
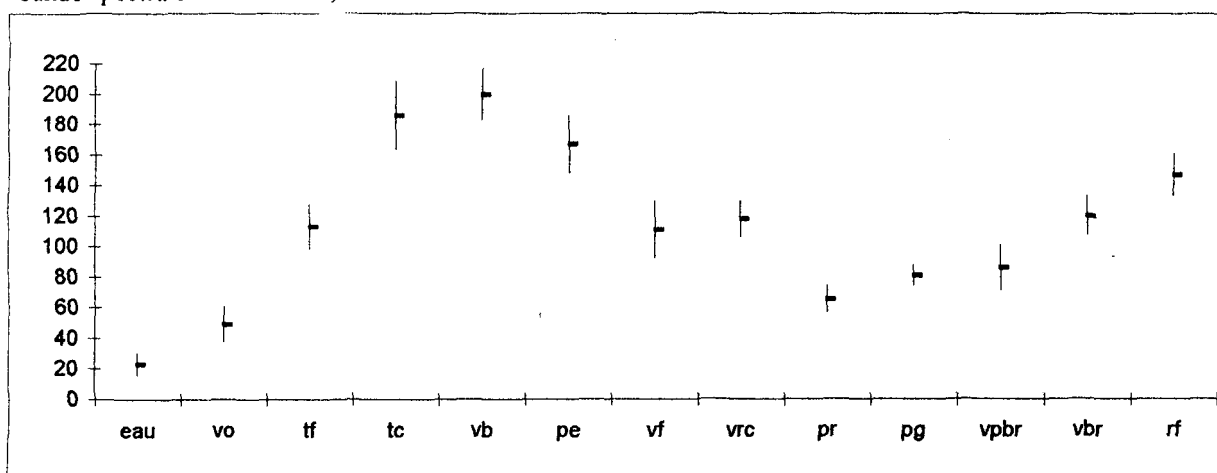


Figure 16: Représentation de l'intensité moyenne des catégories pour le capteur MEIS

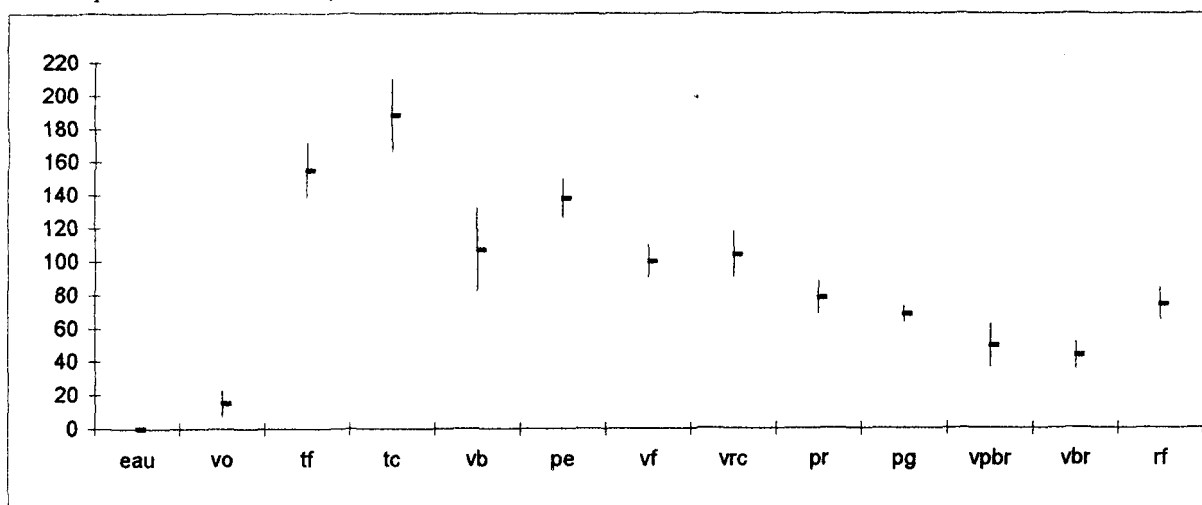
bande spectrale 2 (507-525 nm)



bande spectrale 5 (658-687 nm)



bande spectrale 7 (843-897 nm)



Comme, le survol des capteurs aéroportés a eu lieu à la fin du printemps, et qu'à cette date, la feuillaison printanière était à peine débutée, la réflectance de certains types de végétation tels que les feuillus peut être influencée par la réflectance du sol (végétation morte de l'automne précédent), de même que celle en sous-étage (végétation résineuse).

La première catégorie identifiée est le réseau hydrographique (eau). Le choix des sites d'entraînement s'est effectué sans problème étant donné le nombre de lacs (8) et la présence de la rivière du Chef. Comme les caractéristiques spectrales entre les sites d'entraînement de la rivière et ceux des lacs ne présentaient pas de variation importante, il a été possible de tous les regrouper à l'intérieur d'une même catégorie.

Les caractéristiques spectrales du réseau hydrographique présentent une réflectance faible comparativement aux autres catégories, comme le montrent les figures 15 et 16. La seule catégorie se rapprochant de celle-ci est la végétation ombragée (vo). Lors du survol, le soleil n'était pas encore au zénith, par le fait même, les secteurs accidentés présentent une sous-exposition. Ainsi, la réflectance très faible de l'ombre masque la végétation du côté ouest de la colline circulaire. Malgré les similarités spectrales de ces deux catégories, elles se différencient plus particulièrement à l'intérieur des bandes spectrales 7 et 9 pour le capteur Daedalus, et à l'intérieur des bandes spectrales 5 et 7, pour le capteur MEIS.

Pour les milieux humides, il a été impossible de créer une seule catégorie analogue à la carte forestière puisque ces parcelles se composent généralement d'une végétation hétérogène. Nous constatons et ce, plus particulièrement pour le capteur MEIS, que les secteurs présentant une forte réflectance (clairs) semblent représenter une végétation basse, tandis que les secteurs présentant une réflectance moins élevée (foncés) montrent une végétation diversifiée en hauteur et en densité. Comme, il était difficile de relier ce phénomène à un type de végétation, nous avons nommé les secteurs ayant une forte réflectance les tourbières claires (tc), tandis que ceux présentant une intensité plus faible sont nommés les tourbières foncées (tf). Pour le capteur MEIS, une troisième catégorie a permis de raffiner la végétation limitrophe aux milieux humides soit: la végétation résineuse clairsemée (vrc). Elle se localise principalement en bordure des milieux marécageux et des cours d'eau.

Ces trois catégories présentent des caractéristiques spectrales similaires (figures 15 et 16). Pour le capteur Daedalus, les tourbières foncées (tf) se différencient des autres catégories avec la bande spectrale 9, tandis que les tourbières claires présentent beaucoup de similitude avec la végétation feuillue (vf). Pour le capteur MEIS, la distinction entre les tourbières claires (tc) et foncées (tf) se fait à travers toutes les bandes spectrales. Néanmoins, ces deux catégories se dégagent des autres plus particulièrement avec la bande spectrale 5. La végétation résineuse clairesemée (vrc) se démarque des tourbières avec la bande spectrale 7. Toutefois, les caractéristiques spectrales de cette catégorie se confondent

facilement avec celles de la végétation basse (vb), de la végétation feuillue (vf), et de la régénération feuillue (rf).

La végétation basse (vb) correspond aux milieux dégagés ayant une végétation herbacée, de même que certains milieux marécageux recouverts par des herbes. Cette catégorie se distingue des autres à l'aide de la bande spectrale 3 pour le capteur Daedalus. Avec le capteur MEIS, cette catégorie offre un profil ressemblant à la tourbière claire (vc) et à la peupleraie (pe).

La végétation feuillue n'a pas pu être regroupée à l'intérieur d'une seule catégorie puisque la végétation, située sur le côté nord-est de la colline circulaire, présente une forte réflectance à l'intérieur de toutes les bandes spectrales. Ce phénomène se rattache entre autre à sa topographie qui combinée à la position du soleil lors du passage des capteurs, provoque une suréflectance de la paroi. Comme le secteur surexposé est composé en majorité de peupliers faux-tremble sur la carte forestière, cette catégorie a été nommée la peupleraie. Comme mentionné précédemment, cette catégorie présente des affinités avec la végétation basse (vb). Cependant, les caractéristiques spectrales de celle-ci se démarquent plus particulièrement à l'intérieur des bandes spectrales 9 (Daedalus) et 7 (MEIS).

Outre ce secteur (près de la colline circulaire), les peuplements purs de peuplier faux-tremble se retrouvent peu représentés. En général sur le territoire, les feuillus se composent de plusieurs essences (peuplier faux-tremble, bouleau à papier et d'autres feuillus intolérants). De plus, la plupart d'entre eux sont à tendance résineuse.

La seconde catégorie de peuplement feuillu représente donc une végétation feuillue (vf) à tendance résineuse. Comme mentionné précédemment, cette catégorie offre des caractéristiques spectrales se rapprochant des tourbières claires et de la végétation résineuse clairsemée (vrc). Les caractéristiques spectrales de ces catégories sont quasi similaires et ce n'est que la moyenne des sites d'entraînement qui les différencie et ce, pour les deux capteurs.

Il a été possible de démarquer les peuplements feuillus affectés par le feu. Une des caractéristiques de ces peuplements, après un feu, est qu'ils se régénèrent rapidement et peuvent pousser d'un à deux mètres en quelques années. Ainsi deux ans après le feu, il semble plus probable que les éléments discernés par les capteurs, à ces endroits, soient de la régénération. Nous nommons donc cette catégorie la régénération feuillue (rf). Les caractéristiques spectrales de cette catégorie présentent des affinités avec les tourbières (tc) et la végétation feuillue (vf) à l'intérieur du domaine du visible. Toutefois, le proche infrarouge permet de les discerner et ce, pour les deux capteurs.

L'essence dominante de la végétation résineuse sur le territoire est l'épinette noire et se regroupe généralement en peuplement pur. Néanmoins, d'autres essences résineuses, comme le sapin baumier et le pin gris, peuvent composer une partie de la pessière. Par conséquent, cette catégorie se nomme la pessière à tendance résineuse (pr). Nous retrouvons aussi quelques peuplements purs de pin gris. Malgré leur superficie restreinte, il a été possible de les différencier de la pessière. Par ailleurs, ces deux catégories présentent beaucoup d'affinité spectrale et ce, plus particulièrement dans le domaine du visible. Toutefois, elles se distinguent pour le capteur Daedalus à l'intérieur de la bande spectrale 9, tandis que pour le capteur MEIS, elles se différencient avec les bandes spectrales 5 et 7.

Le feu n'a pas affecté la végétation de façon uniforme et certains secteurs présentent une végétation partiellement brûlée (vpbr). Cette catégorie se caractérise par un milieu hétérogène entre la forêt saine et brûlée. Par conséquent, sa signature spectrale contient une diversité d'intensité qui chevauche la pessière à tendance résineuse et la végétation brûlée. Les caractéristiques spectrales de la végétation partiellement brûlée se distinguent de la pessière à tendance résineuse et de la végétation brûlée à l'aide de la bande spectrale 3 pour le capteur Daedalus tandis que pour le capteur MEIS, c'est la bande spectrale 5.

Et pour finir, la végétation brûlée (vbr) a été identifiée. Cette catégorie est cruciale pour ce projet, le but étant de déterminer les secteurs incendiés et les secteurs sains. Pour le capteur MEIS, cette catégorie se distingue des autres avec les bandes spectrales 5 et 7. Pour

sa part, le capteur Daedalus distingue deux catégories de végétation brûlée. Certains endroits légèrement accidentés produisent un effet d'ombrage. Nous avons dû créer deux catégories pour délimiter les brûlis, soit la végétation brûlée et la végétation brûlée ombragée.

4.2 L'ANALYSE DES CLASSIFICATIONS

Une fois les sites échantillons choisis, nous procédons à la classification des images. Il existe plusieurs méthodes de classification. Nous retrouvons parmi les principales, la classification par parallélipède, la classification par distance minimale et la classification par maximum de vraisemblance. Nous avons privilégié la dernière méthode de classification soit celle par maximum de vraisemblance, qui est la plus utilisée en milieu forestier.

4.2.1 Les matrices de confusion

Un rapport statistique des sites d'entraînement au moyen d'une matrice de confusion vient compléter l'image classifiée. Les résultats de la matrice de confusion pour les deux classifications sont présentés aux tableaux 3 et 4. La matrice de confusion évalue l'assignation des pixels des sites d'entraînement à l'intérieur d'une catégorie lors de la classification.

Ainsi, pour une catégorie donnée, telle que la pessière à tendance résineuse (tableau 3), 95,9% des 170 pixels ont été assignés à cette catégorie lors de la classification. Cependant, certains pixels définis par l'interprète comme étant de la pessière à tendance résineuse se confondent avec d'autres catégories soient la tourbière claire (0,6%), la végétation feuillue (2,4%) et la végétation résineuse partiellement brûlée (1,2%). La matrice de

Tableau 3: La matrice de confusion de la classification des bandes spectrales 3, 7, et 9 du capteur Daedalus.

Nom	Nb de pixels	0 %	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %	6 %	7 %	8 %	9 %	10 %	11 %	12 %	13 %
1	357	1,7	98,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	188	0,0	0,0	97,8	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	88	2,3	0,0	3,4	80,7	0,0	0,0	1,1	0,0	1,1	0,0	0,0	1,1	10,0	0,0
4	30	3,3	0,0	4,0	0,0	86,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	3,3	0,0	0,0
5	78	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	49	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	100	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	170	0,0	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	2,4	0,0	95,9	0,0	0,0	1,2	0,0	0,0
9	78	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	96,2	0,0	2,6	0,0	0,0
10	79	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	98,7	0,0	1,3	0,0
11	59	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	91,5	1,7	6,8
12	264	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5,3	4,2	89,8	0,0
13	88	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1	98,9

exactitude moyenne estimée: 94,96%

Légende:

0	Pixels non classifiés	5	Peupleraie	10	Régénération feuillue
1	Réseau hydrographique	6	Végétation feuillue	11	Végétation résineuse partiellement brûlée
2	Tourbière foncée	7	Pinède	12	Végétation brûlée
3	Tourbière claire	8	Pessière à tendance résineuse	13	Végétation brûlée ombragée
4	Végétation basse	9	Végétation ombragée		

Tableau 4: La matrice de confusion de la classification des bandes spectrales 2, 5 et 7 du capteur MEIS

Nom	nb pixel	0 %	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %	6 %	7 %	8 %	9 %	10 %	11 %	12 %	13 %
1	3083	2,0	96,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,4	0,0	0,0	0,0
2	1014	1,1	0,0	97,4	0,1	0,0	1,0	0,2	0,1	0,0	0,1	0,0	0,0	0,2	0,0
3	634	1,3	0,0	3,2	92,7	0,0	0,0	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	159	0,0	0,0	0,0	0,0	88,5	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0	10,9	0,0	0,0
5	187	0,0	0,0	1,6	0,0	0,0	94,7	1,1	2,1	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0
6	361	0,3	0,0	1,4	0,0	0,0	0,3	95,3	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	183	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	3,8	89,1	0,0	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0
8	108	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	99,1	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0
9	744	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,5	97,6	0,0	0,0	0,3	0,0
10	199	3,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	95,5	0,0	1,5	0,0
11	220	2,7	0,0	0,0	0,0	0,5	2,7	0,0	0,0	0,5	0,5	0,0	89,5	0,0	3,6
12	335	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	0,0	0,3	1,5	3,0	0,6	88,8	2,4
13	896	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,8	2,6	92,6

exactitude moyenne estimée: 93,57%

Légende:

0	Pixels non classifiés	5	Végétation résineuse clairsemée	10	Végétation ombragée
1	Réseau hydrographique	6	Peupleraie	11	Régénération feuillue
2	Tourbière foncée	7	Végétation feuillue	12	Végétation résineuse partiellement brûlée
3	Tourbière claire	8	Pinède	13	Végétation brûlée
4	Végétation basse	9	Pessière à tendance résineuse		

confusion est un bon outil pour vérifier la pertinence des sites d'entraînement définis par l'interprète.

Les matrices de confusion démontrent une précision très acceptable des sites d'entraînement pour les deux classifications. Pour le capteur Daedalus, la matrice affiche une précision globale de 94,96% (tableau 3) tandis que pour le capteur MEIS, elle montre une précision globale de 93,57% (tableau 4). Toutefois, il est important de mentionner que pour chacun des sites échantillons, les pixels présentant trop d'écart par rapport à la moyenne du site ont été enlevés. Par le fait même, cette procédure a pu entraîner une sur-estimation de l'exactitude moyenne des matrices de confusion.

Dans l'ensemble, le choix des sites d'entraînement semble satisfaisant puisque la proportion de confusion entre les sites échantillons est faible. Les catégories présentant plus de confusion sont la tourbière claire, la végétation basse et la végétation brûlée pour le capteur Daedalus tandis que pour le capteur MEIS, ceux présentant plus de confusion sont les résineux partiellement brûlés, la végétation basse et la régénération feuillue.

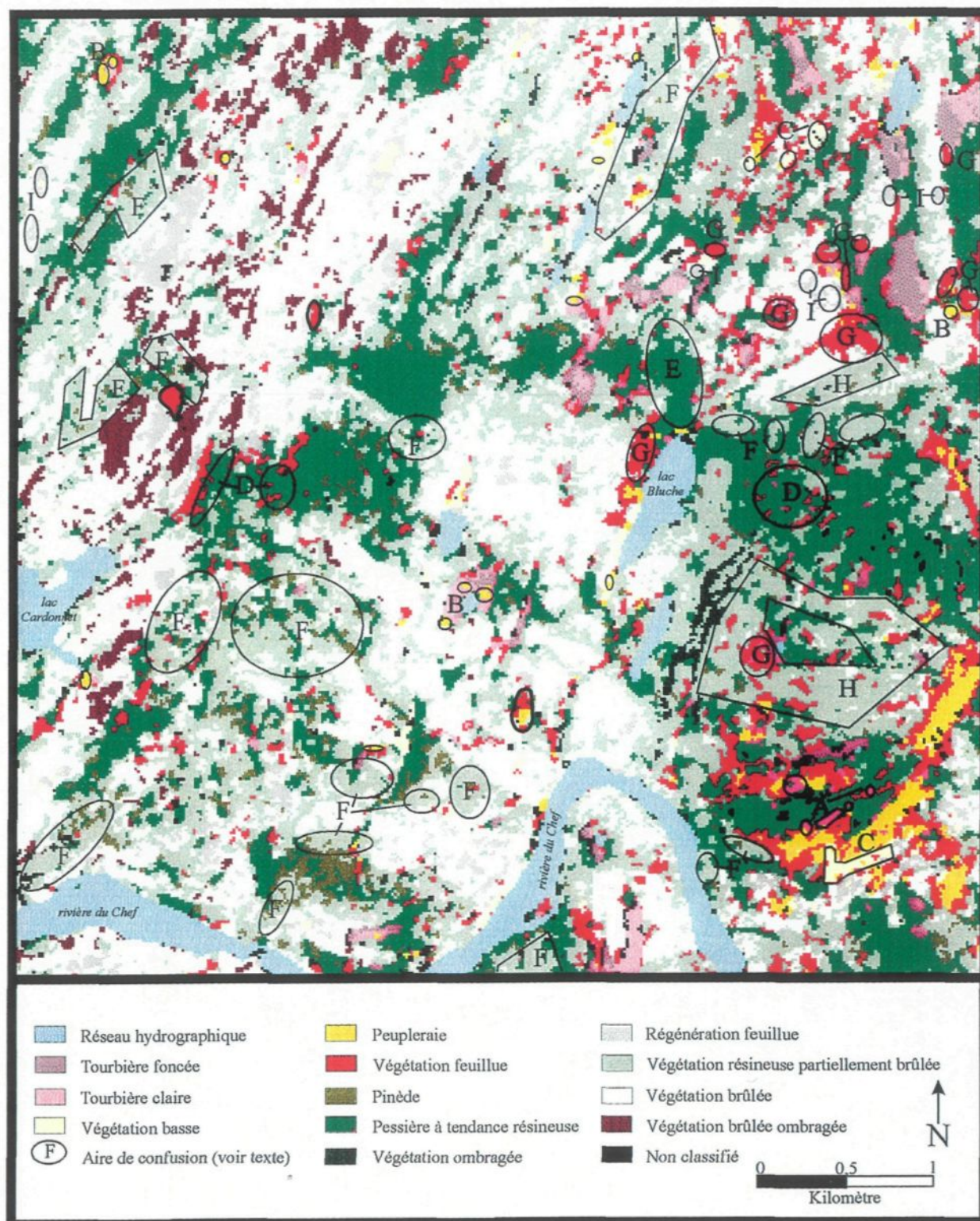
4.2.2 Les images classifiées

Les résultats des matrices de confusion suggèrent que les différents milieux identifiés par les classifications offrent une bonne représentation du territoire pour les deux classifications. Néanmoins, il est nécessaire de procéder à une validation de ces dernières, afin de vérifier leur représentativité. La procédure de validation employée est de type qualitatif. Les images résultantes sont validées visuellement à partir de photographies aériennes et de cartes forestières.

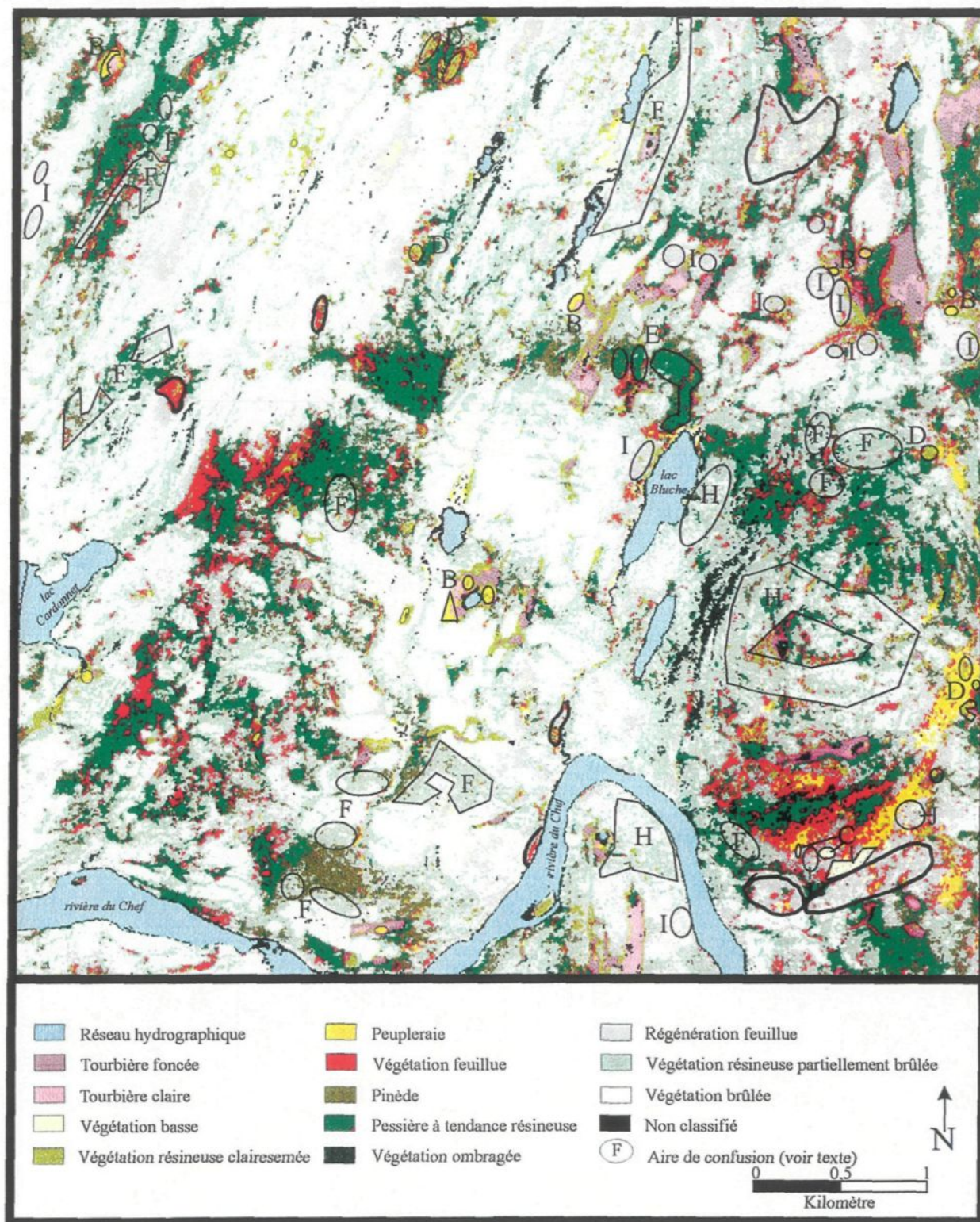
Les images obtenues lors de la classification présentent un regroupement des pixels en fonction des catégories définies au préalable. Ce regroupement est plus ou moins homogène en certains cas et il s'exprime à l'intérieur de certains grands ensembles par un effet « poivre et sel ». Pour remédier à cet effet et rendre les catégories plus homogènes, nous avons appliqué un filtre modal de trois pixels par trois lignes aux classifications. L'image résultante est donc plus facile à interpréter et à comparer avec la carte écoforestière (figures 17 et 18).

À première vue, l'image produite par les classifications offre un aperçu global de la composition du territoire de 1985 qui se compare aux cartes forestières et aux photographies aériennes. Le réseau hydrographique, les milieux humides et la végétation feuillue

La figure 17: Classification par maximum de vraisemblance avec un filtre mondial de 3X3 avec les bandes spectrales 3,7, et 9 du capteur Daedalus



La figure 18: Classification par maximum de vraisemblance avec un filtre mondial de 3X3 avec les bandes spectrales 3,7, et 9 du capteur Daedalus



offrent une similitude appréciable avec les sources de validation. De plus, à l'intérieur des brûlis, les classifications démontrent beaucoup plus de détails que la carte forestière. Ainsi, elles identifient la régénération feuillue et certains secteurs partiellement brûlés, que la carte forestière omet de représenter. La végétation partiellement brûlée est la catégorie la plus difficile à valider à cause de ses caractéristiques spectrales qui chevauchent tant la végétation saine que la végétation brûlée.

Toutefois, les classifications se différencient entre autre par leur résolution spatiale. Comme mentionné au chapitre 2, le capteur Daedalus a une résolution spatiale de 256 m² tandis que celle du capteur MEIS correspond à 31 m², c'est-à-dire, qu'il faut 8 pixels de MEIS pour occuper la même surface qu'un pixel Daedalus. Ainsi, pour une même zone cartographiée, nous pourrions observer une différence non négligeable entre la superficie identifiée avec le capteur Daedalus et celle reconnue par le capteur MEIS. Cette caractéristique se visualise principalement au pourtour des polygones ou dans leur prolongement linéaire. Par le fait même, la classification avec le capteur MEIS offre un degré de découpage plus raffiné que celle effectuée avec le capteur Daedalus.

Afin d'arriver à une évaluation plus exacte des résultats obtenus, les superficies des différentes catégories des classifications sont comparées à celles de la carte forestière après feu. Comme les classes forestières sont plus détaillées que la classification spectrale, nous avons réuni l'information en sept groupes soit: le réseau hydrographique, les milieux

humides, les feuillus, les résineux, les feuillus partiellement brûlés, les résineux partiellement brûlés et les brûlis (tableau 5). Le détail de ce découpage est présenté à au tableau 6.

Une description détaillée de chacun de ces groupes est présentée ci-dessous.

Tableau 5: Superficie couverte selon les regroupements pour la carte forestière après feu et les classifications

Groupe	Carte forestière		Capteur Daedalus		Capteur MEIS	
	hectare	%	hectare	%	hectare	%
Réseau hydrographique	157	5	130	4	110	3
Milieus humides	86	3	99	3	77	2
Feuillus	173	5	263	8	195	6
Résineux	971	30	714	22	658	20
Feuillus partiellement brûlés	96	3	89	3	227	7
Résineux partiellement brûlés	385	12	930	29	917	28
Brûlis	1381	42	964	31	1027	32
Non classifié			49	2	27	2
Total	3249	100	3238	100	3238	100

Tableau 6: Le regroupement des catégories afin de les comparer à la carte forestière après feu

GROUPE	CARTE FORESTIÈRE	CATÉGORIE
Réseau hydrographique	Lacs et la rivière du Chef	Réseau hydrographique
Milieux humides	Dénudé et semi-dénudé sec Dénudé et semi-dénudé humide Aulnaie	Tourbière claire et foncée Végétation basse
Feuillus	Bétulaie Peupleraie Mélangés Feuillus intolérants	Peupleraie Végétation feuillue
Résineux	Pessière Pinède Sapinière	Pinède Pessière à tendance résineuse Végétation résineuse clair-semée Végétation ombragée
Feuillus partiellement brûlés	Bétulaie pbr * Peupleraie pbr Mélangés pbr Feuillus intolérants pbr	Régénération feuillue
Résineux partiellement brûlés	Pessière pbr Pinède pbr Sapinière pbr	Végétation résineuse partiellement brûlée
Brûlis	Brûlis	Végétation brûlée

* pbr : partiellement brûlé

Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique a bien ressorti dans les classifications. Les seuls secteurs problématiques sont les berges qui présentent des caractéristiques spectrales hétérogènes, par le fait même, difficiles à regrouper. Ces milieux se retrouvent donc généralement non classifiés. Pour le capteur MEIS, une partie de la végétation ombragée se confond aux berges.

Les milieux humides

Globalement, les milieux humides identifiés par les classifications sont situés au même endroit que la carte forestière. Toutefois, de petits secteurs de toubière claire et de végétation basse se confondent à la peupleraie sur la carte forestière (secteur A, figure 17 et secteur C, figure 18). La sous-évaluation des milieux humides par rapport à la carte forestière peut s'expliquer, en partie, par la présence de peupleraies à l'intérieur des tourbières (secteur B, figures 17 et 18). De plus, pour le capteur MEIS, la végétation résineuse clairsemée caractérisant avant tout les milieux limitrophes des tourbières, empiète quelques fois sur celle-ci.

Les feuillus

Ce groupe se compose de la peupleraie et de la végétation feuillue. Pour les deux classifications, la catégorie de la peupleraie présente peu de différence avec la carte forestière. Cette catégorie se confond à quelques endroits avec les milieux humides (secteurs B,

figures 17 et 18). Par contre, pour la classification avec le capteur Daedalus, la catégorie de la végétation feuillue présente quelques ambiguïtés. D'une part, certains secteurs devant apparaître en végétation feuillue sont représentés par une végétation résineuse (secteur D, figure 17) tandis que nous observons le phénomène inverse près des milieux humides (secteur G, figure 17). La différence entre les feuillus (tableau 5) de la carte forestière et des classifications peut s'expliquer par la surévaluation de la végétation feuillue près des milieux humides et aussi par le fait que les classifications identifient certains peuplements feuillus présents sur la carte forestière de 1969 et absents de la carte forestière de 1984 (secteur E, figures 17 et 18).

Les feuillus partiellement brûlés

Les feuillus partiellement brûlés sont représentés sur les classifications par la régénération feuillue. Cette catégorie caractérise généralement des peuplements de feuillus partiellement brûlés identifiés par la carte forestière. Toutefois, elle distingue aussi les peuplements de feuillus brûlés omis par la carte forestière lorsqu'ils se situent à l'intérieur de brûlis. Comme le présente le tableau 5, pour le capteur MEIS, cette catégorie est surévaluée comparativement à la carte forestière. Elle occupe près du triple (227 ha) des superficies de la carte forestière après feu (96 ha). Cette confusion se produit principalement à l'intérieur de peuplements feuillus sains sur la carte forestière (secteur J, figure 18) ou à l'intérieur de brûlis (secteur I, figures 17 et 18).

Les résineux , les résineux partiellement brûlés et les brûlis

Lorsque nous regroupons ces trois groupes, la proportion du territoire occupée est sensiblement identique pour les classifications et la carte forestière. Toutefois pris séparément, ces groupes ne correspondent plus à la carte forestière. Le groupe des résineux partiellement brûlés est celui présentant le plus d'ambiguïté. Pour les deux classifications, il occupe près du triple (tableau 5) des superficies comparativement à celles identifiées sur la carte forestière. Il empiète donc sur les résineux et les brûlis et ainsi, ces deux groupes se trouvent en quelque sorte sous-évalués d'environ 10% par rapport à la carte forestière. Les secteurs F des figures 17 et 18 identifient les endroits où la végétation devrait être résineuse, tandis que les secteurs H soulignent des milieux où la végétation devrait apparaître brûlée.

Le résultat des matrices de confusion nous indiquent une précision des classifications de 94,96% pour le capteur Daedalus et de 93,57% pour le capteur MEIS. Cependant, suite à l'analyse des classifications (tableau 7), nous constatons que la superficie de chacun des groupes montre en moyenne une différence de plus ou moins 25% par rapport à la carte forestière (en omettant la végétation partiellement brûlée), c'est-à-dire que la précision des classifications correspond à environ 75%. Comme identifié précédemment, la méthode de sélection des sites échantillons entraîne souvent une surestimation de la précision de la classification.

Tableau 7: Différence de proportion entre les classifications et la carte forestière après feu.

Groupe	Carte forestière	Daedalus	MEIS	Différence Daedalus p/p c. forestière	Différence MEIS p/p c. forestière	Différence MEIS p/p Daedalus
	hectare	hectare	hectare	%	%	%
Réseau hydrographique	157	130	110	17	30	15
Milieus humides	86	99	77	15	11	22
Feuillus	173	263	195	52	13	26
Résineux	971	714	658	26	32	8
Feuillus partiellement brûlés	96	89	227	* 7	* 137	155
Résineux partiellement brûlés	385	930	917	* 142	* 138	1
Brûlis	1381	964	1027	30	26	7
Non classifié		49	27			
Total	3249	3238	3238			
Différence moyenne				** 29	** 22	33

* La carte forestière englobe souvent à l'intérieur des brûlis, les brûlis partiels. Par le fait même, ceux-ci se trouvent surestimés par rapport à la carte forestière.

** Nous n'avons pas tenu compte des brûlis partiels pour calculer la moyenne.

Dans l'ensemble, les catégories définies pour les deux capteurs sont quasi similaires; seules les catégories de la végétation résineuse clairsemée (MEIS) et de la végétation brûlée ombragée (Daedalus) ne sont pas analogues. Comme le démontre le tableau 7, les superficies couvertes par les différents groupes présentent des différences mineures pour chacun des capteurs. Toutefois, la principale différence entre ceux-ci est la caractérisation des milieux feuillus. Le capteur Daedalus offre une moins bonne localisation de la végétation feuillue à tendance résineuse. Elle se confond en grande partie avec les milieux humides. Pour le capteur MEIS, c'est la régénération feuillue qui est fortement surestimée. Elle

empiète parfois sur la végétation feuillue ou la végétation résineuse partiellement brûlée, ce qui accroît la différence moyenne entre les deux classifications à 33% (tableau 7).

En général, ces classifications offrent donc une représentation acceptable des brûlis de même que de la végétation saine sur le territoire à l'étude. Pour ce qui est des secteurs partiellement brûlés, les résultats peuvent paraître discutables par rapport à la carte forestière. Cependant, il est important de noter que la carte forestière représente les brûlis sous une forme généralisée et les brûlis partiels y sont souvent englobés. De plus, il est nécessaire de rappeler que les données numériques sont enregistrées deux ans après le feu. Ainsi, cette catégorie discrimine un milieu hétérogène se composant entre autres de végétation saine, de régénération et de végétation perturbée. Une étude de Lopez Garcia et Caselles (1991) souligne qu'à partir de la deuxième année suivant un feu, la courbe de végétation à l'intérieur des brûlis devient progressivement similaire aux secteurs sains. Par conséquent, certains secteurs brûlés se recolonisent plus rapidement et les caractéristiques spectrales, deux ans après le feu, peuvent ressembler à celles de la végétation partiellement brûlée.

CHAPITRE V

DISCUSSION

Ce travail a permis à l'aide de l'imagerie aéroportée (Daedalus et MEIS) de cartographier certains degrés de perturbation de la forêt après un incendie. Au total, trois classes d'intensité de brûlage ont pu être identifiées, soit la régénération feuillue, la végétation résineuse partiellement brûlée et la végétation brûlée. De plus, la végétation non perturbée a été également discriminée en plusieurs catégories.

En général, les résultats ont démontré la possibilité d'utiliser les données numériques pour distinguer la végétation saine et brûlée. De plus, à l'intérieur de la végétation saine, les classifications ont différencié les milieux humides, la végétation résineuse et la végétation feuillue. Toutefois, nous n'avons pas tenté de discriminer à l'intérieur des brûlis différents niveaux d'intensité de perturbation puisque nous n'avons pas de vérité terrain et que les cartes forestières ne permettent pas autant de précision.

Une attention particulière a été portée au milieu transitoire que forme la végétation partiellement brûlée. La validation de cette catégorie n'a pas permis d'évaluer le degré de perturbation de ces secteurs. Comme les données ont été enregistrées deux ans après le feu, il est fort probable que l'information discriminée soit un mélange de régénération et de sol dénudé. Nous ne pouvons que souligner l'importance de posséder des données numériques enregistrées moins d'un an après le feu. De plus, une validation de terrain des secteurs problématiques, suivant la prise des données numériques, aurait sûrement augmenté la précision de la classification.

Nonobstant ces résultats, l'imagerie numérique est sûrement un outil non négligeable pour caractériser les territoires incendiés. Plusieurs études ont démontré la possibilité d'utiliser l'imagerie satellitaire pour discriminer les brûlis et les brûlis partiels (Husson 1982; Tanaka et al. 1983, Milne 1986, Chuvieco et Congalton 1988-1989, Jakubauskas et al. 1990, Dagorne et al. 1990, Simpson 1990). Un survol des capteurs moins d'un an après le feu, de même qu'une validation de terrain auraient permis de meilleurs résultats.

Pour le moment, la classification semi-supervisée des données numériques n'offre pas autant de détail que l'information discriminée par un photo-interprète. L'analyse de celui-ci tient compte de certaines subtilités des images (la texture, l'effet d'ombrage, etc.) que la classification semi-supervisée ne peut pas discriminer. Néanmoins, un avantage des données numériques est que l'enregistrement d'une ligne de vol correspond à plusieurs photographies aériennes. Ainsi, elles offrent une évaluation globale et rapide des caractéristiques d'un territoire.

À titre d'exemple, le territoire d'étude couvre une superficie de 3 249 ha. Sa photo-interprétation nécessite une quinzaine de photographies aériennes au 1 : 15 000 tandis qu'une seule image de 1024 pixels par 1024 lignes pour le capteur MEIS ou de 355 pixels par 355 lignes pour le capteur Daedalus couvre ce territoire.

Par conséquent, une différence entre ces deux capteurs est la résolution spatiale. Le choix porté vers l'un ou l'autre des capteurs dépend entre autres de la précision recherchée par l'utilisateur. Le capteur Daedalus offre une généralisation par rapport au capteur MEIS, vu sa résolution spatiale huit fois plus grande. Ainsi, le capteur Daedalus serait sûrement plus avantageux à utiliser sur de grands territoires puisqu'il offre une bonne représentation du territoire avec moins de données. Toutefois, les deux capteurs sont limités à la largeur de leur champ balayé.

Le champ balayé des images mises à notre disposition couvre une largeur d'environ 11,5 km pour le capteur Daedalus et 5,7 km pour le capteur MEIS. Le territoire affecté par le feu couvre dans sa portion la plus large (est-ouest) une superficie de 34,5 km. Il serait donc nécessaire de recourir à au moins trois lignes de vol pour le capteur Daedalus et à sept lignes de vol pour le capteur MEIS afin d'analyser l'ensemble du territoire incendié. La juxtaposition de plusieurs lignes de vol peut engendrer certaines difficultés dues aux problèmes de corrections radiométriques des images et augmenter le nombre de manipulations. Ainsi, le choix de l'un ou l'autre des capteurs dépendra du niveau de précision à atteindre par rapport aux coûts des passages aériens.

Ce projet n'a pas déterminé de façon critique les forces et les faiblesses des capteurs Daedalus et MEIS. Nous soulignons du point de vue spectral que l'utilisation de bandes spectrales similaires a permis d'identifier sensiblement les mêmes informations.

L'apport du moyen infrarouge et de l'infrarouge thermique est souvent mentionné lors de la caractérisation des brûlis avec des capteurs satellitaires; il serait tout de même intéressant de voir si ces bandes spectrales pourraient améliorer les classifications des capteurs aéroportés.

Ce projet a démontré que l'imagerie numérique permet une discrimination des brûlis. De plus, cette information étant numérique, elle peut s'intégrer à l'intérieur d'un système d'information géographique (SIG). Donc en incorporant les informations de la carte forestière avant feu et les brûlis déterminés par la classification des données numériques, il est possible d'obtenir une évaluation globale des dommages causés à la végétation.

CONCLUSION

Ce projet avait pour but d'identifier différentes intensités de brûlis sur un territoire de 3 249 ha avec des images numériques aéroportées. Ces données proviennent des capteurs Daedalus et MEIS. Avant d'effectuer l'analyse des données, il a été nécessaire de procéder aux corrections radiométriques de celles-ci. Afin d'atténuer l'effet de réflectance bidirectionnelle, nous avons appliqué une méthode de correction à partir d'une équation de type polynomial.

Suite à la classification semi-supervisée, il a été possible de catégoriser sensiblement les mêmes milieux pour les deux capteurs. Toutefois, la classification avec le capteur Daedalus surévalue la végétation feuillue tandis que les résultats obtenus avec le capteur MEIS tendent à surévaluer la régénération feuillue par rapport à la carte forestière. De plus, nous dénotons pour les deux classifications une sous évaluation des brûlis et des résineux au profit des résineux partiellement brûlés.

En raison de la date du survol des capteurs, il a été difficile de discriminer exactement la végétation partiellement brûlée puisqu'elle regroupe une partie de la régénération. Il aurait donc été souhaitable pour discriminer plus exactement les caractéristiques des brûlis et des brûlis partiels, de disposer d'images prises dans l'année suivant le feu et d'analyser les résultats immédiatement après le survol.

Ce projet a démontré que l'imagerie numérique peut discriminer les grands ensembles de végétation saine, partiellement brûlée et brûlée. Ces résultats peuvent aider les compagnies forestières à estimer les dommages après un incendie. La classification produite par les images numériques combinée à la carte forestière offre un outil additionnel pour aider à la prise de décision lors de la récupération de la matière ligneuse après feu.

Les capteurs Daedalus et MEIS ne sont pas les seules sources de données numériques aéroportées. Actuellement, les données provenant de la vidéographie aérienne multispectrale (VAM) sont de plus en plus utilisées. Dans une perspective d'avenir, il serait intéressant d'utiliser ce type d'outil afin de caractériser un territoire incendié et de comparer les résultats par rapport aux capteurs aéroportés utilisés dans ce travail.

BIBLIOGRAPHIE

Ahern, F. J., et al, 1986, « An initial evaluation of two digital airborne imagers for surveying spruce budworm defoliation », *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol.52, no 10, p. 1647-1654.

Ahern, F. J., et al., 1991, « A quantitative relationship between forest growth rates thematic mapper reflectance measurements », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, no3 p. 387-400.

Ambrosia, V. G., 1990, « High altitude aircraft remote sensing during the Yellowstone national park wildfires », *Geocarto International*, no 3, p.43-47.

Barnsley, M. J., Kay, S. A. W., 1990, « The relationship between sensor geometry, vegetation-canopy geometry and image variance », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, no 6, p. 1075-1083.

Bonn, F., Rochon, G., 1992, « Précis de télédétection, volume 1: Principes et méthodes », Édition les Presses de l'Université du Québec, 485 pages.

Brand, D. G. et al., 1991, « Forest regeneration surveys: Design, data collection, and analysis », *The Forestry Chronicle*, vol. 67, no 6, p.649-657.

Brunelle, J. et al., 1990, « Évaluation spectrale et texturale des données du capteur MEIS II: étude préliminaire des superficies forestière en régénération », *Compte rendu du Treizième Symposium canadien sur la télédétection*, p. 94-98.

Chuvieco, E., Congalton, R. G., 1988, « Mapping and inventory of forest fires from digital processing of TM data », *Geocarto International*, no 4, p. 41-53.

Chuvieco, E., Congalton, R. G., 1989, « Application of Remote Sensing and geographic information systems to forest fire hazard mapping », *Remote Sensing of Environnement*, no 29, p.147-159.

Cook, E. A., et al., 1989, « Estimating forest productivity with thematic mapper and biogeographical data », *Remote Sensing of Environnement*, no 28, p.131-141.

Dagorne, A., et al., 1990, « L'utilisation de la télédétection aérospatiale en mode multi-satellites , multi-capteurs et multi-dates pour l'étude de la reprise de la végétation après incendie: l'exemple du massif de Tanneron (Var-Alpes-Maritimes) », *Photo-interprétation*, no 1990-5, p. 45-47.

Dupont, O. et al., 1991, « Le traitement des images MEIS pour l'évaluation de la défoliation courante au Nouveau-Brunswick », Compte rendu du Quatorzième Symposium canadien sur la télédétection, p. 47.

Franklin, J., 1986, « Thematic mapper analysis of coniferous forest structure and composition », International Journal of Remote Sensing, vol. 7, no 10, p. 1287-1301.

Gauthier et al., 1992, « Airborne Multispectral Scanning for Forestry an Mapping (with emphasis on MEIS), International Forum, p. 6-8.

Gemmell, F. M. et al., 1990 « MEIS analysis and GIS integration » Compte rendu du Treizième Symposium canadien sur la télédétection, p.166-178.

Goel, N. S., Reynolds N.E., 1989, « Bidirectional canopy reflectance and its relationship to vegetation characteristics » International Journal of Remote Sensing, vol. 10, no 1, p. 107-132.

Hermann, K. et al., 1988, « Preliminary assessment of airborne imaging spectrometer an airborne thematic mapper data acquired for forest decline areas in the Federal Republic of Germany », Remote sensing of Environnement, no 4, p. 129-149.

Husson, A., 1982, « Exemple d'utilisation de la télédétection en France: la cartographie des feux de forêt », Le système Spot d'observation de la terre, L'AQT, p. 16-25.

Jakubauskas, M. E. et al., 1990, « Assessment of vegetation change in a fire-altered forest landscape », Photogrametric Engineering and Remote Sensing », vol. 56, no 3, p.371-377.

Kaufman, Y. J., et al., 1992, « Biomass burning airborne ad spaceborne experiment in the Amazonas (base-A) », Journal of Geophysical Research, vol. 97, no d13, p.14,581-14,599.

Leckie, D. G., 1987, « Factors affecting defoliation assessment using Airborne ultispectral scanner data », Photogrametric Engineering and Remote Sensing », vol. 53, no 12, p.1665-1674.

Leckie, D. G., Ostaff, D.P., 1988, « Classification of airborne multispectral scanner data for mapping current defoliation caused by spruce budworm », Forest Science, vol. 34, no 2, p. 259-275.

Leckie, D. G. et al., 1993, « MIFUCAM: A study of MEIS imagery for forest inventory mapping in Québec », Compte rendu du Seizième Symposium canadien sur la télédétection, p. 605-613.

Lemieux, G.-H. et al., 1987, « Vers une cartographie des microclimats forestiers par thermographie nocturne », Rapport d'étape du projet Ecl 84-5.

Lopez Garcia, M. J., Caselles, V., 1991, « Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data », *Geocarto International*, no 1, p.31-37.

Marceau, D. J., et al., 1991, « Relation entre le schéma de classification et la résolution spatiale et l'impact sur la classification automatisée d'un couvert forestier », *Compte rendu du Quatorzième Symposium canadien sur la télédétection*, p. 307-312.

Matejek, S. et al., 1990, « Étude des possibilités du capteur MEIS II aéroporté pour la cartographie forestière au 1 : 20 000, Québec », *Compte rendu du Treizième Symposium canadien sur la télédétection*, p.283-295.

Milne, A. K., 1986, « The use of remote sensing in mapping and monitoring vegetational change associated with bushfire events in eastern Australia », *Geocarto International*, no 1, p.25-32.

Schmugge, T. J. et al., 1991, « Spectral emissivity variations observed in airborne surface temperature measurements », *Remote Sensing of Environment*, no 35, p. 95-104.

Simpson, C. J., 1990, « Deep weathering, vegetation and fireburn significant obstacles for geoscience remote sensing in Australia », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 11, no 11, p. 2019-2034.

Tanaka et al., 1983, « Preparation of a 1 : 25 000 Landsat map for assessment of burnt area on Etajima Island », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 4, no 1, p. 17-31.

Till, S.M., et al., 1983, « Development, field performance and evaluation of the MEIS II, Multi-detector Electro-optical Imaging Scanner », *Proceedings of seventeenth international Symposium of Remote Sensing of Environment*, vol. 3, p. 1137-1146.

Vincent, P., 1984, « Évaluation des réflectances bidirectionnelles par télédétection aéroportée et méthodes de correction » *Mémoire de M.Sc., département de Géographie, Université de Sherbrooke*, 137 pages.

ANNEXE 1

LES ACÉTATES DES CARTES FORESTIÈRES

Annexe 1a: Carte forestière avant feu



Source: Carte forestière produite par le MTF en 1969

E: Épinette noire Fi: Feuillu intolérant Tr: Peuplier faux-tremble Pg: Pin gris
 FiR: Feuillu intolérant à tendance résineuse in: Inondable Br: Brûlis

Annexe 1b: Carte forestière après feu



Source: Carte forestière produite par le MER en 1984, révisée 1987

E: Épinette noire S: Sapin baumier Pg: Pin gris Bb: Bouleau blanc
 Fi: Feuillu intolérant Pe: Peuplier faux-tremble R: Résineux
 pbr: Partiellement brûlé br: Brûlis

ANNEXE 2

L' INTENSITÉS MOYENNE DES SITES ÉCHANTILLONS POUR LES CORRECTIONS DE LA RÉFLECTANCE BIDIRECTIONNELLE

L'intensité moyenne des sites échantillons de la forêt résineuse saine pour le capteur Daedalus.

no pixel 0 à 400	composante image 3	composante image 5	composante image 7	composante image 9
3	153,76	77,48	81,60	78,08
16	152,32	77,44	80,24	82,48
51	145,08	72,20	75,40	72,48
83	139,32	69,88	72,00	74,12
109	135,36	68,36	70,52	68,76
141	131,20	67,12	70,76	74,12
182	124,76	61,88	64,96	59,04
261	110,92	56,88	59,44	57,36
296	112,00	54,72	56,08	50,32
340	111,96	56,32	59,28	54,40
386	111,96	56,00	58,20	55,04

L'intensité moyenne des sites échantillons de la forêt résineuse saine pour le capteur MEIS.

no du pixel 0 à 1024	Composante image							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	160,98	142,77	81,82	141,25	107,74	110,17	93,77	114,86
2	159,34	138,73	77,36	132,46	98,92	101,42	89,35	117,86
40	160,10	139,04	77,64	131,64	102,33	105,62	91,81	114,01
50	164,71	142,45	80,48	138,15	104,56	107,75	92,71	114,54
90	163,47	142,52	81,42	140,68	104,72	109,24	94,48	117,28
151	151,85	120,49	64,72	109,35	81,61	84,06	74,15	99,29
235	157,35	126,76	70,13	120,70	90,53	98,99	79,94	106,21
307	150,91	116,39	63,78	107,76	74,11	85,18	80,91	107,47
315	155,33	122,84	67,50	114,82	85,43	98,48	79,61	108,15
384	147,65	111,88	61,21	101,45	69,90	82,53	85,37	112,54
429	146,81	111,14	60,55	101,31	71,36	84,76	77,93	107,27
458	147,01	108,49	57,80	98,48	74,54	86,67	67,86	99,82
770	127,06	93,55	47,45	80,99	61,35	65,05	51,09	82,96
805	125,90	95,07	48,99	82,36	60,81	64,67	59,38	89,79
806	123,44	92,68	47,06	77,91	56,33	58,88	61,26	89,52
897	120,83	94,86	47,49	82,00	66,32	67,76	47,81	80,31
915	120,54	94,12	48,00	81,21	59,77	60,06	56,26	85,09
955	114,97	91,41	46,94	79,41	58,20	58,25	51,81	76,15
986	116,75	92,87	47,22	79,53	60,25	59,77	51,99	81,55
1001	115,76	94,70	48,79	82,89	61,90	60,78	58,34	84,81
1003	116,48	92,25	47,00	79,07	59,19	58,46	49,94	78,09

ANNEXE 3

LES ÉQUATIONS PERMETTANT DE RÉALISER LES CORRECTIONS DE L'EFFET DE RÉFLECTANCE BIDIRECTIONNELLE

Les équations permettant de réaliser les corrections de l'effet de réflectance bidirectionnelle pour chacune des bandes spectrales des capteurs Daedalus et MEIS.

Capteur Daedalus	
Bande spectrale	Équation empirique
3 (445-495 µm)	$154.91 - 0.25856x + 1.0848 \cdot 10^{-3}x^2 - 5.0715 \cdot 10^{-6}x^3 + 1.2935 \cdot 10^{-8}x^4 - 1.1677 \cdot 10^{-11}x^5$
5 (550-595 µm)	$78.154 - 0.21676x + 2.4727 \cdot 10^{-3}x^2 - 1.6168 \cdot 10^{-5}x^3 + 4.4930 \cdot 10^{-8}x^4 - 4.3451 \cdot 10^{-11}x^5$
7 (625-695 µm)	$83.696 - 0.40053x + 5.2811 \cdot 10^{-3}x^2 - 3.3414 \cdot 10^{-5}x^3 + 8.9752 \cdot 10^{-8}x^4 - 8.5066 \cdot 10^{-11}x^5$
9 (765-895 µm)	$81.691 - 0.31896x + 5.4173 \cdot 10^{-3}x^2 - 4.3106 \cdot 10^{-5}x^3 + 1.3324 \cdot 10^{-7}x^4 - 1.3879 \cdot 10^{-10}x^5$
11 (850-1300 µm)	thermique

Capteur MEIS	
Composante image	Équation théorique
1 (430-460 µm)	$160.83 - 7.8444 \cdot 10^{-2}x + 2.5246 \cdot 10^{-4}x^2 - 4.3414 \cdot 10^{-7}x^3 + 2.1596 \cdot 10^{-10}x^4$
2 (507-535 µm)	$140.95 - 0.15757x + 3.6505 \cdot 10^{-4}x^2 - 4.8487 \cdot 10^{-7}x^3 + 2.3013 \cdot 10^{-10}x^4$
3 (535-565 µm)	$79.033 - 0.11674x + 3.1482 \cdot 10^{-4}x^2 - 4.2615 \cdot 10^{-7}x^3 + 1.9633 \cdot 10^{-10}x^4$
4 (574-607 µm)	$124.07 + 9.0085 \cdot 10^{-2}x - 6.7159 \cdot 10^{-4}x^2 + 9.7080 \cdot 10^{-7}x^3 - 4.3045 \cdot 10^{-10}x^4$
5 (658-688 µm)	$95.514 + 2.4744 \cdot 10^{-2}x - 7.0536 \cdot 10^{-4}x^2 + 2.0274 \cdot 10^{-6}x^3 - 2.2438 \cdot 10^{-9}x^4 + 8.6347 \cdot 10^{-13}x^5$
6 (672-703 µm)	$101.29 - 0.15241x + 5.9824 \cdot 10^{-4}x^2 - 1.2777 \cdot 10^{-6}x^3 + 1.1750 \cdot 10^{-9}x^4 - 3.8247 \cdot 10^{-13}x^5$
7 (844-898 µm)	$93.095 - 0.17494x + 9.2151 \cdot 10^{-4}x^2 - 2.3162 \cdot 10^{-6}x^3 + 2.3788 \cdot 10^{-9}x^4 - 8.4964 \cdot 10^{-13}x^5$
8 (973-1068 µm)	$114.15 - 7.4932 \cdot 10^{-2}x + 7.2122 \cdot 10^{-5}x^2 + 2.6082 \cdot 10^{-7}x^3 - 6.2962 \cdot 10^{-10}x^4 + 3.383 \cdot 10^{-13}x^5$

ANNEXE 4

LES COMPOSANTES IMAGES NON CORRIGÉES ET CORRIGÉES POUR LES CAPTEURS DAEDALUS ET MEIS

Composante image 3 (450-500 nm) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur Daedalus



Composante image 3 (450-500 nm) avec correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur Daedalus



Composante image 5 (550-600 nm) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur Daedalus



Composante image 5 (550-600 nm) avec correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur Daedalus



Composante image 7 (650-690 nm) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur Daedalus



Composante image 7 (650-690 nm) avec correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur Daedalus



Composante image 9 (800-890 nm) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur Daedalus



Composante image 9 (800-890 nm) avec correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur Daedalus



Composante image 11 (9 000-13 000) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur Daedalus



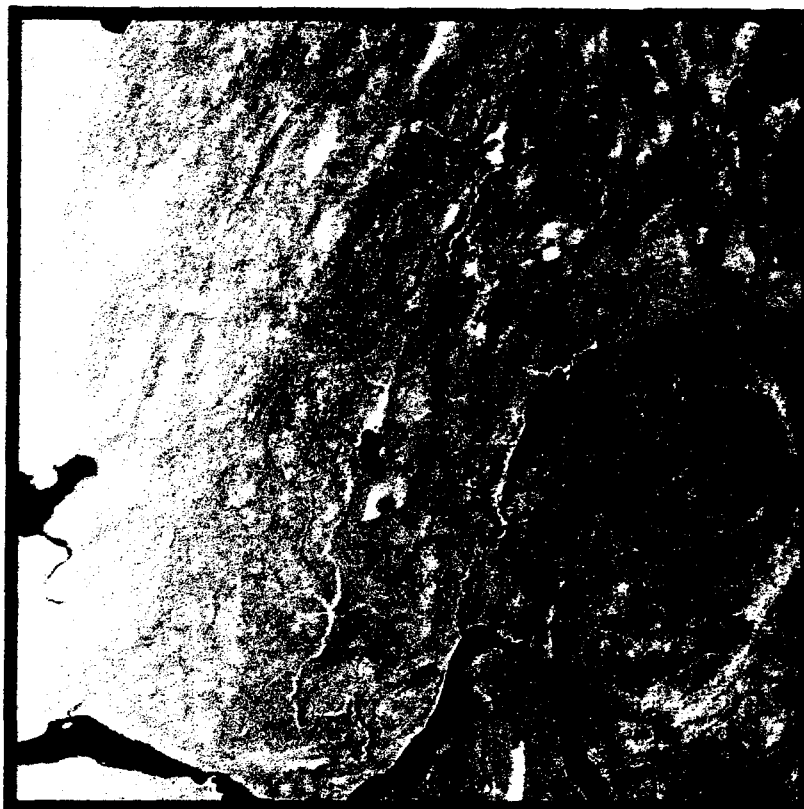
Composante image 1 (430-459 nm) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



Composante image 1 (430-459 nm) avec correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



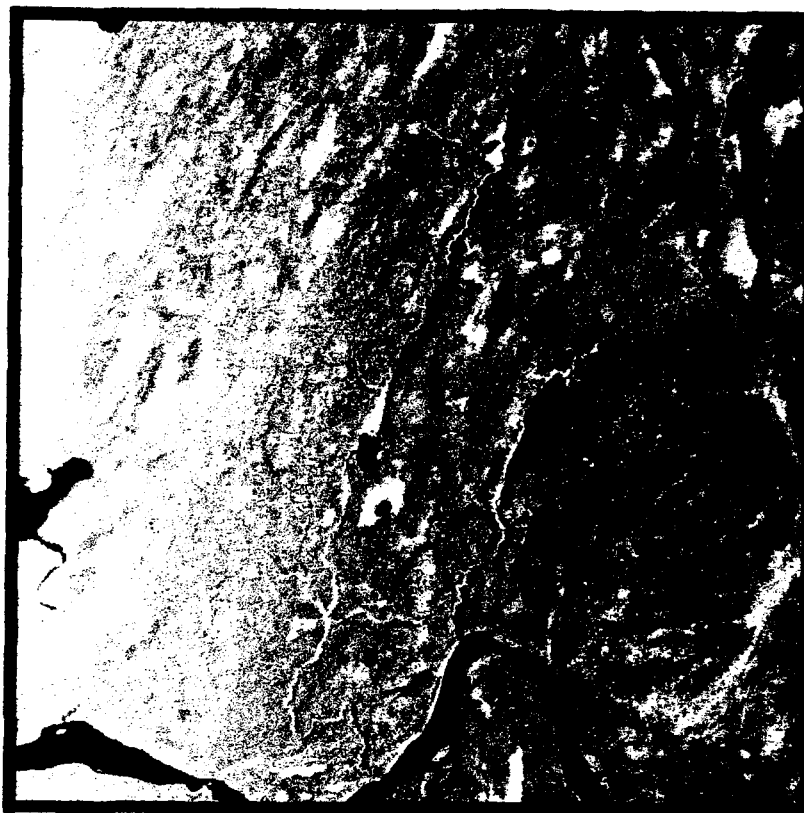
Composante image 2 (507-525 nm) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



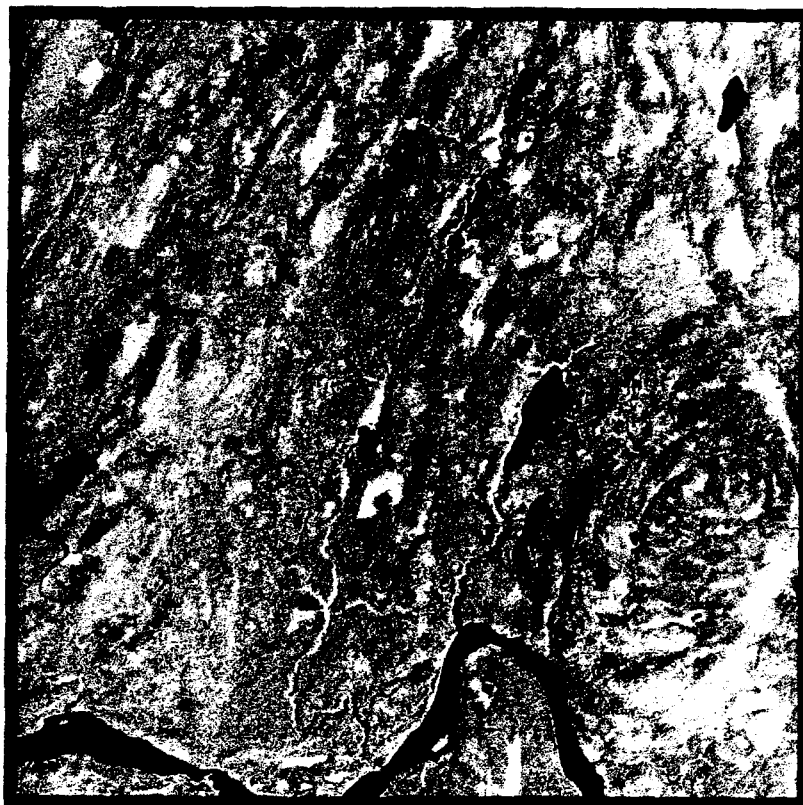
Composante image 2 (507-525 nm) avec correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



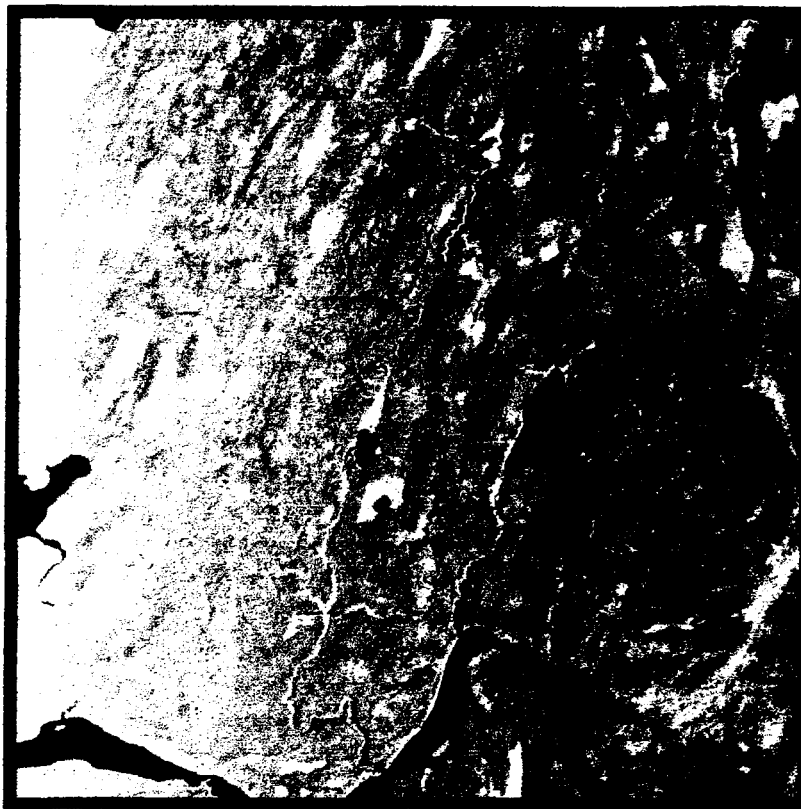
Composante image 3 (555-565 nm) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



Composante image 3 (555-565 nm) avec correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



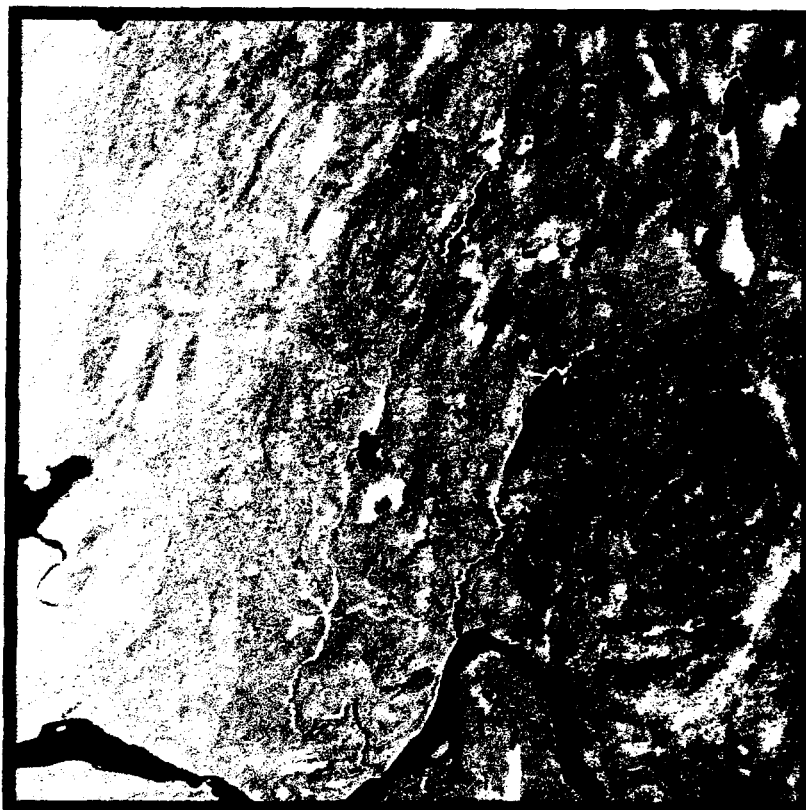
Composante image 3 (555-565 nm) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



Composante image 3 (555-565 nm) avec correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



Composante image 4 (573-606 nm) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



Composante image 4 (573-606 nm) avec correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



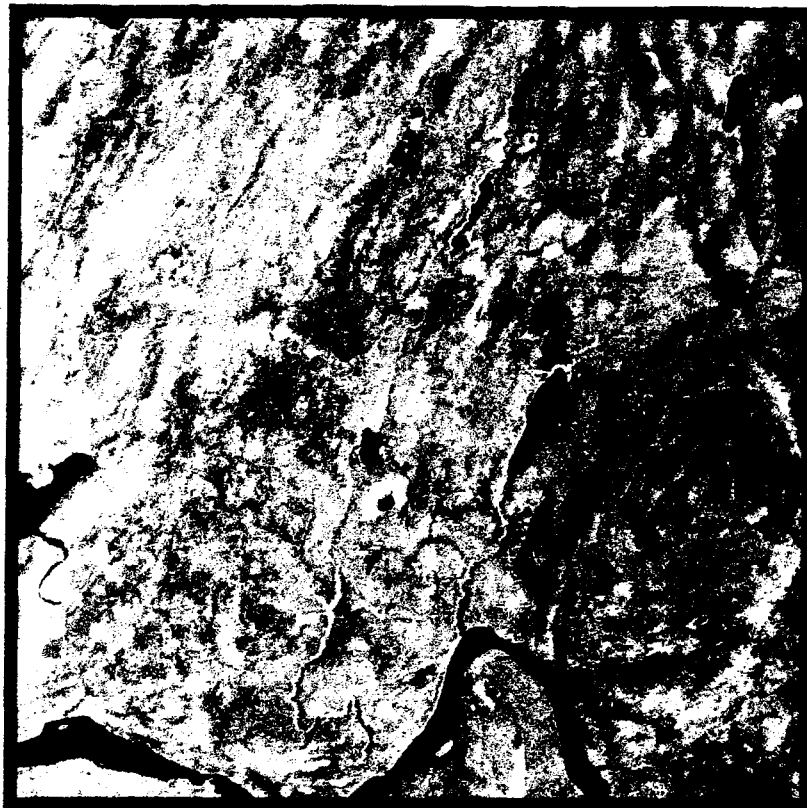
Composante image 5 (658-687 nm) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



Composante image 5 (658-687 nm) avec correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



Composante image 6 (672-703 nm) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



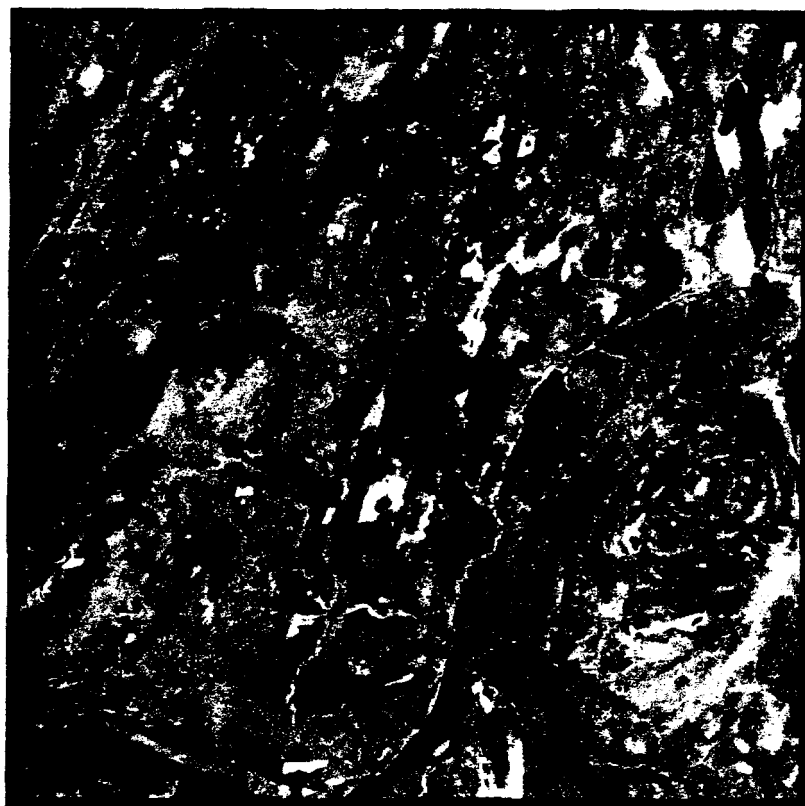
Composante image 6 (672-703 nm) avec correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



Composante image 7 (843-897 nm) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



Composante image 7 (843-897 nm) avec correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



Composante image 8 (973-1068 nm) sans correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS



Composante image 8 (973-1068 nm) avec correction
de la réflectance bidirectionnelle pour le capteur MEIS

