



National Library
of Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Canadian Theses Service

Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada
K1A 0N4

NOTICE

The quality of this microform is heavily dependent upon the quality of the original thesis submitted for microfilming. Every effort has been made to ensure the highest quality of reproduction possible.

If pages are missing, contact the university which granted the degree.

Some pages may have indistinct print especially if the original pages were typed with a poor typewriter ribbon or if the university sent us an inferior photocopy.

Reproduction in full or in part of this microform is governed by the Canadian Copyright Act, R.S.C. 1970, c. C-30, and subsequent amendments.

AVIS

La qualité de cette microforme dépend grandement de la qualité de la thèse soumise au microfilmage. Nous avons tout fait pour assurer une qualité supérieure de reproduction.

S'il manque des pages, veuillez communiquer avec l'université qui a conféré le grade.

La qualité d'impression de certaines pages peut laisser à désirer, surtout si les pages originales ont été dactylographiées à l'aide d'un ruban usé ou si l'université nous a fait parvenir une photocopie de qualité inférieure.

La reproduction, même partielle, de cette microforme est soumise à la Loi canadienne sur le droit d'auteur, SRC 1970, c. C-30, et ses amendements subséquents.

Permission has been granted to the National Library of Canada to microfilm this thesis and to lend or sell copies of the film.

The author (copyright owner) has reserved other publication rights, and neither the thesis nor extensive extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her written permission.

L'autorisation a été accordée à la Bibliothèque nationale du Canada de microfilmer cette thèse et de prêter ou de vendre des exemplaires du film.

L'auteur (titulaire du droit d'auteur) se réserve les autres droits de publication; ni la thèse ni de longs extraits de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation écrite.

ISBN 0 315 56329 X

METHODES COMPAREES D'ANALYSE AERIENNE POUR LA
CLASSIFICATION DE LA VEGETATION EN TOUNDRA
ARBUSTIVE, TERRITOIRE DU YUKON.

PAR FRANCOIS SARRAZIN

THESE SOUMISE A L'ECOLE DES ETUDES SUPERIEURES
DANS LE CADRE DU PROGRAMME DE MAITRISE
AU DEPARTEMENT DE GEOGRAPHIE
DE L'UNIVERSITE D'OTTAWA.

JUILLET 1987, OTTAWA, ONTARIO



UNIVERSITÉ D'OTTAWA
UNIVERSITY OF OTTAWA

RESUME

L'objectif de cette thèse est d'étudier différentes étapes d'une méthodologie adaptée à la préparation d'inventaires de ressources utilisant divers documents télédéfectés. On a cartographié la végétation arbustive d'une section de la Chaîne Ruby, à l'est du lac Klouane, dans le territoire du Yukon.

La région est d'abord cartographiée selon l'interprétation de photos aériennes en noir et blanc. Les classes sont analysées par densitométrie, puis on procède à l'interprétation visuelle de l'image Landsat. Finalement l'image Landsat est analysée numériquement selon des techniques de rehaussement d'image, de classification dirigée et non-dirigée. Le traitement des données est effectué selon une grille d'échantillonnages et la théorie de l'information des systèmes.

Présentement la photointerprétation offre encore les meilleurs résultats. Quoique moins précises, l'interprétation visuelle et la classification dirigée de l'image Landsat 2 sont plus rentables. La classification non-dirigée semble inappropriée pour ce type de région nordique. De toutes les techniques, l'analyse densitométrique est la plus rapide, la moins dispendieuse et génère le plus d'information.

L'auteur recommande une méthodologie constituée d'une analyse densitométrique, appuyée sur la photointerprétation de quelques zones caractéristiques, suivie par l'interprétation visuelle d'une image satellite et complétée, si besoin, par une classification dirigée.

ABSTRACT

This thesis' main objective is the study of various steps of a methodology oriented towards the creation of resource inventories based on the analysis of different remote sensing documents. Range vegetation mapping is attempted on a section of the Ruby Range, east of Klouane lake, in the Yukon territory.

The area is first mapped by interpretation of black and white aerial photographs. The classes are then submitted to a densitometric analysis which is instrumental for the visual interpretation of the Landsat image. Finally this image is numerically analysed using image enhancement techniques, supervised and unsupervised classification. Data compilation and analysis is achieved by grid sampling and the System Information Theory.

At present photointerpretation is still the most precise means of classification. Visual interpretation and supervised classification of the Landsat 2 image are less accurate, but are more cost effective. Unsupervised classification was found inadequate for this type of northern region. Densitometry proved to be the fastest, cheapest and most informative technique.

The author recommends a methodology consisting of a densitometric analysis based on the photointerpretation of key areas, followed by visual interpretation of a satellite image and, if necessary, a supervised classification.

REMERCIEMENTS

Parmi les personnes qui m'ont assisté dans l'acheminement de cette thèse, j'aimerais spécialement remercier M. Hugues Gagnon pour avoir bien voulu veiller à la direction de mes recherches. Aussi, mes plus sincères remerciements à M. John Hornsby du Centre Canadien de Télédétection pour son aide et ses précieux conseils dans la section de l'analyse automatisée des données. Je veux enfin souligner l'assistance de M. Michel Phipps pour ses conseils concernant l'utilisation de la théorie de l'information, et de M. André Langlois pour son expertise dans le domaine des statistiques.

TABLE DES MATIERES

	Page
Résumé / Abstract	i
Remerciements.....	ii
Liste des figures	iv
Introduction.....	1
Objectifs et hypothèses.....	3
Chap. 1 - Recherches antérieures.....	5
Chap. 2 - Secteur d'étude.....	11
Chap. 3 - Matériel et méthodologie.....	16
3.1 - Documents et instrumentation.....	16
3.2 - Méthodologie.....	20
3.3 - Techniques d'évaluation des résultats.....	26
Chap. 4 - Résultats et discussion.....	30
4.1 - Interprétation visuelle.....	30
4.2 - Classification automatisée.....	42
4.3 - Comparaison des techniques / Discussion.....	61
Conclusions.....	67
Bibliographie.....	69

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 : Carte de localisation
- Figure 2 : Mosaïque topographique du secteur d'étude
- Figure 3 : Image Landsat du secteur d'étude
- Figure 4a : Principales régions spectrales en télédétection
- Figure 4b : Sensitivité spectrale des systèmes RBV et MSS de Landsat
- Figure 5 : Représentation graphique des notions de base de la théorie
de l'information
- Figure 6 : Classification de la carte de base
- Figure 7 : Classification de la carte A
- Figure 8 : Courbes de densité
- Figure 9 : Profils spectraux de l'image Landsat avant et après un
rehaussement
- Figure 10 : Classification de la carte B
- Figure 11 : Classification de la carte C
- Figure 12 : Limites spectrales des classes de la carte B
- Figure 13 : Courbes de réflectance spectrale des classes de la carte B
- Figure 14 : Limites spectrales des classes de la carte C
- Figure 15 : Courbes de réflectance spectrale des classes de la carte C

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 : Description des classes de la carte de base
- Tableau 2 : Valeurs moyennes de densité

- Tableau 3 : Description des classes de la carte A
- Tableau 4 : Table de contingence de la carte A
- Tableau 5 : Pourcentages de précision avec intervalles de confiance
des cartes A, B et C
- Tableau 6 : Statistiques selon la Théorie de l'information
- Tableau 7 : Description des classes de la carte B
- Tableau 8 : Table de contingence de la carte B
- Tableau 9 : Description des classes de la carte C
- Tableau 10 : Table de contingence de la carte C
- Tableau 11 : Fréquences des classes des cartes B et C
- Tableau 12 : Evaluation des techniques
- Tableau 13 : Coefficients de corrélation

LISTE DES ANNEXES

- Annexe 1 : Image Landsat - Scène totale
- Annexe 2 : Unités de végétation du secteur d'étude
- Annexe 3 : Instrumentation
- Annexe 4 : Grille d'échantillonnage et vérité de terrain

INTRODUCTION

Au Canada, près de six millions de km carrés sont encore à l'état sauvage. Riche en ressources naturelles de toutes sortes, cette vaste superficie renferme des milliers d'écosystèmes particuliers. Avec une économie basée essentiellement sur l'exploitation de ses ressources naturelles, il est donc très important pour le Canada, tant économiquement qu'écologiquement, d'inventorier et d'aménager ce territoire de façon continue.

Généralement, l'aménagement d'un territoire repose essentiellement sur un inventaire concis effectué sur le terrain. Malheureusement, au Canada, les problèmes de l'étendue à couvrir, de main d'oeuvre, de coût et d'échantillonnage adéquat sont pratiquement insurmontables. Ainsi, depuis plus de trente ans, l'utilisation de la photo aérienne a assisté, puis graduellement remplacé le travail sur le terrain. Or, pour couvrir le pays en entier, selon un recouvrement temporel permettant un aménagement continu, le coût et le temps nécessaires pour l'obtention et l'interprétation des photos aériennes deviennent excessifs (Quiel, 1982).

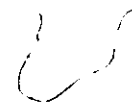
Depuis le lancement en orbite du premier satellite muni d'une caméra en 1968, la télédétection à partir de l'espace est devenue l'instrument par excellence pour inventorier la surface terrestre (Lillesand et Kiefer, 1979). Les plus grands avantages de l'information télédétectée sont: la perspective aérienne et la vaste couverture possible, spécialement pour les régions inaccessibles (Driscoll, Betters et Parquer, 1978).

Récemment, plusieurs chercheurs ont utilisé l'information provenant des satellites Landsat pour une multitude de projets. Le premier de la série, qui comporte maintenant Landsat 1 à 5, fut lancé en 1972 et portait alors le nom de ERTS 1 (Earth Ressources Technology Satellite). Aujourd'hui seul Landsat 4 et 5 (D et D') sont encore en opération. Un des aspects les plus intéressants des données de Landsat est la possibilité d'inventorier de grandes superficies à un coût inférieur à toute autre méthode actuelle (Heller, Driscoll et Frances, 1975).

Le but principal de toute recherche visant l'inventaire d'un ou plusieurs éléments est l'obtention d'une classification adéquate. De nombreuses recherches ont précisément démontré que la combinaison des documents télédétectés et de différentes techniques de classification automatisée représente un outil puissant et économique pour de tels inventaires (Quiel, 1982).

La présente recherche se veut donc une étude des possibilités et de la rentabilité de différentes techniques d'analyse des documents télédétectés. Bien que plusieurs techniques d'analyse sont étudiées, il est évident que les techniques disponibles étant trop nombreuses, un choix a souvent été nécessaire. Lorsque tel est le cas, les raisons sont bien expliquées.

L'essentiel de cette étude repose sur deux points. D'abord, comment la Théorie de l'Information représente une meilleure approximation de la coïncidence entre deux types de données. Le deuxième aspect clé de cette recherche est l'utilisation de la densitométrie comme mesure de précision dans l'interprétation visuelle de l'image Landsat. Bien qu'elle soit une technique qui a fait ses preuves, la densitométrie a tendance à être délaissée pour l'analyse automatisée. Ainsi, en plus d'étudier l'apport concret des mesures densitométriques, nous analyserons une méthode quelque peu controversée. C'est à dire l'utilisation d'un document produit par projection d'encre sur papier au lieu de la traditionnelle acétate. Malgré les limitations de cette technique, expliquées en détails au chapitre 3.2, les résultats obtenus sont très significatifs.



OBJECTIFS ET HYPOTHESES

Depuis environ 1975, plusieurs études ont été entreprises dans le but d'évaluer les possibilités de l'analyse visuelle et automatisée d'images satellites, notamment des images des satellites Landsat. Cependant peu de recherches ont porté sur l'étude de la végétation principalement arbustive. La faible couverture végétale, la forte hétérogénéité des différentes strates et la résolution limitée des images Landsat (exception faite du système THEMATIC MAPPER a bord de Landsat 4 et 5) étaient des problèmes majeurs (Daus, 1975). De plus, ces recherches visaient habituellement la classification de classes végétales représentant à peine quelques pixels et souvent difficilement reconnaissables l'une de l'autre.

Cette étude portera donc sur l'analyse de la végétation représentée par l'étage arbustif. Etant donnée la résolution limitée des images Landsat, les classes seront généralisées afin d'être facilement reconnaissables.

L'objectif de cette recherche est double. Tout d'abord, il s'agira d'établir une méthodologie rapide et peu coûteuse dans le but de créer des documents-guides pour le travail sur le terrain. Celle-ci devra être suffisamment élaborée et flexible afin de permettre une adaptation rapide à toute autre recherche. Deuxièmement, chaque section de la méthodologie sera analysée. Pour chaque section, différentes techniques seront effectuées et chacune sera jugée par rapport à son rendement et à son importance globale.

Prenant en considération les limitations techniques des images Landsat ainsi que les conclusions et recommandations des recherches antérieures, trois hypothèses de travail sont postulées:

Si les classes étudiées sont suffisamment vastes et différentes, on peut s'attendre à obtenir une précision excédant 80 % pour l'analyse automatisée de l'image Landsat.

Une classification dirigée reposant sur une série de cellules d'échantillonnage bien choisie représente la technique d'analyse d'images Landsat la plus rentable.

Une méthodologie adaptée à l'interprétation d'images Landsat est un excellent outil préparatoire au travail sur le terrain, aussi efficace et plus rapide que l'interprétation de photographies aériennes.

CHAPITRE 1 - RECHERCHES ANTERIEURES

Voici un bref aperçu de quelques recherches antérieures qui ont servies à préciser la nature et l'ampleur de cette thèse.

Russel et Francis (1975) se servent de données de Landsat 1 pour classifier la végétation sur deux secteurs d'étude au Colorado. Selon un programme de classification dirigée, le premier site fut d'abord évalué pour la végétation régionale (toundra alpine, etc.), ensuite pour les associations végétales (pin Ponderosa, etc.). Le tout est répété sur le deuxième site à l'aide d'une procédure de classification combinée, dirigée / non-dirigée.

Dans les deux sites étudiés et aux deux niveaux de classification végétale, ils obtiennent plus de 80 % de précision. Au niveau régional, la forêt de conifères et la toundra herbacée sont mieux classifiées que la forêt décidue et l'eau en raison des signatures spectrales confuses de ces dernières. Au niveau des associations, les classes de l'eau et de la végétation herbacée sont acceptables, alors que les classes de conifères et de toundra arbustive de montagne sont inexactes due à leur emplacement sur un terrain très escarpé. Les auteurs recommandent que l'aménagement ne soit pas strictement basé sur la classification automatisée de données Landsat.

Hoffer (1975) a cartographié les ressources naturelles en terrain montagneux à partir de données de Landsat 1 traitées avec le programme LARSYS. Deux régions d'étude au Colorado sont choisies où les types de végétation suivants sont rencontrés: toundra alpine, pin de Ponderosa, sapin de Douglas, genévrier, épinette noire, toundra arbustive, pré herbacé et terres cultivées. La méthodologie utilisée comportera cinq étapes.

Premièrement définir les signatures spectrales des différentes classes présentes, deuxièmement utiliser ces classes pour définir les paramètres de classification et troisièmement déterminer sur l'image les sites d'échantillonnage à l'aide d'un algorithme de reconnaissance spectrale. Reste à classifier chaque pixel selon les classes déterminées par ces sites et finalement représenter les

résultats sur une carte.

La définition des signatures spectrales est l'étape la plus importante de la méthodologie. Des différentes techniques de classification étudiées, la méthode de regroupement modifiée a donné les meilleurs résultats, soit en moyenne 84.7 % de précision. Elle se résume à choisir les sites d'échantillonnage appropriés, classifier chaque région en huit à quinze classes et procéder à l'extension de la classification sur toute l'image.

Thie (1976) évalue l'utilité des photos aériennes et des images Landsat pour la classification écologique du territoire. Son site d'étude se situe près de Churchill au Manitoba, où deux régions physiographiques et deux types de végétation se rencontrent : les basses terres de la Baie d'Hudson et le Bouclier Canadien, la toundra arctique et la forêt boréale. Ses objectifs sont d'évaluer différentes techniques d'interprétation en fonction de la précision et de la rentabilité. Ces techniques incluent la photo-interprétation aérienne, l'analyse visuelle d'images Landsat et l'analyse automatisée des données numériques de Landsat selon des classifications dirigée et non-dirigée.

L'interprétation des photos aériennes a permis la classification de 43 types écologiques et s'est avérée la plus précise ainsi que la plus longue et coûteuse des techniques. Des trois techniques d'interprétation des données Landsat, c'est l'interprétation visuelle à l'échelle de 1 : 1 000 000 qui est actuellement la plus rentable. La classification dirigée pour sa part passe plus près d'une classification écologique désirable que la classification non-dirigée.

En conclusion, Thie trouve que les classifications effectuées à partir des images Landsat sont encore beaucoup trop imprécises pour remplacer la photo-interprétation aérienne. Quoique plus longue et coûteuse, cette dernière est encore la plus rentable en prenant en considération l'exactitude des classes.

Koslovik et Howarth (1977) ont mis à l'épreuve différentes techniques de télédétection pour l'étude de l'environnement naturel dans une zone près de Pen Island sur les rives de la Baie

d'Hudson. La région est caractérisée par un relief plat et une végétation essentiellement herbacée et tourbeuse, étendue sur un pergélisol continu. Suite à un examen intensif en laboratoire et sur le terrain de photos infrarouges couleur à petite échelle, ils procèdent à la cartographie biophysique.

Les résultats de la photo-interprétation aérienne s'avèrent indispensables pour l'analyse des données Landsat. L'interprétation visuelle de l'image satellite a indiqué que la majorité des classes identifiées par la photo-interprétation aérienne peut être décelée et délimitée avec précision. Les auteurs ont alors procédé à l'analyse numérique des données Landsat au moyen du système MAD BENDIX et des programmes MICA. Des classifications non-dirigée et dirigée ont été entreprises, avec plus d'emphase sur cette dernière.

Treize des quinze classes résultantes ont été cartographiées avec autant de précision que celles obtenues par la photo-interprétation aérienne. L'extension de la classification sur une région plus vaste a même révélé une nouvelle classe, absente dans le site d'essai. En conclusion, Koslovic et Howarth soulignent que leurs résultats excellents sont dus à l'homogénéité du relief et à la simplicité de la végétation. Ils notent que cette précision n'est possible que suite à la photo-interprétation aérienne.

Townshend et Justice (1978) évaluent l'utilisation d'une technique de classification automatisée pour la reconnaissance des classes de végétation dans une région de végétation complexe. La zone d'étude est en bordure de la Méditerranée, en Italie, où alternent forêt décidue, forêt de conifères, terres cultivées, végétation herbacée et une plaine alluviale de graviers. Ils utilisent une technique de classification dirigée combinée à une classification non-dirigée et l'appliquent sur quatre sites. Etant donné la complexité physiographique de la région, une série de photos aériennes à l'échelle de 1 : 30 000 servira de vérité de terrain.

Ils effectuent premièrement une classification non-dirigée sur chaque site puis, utilisant les statistiques dérivées de ces classifications, se servent des différentes classes comme sites

d'échantillonnage pour extrapoler la classification sur toute la région d'étude. Seizes classes sont délimitées avec précision. Par contre, l'exactitude de chaque classe varie beaucoup, de 65 à 85 %. Les principaux problèmes qu'ils ont rencontrés sont la difficulté de corréler les classes de Landsat aux conditions de surfaces, la taille souvent trop petite des classes et la complexité du terrain lui-même.

Rubec et Wichware (1978) ont appliqué l'analyse numérique des données Landsat à la classification écologique en zone boréale. Le site d'étude est au sud de Kenora en Ontario. Cette région de physiographie complexe est caractérisée par plusieurs dépôts fluvioglaciers ainsi que par de nombreuses formations glaciaires et périglaciaires. La végétation varie d'une toundra herbacée à une forêt boréale assez dense. La région est également fort perturbée par l'exploitation forestière et les incendies.

Deux types d'analyse numérique sont étudiés. Tout d'abord, ils essaient une classification non-dirigée utilisant un algorithme de moyennes amovibles. Puis vient une seconde classification non-dirigée basée, cette fois, sur un système de regroupement par histogrammes à quatre dimensions, accompagné d'un rehaussement par composantes principales.

Ils ont trouvé qu'en utilisant l'algorithme des histogrammes à quatre dimensions, six classes de couvertures distinctes étaient identifiables avec beaucoup de précision. Par ailleurs, l'algorithme des moyennes amovibles n'est absolument pas satisfaisante. En conclusion, Rubec et Wichware estiment que les données numériques de Landsat conviennent bien à la cartographie synoptique de la couverture superficielle et de l'utilisation des terres. Par contre, elles ne peuvent être utilisées pour la classification écologique détaillée de la forêt boréale du Bouclier Canadien.

Todd, Gehring et Haman (1980) ont développé une classification des ressources naturelles dans une région de végétation arbustive. La classification incluait différentes densités de genévrier sur deux types géologiques, un basalte et du calcaire, en plus de différentes associations d'arbustes parfois denses, parfois très ouvertes. Utilisant une technique de classification dirigée établie sur

une image Landsat, ils ont réussi à identifier de façon régulière toutes les classes, sauf les différentes densités de genévrier installées sur le calcaire. Le problème principal qu'ils ont rencontré est la faible couverture végétale associée à la quantité de réflexion par le sol nu.

Afin de limiter les coûts et le travail sur le terrain, la précision de classification est évaluée à partir d'un échantillonnage par quadrats de premier ordre sans remplacement. Chaque quadrat est représenté par neuf (3 x 3) pixels et est considéré comme un seul point. Le choix des quadrats est effectué sur la classification de l'image Landsat dans le but d'assurer un échantillonnage complètement aléatoire.

Mc Graw (1980) a utilisé des techniques de classification automatisée pour cartographier la végétation au Nevada. Quatorze classes sont reconnues sur le terrain. Suite à une analyse spectrale, celles-ci sont regroupées en huit classes plus générales. Il s'agit essentiellement d'une végétation arbustive très ouverte. A l'aide des programmes PIXYS Mc Graw étudie des techniques de classification non-dirigée, dirigée et une classification hybride. La précision de classification est évaluée à l'aide d'un échantillonnage par quadrats.

Il a trouvé que la classification hybride, combinant une classification non-dirigée et des cellules d'échantillonnage établies sur des fenêtres spécifiques, donne les meilleurs résultats. La précision moyenne de cette classification était de 86.4 %. Les principales difficultés associées à ce type de végétation sont: la faible couverture végétale, la forte hétérogénéité de la végétation et les changements abrupts d'altitude.

En conclusion, McGraw pense que des cartes de végétation générales peuvent être produites de façon très rentable s'il existe un couvert végétal adéquat. De telles cartes sont excellentes pour servir de base à des inventaires plus intensifs.

Paine (1984) applique des techniques mises au point pour la cartographie des couvertures superficielles dans une région montagneuse au sud-ouest de l'Albtra. Utilisant des données numériques de Landsat, sa procédure d'analyse comprend quatre étapes. Les données subissent

d'abord une correction radiométrique, afin d'éliminer les erreurs de valeur de réponses vidéo accumulées pendant l'acquisition de l'image. Les données sont ensuite accentuées pour faciliter l'analyse en utilisant une analyse des composantes principales. L'image entière subit alors un réajustement géométrique à l'aide d'un modèle polynomial de second ordre et de points directeurs au sol. Finalement l'interprétation des données est effectuée à l'aide d'une classification dirigée basée sur l'algorithme du parallélépipède.

La région étudiée représente les conditions les plus difficiles pour la cartographie des couvertures superficielles: des changements très abrupts d'altitude et une végétation très variée allant des marécages, à la forêt de conifères, à la toundra alpine.

Paine a trouvé que même dans les terrains très accidentés, ces techniques peuvent être appliquées avec beaucoup de succès. 94 % des classes de l'image concordent parfaitement à la vérité de terrain. Les composantes de premier et de second ordre renferment plus de 99 % de l'information contenue dans les quatre bandes de données. En conclusion, Paine estime que les deux composantes principales, soit la réflectance et l'indice de chlorophylle, jointes au réajustement géométrique permettant un positionnement plus exact, produit une série de cartes de la couverture superficielle très efficace et économique.

CHAPITRE 2 - SECTEUR D'ETUDE

Le secteur d'étude représente une fenêtre d'environ 632 km carrés au sud-ouest du Yukon (figure 1). Située dans la section sud-ouest de la chaîne Ruby, entre les lacs Kluane et Sekulmun, le site offre un relief modéré de plateau. Les sommets arrondis sont à une altitude moyenne de 1 600 à 1 800 m, certains pics atteignant plus de 2 100 m. La région est disséquée par un système réticulé de vallées alimentées par des lacs de cirques. Du nord-est au sud-ouest, une vallée glaciaire importante, sillonnée par le Gladstone Creek, coupe à travers le plateau à une altitude moyenne de 1 150 m. Il s'agit de la section la plus élevée de la chaîne.

Le coeur du Plateau du Yukon est principalement composé de roche granitique. En bordure du plateau, dans la partie ouest, sud-ouest, plusieurs assemblages de roches sédimentaires et métamorphiques sont présents sous forme de schistes de chlorite-séricite et quartz-biotite. En ce qui concerne notre fenêtre d'étude, elle est située à l'intérieur du batholite du Ruby range, soit un assemblage de granodiorite de hornblende-biotite. Celle-ci est une roche granitique d'une granulométrie plutôt grossière. On y retrouve du quartz, du feldspath essentiellement plagioclase, de la hornblende verte foncée et de la biotite brunâtre.

Les matériaux de surface ont été classifiés selon leur morphologie et leur structure.* Dans notre région d'étude, on retrouve neuf groupes. Situé dans les fonds de vallées et à la base des talus de versants, le premier groupe recouvre près du tiers du secteur: les dépôts organiques. Variant de quelques centimètres à plus de deux à trois mètres d'épaisseur, ces dépôts tourbeux reposent sur un pergélisol continu. Ils sont mal drainés dans les fonds de vallées et bien drainés sur les talus concaves.

* V.N. Rampton, 1981. Surficial Materials and Landforms of Kluane National Park, Yukon Territory. Commission Géologique du Canada, Ottawa.

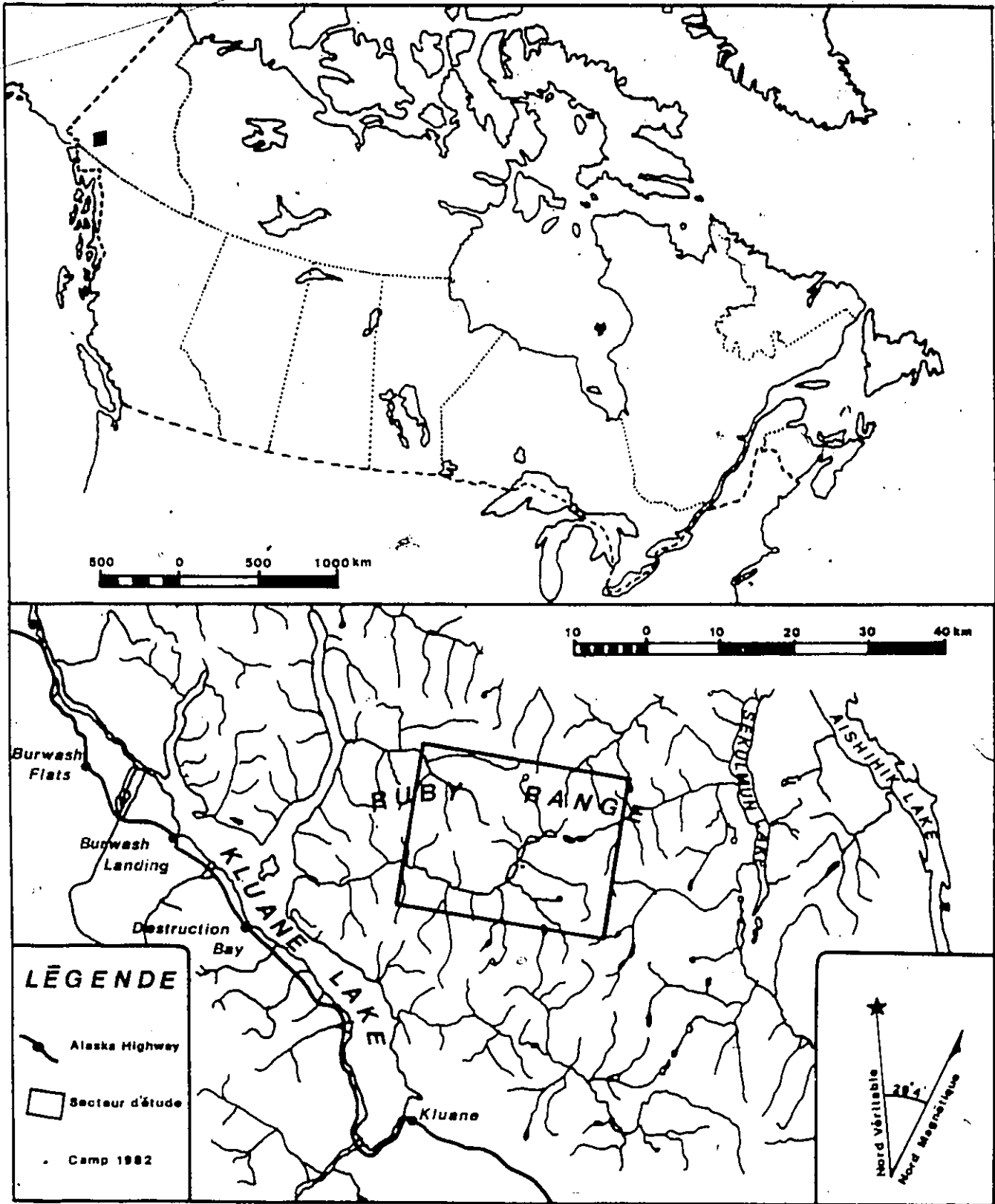


Figure 1-Carte de localisation

A l'autre extrême, on retrouve les dépôts non-consolidés. Quoique généralement minces, ils atteignent parfois plus de 1 m d'épaisseur. Il s'agit essentiellement d'un arène granitique recouvrant les sommets convexes du plateau. En descendant vers la vallée, cet ensemble est progressivement mélangé avec des dépôts de colluvion due aux pentes raides des escarpements. Ces derniers représentent le troisième grand ensemble de dépôts. Ils sont présents sur tous les escarpements et sur les talus et fonds de vallées où les éboulis et glaciers rocheux ont déferlé. Ils incluent les glissements de terrain, les éboulis et glaciers rocheux, et les dépôts résultant d'une solifluction ou du "creep".

Les groupes suivants ne représentent à eux tous qu'environ 10 % du secteur d'étude. Près des lacs et des cours d'eau, on rencontre des dépôts lacustres sous forme de plages sablo-graveleuses et des dépôts fluviaux représentés par des cônes d'alluvions. Sur les versants, on peut déceler l'évidence de glaciers antérieurs par la présence de dépôts morainiques, à peine représentés par quelques tronçons de moraines latérales et une petite moraine terminale, et par des dépôts fluvioglaciaires tels des terrasses de kames et des complexes de kames et kettles.

Finalement, on retrouve ici et là la présence de la roche mère granitique en surface et, sur des surfaces planes au rebord de talus exposés, des dépôts éoliens composés de sable fin provenant surtout des dépôts fluvioglaciaires.

Un des principaux facteurs influençant le climat est la localisation du secteur par rapport au paysage environnant. Etant situé juste à l'est du massif de St-Elias, la région jouit d'un climat continental légèrement frais et sec, grâce à l'efficacité des montagnes pour bloquer les masses d'air chaudes et humides du Pacifique. Ainsi, à cette latitude, l'hiver est long, les journées sont peu ensoleillées, froides et relativement sèches; alors que l'été est court, les journées sont confortablement chaudes et sèches et totalisent plus de vingt heures d'ensoleillement. Le ciel est rarement nuageux, mais il arrive parfois qu'une zone de basse pression s'installe et demeure stagnante pour plusieurs jours, laissant la région dans une nuée humide avec visibilité très réduite.

En raison du climat et de la latitude, la région est sise dans la forêt boréale de transition. Or, dû à l'altitude, le couvert forestier est très léger, la limite des arbres étant vers 1 200 m. La forêt se limite donc à quelques pessières ouvertes, où Picea mariana domine mais atteint rarement plus de 25 cm de diamètre. Le seul autre arbre qu'on peut apercevoir dans le secteur, sous forme de petits bosquets épars, est le peuplier. On en rencontre deux espèces, soit Populus tremuloides et Populus balsamifera.

La majorité des versants à pente faible sont recouverts d'une saulaie très dense, quasi impénétrable, installée sur un sol tourbeux. Constituée de quatre à cinq espèces de Salix sp., cette saulaie varie entre 1 et 2.5 m de hauteur. Les fonds de vallées tourbeux et mal drainés sont recouverts d'une végétation principalement herbacée alors que les abords mieux drainés soutiennent une tourbière à Chaméphytes où abondent Betula glandulosa, Potentilla fruticosa et Salix sp.

Les escarpements, constamment perturbés par les mouvements de masse, ne peuvent soutenir une végétation très stable. Dans les couloirs d'éboulis, on retrouve une végétation très limitée, basée sur les Bryophytes et les Thallophytes. Les endroits plus stables maintiennent une saulaie moyennement dense près du talus, qui se transforme progressivement en une toundra à Chaméphytes vers le sommet.

Les sommets convexes sont recouverts par une toundra herbacée où des espèces telle Dryas octopetala subsistent sur une surface graveleuse parsemée de lichens. Les formations géomorphologiques telles les terrasses de kames et les moraines, situées dans les vallées, ont un sol plus sec en raison de l'épaisseur de leur matrice graveleuse. Ainsi, elles soutiennent mal une végétation dense telle la saulaie. On retrouve donc une toundra à Chaméphytes peuplée de nombreux arbustes à fruits comme Juniperus communis, Vaccinium vitis idea et Ledum groenlandicum.

Cette région fut choisie comme secteur d'étude pour trois raisons principales. D'abord et avant tout, parce que c'est un secteur qui fait actuellement l'objet de nombreuses recherches en

microclimatologie, en géomorphologie et en palynologie par plusieurs professeurs et confrères géographes et géologues de l'Université d'Ottawa. Cette étude s'insère donc dans un contexte de recherches en cours. Deuxièmement, la région remplit très bien les conditions recherchées, c'est à dire un endroit difficile d'accès, où peu de données de terrain et aérographiques existent. Finalement, la physiographie à relief accentué et la végétation représentée surtout par l'étage arbustif constituent une combinaison peu étudiée par télédétection.

CHAPITRE 3 - MATERIEL ET METHODOLOGIE

3.1 - Documents et instrumentation

Les documents utilisés dans cette recherche sont de trois types. Les deux premiers types serviront à l'édification d'une carte de base de la végétation qui sera utilisée pour la vérification des classifications obtenues avec le troisième type de données.

On a démontré qu'avec un minimum de données de terrain et une bonne couverture récente de photos aériennes à échelle de 1 : 100 000 ou moins, il est possible d'obtenir une carte de base représentant très précisément la vérité de terrain (Charron et le Sauter, 1975; Koslovic et Howarth, 1977; Kalensky et al, 1981; Harvie et al, 1982). Tout d'abord, les données de terrain recueillies pendant l'été 1982 serviront à préciser la nomenclature des différentes classes de la carte de base. Cette carte de la végétation sera établie à partir de photos aériennes en noir et blanc à l'échelle de 1 : 57 000, prises à la mi-été 1979 à une altitude approximative de 9 750 m, et des cartes topographiques correspondantes (Figure 2).

Le troisième type de document est constitué d'images satellites. Deux images seront utilisées. La première image, choisie parmi les classeurs du Centre Canadien de Télédétection (C.C.T.) à Ottawa, provient de la station réceptrice de Prince Albert, Saskatchewan. Il s'agit de l'image multibandes no. 20995-19290 de Landsat 2 prise le 3 septembre 1977 (Figure 3).

Le satellite Landsat 2 a été lancé le 22 janvier 1975 et placé sur une orbite nominale de 915 km d'altitude. Il prenait 103 minutes à faire une orbite totale en enregistrant un décalage vers l'ouest d'environ 2 760 km, ce qui lui permettait de suivre la trajectoire apparente vers l'ouest du soleil. Au bout de 24 heures, le satellite a établi quatorze révolutions et revient quelques 159 km à l'ouest de la première révolution à la hauteur de l'équateur. Il couvre donc le globe entier, à l'exception des latitudes polaires de 82 à 90 degrés, tous les dix-huit jours.

Le satellite Landsat 2 possède deux systèmes de télédétection. Le premier est constitué de trois caméras de télévision vidicon (RBV). La première caméra capte la bande spectrale de 0.475 à 0.573 μ , la deuxième, de 0.580 à 0.680 μ et la troisième enregistre la bande comprise entre 0.690 et 0.830 μ (Figure 4 a-b). Chaque image, captée simultanément par les trois caméras, couvre une surface de 185 km de côté avec une résolution de 80 m.

Le second système est constitué d'un senseur à balayage multibande (MSS) permettant l'enregistrement de l'image selon quatre bandes spectrales. Les bandes, numérotées de 4 à 7, représentent respectivement les longueurs d'ondes de 0.5 à 0.6 μ et 0.6 à 0.7 μ , correspondant au vert et au rouge dans le spectre visible, et de 0.7 à 0.8 μ et 0.8 à 1.1 situées dans l'infrarouge (Figure 4 a-b). Les images produites couvrent une surface de 185 km de côté avec une résolution de 79 m. L'image Landsat sera utilisée sous forme digitale sur ruban magnétique. La seconde image est une image radar produite le 7 juillet 1978 par le satellite Seasat 1. Il s'agit d'une section comprise sur le ruban d'images de la révolution no. 150, obtenu de la Division des Données Satellites de E.D.I.S., soit le Environmental Data and Information Services, à Washington D.C.

Le satellite Seasat 1 a été lancé le 26 juin 1978 et placé sur une orbite nominale de 800 km d'altitude. Ses objectifs étaient d'analyser plus de 95 % des océans et la majorité des côtes pour la recherche océanographique. Seasat 1 opère principalement dans les micro-ondes supérieures à 3 cm et essentiellement dans la bande L, soit de 15 à 30 cm (tableau 2 a). Seasat 1 utilise un système radar à antenne synthétisée (Synthetic Aperture Radar ou SAR). Il s'agit d'un système où les techniques de réception et de traitement des données sont modifiées afin de synthétiser l'effet d'une antenne plus longue. Ceci est nécessaire car la résolution de l'azimuth est inversement proportionnelle à la longueur de l'antenne. En d'autres mots, sans ce système, la résolution de 40 m de Seasat opérant dans la longueur d'onde de 24 cm, nécessiterait une antenne longue de 600 m. Inversement, son antenne réelle de 10 m ne donnerait qu'une résolution de 2.4 km.

National Library
of Canada

Canadian Theses Service

Bibliothèque nationale
du Canada

Service des thèses canadiennes

NOTICE

THE QUALITY OF THIS MICROFICHE
IS HEAVILY DEPENDENT UPON THE
QUALITY OF THE THESIS SUBMITTED
FOR MICROFILMING.

UNFORTUNATELY THE COLOURED
ILLUSTRATIONS OF THIS THESIS
CAN ONLY YIELD DIFFERENT TONES
OF GREY.

AVIS

LA QUALITE DE CETTE MICROFICHE
DEPEND GRANDEMENT DE LA QUALITE DE LA
THESE SOUMISE AU MICROFILMAGE.

MALHEUREUSEMENT, LES DIFFERENTES
ILLUSTRATIONS EN COULEURS DE CETTE
THESE NE PEUVENT DONNER QUE DES
TEINTES DE GRIS.

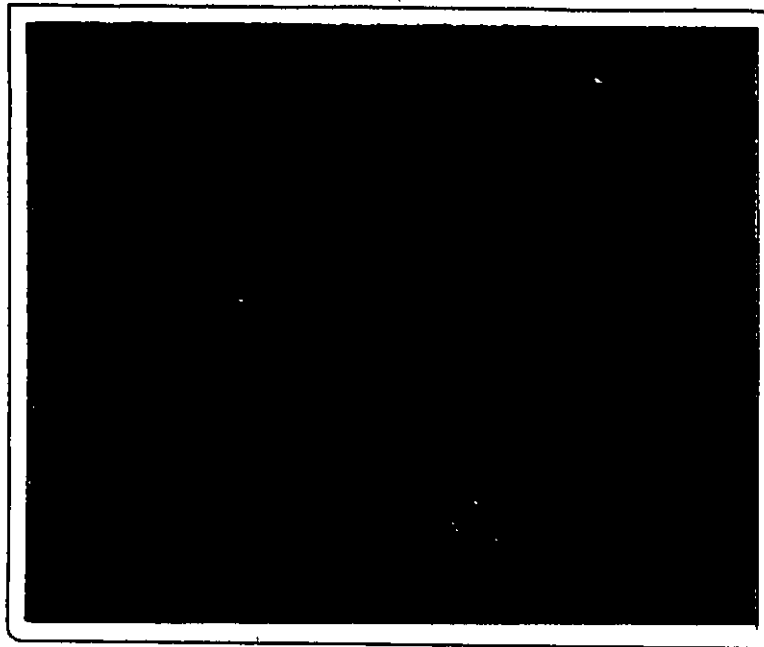


Figure 2 - Mosaïque topographique du secteur d'étude (1:256 000)

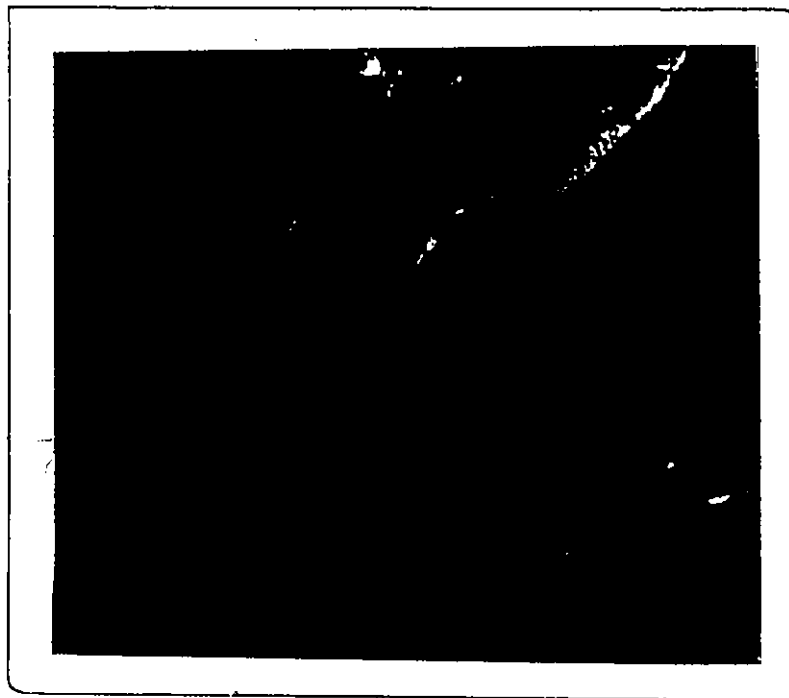


Figure 3 - Image Landsat - Secteur d'étude (1:287 000)

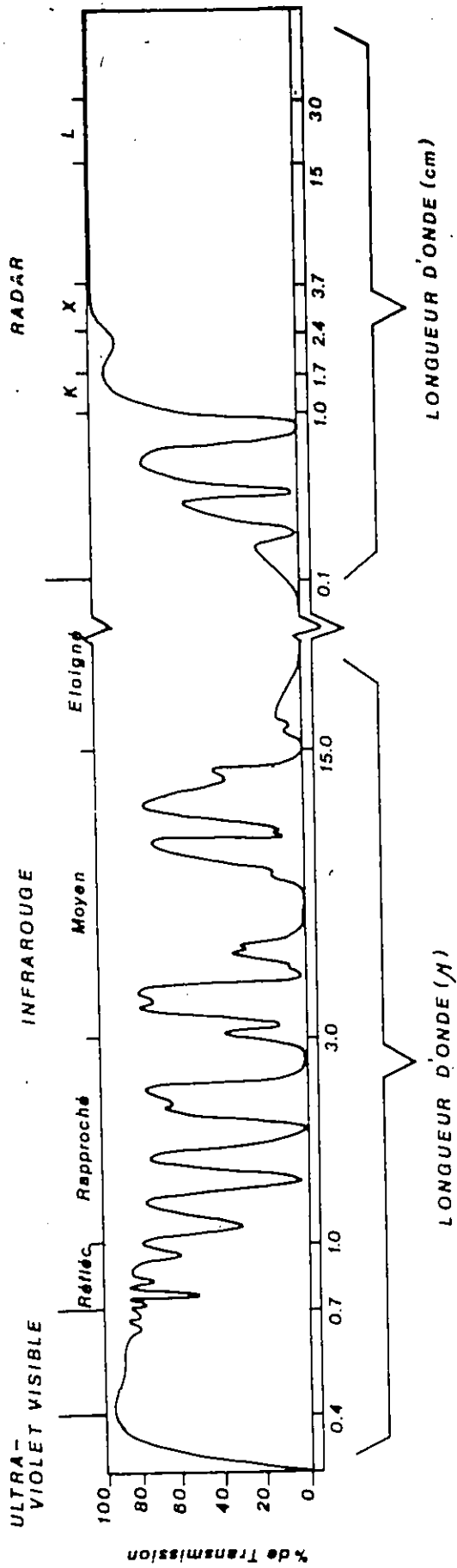


Figure 4a - Principales régions spectrales en télédétection

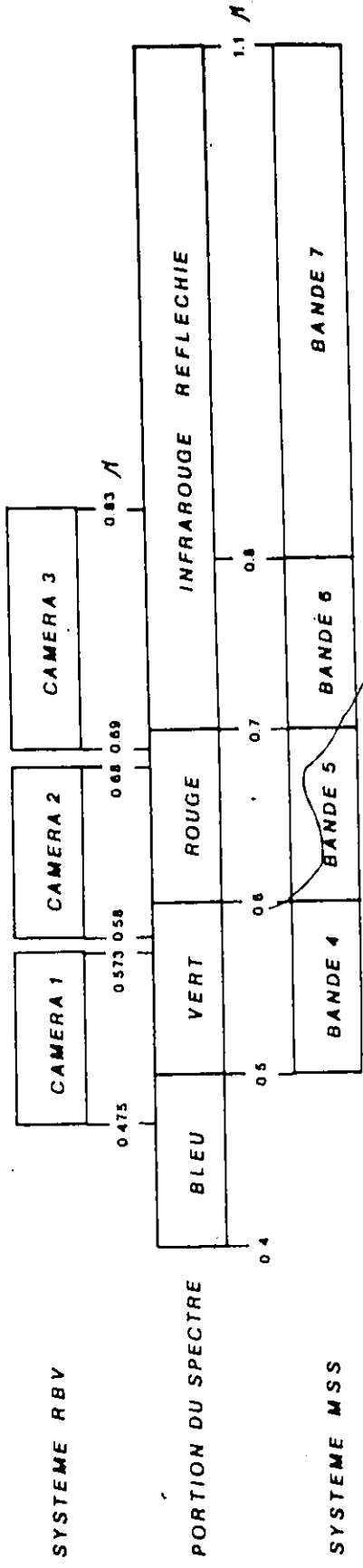


Figure 4b - Sensitivité spectrale des systèmes RBV et MSS de Landsat 2

Avec ce système, il en résulte donc des rubans d'images d'une largeur approximative de 100 km avec une résolution de 40 m.

L'interprétation des images sera effectuée dans deux laboratoires d'analyse situés à Ottawa. Les images reproduites sur papier seront interprétées au laboratoire de télédétection du Département de Géographie de l'Université d'Ottawa. Les photos aériennes seront interprétées à l'aide du Stéréosketch Higger and Watts et d'un stéréoscope modèle Wild ST4 à agrandissement 8 X. Les images sur ruban magnétique seront traitées sur le General Electric Image 100 Computer du C.C.T.

3.2 - Méthodologie

La méthodologie adoptée comportera cinq étapes. Dans chacune, différentes techniques seront considérées et à la fin du projet, une méthodologie sera proposée réunissant pour chaque étape les meilleures techniques.

La première étape consiste à établir la carte de la végétation. Quantitativement, ceci est accompli par l'interprétation d'une série de quinze photos aériennes. Afin d'éliminer la distortion d'une photo à l'autre, un stéréosketch est utilisé puisqu'il permet de projeter l'image tridimensionnelle sur la carte topographique de la région. Les précisions sont effectuées à l'aide d'un stéréoscope à agrandissement de 8 X. Puisque la carte topographique est à une échelle différente, soit de 1 : 50 000, la carte finale de la végétation est retransmise à l'échelle des photos aériennes afin de faciliter les vérifications ultérieures. Ceci est accompli à l'aide du Map-o-graph modèle 55 de Art-o-Graph Inc. Qualitativement, les classes de la carte sont décrites à partir de données de terrain recueillies pendant l'été 1982 près du lac Rectangular dans la vallée du Gladstone Creek.

La deuxième étape est l'interprétation visuelle de l'image Landsat. Or avant de passer directement à l'interprétation de l'image, comme on procède habituellement, il est fort préférable d'effectuer une analyse des possibilités du document. En effet certaines classes pourraient être

difficilement reconnaissables suite aux limitations géométriques et/ou radiométriques de l'image, et aux limitations visuelles de l'auteur lui-même. Un moyen rapide, précis et peu dispendieux de faire une telle analyse est d'effectuer des mesures densitométriques.

Tout objet est visible dû à sa réflectance par rapport à la lumière incidente. Ainsi, une photographie représente ni plus ni moins que l'évidence des différences de réflectance des objets d'une scène selon la lumière incidente. Chaque grain d'une image est en fait un dépôt d'argent dont l'opacité dépend de la réflectance de l'objet, donc de l'exposition du film à ce point.

Il existe plusieurs façons de mesurer l'exposition du film à certains points précis d'une image. Une façon rapide et très utile est de mesurer la densité. Cette mesure s'effectue sur des copies transparentes, positives ou négatives. La densité (D) d'une image au point 'p' est définie par le logarithme en base 10 de l'opacité (O) du film à ce point

$$D(p) = \log O(p)$$

L'opacité d'un point est inversement proportionnelle à la quantité de lumière traversant le point, la transmissibilité (T). Pour n'importe quel point 'p', la transmissibilité est

$$T(p) = \frac{\text{Lumière transmise à travers le film au point 'p'}}{\text{Lumière totale incidente sur le point 'p'}}$$

Le densitomètre ponctuel TD-101 de Macbeth mesure la densité par l'entremise de circuits électroniques. Le processus est simple. Toute lumière incidente sur la cellule photosensible de la cathode produit un voltage qui détermine le courant électrique passant à l'anode. Si un échantillon est introduit entre la source de lumière et la cathode, le voltage est modifié, ce qui change le courant passant à l'anode. Pour mesurer la densité, un circuit est utilisé qui ajuste automatiquement le voltage afin de conserver un courant constant passant à l'anode.

Un voltmètre mesure le voltage, normalement situé entre 200 et 800 volts. Ceci représente une transmissibilité de 0 à 100 %, correspondant à une densité de 0.0 à 4.0. Ce densitomètre offre

également la possibilité de varier la nature de la lumière incidente grâce à l'utilisation de quatre filtres.

Ordinairement, les mesures densitométriques sont prises sur un document transparent. Dans la majorité des cas, ces mesures servent à l'interprétation d'un document reproduit sur papier. En procédant ainsi, une partie importante de l'information est souvent perdue à cause de l'opacité additionnelle du papier. Une nouvelle technique est proposée.

Puisque le Applicon Plotter du C.C.T. reproduit les images sur un papier peu opaque, il est possible de prendre des mesures densitométriques. Lorsque plusieurs mesures ont été faites sur le papier vierge, on a trouvé une grande stabilité dans la transmissibilité. Par contre, on se doit de noter les limitations de cette technique. D'abord, puisque l'image est produite par projection d'encre et que cette méthode n'est pas parfaitement constante, on ne peut s'assurer de la stabilité des teintes. De plus, ces couleurs ont tendance à faner lorsqu'exposées au soleil ou à s'effacer si le document est frotté. Il est donc recommandé de prendre les mesures rapidement et avec le minimum de manipulation du document.

Pour procéder aux mesures, le document est d'abord transposé sur la carte étalon. Pour chaque classe représentée sur la carte, un minimum de dix cellules constituées de trente pixels chacune (T. Joyce, 1978) sont identifiées et délimitées sur l'image-satellite. Chaque cellule est alors mesurée au densitomètre ponctuel sous quatre filtres différents. Il en résulte un ensemble de 40 données représentant la signature densitométrique de la classe. Les signatures sont alors comparées entre elles afin de sortir les classes pouvant être distinguées par l'ordinateur (Lillesand et Kiefer, 1979). L'image est alors prête à être interprétée.

En plus de représenter une technique indispensable pour l'interprétation visuelle de l'image Landsat, la densitométrie permet également de déterminer avec une très grande précision les cellules d'échantillonnage, nécessaires pour la classification dirigée. Ainsi, même si l'interprétation visuelle d'une image satellite soit suffisante, si, plus tard, l'auteur désire effectuer des analyses

automatisées, la densitométrie lui a déjà procuré beaucoup d'information.

La quatrième étape, soit l'analyse automatisée de l'image satellite sous forme numérique, est la plus complexe et nécessite donc une préparation intensive. L'établissement d'un plan détaillé permet d'utiliser dans chaque cas les techniques et les algorithmes les plus appropriés et surtout de réaliser le plus possible en utilisant le minimum d'heures d'ordinateur.

Les opérations de l'analyse automatisée se regroupent en trois types à but totalement différent.* Tout plan d'analyse suit généralement la succession logique suivante.

Le premier type d'opération s'intéresse à la restauration de l'image. Le but de ces techniques est de restituer à l'image l'apparence véritable de la région en corrigeant, si nécessaire, certaines distortions radiométriques ou géométriques présentes sur l'image. Tout ce qui est requis est un minimum de dix points de localisation de surface qui peuvent être identifiés sur l'image satellite. Ces points sont analysés numériquement selon un programme de régression produisant des coefficients de corrélation. Ceux-ci sont alors utilisés pour modifier l'allure de l'image afin de mieux correspondre à la réalité. Selon la grandeur du secteur étudié et sa physiographie, ces opérations peuvent être très compliquées.

Le second type d'opération est composé de techniques de rehaussement d'image. Il en existe deux genres. Le premier genre s'effectue avant les techniques d'interprétation des données. Leur but est de faciliter le travail de l'interprétation en accentuant le contraste entre chaque élément spectralement différent. Parmi les divers rehaussements d'image, les rehaussements de contrastes sont le plus communément appliqués aux images Landsat. Avant d'effectuer un rehaussement de contrastes, il est nécessaire d'obtenir une signature de l'image, c'est-à-dire un profil numérique ou bidimensionnel des différentes valeurs spectrales comprises sur l'image. Suite à l'examen de ce profil et aux objectifs de la recherche, un rehaussement de contrastes particulier est appliqué. Les

* Ces types d'opérations sont tirés de l'ouvrage "Remote Sensing and Image Interpretation", par Lillesand, T.M. et Kiefer, R.W., 1979.

rehaussements de contrastes le plus souvent utilisés sont les contrastes linéaires, par histogramme ou spécial.

Le deuxième genre de rehaussement s'effectue après l'interprétation des données. Il s'agit de divers filtres qui sont appliqués sur l'image dans le but d'éliminer les pixels errants, donnant ainsi un aspect plus homogène aux classes. Selon ces méthodes, chaque pixel est comparé aux pixels avoisinants. Si la signature spectrale ne correspond pas, le pixel "errant" est réassigné dans la classe appropriée.

Finalement, le dernier type représente les techniques d'interprétations elles-mêmes. Ici, une quantité infinie d'algorithmes est disponible. Il existe trois méthodes de base pour la classification des données. La classification dirigée, la classification non-dirigée et les classifications hybrides.

La classification dirigée (supervisée) nécessite des connaissances initiales sur la région concernée. L'identification et la délimitation des classes de l'image sont appuyées sur des cellules de surface d'entraînement prédéterminées pour chaque classe. L'ordinateur regroupe l'information de ces cellules et crée les statistiques de chaque classe. Selon la fonction discriminante choisie, les statistiques sont alors appliquées à l'image. Chaque pixel est comparé aux signatures spectrales des cellules telles que spécifiées par les statistiques et est assigné à la classe la plus probable. Les fonctions discriminantes principalement employées pour la classification dirigée sont: la méthode du parallélépipède et celle du maximum de vraisemblance.

La classification non-dirigée (non-supervisée) procède de façon inverse. Ici, la participation de l'auteur est faite à la suite de la classification. Celle-ci est donc basée strictement sur la signature spectrale individuelle de chaque pixel. Préalablement, l'auteur n'a qu'à spécifier soit le nombre de classes désiré ou les paramètres de classification. Dans le premier cas, l'ordinateur étudie les pixels et détermine les paramètres pour chaque classe en accord avec le nombre de classes suggéré. Dans le cas contraire, les paramètres, c'est à dire l'écart maximal du centre, la distance minimale entre différents centres et le nombre maximal de pixels par classes, sont spécifiés.

D'une façon ou de l'autre, les classes ne sont pas identifiées. L'ordinateur ne fait que placer les pixels dans le plus de classes possible. Une fois que la classification est terminée et reproduite sur papier, l'auteur peut alors l'étudier avec l'aide des données de base et si possible identifier les classes. Si les classes ne concordent pas, il peut recommencer en variant le nombre de classes ou les paramètres. Les fonctions discriminantes préférées pour la classification non-dirigée sont: le plus proche voisin, les moyennes amovibles et l'histogramme à quatre dimensions.

Les classifications hybrides sont des méthodes de classification combinant certaines caractéristiques des deux autres. Bien qu'une grande variété de ces techniques existe, chacune représente sensiblement les mêmes caractéristiques principales. Ainsi, il s'agit normalement de choisir des petites fenêtres de classification, chacune représentative de certains éléments spécifiques de la région. Celles-ci sont alors classifiées selon une méthode non-dirigée, résultant en une série de pseudo-cellules d'échantillonnage. La région entière est alors classifiée selon une méthode dirigée en utilisant l'information contenue dans les statistiques de ces classes.

3.3 - Techniques d'évaluation des résultats

Les mesures de terrain utilisées pour la description des types de végétation ont été établies par la méthode du transect linéaire avec quadrats. Suivant une ligne imaginaire, les analyses sont effectuées à intervalles réguliers ou aux changements évidents de végétation. A chaque point d'arrêt, un carré de dix mètres de côté est visualisé et cinq quadrats sont observés, aux quatre coins et au centre. Les observations sont prises par rapport aux espèces présentes, leur pourcentage de couverture et leur strate correspondante. Ceci nous donne une bonne représentation globale de la classe de végétation.

Les résultats seront interprétés selon trois attributs. D'après l'exactitude de la classification, l'efficacité de chaque technique et selon le coût et le temps requis par ces dernières.

L'évaluation de l'exactitude de classification soulève deux problèmes. D'abord, il s'agit de trouver la meilleure technique qui est également facile, rapide et peu coûteuse. Le deuxième problème, plus complexe, est l'élimination de l'erreur due aux distorsions géométriques. En effet, la superposition de l'image satellite à la carte topographique a identifié deux séquences de distorsions mineures associées aux dénivellations importantes de la vallée du Gladstone Creek.

Suite à l'essai de différentes techniques d'échantillonnage, une grille d'échantillonnage par quadrat aléatoire est jugée optimale. Il s'agit d'une grille constituée de sept quadrats choisis de façon aléatoire tout en respectant les zones de distorsions. Chaque quadrat est lui-même stratifié en une grille de 121 points. Il en résulte un échantillonnage total de 847 points qui représente une excellente quantification de la carte étudiée. Chaque point de la grille couvre environ 2 x 2 pixels et est éloigné du voisin par six pixels. Les résultats sont exprimés dans des tables de contingence. Le pourcentage correctement classifié est calculé pour chaque classe et la précision moyenne est calculée pour la classification totale.

Le pourcentage correctement classifié (P_i) est le nombre d'observations correctement classifiées dans la classe i (y) sur le nombre total d'observations dans la classe i sur la carte de base (m).

$$P_i = y/m$$

Des intervalles de confiance ont été calculés pour le pourcentage correctement classifié de chaque classe selon la formule (Hogg et Tanis, 1977).

$$P_i \pm Z \sqrt{(y/m)(1-y/m) / m}$$

où; Z est la valeur critique de la distribution normale Z
au niveau de confiance approprié (.95)

De plus, chaque grille d'échantillonnage a été interprétée selon la théorie de l'information. L'avantage de cette technique est qu'elle transforme les données d'une table de contingence sous une forme statistiquement plus significative. La théorie de l'information est une technique de traitement des données qui permet la mesure de l'information. La théorie date de 1946 et fut conçue par Shannon. Les concepts de thermodynamique classique, élaborés par Boltzmann vers 1906, reposent sur le fait que tout changement est accompagné d'un transfert d'énergie. Shannon part de cette base et stipule que tout élément qui varie dans le temps ou l'espace crée de l'information. Sa théorie a pour but de mesurer cette information.

Considérons une expérience E quelconque où une épreuve X_i a pour résultat un événement A_j . L'information amenée par l'épreuve X_i est égale à $-\log P_j$, où P_j représente la probabilité de A_j . C'est à dire que plus P_j approche de 1, plus l'événement est certain et moins il a d'information. Plus P_j approche de 0, plus l'expérience est incertain, donc possède un potentiel élevé d'information.

Si la somme de l'information de l'expérience est

$$I(E) = \sum F_j (-\log P_j), \text{ où } F_j = P_j \times N$$

l'entropie $H(Ea)$, c'est à dire l'incertitude du système est, selon la formule de Shannon

$$H(Ea) = -\sum P_j \times \log P_j$$

Considérons maintenant une expérience constituée de deux événements, soit A et B. Chacun a sa propre valeur d'entropie, $H(A)$ et $H(B)$. Or il est possible que pour l'événement A, l'entropie soit diminuée sachant l'événement B. Cette notion porte le nom d'entropie à postériori. Elle est très importante car elle permet de calculer l'information commune aux deux événements A et B de l'expérience.

Si on examine la figure 5, l'ensemble de l'expérience a une entropie totale $H(A,B)$. Les événements A et B ont des entropies respectives de $H(A)$ et $H(B)$. Maintenant, sachant l'événement B, l'événement A a une entropie à posteriori $H_b(A)$. Inversement, sachant l'événement A, l'événement B a une entropie à postériori $H_a(B)$. Il est clair sur le schéma que l'intersection des deux cercles représente l'information commune à A et B. Il s'agit de l'Information Mutuelle IM qui se calcule ainsi

$$IM(A,B) = H(A) - H_b(A)$$

Si on désire exprimer l'information mutuelle sous forme de pourcentage, on obtient la Redondance R, c'est à dire l'information mutuelle relative, selon

$$R(A,B) = IM(A,B) / H(A) \times 100$$

Si on revient à notre étude, l'événement A est la carte de base, soit la vérité de terrain, et l'événement B est la carte étudiée. En construisant une table de contingence à double entrée, l'événement A est en ligne et l'événement B est en colonne. Il suffit donc de calculer les entropies et les entropies à postériori des deux événements pour enfin calculer la redondance de l'expérience, c'est à dire la coïncidence des deux cartes.

Cette façon d'exprimer la coïncidence est beaucoup plus appropriée parce qu'elle est calculée à

partir de l'entropie totale de l'expérience. Elle prend donc en considération toutes les contraintes ayant une influence sur l'expérience, c'est à dire le nombre de classes, la précision de classification ainsi que la surclassification.

Une dernière analyse quantitative est effectuée. Il s'agit de comparer les fréquences expérimentales de chaque classe des classifications automatisées aux fréquences théoriques calculées par l'ordinateur. Ceci est effectué dans le but d'établir la validité de la grille d'échantillonnage utilisée pour le calcul des statistiques. Un test de Chi carré sera effectué sur ces fréquences afin de déterminer si les différences entre la grille et l'ordinateur sont dues au hasard ou à un échantillonnage inadéquat.

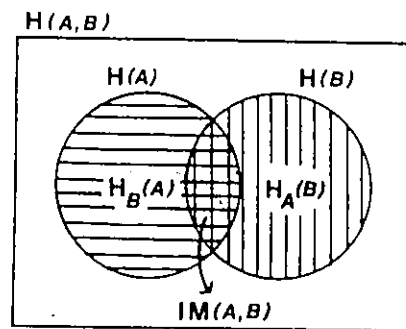


Figure 5 - Représentation graphique des notions de base de la théorie de l'information.

CHAPITRE 4 - RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 - Interprétation Visuelle

La carte de base est constituée de onze classes représentant des types de végétation très généraux (Tableau 1, figure 6). Pourtant, dans la région d'étude, il existe vraisemblablement plus d'une vingtaine de classes plus précises qui sont facilement discernables sur les photos aériennes. Or, plusieurs de ces classes sont soit trop petites pour être reconnues par la résolution limitée du satellite soit trop similaires pour être séparées. Une généralisation a dû être effectuée. Chaque classe de la carte de base couvre au moins quatre pixels (2 X 2), ou parfois seulement un pixel de large et plusieurs de long permettant l'identification - les cours d'eau par-exemple.

Bien que la région entière n'ait pas été inventoriée sur le terrain, chaque type de végétation a été analysé. La combinaison des relevés et des photos personnelles recouvrent environ 20 % du secteur d'étude (annexe 4).

Les photos aériennes étaient de bonne qualité. Quoique d'une ligne de vol à une autre le recouvrement était parfois minime (= 10 %), la majorité des distortions a été réduite avec le stéréosketch. Les précisions dans les limites ont été obtenues avec un stéréoscope. Cette méthode est certainement la plus précise. Par contre, elle nécessite plus de quinze photos et environ 180 heures de travail intensif.

Avant de passer à l'interprétation visuelle de l'image satellite, on a effectué une analyse densitométrique de l'image reproduite sur papier. Une série de dix secteurs pour chaque classe de la carte de base a été choisie et tracée sur l'image satellite (Figure 3). Ces secteurs ont par la suite été mesurés au densitomètre ponctuel sous quatre filtres. Chaque classe est donc représentée par quatre séries de dix mesures représentant sa signature densitométrique.

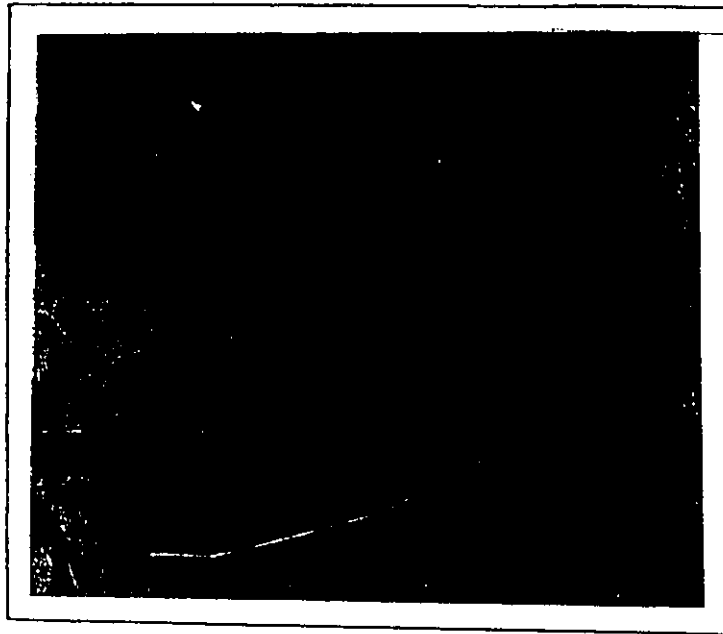


Figure 6 - Classification de la carte de base (1:287 000)

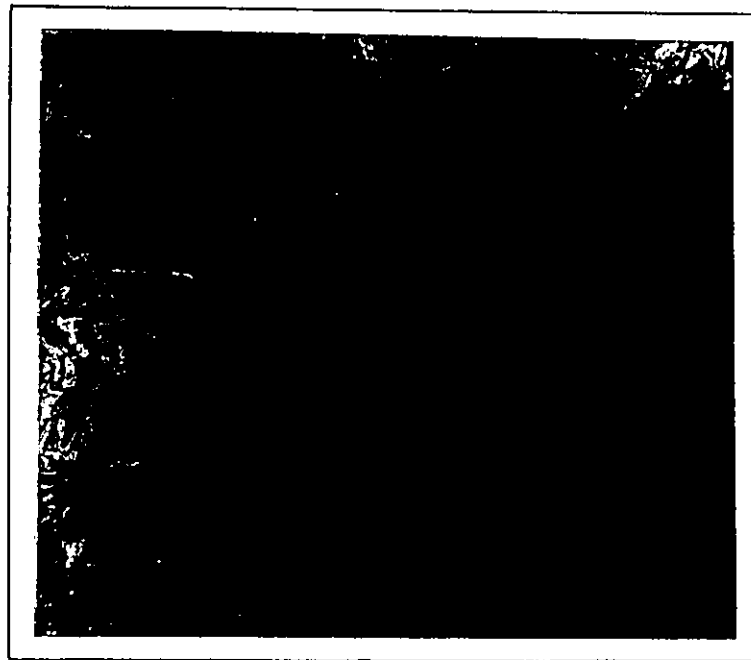


Figure 7 - Classification de la carte A (1:37 000)








Classe	Symbole	Description
Eau		Comprend les lacs, les ruisseaux et les surfaces inondées.
Tourbière à Bryophytes		Tourbière riche très active, légèrement élevée au dessus de la nappe phréatique. Végétation herbacée avec des bosquets de <u>Ledum decumbens</u> et <u>Betula glandulosa</u> . Extrémités submergées composées d'espèces aquatiques: <u>Sparganium sp.</u> , <u>Potamogeton sp</u> et <u>Equisetum sp.</u>
Tourbière à Chaméphytes		Tourbière plus mince et moins active installée sur les versants à pente douce. Végétation arbustive bien installée sur les bourlets: <u>Salix sp.</u> , <u>Betula glandulosa</u> , <u>Potentilla fruticosa</u> , <u>Ledum decumbens</u> et <u>Vaccinium uliginosum</u> . Quelques bosquets de <u>Picea mariana</u> sont parsemés par marcottage.
Saulaie		Classe très dense composée de trois à quatre espèces de <u>Salix</u> atteignant plus de 2 m. On retrouve <u>Betula glandulosa</u> , <u>Ledum decumbens</u> et <u>Potentilla fruticosa</u> dans les zones moins denses. Quelques éboulis rocheux colonisés par <u>Populus balsamifera</u> et <u>Populus tremuloïdes</u> sont bien isolés.
Saulaie à Picea		Classe similaire à 'S' mais plus ouverte. Elle est caractérisé par une présence plus marquée de <u>Picea mariana</u> mais qui atteint à peine 5 m.
Jeunes Pessières		Population très ouverte composée de jeunes épinettes de 3 à 4 m de hauteur. <u>Salix sp</u> est dispersé. Le sol humide est constitué d'une tourbe riche en graminées et carex.
Toundra à Chaméphytes		Végétation arbustive installée sur une matrice sablo-graveleuse couverte de plaques de mousse et de lichen. En plus de <u>Betula glandulosa</u> , <u>Salix sp</u> et <u>Potentilla fruticosa</u> , on rencontre <u>Juniperus communis</u> , <u>Vaccinium vitis idea</u> , et <u>Saxifraga sp.</u>

Tableau 1 - Description des classes de la carte de base

Classe	Symbole	Description
Toundra Striée		Surface ondulée représentant un amalgame de deux types de végétation à Chaméphytes. Constituées d'une matrice sablo-graveleuse sèche, les crêtes soutiennent une végétation similaire à 'tÉ', alors que les dépressions humides possèdent une végétation du type 'TC'.
Toundra Herbacée		Matrice sablo-graveleuse presque totalement recouverte de lichen. La végétation est entièrement herbacée. En plus des graminées et des composées, on retrouve les espèces caractéristiques: <u>Empetrum nigrum</u> , <u>Artemesia frigida</u> et <u>Dryas octopetala</u> .
Toundra à Chaméphytes Perturbée		Toundra similaire à 'tC' mais perturbée par de nombreux éboulis rocheux. Les blocs sont couverts de lichen et de mousse où s'accrochent <u>Salix sp.</u> , <u>Dryas octopetala</u> , quelques graminées et fougères.
Surfaces Dénudées		Comprend les surfaces sans végétation tels les plages, les déflations éoliennes, les éboulis et glaciers rocheux, et les surfaces recouvertes de neige.

Tableau 1 - Description des classes de la carte de base (suite)

Le tableau 2 indique les valeurs moyennes des classes selon les quatre filtres. Le diagramme correspondant est présenté à la figure 8. Les lignes pleines représentent les huit classes qui seront considérées pour l'interprétation visuelle. Les lignes pointillées sont les classes trop similaires qui seront groupées avec une autre pour former une classe plus générale. La Saulaie à Picea est groupée à la Pessière ouverte, la Tourbière à Bryophytes est jointe à la Tourbière à Chaméphytes et la Toundra striée est associée à la Toundra à Chaméphytes. Reste quand même une forte ressemblance entre la majorité des classes.

Classe	Filtre bleu	Filtre vert	Filtre gris	Filtre rouge
E	1.63	1.53	1.56	1.49
TB	1.50	1.34	1.28	1.22
TC	1.51	1.34	1.28	1.23
S	1.37	1.22	1.08	1.00
SP	1.58	1.42	1.36	1.29
P	1.58	1.43	1.36	1.30
tC	1.44	1.30	1.25	1.20
ts	1.48	1.32	1.26	1.21
th	1.45	1.34	1.35	1.33
tp	1.32	1.21	1.20	1.19
D	0.87	0.83	0.84	0.91

Tableau 2 - Valeurs moyennes de Densité

De façon générale, une valeur de densité élevée signifie que peu de transmission fut diffusée à travers le point mesuré. Sur l'image, celui-ci apparaît sombre. Une valeur basse représente une bonne transmission de la lumière à travers le point et apparaît clair. Or, ceci varie de filtre en filtre. Bien que les quatre filtres opèrent dans la région visible du spectre électromagnétique, chacun possède une sensibilité particulière qui dépend des tonalités et de la composition spectrale de l'image.

Examinons la figure 8. Les Surfaces dénudées (sd) sont claires, suivies des Saulaies (S), de la Toundra à Chaméphytes perturbée (tp), de la Toundra à Chaméphytes (tC) et de la Toundra striée (ts). Viennent ensuite la Tourbière à Bryophytes (TB), la Tourbière à Chaméphytes (TC), la Toundra herbacée (th), la Saulaie à Picea (SP), les Pessières (P) et l'Eau (E).

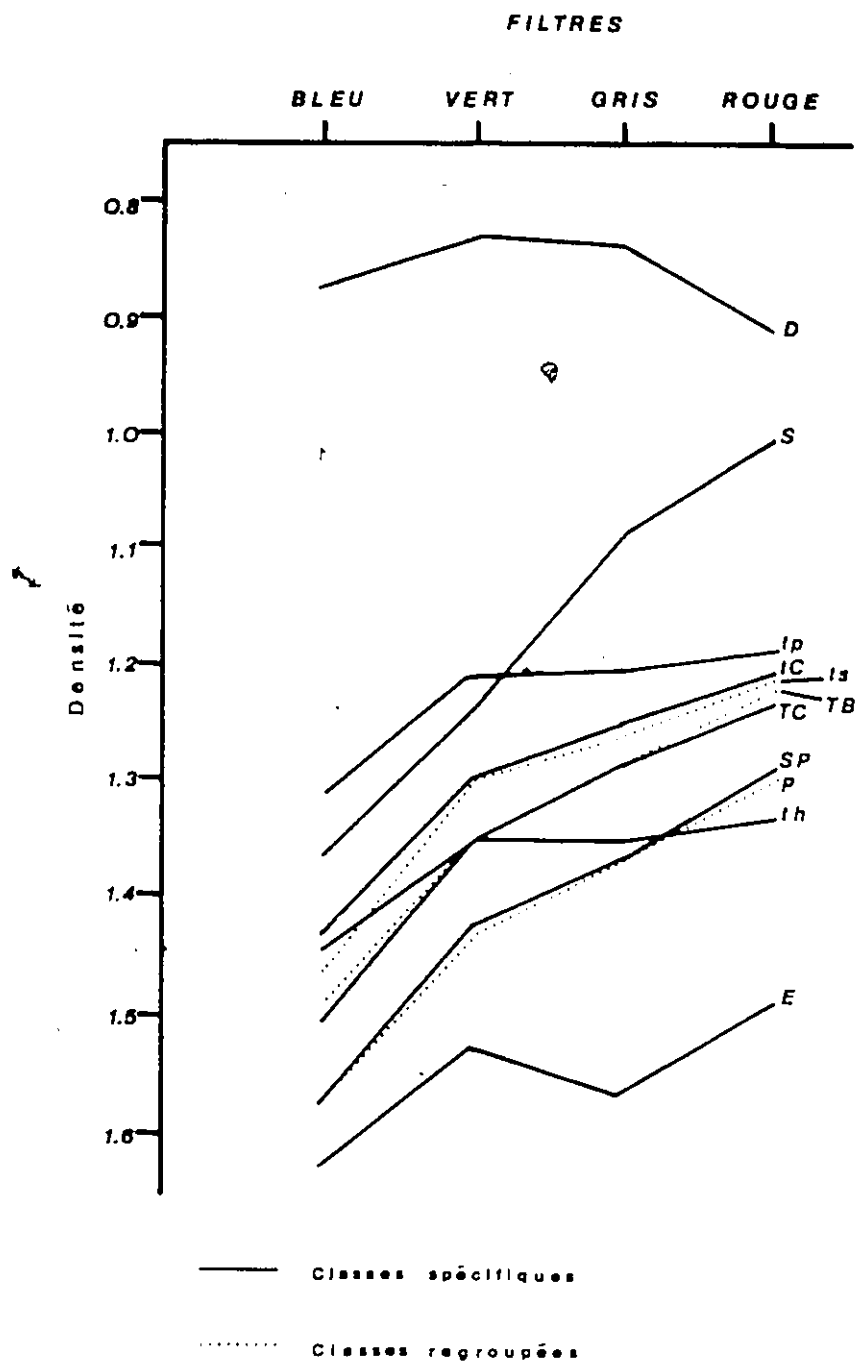


Figure 8 - Courbes de densité

Dans l'ensemble, cet ordre représente assez bien l'aspect des classes sur le terrain. Les surfaces dénudées apparaissent effectivement très claires, suivies des Toundras, des Tourbières, des classes de végétation denses et de l'Eau, qui sont progressivement plus foncées.

Or deux anomalies sont détectées. La Saulaie, qui a une signature densitométrique plus faible que prévue et la Toundra herbacée, qui a une signature plus élevée. L'explication réside dans la période pendant laquelle l'image a été prise. Au Yukon, la saison automnale arrive très tôt, vers la mi-août. De sorte que le 3 septembre, date de l'image, la température s'est définitivement rafraîchie et les feuilles sont déjà très jaunes. Ainsi, la Saulaie qui est très dense, présente une surface jaunie uniforme dû à la perte de chlorophylle et apparaît plus claire.

Donc sur l'image, plus la classe est établie sur un sol sec et est composée d'essences feuillues, plus elle est claire. Plus elle repose sur un sol humide et supporte des espèces vivaces, plus elle est sombre. La Toundra herbacée, par exemple, est sur un sol très sec mais est composée d'espèces telles Dryas octopetala, Empetrum nigrum et Artémisia frigida. A cause de ces espèces vivaces, cette classe apparaît moins claire que celles composées de feuillus, mais possède une signature plus sombre que les autres types de Toundra et les Tourbières dû au couvert ras mais continu de chlorophylle.

Cette étape est simple et très rapide. Moins de douze heures sont nécessaires, incluant le montage et l'analyse des graphiques.

Il y a donc huit classes qui ont une signature densitométrique suffisamment distincte pour être considérées dans l'interprétation visuelle de l'image satellite (Tableau 3). Cette classification est alors effectuée et représentée sur la carte A (Figure 7). Travaillant avec une seule image sur une table lumineuse, la classification totale ne nécessite qu'environ vingt heures.

Le tableau 4 représente la table de contingence de la carte A. En abscisse, on trouve la précision de classification et en ordonnée, la surclassification.


Classe	Symbole	Description
Eau	E	Comprend les lacs, les ruisseaux et les surfaces inondées.
Tourbières	T	Tourbière moyennement épaisse et active. S'étend des zones submergées aux pentes douces des talus. Graminées et carex abondent alors que <u>Salix sp.</u> , <u>Betula glandulosa</u> et autres Chaméphytes subsistent sur les bosquets. Les extrémités submergées sont composées d' <u>Equisetum sp.</u> , <u>Sparganium sp.</u> et <u>Potamogeton sp.</u>
Saulaie	S	Classe très dense composée de trois à quatre espèces de <u>Salix</u> atteignant plus de 2 m. On retrouve <u>Betula glandulosa</u> , <u>Ledum decumbens</u> et <u>Potentilla fruticosa</u> dans les zones moins denses. Quelques éboulis rocheux colonisés par <u>Populus balsamifera</u> et <u>Populus tremuloïdes</u> sont bien isolés.
Saulaie à Picea		Classe dominée par <u>Salix</u> , mais moins dense que les saulaies. <u>Betula glandulosa</u> et <u>Potentilla fruticosa</u> sont remplacés par <u>Picea mariana</u> qui est parfois dominant. Le sol est couvert d'un mince tapis de tourbe humide.
Toundra à Chaméphytes	tc	Végétation arbustive installée sur une matrice sablo-graveleuse couverte de plaques de mousse et de lichen. A certains endroits, des dépressions ont un sol tourbeux où la végétation est arbustive. Sur la matrice plus sèche on rencontre: <u>Juniperus communis</u> , <u>Vaccinium vitis idae</u> , <u>Saxifraga sp.</u> et <u>Populus tremuloïdes</u> .
Toundra Herbacée	th	Matrice sablo-graveleuse presque totalement recouverte de lichen. La végétation est entièrement herbacée. En plus des graminées et des composées, on retrouve les espèces caractéristiques: <u>Empetrum nigrum</u> , <u>Artemisia frigida</u> et <u>Dryas octopetala</u> .

Tableau 3 - Description des classes de la carte A

Classe	Symbole	Description
Toundra à Chaméphytes Perturbée	tp	Toundra similaire à 'tC' mais perturbée par de nombreux éboulis rocheux. Les blocs sont couverts de lichen et de mousse où s'accrochent <u>Salix sp.</u> , <u>Dryas octopetala</u> , quelques graminées et fougères.
Surfaces Dénudées	D	Comprend les surfaces sans végétation tels les plages, les déflations éoliennes, les éboulis et glaciers rocheux, et les surfaces recouvertes de neige.
Surfaces Ombragées	O	Surfaces ayant la même teinte que 'E' mais qui ne correspondent pas à de l'eau.

Tableau 3 - Description des classes de la carte A (suite)

Le tableau 5-a exprime les pourcentages de précision avec intervalle de confiance au niveau de 0.95. La précision moyenne est de 70 % avec des minimum et maximum de 37.5 et 100 %. Or ces pourcentages sont parfois trompeurs. Dans toute classification à partir de documents télédétectés, on peut s'attendre à ce que chaque classe soit surclassifiée. Ceci est dû à la résolution qui ne peut être aussi précise que la vérité de terrain. Il faut donc prendre ces pourcentages dans l'optique où ceux-ci représentent la proportion de la vérité de terrain qui est correctement classifiée sur la carte étudiée.

Des huit classes, cinq ont une précision supérieure à 67 %, dont trois dépassent 75 %. Deux autres sont marginales et la dernière est pauvrement classifiée. Un problème particulier à l'image satellite est la grande quantité d'ombre qui, ayant une signature spectrale indifférentiable de celle de l'Eau, est incluse dans cette classe. De ce côté, une corrélation existe entre l'Eau et la Toundra à Chaméphytes perturbée. Sur la carte A, les points classifiés dans la classe de l'Eau, mais ne correspondant pas à l'eau sur la carte de base, sont présentés d'un bleu marine plus clair. Si on examine la carte de base par rapport à la carte topographique (Figure 2), il est facile de prévoir que les escarpements rocheux faisant face au nord seront vraisemblablement ombragés. Or, la Toundra à Chaméphytes perturbée correspond exactement à ces escarpements. Dans la

table de contingence, on remarque en effet que la majorité des points surclassifiés de la classe de l'Eau correspondent à la Toundra à Chaméphytes perturbée.

Carte de base

Classe	E	TB/TC	S	SP/P	ts/tc	th	tp	D	Total	%
E	12	1	1		2	2	30		48	75.0
T		64	16	2	9	2	7		101	36.6
S		5	72	2	22	4	20	1	125	42.4
P		2	8	12		1			23	47.8
tC		2	9		180	22	31		244	26.2
th		1			32	89	5	1	128	30.5
tp		1	11		23	8	124	3	170	27.1
D		1					4	3	8	62.5
Total	12	77	117	16	268	128	221	8	847	
%	100	83.1	61.5	75.0	67.4	69.5	56.1	37.5		

Précision de classification

Tableau 4 - Table de contingence de la carte A

En incluant ces points dans la classe appropriée, la précision de classification de cette dernière passe de 56.1 à 69.7 % et l'Eau n'est plus surclassifiée que de 33.3 %. On note ici un des avantages de l'interprétation visuelle: la possibilité qu'a l'expérimentateur d'effectuer des décisions.

Par contre, ce genre d'opération requiert des connaissances de base sur la région, au minimum une bonne couverture récente de photos aériennes. Puisqu'un des buts de cette étude est d'évaluer les documents et les techniques pour l'analyse pré-terrain, on doit considérer qu'une telle couverture n'est pas toujours disponible. Donc, même si la possibilité existe, ce changement n'a pas été considéré dans le calcul des statistiques.

Considérons maintenant les autres classes. Les surfaces dénudées sont sérieusement mal classifiées. La cause est probablement liée à l'échantillonnage inadéquat. Par ailleurs, la taille souvent très petite des zones de ces classes, associée à la grande quantité de radiation réfléchie par le sol - phénomène commun aux types de végétation reposant sur l'étage arbustif - porte à une grande confusion spectrale. Il en résulte que ces petites classes sont souvent incorporées dans d'autres classes plus vastes. On remarque que 50 % des points de cette classe sont associés à la Toundra à Chaméphytes perturbée, soit une végétation découpée par plusieurs éboulis rocheux souvent assez vastes.

Carte A		Carte B		Carte C	
Classe	% avec I.C.	Classe	% avec I.C.	Classe	% avec I.C.
E	100 + —	E	100 + —	E	100 + —
TB/TC	83.1 + 8.4	TB/TC	62.3 + 24.3	TB/TC	90.9 + 6.4
S	61.5 + 8.8	S	19.7 + 7.1	S/P/SP	42.1 + 8.4
P/SP	75.0 + 21.2	P/SP	43.8 + 24.3		
ts/tc	67.4 + 5.6	ts	18.5 + 10.4	ts/tc	62.6 + 5.8
th	69.5 + 8.0	tc	31.8 + 6.2	th	63.3 + 8.3
tp	56.1 + 6.2	th	21.9 + 7.2	tp	52.9 + 6.3
D	37.5 + *	tp/D	7.2 + 3.4	D	50.0 + *
Moyenne	70 %	Moyenne	38 %	Moyenne	67 %

* Echantillonnage inadéquat pour le calcul des statistiques

Tableau 5 - Pourcentages de précision avec intervalles de confiance (I.C.) au niveau de confiance 0.95.

Pour ce qui est des Tourbières, de la Saulaie, des Pessières ouvertes, de la Toundra à Chaméphytes et de la Toundra herbacée, la précision de classification est assez bonne, entre 61,5 et 83,1 %. Dans chaque cas, le manque de précision est attribuable à un de trois phénomènes. Le premier et plus probable, est la différence de résolution entre les photos aériennes et l'image satellite. Le deuxième est l'erreur visuelle due à la ressemblance des classes. Le dernier, plus limité mais jamais totalement éliminé, est l'erreur causée par la distortion géométrique. Ces trois phénomènes sont également responsables à différents degrés du manque de précision des trois premières classes.

Appliquons la théorie de l'information des systèmes (Tableau 6). La première valeur $H(b)$ représente l'entropie maximale possible, c'est-à-dire une classification identique à la carte de base. Il est à remarquer que les valeurs de $H(b)$ ne sont pas les mêmes pour les trois techniques alors que la carte de base demeure inchangée. Ceci est dû à la jonction de classes sur la carte de base afin de correspondre au nombre de classes sur les autres cartes.

Carte	$H(b)$	IM	R(%)
A	1.67	0.70	42
B	1.91	0.61	32
C	1.72	0.69	40

Tableau 6 - Statistiques selon la théorie de l'information.

Par rapport à une entropie maximale de 1.67, la redondance de la carte n'est que de 42 %. Cette valeur est remarquablement inférieure à la précision moyenne telle que calculée de façon standard. Or, si on compare les deux cartes, il semblerait que 42 % approche plus de la réalité. La redondance constitue donc une meilleure expression de la carte, c'est-à-dire une seule valeur qui

tient compte de la précision moyenne, 70 % et de la surclassification moyenne, soit 44 %.

3.2 - Classification Automatisée

Un projet de recherche a été accordé avec une allocation de 80 heures d'utilisation d'ordinateur par le ministère d'Énergie, Mines et Ressources. Suite à l'étude des possibilités de l'image, et prenant en considération le nombre et la nature des techniques disponibles, un plan d'étude a été établi avec l'aide d'aviseurs techniques et d'opérateurs sur le Image 100 Computer du C.C.T.

L'ordinateur Image 100 offre la possibilité de visionner et d'interpréter un maximum de quatre canaux d'information. Puisqu'on analyse une image Landsat, ces canaux correspondent aux bandes 4, 5, 6 et 7 de celle-ci.

La première opération est traditionnellement une restauration géométrique de l'image. Or l'image Landsat utilisée a déjà subi toutes les corrections nécessaires au centre de Prince Rupert. Aussi, l'étape de l'analyse densitométrique a indiqué qu'à peine une légère distortion géométrique existait (Annexe 4). Bien que plusieurs programmes existent pour éliminer les ombres, ceux-ci sont très sophistiqués. Ils exigent des données exactes de localisation, d'altitude et de la nature de la végétation pour chaque classe différente comprise dans l'ombre. Étant donné la grande quantité d'ombre sur l'image, et que celle-ci est indifférentiable de l'eau, il serait d'autant plus difficile d'effectuer une correction, les lacs étant les principaux points directeurs. Aucune tentative de restauration d'image n'a donc été effectuée puisque celle-ci serait difficile et amènerait peu d'amélioration.

La première opération automatisée a donc été un rehaussement d'image. L'analyse des diagrammes représentant le profil spectral de l'image (Figure 9-a) démontre que l'information des quatre bandes est concentrée dans un noyau central et qu'elle ne s'étend pas sur la gamme complète de niveaux de grisés. Un rehaussement de contraste s'impose afin de maximiser l'information de chaque bande. Ceci est accompli en accentuant les différences spectrales des

pixels. Différents rehaussements de contraste sont considérés et un contraste linéaire s'avère excellent. Il s'agit d'une technique qui accentue le contraste tout en répartissant l'information spectrale sur la gamme complète de niveaux de grisés. Ceci amène aussi l'éclaircissement du noyau central d'information (Figure 9-b). Le programme utilisé est PRELUT (Pre processor Look Up Table). L'image est maintenant prête pour la classification.

Une technique de classification non-dirigée est d'abord effectuée. Avec le programme CLUSMM dont le regroupement repose sur l'algorithme des moyennes flottantes, plusieurs classifications sont essayées. Comme expliqué précédemment (p. 24), il y a deux façons générales de procéder à une classification non-dirigée. La première est de spécifier le nombre de classes. L'ordinateur attribue aux autres paramètres des valeurs standards. L'autre façon est de préciser tous les paramètres. Ceci est évidemment plus long et requiert beaucoup plus de manipulation de données.

Puisqu'un des buts de cette étude est de trouver une méthodologie simple et rapide, cette deuxième méthode est dans ce cas inappropriée. Alors, les classifications sont établies en spécifiant uniquement le nombre de classes, de 6 à 11. Pour chaque classification, un filtre est passé afin d'éliminer les pixels errant à l'aide du programme FNN FLL basé sur l'algorithme du plus proche voisin.

L'identification des classes est plus difficile que prévue et les classifications ne sont pas très bonnes. La meilleure, atteignant à peine 38 % de précision moyenne, est celle de huit classes (Tableaux 7 et 8). Celle-ci est représentée sur la carte B (Figure 10). Les pourcentages de précision avec intervalle de confiance sont au tableau 5-b.

Les précisions de classification vont de 100 % pour l'Eau, à 7.2 % pour la Toundra à Chaméphytes perturbée. Trois classes ne peuvent être distinguées: la Tourbière à Bryophytes, les Pessières et les surfaces dénudées. Or la presque totalité des pixels non-classifiés correspond à cette dernière. Il serait donc intéressant de trouver si ceux-ci possèdent une seule signature spectrale.

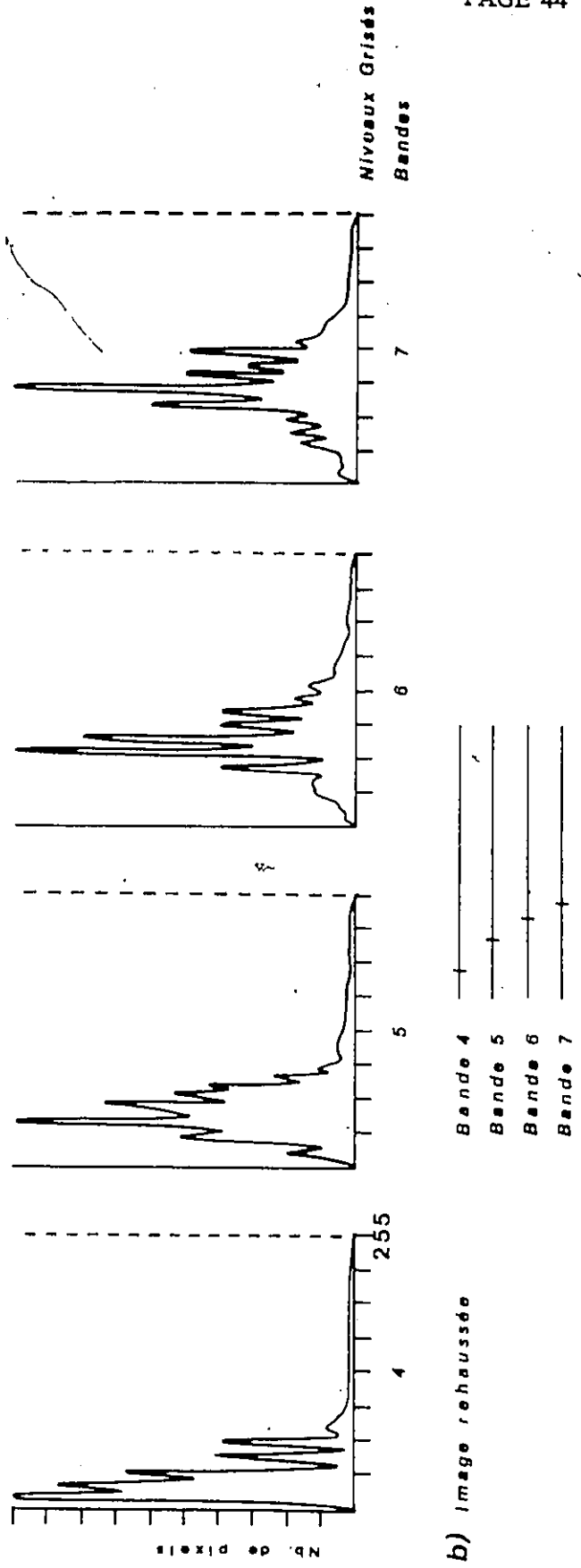
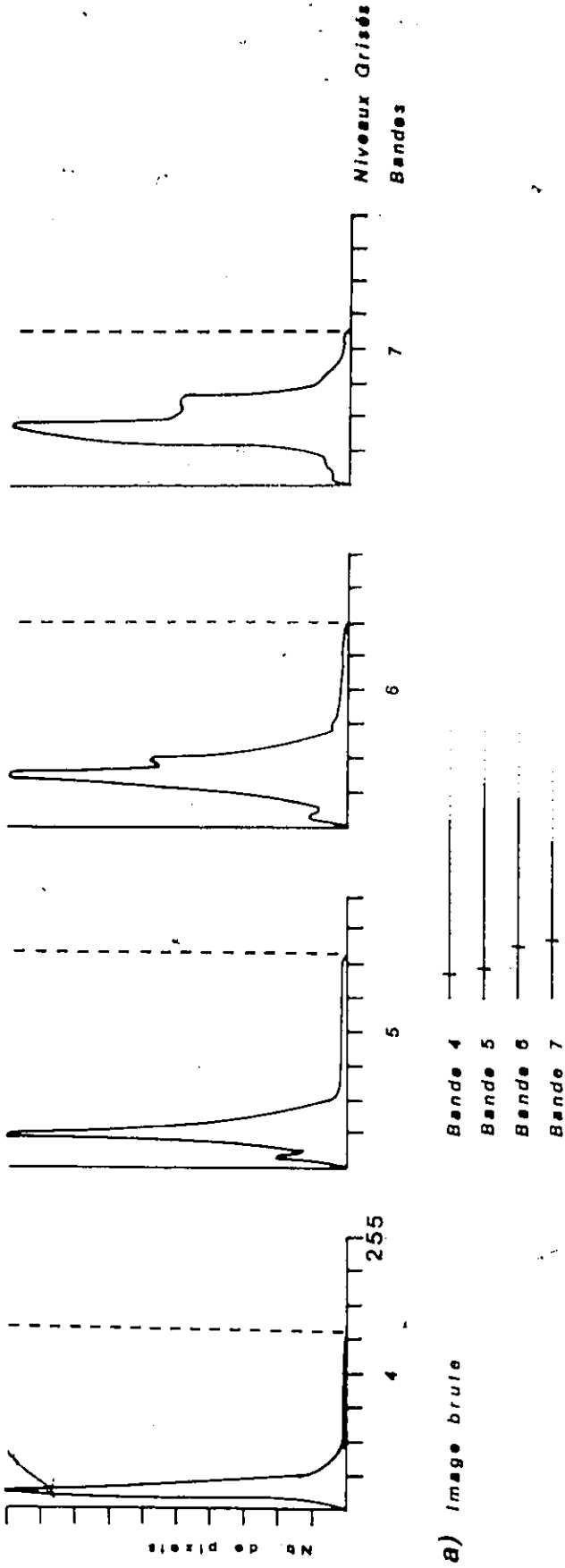


Figure 9 - Profils spectraux de l'image Landsat avant et après un rehaussement spectral

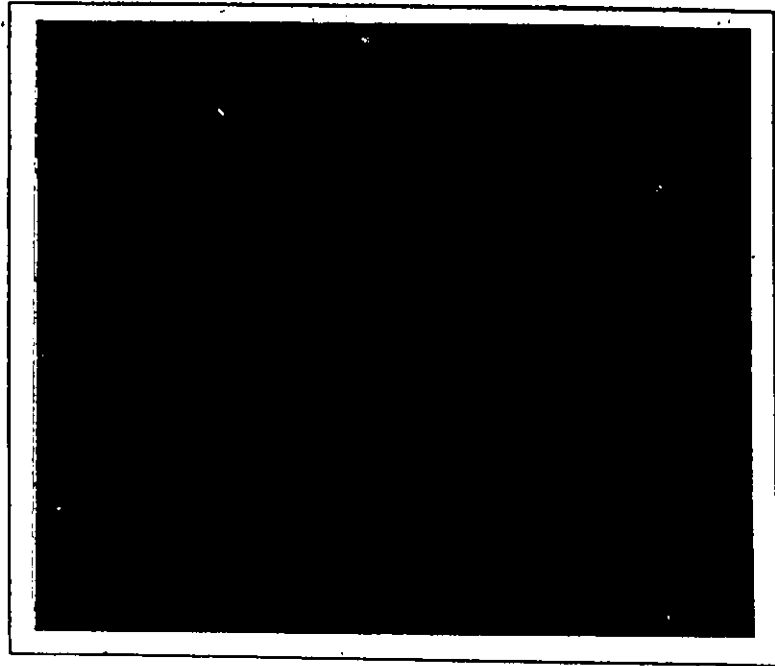


Figure 10 Classification de la carte B (1:287 000)

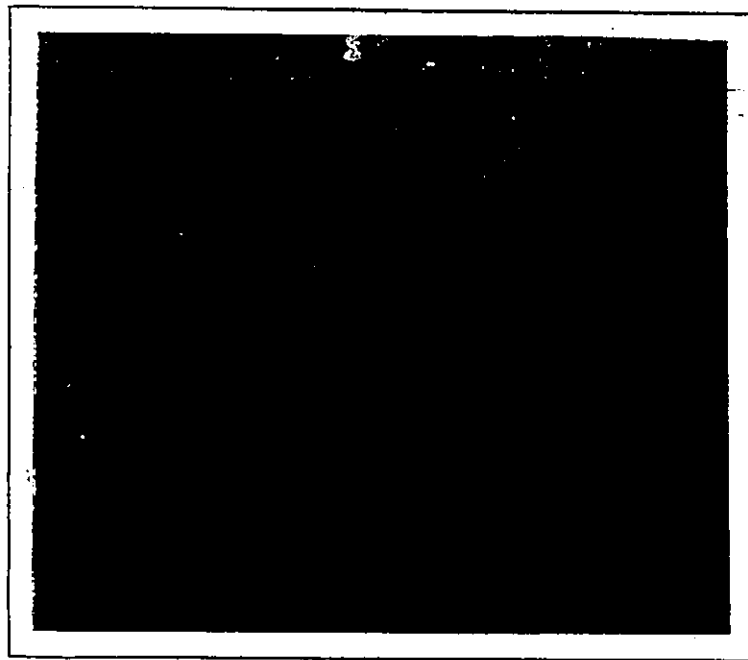


Figure 11 - Classification de la carte C (1:87 000)







Classe	Symbole	Description
Eau		Comprend les lacs, les ruisseaux et les surfaces inondées.
Tourbières		Tourbière moyennement épaisse et active. S'étend des zones submergées aux pentes douces des talus. Graminées et carex abondent alors que <u>Salix sp.</u> , <u>Betula glandulosa</u> et autres Chaméphytes subsistent sur les bosquets. Les extrémités submergées sont composées d' <u>Equisetum sp.</u> , <u>Potamogeton sp.</u> et <u>Sparganium sp.</u>
Saulaie		Classe très dense composée de trois à quatre espèces de <u>Salix</u> atteignant plus de 2 m. On retrouve <u>Betula glandulosa</u> , <u>Ledum decumbens</u> et <u>Potentilla fruticosa</u> dans les zones moins denses. Quelques éboulis rocheux colonisés par <u>Populus balsamifera</u> et <u>Populus tremuloïdes</u> sont bien isolés.
Saulaie à Picea		Classe dominée par <u>Salix</u> , mais moins dense que les saulaies. <u>Betula glandulosa</u> et <u>Potentilla fruticosa</u> sont remplacés par <u>Picea mariana</u> qui est parfois dominant. Le sol est couvert d'un mince tapis de tourbe humide.
Toundra à Chaméphytes		Végétation arbustive installée sur une matrice sablo-graveleuse couverte de plaques de mousse et de lichen. En plus de <u>Betula glandulosa</u> , <u>Salix sp.</u> et <u>Potentilla fruticosa</u> , on rencontre <u>Saxifraga sp.</u> , <u>Vaccinium vitis-idaea</u> et <u>Juniperus communis</u> .
Toundra Striée		Surface ondulée représentant un amalgame de deux types de végétation à Chaméphytes. Constituées d'une matrice sablo-graveleuse sèche, les crêtes soutiennent une végétation similaire à 'tC', alors que les dépressions humides possèdent une végétation du type 'TC'.

Tableau 7 - Description des classes de la carte B

Classe	Symbole	Description
Toundra Herbacée	th	Matrice sablo-graveleuse presque totalement recouverte de lichen. La végétation est entièrement herbacée. En plus des graminées et des composées, on retrouve les espèces caractéristiques: <u>Empetrum nigrum</u> , <u>Artemesia frigida</u> et <u>Dryas octopetala</u> .
Toundra à Chaméphytes Perturbée	tp	Toundra similaire à 'tc' mais perturbée par de nombreux éboulis rocheux. Les blocs sont couverts de lichen et de mousse où s'accrochent <u>Salix sp.</u> , <u>Dryas octopetala</u> , quelques graminées et fougères.

Tableau 7 - Description des classes de la carte B (suite)

Bien que huit classes soient identifiées, certaines sont très erronées. Particulièrement la Saulaie à Picea et la Toundra striée. Pour elles, la surclassification est tellement élevée, 94.4 et 91.0 % respectivement, qu'il est vraiment difficile de les associer à un type particulier de végétation. Cette association est basée strictement sur le fait que c'est à ces types que les courbes de réflectance spectrale (Figure 12) correspondent le mieux. Les six autres classes, soit l'Eau, les Tourbières, la Saulaie, la Toundra à Chaméphytes, la Toundra herbacée et la Toundra à Chaméphytes perturbée, ont une précision de classification très variée.

Le tableau 6 nous dit que la redondance de la carte B n'est que de 32 %. Dans ce cas-ci, ceci correspond assez bien à la précision moyenne de la carte, 38 %, et réaffirme que celle-ci ne partage que peu d'information avec la carte de base. Cela n'implique pas que la carte ne fournit aucune information au sujet des classes! C'est précisément cette négentropie elle-même, c'est à dire le peu de ressemblance entre ces deux cartes, qui fournit le plus d'information. En effet, c'est grâce à la mauvaise classification évidente de certaines classes qu'on procède graduellement à une meilleure classification dirigée.

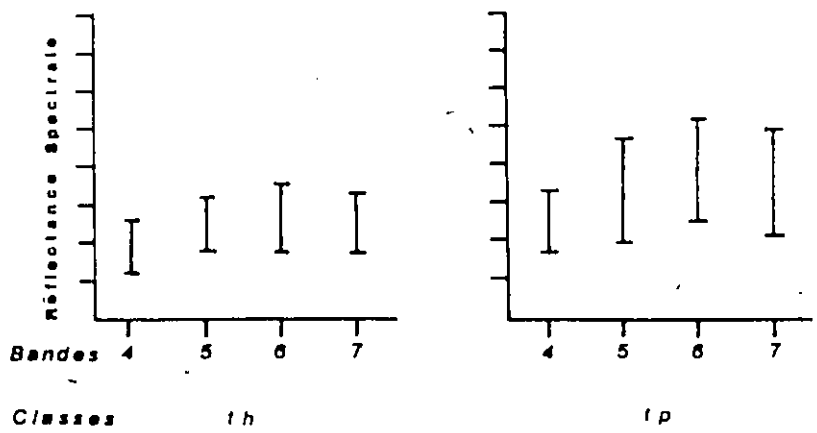
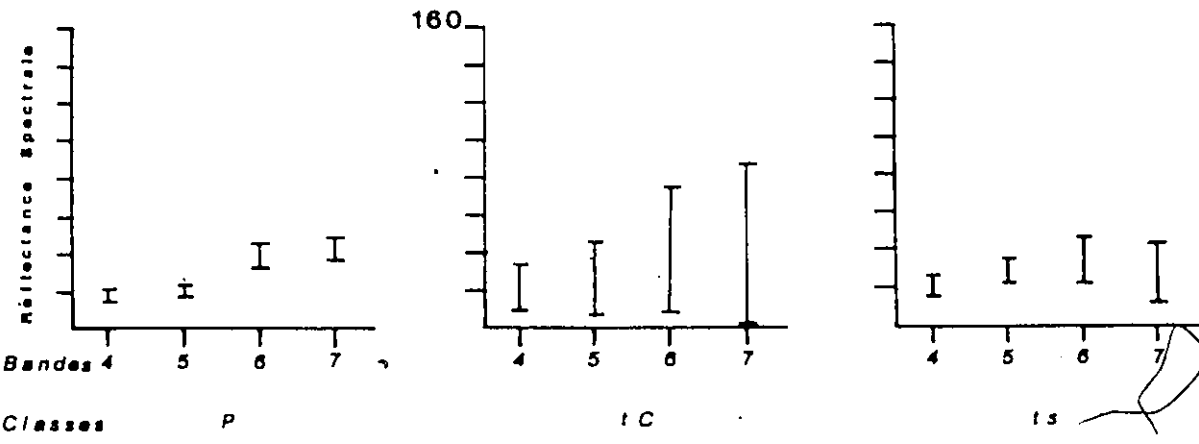
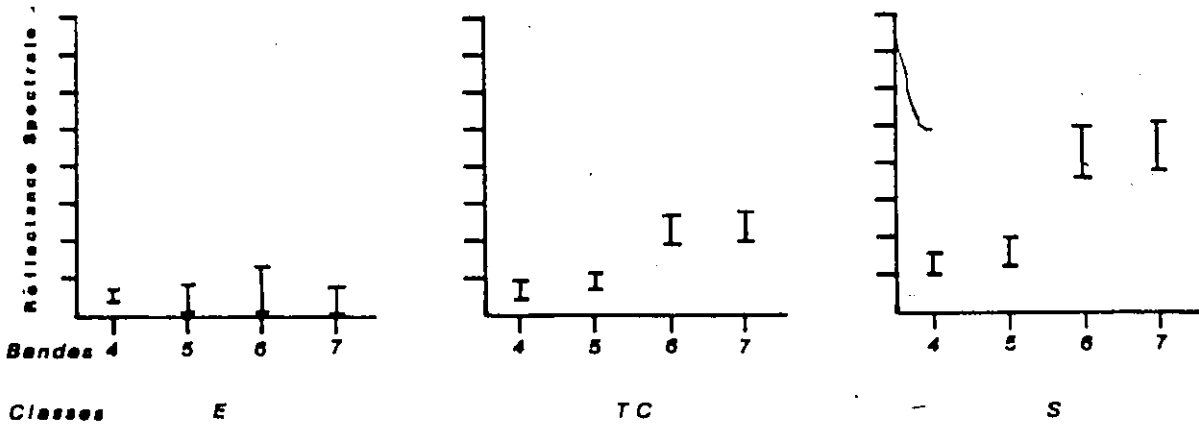


Figure 12 - Limites spectrales des classes de la carte B

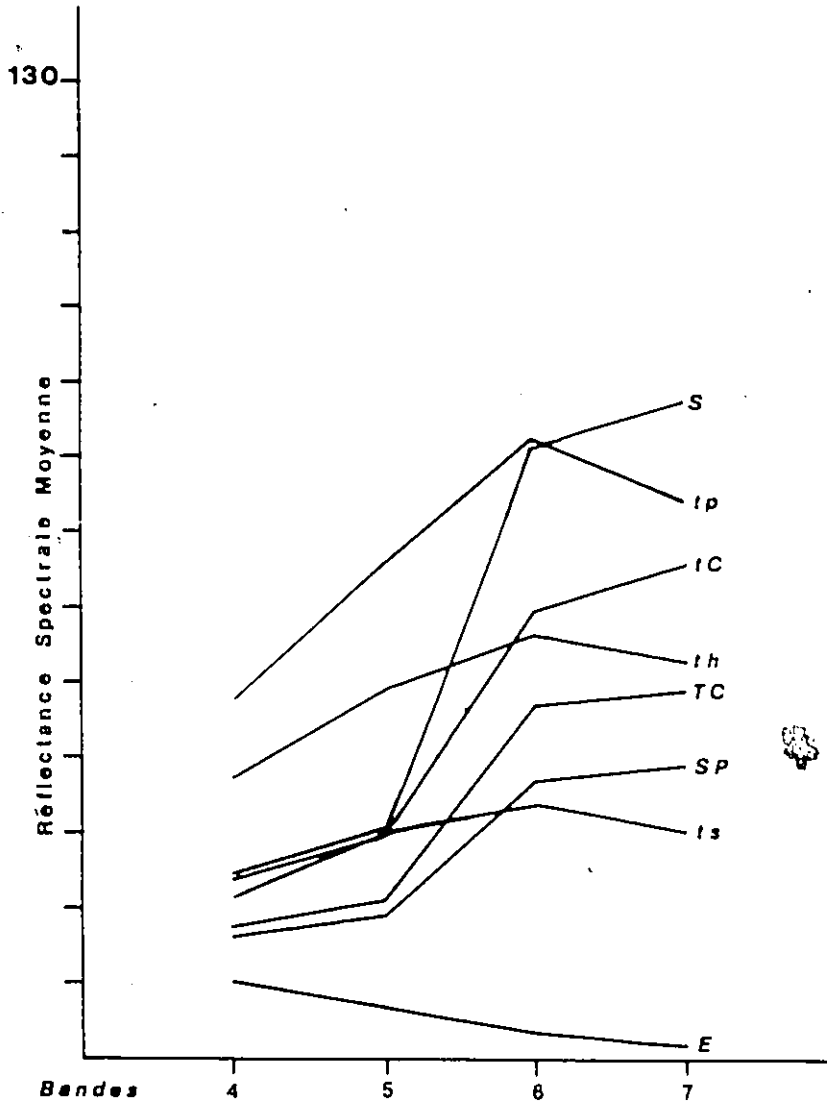


Figure 13- Courbes de réflectance spectrale des classes de la carte B

Examinons les caractéristiques spectrales de cette classification. La figure 12 est composée de huit graphiques indiquant les limites spectrales de chaque classe. Les courbes de la figure 13 représentent les valeurs moyennes de réflectance spectrale. Les problèmes de classification sont maintenant plus évidents.

Carte de base										
Classe	E	TB/TC	S	SP/P	ts	tC	th	tp/D	Total	%
E	12		3			7	8	34	64	71.2
T		48	40		16	53	32	28	217	77.9
S		3	16		10	28	9	49	115	91.0
P		2	23	7	2	16	4	14	68	90.0
ts		16	11	7	8	26	19	37	124	94.4
tC		8	24	2	15	68	26	44	187	63.6
th					3	15	28	6	52	46.2
tp							2	16	18	11.2
Total	12	77	117	16	54	214	128	221	847	
%	100	62.3	19.7	43.8	18.5	31.8	21.9	7.2		

Précision de classification

Tableau 8 - Table de contingence de la carte B

La figure 12 démontre bien la confusion spectrale entre les différentes classes. La Toundra à Chaméphytes par exemple, recouvre en partie ou totalement toutes les autres classes. Paradoxalement, la Saulaie à Picea est incluse en partie ou totalement dans toutes les classes. Parce qu'elle est trop vague, les classes de la Saulaie à Picea et de la Toundra striée sont considérées totalement inutiles. Examinons d'abord la Toundra à Chaméphytes. Lorsqu'on effectue une classification non-dirigée en précisant le nombre de classes désiré, il arrive souvent qu'une des classes soit constituée ni plus ni moins des résidus. C'est-à-dire de pixels n'appartenant à aucune classe en particulier, mais suffisamment similaires à la signature spectrale de celle-ci pour ne pas

être laissés non-classifiés. La dispersion spectrale de la Toundra à Chaméphytes présente les caractéristiques parfaites pour ce genre de classe. Ceci peut être réglé plus tard en précisant la signature spectrale de la classe.

Nous en sommes maintenant à cinq classes qui semblent avoir une signature spectrale relativement distincte. De celles-ci, seules l'Eau et les Tourbières sont assez bien classifiées. Il semblerait donc que leur signature spectrale soit très précise. Pour ce qui est de la Saulaie, la Toundra herbacée et la Toundra à Chaméphytes perturbée, la cause principale de leur manque de précision est certainement la pauvre définition de leur signature spectrale.

Les courbes de la figure 13 indiquent l'apparence des classes selon la bande spectrale. La courbe de l'Eau est typique. Une réflectance faible dans le visible se traduit par un aspect très opaque. Une réflectance encore plus faible dans l'infrarouge est normal puisque ces longueurs d'onde pénètrent faiblement dans l'eau où elles sont presque totalement absorbées. Les Tourbières très humides mais constituées de Chaméphytes partiellement jaunies sont plus claires.

La Toundra à Chaméphytes et la Saulaie sont les classes où les Chaméphytes sont le mieux représentés. Ils ont donc un aspect très similaire dans le visible, clair moyen dû aux feuilles jaunies. Dans l'infrarouge, la Toundra réfléchit beaucoup de radiation due à l'exposition du sol entre les arbustes et aussi au manque de chlorophylle dans ceux-ci. Pour sa part, la Saulaie très dense présente une surface très uniforme presque dépourvue de chlorophylle et réfléchit donc beaucoup de radiation. Les Toundras herbacée et à Chaméphytes perturbée sont évidemment les plus claires dans le visible. Pourtant, alors que la Toundra perturbée réfléchit beaucoup dans l'infrarouge, la Toundra herbacée réfléchit beaucoup moins. Comme expliqué précédemment, ceci est dû au couvert ras d'espèces vivaces absorbant une grande quantité de radiation.

Si on compare ces courbes aux courbes densitométriques de la figure 7, celles-ci sont remarquablement similaires. Les différences sont attribuables au fait qu'il s'agit de senseurs différents.

Cette étape n'a requis que deux sessions d'ordinateur, c'est-à-dire douze heures, pour la création des classifications et leur reproduction sur papier. Le calcul des statistiques et leur interprétation ont pris environ quarante heures. En tout, l'interprétation de l'image selon une technique non-dirigée, incluant le rehaussement d'image, nécessite à peu près cinquante heures.

La signature spectrale des classes et l'information totale tirée de la classification non-dirigée sont alors combinées aux signatures densitométriques, et à la carte de base et la carte A. Tout ceci dans le but de délimiter avec le plus de précision possible les cellules d'échantillonnage qui guideront l'ordinateur dans l'étape suivante, soit une classification dirigée. Les trois classifications sont comparées entre elle et seules les cellules correspondant à la même classe sur les trois cartes sont choisies. Ces cellules sont délimitées sur l'image satellite sur papier et une mesure densitométrique est effectuée comme vérification finale. Un minimum de dix cellules composées de trente pixels chacune est préférable. Là où ceci est impossible, il est important de s'assurer que les cellules soient parfaitement homogènes.

Neuf classes ont été échantillonnées. Les seules qui ont été délaissées sont: les Pessières et la Tourbière à Bryophytes qui apparaissent ni sur la carte A ou la carte B. Différentes classifications dirigées sont effectuées. D'une part en omettant certaines classes qui étaient très ambiguës selon la classification non-dirigée, la toundra striée et/ou la Saulaie à Picea, puis en appliquant différents indices de sensibilité. Il s'agit ici de l'écart maximal du centre qu'un pixel peut avoir pour faire partie d'une classe particulière. Comprise entre 0 et 50, cette valeur indique à l'ordinateur la sensibilité spectrale qui doit être respectée. Plus l'indice est bas, plus la classification est discriminante.

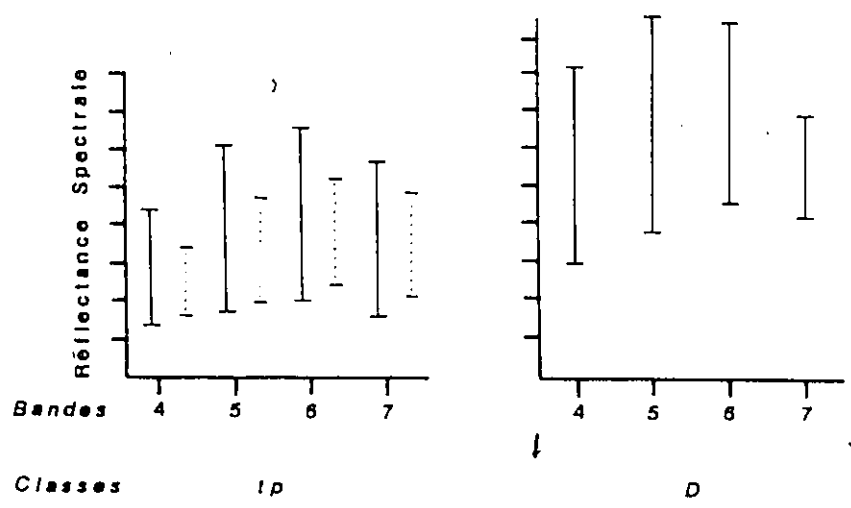
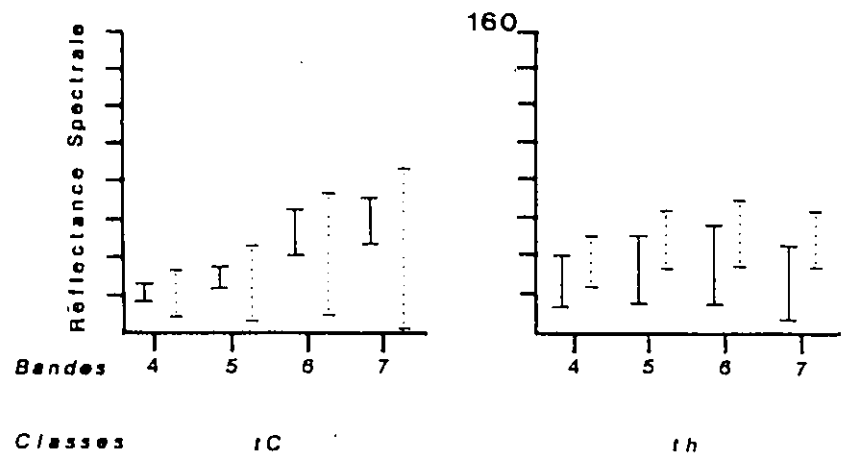
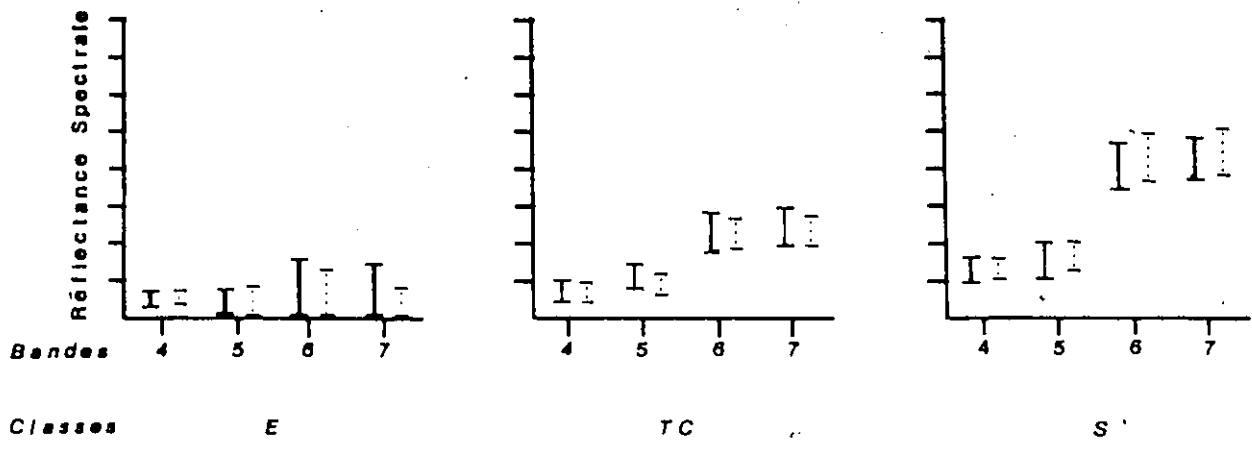
D'abord on doit entrer l'information des cellules d'échantillonnage sur l'ordinateur. Ensuite, le programme GSTAT (Generation of Statistics), nous donne les statistiques de ces cellules: Le rayonnement spectral moyen avec écart type, le nombre de pixels dans chaque classe et les matrices de covariance. L'ordinateur procède alors à la classification des pixels selon l'algorithme du parallélépipède. Finalement, un filtre est passé sur chaque classification.

De toutes les classifications obtenues, la quatrième, établie avec un indice de sensibilité de 8, est de loin la meilleure (Tableaux 9 et 10). La carte correspondante est la carte C (Figure 11). La présence de la Toundra striée et/ou de la Saulaie à Picea ne faisait qu'ajouter de la confusion au détriment des autres classes. Des indices de sensibilité plus élevées écartaient les limites spectrales et amenaient de la confusion entre les classes.

La précision moyenne est de 67 %, avec un minimum de 42 % pour la Saulaie et un maximum de 100 % pour l'Eau. Si on regarde le Tableau 5, on voit que la carte C a un moins grand écart de précision et de meilleures intervalles de confiance. De plus, la précision moyenne n'est pas significativement différente de la carte A, soit 67 % par rapport à 70 %.

La même observation est retrouvée avec la théorie de l'information (Tableau 6). En effet, la redondance de la carte C par rapport à la carte de base est de 40 %, relativement à 42 % pour la carte A. Les deux cartes contiennent donc à peu près autant d'information. Le fait que la carte C ait une classe de moins que la carte A est compensé par la précision améliorée de certaines classes. Voyons quelles améliorations ont été apportées par les cellules d'échantillonnage.

La figure 14 superpose les limites spectrales des classes des cartes B et C. Tel que prévu, les limites de l'Eau et des Tourbières sont identiques pour les deux cartes. Ces classes avaient donc effectivement une signature spectrale bien précise. Or la Saulaie a aussi des limites spectrales inchangées. On doit donc conclure que la faible précision de classification de cette classe sur la carte B n'était pas due à sa propre signature spectrale, mais bien aux signatures spectrales mal définies d'une ou plusieurs autres classes.



Carte C
 Carte B

Figure 14 - Limites spectrales des classes de la carte C

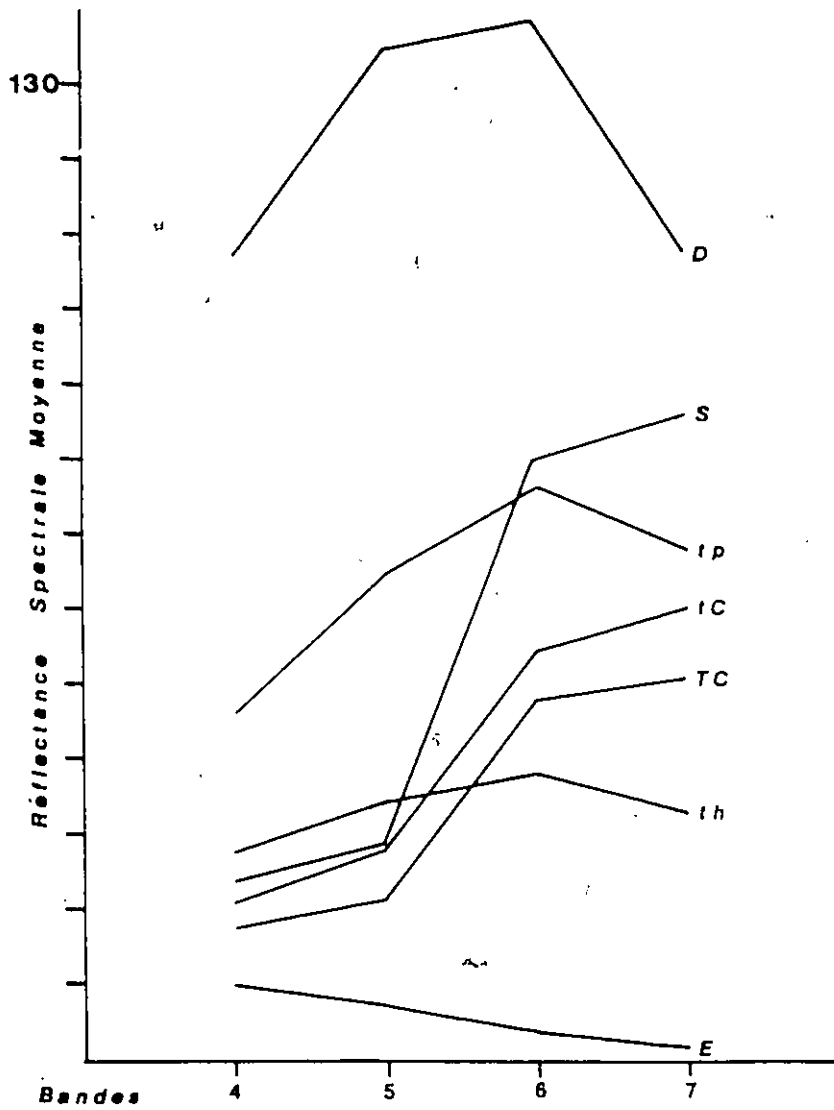


Figure 15 - Courbes de réflectance spectrale des classes de la carte C

Classe	Symbole	Description
Eau	E	Comprend les lacs, les ruisseaux et les surfaces inondées.
Tourbières	T	Tourbière moyennement épaisse et active. S'étend des zones submergées aux pentes adouces des talus. Graminées et carex abondent, alors que <u>Salix sp.</u> , <u>Betula glandulosa</u> et autres Chaméphytes subsistent sur les bosquets. Les extrémités submergées sont composées d' <u>Equisetum sp.</u> , <u>Sparganium sp.</u> et <u>Potamogeton sp.</u>
Saulaie	S	Classe générale caractérisée par <u>Salix</u> . Très dense où <u>Salix</u> domine, plus éparse où <u>Betula glandulosa</u> et <u>Potentilla fruticosa</u> abondent, et très ouverte où <u>Picea mariana</u> devient dominant. Quelques bosquets de <u>Populus balsamifera</u> et <u>Populus tremuloïdes</u> sont installés sur des éboulis rocheux.
Toundra à Chaméphytes	tc	Végétation arbustive installée sur une matrice sablo-graveleuse couverte de plaques de mousse et de lichen. A certains endroits, des dépressions humides ont un sol tourbeux où la végétation est arbustive. Sur la matrice sèche, on retrouve <u>Vaccinium vitis idea</u> , <u>Saxifraga sp.</u> , <u>Juniperus communis</u> et <u>Populus tremuloïdes</u> .
Toundra Herbacée	th	Matrice sablo-graveleuse presque totalement recouverte de lichen. La végétation est entièrement herbacée. En plus des graminées et des composées, on retrouve les espèces caractéristiques: <u>Empetrum nigrum</u> , <u>Artemisia frigida</u> et <u>Dryas octopetala</u> .
Toundra à Chaméphytes Perturbée	tp	Toundra similaire à 'tc' mais perturbée par de nombreux éboulis rocheux. Les blocs sont couverts de lichen et de mousse où s'accrochent <u>Salix sp.</u> , <u>Dryas octopetala</u> , quelques graminées et fougères.

Tableau 9 - Description des classes de la carte C

Classe	Symbole	Description
Surfaces Dénudées	D	Comprend les surfaces sans végétation tel les plages, les déflations éoliennes, les éboulements et glaciers rocheux, et les surfaces recouvertes de neige.

Tableau 9 - Description des classes de la carte C (suite)

Par ailleurs, les trois Toundras ont des limites spectrales bien différentes. Tel qu'espéré, les limites spectrales de la Toundra à Chaméphytes se sont beaucoup contractées. L'inverse se produit pour la Toundra à Chaméphytes perturbée. Pour ce qui est de la Toundra herbacée, celle-ci présente le plus grand changement. De sorte que presque 50 % des pixels inclus dans cette classe sur la carte B ne le sont pas sur la carte C. La septième classe constitue les surfaces dénudées. Celles-ci ont en effet une signature spectrale bien distincte qui réunit presque tous les pixels non-classifiés de la carte B.

En comparant les tables de contingences de ces deux cartes (Tableaux 8 et 10), il est possible de déterminer de façon générale l'effet de l'amélioration des signatures spectrales sur les pixels. Pour la classe de l'Eau, la précision de classification est identique, mais la surclassification est diminuée de moitié. On note aussi que moins de points correspondent à la Toundra perturbée. On a donc réussi à éliminer beaucoup d'ombre et à préciser le contour des lacs.

La Tourbière à Chaméphytes diminue de surface et gagne en précision. Il y a donc beaucoup moins de surclassification, et une grande part des pixels préalablement assignés aux Pessières y sont correctement ajoutés. La Saulaie demeure à peu près inchangée en surface mais double de précision. L'amélioration semble due aux pixels provenant en partie des Pessières et de la Toundra à Chaméphytes.

Chacune des trois toundras augmente beaucoup en surface tout en améliorant la précision de classification. Dans le cas de la Toundra perturbée, le changement est drastique. La surface

augmente de huit fois alors que la précision est améliorée de 45 %. Ceci est dû partiellement à l'élimination d'une partie de l'ombre et à l'addition de pixels antérieurement non-classifiés. Les Toundra à Chaméphytes et herbacée doivent leur amélioration aux pixels provenant essentiellement de la Toundra striée.

Carte de base

Classe	E	TB/TC	S/SP/P	ts/tC	th	tp	D	Total	%
E	12				1	25	1	39	68.2
T		70	39	11		12		132	47.0
S			56	6	4	9		75	26.4
tC		3	23	168	22	15		231	27.3
th		2	10	50	81	42	2	187	56.6
tp		1	5	32	20	117	1	176	43.5
D		1		1		1	4	7	42.9
Total	12	77	133	268	128	221	8	847	
%	100	90.9	42.1	62.6	63.3	52.9	50.0		

Précision de classification

Tableau 10 - Table de contingence de la carte C

La figure 15 démontre que les courbes de réflectance spectrale de la carte C ont les mêmes caractéristiques que celles de la carte B. La seule différence significative est la quantité moyenne de radiation réfléchiée par la Toundra herbacée. Ceci correspond au changement important des limites spectrales.

Cette étape a également nécessité deux sessions d'ordinateur. En plus de ces douze heures, environ huit heures ont été nécessaires pour choisir et délimiter les cellules d'échantillonnage, et plus de trente heures pour le calcul des statistiques et leur interprétation. L'interprétation de

l'image satellite selon une technique de classification dirigée a donc requis environ cinquante heures, soit sensiblement le même temps que la classification non-dirigée.

La prochaine session est consacrée au traitement de l'image radar de Seasat 1. Obtenue sous forme visuelle sur un ruban positif, l'image doit d'abord être transformée sous forme numérique et transposée sur un ruban magnétique. Ceci est accompli au C.C.T. par un technicien en cartographie automatisée.

Cette image radar est utilisée afin de vérifier si l'information qu'elle détient sur la bande L (Figure 4-a) peut ajouter à la précision de l'image Landsat. Il faut premièrement éliminer une des bandes de données de l'image Landsat, puisque le Image 100 ne peut traiter que quatre canaux à la fois. Suite à l'étude de diverses combinaisons de bandes, la combinaison des bandes 4, 5 et 7 est jugée la meilleure tant du côté qualitatif que quantitatif. De plus, il est noté que la bande 5 offre le plus d'information lorsque considérée individuellement. Il s'agit maintenant de joindre les deux images.

Ceci s'effectue en deux étapes avec le programme REGIU (Registration and Overlay). L'image est d'abord corrigée géométriquement pour correspondre avec l'image Landsat, puis elle y est superposée. Il est donc nécessaire d'établir des points précis de localisation. Or, l'image radar est de très pauvre qualité et une session entière est nécessaire pour la correction géométrique. L'image finale est floue, dû à l'aspect enneigé de la bande L et à la correction géométrique imprécise. Une autre session est donc réservée pour l'interprétation de cette nouvelle image. Mais il est tout de suite évident qu'aucune amélioration ne peut être espérée. Une classification dirigée utilisant comme directives les mêmes cellules d'échantillonnage, s'avère visiblement beaucoup moins précise que celle effectuée sur l'image Landsat seule. Cette étape est donc malheureusement abandonnée.

La dernière opération a été de justifier l'emploi de la grille d'échantillonnage utilisée pour le calcul des statistiques. Cette vérification est possible grâce aux statistiques fournies par les programmes de classification de l'ordinateur. En effet, chaque classification est accompagnée d'une

fiche indiquant, en plus des caractéristiques spectrales des classes, le pourcentage de surface de chaque classe. En convertissant ces pourcentages en fréquences absolues, on peut les comparer aux fréquences de la grille et ainsi effectuer un test de Chi carré afin de déterminer si la différence est due au hasard ou à la grille qui est inadéquate.

Classe	Classification non-dirigée		Classification dirigée	
	Fréquence de la grille	Fréquence de l'ordinateur	Fréquence de la grille	Fréquence de l'ordinateur
E	64	56	39	42
TB/TC	217	222	132	141
S	115	131		
S/P/SP			75	55
P/SP	68	84		
ts	124	133		
ts/tC			231	243
tC	187	166		
th	52	42	187	195
tp			176	160
tp/D	18	13		
D			7	11
Total	847	847	847	847

Tableau 11 - Comparaison des fréquences absolues de chaque classe, calculées à partir de la grille d'échantillonnage et calculées par l'ordinateur.

Posons l'hypothèse statistique suivante: H_0 : La différence de surface entre la grille et la réalité (surface calculée par l'ordinateur) est strictement due au hasard.

En effectuant un test de Chi carré, on obtient les valeurs suivantes. Pour la classification non-dirigée, $Q(7) = 13.83$ par rapport à la valeur de rejet de 14.07 pour 7 niveaux de confiance avec une valeur de alpha (α) établie à 0.05. La classification dirigée donne: $Q(6) = 12.04$ vis-à-vis la valeur de rejet de 12.59 pour 6 niveaux de confiance avec α établie à 0.05.

L'hypothèse statistique H_0 n'est donc pas rejetée et on peut conclure que la grille d'échantillonnage est adéquate.

4.3 - Comparaison des techniques - Discussion

En tout, huit techniques ont été analysées. Quatre d'entre elles sont des techniques d'interprétation: la photointerprétation aérienne, l'interprétation visuelle de l'image Landsat et l'interprétation automatisée de cette dernière selon des techniques non-dirigée et dirigée. Les autres sont des techniques de traitement de données: l'analyse densitométrique, la délimitation des cellules d'échantillonnage, la correction géométrique de l'image Seasat et les techniques utilisées pour la vérification de précision. Le tableau 12 compare les techniques selon le temps requis, le coût moyen et le contenu d'information qu'elles apportent.

Parmi les techniques d'interprétation, la photointerprétation aérienne est de loin la plus précise. En effet, une bonne couverture récente de photos aériennes appuyée d'un minimum de données de terrain est fréquemment utilisée comme vérité de terrain. Là où les photos existent déjà, le coût est insignifiant. Le coût devient exorbitant s'il faut faire effectuer des lignes de vol. D'une façon ou de l'autre, le temps requis pour leur analyse est considérable. Ici, plus de 180 heures ont été nécessaires pour interpréter et cartographier quinze photos.

L'interprétation visuelle de l'image Landsat n'est supérieure à la classification dirigée que par une faible marge. L'interprétation a permis l'identification de huit des onze classes avec une précision moyenne de 70 %. De plus, cette technique ne coûte que \$120 (coût de la reproduction sur papier de l'image satellite), et ne requiert que 32 heures, incluant l'analyse densitométrique.

La classification dirigée identifie sept des onze classes avec une précision moyenne de 67 %. Par contre, le temps requis est presque doublé et le coût est décuplé.

Technique	Temps requis (Hrs)	Coût moyen (\$)	Contenu en Information
Interprétation des photos aérienne	280	70	Excellent
Densitométrie	12	—	Excellent
Interprétation de l'image Landsat	20	120*	Bon
Classification non-dirigée	50	1000*	Léger
Cellules d'échantillonnage	8	—	Très bon
Classification dirigée	50	1000*	Bon
Image Seasat	6	700	Nul
Théorie de l'information	1	—	Très bon

* N'inclut pas le coût du ruban magnétique de l'image Landsat (\$300)

Tableau 12 - Statistiques qualitatives des techniques

La classification non-dirigée ne donne pas de bons résultats. Bien qu'elle soit à peu près identique en coût et temps à la classification dirigée, elle n'identifie que huit classes très vagues. Or, cette technique est très utile car, effectuée avant une classification dirigée, elle fournit un aperçu des caractéristiques spectrales des classes identifiables et aide à préciser les cellules d'échantillonnage.

L'analyse densitométrique de l'image Landsat est absolument indispensable, non seulement pour la classification automatisée mais aussi pour l'interprétation visuelle. Les courbes

densitométriques des classes sont remarquablement similaires aux courbes de rayonnement spectral des classes de l'interprétation automatisée. Un moyen de vérifier cette similitude est de calculer le coefficient de corrélation entre ces deux types de données avec l'aide de la formule:

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{N (S_x S_y)}$$

où; R est le coefficient de corrélation

x_i est la mesure densitométrique de la classe i

y_i est la valeur de rayonnement spectral de la classe i

\bar{X} est la valeur densitométrique moyenne

\bar{Y} est la valeur moyenne de rayonnement spectral

N est le nombre d'observations

S_x est l'écart type des mesures densitométriques

S_y est l'écart type des valeurs de rayonnement spectral

Afin de tester la signification de ces coefficients de corrélation, on utilise le test t de Student avec N-2 degré de liberté selon

$$t = \frac{\sqrt{N-2}R}{\sqrt{1-R^2}}$$

Les mesures densitométriques représentent l'événement X, les mesures de rayonnement spectral

de la classification non-dirigée représentent l'événement Y1 et celles de la classification dirigée, l'événement Y2. Nous obtenons donc deux séries de quatre coefficients de corrélation entre les filtres densitométriques bleu, vert, gris et rouge et les bandes spectrales 4, 5, 6 et 7 (Tableau 13).

Filtre/Bande	Classification non-dirigée		Classification dirigée	
	R	t	R	t
Bleu/ 4	-0.82	4.41	-0.84	4.25
Vert/ 5	-0.82	4.41	-0.83	4.44
Gris/ 6	-0.80	4.21	-0.86	4.50
Rouge/ 7	-0.77	3.98	-0.87	4.65

Tableau 13 - Coefficients de corrélation avec test de signification

Les coefficients sont tous compris entre -0.77 et -0.87. La valeur moyenne est de -0.83 et indique une forte corrélation entre les deux types de données. Pour les coefficients entre la densitométrie et la classification non-dirigée, les valeurs de t au niveau de confiance 0.01 sont largement supérieures à la valeur critique de 3.14. Les valeurs de t à 0.01 pour les coefficients entre la densitométrie et la classification dirigée sont également plus élevées que la valeur critique de 3.37. On est donc certain à 99 % qu'il existe bel et bien une corrélation très forte entre les deux types de mesures. L'analyse densitométrique nous procure donc une bonne représentation des classes sans même effectuer une analyse automatisée.

Bien que la méthode utilisée ne soit pas acceptée présentement à cause des nombreuses limitations qu'elle possède, les résultats sont excellants. De plus, à en juger par la corrélation élevée entre les mesures densitométriques et les mesures spectrales, la méthode mérite beaucoup plus d'attention, spécialement dans les cas où l'accès à une classification automatisée est limitée. Ceci est une situation assez fréquente dans les pays sous-développés et dans les régions isolées du globe. Notons encore qu'il est toujours préférable, si possible, d'effectuer les analyses sur un transparent qui n'a subi aucune modification.

Appuyé sur l'analyse densitométrique et la classification non-dirigée, la délimitation des cellules d'échantillonnage atteint une précision plus que satisfaisante. Cette étape est critique pour la classification dirigée et d'elle en dépend la réussite.

La correction géométrique de l'image Seasat est une technique assez longue dont la précision repose entièrement sur les points directeurs. L'image Seasat elle-même étant de pauvre qualité, et les points directeurs étant difficiles à localiser avec précision, la correction géométrique était vouée à l'échec dès le début. Il est à conseiller, avant d'envisager une telle opération, de s'assurer de la qualité de l'image et de la précision des points directeurs.

Un test de Chi carré effectué sur la grille d'échantillonnage démontre que celle-ci est parfaitement adéquate pour le calcul des statistiques. De plus, puisqu'elle manipule les données de façon totalement uniforme, l'utilisation de la théorie de l'information représente de façon excellente la coïncidence entre chaque classification. Ainsi, au lieu d'exprimer la classification selon différentes valeurs représentant la précision, la surclassification et le nombre de classes identifiées, nous obtenons une seule valeur englobant chacun de ces critères. Or ceci ne représente qu'un faible aperçu de la multitude de possibilités qu'offre la théorie de l'information des systèmes. Roberge (1982) a démontré la viabilité de la théorie pour l'analyse statistique d'inventaires effectués par analyse aérienne. Non seulement aide-t-elle à déterminer la meilleure classification, mais elle peut aussi déterminer le nombre de types d'inventaires possible par analyse aérienne et même mieux identifier les classes.

Il serait aussi très intéressant d'appliquer cette théorie à la manipulation à priori des valeurs spectrales ou densitométriques. Ce genre d'opération fut l'objet de plusieurs recherches récentes dont: Qui et Goldberg, Juillet 1985; Green, Mai 1986; Talbot et Markon, Juin 1986 et Everitt et Nixon, Août 1986. Chacun utilise différentes techniques afin de modifier les valeurs spectrales originales des pixels pour faciliter la classification.

CONCLUSIONS

Cette étude a prouvé qu'en utilisant des techniques d'interprétation d'images satellite, il est possible de produire des cartes d'inventaire générales mais suffisamment précises pour servir de guides pour divers projets. Prenant en considération les observations effectuées au cours de cette étude, la méthodologie suivante, composée d'au plus quatre étapes est proposée.

La première étape consiste à étudier quelques photos aériennes dans le but d'identifier différentes zones d'intérêt. Lorsque toutes les zones d'intérêt sont délimitées sur les photos aériennes, elles sont reportées sur l'image satellite. La seconde étape consiste à effectuer une analyse densitométrique de ces différentes zones, ou classes. L'importance de cette étape ne peut être exagérée! En effet, même si la méthode est encore controversée, on a démontré que ces signatures densitométriques ont une forte corrélation avec les signatures spectrales des classes de la classification automatisée. De sorte que dans plusieurs cas, particulièrement si l'accès à une classification automatisée est impossible, l'interprétation visuelle d'une image satellite, assistée d'une analyse densitométrique, peut atteindre une précision aussi grande que celle obtenue avec une classification automatisée.

La troisième étape consiste à classifier le secteur d'étude selon les classes définies par une signature densitométrique spécifique. Si toutefois la classification n'est pas satisfaisante, nous procédons alors à une quatrième étape, soit une classification dirigée.

La réussite de cette classification dépend totalement de la précision des cellules d'échantillonnage, qui est beaucoup améliorée lorsqu'appuyée sur une analyse densitométrique. Suite à la délimitation des cellules d'échantillonnage, il ne reste qu'à effectuer une classification dirigée.

Cette thèse a également démontré la versatilité de la théorie de l'information, spécialement pour exprimer la coïncidence entre deux séries d'information. Il est à souhaiter qu'elle soit à

l'avenir plus utilisée.

Les principaux problèmes rencontrés dans cette étude sont la résolution limitée et la mauvaise définition spectrale des bandes des images de Landsat, la forte réflexion par le sol nu, la quantité d'ombre présente sur l'image et les changements abrupts d'altitude. Or la majorité de ceux-ci sont facilement éliminés. Actuellement (à la rédaction de cette thèse), les trois satellites en opération ont des senseurs améliorés permettant une résolution de surface beaucoup plus précise et des bandes spectrales mieux définies. De plus, puisque ces satellites enregistrent l'image des mêmes points à des dates différentes, nous sommes presque assuré d'obtenir une bonne image pour toute période de l'année. Nous estimons qu'avec une image multibande de Landsat 2 captée dans le mois de juin, les classifications auraient certainement eu une précision excédant 80 %. Une telle image était disponible sur transparence. Malheureusement le ruban magnétique fut endommagé à la station de Prince Albert. L'image utilisée dans cette thèse était la meilleure image disponible.

Depuis quelques années, de nombreuses études se poursuivent sur l'élimination des problèmes causés par l'ombre et la réflexion du sol. Les recherches sont orientées vers la transformation des valeurs spectrales des pixels en des mesures plus significatives. De plus amples recherches sont également effectuées avec l'infrarouge thermique et les micro-ondes. Avec des satellites très sensibles et la rapidité phénoménale des améliorations techniques de traitement des données, la cartographie à grande échelle à partir d'images satellites est sur le point de devenir réalité.

BIBLIOGRAPHIE

Ahern, F.J.

1983: New Landsat MSS Enhancements. Remote Sensing News Briefs;
C.C.R.S., Ottawa, 15 p.

Anderson, J.H.

1976: On Vegetation Mapping in Alaska using Landsat Imagery; for
Nasa under contract titled Identification, Definition and
Mapping of Terrestrial Ecosystems in Interior Alaska,
133 p.

Blom, R. et Daily, M.

1981: Radar Image Processing for Rock Type Discrimination; Ins-
titute of Geoscience and Remote Sensing symposium, vol. 1,
Washington D.C., pp. 574-581.

Campbell, J.B. et Henderson, F.M.

1981: Comparaisons of Land Cover Classifications from Selected
Remote Sensing Systems; Proceedings 47 th Annual Society
of Photogrammetry Meeting, Washington D.C., pp. 618-626.

Campbell, J.G.

1981: Use of Landsat Data for Ecological Mapping; Proceedings
9 th conference on Matching Remote Sensing Technologies
and their Applications, London, England, pp. 143-161.

Charron, L. et Le Sauter, D.

1975: Applications of Landsat 1 Data in a Biophysical Land Classification and a Geomorphological Study - Auyiuttuz National Park, Baffin Island; Canadian Department of Indian Affairs and Northern Development, Ottawa, 22 p.

Daus, S.J.

1975: Utilisation of automated data analysis techniques for Landsat - based range evaluations; R. N. Colwell ed., BLM Final Report No. 52500-CT4-208(N).

Driscoll, R.S., Betters, D.R. et Parker, H.D.

1978: Land Classifications through Remote Sensing - Techniques and Tools; Journal of Forestry, vol. 76, no. 10, Fort Collins, Co, pp. 656-661.

Everitt, J.H. et Nixon, P.R.

1986: Canopy Reflectance of two Drought-Stressed Shrubs; Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 52, no. 8, pp. 1189-1192.

George, T.H., Stringer, W.J. et Baldrige, J.N.

1977: Reindeer Range Inventory in Western Alaska from Computer Aided Digital Classification of Landsat Data; Proceedings 11 th International Symposium on Remote Sensing of the Environment, vol. 1, Ann Arbor, Mich., pp. 671-681.

Green, G.M.

1986: Use of SIR-A and Landsat MSS Data in Mapping Shrub and Intershrub Vegetation at Koonamore, South Australia; Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 52, no. 5, pp. 659-670.

Harvie, F.M., Cihlar, J. et Goodfellow, C.

1982: Surface Cover Mapping in the Arctic through Satellite Remote Sensing; User's Manual 82-1, C.C.R.S., Ottawa, Ont., 64 p.

Heller, R.C., Driscoll, R.S. et Frances R.E.

1975: Evaluation of ERTS-1 data for forest and rangeland surveys; PSW Forest and Range Experimental Station, Publ. no. 112, pp. 26-43.

Hoffer, R.M.

1975: Natural Resource Mapping in Mountainous Terrain by Computer Analysis of ERTS-1 Satellite Data; Univ. of Purdue, LARS Research Bull. 919, 124 p.

Hogg, R.B. et Tanis, E.A.

1977: Probability and Statistical Inference; Mac Millan Publishing Co., Inc., New York, Chap 6.

Joyce, A.T.

1978: Procedures for Gathering Ground Truth Information for a Supervised Approach to a Computer Implemented Land Cover Classification of Landsat-Acquired Multispectral Scanner Data; NASA Reference Publication no. 1015, Houston, 44 p.

Johnston, I.L. et Howarth, P.J.

1980: Digital Enhancements for Vegetation Mapping in a Subarctic Environment; 6 th Canadian Symposium on Remote Sensing, Halifax, N.S., pp. 405-412.

Kalenski, Z.D. et al.

1981: Summary Forest Ressource Data from Landsat Images: Final Report of a Pilot Study for Northern Saskatchewan, Chalk River, Ont., 35 p.

Koslqvic, N.J. et Howarth, P.J.

1977: Biophysical Mapping in Northwestern Ontario from Aircraft and Satellite Remote Sensing Data; 4 th Canadian symposium on Remote Sensing, Quebec, Qc., pp. 27-33.

Lillesand, T.M. et Kiefer, R.W.

1979: Remote Sensing and Image Interpretation; John Wiley and sons, New York, NY, Chaps 6, 9 et 10.

Lowry, R.T., Shlien, S. et Goodenough, D.G.

1978: A C.C.R.S. System for Synthetic Aperture Radar Imagery Analysis; 5 th Canadian Symposium for Remote Sensing, Victoria, B.C., 38 p.

Lyon, J.G. et George, T.L.

1979: Vegetation Mapping in the Gates of the Arctic National Park; 45 th Annual Meeting Of the American Society of Photogrammetry, Washington DC, pp. 483-497.

Mc Graw, J.F.

1980: Landsat Computer-Aided Analysis Techniques for Range Vegetation Mapping; Thesis submitted for the Degree of Master of Science, University of Nevada, Reno, 56 p.

Mc Quillan, A.K.

1975: Benefits from Remote Sensing in Canadian Northern Resource Development; Research Report no. 75-6AX, C.C.R.S., Ottawa, Ont., 79 p.

Muller, J.E.

1967: Kluane Lake Map-Area, Yukon Territory; Geological Survey of Canada, Ottawa, Ont., Memoir no. 340, Chap. 1 et 3.

Paine, S.H.

1984: Using Landsat Imagery for Position-Based Surface Cover Mapping in the Rocky Mountains; Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 10, no. 2, pp. 190-200.

Phipps, M.

1979: Information Theory and Spatial-Ecological Analysis: The "Pegase" Procedure; Note de Recherche no. 23 du Département de Géographie de l'Université d'Ottawa, Ont., 45 p.

Quiel, F.

1982: Photointerpretation, Unsupervised or Supervised Classification? Symposium of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Commission 8, vol. 1, 7 p.

Qui, Z. C. et Goldberg, M.

1985: A new classification Scheme Based Upon Segmentation for Remote Sensing; Canadian Journal Of Remote Sensing, vol. 11, no. 1, pp. 59-69.

Rampton, V.N.

1981: Surficial Materials and Landforms of Kluane National Park, Yukon Territory; Commission Géologique du Canada, Ottawa, Ont., pp. 6-10.

Rencz, A.N. et Shilts, W.W.

1982: Surficial Geology Mapping from Landsat, Kaminak Lake, N.W.T.; Proceedings of the 7 th Canadian Symposium on Remote Sensing, Winnipeg, Man., pp. 358-363.

Roberge, J

1982: Un usage de la Théorie de l'information pour l'analyse aérienne; avec étude de cas: L'inventaire biophysique du territoire. Thèse soumise pour le degré de Maîtrise, Département de Géographie, Université d'Ottawa, 166 p.

Rubec, C.D.A.

1982: Overview of Workshorp on Applications of Remote Sensing in Ecological Land Survey in Canada; Lands Directorate, Environment Canada, Hull, Qc., 11 p.

Rubec, C.D.A. et Thie, J.

1978: Land Use Monitoring with Landsat Digital Data in Southwestern Manitoba; 5 th Canadian Symposium on Remote Sensing, Victoria, B.C., pp 136-150.

Rubec, C.D.A. et Wickware, G.M.

1978: Automated Land Classification in the Boreal Zone Using
Landsat Digital Data; 5 th Canadian Symposium on Remote
Sensing, Victoria, B.C., pp. 127-136.

Russel, D. et Boyd, C.

1977: Summer 1977, Reports-Habitat Section, Internal Unpublished
Report, Yukon Game Branch, pp. 22-25.

Talbot, S.S. et Markon, C.J.

1986: Vegetation Mapping of Nowitna National Wildlife Refuge,
Alaska Using Landsat MSS Digital Data; Photogrammetric En-
gineering and Remote Sensing, vol. 52, no. 6, pp. 791-800.

Tarnocai, C. et Kristof, S.J.

1976: Computer-Aided Classification of Land and Water Bodies
Using Landsat data, MacKenzie Delta Area, N.W.T.; Alpine
and Arctic Research, vol. 8, no. 2, pp. 151-159.

Thie, J.

1974: Remote Sensing for Northern Inventories and Environmental
Monitoring; Prepared for the National Workshop to Develop
an Intergrated Approach to Northern Baseline Data Invento-
ries, Toronto, Ont., 7 p.

1976: An Evaluation of Remote Sensing Techniques for Ecological
Land Classification in Northern Canada; 1 st Meeting of
the Canadian Committee on Ecological Land Classification,
Petawawa, Ont., pp. 129-147.

Todd, W.W., Gehring, D.G. et Haman, J.F.

1980: Landsat Wildland Mapping Accuracy; Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 46, no. 4, pp. 509-520.

Townshend, J.R.G. et Justice, C.O.

1978: Unsupervised Classification of MSS Landsat Data for Mapping Spatially Complex Vegetation; International Journal of Remote Sensing, vol. 1, no. 2, pp. 105-120.

1980: The Potential of Landsat 3 RBV Images for Thematic Mapping; 3^e Colloque International pour le Traitement et l'Exploitation Cartographique des Images Spatiales, 1979, Toulouse, Fr., pp. 139-144.

U.S. Geological Survey

1982: Remote Sensing and Advanced Techniques; USGS Professional paper no. 1075, 1981, Reston, Va., pp. 251-164.

Wickware, G.M., Sims, R.A., Ross, R.K. et Cowell, D.W.

1980: The Applications of Remote Sensing Techniques for an Ecological Land Survey of the Snow Goose Colony at Cape Henrietta Maria, Hudson Bay; 6th Canadian Symposium on Remote Sensing, Halifax, N.S., pp. 387-395.

Wiken, E.B., Pierce, T.W. et Ironside, G.R.

1980: Multistage Remote Sensing in Explanatory Ecodistrict Land Classification; 6th Canadian Symposium on Remote Sensing, Halifax, N.S., pp. 63-71.

Wiken, E.B., Welch, D.M., Ironside, G.R. et Taylor, D.G.

1979: Ecological Land Survey of the Northern Yukon; 2nd Canadian Committee on Ecological Land Classification, Victoria, B.C., pp. 361-372.

Yeates, M.

1974: An Introduction to Quantitative Analysis in Human Geography, Mc Graw-Hill Inc, Toronto, Ont., Chap. 3 et 4.

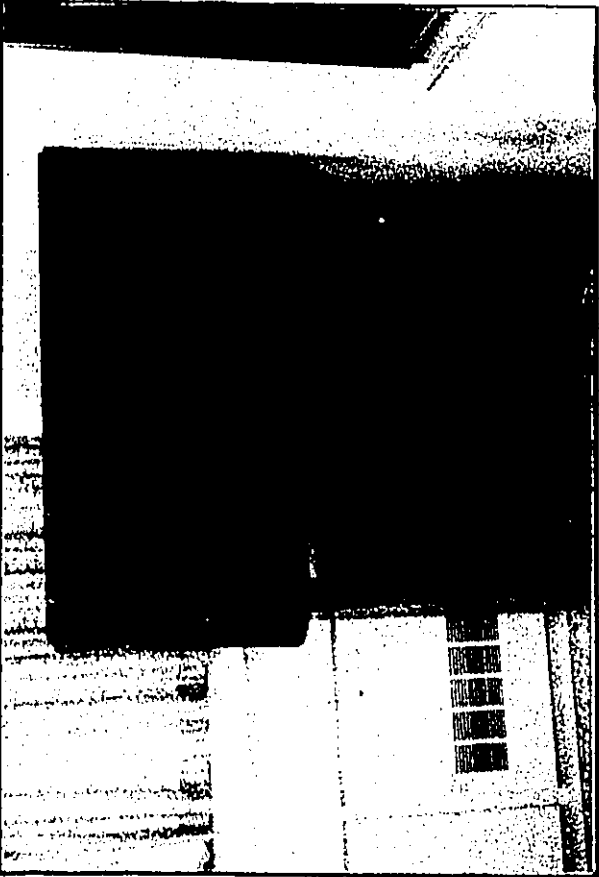
UNIVERSITY OF TORONTO LIBRARY
UNIVERSITY OF TORONTO LIBRARY



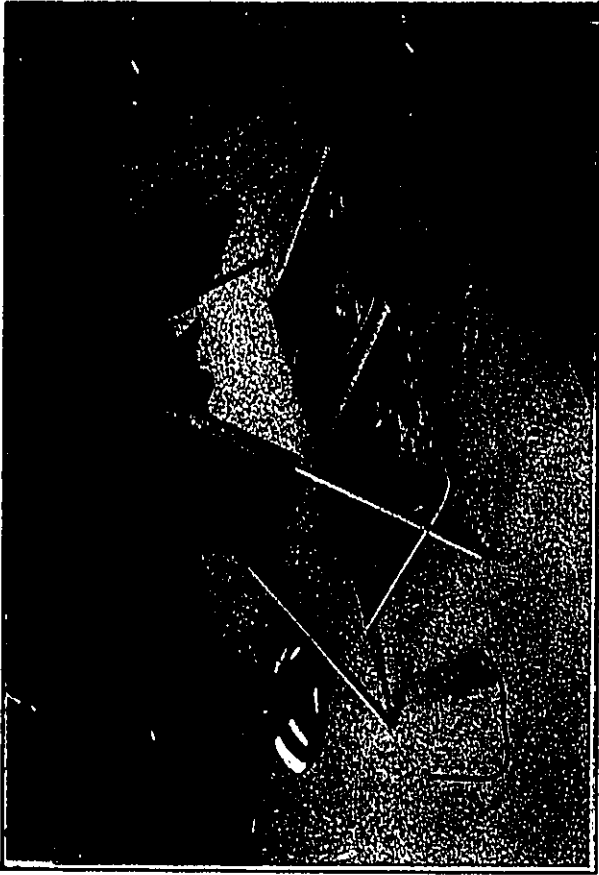
Annexe 1 - Image Landsat - Scène totale



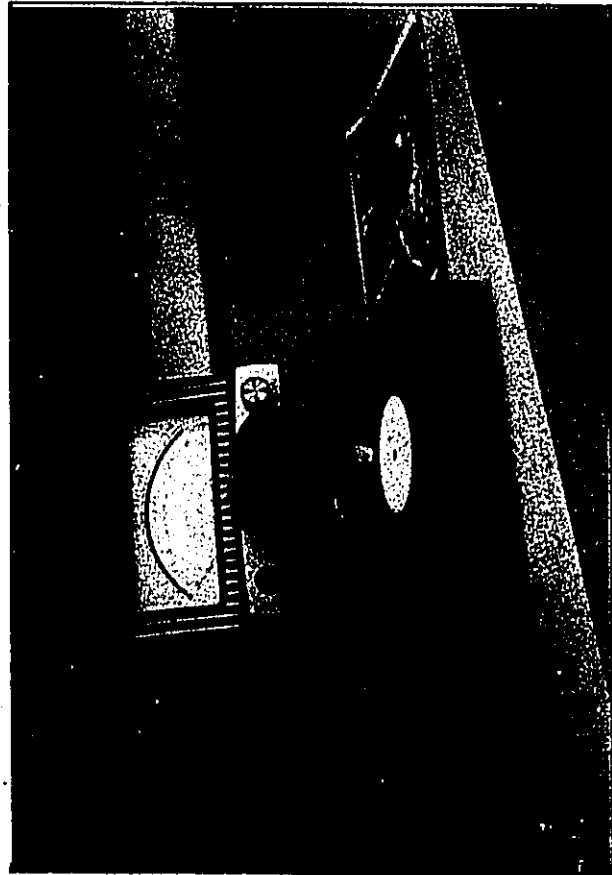
Annexe 2 — Classes de végétation du secteur d'étude



Stéréosketch Higger & Watts



Stéréoscope Wild ST4



Densitomètre ponctuel Macbeth TD-101



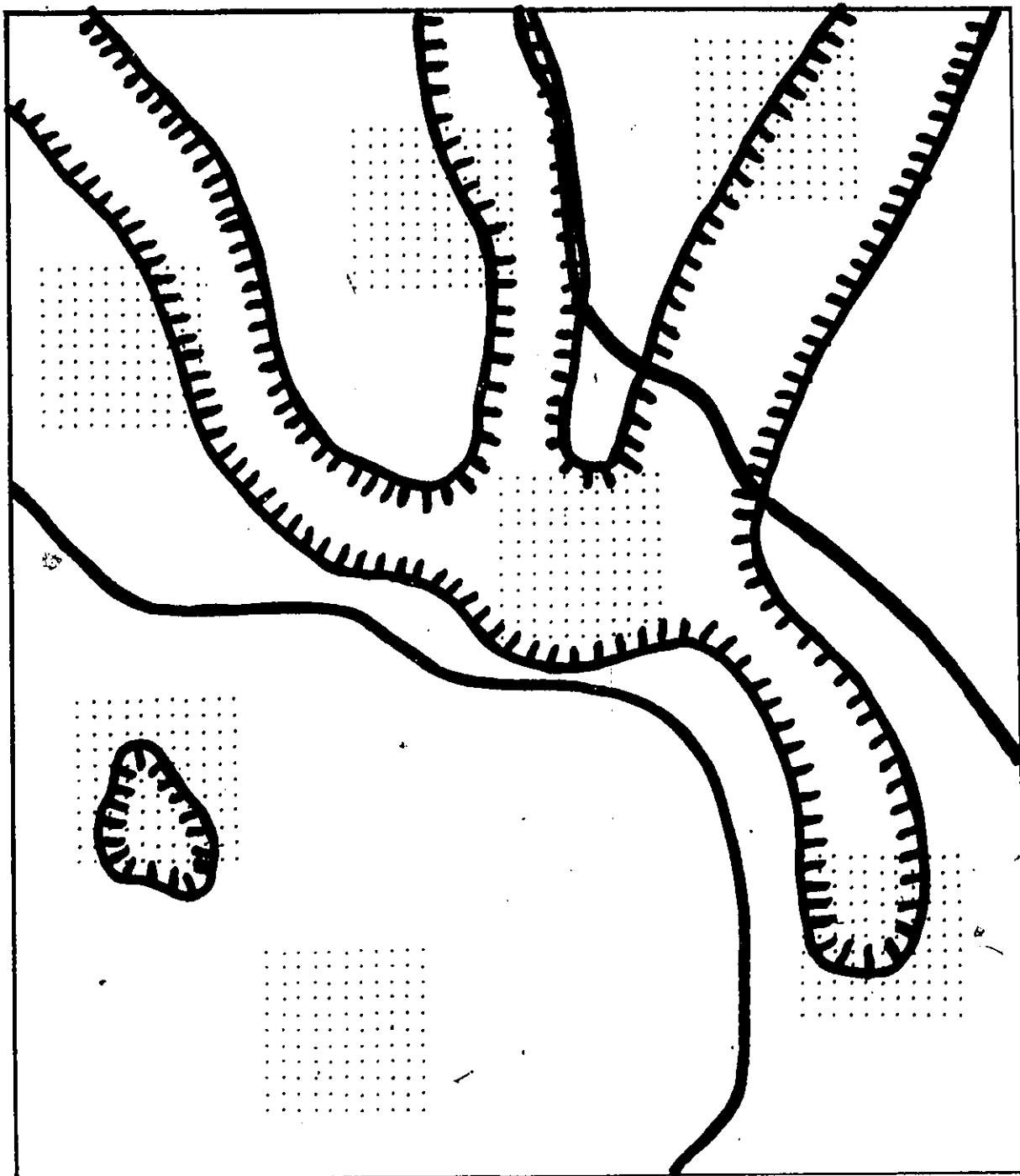
General Electric Image 100

LÉGENDE

Points
d'échantillonnage

Zones de
distorsion

Vérité de
terrain



Annexe 4 - Grille d'échantillonnage et vérité de terrain