

**Maîtrise en environnement
Université de Sherbrooke**

**L'analyse par objets spatiaux d'une image ETM⁺ de Landsat
au service de l'inventaire écologique du
parc national du Canada Auyuittuq**

Yann Troutet

**Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître en environnement (M.Env.)**

Février 2009

© Yann Troutet, 2009



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 978-0-494-49593-3
Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-49593-3

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

■ ■ ■
Canada

Résumé

La classification d'une image ETM⁺ de Landsat a été réalisée pour la cartographie des types de couverture du sol dans la moitié sud du parc national du Canada Auyuittuq. Le projet fait appel à l'analyse d'image par objets spatiaux (*object-based image analysis*). Le logiciel eCognition 4.0 permet une segmentation hiérarchique de l'image qui est analogue au concept de l'inventaire écologique des parcs nationaux. Un territoire d'environ 8 300 km² a été cartographié à trois niveaux de perception différents à partir d'une image acquise le 13 août 2000. Un modèle numérique d'altitude fut incorporé au projet et de nombreux indices spectraux ont été calculés à partir des données ETM⁺. Le niveau de segmentation brute comporte 375 312 objets regroupés en 36 classes. À ce niveau, la structure de classification repose sur 118 règles référant aux paramètres spectraux, spatiaux et topographiques des segments. Ces règles combinent des systèmes de seuillages chiffrés et des opérations de tri au plus proche voisin. L'attribution des segments aux classes du projet est tributaire de ces règles et répond à une logique floue. À la suite d'une fusion de segments et d'un premier regroupement de classes, on obtient le second niveau du projet, qui compte 102 239 objets et 28 classes thématiques. Ce niveau s'apparente aux « écotypes » au sens de l'inventaire écologique des parcs nationaux. Un second regroupement réduit à 9 le nombre de classes et à 36 887 le nombre d'objets, ce qui se rapproche d'une cartographie des « écosystèmes » de l'inventaire écologique. Sur le terrain, 315 relevés photographiques de la végétation ont été réalisés dans les vallées Akshayuk et Naqsaq. Pour chaque relevé, les pourcentages de couverture de 5 strates végétales ont été estimés, de manière à ranger les relevés dans 8 classes de végétation connues a priori. Dans l'image, ce sont 135 segments qui ont pu être retenus comme échantillons. De ce nombre, 71 et 64 échantillons furent retenus respectivement pour l'entraînement et la validation de la classification au plus proche voisin qui fut réalisée pour la végétation. L'exactitude générale de la classification de la végétation a été estimée à 54,7 %. Contrairement à la végétation, le couvert non-végétal est classifié suivant principalement un système de règles, lesquelles décrivent le comportement spectral de 34 types de surfaces selon une structure de classification hiérarchique. La classification des 20 écotypes non-végétaux a été validée par photo-interprétation à l'aide de 992 segments-

échantillons issus d'un tirage aléatoire stratifié. L'exactitude générale de la classification non-végétale est évaluée à 83,2 %. Une fois synthétisée au niveau des écosystèmes, la classification atteint un taux de succès global de 92,7 %. Pour la classification de la végétation, l'analyse d'image par objets spatiaux livre une cartographie dont l'exactitude est équivalente à celle d'une classification basée sur le pixel réalisée par Parcs Canada pour la même image (54,7 % vs 53,4 %). Notre stratification comporte cependant un plus grand nombre de catégories non-végétales et leur classification atteint un niveau d'exactitude supérieur. L'analyse par objet spatiaux nous a permis d'aller au-delà de l'analyse purement spectrale pour incorporer des paramètres texturaux, géométriques et contextuels à la procédure de classification. Elle résulte en une représentation plus synthétique de l'information cartographique que la classification basée sur le pixel, mais les patrons spatiaux les plus fins des milieux les plus hétérogènes sont alors perdus. La structure de classification développée pour notre image peut être transposée avec succès vers une nouvelle image, mais ceci exige que soient apportés des ajustements aux règles de classification, voire l'ajout ou la suppression de certaines règles. La segmentation hiérarchique s'avère utile comme analogue au concept de l'inventaire écologique des parcs nationaux. Les informations véhiculées par chacun des niveaux de notre classification sont des intrants importants pour l'inventaire écologique du parc national du Canada Auyuittuq. Une typologie définitive reste à définir tant pour la classification de la végétation que pour le couvert non-végétal des parcs nationaux de l'Arctique. Des clés de classification seraient requises pour traduire ces typologies en paramètres reconnaissables sur le terrain. En mettant en commun les diverses données de terrain existantes pour le parc national du Canada Auyuittuq et en les structurant selon ces typologies, on obtiendrait une banque d'échantillons augmentée et plus cohérente. De telles données de références s'avéreraient une base solide pour la validation des classifications présentement disponibles ainsi que pour la mise en oeuvre de travaux futurs en matière d'inventaire écologique pour le parc national du Canada Auyuittuq.

Mots-clés :

télétection, segmentation, parc national, Auyuittuq, Baffin, inventaire écologique, Landsat, eCognition

Composition du jury

**L'analyse par objets spatiaux d'une image ETM⁺ de Landsat
au service de l'inventaire écologique du
parc national du Canada Auyuittuq**

Yann Troutet

Ce mémoire a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Richard Fournier

Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines
Directeur de recherche

Hardy Granberg

Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines
Co-directeur de recherche

Jean-Marie Dubois

Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

Patrick Lajeunesse

Département de géographie, Faculté de foresterie et de géomatique
Université Laval

Table des matières

Liste des figures	iii
Liste des tableaux	vii
Liste des annexes	viii
Remerciements	ix
1. Introduction	1
1.1. Le contexte.....	1
1.2. Objectifs et hypothèses.....	7
1.3. Le site d'étude.....	8
1.4. Le logiciel eCognition et « l'analyse d'image par objets spatiaux ».....	11
1.4.1. La segmentation.....	12
1.4.2. L'utilisation des attributs.....	15
1.4.3. Les modes de classification.....	15
1.4.4. La classification hiérarchique.....	17
1.4.5. Les segmentations basées sur la classification.....	17
2. Campagne de terrain	18
2.1. Objectifs de la campagne de terrain.....	18
2.2. Calendrier et localisation des travaux de terrain.....	20
2.2.1. La vallée Akshayuk.....	21
2.2.2. La vallée Naqsaq.....	22
2.2.3. Le complexe glaciaire Tirokwa – Fork Beard.....	23
2.3. Échantillonnage de la végétation.....	24
2.3.1. L'unité d'échantillonnage.....	24
2.3.2. Techniques photographiques pour la collecte de relevés de la végétation.....	27
2.4. Sélection des sites d'échantillonnage.....	34
2.4.1. Accessibilité et potentiel d'échantillonnage.....	35
2.4.2. Localisation des relevés et précision positionnelle des données à référence spatiale.....	35
2.4.3. Représentativité et éléments de stratification de l'échantillonnage.....	37
2.5. Résultats de la campagne de terrain.....	38
2.6. Analyse des relevés de végétation.....	39
3. Traitements informatiques préliminaires	42
3.1. La portion d'image utilisée.....	44
3.2. Les intrants.....	46
3.2.1. L'image ETM ⁺ de Landsat.....	46
3.2.2. La création d'indices spectraux.....	46
3.2.3. Modèle numérique d'altitude.....	47
3.2.4. L'optimisation de l'espace-attribut.....	47
3.2.5. La sélection finale des intrants.....	48
3.3. La segmentation fine de l'image ETM ⁺	50
4. Stratification thématique	52
4.1. La végétation.....	53
4.1.1. Le cas des « Complexes de haute altitude ».....	56
4.1.2. Le cas des complexes ripoles.....	60

4.1.3. La stratification de la végétation.....	63
4.1.4. La classification « au plus proche voisin » des classes de végétation	65
4.2. Les surfaces cryosphériques	67
4.2.1. La glace distale et la glace proximale	69
4.2.2. La neige.....	70
4.2.3. La neige gorgée d'eau de fonte	72
4.2.4. La glace entremêlée de débris morainiques	72
4.3. Les ombres.....	74
4.3.1. Ombre sur glacier vs Ombre	76
4.3.2. Ombre sur falaise	78
4.3.3. Ombres sur replat.....	78
4.4. Les eaux	79
4.4.1. Eau turbide	80
4.4.2. Eau turbide 2.....	81
4.4.3. Eau turbide proximale au glacier	81
4.4.4. Eau verte	82
4.4.5. Eau bleue.....	83
4.4.6. Eau noire	84
4.4.7. Eau noire hors-MNA.....	85
4.5. Les sols non-végétalisés.....	85
4.5.1. Les complexes de haute altitude clairs et foncés	86
4.5.2. Les dépôts fluvioglaciaires secs.....	88
4.5.3. L'alluvium-eau	91
4.5.4. Les dénudés rocheux : falaise, sable et roc	92
4.5.5. Le mélange neige et roc	94
4.6. La classe « No data »	94
4.7. Les segments non-classifiés.....	94
4.8. La classification hiérarchique : groupes spectraux et regroupements thématiques	96
4.8.1. Fusion de polygones et création du second niveau de segmentation hiérarchique.....	96
4.8.2. Regroupement de classes et création du troisième niveau de segmentation.....	100
5. L'évaluation des résultats de la classification	103
5.1. Validation de la classification de la végétation.....	103
5.2. Validation de la classification du couvert non-végétal	105
6. Discussion.....	110
6.1 Nombre d'échantillons	110
6.2. La segmentation d'image : potentiels et limites	111
6.3. Comparaison des résultats avec ceux de Manseau <i>et al.</i> (2003).....	118
6.3.1. Classification de la végétation et arrimage avec Manseau <i>et al.</i> (2003).....	118
6.3.2. Les exactitudes des deux projets de classifications: quelques comparaisons	124
6.4. Exportabilité de la structure de classification	125
7. Conclusion	132
8. Références citées.....	134

Liste des figures

Figure 1	Localisation du parc national du Canada Auyuittuq, île de Baffin, Canada	1
Figure 2	L'inventaire écologique proposé pour le PNC Auyuittuq par Blouin <i>et al.</i> (1975).....	4
Figure 3	L'inventaire écologique du PNC Auyuittuq de Paradis <i>et al.</i> (1986)	5
Figure 4	Le parc national du Canada Auyuittuq	8
Figure 5	L'image ETM ⁺ de Landsat du 13 août 2000	10
Figure 6	« Gala regardant la mer Méditerranée qui à vingt mètres se transforme en portrait d'Abraham Lincoln »	13
Figure 7	Le tableau de Dali, segmenté à deux niveaux différents	14
Figure 8	Une fonction d'appartenance	16
Figure 9	Une classification très simple du tableau de Dali.....	16
Figure 10	Les déplacements qui ont été faits par l'auteur dans le PNC Auyuittuq et ses environs entre le 4 juillet et le 19 août 2003	20
Figure 11	Une partie de la vallée Akshayuk, vue vers le sud depuis les chutes Schwarzenbach	21
Figure 12	La vallée Naqsaq, vue vers le nord-ouest depuis son flanc sud	22
Figure 13	Le glacier Fork Beard, vu vers le sud-est depuis les flancs du mont Thor.....	23
Figure 14	Imagerie ETM ⁺ montrant l'endroit où la vallée Naqsaq rencontre le fjord de Pagnirtung.....	26
Figure 15	Quadrillage photographique d'un site de végétation.	29
Figure 16	Erreurs sur le géopositionnement des données pour un site de relevés photographiques de la végétation.....	32
Figure 17	L'avantage de la photographie oblique	33
Figure 18	Unité d'échantillonnage, bordures et localisation du relevé de terrain au site S18	36

Figure 19	Exemple de relevé photographique de la végétation : le relevé J4.....	42
Figure 20	Organigramme méthodologique: principaux intrants, traitements et extrants du projet	43
Figure 21	La portion de l'image satellitaire utilisée.....	44
Figure 22	Le site d'étude est situé sur la péninsule de Cumberland, Ile de Baffin	45
Figure 23	Les valeurs de NDVI portées par divers groupes d'objets d'image.....	54
Figure 24	Un relevé photographique donnant un exemple de « Complexe de haute altitude ».....	56
Figure 25	Les échantillons de divers types de surfaces forment des groupes dans l'espace à deux dimensions défini par le NDVI et l'indice $ETM3/(ETM1+2)$	57
Figure 26	Une fonction appliquée au NDVI contrôle l'appartenance des objets au groupe des classes de « végétation continue », à l'exclusion des dénudés rocheux	58
Figure 27	Les indices NDVI et $ETM4/(ETM1+2+3+4+5)$ permettent d'isoler en un seul groupe les classes de végétation, à l'exclusion des complexes de haute altitude et des classes non-végétales	59
Figure 28	Trois exemples illustrant le taux de végétalisation très variable de la classe que Manseau <i>et al.</i> (2003) appellent <i>Complexes ripicoles</i>	61
Figure 29	La rive est de la rivière Weasel présentent de grandes surfaces périodiquement inondées.	62
Figure 30	Relevés de végétation réalisés dans la vallée Naqsaq	63
Figure 31	La stratification végétale utilisée pour le projet	64
Figure 32	Parmi les meilleurs attributs pour séparer les classes de végétation, il y a l'indice NDVI et l'indice $ETM2/(ETM1+2+3)$	65
Figure 33	Les surfaces cryosphériques	68
Figure 34	Les surfaces cryosphériques possèdent des valeurs élevées pour l'indice $ETM4/ETM5$ et pour le NDSI	71
Figure 35	La glace entremêlée de débris morainiques.....	73
Figure 36	Les ombres.....	74

Figure 37	Les propriétés spectrales des ombres les rendent difficiles à distinguer de certains complexes de haute d'altitude et des lacs de toundra	76
Figure 38	Les ombres dans l'image ETM ⁺ forment deux groupes distinctifs selon que l'ombre est portée sur un glacier ou sur un autre type de surface.	77
Figure 39	Le secteur du lac Greensheild.....	79
Figure 40	Les eaux turbides d'un torrent sans nom se jettent dans le fjord de Kingnait	82
Figure 41	La moraine du glacier Nerutusooq barre l'extrémité ouest du lac Summit	83
Figure 42	Les relevés effectués sur le terrain nous permettent de localiser sur l'image ETM ⁺ des exemples de différentes classes	87
Figure 43	Les glaciers du parc national du Canada Auyuittuq ont connu une avancée lors du Petit Âge glaciaire.....	89
Figure 44	Les plaines alluviales qui bordent la rivière Weasel	90
Figure 45	Falaises, sable et roc au PNC Auyuittuq	93
Figure 46	La structure hiérarchique des classes qui ont été créées pour la région du parc national du Canada Auyuittuq	97
Figure 47	L'image satellitaire est segmentée en cellules fines en vue de l'étape de classification brute	99
Figure 48	Le niveau de classification brute vise les cellules de base que procure la segmentation fine de l'image.....	101
Figure 49	Entre le second et le troisième niveau hiérarchique, il se fait un regroupement des classes selon leur contenu thématique	102
Figure 50	La chute Schwarzenbach se jette dans la vallée Akshayuk	113
Figure 51	Le fond d'une vallée encaissée	114
Figure 52	L'analyse d'image basée sur le pixel et l'analyse par « objets spatiaux »	116
Figure 53	Le flanc de la vallée Akshayuk.....	117
Figure 54	Par endroits, la sélection des sites d'échantillonnage dans Manseau <i>et al.</i> (2003) donne une représentation serrée de certains secteurs	120

Figure 55 Classes de végétation et gradient de NDVI.....	122
Figure 56 Classe STMOSH et classe TLAN	123
Figure 57 La partie sud-ouest du parc national du Canada Auyuittuq est couverte tant par l'image ETM ⁺ du 13 août 2000 que par celle du 1 ^{er} août 2002	126
Figure 58 Une portion de territoire d'environ 4 600 km ² a été tirée de deux images satellitaires pour tester la stabilité de la structure de classification	127
Figure 59 L'application directe, à une nouvelle image, des règles de classification développées pour l'image ETM ⁺ du 13 août 2000	129
Figure 60 Les segments ayant un NDVI supérieur à un seuil donné sont affichés en couleur.....	130

Liste des tableaux

Tableau 1	Description sommaire des classes décrites par Manseau <i>et al.</i> (2003) pour le parc national du Canada Auyuittuq.....	40
Tableau 2	Matrice d'erreur pour les huit classes végétales.....	104
Tableau 3	Matrice d'erreur pour les 20 classes non-végétales du second niveau hiérarchique du projet.....	107
Tableau 4	Matrice d'erreur pour la classification du troisième niveau hiérarchique du projet.....	109
Tableau 5	Nombre de relevés fournis par Manseau pour chacune des classes végétales décrites dans Manseau <i>et al.</i> (2003)	119
Tableau 6	Matrice d'erreur pour les échantillons fournis par Manseau.....	121
Tableau 7	Les ajustements apportés pour adapter les règles de classification d'une première image aux propriétés spectrales d'une seconde image.....	131

Liste des annexes

Annexe 1	Le concept de l'inventaire écologique.....	140
Annexe 2	Le secteur d'étude.....	141
Annexe 3	Métadonnées conformes au profil FDGC pour les métadonnées au niveau de l'acquisition	142
Annexe 4	Métadonnées pour le produit orthoimage ETM ⁺ de Landsat-7.....	147
Annexe 5	Métadonnées pour l'orthoimage ETM ⁺ de Landsat-7 du 13 août 2000	148
Annexe 6	Les numéros et les plages spectrales des bandes du capteur ETM ⁺ utilisé sur la plateforme Landsat-7	149
Annexe 7	Création du modèle numérique d'altitude (MNA)	150
Annexe 8	Règles de classification.....	152
Annexe 9	Matrice d'erreur pour la classification végétale de Manseau <i>et al.</i> (2003)	164
Annexe 10	Les attributs spectraux distinctifs des classes végétales	165
Annexe 11	Relevés photographiques de la végétation: résultats d'analyse.....	166

Remerciements

Malgré mon affiliation avec l'Université de Sherbrooke, Bernard Lauriol, de l'Université d'Ottawa, m'a permis de bénéficier d'une collaboration qu'il a entretenue avec Parcs Canada. Sa curiosité, son ouverture et son attachement à l'expérience du terrain m'ont été des exemples et des enseignements. Merci Bernard.

Dans l'Arctique, ce n'est pas avec n'importe qui qu'on partage tout un été la même tente, le même menu, la même toilette portative, les mêmes lectures et ses états d'âme... Pour moi, Cynthia Marchildon était la personne de confiance. Infatigable, prudente, drôle, discrète, patiente, cultivée et sympathique, Cynthia a été une partenaire hors-pair. Désormais, le mot « couscous » évoquera chez moi quelque chose d'un parfum de Grand Nord.

Je remercie Christophe Kinnard et Christian Zdanowicz pour leur soif de découverte, qu'ils m'ont amicalement permis de partager un peu.

Ce mémoire n'aurait pas vu le jour sans l'appui de Richard Fournier. Sa confiance et son soutien ont été vitaux pour l'avancement de mon travail, tant sur le plan technique, que scientifique, académique et émotif. Sa méthode de travail et son professionnalisme sont exemplaires. Ses mots d'encouragement chaleureux ont ponctué un travail parfois trop solitaire. Merci Richard.

Mes contacts avec Hardy Granberg ont été et demeurent une source d'inspiration qui me fait chérir la pensée scientifique. Plus soucieux de me voir cultiver mon jardin que de me voir cueillir le fruit, Hardy a su faire de mon esprit un terreau plus fertile. Tack så mycket.

Je remercie Léo Provencher, Patrick Lajeunesse et Jean-Marie Dubois pour leur révisions détaillées et pour leur mots d'encouragement.

Merci à Jean Poitevin et au personnel de Parcs Canada qui m'a renseigné et soutenu dans la réalisation de mon projet.

Tendre Chantal, petite Maïté, vous pour qui mes longs moments d'absence et mes courts moments d'abattement ont été parfois lourds... ce poids vous ancre toujours plus profondément en moi, d'autant d'amour.

À mes parents, pour tout ce que j'ai pu devenir, merci.

Au monde, d'être à la fois si intrigant et si beau, qujannamiik.

Ce projet a bénéficié de l'assistance financière du Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies, de l'Université de Sherbrooke et du Ministère des affaires indiennes et du Nord canadien.

1. Introduction

1.1. Le contexte

L'accès difficile et la grande étendue des parcs nationaux de l'Arctique canadien en font des aires protégées encore mal connues. Les objectifs que se fixe Parcs Canada en matière de gestion des écosystèmes commandent la mise à jour et la validation de diverses connaissances scientifiques au sujet des parcs nationaux du réseau canadien. Parmi les travaux qui s'imposent figure la mise à jour des inventaires écologiques de nombreux parcs. Or, la disponibilité de systèmes d'information géographique et d'une gamme diversifiée de données de télédétection rend aujourd'hui possible la synthèse géospatiale pour ces parcs. Le présent projet consiste en l'analyse d'une image satellitaire et vise à appuyer la mise à jour et l'avancement des connaissances écologiques à référence spatiale pour le parc national du Canada (PNC) Auyuittuq (figure 1).

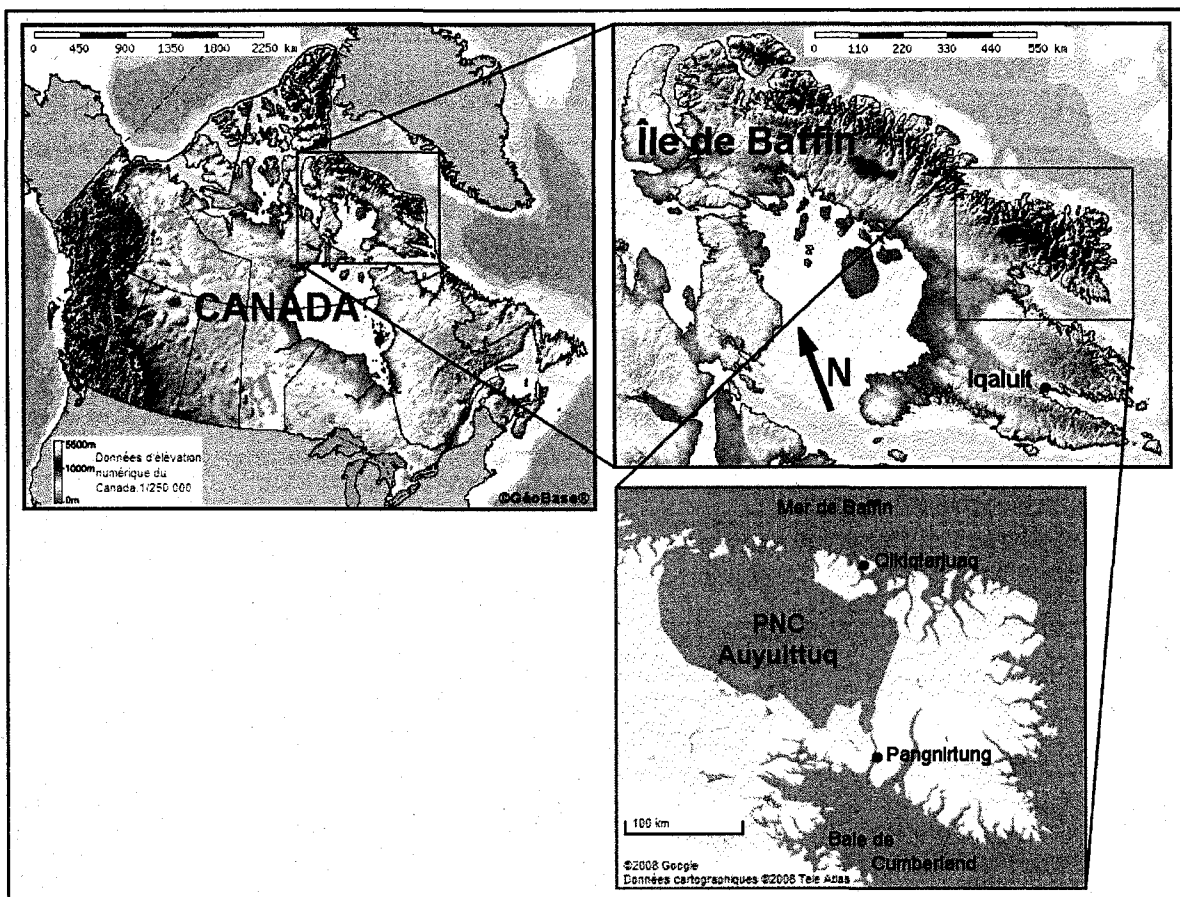


Figure 1: Localisation du parc national du Canada Auyuittuq, île de Baffin, Canada

En raison de sa dynamique glaciaire spectaculaire, le territoire du PNC Auyuittuq a été le site de plusieurs études géomorphologiques et glaciologiques (Baird *et al.*, 1953; Thomson, 1954; Andrews *et al.*, 1973; Andrews and Dyke, 1974; Jacobs *et al.*, 1973; Anderson, 1976, 1978; Church *et al.*, 1979; Davis, 1982; Alling *et al.*, 1987; Aitken and Gilbert, 1989; Zielinski, 1998; Mercier, 2004). Dès les années 1950, la cartographie du relief, des formations meubles et du réseau hydrographique du parc fut bien servie par la disponibilité de photographies aériennes en noir et blanc. Depuis sa mise en réserve en 1972, le territoire du parc a aussi fait l'objet d'inventaires botaniques (Elliott, 1973; Hines and Moore, 1988). Mais Hines *et al.* (1988) avancent que la cartographie du couvert végétal du parc a longtemps été freinée par le manque d'imagerie en couleurs pour ce territoire.

La végétation n'occupe qu'une fraction du parc, mais sa répartition et sa diversité sont liées avec diverses fonctions écologiques des écosystèmes : la stabilisation des substrats; l'accumulation de matière organique; la profondeur du pergélisol; les établissements humains; l'alimentation, les déplacements et la reproduction de la faune; etc. (Callaghan *et al.*, 1995; Chapin *et al.*, 1996; Broll *et al.*, 1999; Walker, 2000; Adler *et al.*, 2001; Oswald *et al.*, 2003; Epstein *et al.*, 2004; van der Wal *et al.*, 2004; Hobbie *et al.*, 2005). Comme le souligne Zoltai (1979), la végétation arctique n'est que rarement soumise à des perturbations et reflète donc les communautés végétales les mieux adaptées à chaque type de surface. L'étude de sa répartition nous renseigne donc, non seulement sur le potentiel écologique des sites qu'elle colonise, mais aussi sur les propriétés environnementales qui les caractérisent (conditions édaphiques, topographiques, microclimatologiques, hydrosédimentaires, etc.) (Virtanen *et al.*, 2006). L'étude des formes physionomiques de la végétation (*growth forms*) aide à prédire et à détecter la réponse à un changement environnemental et la rétroaction sur cet environnement (Chapin *et al.*, 1996; Walker, 2000; Jia *et al.*, 2006), particulièrement dans le cas de la transition entre la prairie hygrophile (*tussock tundra*) et les groupements arbustifs (*schrub tundra*) (Oswald *et al.*, 2003; Epstein *et al.*, 2004). La répartition des groupements végétaux s'avère un renseignement important pour mieux comprendre la composition et les fonctions actuelles et futures des écosystèmes du PNC Auyuittuq.

Sur la base des recommandations émises en 1978 par le Comité canadien de la classification écologique, Parcs Canada a adopté le concept de l'inventaire écologique pour procéder à « l'identification, la délimitation, l'inventaire, la classification et la description des écosystèmes terrestres ». Cette approche, « contrairement au clivage horizontal caractéristique des inventaires sectoriels, [...] fragmente d'abord sur le plan vertical le territoire en unités homogènes, puis procède à leur description à différents niveaux d'intégration, c'est-à-dire sur une base hiérarchique. » (Parcs Canada, 1980, p. 24). Une représentation graphique de ce concept en est donnée à l'annexe 1.

Parmi les premiers inventaires écologiques des parcs nationaux canadiens, les travaux réalisés dans la vallée principale du parc par Blouin *et al.* (1975, 1978) furent cités comme « *de véritables modèles* » (Parcs Canada, 1980). L'inventaire écologique qu'ils proposèrent pour le PNC Auyuittuq divisait la vallée de Pangnirtung (aujourd'hui appelée vallée Akshayuk) en sections auxquelles furent associées 17 descripteurs souvent très détaillés. Le descripteur « végétation », par exemple, est décrite par 41 associations végétales différentes. On y reconnaissait aussi 39 types géomorphologiques. Ne couvrant que 15% du parc, l'inventaire fut réalisé à l'échelle 1:250 000 et est constitué de polygones relativement grands aux contours grossiers (figure 2).

Les classifications de Blouin *et al.* furent simplifiées puis étendues à l'ensemble du parc par Paradis *et al.* (1986) (figure 3) puis par Hines et Moore (1988). Un des motifs qui poussèrent Hines et Moore (1988) à proposer des classes de végétation simplifiées était leur applicabilité comme base pour une éventuelle cartographie par télédétection. En effet, il avait été reconnu « [...] que l'exactitude de tout système de classification des terres utilisant une approche hiérarchique dépend de la disponibilité et de la qualité des produits de la télédétection [...] » (Parcs Canada, 1980, p. 26). Or seules de petites parties du parc avaient été couvertes par des photographies aériennes en couleur. Pour leur part, les travaux de Hines *et al.* (1988) furent conçus pour répondre aux possibilités offertes par le capteur MSS de Landsat.



Figure 2 : L'inventaire écologique proposé pour le PNC Auyuittuq par Blouin *et al.* (1975)
 Parmi 17 descripteurs figure l'exemple donné ici, soit la description des types géomorphologiques primaires associés par les auteurs à chacun de polygones de l'inventaire.

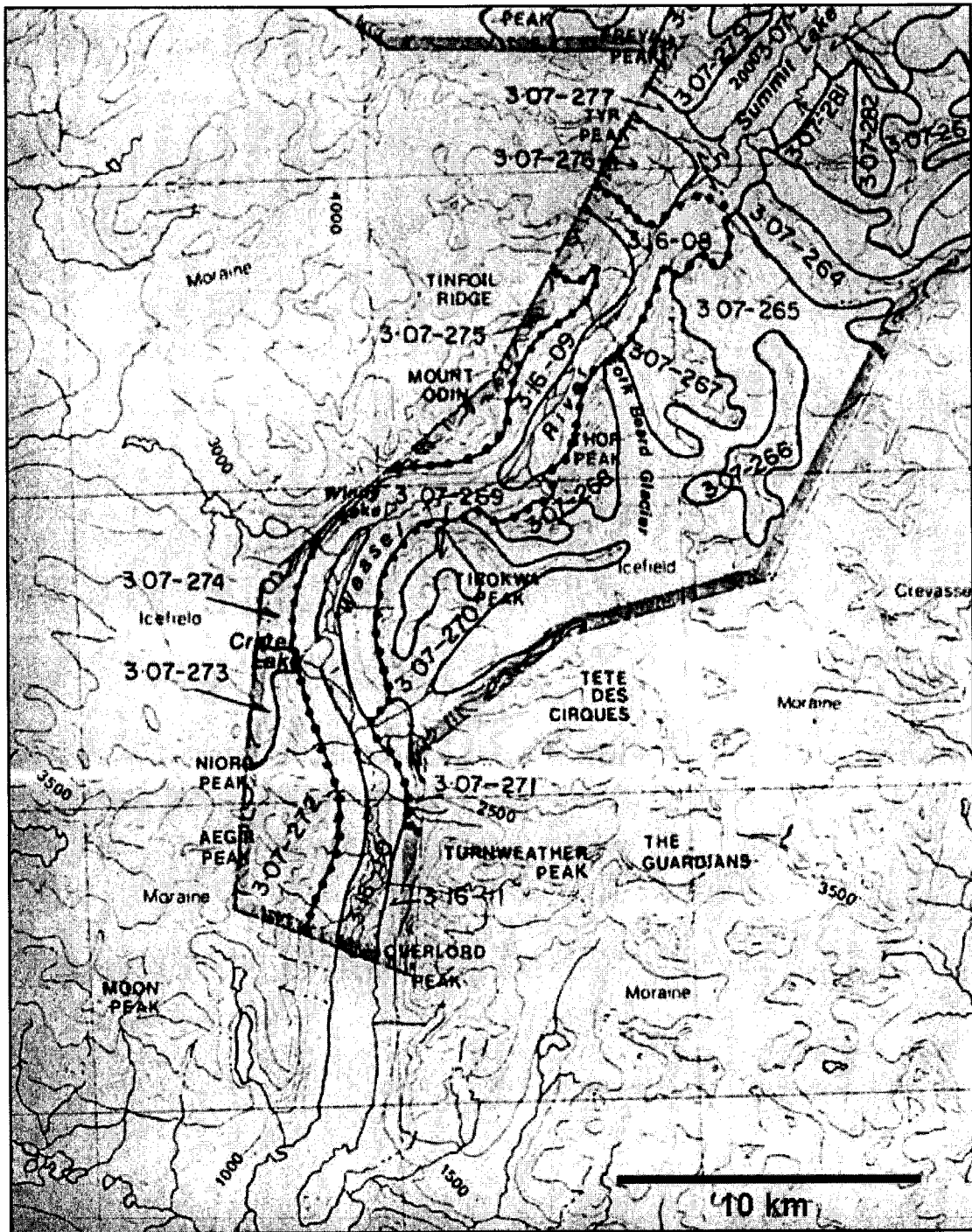


Figure 3: L'inventaire écologique du PNC Auyuittuq de Paradis *et al.* (1986) L'inventaire couvre l'ensemble du parc (ici, son extrémité sud). Les unités cartographiques sont très étendues. Réalisée à partir de photos aériennes en noir et blanc, la classification du couvert végétal est très générale. Elle fut aussi jugée inadéquate par Hines et Moore (1988).

En matière de télédétection, l'informatisation et le développement de capteurs procurant des résolutions sans cesse plus fines ont rendu possible une caractérisation des territoires nordiques à un niveau de détail accru (Laidler *and* Treitz, 2003). Dans l'espoir de mettre à jour et de bonifier les connaissances relatives au PNC Auyuittuq, le recours à ces nouvelles méthodes s'imposait. En 1999, Parcs Canada a entrepris la cartographie de la végétation du parc à l'aide de données ETM⁺. En s'appuyant sur les travaux de Hines et Moore (1988), des équipes de recherche ont mené de nouvelles campagnes d'échantillonnage botanique dans diverses régions du parc (Manseau *et al.*, 2003). Ces relevés supplémentaires avaient pour but de (1) fournir des données pour des secteurs du parc n'ayant pas fait l'objet de relevés antérieurs, (2) assurer un nombre adéquat d'échantillons pour chacune des communautés végétales identifiées et (3) décrire des sites homogènes et représentatifs de ces communautés et en donner la position géographique. Sur une période de quatre ans, 335 sites furent échantillonnés dans les secteurs ouest, nord et sud du parc.

Tout en s'appuyant sur les techniques de télédétection mises au point au courant des années 1990, Parcs Canada se penche aujourd'hui sur le potentiel offert par des approches alternatives pour la surveillance et l'acquisition de connaissances sur les écosystèmes des parcs (Deshaye, 2000; Parcs Canada, 2005). Du point de vue de la télédétection, le concept de l'inventaire écologique présente des similitudes avec la notion de segmentation d'image. En effet, l'inventaire écologique implique une subdivision cartographique (en polygones) d'un territoire, tout comme le permet la segmentation d'une image de télédétection. La notion d'unités cartographiques imbriquées les unes dans les autres (Lacate, 1969; Jurdant *et al.*, 1977; Parcs Canada, 1980; Klijn *and* Udo de Haes, 1994) s'apparente à son tour à ce qu'on désigne, en télédétection, sous le vocable « segmentation hiérarchique ».

Divers logiciels d'analyse d'images incorporent aujourd'hui des méthodes de segmentation. Parmi les logiciels commerciaux, le logiciel eCognition est reconnu pour son algorithme de segmentation et ses nombreuses fonctionnalités de classification (Schiewe *et al.*, 2001; Blaschke *and* Strobl, 2001; Flanders *et al.*, 2003; Meinel *and* Neubert, 2004). Parcs Canada souhaite mieux connaître les possibilités d'analyse qu'offrent le logiciel eCognition pour la cartographie écologique des parcs de l'Arctique à partir de données de télédétection (CLC-Camint Inc., 2003).

1.2. Objectifs et hypothèses

La présente étude a pour objectif la classification d'une portion d'image ETM⁺ Landsat couvrant la moitié sud du parc national du Canada Auyuittuq. Le projet cherche à s'inscrire dans la continuité des travaux réalisés à ce jour dans le parc en s'arrimant aux notions d'inventaire écologique et de classification végétale précédemment décrites par Parcs Canada pour le PNC Auyuittuq.

Les objectifs spécifiques de cette étude visent à :

- explorer le potentiel de la segmentation d'image comme base pour l'analyse d'images ETM⁺ de l'Arctique ;
- réaliser la classification d'une portion d'image ETM⁺ du 13 août 2000 touchant le PNC Auyuittuq ;
- incorporer des données topographiques au processus de cartographie écologique ;
- produire une segmentation hiérarchique qui permet une synthèse cartographique des résultats de classification à divers niveaux d'intégration ;
- évaluer l'exactitude des classifications réalisées ;
- mettre en relief nos résultats avec ceux de projets réalisés antérieurement pour le parc ;
- examiner l'exportabilité de la structure de la classification.

Nous avançons comme hypothèse que la segmentation d'image et les options de classification qu'offre cette technique, permettent de délimiter et de classier de façon satisfaisante les différents types de couverture du sol présents dans le PNC Auyuittuq.

Comme hypothèse secondaire, nous proposons que la segmentation hiérarchique est un analogue valable au concept de l'inventaire écologique tel qu'on l'entend pour les parcs nationaux du Canada.

1.3. Le site d'étude

Le PNC Auyuittuq occupe une superficie de 19 089 km², presque totalement incluse dans le cercle arctique, sur l'île de Baffin. Situé entre 66°23'N et 68°20'N et entre 63°50'W et 68°15'W, le parc ceinture la calotte glaciaire de Penny, d'une superficie de 6 000 km² (figure 4).

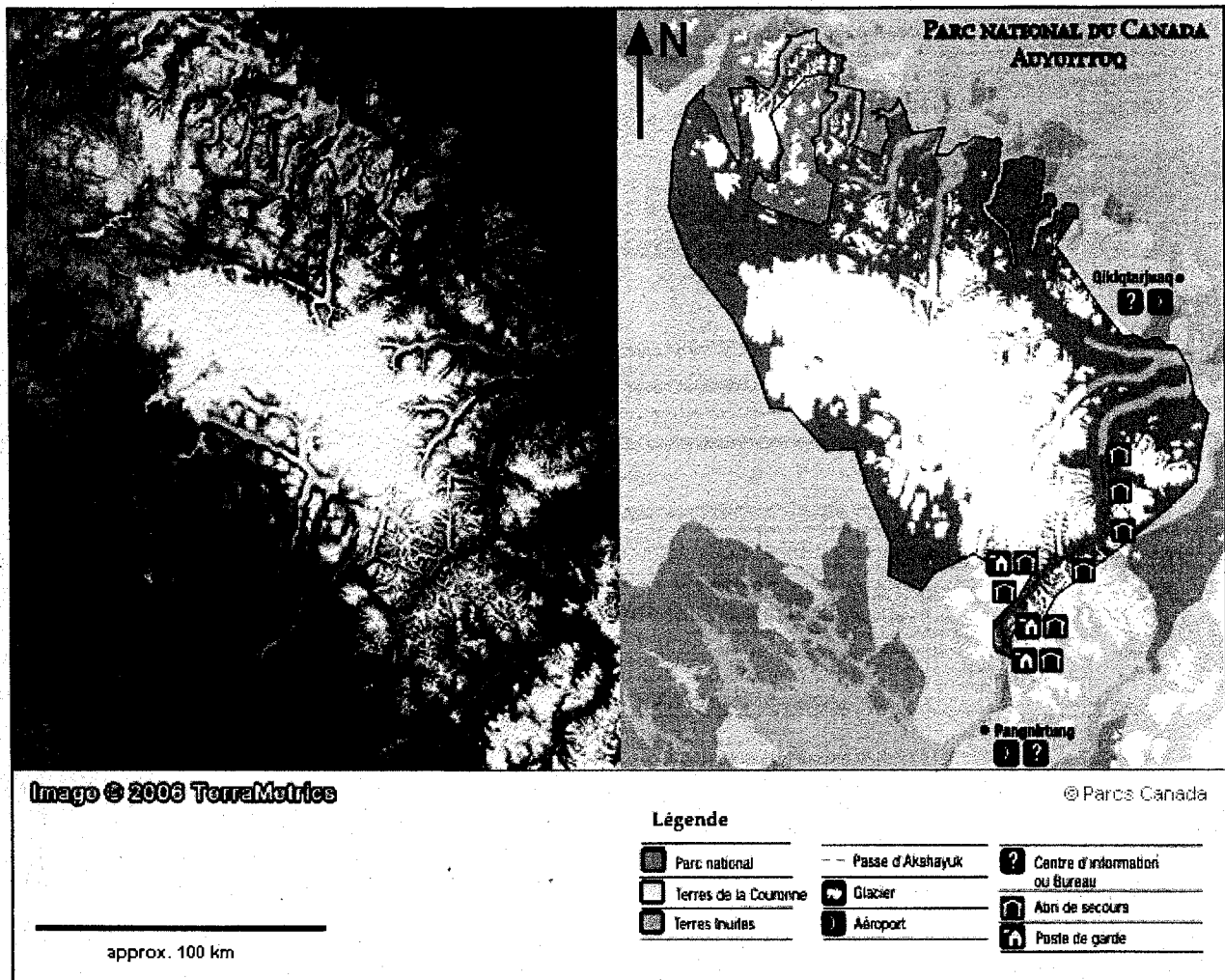


Figure 4: Le parc national du Canada Auyuittuq

Sont présentés, en parallèle, une mosaïque d'imagerie satellitaire et les limites et infrastructures du parc. Les carrés superposés aux figures montrent la portion du territoire considérée dans le cadre du présent projet.

Le socle rocheux d'Auyuittuq est constitué de roches cristallines du Bouclier canadien (Hines *et al.*, 1988). Les paysages du parc ont été façonnés tant par le passage de l'Inlandsis laurentidien que par l'action érosive des glaciers contemporains, dont témoignent les innombrables cirques,

arêtes, pics et moraines du parc. La calotte glaciaire de Penny recouvre les hautes-terres du même nom dans la partie centrale du parc. Elle culmine à plus de 2 000 m d'altitude. Les grands glaciers qui y trouvent leur origine ont des langues de plusieurs dizaines de kilomètres de longueur et sont principalement situés au nord-est et au sud-ouest de la calotte. Au nord et à l'est de la calotte, ces glaciers empruntent des vallées qui incisent profondément les haut-plateaux de la côte est de l'île de Baffin. Trois langues glaciaires importantes continuent d'atteindre la mer. Outre la calotte, de vastes champs de glace occupent également les hauteurs du côté est du parc. Plusieurs grands lacs en occupent les vallées. Du côté sud-ouest de la calotte glaciaire Penny, on trouve un paysage de plateaux, de collines et de vallées au relief moins marqué. Criblé de petits lacs, ce secteur présente aussi quelques très grands lacs proglaciaires. Au sud-est du parc, le terrain consiste en un ensemble complexe de vallées alpines et de pics. Les sommets atteignent les 2 000 m et les vallées glaciaires y sont très profondes. On trouve à cet endroit certaines des plus hautes falaises du monde : nombre d'à-pics quasi-verticaux dépassent le kilomètre en hauteur. Les dimensions des moraines et des talus d'éboulis y sont également impressionnantes. Une large gamme de processus et de formes périglaciaires peut être observée dans le PNC Auyuittuq : sols polygonaux, thermokarst, solifluxion, gélifraction, felsenmeer, etc. De grandes parties du parc sont des déserts rocheux.

Une des particularités du PNC Auyuittuq tient à la présence de la vallée du nom d'Akshayuk, une profonde vallée en auge qui traverse la péninsule de Cumberland à l'endroit où son relief est le plus dramatique (figure 4 et 5). La vallée forme un col à environ 400 mètres d'altitude et crée une voie de passage libre de glace reliant le détroit de Davis et la baie de Cumberland. Cette vallée est la porte d'entrée et le site de la grande majorité des visites du parc. C'est également son secteur le plus étudié.



1

Vue, vers le sud, de la vallée Akshayuk, vallée en auge profonde traversant la péninsule de Cumberland

2

Vue, vers l'ouest, du fjord Kingnelling : hauts plateaux et glaciers

5

Vue, vers l'ouest, de la vallée Naqsaq, dont le relief et le réseau hydrographique sont typiques des plateaux du sud-ouest du parc

4

Vue, vers l'est, du Mont Turmweather et du glacier du même nom, au sein des complexes alpins au sud-est de la vallée Akshayuk

3

Marge de la calotte glaciaire de Penny, à l'endroit où le glacier Highway plonge vers le sud entre de hautes falaises de roc.

photos: Yann Troutet (1, 5), Ansgar Walk (2,3,4)

Figure 5: L'image ETM⁺ de Landsat du 13 août 2000

Centrée sur la calotte glaciaire Penny et la vallée Akshayuk, elle montre une partie du parc national du Canada Auyuittuq et de ses environs. Les photos annotées donnent des exemples des grandes unités physiographiques de ce territoire.

Le parc national du Canada Auyuittuq est situé au point de rencontre de plusieurs régions écoclimatiques. Mais comme le soulignent Hines *et al.* (1988) :

[...] il est impossible de définir un climat typique pour la région. Les principaux facteurs de contrôle (latitude, altitude, proximité de plans d'eau et de glaciers importants, topographie et corridors d'anticyclones) donnent lieu à des régimes climatiques locaux et régionaux complexes. En raison de la variabilité des patrons météorologiques locaux, les données des stations météo ne reflètent pas toujours les conditions que l'on peut retrouver même à faible distance des dites stations. (traduction libre)

Tout en gardant cette précision en tête, considérons les moyennes tirées de Mercier (2004) :

Les données [...] proviennent de la station climatique de Pangnirtung (Nunavut), située à 40 km au sud de la Passe d'Akshayuk. Ces données représentent les moyennes entre 1995 et 2001. La température moyenne annuelle est de $-10,4^{\circ}\text{C}$; la température moyenne du mois de janvier est de -28°C et la température moyenne du mois de juillet est de 7°C . Les précipitations moyennes totales sont de 450 mm. Près de la moitié des précipitations, soit 45 %, tombe entre les mois de juillet et septembre.

Situé à plusieurs centaines de kilomètres au-delà de la limite nordique des arbres, le PNC Auyuittuq présente une végétation de toundra constituée d'arbustes nains, de graminées, d'herbacées, de lichens et de mousses (CAVM Team, 2006). Là où les conditions sont exceptionnellement favorables, les arbustes nains peuvent atteindre 70 cm, mais la végétation est généralement beaucoup plus basse. La végétation continue ne couvre que 15 % de la superficie du parc (Parcs Canada, 2008) et environ 22 % du secteur à l'étude (annexe 2). La composition du couvert végétal varie en fonction du drainage et de la nature des dépôts de surface (Hines *and* Moore, 1988), mais est contrôlée essentiellement par l'effet de l'altitude. La végétation se présente comme une mosaïque intimement liée aux variations des formes du terrain.

Des détails additionnels sur les secteurs visités et la nature du terrain sont donnés aux sections 2.2. et 4. Pour une description détaillée des ressources naturelles du PNC Auyuittuq, on peut également référer à Hines *et al.* (1988).

1.4. Le logiciel eCognition et « l'analyse d'image par objets spatiaux »

Le concept de l'inventaire écologique tel qu'énoncé par Parcs Canada (1980) présente une parenté avec certaines techniques employées dans le domaine de la télédétection. Effectivement, la subdivision cartographique qui est prévue par l'inventaire écologique s'apparente à la

segmentation et à la classification qu'on peut faire d'une image satellitaire. De plus, l'imbrication des unités cartographiques de l'inventaire écologique se rapproche de la segmentation dite hiérarchique que permettent aujourd'hui les systèmes d'informations géographiques et les logiciels de traitement d'images numériques tels que eCognition de Definiens Imaging (©). Dans le cadre du présent projet, nous avons tenté de mettre au service de l'inventaire écologique les fonctionnalités du logiciel eCognition 4.1. Nous ferons ici un survol des concepts qui sous-tendent les principales fonctionnalités : la segmentation d'image, l'utilisation des attributs, les deux modes de classification, la classification hiérarchique et les segmentations basées sur la classification.

1.4.1. La segmentation

Le concept fondamental sur lequel est basé le logiciel eCognition est celui du « traitement d'image par objets spatiaux » (*object-oriented image analysis*). Ce qu'on entend par cette expression, c'est que l'analyse d'une image ne se fait non pas sur la base de l'information que contiennent les pixels, mais bien sur les informations que renferment des polygones dans l'image (objets spatiaux). Ces polygones résultent d'une étape de segmentation d'image où les zones homogènes sont identifiées. Cette étape constitue le point de départ de tout projet dans eCognition. Au-delà d'une simple image, plusieurs couches matricielles peuvent être incorporées à cette étape : bandes spectrales, données topographiques, cartes d'occupation du sol, cartes météorologiques, etc. L'algorithme de segmentation propre à eCognition se base sur les contrastes dans les intrants matriciels pour tracer les contours de portions significantes (objets) d'un territoire. Ces portions significantes différeront sensiblement selon le niveau de perception auquel on se place, tout comme dans l'inventaire écologique (annexe 1). C'est pourquoi le logiciel nous permet de moduler un critère d'échelle de la segmentation, de manière à respecter l'échelle à laquelle s'opère le phénomène qu'on tente de mettre en lumière. Pour à illustrer ce concept, nous avons appliqué divers scénarios de segmentation à l'image d'un tableau de Salvator Dali : « Gala regardant la mer Méditerranée qui à vingt mètres se transforme en portrait d'Abraham Lincoln ». Ce tableau incorpore de façon très explicite divers niveaux de perception. Les figures 6 et 7 montrent comment la segmentation nous permet d'extraire des éléments significants de ce tableau aux divers niveaux de perception que suggère ce tableau.

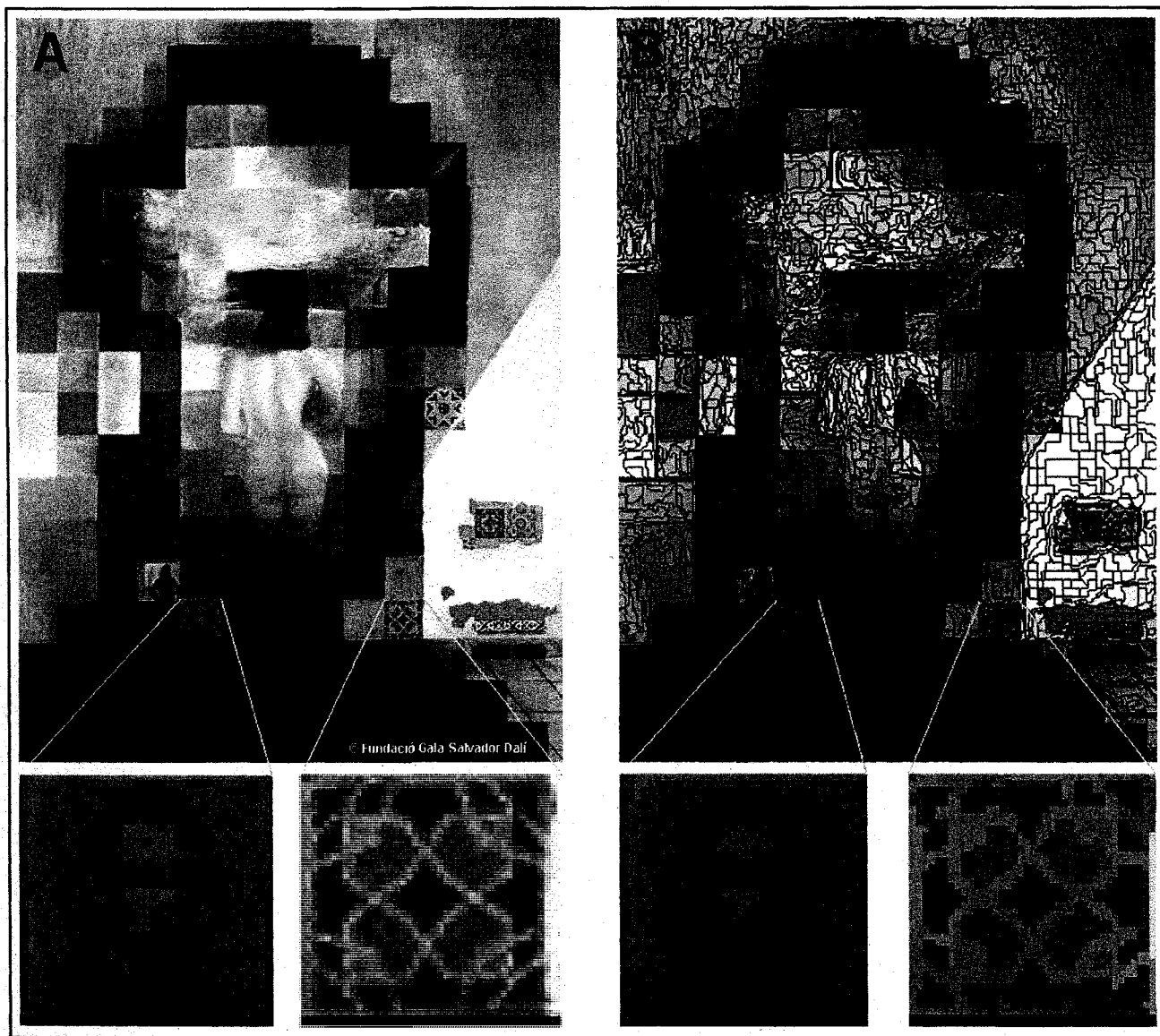


Figure 6: « Gala regardant la mer Méditerranée qui à vingt mètres se transforme en portrait d'Abraham Lincoln »

Le tableau comporte trois niveaux de perception :

- 1) à l'échelle intermédiaire, une femme regarde la mer par une fenêtre en forme de croix ;
- 2) avec du recul, le tableau montre le portrait d'Abraham Lincoln, en incorporant les motifs grossiers créés par le carrelage du mur ;
- 3) à l'échelle plus fine, on remarque que des images et des motifs apparaissent à l'intérieur même des pièces de carrelage.

Une segmentation fine de l'image est donnée en B. Les gros plans montrent des détails fins de l'image : en A, l'image brute, et en B, l'image segmentée, où c'est alors la valeur spectrale moyenne des segments qui est affichée. Cette segmentation permet de préserver les motifs du niveau de perception le plus fin de l'image.

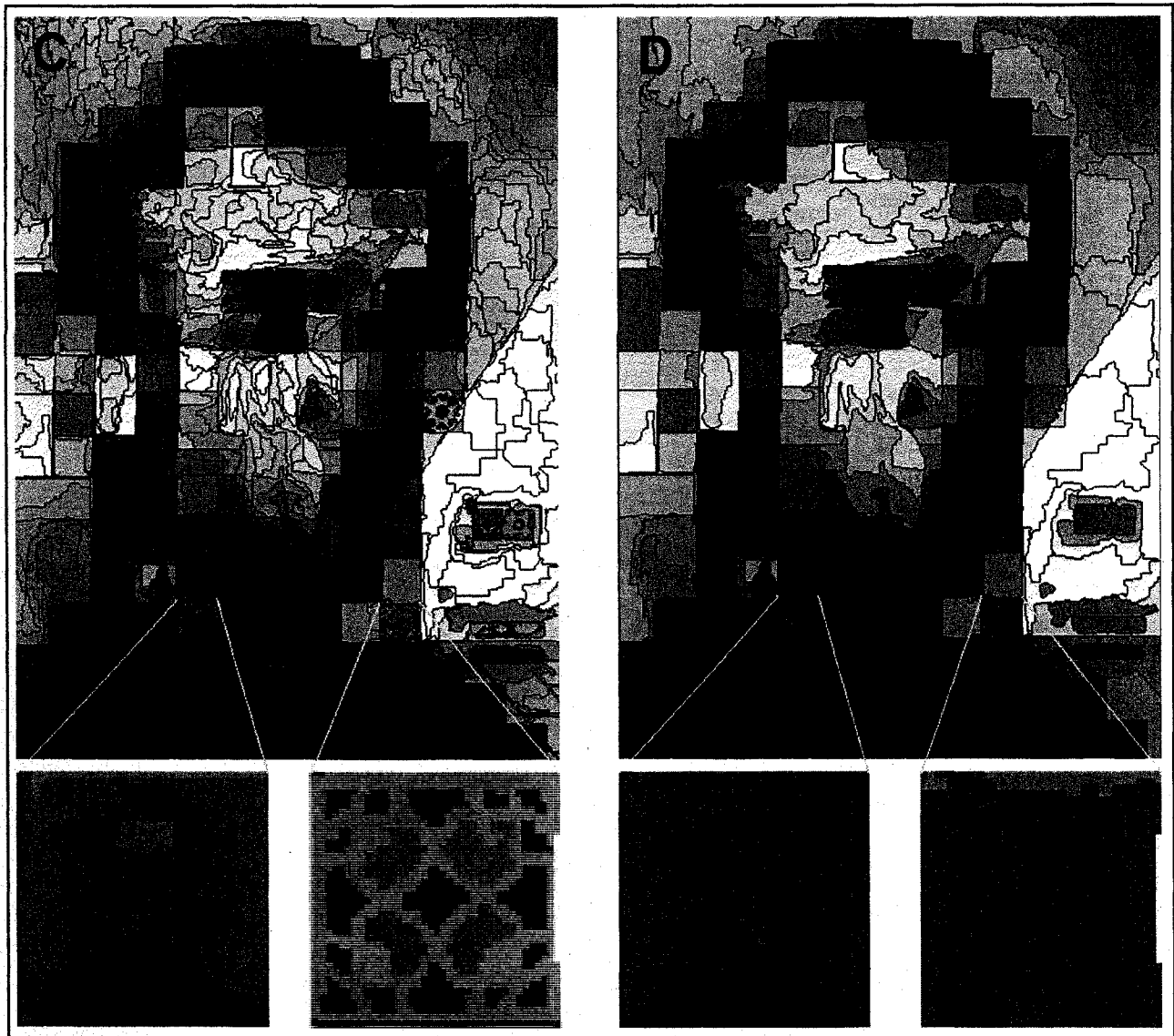


Figure 7: Le tableau de Dali, segmenté à deux niveaux différents

Les segments en C sont imbriqués dans ceux en D. Au niveau de segmentation présenté en C, les contours des segments permettent de suivre adéquatement le profil du personnage qui regarde par la fenêtre, mais dégradent quelque peu les motifs fins de l'image originale (vs figure 6, A). Au niveau grossier (D), la segmentation agglomère les motifs fins et le profil du personnage commence à disparaître. Par contre, ce niveau relève bien les contours des pièces de carrelage, que l'on pourrait considérer comme des éléments significatifs de l'image. On remarquera également qu'avec du recul, le portrait d'Abraham Lincoln se dégage aussi nettement en D qu'en C.

1.4.2. L'utilisation des attributs

La segmentation d'une image est l'étape initiale de toute analyse d'image dans eCognition. Une fois que les segments ont été créés, l'analyse de l'image peut s'opérer sur la base des divers attributs que comporte chacun des segments. Ces attributs constituent alors les descripteurs qui servent à la classification des segments, que l'on désignera ci-après comme « objet d'image ». Les attributs que peut présenter un objet sont très variés : en plus de son contenu multispectral, il présente des attributs liés à sa forme, sa texture interne, son voisinage, etc. Tous ces attributs, ou descripteurs, peuvent constituer des critères des classifications. Non seulement cela démultiplie-t-il les possibilités de classification, mais on notera aussi que cela nous permet 1) de profiter de l'effet de moyenne dans les segments pour réduire le ratio signal-bruit et 2) de contrecarrer l'effet souvent indésirable de « poivre et sel » dans la classification finale.

1.4.3. Les modes de classification

Lorsque l'utilisateur souhaite classifier une image avec eCognition, il doit d'abord spécifier les attributs sur la base desquels sont classifiés les objets. Nous verrons plus loin comment sélectionner les meilleurs attributs, mais nous examinerons d'abord les deux manières de faire la classification même des objets dans eCognition : par l'imposition de « fonctions d'appartenance » (*membership function*), ou par classification « au plus proche voisin » (*nearest neighbour*).

Comme son nom l'indique, l'imposition de fonctions d'appartenance requiert que l'on spécifie des règles qui définiront si un objet est inclut ou n'est pas inclut dans une classe donnée. Or, puisque le logiciel fonctionne selon la logique floue (*fuzzy logic*), cette appartenance se mesure sur une échelle progressive de 0 à 1. Une fonction d'appartenance spécifie donc les valeurs de l'attribut entre lesquelles se fait une transition de la non-appartenance à pleine appartenance. La courbe de la fonction peut prendre différentes formes : seuil, fonction linéaire, sinusoïde, etc. (figure 8). Au besoin, plusieurs fonctions concurrentes peuvent être appliquées, en référence à une variété d'attributs, de manière à bien circonscrire la classe qu'on cherche à mettre en relief dans l'image (figure 9). L'imposition de fonctions d'appartenance a été utilisée abondamment dans le cadre du présent projet, ce que nous verrons à la section 4.

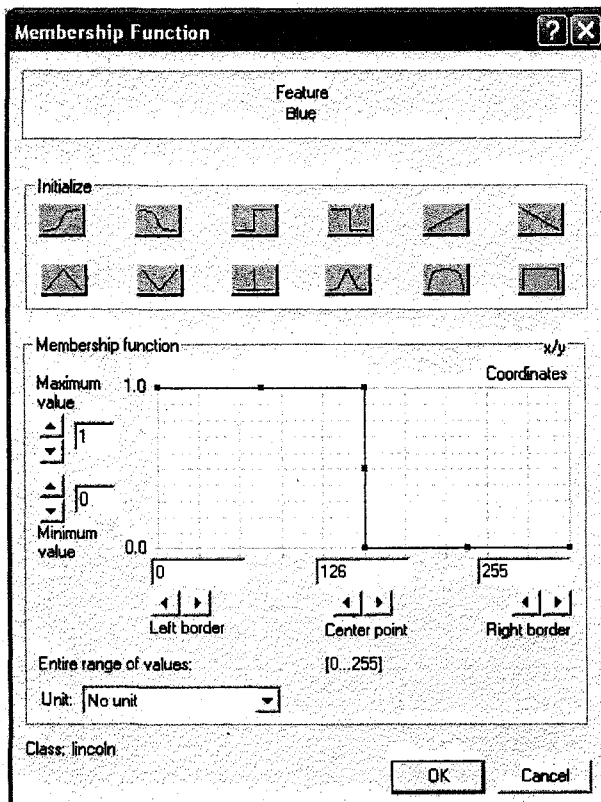


Figure 8: Une fonction d'appartenance
Simple seuil, ce critère n'admet dans la classe que les objets dont la composante bleue (en référence à l'affichage RGB) est inférieure à 126.

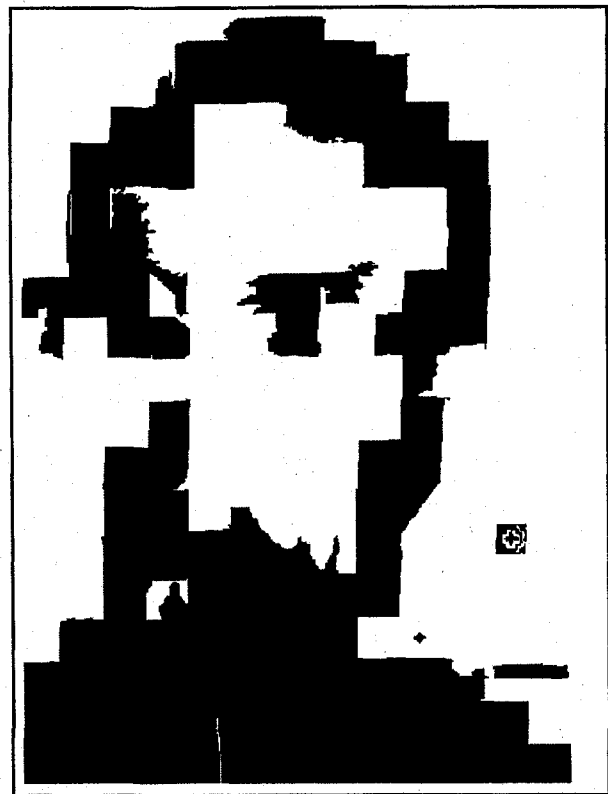


Figure 9: Une classification très simple du tableau de Dali
La fonction d'appartenance donnée à la figure 8 permet de relever les principaux objets qui composent le portrait de Lincoln.

Contrairement à la classification par imposition de fonctions d'appartenance, la classification « au plus proche voisin » n'exige pas qu'on spécifie les valeurs d'attribut attendues pour la classification des objets d'image. L'utilisateur n'a qu'à choisir des segments qui constituent de bons exemples des classes souhaitées. Il suffit alors de spécifier les attributs sur la base desquels la classification doit s'opérer, puis de lancer l'opération, qui se fait de façon semi-automatisée. Le logiciel regroupe alors les objets de l'image par catégories selon leur proximité à l'un ou l'autre des nuages d'échantillons. Dans le cadre du présent projet, cette approche s'est révélée utile pour la création de quelques unes des sous-catégories importantes de la hiérarchie des classes.

Mentionnons que les deux modes de classification (l'imposition des fonctions d'appartenance et l'assignation « au plus proche voisin ») peuvent être combinés dans la description d'une classe.

1.4.4. La classification hiérarchique

Nous avons vu que la classification dans eCognition se fait sur la base des attributs des objets d'image. Chaque classe comporte des critères d'inclusion ou d'exclusion se rapportant à divers attributs et qui permettent d'assigner les objets à l'une ou l'autre des classes. L'utilisateur peut par ailleurs organiser les classes de façon hiérarchique. En effet, il peut subdiviser des classes en « sous-classes », qui héritent alors des caractères qui définissent la « classe parente ». Des critères de classification additionnels permettent de distinguer entre elles les sous-classes. La classification hiérarchique permet donc de réaliser des classifications plus générales sur les grands ensembles d'une image, suivies de classifications plus détaillées pour scinder ces grands ensembles en groupes de portée thématique plus ciblée.

1.4.5. Les segmentations basées sur la classification

Lorsque la classification des objets d'une image est complétée, on peut se servir de cette information pour générer de nouveaux contours de segments. C'est ce qu'on appelle la segmentation basée sur la classification (*classification-based segmentation*). On réfère parfois aux segments initiaux d'un projet comme aux « objets primitifs », car ils ne découlent que d'une analyse purement numérique de l'hétérogénéité d'un ensemble d'intrants matriciels, et qu'aucune information thématique n'intervient dans le tracé de ces contours (les objets d'image que nous avons présentés aux figures 6 et 7, bien que de résolutions variées, sont tous, à ce titre, des objets primitifs). Contrairement aux segmentations pré-classification, les segmentations basées sur la classification ne s'appuient plus seulement sur un critère d'hétérogénéité de l'image, mais incorpore l'information sémantique des objets classifiés. Ce genre de segmentation nous permet, par exemple, de regrouper en un seul segment les objets primitifs voisins qui font partie de la même classe. À leur tour, ces segments peuvent être regroupés avec ceux de classes apparentées pour produire des segments d'un ou plusieurs niveaux hiérarchiques différents. Inversement, si on s'intéresse aux détails du terrain à l'intérieur d'une classe donnée, on peut faire des sous-segmentations très fines des seuls objets de cette classe. C'est à l'aide de ces divers procédés qu'on parvient à obtenir des objets d'image véritablement signifiants, dont la portée thématique, dans notre cas, écologique, devient réellement intéressante.

2. Campagne de terrain

2.1. Objectifs de la campagne de terrain

La cartographie par télédétection requiert généralement des données de référence : photographies aériennes, cartes de référence préalables, données de terrain, etc. Nous verrons ici que les données brutes disponibles pour le PNC Auyuittuq en début de projet (2003) n'étaient pas suffisamment nombreuses ou assez précises pour constituer une banque de données de référence suffisante pour l'analyse d'une image ETM⁺, particulièrement pour la végétation. En conséquence, une campagne sur le terrain s'imposait.

La cartographie géomorphologique des formes de terrain a été faite par photo-interprétation pour l'ensemble du parc par Paradis *et al.* (1986). Par des validations sur le terrain, Hines *et al.* (1988) ont déterminé que l'origine des formations meubles et de l'expression de la surface cartographiées par Paradis *et al.* sont correctes dans 90 % des cas. Par contre, alors qu'ils n'ont utilisé que 4 classes de végétation, Paradis *et al.* n'ont obtenu qu'un taux de succès de 42 % pour les descripteurs de la végétation. On en comprend que si la géomorphologie se caractérise bien par la photo-interprétation (dans ce cas-ci de photographies aériennes en noir et blanc), la cartographie de la végétation, elle, demeure problématique.

Pour résoudre le problème que posait la cartographie de la végétation, Hines et Moore (1988) ont proposé une approche morphométrique pour décrire des classes de végétation adaptées à l'analyse d'images MSS de Landsat. Reprise puis mise à jour successivement par Deshayé (2000), Manseau et Hughson (2000) puis Manseau *et al.* (2003), cette approche a livré une suite de huit classes jugées optimales pour la cartographie de la végétation pour le PNC Auyuittuq à l'aide d'imagerie ETM⁺.

Le rapport de Deshayé (2000) faisait état de 91 relevés de végétation sur le terrain. Nous verrons plus loin que le nombre d'échantillons que requiert le présent projet se chiffre en centaines. Nous savons aussi que l'imprécision du système de positionnement global (GPS) d'avant l'an 2000, de l'ordre de 100 mètres, rend moins intéressants les relevés effectués avant cette date. Les données

de Deshaye nous étant donc de peu de secours et les données de Manseau *et al.* (2003) ne nous étant pas encore accessibles, il s'avérait nécessaire de réaliser notre propre série de relevés-échantillons géopositionnés pour les classes de végétation décrites par ces auteurs. Remarquons qu'en plus des relevés de végétation, une campagne de terrain allait livrer plusieurs autres bénéfices. Par exemple, cela nous a permis de tester la facilité avec laquelle les classes décrites pouvaient être identifiées sur le terrain. Par ailleurs, l'occasion de faire l'expérience physique du terrain et d'acquérir une connaissance directe des types de couverture du sol de la toundra s'avère d'une valeur inestimable pour la conduite intuitive des étapes de classification subséquentes.

Les objectifs de la campagne de terrain étaient les suivants :

- obtenir un nombre suffisant des relevés photographiques géopositionnés pour les classes végétales préalablement décrites pour le PNC Auyuittuq ;
- se familiariser avec le relief, les types géomorphologiques et l'environnement glaciaire du PNC Auyuittuq ;
- être témoin, sur le terrain, de l'expression physique des diverses informations présentées dans l'inventaire écologique réalisé pour le parc par Blouin *et al.* (1975) (types géomorphologiques, phénomènes périglaciaires, végétation et taux de végétalisation, relief, drainage, etc.) ;
- développer une aisance pour l'interprétation de l'image ETM⁺ de Landsat-7 en confrontant des imprimés d'images avec la réalité du terrain et en s'en servant comme outil pour la sélection d'échantillons sur le terrain.

2.2. Calendrier et localisation des travaux de terrain

Les travaux de terrain réalisés dans le cadre de ce projet se sont échelonnés sur une période de sept semaines, entre les 4 juillet et 19 août 2003. L'accès au terrain s'est fait en bateau depuis le village de Pangnirtung. Par la suite, l'équipe circulait à pied de façon autonome. La figure 10 illustre les déplacements qui ont été faits dans le cadre de la campagne de terrain. Trois secteurs différents furent visités. Les sections qui suivent les décrivent sommairement.



Figure 10: Les déplacements qui ont été faits par l'auteur dans le PNC Auyuittuq et ses environs entre le 4 juillet et le 19 août 2003

Les secteurs visités :

- la vallée Akshayuk, au centre de l'image ;
- le complexe glaciaire Tirokwa - Fork Beard, à droite de la vallée Akshayuk ;
- la vallée Naqsaq, dans la partie inférieure gauche de l'image.

2.2.1. La vallée Akshayuk

Longue de 97 km et d'une largeur moyenne de 4 km, la vallée Akshayuk traverse la péninsule de Cumberland de part en part. Elle forme un col à une altitude d'environ 380 m, à l'endroit où deux plans d'eau importants, les lacs Summit et Glacier, forment les têtes des eaux pour les rivières drainant chacune des moitiés de la vallée. La portion nord de la vallée est drainée par la rivière Owl, qui se jette dans la mer de Baffin. La portion sud de la vallée est parcourue par la rivière Weasel, qui se jette dans la baie de Cumberland. Creusée jadis par les glaciers en bordure de l'Inlandsis laurentidien (Wilson, 1976), la vallée Akshayuk prend aujourd'hui une forme en auge typique et est profondément encaissée entre des sommets qui atteignent les 2 000 m (figure 11). D'imposants talus d'éboulis et de hautes moraines encombrant le fond de la vallée sur la majorité de sa longueur. Plusieurs dizaines de vallées suspendues s'y déversent. Les phénomènes fluvioglaciaires y sont très actifs : épandages, chenaux anastomosés, lacs proglaciaires, etc. La vallée Akshayuk est le secteur le plus visité et le plus étudié du parc.

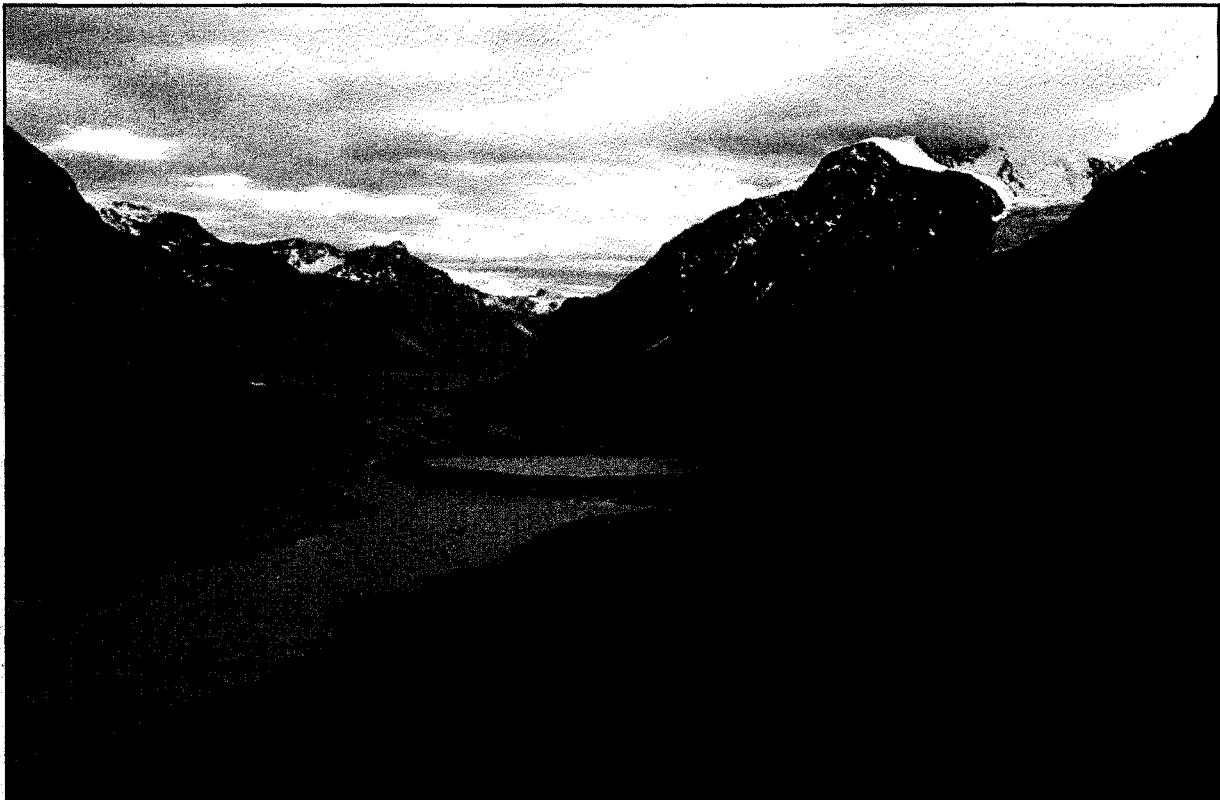


Figure 11: Une partie de la vallée Akshayuk, vue vers le sud depuis les chutes Schwarzenbach (66°30'14"N 65°31'12"O)

L'échelle est donnée par le lac proglaciaire au centre de l'image (Crater Lake) : diamètre de 1 km environ.

2.2.2. La vallée Naqsaq

La vallée Naqsaq est sise au sud-ouest du parc, à environ 10 km de l'entrée sud du parc, située à la tête du fjord de Pangnirtung (figure 10). Contrairement à la vallée Akshayuk, qui est à basse altitude, le fond de la vallée Naqsaq se maintient partout à plus de 400 m d'altitude. C'est aussi une vallée plus large et plus évasée que la vallée Akshayuk. Ses flancs ne présentent ni falaises, ni talus d'éboulis. Les phénomènes fluvioglaciaires y sont moins dynamiques. Les affleurements rocheux sont beaucoup moins fréquents. Le réseau hydrographique y est composé de petits lacs et de ruisseaux. À l'inspection de l'image satellitaire, on remarque aussi que la végétation de la vallée Naqsaq est beaucoup plus représentative des collines du secteur ouest du parc que ne l'est la végétation plus verdoyante de la vallée Akshayuk. Enfin, les hauteurs de la vallée Naqsaq sont typiques des vastes espaces non-végétalisés qui caractérisent de grandes portions du territoire à l'étude (figure 12).



Figure 12: La vallée Naqsaq (66°19'N 65°44'O) vue vers le nord-ouest depuis son flanc sud

2.2.3. Le complexe glaciaire Tirokwa – Fork Beard

Le complexe glaciaire Tirokwa – Fork Beard comporte trois glaciers d'une longueur d'environ 12 km chacun drainant un bassin glaciaire d'environ 80 km² (figure 10). Partageant une même zone d'accumulation, ces glaciers s'écoulent dans trois directions opposées. Jouxant la vallée Akshayuk entre les monts Sandcastle et Breidablik, ce secteur présente un paysage de crêtes, de pics et de cirques typique de la portion sud-est du parc (voir figure 13).



Figure 13: Le glacier Fork Beard, vu vers le sud-est depuis le flanc est du mont Thor (66°32'N 65°19'O)

2.3. Échantillonnage de la végétation

Les sections qui suivent présentent la façon dont ont été choisis et obtenus les relevés-échantillons qui ont servi pour la classification, par ordinateur, du couvert végétal de l'image satellitaire utilisée. La sélection de sites d'échantillonnage en télédétection est abordée dans plusieurs manuels de référence en la matière (e.g. Jensen, 2005; Congalton *and* Green, 1999; Lillesand *and* Kiefer, 2000). On y souligne que la stratégie d'échantillonnage aura un effet prépondérant sur la crédibilité qu'on pourra accorder à tout projet de classification. Sur ce point, les auteurs reconnaissent volontiers la robustesse des approches purement statistiques. Ceci étant dit, ils insistent aussi sur la nécessité de parvenir à un compromis à la fois acceptable du point de vue statistique et réalisable sur le plan pratique. Le sujet donne alors lieu à diverses nuances. Nous aborderons ici ces trois points plus en détails.

2.3.1. L'unité d'échantillonnage

Avant d'aborder la sélection proprement dite des échantillons, il importe de définir l'unité d'échantillonnage qui est utilisée. Par « unité d'échantillonnage », on entend la cellule dans l'image qui servira d'échantillon à l'entraînement ou à la validation de la classification. L'unité d'échantillonnage peut prendre plusieurs formes. Souvent il s'agit du pixel ou d'un groupe de pixels, mais de plus en plus, le polygone s'impose comme unité d'échantillonnage (Congalton *and* Green, 1999). Comme nous l'avons vu plus haut, le cas qui nous intéresse consiste en la classification d'une image qui aura d'abord été « segmentée ». La segmentation est une opération de traitement d'image menant à la délimitation de nombreux petits polygones. Cette étape a pour avantage de créer des unités d'échantillonnage qui :

1. délimitent de façon plus naturelle des composantes du paysage que ne peuvent le faire le pixel ou des groupes de pixels strictement quadrangulaires ;
2. sont assez grandes pour ne pas souffrir d'erreurs d'assignation liées à la précision positionnelle de l'image et du GPS ;
3. offrent des options de classification additionnelles liées à la forme et la texture spectrale interne des polygones.

Au moment de segmenter une image, il faut tenir compte du niveau de perception auquel nous place le type d'image dont on traite. En effet, les résolutions spatiales et spectrales des images qu'on utilise ont un effet prépondérant sur la portée thématique de leur analyse. Dans notre cas, la segmentation de l'image avait pour objectif de livrer des polygones reflétant les patrons de végétation les plus fins qu'on puisse percevoir dans l'image ETM⁺ du PNC Auyuittuq. De par la taille des pixels de cette image (900 m² par pixel pour les bandes en couleurs), on comprend que les patrons les plus fins qui s'en dégagent sont constitués de cellules d'au moins quelques milliers de mètres carrés. Nous sommes alors à même de mieux comprendre la nature exacte des patrons de végétation qu'une image ETM⁺ nous permet de cartographier. En effet, la végétation de la toundra peut être perçue à diverses échelles. La dimension des unités cartographiques employées est la variable qui fixe le niveau de perception écologique de la carte finale.

Puisque la flore de la toundra est de petite taille, le niveau de perception de l'observateur sur le terrain peut être tout aussi miniature. Par exemple, l'abri qu'offre un simple bloc rocheux peut s'avérer critique pour la végétation de la toundra : du côté sous le vent de celui-ci, la végétation pourra être dense et grasse alors qu'à quelques centimètres de là, l'érosion éolienne dénude le sol au point d'en polir la pierre. À l'inverse, on pourra remarquer, à l'échelle du paysage, l'effet très net de l'altitude sur la gradation de divers paramètres végétaux le long des immenses pentes. Plusieurs facteurs concurrents contribuent ainsi au contrôle de la répartition de la végétation dans la toundra. Il en résulte un continuum de niveaux de perception plus ou moins imbriqués les uns dans les autres et allant du microsite jusqu'aux biomes continentaux.

Le présent projet nécessitait une segmentation fine reflétant bien les patrons de végétation dans l'image ETM⁺. Au terme de plusieurs tests empiriques, un niveau de segmentation jugé optimal a été choisi. Au niveau retenu, on obtient des unités végétales de 3,2 ha en moyenne (soit l'équivalent de 180 m par 180 m sur le terrain, ou 36 pixels). En ayant comme barème cette dimension de polygone, nous comprenons que l'unité d'échantillonnage végétale ne correspond ni au microsite (la végétation poussant à l'abri sous le vent d'un bloc) ni au paysage (le couvert végétal d'un versant de vallée), mais bien à un niveau de perception intermédiaire (figure 14). Nous remarquerons que ce niveau s'apparente, par ses dimensions, à la « phase écologique » telle que définie par le concept de l'inventaire écologique dans les parcs nationaux (annexe 1).

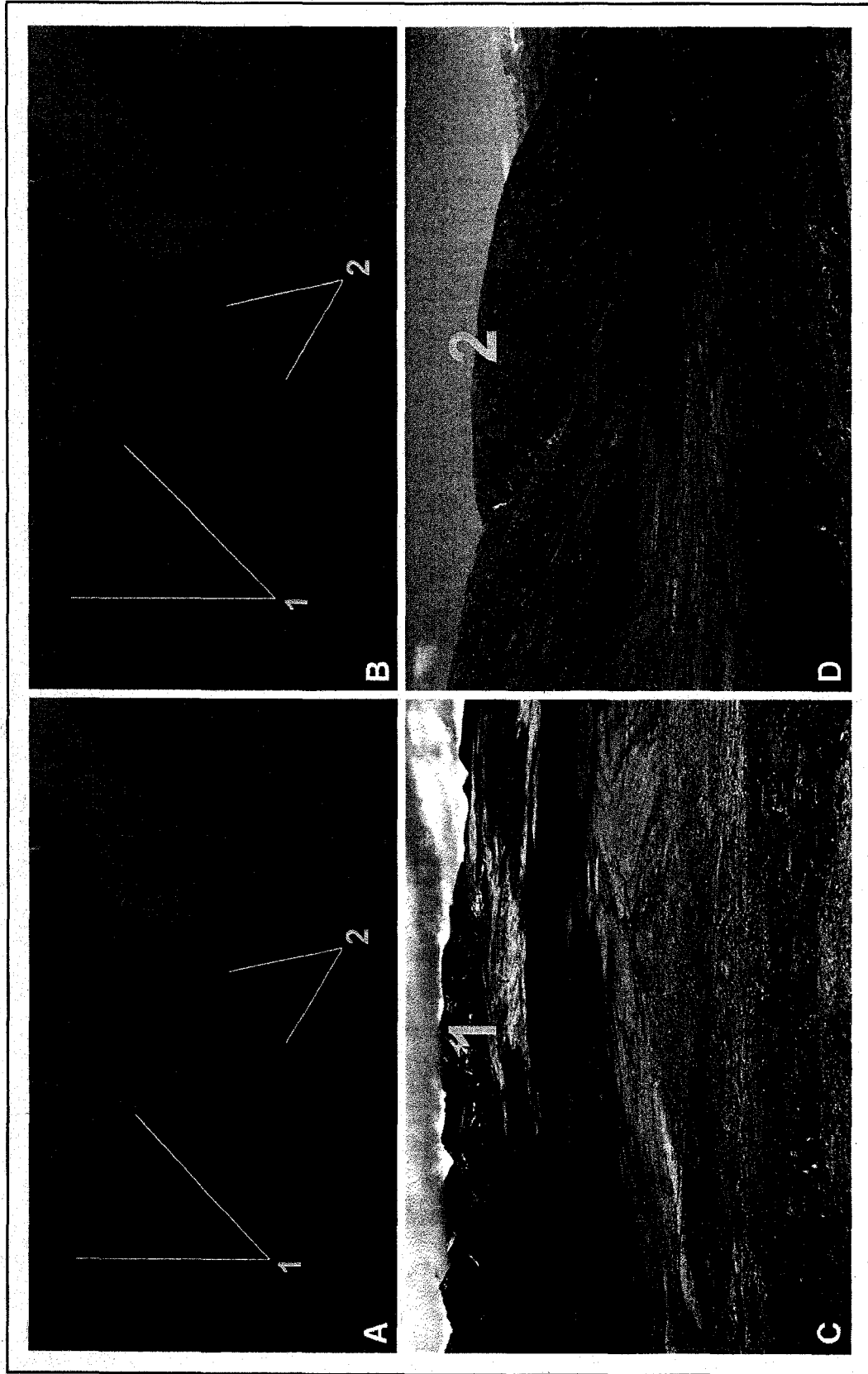


Figure 14: Imagerie ETM⁺ (donnée en A) montrant l'endroit où la vallée Naqsaq rencontre le fjord de Pangnirtung

On y reconnaît divers patrons de végétation. La prise de vue 1 (C) montre le fond de vallée, sur lequel se détache entre autres des terrasses au couvert lichéneux. La prise de vue 2 (D) montre la végétation plus verdoyante qui occupe les flancs du fjord. La segmentation de l'image (B) a été faite à un niveau jugé adéquat pour représenter ces patrons de végétation. Ces objets primitifs constituent l'unité d'échantillonnage pour la classification de l'image.

2.3.2. Techniques photographiques pour la collecte de relevés de la végétation

De récentes études réalisées pour le compte de Parcs Canada dans le PNC Auyuittuq (Deshaye, 2000; Manseau *et al.* 2003) décrivent des classes de végétation jugées adéquates pour une cartographie du couvert végétal par l'analyse d'images ETM⁺ de Landsat. Cette classification s'appuie sur des relevés botaniques détaillés effectués dans le parc entre 1999 et 2002. Ces travaux se basaient sur des inventaires botaniques conventionnels sur le terrain, mais ont aussi inclus une autre technique, moins éprouvée, qui consistait à prendre des photographies verticales de quadrats de végétation, pour analyse subséquente en laboratoire. Pour avoir comparé les méthodes entre elles, Deshayé (2000) note que la technique photographique fait économiser beaucoup de temps sur le terrain, mais remarque que l'inventaire sur le terrain permet d'identifier un plus grand nombre d'espèces (30 %) que l'inventaire photographique. Il souligne cependant que les espèces additionnelles ne comptent que pour une très faible partie du couvert végétal et que pour les strates principales (lichens, mousses, graminoïdes, herbes et arbustes), les pourcentages de couverture ne diffèrent pas significativement selon qu'on fasse l'inventaire sur le terrain ou qu'on analyse les photographies en laboratoire. Or, comme nous le verrons plus loin, c'est précisément le couvert relatif de chacune des strates qui nous intéresse. En regard des conclusions de Deshayé (2000) et des objectifs de notre travail, il nous a donc semblé opportun de nous limiter à la technique photographique pour échantillonner la végétation du parc. En effet, compte tenu de nos faibles connaissances en botanique et de nos effectifs limités sur le terrain, l'échantillonnage par photographie s'avérait le seul moyen de recueillir un nombre suffisant de relevés de référence pour l'analyse et la classification de la végétation.

Comme le soulignent Congalton et Green (1999), il est important d'adapter la prise de données de références sur le terrain à la dimension de l'unité d'échantillonnage sélectionnée :

Indépendamment de l'unité d'échantillonnage, les données de référence devraient être obtenues à une échelle correspondant à l'unité cartographique minimale de la carte qui est générée à partir des données de télédétection. [...] Il n'est pas possible de bien représenter un pixel de 30 m par 30 m avec un seul quadrat de 0,05 ha, tout comme il n'est pas possible de bien représenter un pixel AVHRR de 1,1 km par 1,1 km à l'aide d'un pixel de 30 m par 30 m. (traduction libre de Congalton et Green, 1999, p. 16)

Rappelons que le présent projet fait appel à la segmentation d'image comme étape initiale de l'analyse d'image. Les polygones résultant de cette segmentation constituent les unités d'échantillonnage du projet. De manière à respecter les conditions citées ci-haut, il importait donc d'obtenir les données de référence adaptées à la dimension de ces polygones. Plus exactement, on dira qu'il fallait obtenir des échantillons illustrant la diversité des formes de végétation qui peuvent être cartographiées à l'aide de cellules d'environ 3,2 ha dans le paysage. C'est dans cette optique qu'ont été adaptées les méthodes d'échantillonnage photographique de la végétation sur le terrain, que nous décrirons plus en détail ici.

Diverses techniques d'échantillonnage photographiques au sol ont été testées pour obtenir des données de référence sur la végétation. Une des techniques que nous avons utilisées consistait à faire l'échantillonnage de chacun des sites homogènes à l'aide de plusieurs photographies verticales. Les photographies, illustrant environ 1 m² du terrain, étaient espacées entre elles selon une grille régulière couvrant une bonne proportion du site visé (rappelons que chaque site, ou unité d'échantillonnage, mesure en moyenne 3,2 ha). Par cette méthode, on obtient d'abord de l'information détaillée sur les espèces présentes. Puis, en examinant l'ensemble des photographies d'un site, on parvient à se prononcer en détail sur les pourcentages et la variabilité dans la couverture du sol pour chacune des strates (mousses, lichens, etc.) à l'échelle du site. Cette technique requiert beaucoup de photographies et est lente sur le terrain (respect des azimuts de la grille, mesure exacte des distances, réalisation de croquis, etc.). Seuls quelques sites de la vallée Akshayuk ont été échantillonnés de la sorte. Un exemple est donné à la figure 15.

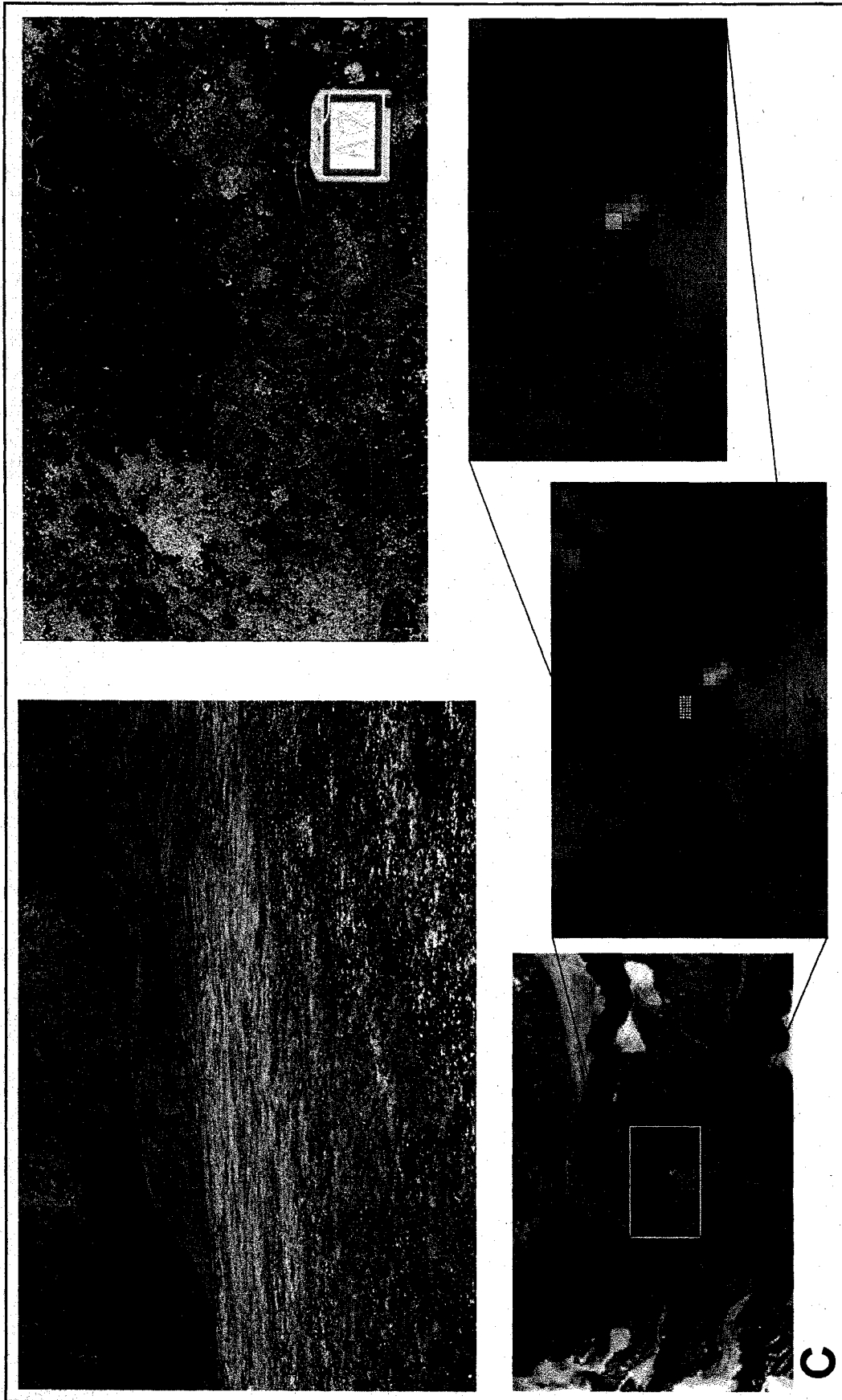


Figure 15: Quadrillage photographique d'un site de végétation

Ce site (aperçu général donné en A) a fait l'objet de 32 photos verticales telles (exemple en B). Situé au fond de la vallée Akshayuk (C), le site a été quadrillé avec 4 rangées de 8 photos verticales (D). Le couvert moyen des différentes strates végétales noté dans les 32 photos permet de décrire la végétation de l'objet d'image surligné en E.

Une autre des techniques d'échantillonnage photographique que nous avons employée impliquait de prendre, à intervalles fixes, des photographies verticales sur des transects parallèles le long de grands gradients altitudinaux. Après quelques essais, cette technique a été jugée inadaptée à la nature du terrain. En effet, les gradients altitudinaux ne se reflétaient pas de manière évidente dans les caractères physiologiques de la végétation visible sur les photographies verticales (environ 1 m² au sol), qui semblaient plus sensibles à la nature du terrain à l'échelle du microsite. Or les photographies verticales ne rendaient compte ni de la nature du terrain, ni de la mosaïque des microsites à l'échelle de l'unité d'échantillonnage.

Pour les raisons évoquées ci-haut, l'utilité de la photographie verticale comme technique d'échantillonnage a été remise en question au fil des travaux de terrain. En effet, bien qu'utiles pour décrire en détail la composition floristique de microsites donnés, les grilles de photographies verticales doivent comporter de nombreuses images pour bien décrire un seul polygone de l'image ETM⁺, et exigent aussi que les images soient recueillies d'une manière systématique, ce qui demande du temps. Par comparaison avec la photographie verticale, la photographie oblique semblait procurer plusieurs avantages. D'abord elle donne une image générale de la nature du site photographié (homogénéité, micro et macrotopographie, proximité des écotones, etc.). À l'avant-plan de la photographie, l'estimation du couvert des principales strates végétales peut couvrir une surface de plusieurs mètres carrés. Et dans la mesure où l'arrière-plan de la photographie montre des éléments distinctifs du paysage, il est aussi possible de mieux situer l'échantillon dans l'espace (figure 16 et 17). Cette information contextuelle s'est avérée très utile vu l'imprécision positionnelle des données, qui atteint parfois 100 m, particulièrement en altitude. Dans le cas de sites très homogènes, une seule photographie suffit pour permettre de classer le site sans équivoque. Dans le cas de sites moins homogènes, deux, parfois trois photographies ont pu être prises, dans différentes directions. Cette approche nous évitait d'avoir à utiliser pour chacun des sites le ruban à mesurer, les azimuts et les photographies multiples. Le temps ainsi économisé nous permettait de visiter un plus grand territoire et d'obtenir des relevés photographiques pour un bien plus grand nombre de sites-échantillons. L'économie de temps que représentait l'utilisation de la photographie oblique était salutaire à cet égard. Compte tenu des avantages importants que comporte la photographie oblique, c'est la technique que nous en sommes venus à

utiliser le plus souvent. À partir de la troisième semaine de travaux sur le terrain, c'est uniquement cette technique qui a été employée.

La figure 16 illustre le problème que peut poser l'assignation aveugle des échantillons sur la seule base des coordonnées géographiques données par le GPS et l'image satellitaire. Dans cet exemple, une bande de végétation colonise le bas d'une grande pente juste au nord de la moraine du glacier Tirokwa (66°27'42"N 65°26'11"O). Environ 1 ha y a été échantillonné à l'aide d'une grille de 16 relevés photographiques de la végétation. La localisation des coins de la grille a été enregistrée sur le terrain à l'aide d'un GPS. Une fois reportées sur l'image satellitaire, ces coordonnées révèlent que l'erreur du GPS et combinée à celle de l'image est de plusieurs pixels. Ceci est mis en évidence par la présence toute proche de la moraine. En effet, en reportant directement les données du GPS sur l'image satellitaire, on remarque que la grille chevauche la moraine. Pourtant, le site échantillonné était en réalité situé dans la zone de végétation au nord de cette moraine. Sans cette connaissance personnelle du site, corroborée par les photos obliques, nous aurions pu créer un échantillon avec le mauvais objet dans l'image segmentée, ce qui aurait eu de graves conséquences sur la qualité de cet échantillon. Pour rectifier ce type de problème, il nous fut parfois nécessaire de resituer certains échantillons au jugé, de manière à associer correctement la donnée de terrain au segment approprié du projet. Notons que l'altitude de ce site est de 750 m, ce qui explique en partie l'erreur positionnelle.

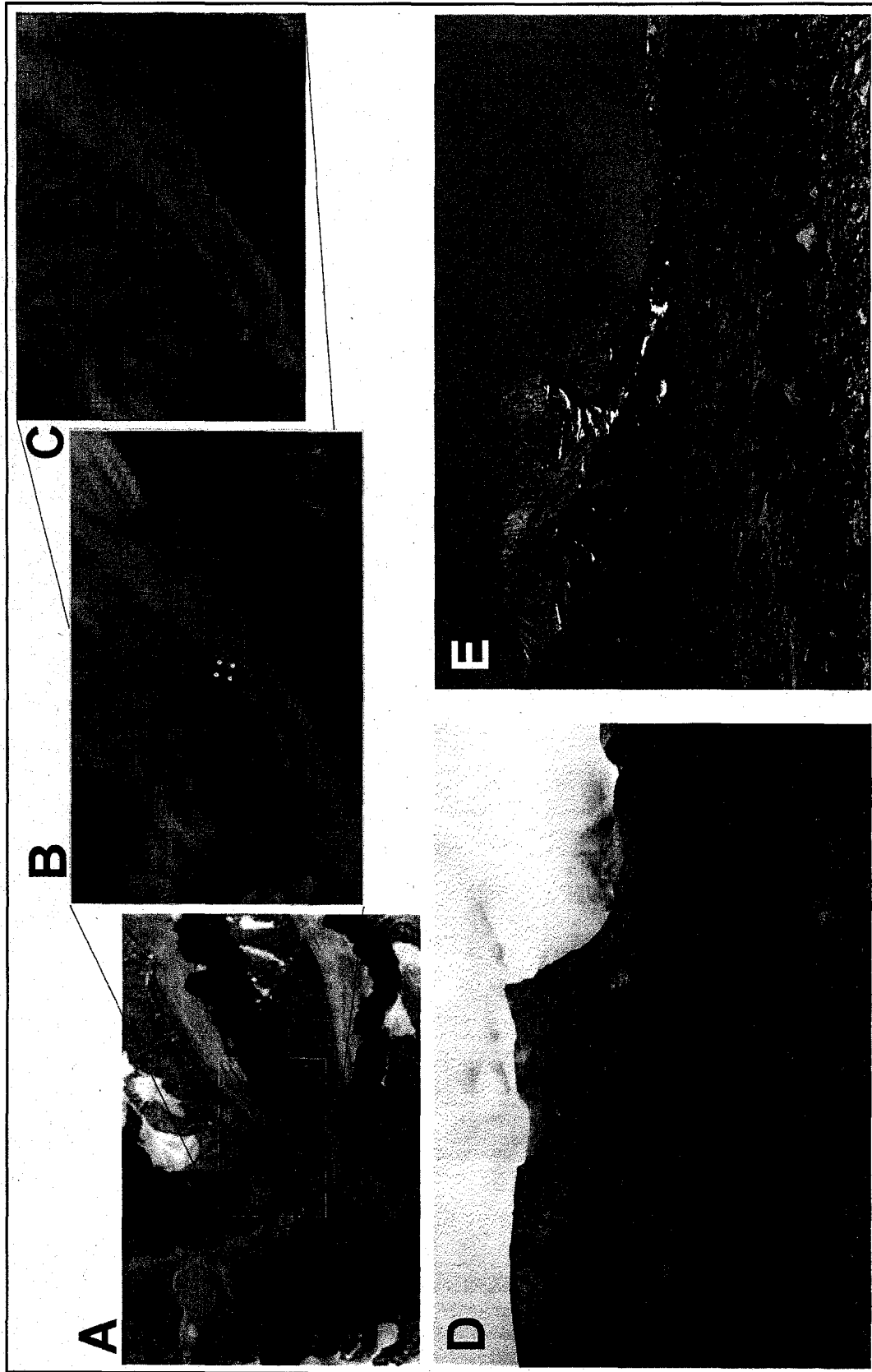


Figure 16: Erreurs sur le géo-positionnement des données pour un site de relevés photographiques de la végétation

A: la rencontre des vallées Tirokwa et Akshayuk B: moraine Tirokwa et données de positionnement des coins de grille

C: le polygone utilisé, sélectionné au jugé D: la position réelle du site (vert)

E: aperçu général du site échantillonné

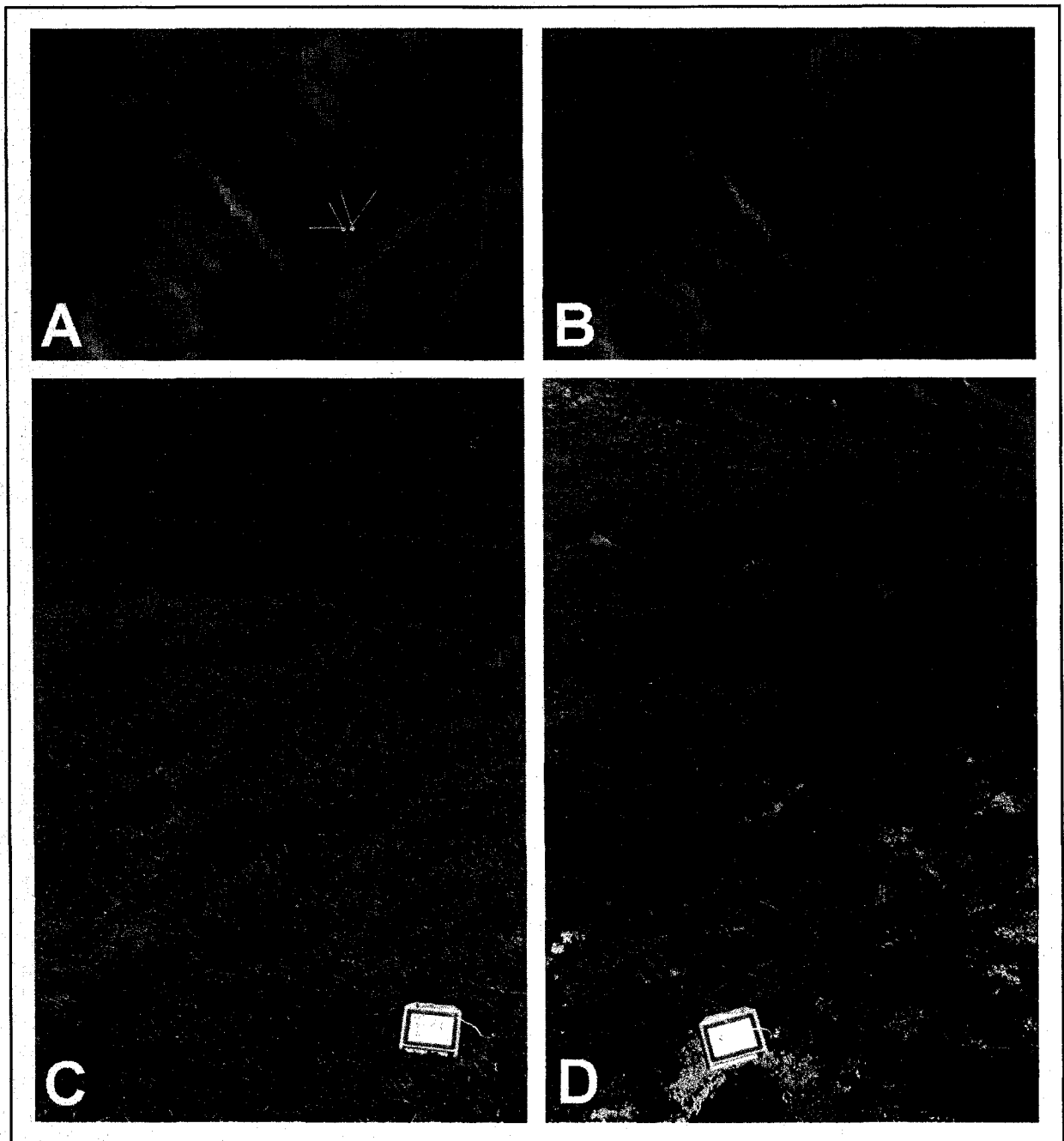


Figure 17: L'avantage de la photographie oblique

En A, on reconnaît la traînée blanche de la chute Schwarzenbach ($66^{\circ}30'14''N$ $65^{\circ}31'12''O$) et les chenaux turbides de la rivière Weasel. Entre les deux se trouve un petit milieu humide dont les photos en C et D donnent des relevés par photographie oblique (les prises de vue sont délimitées en jaune). Les relevés offrent un aperçu général du site : la composition végétale peut être observée à l'avant-plan alors que l'arrière-plan nous permet de situer le site dans son contexte. Malgré l'imprécision positionnelle combinée du GPS et de l'image ETM⁺, nous pouvons sans équivoque associer de tels relevés à un des segments de l'image (B).

2.4. Sélection des sites d'échantillonnage

Comme le mentionne Jensen (2005), les méthodes statistiques les plus robustes ont généralement comme prémisses que les données de référence ont été obtenues par un échantillonnage aléatoire simple. Dans notre cas, ce type d'échantillonnage aurait présenté plusieurs inconvénients liés à la sous-représentation des classes marginales, à la géolocalisation des relevés et à l'inaccessibilité des sites. En effet, l'échantillonnage aléatoire simple a pour inconvénient de sous-échantillonner les classes moins étendues (Lillesand *and* Kiefer, 2000). De plus, des relevés localisés au hasard se seraient souvent retrouvés près des limites des polygones de l'image segmentée. Or, comme l'erreur cumulée du GPS et de l'image satellitaire est d'environ trois pixels et que les polygones ne mesurent que six pixels par six pixels en moyenne, il aurait alors été difficile d'assigner correctement les relevés aux polygones correspondants dans l'image. Enfin, on comprendra qu'une répartition aléatoire de points d'échantillonnage sur le territoire du parc en entier aurait posé d'insurmontables problèmes d'accessibilité compte tenu de la nature et de l'étendue du terrain.

Pour pallier les problèmes soulevés ci-haut, plusieurs solutions étaient envisageables. Pour résoudre le problème d'inaccessibilité des sites tirés au hasard, une approche raisonnée permet de grandes économies sans compromettre de façon inacceptable la représentativité des échantillons. Congalton et Green (1999) suggèrent de fixer une limite à la zone d'échantillonnage sur la base de critères d'accessibilité, tout en insistant sur la nécessité de minimiser les biais qu'une telle approche peut comporter. Pour remédier à la confusion liée aux erreurs de géolocalisation des données, Lillesand et Kiefer (2000) proposent de ne situer des échantillons que là où ce problème ne se pose pas, soit au centre plutôt qu'en bordure des zones-échantillons. Puis, pour assurer une représentation adéquate tant des classes dominantes que des classes marginales, Jensen (2005) évoque le recours possible à la stratification, où un effort d'échantillonnage minimal est garanti pour chacune des catégories d'échantillons. Examinons maintenant comment ces considérations ont été prises en compte dans la sélection des sites d'échantillonnage sur le terrain.

2.4.1. Accessibilité et potentiel d'échantillonnage

Tout en gardant un souci pour la représentativité et l'exhaustivité de l'effort d'échantillonnage, la collecte de relevés photographiques a dû être planifiée en tenant compte des capacités de l'équipe de terrain, qui circulait à pied. Les déplacements de l'équipe de terrain consistaient en excursions successives d'environ une semaine dans un rayon d'environ 30 km autour d'une cache à nourriture pouvant être déplacée au besoin. Ce rayon d'action et la durée de la saison végétative nous ont permis de délimiter à l'avance les secteurs où pourrait se faire l'échantillonnage, compte tenu de notre voie d'accès, le fjord de Pangnirtung. Outre les vallées glaciaires sans végétation, quatre secteurs s'avéraient alors accessibles : la portion sud de la vallée Akshayuk, la vallée Qijuttaaqanngittuq, la vallée Naqsaq et une vallée sans nom au sud du Mont Overlord. Bien que de portée limitée, les déplacements à pied permettent d'atteindre une grande variété de terrains différents (contrairement aux aéronefs, dont les déplacements en terrain montagneux comporte des contraintes). Dans la planification des déplacements, une attention particulière a été accordée à la représentation complète des divers types de terrain. Entre autres, il nous a paru important de ne pas limiter l'échantillonnage à la vallée Akshayuk, mais de l'étendre aux vallées suspendues qui la dominent et dont la végétation s'apparente à celle des plateaux de la portion sud-ouest du parc. Par ailleurs, des contraintes particulières ont dû être prises en considération dans la planification et la réalisation des parcours d'échantillonnage, notamment : les zones d'ombres sur l'image satellitaire, les limites du matériel technique, les crues soudaines des torrents glaciaires, les pentes instables, les secteurs fréquentés par les ours polaires, les glaciers crevassés, etc. C'est d'ailleurs en raison de l'accès jugé dangereux que la vallée Qijuttaaqanngittuq a été abandonnée au profit de la vallée Naqsaq. Voyons maintenant comment s'est faite la localisation exacte des relevés photographiques de la végétation.

2.4.2. Localisation des relevés et précision positionnelle des données à référence spatiale

En raison des risques de confusion liés à la précision positionnelle des données en cause, il était important de localiser les échantillons de manière non-équivoque par rapport aux bordures apparentes dans la végétation. En effet, la précision des ortho-images ETM⁺ est estimée à 50 m dans l'Arctique, voire pire dans les régions montagneuses (annexe 3). À cette erreur s'ajoutent les

imprécisions sur les données GPS, qui dans notre cas pouvaient atteindre les 30 m. L'erreur combinée correspond donc à une erreur de deux à trois pixels sur la géolocalisation des échantillons. Or, puisque les dimensions moyennes des unités d'échantillonnage (polygones de 6 pixels par 6 pixels) n'étaient que d'environ deux fois l'erreur, il devenait important que les échantillons soient situés autant que possible au centre des unités d'échantillonnage. Dans ce contexte, il convenait donc de ne pas laisser au hasard la localisation des relevés photographiques à obtenir, mais bien d'en fixer l'endroit une fois sur le terrain. Rappelons que l'utilisation de la photographie oblique est d'un grand secours à cet effet, car elle permet au photographe d'orienter la prise de vue vers la partie la plus représentative du site tout en illustrant la position des écotones par rapport à l'unité d'échantillonnage (figure 18).

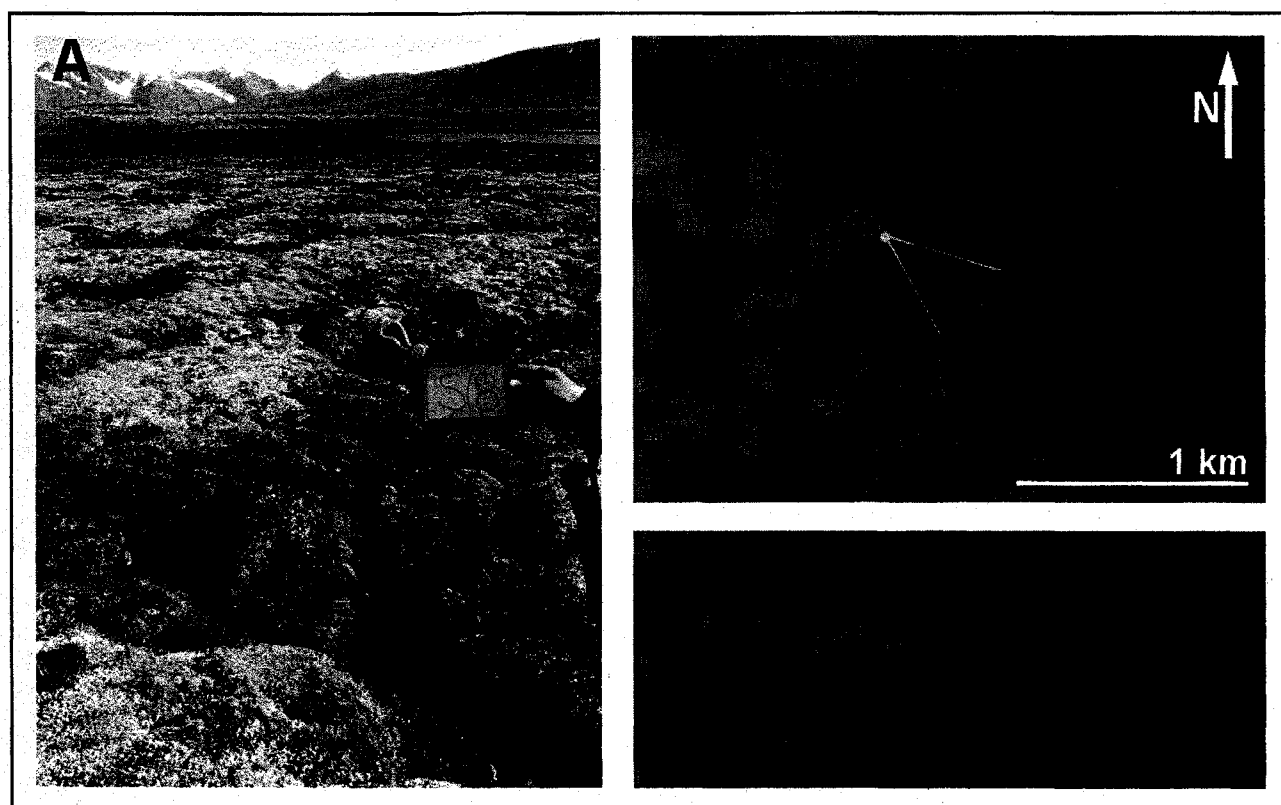


Figure 18: Unité d'échantillonnage, bordures et localisation du relevé de terrain au site S18

Le site S18 ($66^{\circ}20'05''$ N $65^{\circ}44'45''$ O) est une terrasse dominée par un couvert lichéneux (A). À l'arrière plan, on voit que la végétation change à proximité du plan d'eau. Cette transition se voit nettement sur l'image satellitaire (B) (la prise de vue est délimitée en jaune). Ces informations nous confortent dans la sélection du segment (C) en tant qu'échantillon pour ce type de végétation.

2.4.3. Représentativité et éléments de stratification de l'échantillonnage

Sans être un échantillonnage strictement stratifié, nous pouvons dire que la collecte de relevés photographiques s'est faite de manière à représenter un certain nombre de classes connues a priori. Au moment d'entreprendre les travaux sur le terrain, nous avons en effet pris bonne note de la classification végétale proposée pour le PNC Auyuittuq par Deshayé (2000). Au nombre de neuf, ces classes avaient été élaborées expressément pour servir à la classification d'images ETM⁺ Landsat. Sans en connaître à l'avance la répartition sur le territoire, nous avons néanmoins fait un effort pour rechercher sur le terrain suffisamment d'exemples homogènes des couverts végétaux qu'avait décrits cet auteur : dénudés de haute altitude, toundra humide, communauté de jeune succession, toundra à lichens, etc. Par « exemples homogènes », on entend ici des sites dont les couvertures respectives des différentes strates végétales sont relativement continues dans l'espace, et ce sur une superficie suffisamment grande pour que le site apparaisse comme un groupe homogène de plusieurs pixels dans l'ortho-image satellitaire.

La recherche de sites homogènes s'est faite en partie avant le début des travaux, puis s'est poursuivie sur le terrain. En effet, des interprétations de diverses photographies aériennes et d'images satellitaires nous ont permis d'évaluer sommairement la diversité et la répartition du couvert végétal sur le territoire, de manière à en cibler des secteurs d'intérêt. Une fois sur place, l'observation directe de ces secteurs (particulièrement depuis des points de vue situés en altitude) nous a permis de préciser le plan des parcours à réaliser pour échantillonner et assurer une représentation adéquate de la diversité des couverts végétaux présents.

L'échantillonnage réalisé pour l'entraînement de la classification végétale comportait donc une certaine stratification. On doit cependant le qualifier de plus systématique qu'aléatoire. Comme le suggèrent Lillesand et Kiefer (2000), un échantillonnage systématique (plutôt qu'aléatoire) peut être valable en début de projet, en complétant subséquentement ces données d'entraînement par des données de validation obtenues par une approche aléatoire stratifiée une fois la classification complétée. C'est une solution que mentionne aussi Jensen (2005) en soulignant qu'il est difficile d'adopter une approche purement stratifiée en début de projet, alors que les classes

finales ne sont pas confirmées, car c'est seulement lorsque les résultats de classification sont connus qu'on peut les valider par un véritable échantillonnage.

Il faut préciser ici que le présent projet prévoyait deux saisons de terrain : la collecte de données d'entraînement faite en 2003 devait être suivie d'une campagne de validation en 2004. La seconde saison de terrain ayant été annulée, la validation de la classification a dû se faire à même les échantillons destinés à son entraînement. Or, puisque la collecte des relevés de 2003 n'incorporait pas un réel souci pour l'échantillonnage aléatoire, nous pouvons nous questionner sur la représentativité des échantillons utilisés pour la validation. Notons que ce problème ne se pose pas pour les classes non-végétales, qui ont été validées par photo-interprétation.

2.5. Résultats de la campagne de terrain

Au cours des sept semaines passées sur le terrain, quelques 350 km furent parcourus à pied. La plus grande partie des déplacements s'est fait dans la moitié sud de la vallée Akshayuk. Cette portion de la campagne nous a permis de visiter les complexes ripicoles de la rivière Weasel, divers talus d'éboulis actifs, des grandes pentes végétalisées à basse et moyenne altitude, des complexes morainiques, des secteurs de déposition éolienne, des aueis, des milieux humides, des plaines d'alluvions, etc. Puis, nous avons marché environ 60 km sur les hauts plateaux de la vallée Naqsaq, au sud du parc. Là, nous avons pu observer un réseau hydrographique plus complexe, des terrasses au couvert lichénique très dense, des complexes végétaux de haute altitude, des grandes étendues de felsenmeer, divers phénomènes périglaciaires, etc. Enfin, quelques 60 km ont été parcourus sur divers glaciers, où nous avons pu examiner de près des langues de glace ; des moraines terminales, latérales et médianes ; des névés ; des crevasses et moulins ; des glaciers de cirque et nunataks ; des falaises ; etc.

La campagne de terrain nous a permis d'effectuer 478 relevés photographiques du couvert végétal sur 299 sites géopositionnés. À ces relevés s'ajoutent 50 images prises l'année suivante par une autre équipe sur 23 sites dans la moitié nord de la vallée Akshayuk. Au total, 528 photographies réparties entre 323 sites furent utilisées pour documenter les divers types de végétation présents dans les vallées Akshayuk et Naqsaq. Ces relevés ont procuré des exemples de sites où l'on

pourrait reconnaître les classes végétales décrites préalablement pour le PNC Auyiuttuq (Deshaye, 2000; Manseau *et al.*, 2003).

2.6. Analyse des relevés de végétation

La classification de la végétation proposée pour le PNC Auyiuttuq par Manseau *et al.* (2003) s'appuie sur les caractères physiologiques du couvert végétal. Cette approche s'inscrit dans la continuité des travaux antérieurs concernant la classification végétale pour ce parc (Paradis *et al.*, 1986; Hines *et al.*, 1988; Deshayé, 2000). À ce sujet, Hines *et al.* avancent l'argumentaire suivant:

Notre intention était d'élaborer une classification de la végétation qui soit simple et qui pourrait servir à des études en écologie, en gestion de la faune et en télédétection pour le parc. Idéalement, une telle classification ne devait comporter que quelques classes majeures et devait pouvoir être employée par du personnel du Service des parcs possédant une formation limitée en botanique ou ayant une connaissance de base de la flore locale. La structure de l'habitat (forme de croissance des plantes) et l'étendue du couvert au sol (abondance de végétation) et certains aspects de l'environnement physique sont des attributs majeurs [...] facilement reconnaissables par des non-botanistes et identifiables par télédétection. Conséquemment, ces critères ont été retenus dans l'élaboration de la classification des communautés végétales. (traduction libre de Hines *et al.*, 1988, p. 88)

Une description sommaire des classes de Manseau *et al.* (2003) est donnée au tableau 1, où sont présentés les pourcentages de couverture de cinq strates de végétation au sol : mousses, lichens, arbustes, graminoides et herbacées.

Tableau 1 : Description sommaire des classes de Manseau *et al.* (2003) pour le parc national du Canada Auyuittuq

Ces descriptions ont servi de base à la catégorisation, par classe, des relevés photographiques de la végétation qui ont été effectués sur le terrain. Les pourcentages donnés ici ont été pondérés, de sorte que le total ne peut dépasser 100 %, contrairement aux données présentées dans Manseau *et al.* (2003).

Classe	Description	Couverture des strates (% moyen)				
		lichens	mousses	gramin.	herbes	arbustes
Communauté de lichens et d'arbustes nains (CLAN)	<ul style="list-style-type: none"> - 25 à 55 % de lichens (vs 51 % + pour TLAN) - 15 à 35 % arbustes - végétation moins dense que TLAN (98 vs 163 %) - moins de 20 % de sol nu - sites au drainage modérément bon 	37	29	6	1	25
Communauté ouverte d'arbustes nains et de lichens (COANL)	<ul style="list-style-type: none"> - dominé par les arbustes 15 à 35 % - moins de lichens et de mousses que CLAN - 35 à 55 % de sol nu - plus de 45 % de couvert végétal 	13	12	2	2	26
Complexes de haute altitude (CHA)	<ul style="list-style-type: none"> - couvert végétal inférieur à 30 % - dominé par les mousses et les lichens 	7	7	2	1	9
Prairie de laïches (PL)	<ul style="list-style-type: none"> - couvert élevé de graminoides - couvert élevé de mousses mais très variable - couvert arbustif bas, lichens pratiquement absents - sites saturés en eau mais peu d'eaux libres 	3	36	47	4	11
Toundra d'arbustes nains et de mousses (TANM)	<ul style="list-style-type: none"> - 19 à 47 % d'arbustes, haute variabilité - 12 à 67% de mousses, haute variabilité - drainage modéré 	7	40	4	1	33
Toundra de mousses, d'arbustes nains et de graminoides (TMANG)	<ul style="list-style-type: none"> - dominé par les mousses, peu de lichens et d'herbes - 8 à 35 % de graminoides - non-saturé en eau mais drainage modéré à pauvre 	7	48	14	2	30
Toundra de lichens (<i>stereocaulon</i>) et d'arbustes nains (TLAN)	<ul style="list-style-type: none"> - ouvert végétal de 89 à 100 % - 51 à 90 % lichen dominé par <i>Stereocaulon alpinum</i> - graminoides sur sites secs - arbustes sur sites au drainage modéré 	43	30	4	<1	24
Complexes ripicoles (CR)	<ul style="list-style-type: none"> - perturbations fréquentes - espèces pionnières tels <i>Epilobium latifolium</i> 	1	7	4	3	3

L'analyse des relevés de végétation avait pour but la catégorisation, dans l'une ou l'autre des 8 classes proposées par Manseau *et al.* (2003), de chacun des sites pour lesquels un relevé photographique avait été obtenu. La première étape de cette analyse consistait à estimer le pourcentage de couverture des cinq strates végétales dans chacun des relevés photographiques (figure 19). Suite à cette estimation, il nous a fallu préciser, pour chacun des sites, la classe à laquelle la stratification observée correspondait le mieux. À cet effet, une démarche systématique a été adoptée pour coter la correspondance de chaque relevé à chacune des huit classes possibles. Dans la majorité des cas (160 relevés), il s'en dégage une conclusion claire, où le relevé peut aisément être associé à l'une des classes décrites. Cependant, dans plusieurs cas, nous ne sommes que moyennement confiants de la classification à donner (90 relevés), voire franchement incertains (49 relevés). Seuls les relevés jugés les plus typiques des classes décrites ont été retenus comme échantillons pour l'analyse d'image subséquente. Parmi les 23 sites photographiés dans la portion nord du col d'Akshayuk, 16 sont retenus pour leur correspondance à une des classes décrites.

Les résultats de l'analyse des relevés sont donnés à l'annexe 11.

Avec le recul, et à la suite de l'analyse en laboratoire des photographies prises sur le terrain, nous suggérons que les relevés photographiques qui pourraient être réalisés dans le futur incorporent, pour chaque site, à la fois une ou deux photographies obliques (pour une description générale du site) et une ou deux photographies verticales (pour l'identification précise des espèces présentes). L'ajout de photographies verticales permettrait un meilleur calibrage de l'estimation des pourcentages de couverture des différentes strates.

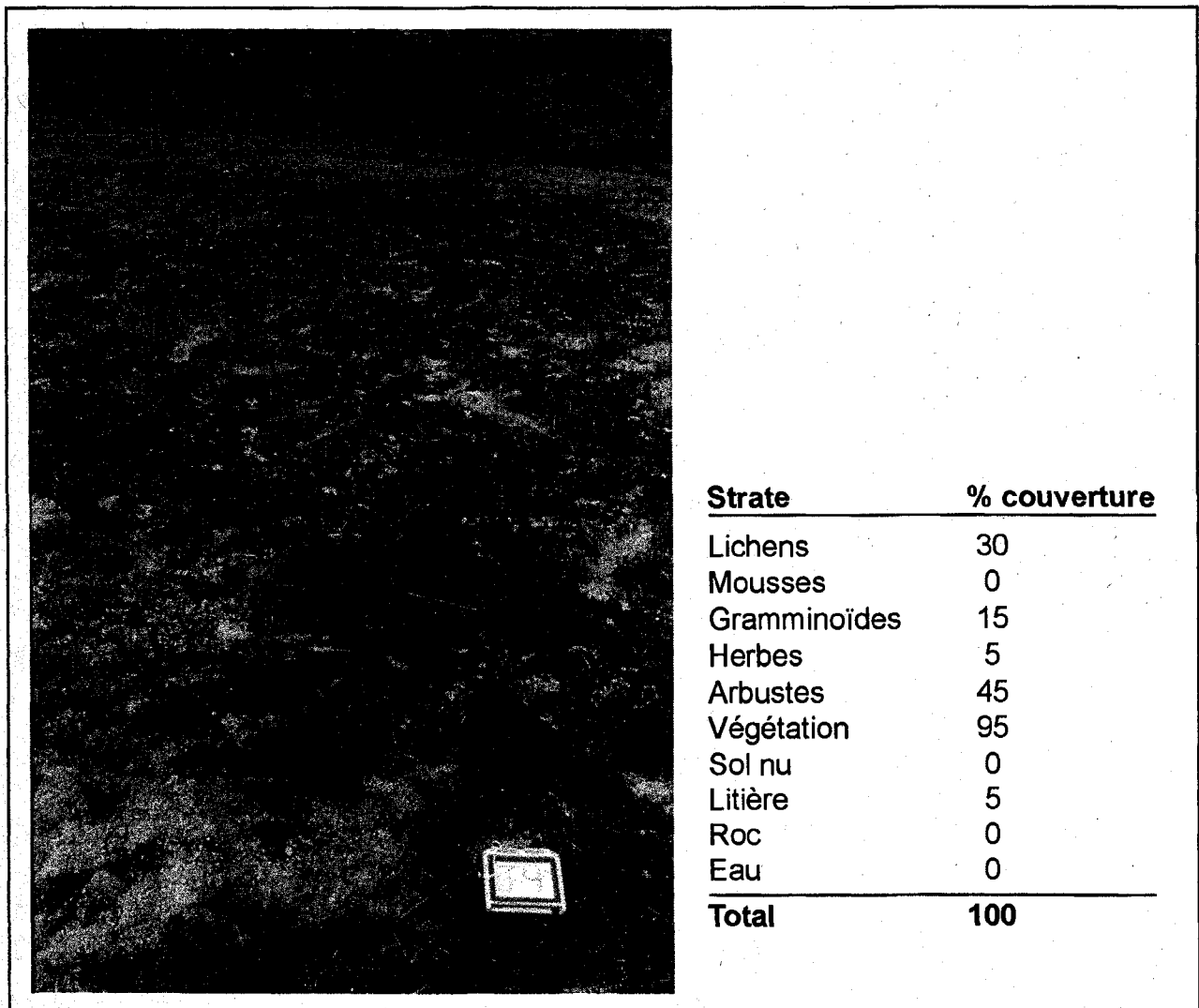


Figure 19: Exemple de relevé photographique de la végétation : le relevé J4

À l'avant-plan, on peut estimer les pourcentages de couvertures des 5 strates principales de la végétation (données au tableau). L'arrière-plan permet d'apprécier les dimensions et topographie du site, il aide aussi au repérage lors de la sélection des échantillons dans l'image Landsat. Ce relevé se classe dans la *Communauté de lichens et d'arbustes nains*.

3. Traitements informatiques préliminaires

La présente section explicite la manière dont les données de référence ont été conjuguées aux fonctionnalités du logiciel eCognition pour livrer une cartographie de la couverture du sol pour la portion sud du PNC Auyittuq et ses environs. La méthodologie est schématisée à la figure 20.

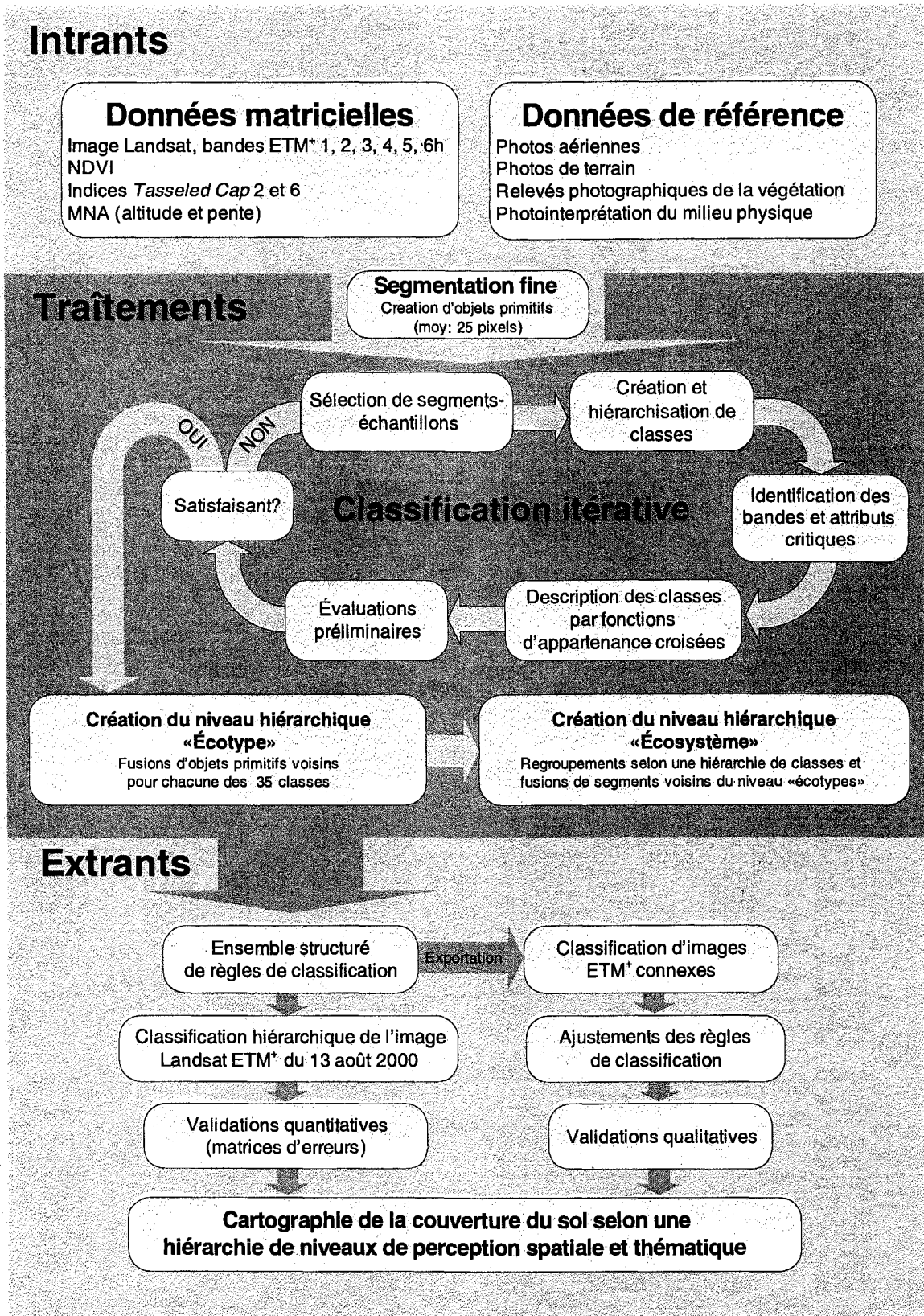


Figure 20: Organigramme méthodologique : principaux intrants, traitements et extrants du projet

3.1. La portion d'image utilisée

En raison de contraintes liées au logiciel eCognition 4.0, il n'était pas possible de réaliser les traitements informatiques sur l'ensemble de l'image satellitaire. En effet, ce logiciel comporte une limite quant au nombre de segments qu'il peut générer. Au niveau de segmentation souhaité, seule une partie de l'image pouvait donc être analysée. Nous avons choisi de limiter notre analyse à la portion de l'image ETM⁺ pour laquelle nous détenions des données de terrain (figure 21). Les données auxquelles nous avons accès sont : 1) celles qu'ont obtenues Manseau *et al.* en 2002, 2) celles tirées de notre campagne de terrain de 2003, puis 3) les relevés photographiques réalisés suivant notre méthode par l'équipe de Bernard Lauriol (Université d'Ottawa) en 2004.

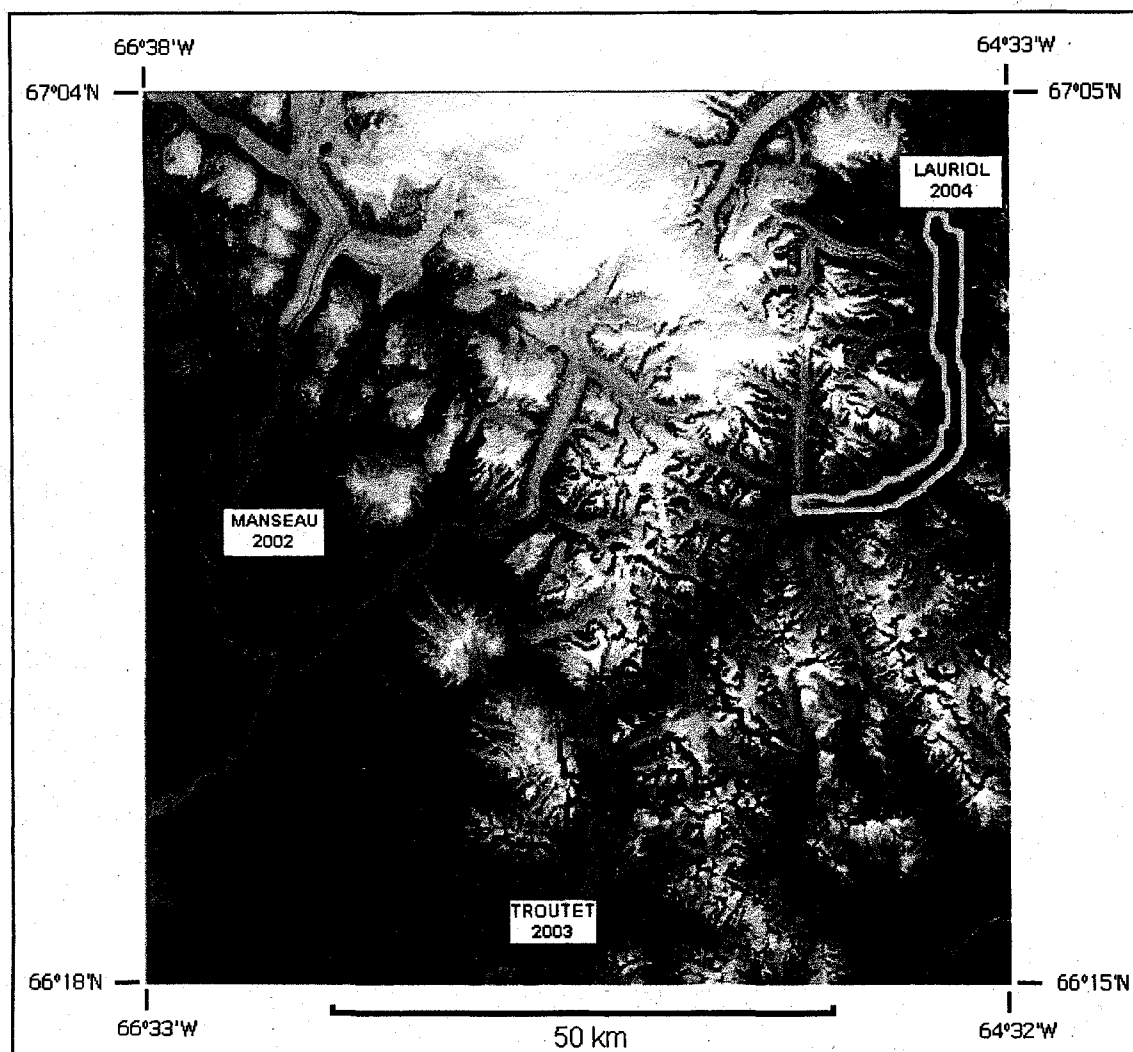


Figure 21: La portion de l'image satellitaire utilisée
La portion d'image utilisée couvre les secteurs où Manseau *et al.* (2003), Troutet et Lauriol ont acquis des données de référence, en 2002, 2003 et 2004 respectivement.

La superficie au sol de la portion d'image retenue est d'environ 8 300 km², soit environ le tiers de l'image ETM⁺ (figure 22). Un peu plus de la moitié de ce territoire est inclus dans le parc. C'est donc dire qu'environ un quart des quelques 19 700 km² du parc sont touchés par l'analyse qui a été faite. Ce sont principalement les parties sud et sud-ouest du parc qui sont représentées.



Figure 22: Le site d'étude est situé sur la péninsule de Cumberland, île de Baffin (encart). Se détachant du fond ombragé, on voit la partie du territoire couverte par l'image ETM⁺ du 13 août 2000. Le rectangle jaune délimite la portion de l'image qui a été utilisée dans le cadre du présent projet.

3.2. Les intrants

Le présent projet consiste en l'analyse d'une image ETM⁺ segmentée pour la cartographie écologique d'un milieu arctique. Une attention plus particulière a été portée à la détection des patrons de végétation pour les classes de végétation que définissent Manseau *et al.* (2003). Dans ce contexte, un des premiers enjeux que nous avons abordés concernait le choix des intrants spectraux et non-spectraux. Bien évidemment, nous avons puisé à même les bandes de l'image satellitaire, mais nous avons aussi généré différents dérivés de ces bandes, plus particulièrement pour la cartographie de la végétation. Enfin, nous y avons incorporé des données auxiliaires.

3.2.1. L'image ETM⁺ de Landsat

L'image utilisée fut prise le 13 août 2000 par le capteur ETM⁺ (satellite Landsat-7), à 10 h 42, heure locale. L'image compte 6 bandes spectrales distinctes, dont chacun des pixels mesure 30 m par 30 m, ou 900 m². À ces bandes s'ajoutent la bande panchromatique, dont la résolution spatiale au sol est de 15 m, et la double bande thermique, de 60 m de résolution. Il s'agit d'un produit de niveau 1-G, c'est-à-dire une image qui a subi une correction radiométrique et une correction géométrique au Centre canadien de télédétection. Les plages spectrales des huit bandes et l'ensemble des métadonnées d'acquisition de l'image sont données aux annexes 3 à 5.

3.2.2. La création d'indices spectraux

L'utilisation d'indices spectraux en télédétection a fait l'objet de nombreux textes (Crist *and* Cicone, 1984; Huete, 1988; Jensen, 2005). Dans le cadre du présent projet, nous avons créé plusieurs indices spectraux, soit avant, soit après l'étape de segmentation. Les indices qui ont été créés en amont de la segmentation sont ceux qu'on pourrait considérer comme des indices classiques. En effet, de par leur succès, certains indices spectraux sont passés dans l'usage courant. Vu leur potentiel prometteur, nous avons voulu en tester quelques uns, nommément le *Normalized Difference Vegetation Index* (Myneni *et al.*, 1995), le *Soil Adjusted Vegetation Index* (Huete, 1988) et les transformations *Tasseled Cap* (Crist *and* Cicone, 1984). À cet effet, nous avons généré des données matricielles que nous pouvions insérer dans le projet sous forme de

couche. Les indices qui ont été créés après la segmentation sont de simples rapport bandes calculés à même le logiciel eCognition. Cette dernière approche a le désavantage de ne livrer qu'une seule valeur par objet, soit la moyenne de l'indice sur l'ensemble des pixels du segment. À l'inverse, l'incorporation d'indices sous forme de bandes en amont du projet permet de préserver les valeurs de l'indice pour chacun des pixels à l'intérieur des objets, ce qui démultiplie les possibilités d'analyses.

3.2.3. Modèle numérique d'altitude

Comme le suggèrent divers auteurs (Parrot *et al.*, 1993; Pouliot *et al.*, 1995; Jensen, 2005; Sidjak *and* Wheate, 1999; Deshayé, 2000; Buchroithner *et al.*, 2006), l'incorporation d'un modèle numérique d'altitude (MNA) dans un projet de classification permet de distinguer certaines classes qu'on ne peut pas séparer sur la base seule des données spectrales. Dans notre cas, par exemple, le degré de pente permet de séparer les falaises dénuées de formations meubles des autres surfaces minérales. De même le profil très plat des plans d'eau peut nous aider à les différencier des ombres. De manière à nous ouvrir ce genre d'options, un MNA a été créé pour le secteur à l'étude pour permettre d'utiliser l'altitude et la pente. Pour plus de détails sur la création du MNA, voir l'annexe 7.

3.2.4. L'optimisation de l'espace-attribut

À la suite de la création des intrants, une première sélection a été faite parmi ces sources d'information à l'aide d'une fonction prévue à cet effet dans le logiciel eCognition. En effet, ce logiciel comporte une fonction dont on peut traduire le nom par « optimisation de l'espace-attribut » (*feature space optimisation*). Par le mot attribut, on entend tout descripteur qui peut caractériser un objet donné de l'image. Les attributs peuvent être de tout ordre, par exemple : la valeur moyenne de la réponse spectrale des pixels du segment dans une bande donnée, la taille du segment, son homogénéité interne, son voisinage ou sa distance par rapport à un objet d'une classe donnée, la valeur du pixel qui la plus faible ou la plus forte réponse dans une bande donnée, etc. Le nombre de tels attributs pour chacun des objets de l'image se chiffre à plus de mille. L'optimisation de l'espace-attribut consiste en une analyse cernant les attributs qui

maximisent la séparabilité entre des groupes de segments-échantillons. En y recourant de façon itérative, il est possible de sélectionner les bandes qui s'avèrent les meilleures pour distinguer diverses classes les unes des autres. Compte tenu des objectifs du présent projet, nous avons axé cette première analyse sur les classes de végétation. En utilisant les relevés de terrain comme données de référence, des groupes d'échantillons ont été créés pour chacune des classes végétales. Puis, une série d'itérations a été réalisée pour identifier les bandes les plus importantes à retenir pour les suites du projet.

3.2.5. La sélection finale des intrants

Les bandes 1, 2 et 3 de l'image Landsat ETM⁺ ont été retenues d'office pour l'affichage à l'écran. Les nombreux exercices « d'optimisation de l'espace-attribut » ont révélé l'utilité des bandes 4, 5 et 6 (*gains élevés*). Les bandes 7 et 6 (*gains faibles*) ont été abandonnées à cause de leur forte corrélation avec les bandes choisies. L'inclusion de la bande panchromatique (bande 8), bien qu'utile pour l'interprétation visuelle de l'image, rend le travail de l'ordinateur plus lent sans augmenter la séparabilité des classes. En conséquence, la bande 8 n'a pas été retenue pour le projet. Pareillement, la fusion (*pansharpening*) des données panchromatiques avec les données multispectrales du capteur ETM⁺ n'est pas avantageux ; on peut soupçonner que la dimension relativement grande des segments rend inutile l'utilisation de pixels plus fins. Les tests d'optimisation ont souligné l'utilité de la sixième transformation *Tasseled Cap*. Le NDVI s'est avéré un indice très important pour augmenter la séparabilité entre de nombreuses classes, dont les classes végétales tout particulièrement. Le SAVI, que l'on pourrait présumer plus utile que le NDVI dans la toundra, n'a donné qu'un rendement similaire au NDVI, sans augmenter sensiblement la séparabilité des classes végétales. Puisque le NDVI est plus répandu dans la littérature et mieux compris par un auditoire plus large d'utilisateurs éventuels, il a été préféré au SAVI. Enfin, l'altitude et la pente s'avèrent des informations auxiliaires pertinentes.

Nous noterons ici que pour une raison inconnue, la couche matricielle du NDVI a été intégrée au projet avec un décalage d'un pixel en X et d'un pixel en Y. Ce décalage n'a été remarqué qu'en fin de projet. On peut soupçonner que ceci aura eu une répercussion sur le potentiel de

discrimination de la classification pour les plus petits segments, mais ce problème n'a pas été évalué de façon systématique.

En somme, la banque d'images qui a été constituées comportait les 13 couches suivantes : bandes ETM⁺ 1, 2, 3, 4, 5, 6 (gains élevés) et 7; *NDVI*; *Tasseled Cap 6th*; MNA, Altitude, Pente. Rappelons que cette liste se limite aux intrants matriciels retenus ou générés en amont du projet. À ceux-ci s'ajoutent plusieurs indices qui ont été créés suite à la segmentation de l'image, à même les valeurs spectrales des objets d'image. Parmi ces indices, ceux qui se sont révélés utiles à la suite de l'étape d'optimisation sont les suivants, exprimés mathématiquement :

- $ETM1/(ETM2 + ETM3)$;
- $ETM1/(ETM1 + ETM2 + ETM3)$;
- $ETM1/(ETM1 + ETM2 + ETM3 + ETM4)$;
- $ETM1/(ETM1 + ETM2 + ETM3 + ETM4 + ETM5)$;
- $ETM2/(ETM1 + ETM2 + ETM3)$;
- $ETM3/(ETM1 + ETM2 + ETM3)$;
- $ETM5/(ETM1 + ETM2 + ETM3)$;
- $ETM6/(ETM1 + ETM2 + ETM3)$;
- $ETM4/ETM3$;
- $ETM4/ETM5$;
- $ETM4/(ETM1 + ETM2 + ETM3 + ETM4 + ETM5)$.

3.3. La segmentation fine de l'image ETM⁺

Une fois l'ensemble des bandes choisies, la première étape d'une analyse d'image par objets spatiaux consiste à diviser l'image en petits polygones (segments). Ces segments tracent les contours des portions homogènes de l'image, qui feront ensuite l'objet de la classification. En sachant qu'on peut regrouper subséquemment les segments qui auront été produits, on vise, lors de la première segmentation, à représenter les patrons spatiaux les plus fins qu'on souhaite déceler. Lorsqu'on initie une segmentation d'image, le logiciel eCognition donne par défaut certaines valeurs aux paramètres de segmentation. Ces paramètres peuvent toutefois être modifiés selon les besoins de l'utilisateur. Dans le cas qui nous intéresse, deux paramètres importants ont été ajustés: 1) la pondération des couches matricielles et 2) le paramètre d'échelle.

Avec eCognition, chacune des couches d'un projet peut se voir attribuer un poids différent dans l'opération de segmentation. Ainsi, si une couche obtient un poids plus grand, les patrons spatiaux qu'elle contient auront une plus grande influence sur la forme des segments obtenus que les patrons contenus dans les autres couches. Dans notre étude, une pondération égale a été maintenue pour l'ensemble des couches spectrales, y compris les indices spectraux. Toutefois, les trois bandes du MNA se sont vues attribuer un poids nul pour ne pas interférer avec la donnée-image.

En lançant la segmentation, on ne peut pas contrôler directement la taille des polygones que va livrer l'opération. C'est plutôt le niveau d'hétérogénéité entre les pixels qui fera que les segments seront grands ou petits. Lorsqu'une surface est très homogène, elle sera délimitée par un seul ou quelques segments relativement grands. À l'inverse, une surface plus hétérogène sera divisée en segments relativement petits. Pour avoir un contrôle indirect sur la taille moyenne des segments, on doit donc moduler un paramètre d'échelle (*scale parameter*) qui est lié à la texture de l'image. En quelque sorte, on fixe alors le niveau d'hétérogénéité qui est acceptable à l'intérieur d'un seul et même polygone. Plus ce niveau est restrictif, plus l'image sera segmentée finement. Des tests préliminaires ont été réalisés avec l'objectif de trouver le niveau de résolution optimal pour bien représenter les patrons de végétation apparaissant dans l'image. Le niveau de résolution souhaité devait permettre d'obtenir un compromis entre des objets dont (1) la taille est suffisamment petite

pour qu'ils n'incluent pas plus d'un seul type de couvert végétal à la fois et (2) la taille est suffisamment grande pour que l'assignation des échantillons ne risque pas d'être compromise par l'erreur positionnelle combinée des données du GPS et de l'image (plus ou moins trois pixels environ). Le résultat de cette segmentation fine allait constituer la base pour la classification de l'ensemble de classes, tant végétales que non-végétales, les objets produits servant de cellules de base aux généralisations hiérarchiques subséquentes.

Au niveau de segmentation retenu (*scale parameter* = 5), la portion de l'image utilisée est divisée en 369 336 segments, pour une dimension moyenne de 22 768 m² par polygone (ou 25 pixels). La dimension des objets varie sensiblement selon les types de surface, ce qui s'explique par l'hétérogénéité, qui varie d'un type de surface à l'autre. Les plans d'eau, par exemple, ont une surface plus homogène que la toundra. Il en résulte que les objets d'image sont en moyenne plus gros sur les plans d'eau que là où pousse la végétation. Par ailleurs, on note que les surfaces de neige sont segmentées très finement. Bien qu'homogènes à l'œil, ces surfaces présentent aussi un grand albédo, et donc un signal fort, ce qui amplifie l'écart absolu entre les valeurs spectrales de pixels voisins. Il en résulte une hétérogénéité plus grande, du point de vue du signal électromagnétique. Inversement, les surfaces sombres (eaux limpides, ombres) présentent moins de contraste et donnent donc lieu à des objets plus grands. La classe pour laquelle la segmentation a livré les plus grands objets est la classe « Eau bleue », dont les segments ont une dimension moyenne de 165 pixels. Ceci s'explique en partie par le signal faible et l'homogénéité plus grande, mais aussi par le fait que les eaux de mer offrent de grandes surfaces continues où peuvent s'étendre de grands segments. À l'inverse la classe « Neige et roc » présente des objets de seulement trois pixels en moyenne. Ceci s'explique par le fait qu'il s'agit d'une zone de transition très nette entre la neige et le roc, où la mixture spectrale crée une frange très mince entre deux types de surfaces. Pour la végétation, qui constitue le critère principal pour lequel le niveau de segmentation a été choisi, un objet moyen, toutes classes confondues, comporte 36 pixels (ou 6 pixels de côté en moyenne).

Enfin, nous mentionnerons que, outre la pondération des couches et le paramètre d'échelle, les paramètres de segmentation qui ont été utilisés furent les paramètres par défaut.

4. Stratification thématique

L'analyse d'image qui a été réalisée consistait en une classification dite hiérarchique. Par cela, on entend une classification où sont d'abord créées des classes générales, subdivisées ensuite en sous-classes de portée thématique plus ciblée. Pour créer les classes générales, nous avons donc d'abord cherché à comprendre les propriétés spectrales que partagent certaines surfaces apparentées. Par exemple, nous avons vérifié si les surfaces de neige et de glace visibles dans l'image (glaciers, névés, icebergs, auefs, etc.) avaient des traits communs permettant de les regrouper dans une seule et même « classe parente ». Pour ce faire, nous avons sélectionné des segments-échantillons de chacune de ces surfaces. La sélection des échantillons peut se faire soit à l'aide de données terrain ou par une simple interprétation de l'image satellitaire. Grâce à ces échantillons, il a été possible de faire une analyse du comportement spectral de chacun des grands ensembles thématique. Ces analyses nous ont permis d'élaborer un ensemble des règles (fonctions d'appartenance) qui sous-tendent la première stratification du projet. Pour cette première étape, nous avons choisi de créer les classes parentes suivantes :

- la végétation ;
- les surfaces cryosphériques ;
- les ombres ;
- les eaux ;
- les sols non végétalisés ;
- une classe pour la partie de l'image qui ne contient pas de données satellitaires ;
- un groupe de segments non-classifiés, qui fera l'objet d'un tri subséquent.

Une fois ces grands ensembles créés, nous nous sommes employés à subdiviser ces groupes en un nombre maximal de sous-groupes et de classes finales, de manière à tirer le plus d'information écologique possible de l'image. Les sections suivantes décrivent la portée thématique de ces classes et les attributs spectraux et auxiliaires qui nous ont permis de les discerner dans l'image (les détails concernant l'ensemble des fonctions d'appartenance des classes, incluant les valeurs des attributs et la forme des courbes utilisés, sont donnés à l'annexe 8).

4.1. La végétation

Au PNC Auyuittuq, le taux de végétalisation et la composition des groupements végétaux sont influencés par des facteurs comme l'altitude, les propriétés des sols ou des surfaces, le drainage, le régime de perturbation, etc. (Church, 1972 *in* Elliott, 1973; Blouin *et al.*, 1975, Hines *et al.*, 1988). Or, on pourrait aller jusqu'à dire que même la neige, la glace et l'eau sont végétalisées, dans la mesure où ces surfaces abritent des organismes photosynthétiques. Évidemment, une telle approche n'est pas fonctionnelle du point de vue de la classification écologique conventionnelle. Nous verrons ici les règles qui ont été fixées pour l'inclusion des objets d'image à l'ensemble thématique *Végétation*. Puis, nous verrons sur quelle base ce groupe a été subdivisé en diverses classes.

Nous nous sommes servis des relevés de végétation géopositionnés et d'autres sites connus pour créer des échantillons et réaliser des exercices d'optimisation de l'espace-attribut (section 3.2.5). Ainsi nous avons pu mieux comprendre les propriétés spectrales des diverses surfaces et avons identifié des attributs qui permettent de distinguer la végétation des autres surfaces du parc. Sans surprise, le NDVI s'est avéré très utile pour séparer les espaces végétalisés des autres surfaces présentes dans le secteur (eaux, ombres, neige, glace, roc, etc.). En effet, cet indice est lié à la capacité photosynthétique de la canopée végétale (Sellers, 1985 ; Myneni *et al.*, 1995). La figure 23 montre la distribution des objets de l'image selon le gradient des valeurs du NDVI (notons qu'il s'agit de la valeur moyenne du NDVI calculé sur l'ensemble du segment).

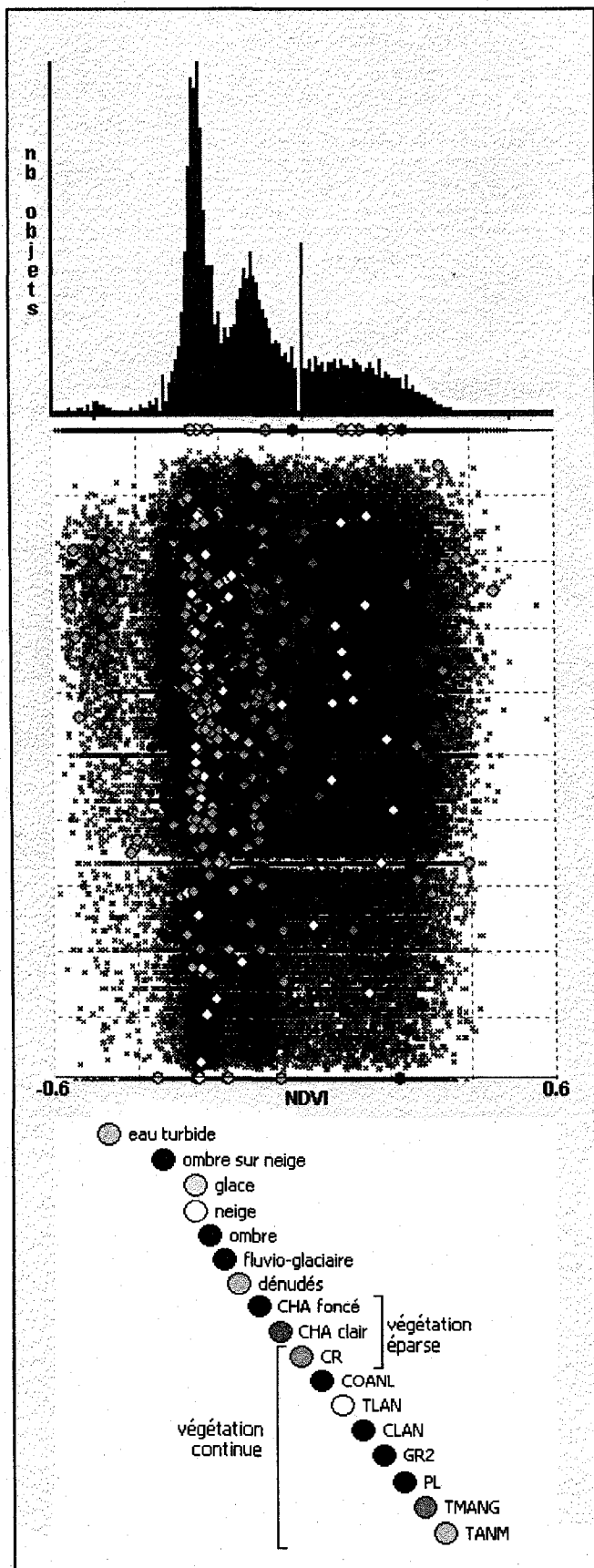


Figure 23 :

Les valeurs de NDVI portées par divers groupes d'objets d'image

Les bulles de couleur donnent la position de segments-échantillons de quelques classes le long du gradient des valeurs de NDVI. Un premier groupe est constitué par les segments qui touchent les plans d'eau, particulièrement l'eau turbide. Les segments touchant la neige et la glace forment un groupe très nombreux, qui inclut aussi des ombres. Les dépôts fluvio-glaciaires et les dénudés forment un second groupe nombreux. On note un point d'inflexion aux environs de la valeur zéro. Au-delà de cette valeur, on remarque un plateau formé principalement par les classes de végétation, mais qui comprend aussi certains complexes de haute altitude (CHA) et des complexes ripicoles (CR). Il y a un chevauchement important entre les complexes de haute altitude et les dénudés, mais ces derniers se distinguent nettement des classes de végétation. Le pic ponctuel à la valeur zéro s'explique par le fait qu'une partie de l'image utilisée ne contient aucune donnée.

Par soucis de clarté, plusieurs classes du projet n'ont pas été incluses dans cette figure.

L'inspection de l'image ETM⁺ confirme que les valeurs les plus élevées du NDVI sont portées par les objets qui représentent les espaces végétalisés. Par contre, on sait que les valeurs du NDVI pour ces espaces ne forment pas un groupe distinct mais sont plutôt l'extrémité du continuum (figure 23). Il suffit de penser à l'effet de l'altitude, qui crée un gradient où la transition entre la végétation et les dénudés rocheux est très progressive. Cet effet et plusieurs autres ont déjà été décrits par divers auteurs pour le PNC Auyuittuq. D'ailleurs, plusieurs approches ont déjà été proposées pour faire une classification des espaces végétalisés du parc (Blouin *et al.*, 1975; Paradis *et al.*, 1986; Hines *and* Moore, 1988; Deshayé, 2000; Manseau *et al.*, 2003). Pour les besoins de notre classification, nous avons adopté d'entrée de jeu la stratification la plus récente, donnée en 2003 par Manseau *et al.* (voir tableau 1). Ces auteurs avaient réalisé une analyse d'ensemble (*cluster analysis*) de données botaniques détaillées et ont proposé huit classes de végétation pour le parc. Le choix de nous baser sur ce système de classification visait à assurer une continuité dans l'acquisition des connaissances sur le PNC Auyuittuq. Mais, comme nous le verrons ici, des ajustements à ce système se sont avérés nécessaires, en particulier parce que parmi les huit classes de Manseau *et al.*, certaines n'ont pas un couvert végétal continu.

4.1.1. Le cas des « Complexes de haute altitude »

Les complexes de haute altitude (CHA) sont décrits par Manseau *et al.* (2003) comme ayant un couvert végétal très faible, dominé par les lichens et les mousses. D'après la description qu'en font ces auteurs, le couvert végétal des CHA est de 26 % en moyenne (tableau 1). La figure 24 montre un exemple de la forme que prend la végétation de ces complexes.



Figure 24 :

Un relevé photographique donnant un exemple de « Complexe de haute altitude »

Le site T13 est situé à environ 760 m d'altitude du côté sud de la vallée Naqsaq. La végétation couvre moins de 50 % de la surface et est dominée par un mince couvert de mousses et de lichens.

Les complexes de haute altitude constituent une zone de transition entre les dénudés rocheux et les classes de végétation continue. Sans surprise, cette transition se traduit par un chevauchement important entre les nuages d'échantillons des CHA et ceux des classes de végétation continue le long du gradient des valeurs de NDVI (figure 23). Il n'est donc pas possible sur la base du NDVI seulement de faire la distinction entre les classes de végétation décrites par Manseau *et al.* (2003) et les autres surfaces. Si on avait voulu absolument maintenir l'ensemble des classes de Manseau *et al.* dans le même groupe, il aurait été possible de faire appel à l'attribut ETM3/(ETM1+2). En effet, l'optimisation de l'espace-attribut identifie cet indice comme un attribut utile pour séparer

les CHA des dénudés rocheux. En combinant le NDVI et cet indice, il est possible de définir un champ dans un espace à deux dimensions qui circonscrit assez bien la plage de valeurs que prennent les échantillons des classes de Manseau *et al.* (2003) à l'exclusion des autres (figure 25). Cependant, l'option de recourir à l'indice $ETM3/(ETM1+2)$ pour ne créer qu'un seul groupe avec les classes de Manseau *et al.* (2003) implique que le groupe résultant doit inclure des valeurs de NDVI de l'ordre de -0,15. Or, la littérature nous enseigne que les valeurs inférieures à 0,1 correspondent à des surfaces dénuées de végétation et que même les landes occupent plutôt des valeurs de 0,2 à 0,3 (Weier *and* Herring, 2008). Dans notre cas, seules les classes dites de « végétation continue » ont un NDVI supérieur à 0,1.

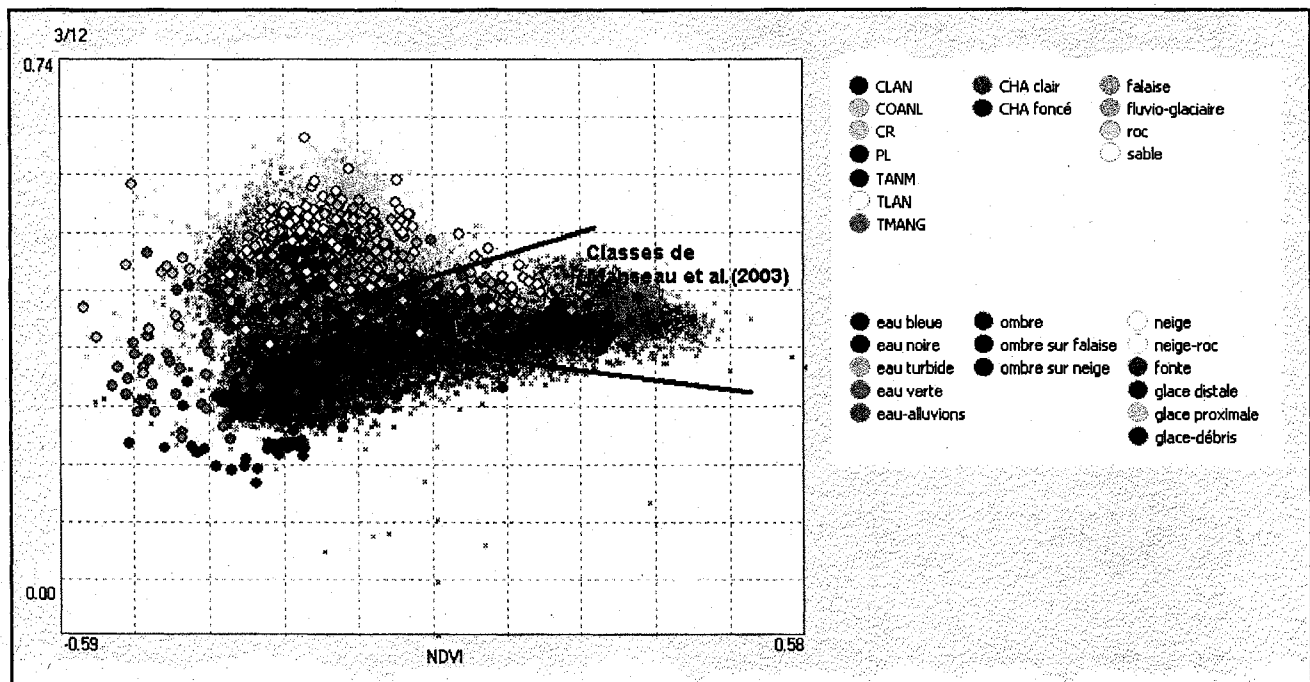


Figure 25: Les échantillons de divers types de surfaces forment des groupes dans l'espace à deux dimensions défini par le NDVI et l'indice $ETM3/(ETM1+2)$. Les classes de végétation décrites par Manseau *et al.* en 2003 s'y distinguent assez nettement des autres surfaces qu'on reconnaît dans l'image ETM⁺. Ce groupe inclut cependant des valeurs négatives de NDVI, ce qui suggère des surfaces dénuées de végétation.

Pour les besoins d'une classification à l'échelle continentale, un groupe international de chercheurs a fixé la limite inférieure de la végétation de l'Arctique à $NDVI = 0,03$ pour le capteur AVHRR (CAVM Team, 2006). En raison des dimensions plus grandes des pixels de AVHRR, on comprendra que cette valeur se rapproche de zéro, car ces pixels ont plus de chance d'inclure des

surfaces non-végétalisées (Sugita *et al.*, 1996; Wessels *et al.*, 2006). Bien que l'effet de moyenne qui s'opère sur les objets d'image puisse lui aussi pousser à la baisse les valeurs de NDVI des objets végétalisés, la dimension et le contour plus naturel de ces zones nous poussent à dire que le NDVI de la végétation dans l'image segmentée du PNC Auyuittuq ne peut pas être inférieur à celui qu'avance le CAVM Team (2006). Or, les complexes de haute altitude que décrivent Manseau *et al.* ont un NDVI moyen inférieur à zéro. On remarque de plus que l'écart des valeurs de NDVI est plus grand entre les classes de « végétation continue » et les CHA qu'entre ces derniers et les dénudés (falaise, roc, sable, etc.). Pour toutes ces raisons, nous avons choisi de ne pas réunir les CHA et les autres classes végétales dans un seul et même ensemble thématique. Nous associons plutôt les CHA à l'ensemble thématique « Sols non-végétalisés », que nous verrons à la section 4.5. La fonction donnée à la figure 26 reflète la condition que nous venons de décrire pour l'appartenance au groupe des classes de végétation.

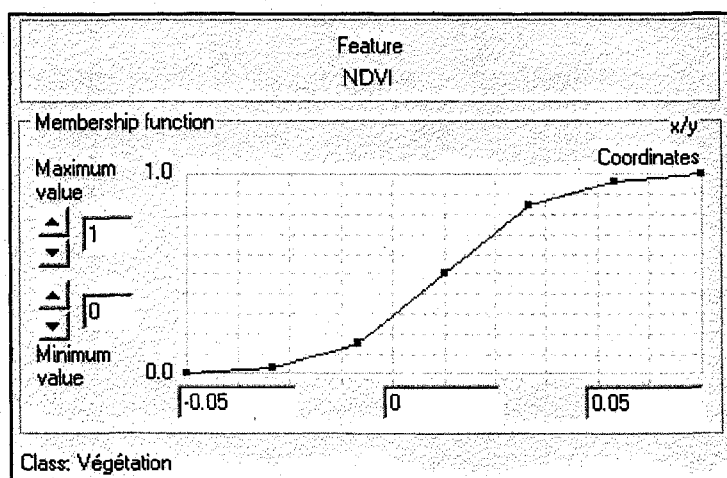


Figure 26 :
Une fonction appliquée au NDVI
contrôle l'appartenance des objets au
groupe des classes de «végétation
continue», à l'exclusion des dénudés
rocheux

Les relevés de végétation indiquent que ces classes excluent toute surface dont le NDVI est inférieur à -0,05. Le taux d'appartenance que nous avons fixé progresse selon la courbe de la fonction d'appartenance, pour atteindre 100 % lorsque le NDVI est égal à 0,05.

Nous avons vu qu'on peut séparer les dénudés rocheux et les classes de végétation sur la base du NDVI (figures 23 et 25). Par contre, on constate que les CHA se confondent avec ces deux groupes sur la base de cet indice. De manière à exclure les CHA du groupe des classes végétales, nous avons fait une nouvelle analyse de séparabilité. Plus exactement nous avons cherché à identifier l'attribut qui nous permet de bien séparer la classe « CHA clair » des classes « Communauté ouverte d'arbuste nains et de lichens » (COANL) et « Toundra de lichens et d'arbustes nains » (TLAN). En effet, ces deux dernières sont celles qui présentaient le plus de chevauchement avec les CHA le long du gradient de NDVI. Le meilleur attribut pour faire cette

séparation s'avère être l'indice $ETM4/(ETM1+2+3+4+5)$. En appliquant sur cette base une seconde fonction d'appartenance au groupe des classes de végétation continue, on réussit à en retrancher les CHA de façon satisfaisante (figure 27). Au sens du présent projet, la classe « Végétation » n'inclut donc que les objets d'image dont le NDVI moyen est supérieur à -0,05 et dont la valeur de l'indice $ETM4/(ETM1+2+3+4+5)$ est supérieure à 0,12. C'est donc dire qu'une des classes proposées par Manseau *et al.* (2003), en l'occurrence la classe « Complexes de haute altitude », a été retirée du groupe des classes végétales au profit des classes non-végétales.

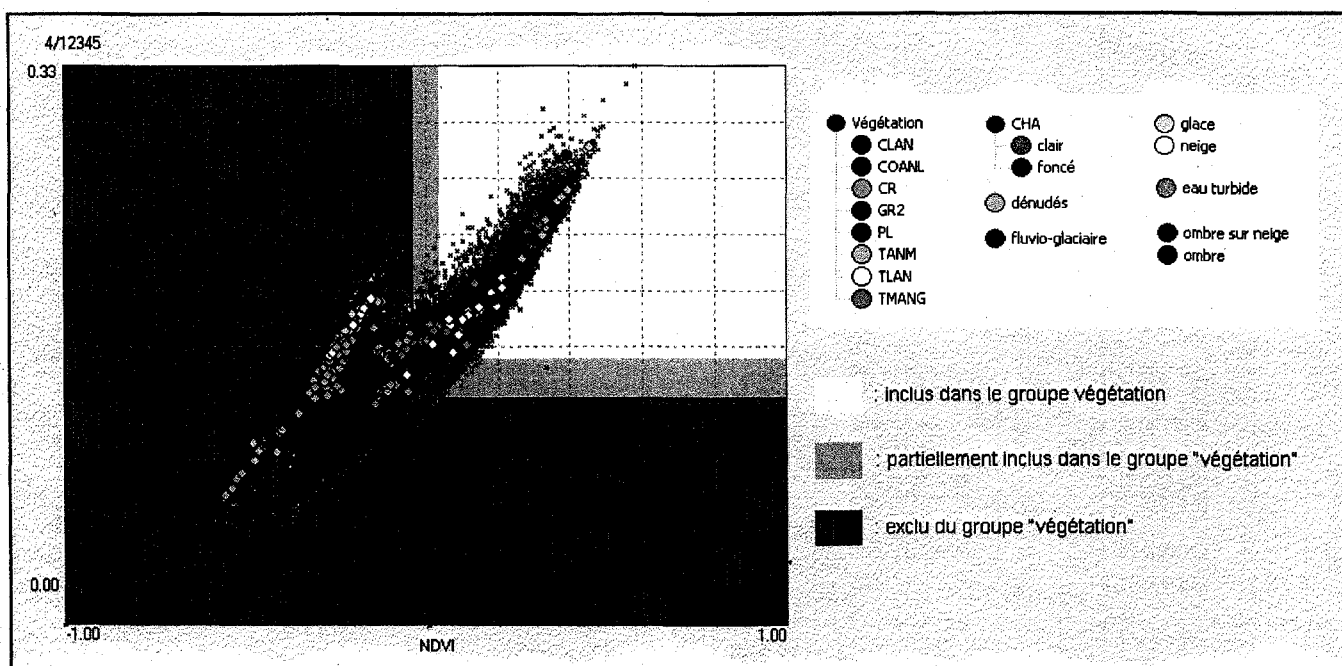


Figure 27: Les indices NDVI et $ETM4/(ETM1+2+3+4+5)$ permettent d'isoler en un seul groupe les classes de végétation, à l'exclusion des complexes de haute altitude et des classes non-végétales

Les tons de gris indiquent l'appartenance possible à la classe Végétation. Tout objet dont le NDVI moyen est inférieur à -0,5 est exclu de la classe Végétation. Au-delà de cette valeur, le niveau d'appartenance augmente progressivement pour atteindre la pleine appartenance à la valeur 0,5. De même, tout objet comportant une valeur inférieure à 0,12 pour l'attribut « 4/12345 » ne pourra pas appartenir à la classe Végétation, alors qu'il le pourra s'il comporte une valeur supérieure à 0,18. La classification finale d'un objet se trouvant dans la zone de transition (en gris pâle) dépendra des fonctions d'appartenance appliquées aux autres classes du projet.

4.1.2. Le cas des complexes ripicoles

Contrairement à ce qui a été fait pour les complexes de haute altitude, on ne peut pas simplement retirer les « complexes ripicoles » (CR) du groupe des classes végétales. En effet, le taux de végétalisation de ces complexes est trop variable. Les CR regroupent l'ensemble des formes de végétation que prennent les zones inondées par les crues des cours d'eau. Or, bien qu'elles soient caractérisées par la présence d'espèces pionnières, ces zones sont principalement définies par leur processus de perturbation plutôt que par un critère floristique précis. Le taux moyen de végétalisation qu'obtiennent Manseau *et al.* (2003) pour les CR est de 36 %, mais il varie grandement (figure 28).

Parmi les différentes formes que prennent les complexes ripicoles, certaines se qualifient comme de la « végétation continue », alors que d'autres présentent une surface presque entièrement constituée de dépôts fluviaux (figures 28 et 29). Dans ce contexte, il convient de retenir cette classe comme une classe végétale, car certains sites satisfont aux critères qui ont été retenus à cet effet, soit le NDVI et $ETM4/(ETM1+2+3+4+5)$. Quant aux sites qui n'y répondent pas, ceux-ci seront amalgamés avec la classe des dépôts fluvioglaciaires, dans le groupe des classes non-végétales. Face à ce problème, une approche similaire a d'ailleurs été adoptée par Manseau *et al.* (2003).

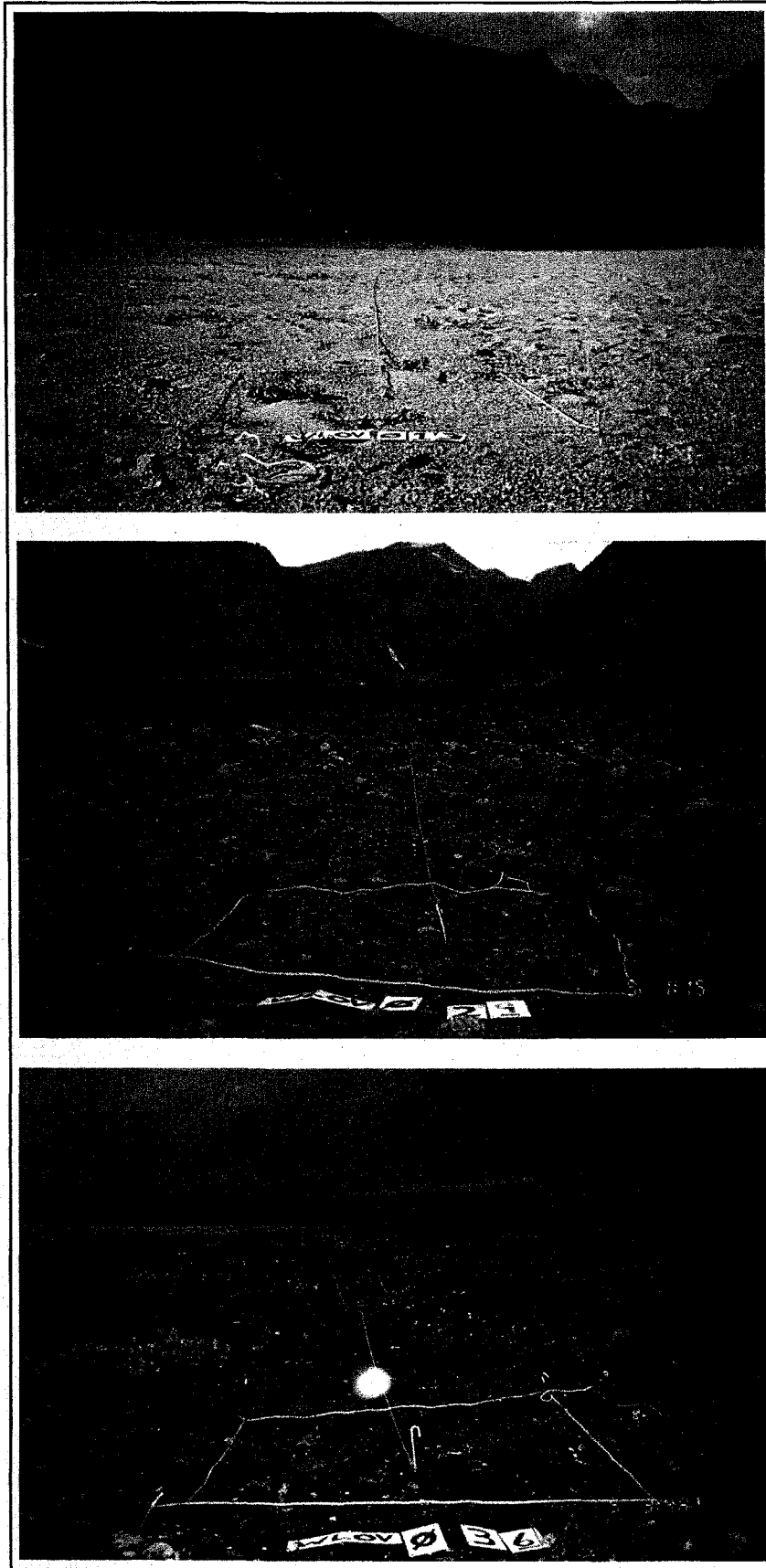


Figure 28:

Trois exemples illustrant le taux de végétalisation très variable de la classe que Manseau *et al.* (2003) appellent *Complexes ripicoles*

photos :
collection Micheline Manseau

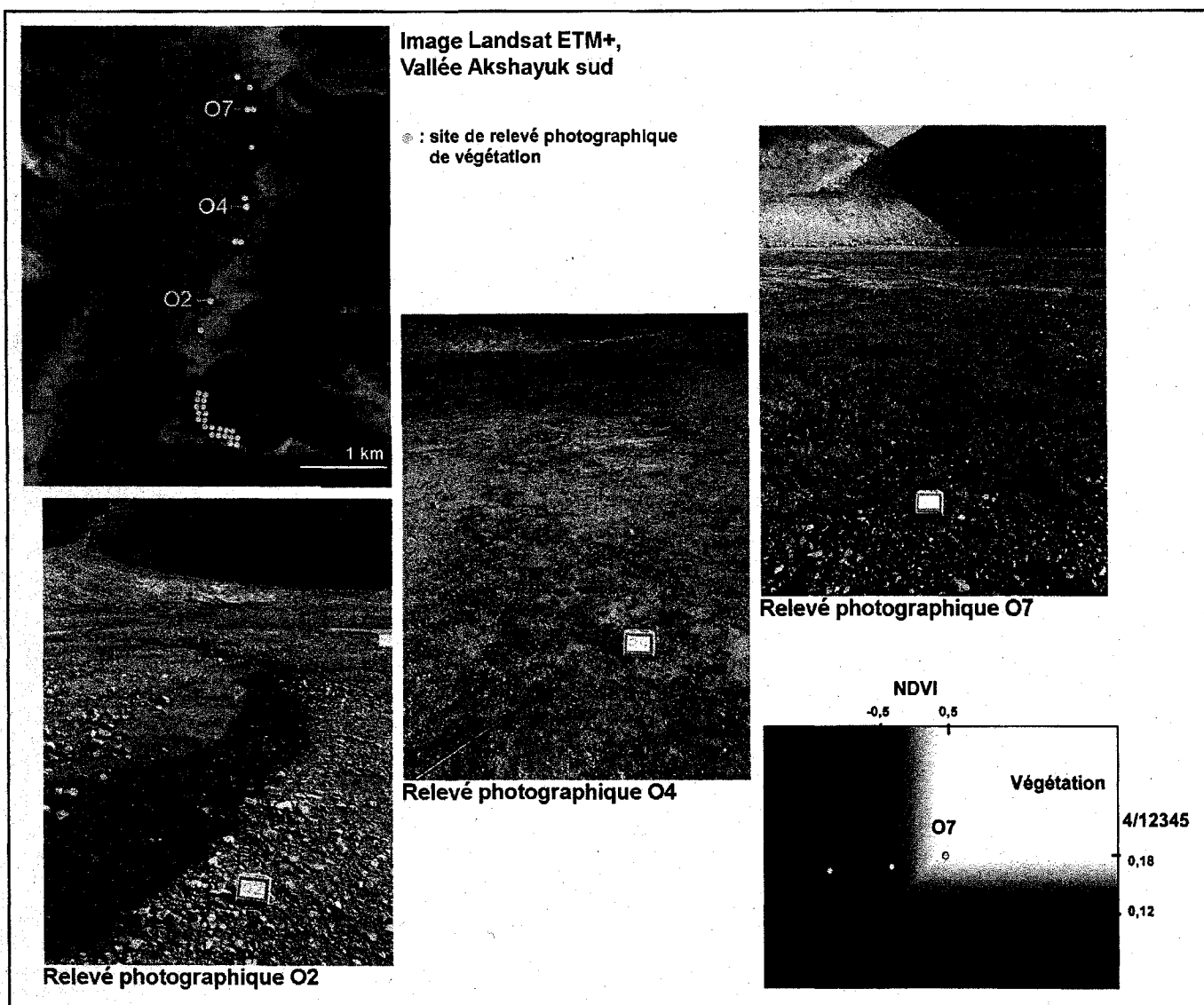


Figure 29: La rive est de la rivière Weasel présente de grandes surfaces périodiquement inondées

Les valeurs de NDVI des relevés O2, O4 et O7 nous permettent de comprendre la transition entre les classes végétales et non-végétales.

- O2 présente très peu de végétation, sinon quelques groupes d'épilobes, une espèce pionnière ; la surface possède un NDVI trop faible pour se qualifier comme un site de végétation (-0,12 vs -0,05) ;
- O4 se qualifie tout juste comme site de végétation (NDVI = -0,04), mais son niveau d'appartenance sera faible et la classification finale le rangera vraisemblablement dans une classe non-végétale ;
- O7 respecte presque pleinement le critère d'appartenance que constitue le NDVI pour le groupe de classes de végétation (NDVI = 0,037 vs 0,05) et la classification finale le retiendra comme une surface végétalisée.

4.1.3. La stratification de la végétation

En plus des sept classes végétales que nous retenons de Manseau *et al.* (2003), nous avons jugé utile d'ajouter une huitième classe. Celle-ci comble un vide qui nous a semblé subsister après l'analyse des relevés de végétation. En effet, parmi les relevés qu'il nous a été difficile de classifier de façon catégorique (section 2.6.), il y a un groupe qui correspond aux surfaces qui ont une apparence brunâtre dans l'image satellitaire (figure 30). Ce sont là des surfaces que nous n'étions pas à l'aise de ranger dans l'une ou l'autre des classes précédemment décrites par Manseau *et al.* (2003). Il se trouve donc qu'aucun échantillon ne représentait ces surfaces suite à l'analyse des relevés photographiques. Or, elles occupent une part importante des surfaces végétalisées des environs du PNC Auyuittuq. Nous avons jugé qu'il était important de créer une classe propre à ces surfaces. Cette classe s'apparente à la classe *Graminoid, prostrate dwarf-shrub, forb tundra* décrite par le groupe *Circumpolar Arctic Vegetation Mapping Team* (Walker *et al.*, 2005; CAVM Team, 2006). Bien que nous n'ayons pas cherché à valider cette correspondance, nous avons attribué à cette nouvelles classe le nom de « Toundra de graminoides, d'arbustes prostrés et d'herbacées », à laquelle l'équipe CAVM a donné le code G2.

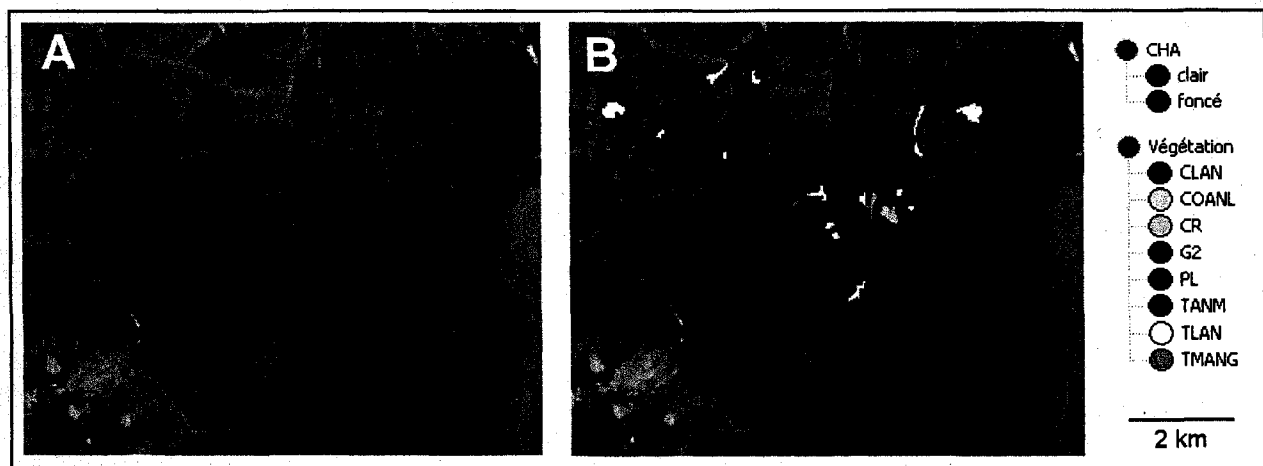


Figure 30: Relevés de végétation réalisés dans la vallée Naqsaq

La végétation y prend plusieurs formes, comme l'illustre l'image ETM⁺ (A). La position connue de ces relevés permet de sélectionner des segments-échantillons (B) pour les classes décrites par Manseau *et al.* (2003). À l'inspection de l'image, ce groupe de classes semble sous-représenter les grandes étendues d'apparence brunâtre dans l'image ETM⁺. Ces étendues avaient fait l'objet de plusieurs relevés de végétation qui n'avaient pas pu être catégorisés avec confiance dans l'une ou l'autre des classes décrites par Manseau *et al.* (2003). La classe G2 a été créée et des segments-échantillons ont été choisis pour représenter ces surfaces (B).

Notre stratification de la végétation comporte donc huit classes. La figure 31 donne un exemple de relevé photographique pour chacune des classes.

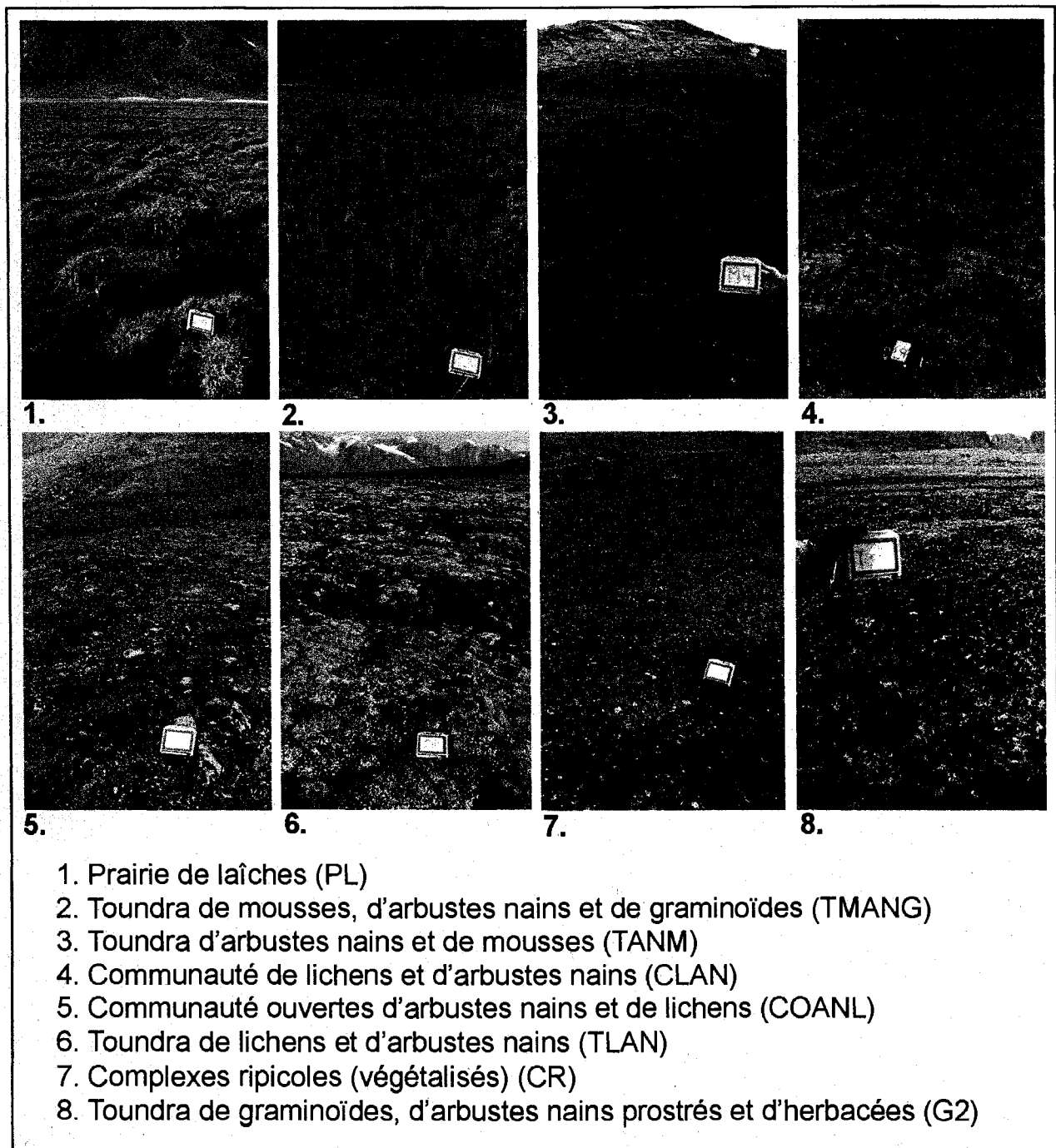


Figure 31: La stratification végétale utilisée pour le projet

Sept des classes végétales décrites par Manseau *et al.* (2003) ont été retenues pour la classification de la végétation au PNC Auyittuq (numéros 1 à 7). À ce groupe s'ajoute une classe (no 8) qui a été utilisée pour représenter des surfaces que ne semblaient pas inclure les classes de Manseau *et al.* (2003).

4.1.4. La classification « au plus proche voisin » des classes de végétation

La localisation des relevés photographiques de la végétation (GPS) nous permet de sélectionner plusieurs segments-échantillons pour chacune des classes de végétation. De manière à connaître le comportement spectral des classes végétales, nous nous sommes penchés sur les valeurs que prenaient ces groupes d'échantillons pour divers attributs. L'objectif de ces manipulations était de fixer des fonctions d'appartenance pour chacune des classes, ce qui nous aurait permis de les séparer selon un ensemble de règles définies. Au terme de nombreux essais, nous nous sommes aperçu que, peu importe l'attribut, il y avait toujours un chevauchement important entre plusieurs classes végétales, et qu'on ne pouvait pas arriver à des classifications satisfaisantes en ne recourant qu'à des règles d'inclusion et d'exclusion. Contrairement à ce qu'on a pu faire pour la classe parente, il nous était donc impossible de séparer les groupes d'échantillons en nuages de points distincts dans un espace à seulement deux ou trois dimensions (figure 32). En effet, la proximité spectrale des classes végétales est telle qu'il faut faire appel à de nombreux attributs pour arriver à une séparabilité spectrale satisfaisante.

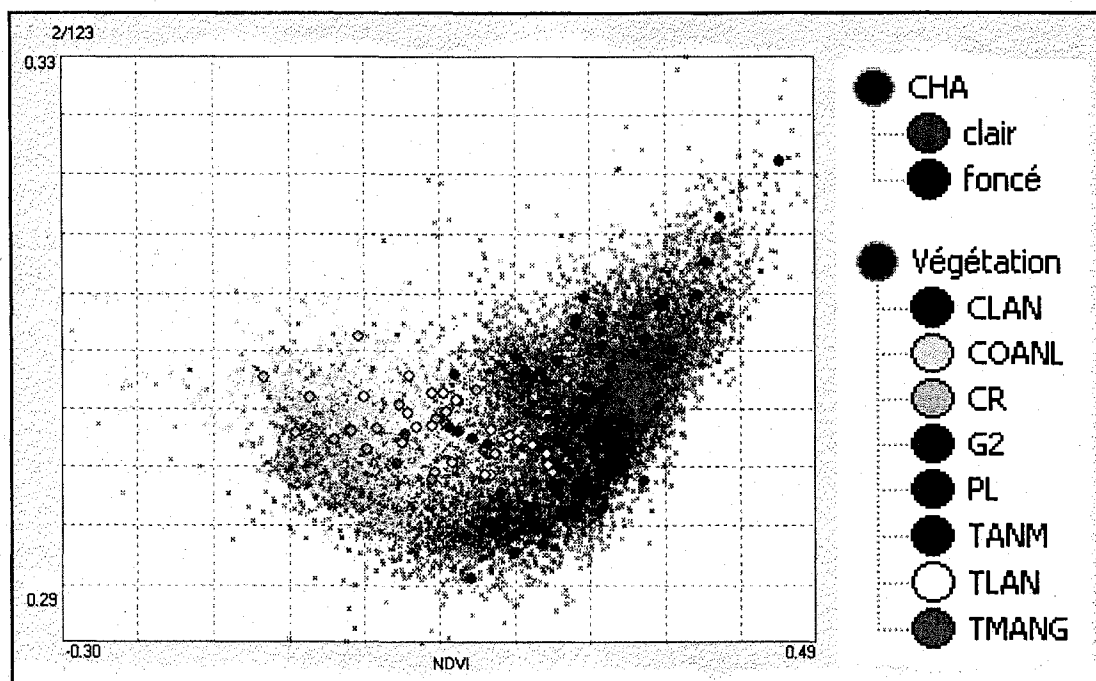


Figure 32: Parmi les meilleurs attributs pour séparer les classes de végétation, il y a l'indice NDVI et l'indice $ETM2/(ETM1+2+3)$. Projetés dans cet espace, les échantillons montrent qu'il est difficile de bien séparer les nuages de points sans faire appel à plusieurs autres attributs et resituer ces nuages de points dans un espace pluridimensionnel.

Dans un contexte comme celui que nous venons de décrire, le logiciel eCognition offre un mode de classification plus approprié, qui permet de réaliser des classifications dans un espace défini par de multiples attributs. Ce mode de classification s'appuie sur le calcul de la distance spectrale entre tout objet et la position des divers nuages d'échantillons dans un espace à n dimensions. L'objet est, à terme, associé à la classe dont le nuage de points est le plus proche. C'est ce qu'on appelle le mode de classification « au plus proche voisin » (*nearest neighbour*) (voir aussi section 1.4.3). La fonctionnalité de classification au plus proche voisin diffère de la méthode dite « par fonctions d'appartenance » en cela que le système identifie automatiquement les critères de proximité au lieu de nécessiter la description explicite des règles d'inclusion. Dans le cas qui nous intéresse, un premier tri avait été réalisé au moment de créer la classe parente « Végétation ». Ce tri a permis d'isoler les objets qui se qualifient comme faisant partie du groupe des classes végétales. La classification au plus proche voisin a donc été opérée isolément sur ces objets, selon leur proximité avec les nuages d'échantillons formés par les échantillons des classes végétales. Par des tests d'optimisation de l'espace-attribut, nous avons comparé les classes végétales entre elles une à une pour identifier l'attribut le plus performant pour séparer chacune des classes végétale de chacune des autres (annexe 10). En prenant l'ensemble de ces attributs, nous avons pu spécifier un espace à 8 dimensions, à l'intérieur duquel allait s'opérer la classification au plus proche voisin. Les attributs retenus comme critères pour la classification de la végétation sont :

- $ETM3/(ETM1 + ETM2)$;
- NDVI ;
- $ETM4/ETM3$;
- $ETM6/(ETM1 + ETM2 + ETM3)$;
- valeur du pixel au signal le plus faible pour le NDVI ;
- valeur du pixel au signal le plus faible pour la bande ETM5 ;
- $ETM2/(ETM1 + ETM2 + ETM3)$;
- $ETM4/(ETM1 + ETM2 + ETM3 + ETM4 + ETM5)$.

Cette première opération permet un premier tri des segments de végétation en sept classes. De manière à améliorer le résultat de la classification nous ajoutés les règles suivantes :

- la classe CR ne peut contenir que des objets qui se trouvent à moins de 1 000 m d'une surface d'eau turbide et dont la pente est inférieure à 12 ° ;
- la classe CR fait l'objet de contraintes liées à l'indice $ETM4/ETM3$ et à la valeur minimale que prennent les pixels dans la bande ETM5 ;
- la classe PL ne peut contenir que des objets dont la pente est inférieure à 18 °.

4.2. Les surfaces cryosphériques

Auyuittuq est mot inuit qu'on pourrait traduire par « Terres de neiges éternelles ». En effet, le parc recèle plusieurs surfaces liées à la cryosphère, et ce à tout moment de l'année. L'image ETM⁺ du 13 août 2000 illustre les conditions de fin d'été, où l'étendue des surfaces neigeuses est à son minimum. Les surfaces cryosphériques qu'on reconnaît sur l'image et que nous avons aussi observées sur le terrain sont : la neige peu transformée, la neige mouillée, les névés, les langues glaciaires, la glace mêlée à des débris morainiques, les auefs et les icebergs. On en voit quelques exemples dans la figure 33. Évidemment, l'image satellitaire du 13 août 2000 ne doit être considérée que comme un cliché, dont on ne peut tirer qu'une information relative quant aux limites des zones d'accumulation et d'ablation sur les glaciers. La limite terminale des glaciers y est toutefois bien exposée et constitue une mesure fiable de leur état en date de l'an 2000.

Après la classification des espaces végétalisés, celle des surfaces cryosphériques s'avère intéressante compte tenu du contraste élevé qui existe entre ces surfaces et les autres surfaces apparaissant sur l'image ETM⁺. Les résultats obtenus par Paul *et al.* (2002) suggèrent que l'indice TM4/TM5 serait le meilleur attribut à utiliser pour tracer le contour général des glaciers à l'aide d'images TM de Landsat. Les bandes spectrales 4 et 5 étant les mêmes pour le capteur ETM⁺, nous avons testé cette hypothèse. Dans notre cas, cet indice ne permettait pas de séparer adéquatement les surfaces glaciaires et plusieurs plans d'eau. Nous avons plutôt observé que la bande thermique procurait un meilleur contraste pour faire ressortir les surfaces cryosphériques du reste de l'image. Une première fonction d'appartenance appliquée à la bande ETM6H nous a donc permis de délimiter grossièrement ces surfaces. Après application de cette règle, l'inspection de l'image révélait toutefois que certaines ombres, moraines et surfaces d'eau subsistaient dans le groupe. En créant de nouveaux échantillons avec ces segments, des analyses de séparabilité spécifiques ont pu être réalisées. Ici, l'indice ETM4/ETM5 s'est avéré utile car il s'agit de l'attribut clé pour séparer la glace et les moraines. De même, l'indice ETM3/(ETM1+2+3) a pu être utilisé pour retrancher les ombres. Quant à la confusion avec les plans d'eau, c'est plutôt en raffinant la description des classes d'eau que nous sommes arrivés à l'amoindrir. C'est donc dans un espace à trois dimensions que nous parvenons à isoler un ensemble de segments qui exclut en grande partie l'ensemble des surfaces non-cryosphériques. De cet ensemble, certains segments pourront

être retranchés de par les fonctions d'appartenance qui seront appliquées aux nombreuses autres classes du projet. Le détail des fonctions d'appartenance de l'ensemble des classes est donné à l'annexe 8.

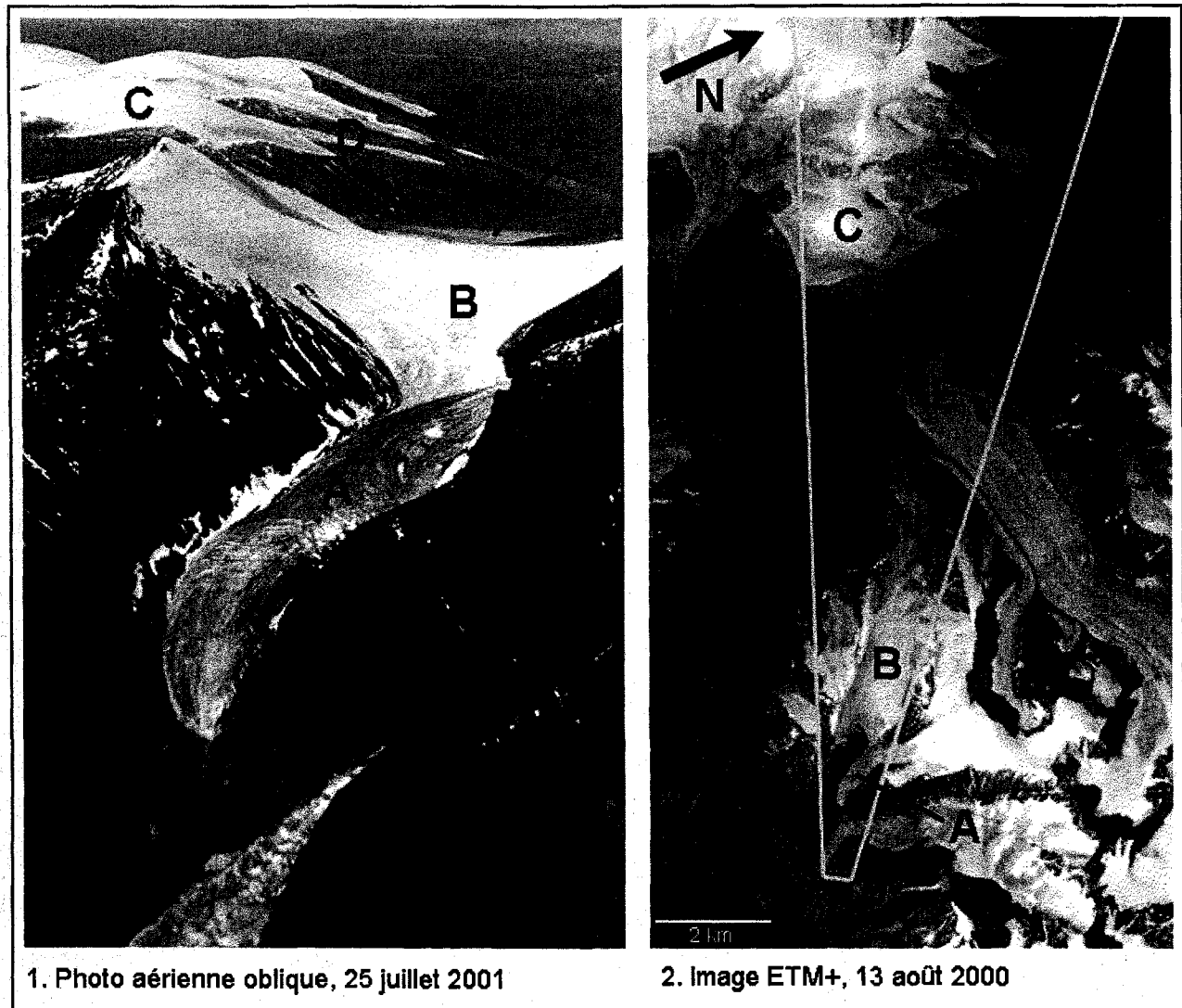


Figure 33: Les surfaces cryosphériques

Juste à l'ouest du mont Odin ($66^{\circ}55'N$ $65^{\circ}43'O$) se trouvent deux petits glaciers. Le glacier que l'on voit en A est alimenté par une zone d'accumulation neigeuse (B). Plus à l'ouest se trouve un dôme de neige (C) d'où descendent plusieurs petits glaciers (D). La partie terminale d'un plus grand glacier occupe le fond de la vallée, où on note les bandes foncées que forme la glace mêlée de débris (E). On remarque çà et là de petits névés dans les dépressions du terrain.

Nous savons que l'image du 13 août 2000 n'est qu'un cliché reflétant l'état des glaciers à cette date. En conséquence, on pourrait juger inutile de subdiviser les surfaces cryosphériques en classes thématiques précises. On pourrait, par exemple, limiter la stratification à deux catégories, la neige et la glace, et c'est d'ailleurs ce que nous avons d'abord fait. Cependant, nous nous sommes aperçus en cours de projet que la confusion entre les surfaces cryosphériques et certaines autres surfaces étaient parfois attribuable à une partie plus spécifique du groupe des surfaces cryosphériques. Il nous a donc été utile de subdiviser ces dernières en classes plus ciblées. À cette fin, nous avons employé l'indice ETM4/ETM5, qui offre un gradient le long duquel se répartissent diverses surfaces de neige et de glace (Paul *et al.*, 2002). Cette division s'est donc faite de façon plutôt arbitraire et pour des considérations plus pratiques qu'écologiques. Dans l'interprétation de la présente classification, il convient donc de considérer la suite des classes suivantes comme un continuum plutôt qu'une série catégorique.

4.2.1. La glace distale et la glace proximale

En examinant le comportement spectral de l'ensemble des surfaces de glace, on remarque une confusion entre certaines de ces surfaces et l'eau turbide des torrents qui coulent des glaciers. La façon dont nous avons pu palier cette confusion était de scinder la classe de glace en deux : la glace proximale et la glace distale. Ainsi, nous pouvions mieux circonscrire la portée de cette dernière classe et limiter la confusion avec l'eau.

Par « Glace distale », on entend les surfaces de glace qu'on retrouve dans la partie terminale du glacier, là où le glacier perd de sa masse par la fonte et où on ne trouve généralement pas de neige pendant l'été. Notons cependant que l'extrémité des glaciers se situe souvent sous une épaisse couche de débris morainiques. Les surfaces de glace distale ne nous permettent donc pas de localiser la limite terminale des glaciers. Ceci étant dit, leur position est relativement stable et peut éventuellement servir d'indice relatif pour décrire la position d'un glacier le long de son axe d'écoulement.

Par rapport aux autres surfaces cryosphériques, la glace distale montre des valeurs relativement faibles pour l'indice ETM4/ETM5. Sur la base de cet indice, une première fonction permet donc

de délimiter grossièrement la partie distale des glaciers. Par rapport aux surfaces avoisinantes, nous avons mentionné plus haut que la glace présentait de la confusion, plus particulièrement avec l'eau turbide. Pour parvenir à limiter cette confusion, nous avons dû recourir à deux attributs bien précis. Dans un premier temps, le sixième indice *Tasseled Cap* nous permet de séparer la glace distale de la classe « Eau turbide » qui est incluse dans le groupe « Eaux ». Puis, nous recourrons à l'écart type des valeurs que prend la bande bleue pour faire la différence entre la glace distale et une classe bien précise, que nous avons nommée « Eau turbide proximale » et qui est décrite plus loin.

La glace dite « proximale » est la surface que l'on retrouve dans la zone de transition entre la classe « Neige » et la classe « Glace distale ». Comme nous l'avons vu plus haut, la création de cette classe relève d'une considération essentiellement pratique, visant à faciliter la classification des langues terminales des glaciers. Ceci étant dit, la répartition des zones de glace proximale permet de mieux interpréter des facteurs tels que l'effet de la pente sur les propriétés des surfaces glaciaires, l'effet de leur exposition au rayonnement solaire, etc.

4.2.2. La neige

Pour avoir examiné une image RSO de RADARSAT du mois d'août 1996, nous savons que presque toutes les surfaces neigeuses du PNC Auyittuq subissent à un moment ou un autre une certaine transformation thermique. En effet, la donnée radar permet de croire que même au sommet de la calotte glaciaire de Penny, la neige ne reste pas sèche à ce moment de l'année. Ceci étant dit, nous savons que tout glacier doit, pour se maintenir, avoir une zone d'accumulation où, année après année, il se dépose plus de neige qu'il n'en fond. Ce phénomène d'accumulation peut être contrôlé par divers facteurs (Mercier, 2004), mais l'altitude en reste le principal. Sauf en cas de canicule exceptionnelle, la tête de tous les glaciers est donc occupée par ce qu'on appelle un névé, soit une couche de neige qui ne fond pas totalement au courant de l'été, mais qui peut être transformée à divers degrés. Les névés peuvent aussi prendre la forme de petits bancs de neige statiques dans des couloirs ou dans des dépressions du terrain, comme on en voit à la figure 33. La classe que nous décrivons ici inclut autant les névés que les zones de neige.

De toutes les surfaces cryosphériques, c'est la neige qui possède les plus fortes valeurs pour l'indice ETM4/ETM5. Cet attribut nous permet de délimiter grossièrement les surfaces neigeuses qu'on retrouve à la tête de la plupart des glaciers et qui occupe une partie importante de la calotte glaciaire de Penny. L'interprétation de l'image satellitaire nous a permis de fixer de façon relativement arbitraire un seuil marquant la transition entre la glace et la neige. Rappelons que cette transition doit plutôt être considérée comme un continuum. Pour nous être intéressés à d'autres indices pertinents, nous pouvons dire que le choix de l'indice ETM4/ETM5 s'avère judicieux. La figure 34 illustre la différence entre ce dernier et le *Normalized Difference Snow Index* (Sidjak and Wheate, 1999), qui est donné par le calcul :

$$\frac{ETM2-ETM5}{ETM2+ETM5}$$

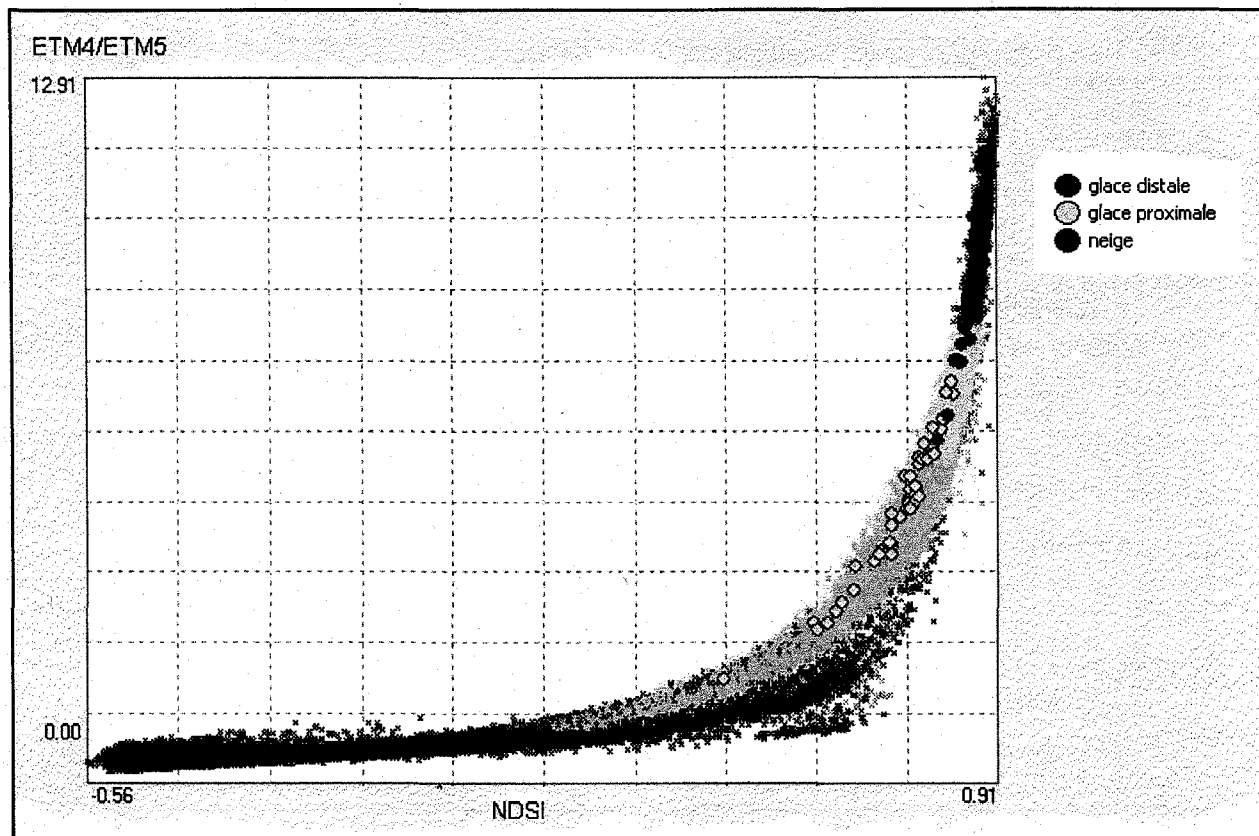


Figure 34: Les surfaces cryosphériques possèdent des valeurs élevées pour l'indice ETM4/ETM5 et pour le NDSI

Pour les valeurs les plus élevées, il se produit un tassement dans les valeurs du NDSI, alors que, les valeurs de l'indice ETM4/ETM5, elles, s'étirent à ce bout du spectre. Il appert donc plus facile de discriminer entre les différentes classes cryosphériques en référant à ce dernier attribut plutôt qu'au NDSI.

4.2.3. La neige gorgée d'eau de fonte

Lors des journées chaudes de l'été, les glaciers du parc génèrent d'importants volumes d'eau de fonte. Par l'effet de la pente, cette eau voyage en créant un réseau de chenaux à la surface, à la base et à l'intérieur même des glaciers. Toutefois, là où les surfaces sont plus plates et où subsiste de la neige, il s'accumule parfois des quantités appréciables d'eau, qui se mélange alors à la neige. Comparativement aux autres surfaces de neige et de glace, les surfaces de neige ainsi gorgée d'eau se démarquent par des valeurs très faibles pour l'indice ETM4/ETM3. Évidemment, on doit considérer l'apparition et l'expansion de telles surfaces comme des phénomènes très variables dans le temps. Néanmoins, leur localisation nous renseigne sur la structure des glaciers.

4.2.4. La glace entremêlée de débris morainiques

Souvent, le bout des glaciers ne se situe pas là où s'arrête la glace à la surface. En effet, la masse de glace peut se prolonger bien en aval de cette limite, sous une couche de débris morainiques de plus en plus épaisse. D'ailleurs, au PNC Auyuittuq, même les moraines terminales les plus distantes des glaciers conservent un noyau de glace qui constitue la majeure partie du volume de la moraine (Wilson, 1976). La limite des glaciers peut donc être définie de plusieurs manières mais, dans bien des cas, c'est le profil topographique de la langue glaciaire qui constitue le meilleur marqueur de sa position terminale, car sa surface y est souvent complètement recouverte de blocs, de gravier et de sable. Ceci étant dit, il peut y avoir une zone de transition entre la surface à dominante glaciaire et la surface couverte de débris (figure 35).

Le comportement spectral de la glace entremêlée de débris reflète la transition que nous venons de décrire. On remarque en effet que cette classe renvoie un signal plus fort que la glace dans l'infrarouge (bande ETM5) mais plus faible que les surfaces rocheuses dans la bande thermique (bande ETM6). La combinaison de ces deux attributs définit grossièrement la classe, mais on en précise grandement la description en faisant appel aux trois attributs suivants :

$$\frac{\text{ETM1}}{(\text{ETM1}+\text{2}+\text{3})} \quad ; \quad \frac{\text{ETM2}}{(\text{ETM1}+\text{2}+\text{3})} \quad ; \quad \frac{\text{ETM3}}{(\text{ETM1}+\text{2}+\text{3})}$$

Ces attributs nous permettent de remédier à la confusion avec les classe « Eau turbide proximale », « Eaux » et « Ombre » respectivement.

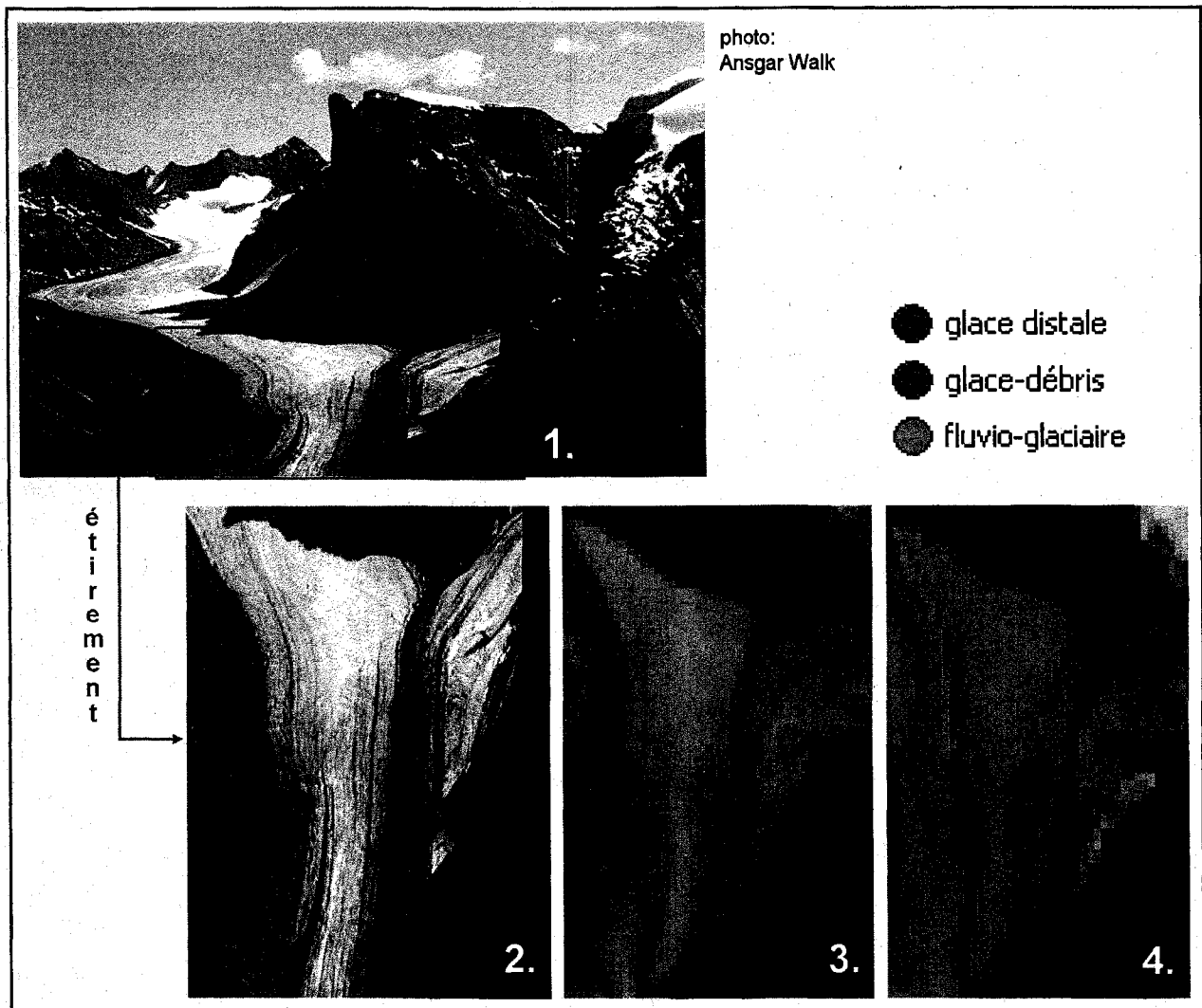


Figure 35: La glace entremêlée de débris morainiques

Deux glaciers se rencontrent en aval du mont Turnweather (1.). On reconnaît dans l'imagerie ETM⁺ (3.) la moraine latérale et une grosse moraine médiane. On voit aussi que plus elle s'approche de ces moraines, plus la glace est encombrée de débris rocheux. L'existence de la classe *Glace-débris* permet de relever cette transition tout en évitant des erreurs de classification entre la glace et les dépôts fluvio-glaciaires.

4.3. Les ombres

La côte est de l'île de Baffin compte parmi les endroits du monde où l'on retrouve les plus hautes falaises. Par l'effet combiné du relief et de la latitude élevée, les ombres couvrent à tout moment un pourcentage appréciable de cette partie du monde. Au moment de l'acquisition de l'image le soleil était à $37,54^\circ$ au-dessus de l'horizon (métadonnées en annexe 5). Tout obstacle sur le terrain projetait donc une ombre sur une distance d'environ 130 % de sa hauteur. Étant donné les dimensions des vallées, ces ombres couvrent souvent plusieurs kilomètres carrés à la fois. Dans les complexes alpins, elles comptent pour près de 25 % de l'image. Sur l'image satellitaire, on remarque que les ombres se divisent en deux groupes aux propriétés spectrales distinctes : 1) les ombres portées sur la neige et 2) les ombres portées sur les autres surfaces. Sur la plupart des surfaces, les ombres créent des zones d'où presque aucun signal n'est renvoyé vers l'espace. Mais, comme le montre la figure 36, les surfaces de neige, elles, renvoient un signal nettement perceptible dans la partie bleue du spectre (par la réflexion du bleu du ciel).

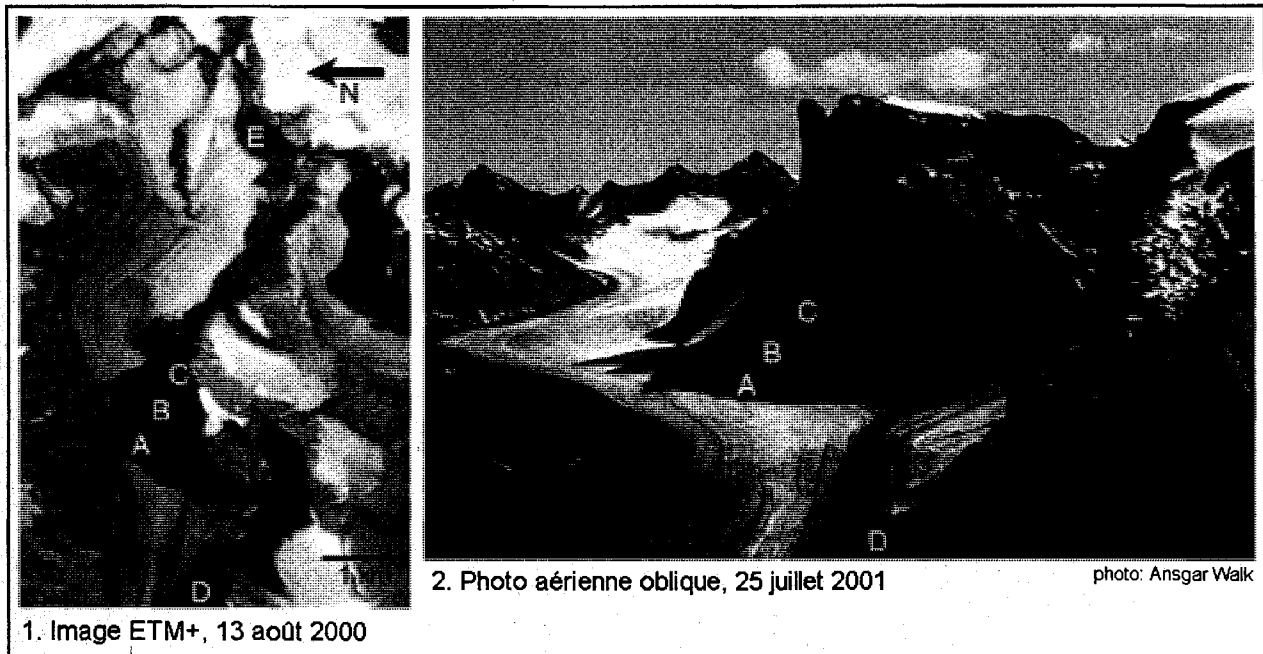


Figure 36: Les ombres

La face nord mont Turnweather est haute de 1000 mètres. Une lumière bleutée est renvoyée de là où son ombre est portée sur la glace (A) et le névé (B). Dans l'ombre, la falaise rocheuse (C) et la moraine (D) renvoient un signal très faible dans toutes les parties du spectre lumineux. La neige peu transformée (E) renvoie un signal plus fort que la glace et le névé, qui est aussi amplifié par le rayonnement solaire réverbéré provenant des étendues de neige à la tête du glacier.

L'observation à l'écran des attributs de l'image segmentée indique que l'indice $ETM1/(ETM1+2+3)$ constitue un bon critère pour faire une sélection brute de toutes les ombres dans l'image. On peut y appliquer une fonction d'appartenance qui sépare les ombres de la majorité des autres classes, mais qui inclut quand même des objets des classes « Sols non-végétalisés » et « Eaux » : 1) les lacs de toundra et 2) les champs de blocs colonisés par les lichens crustosés (figure 37). Nous verrons plus loin que les fonctions d'appartenance appliquées à ces classes d'eau et de sols ont aidé à limiter cette confusion. Ceci étant dit, l'indice $ETM1/(ETM1+2+3+4+5)$, bien qu'apparenté à l'indice donné plus haut, constitue un attribut additionnel qui incorpore le signal infrarouge. Une fois appliqué à la classe *Ombres*, cet attribut permet de distinguer les ombres et les pierriers colonisés par les lichens. À cet indice s'ajoute la bande thermique (ETM6), qui vient préciser la distinction entre ces deux classes (les détails concernant l'ensemble des fonctions d'appartenance des classes, incluant les valeurs des attributs et la forme des courbes utilisés, sont donnés à l'annexe 8).

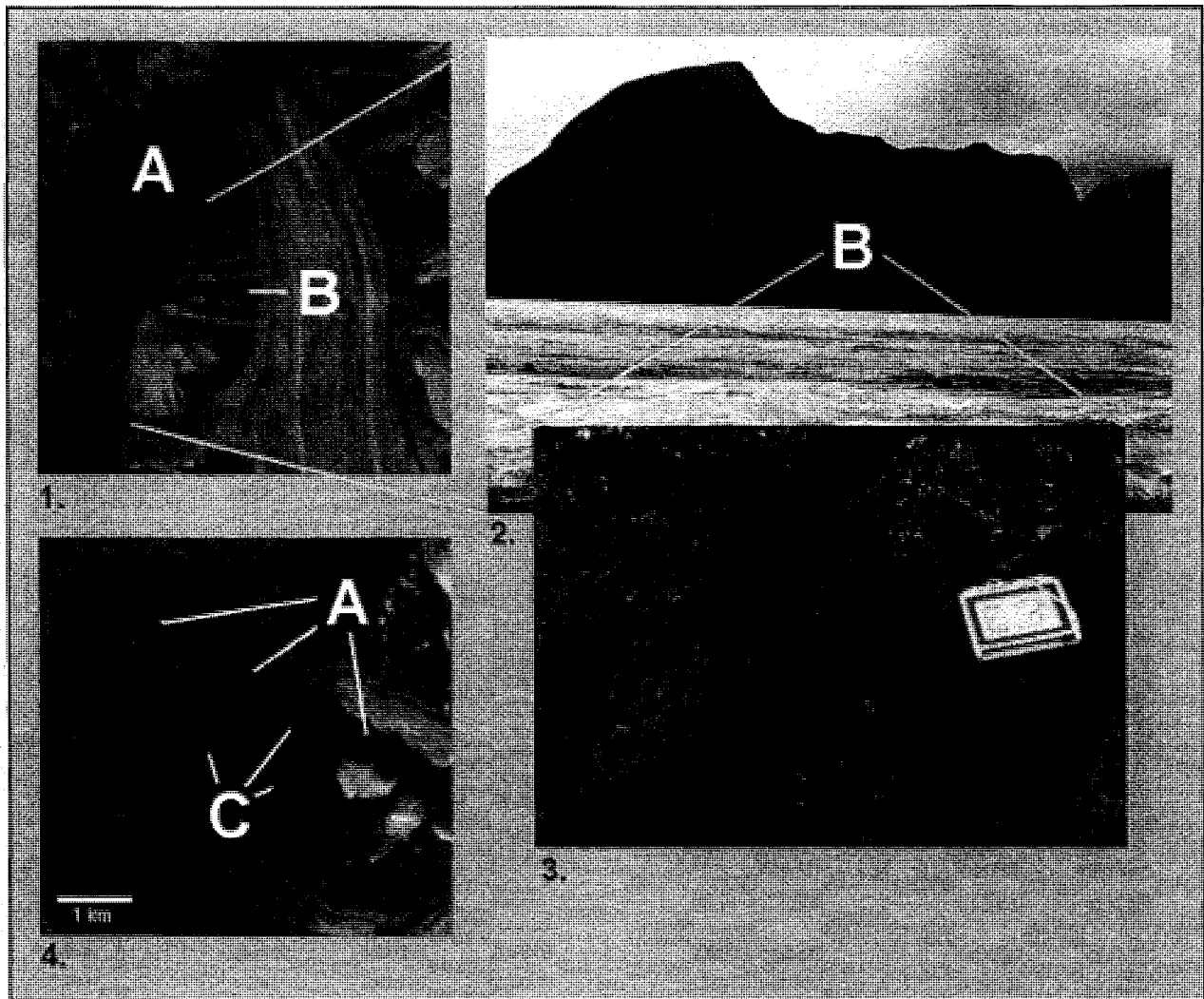


Figure 37: Les propriétés spectrales des ombres (A) les rendent difficiles à distinguer de certains complexes de haute d'altitude (B) et des lacs de toundra (C)
 Le versant nord du mont Thor (1.) est dans l'ombre alors que son versant est (2.) arbore des pierriers colonisés par les lichens crustosés (3.) leur conférant une apparence sombre.

4.3.1. Ombre sur glacier vs Ombre

Il y a parmi les ombres de l'image ETM+ de nombreuses zones que l'on distingue nettement comme étant des parties de glaciers dans l'ombre de montagnes : elles renvoient une couleur bleutée très distinctive. Ceci se reflète bien dans le comportement spectral de ces zones d'ombres. En effet, plusieurs attributs spectraux séparent en deux nuages de points les échantillons d'ombres qui sont portées sur les glaciers et sur les autres surfaces. La figure 38 montre la répartition de ces

échantillons dans l'espace à deux dimensions que forment deux de ces attributs. La technique la plus efficace pour séparer ces deux groupes est de recourir à la classification au plus proche voisin. Les attributs identifiés par le logiciel comme étant les meilleurs pour cette opération sont :

- le signal moyen pour la bande ETM1 ;
- l'indice ETM4/ETM5 ;
- l'indice $ETM1/(ETM2 + ETM3 + ETM4 + ETM5 + ETM6)$;
- l'indice $ETM6/(ETM1 + ETM2 + ETM3 + ETM4 + ETM5)$;
- l'indice ETM1-ETM2.

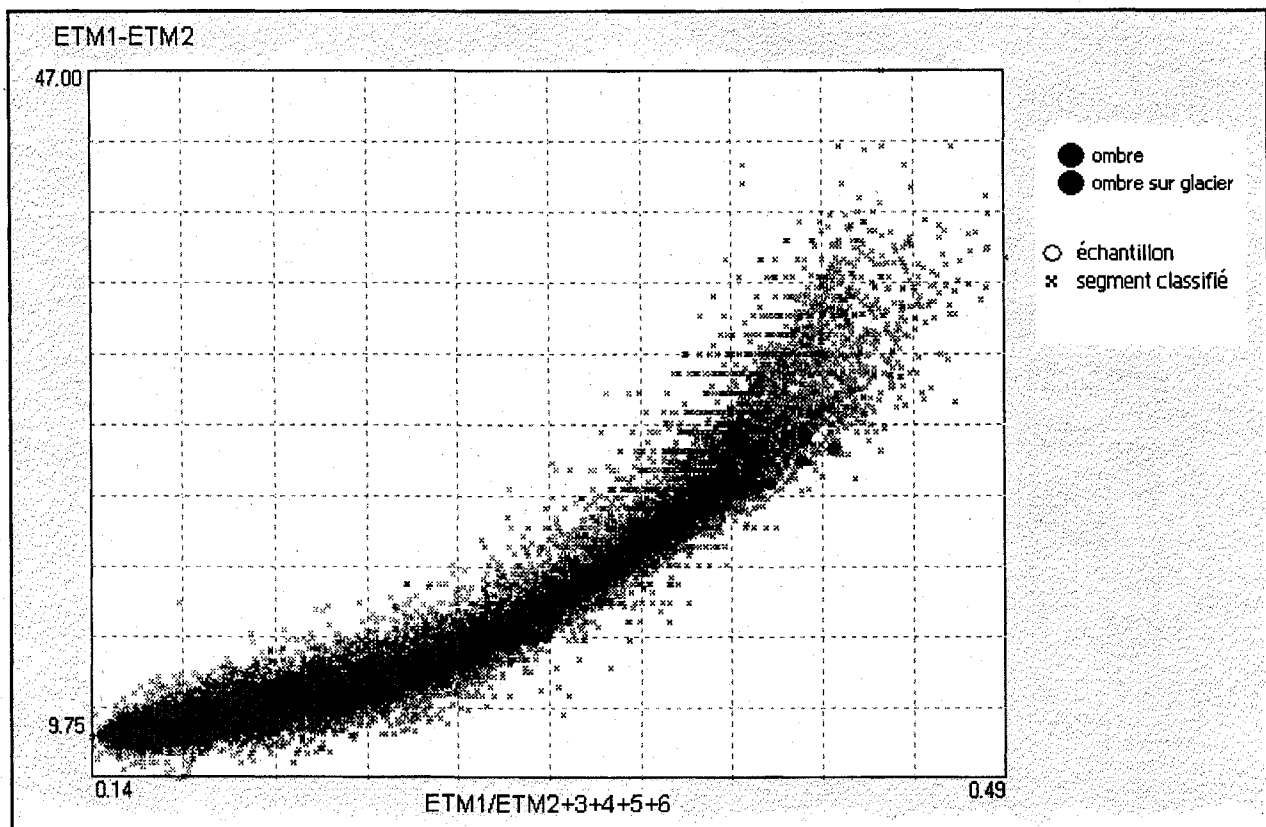


Figure 38: Les ombres dans l'image ETM⁺ forment deux groupes distinctifs selon que l'ombre est portée sur un glacier (surface de neige ou glace) ou sur un autre type de surface

La photo-interprétation de l'image permet de créer des échantillons qui reflètent le comportement spectral de ces deux classes. Les deux attributs utilisés ici font partie d'un groupe d'attributs employé pour une classification au plus proche voisin de ces deux classes. La représentation en deux dimensions donnée ici laisse croire à une confusion entre les deux classes, mais la classification, elle, se fait dans un espace à cinq dimensions, où les nuages de points se séparent beaucoup plus complètement.

4.3.2. Ombre sur falaise

Le territoire du PNC Auyuittuq est à ce point accidenté que de grandes superficies du territoire sont exemptes de sols. En effet, lorsque la pente excède un certain seuil, plus aucun matériel meuble ne parvient à s'accrocher au substratum rocheux. Ainsi sont exposées les nombreuses falaises dans le secteur d'étude. Nous nous sommes servis du MNA du projet pour préciser et utiliser ce seuil comme critère de classification. Toutefois, comme l'effet de moyenne qui s'opère à la fois dans les pixels du MNA et dans les segments du projet cause une sous-estimation du degré de pente réel des falaises, on ne précise pas un degré de pente exact, mais plutôt une mesure relative de la pente.

Toutes les falaises faisant face au nord-ouest, au nord et au nord-est étaient dans l'ombre au moment de la prise de vue. Évidemment, l'ombre que projette une falaise peut aussi couvrir une partie du territoire se trouvant au pied de la falaise. Or celui-ci peut être de toute nature : moraine, plan d'eau, végétation, etc. C'est donc dire que, bien qu'aucun signal discernable ne nous soit retourné dans les zones d'ombre, on peut diviser celles-ci en deux groupes en fonction de la pente : 1) les falaises ombragées et 2) les autres zones d'ombre. La classe «Ombre sur falaise» reprend donc les critères spectraux qui décrivent la classe «Ombre», mais ne comprend que les objets dont la pente est plus forte.

4.3.3. Ombres sur replat

Nous venons de voir que les falaises ombragées ont pu être classées à part. Nous avons aussi vu que l'ombre portée sur la neige et la glace peut, elle aussi, constituer une classe distincte. Bien qu'elles touchent une variété de surfaces, tout ce qu'on sait des ombres qui restent, c'est que les régions touchées sont des zones relativement planes au pied d'une proéminence topographique. Aussi nommons-nous ce groupe « Ombre sur replat ». En plus des critères hérités de la classe « Ombre » cette classe comporte une contrainte liée au degré de pente, de sorte que seules les zones en faible pente peuvent y être incluses.

4.4. Les eaux

L'image ETM⁺ du PNC Auyittuq monte plusieurs types de plans d'eau : lacs et torrents proglaciaires, lacs de toundra, eaux de mer, etc. De turbidité variable, ces surfaces forment un ensemble thématique aux propriétés spectrales diverses. On remarquera de plus que le mélange des eaux provenant de différentes sources crée une variété d'intermédiaires (figure 39).

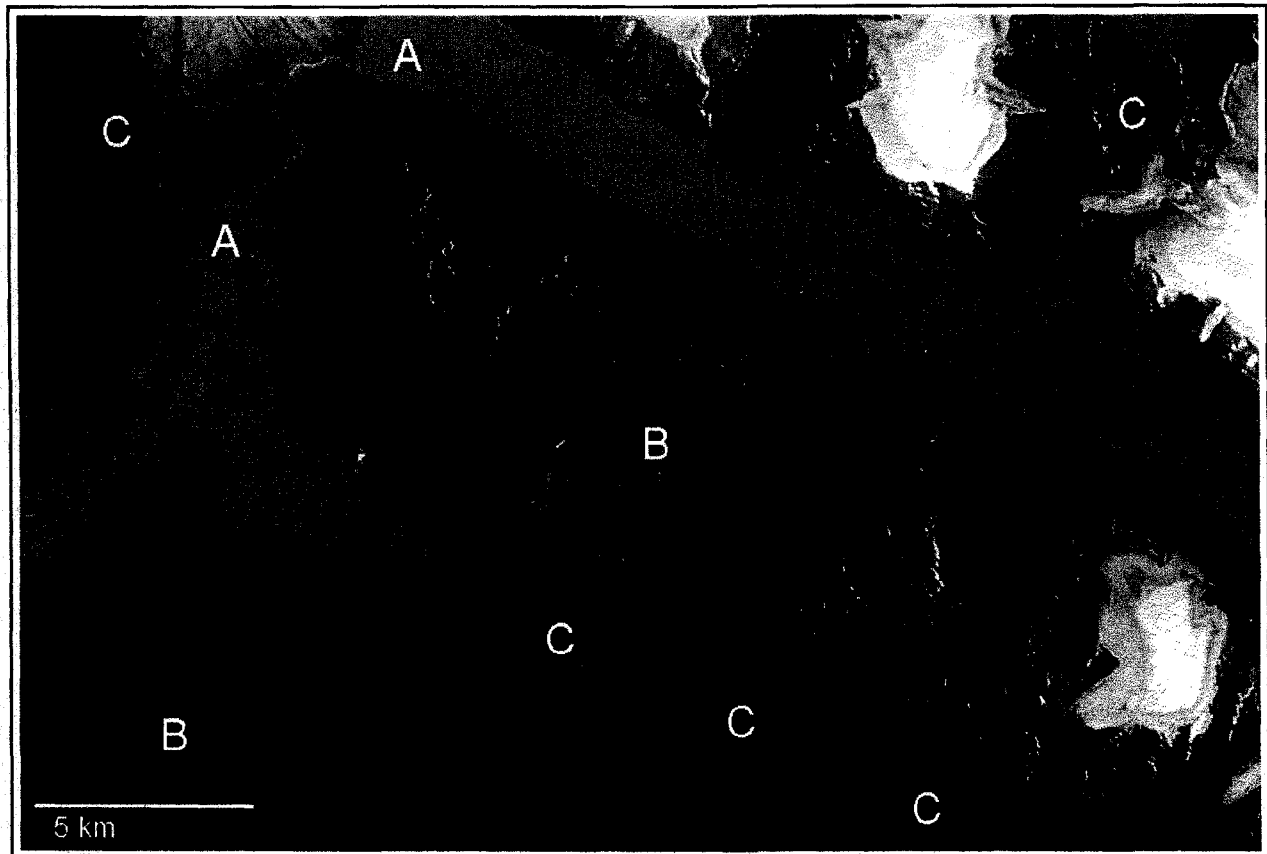


Figure 39: Le secteur du lac Greenshield (67°04'N 66°39'O)

On y note une diversité de plans d'eau aux propriétés spectrales différentes : des torrents et lacs proglaciaires aux eaux visiblement chargées de matières en suspension (A); des lacs de toundra aux eaux très limpides (B) et divers intermédiaires, de turbidité variable (C).

Nous avons déjà vu que certains attributs permettent de mettre à part des autres classes les ombres et les surfaces cryosphériques. Nous verrons qu'il est aussi possible d'écarter les plans d'eau des grands ensembles « Sols » et « Végétation ». Ceci étant dit, nous savons que le détail de la classification finale dépend en partie des critères appliqués aux sous-classes des grands

ensembles. C'est pourquoi l'ensemble thématique « Eaux » ne comporte qu'un seul critère d'appartenance, basé sur la sixième transformation *Tasseled Cap*, qui s'avère un attribut critique pour éliminer toutes les surfaces cryosphériques de l'ensemble « Eaux » (les détails concernant l'ensemble des fonctions d'appartenance des classes, incluant les valeurs des attributs et la forme des courbes utilisés, sont donnés à l'annexe 8).

4.4.1. Eau turbide

Dans le secteur à l'étude, de grandes parties du réseau hydrographique ont comme source les eaux de fonte des glaciers. Or, comme les glaciers sont de puissants agents d'érosion, leurs eaux de fonte charrient une très grande charge sédimentaire, et ce sur des dizaines de kilomètres, bien souvent jusqu'à la mer. Toutes les plus grandes rivières et la majorité des plus grands lacs du secteur sont ainsi alimentés par une eau très turbide, qui les distingue nettement des autres surfaces aquatiques du réseau hydrographique.

En plus du critère très général qu'elle hérite de la classe parente « Eaux », la classe « Eau turbide » comporte plusieurs attributs qui la séparent de diverses surfaces. Par rapport aux surfaces minérales et à la végétation, les segments d'eau turbide se distinguent par un signal moyen plus fort dans la bande 1 (bleue) et par la présence de pixels au signal particulièrement faible dans la bande 5 (infrarouge). Vis-à-vis la neige, les segments d'eau turbide contiennent des pixels au signal plus faible dans la bande 4 (proche infrarouge). Enfin, l'eau turbide se distingue de « Ombre sur glacier » par des valeurs plus fortes dans l'indice $ETM2/(ETM1+2+3)$.

Par rapport aux surfaces d'eau plus claire, l'eau turbide se distingue par un signal plus fort dans les trois bandes du spectre visible, mais surtout dans la bande rouge (ETM3). D'ailleurs, l'indice $ETM3/(ETM1+2+3)$ présente un gradient relativement progressif suivant la turbidité de l'eau. C'est indice a été utilisé pour la classification de plusieurs classes d'eau. L'eau turbide en a les valeurs les plus élevées.

4.4.2. Eau turbide 2

La classe « Eau turbide 2 » a pratiquement la même portée thématique que la classe précédente, mais comprend des descripteurs légèrement différents. La création de cette classe était nécessaire pour reclassifier correctement des segments qui demeuraient non-classifiés. En effet, la classe « Eau turbide » comporte une contrainte liée à l'indice $ETM2/(ETM1+2+3)$, qui aide à en retrancher les ombres portées sur les glaciers. Or cette contrainte exclut plusieurs surfaces d'eau turbide. La classe « Eau turbide 2 » reprend donc tous les descripteurs de « Eau turbide », mais est un peu plus inclusive pour ce qui concerne cet indice. En contrepartie, des critères ont été ajoutés de sorte que tout segment étant immédiatement voisin d'une surface cryosphérique soit exclu de la classe. Mentionnons aussi que la classe « Eau turbide 2 » ne fait pas partie de la classe parente « Eaux » et qu'elle n'en respecte donc pas le critère d'inclusion.

4.4.3. Eau turbide proximale au glacier

Tout comme la précédente, la classe « Eau turbide proximale au glacier » n'est pas soumise au critère d'inclusion de la classe parente « Eaux ». De même, il s'agit ici aussi d'une classe que nous avons été contraints de créer pour résoudre un délicat problème de confusion. Dans ce cas-ci, il s'agissait de reclassifier correctement des surfaces d'eau turbide qui étaient classifiées comme de la « Glace distale ». Les indices $ETM3/(ETM1+2+3)$ et $ETM4/ETM5$ permettent de délimiter la classe grossièrement. La bande thermique ($ETM6$) élimine ensuite une partie de la confusion avec la glace. Puis, l'écart type des valeurs de pixels dans la bande bleue ($ETM1$) vient s'ajouter comme attribut critique pour distinguer les segments d'eau turbide proximale au glacier et le terminus du glacier. Enfin, nous excluons de cette classe tous les segments qui comptent moins de 4 pixels, ce qui réduit la confusion entre cette classe et la classe « Neige et roc ».

4.4.4. Eau verte

La classe « Eau verte » regroupe principalement des lacs dont la turbidité est grande, toute en étant visiblement inférieure à celle de la classe « Eau turbide ». Ceci nous indique que les plans d'eau de cette classe occupent une position hydrographique intermédiaire, où l'apport en sédiments semble compensé en partie par la décantation ou la dilution par des eaux plus claires. Il s'agit souvent de petits lacs isolés parmi des débris morainiques ou encore de grands lacs de vallée en aval de petits glaciers. Parfois, on trouve de petits plans d'eau verte à la bordure latérale des glaciers. Une partie des surfaces marines donne aussi lieu à des zones d'eau dite verte (figure 40). La description de la classe reprend tous les descripteurs de la classe « Eau turbide », à l'exception de l'indice $ETM3/(ETM1+2+3)$.

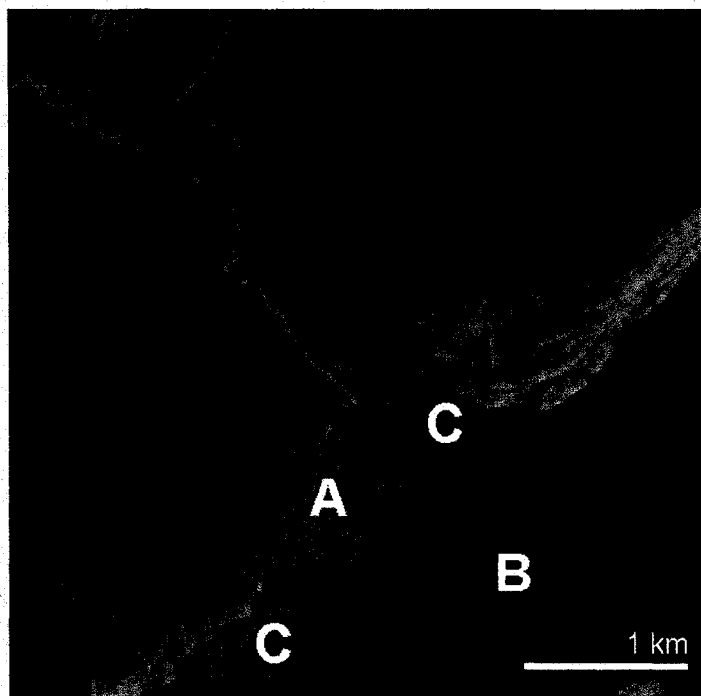


Figure 40 :

Les eaux turbides d'un torrent sans nom se jettent dans le fjord de Kingnait

Les eaux turbides (A) se mélangent à l'eau de mer (B) pour former des zones d'eau de turbidité intermédiaire (C), d'apparence plus verdâtre. Le brassage de sédiments par les marées est aussi une explication possible pour la turbidité apparente de l'eau de mer.

4.4.5. Eau bleue

L'autre intermédiaire qu'on trouve entre l'eau limpide et l'eau turbide est l'eau dite « Eau bleue ». Il s'agit d'une classe plus restreinte. Comme pour la classe « Eau verte », on retrouve cette sorte d'eau dans plusieurs petits lacs situés à proximité des milieux glaciaires (figure 41) ainsi que quelques plans d'eau plus importants à plus grande distance des glaciers. Une partie de l'eau de mer du secteur d'étude se trouve aussi dans cette catégorie. Sa teinte suggère que c'est une eau qui comporte une petite charge sédimentaire, dont le brassage est faible.

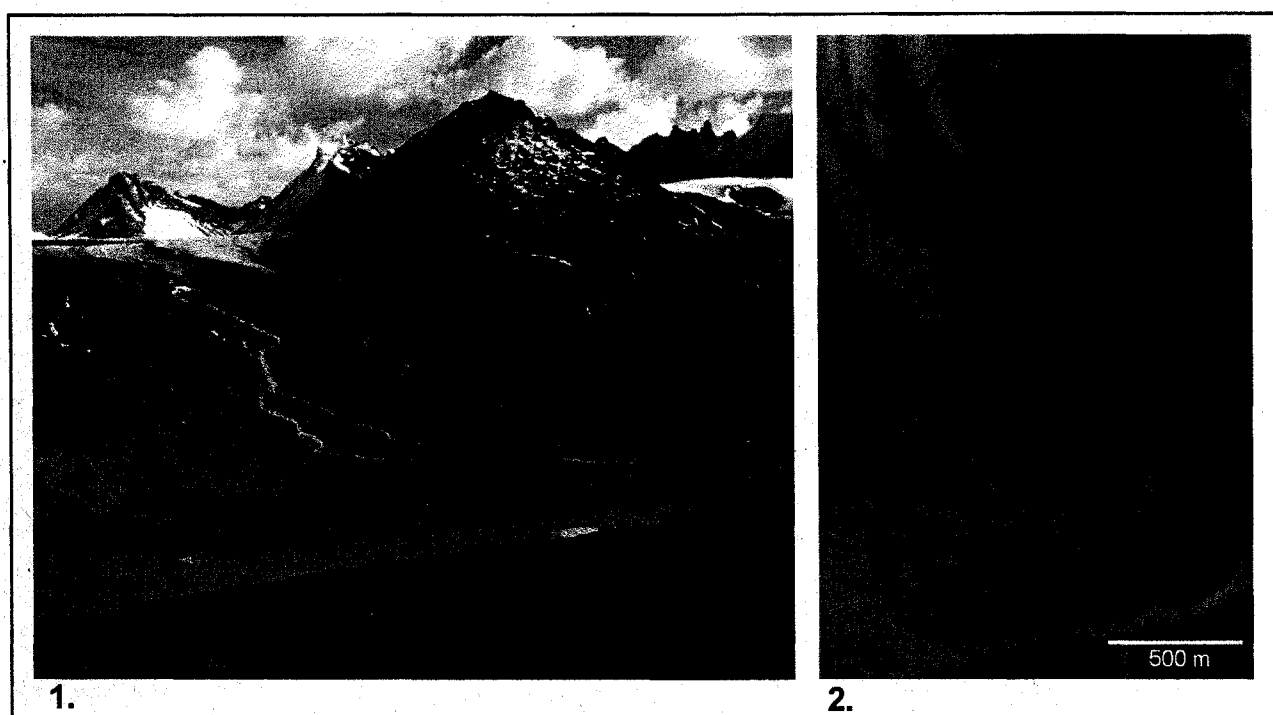


Figure 41: La moraine du glacier Nerutusoq barre l'extrémité ouest du lac Summit
Cette moraine renferme un petit lac (66°36'32"N 65°13'35"O) qui n'est pas directement alimenté par les eaux de fonte du glacier. Alors que l'eau turbide du lac Summit est d'apparence grise-verdâtre, l'eau du petit lac est bleue. Cette différence s'observe aussi bien sur le terrain (1.) que sur l'image satellitaire (2.).

Du point de vue spectral, la classe « Eau bleue » cible les surfaces d'eau qui ont des valeurs faibles pour l'indice $ETM3/(ETM1+2+3)$. Elle récupère ainsi certaines des surfaces qui ne répondent aux critères ni de la classe « Eau turbide », ni de la classe « Eau verte ». Mais, ce simple critère ne parvient pas à circonscrire complètement la classe car il subsiste une confusion avec les petits segments qui se trouvent à la bordure entre la neige et l'ombre. Nous éliminons ce

problème en ajoutant comme condition que seuls les segments ne jouxtant pas les classes d'ombre peuvent être inclus dans la classe « Eau bleue ».

4.4.6. Eau noire

Comme son nom le suggère, la classe « Eau noire » regroupe les plans d'eau dont l'apparence est très sombre sur l'image satellitaire. Ce sont des eaux non-turbides : cette classe ne regroupe que des lacs qui n'entrent pas en contact avec les réseaux hydrographiques qui se développent en aval des glaciers. Les plans d'eau noire sont donc essentiellement alimentés par les précipitations et l'eau souterraine. Leur hydrologie et leur écologie sont donc bien différentes des autres types de plans d'eau. D'ailleurs, ceci se manifeste par un NDVI nettement plus élevé que dans tout autre milieu aquatique du PNC Auyuittuq.

La clarté de l'eau noire favorise l'absorption du rayonnement incident dans toutes les parties du spectre. La figure 37 nous a illustré le problème de confusion qui existe entre l'eau noire et les ombres. Le problème est tel que nous n'avons trouvé aucun attribut spectral permettant de séparer ces deux classes de façon satisfaisante. C'est seulement en combinant des attributs spectraux et des critères topographiques que nous sommes parvenus à donner une description satisfaisante de la classe « Eau noire ». D'abord, la bande bleue (ETM1) et l'indice $ETM1/(ETM1+2+3)$ ont servi à séparer l'eau noire de la plupart des autres classes, en particulier des milieux humides et de la classe «Eau verte». Toutefois, ces critères ne permettent pas de la distinguer des ombres. Comme critère topographique, nous faisons appel à l'écart type des valeurs d'altitude à l'intérieur des segments. Comme les lacs sont des surfaces planes dans le MNA, il se trouve que cet écart type y est plus faible qu'ailleurs, ce qui nous permet d'écarter les ombres de cette classe. Pour réduire la confusion résiduelle, nous avons exclu de la classe « Eau noire » tous les territoires qui se trouvent à plus de 1 000 m d'altitude.

4.4.7. Eau noire hors-MNA

Malgré les efforts de rectification géométrique qui ont été faits pour que le MNA se superpose le mieux possible à l'image satellitaire (annexe 7), l'adéquation n'est pas partout parfaite. Ceci se voit plus facilement le long des rives des plans d'eau, où on remarque une erreur de l'ordre de quelques pixels par endroits. Comme la classe « Eau noire » repose essentiellement sur un critère lié à la pente du terrain, il en résulte que certaines bordures de lacs et plusieurs petits lacs d'eau noire se voient classifiés comme des ombres. Dans d'autres cas, la mixture spectrale des pixels donne aussi lieu à une classification erronée où la bordure des lacs d'eau noire est classée comme un milieu humide (classe « Prairie de laïches »). En créant un groupe d'échantillons avec ces segments mal classifiés, nous avons pu cerner les caractéristiques d'une classe très ciblée que nous appelons « Eau noire hors-MNA ». L'indice $ETM2/(ETM1+2+3)$ permet de limiter la confusion avec les ombres. L'indice $ETM3/(ETM1+2+3)$, lui, permet de limiter la confusion avec les milieux humides.

4.5. Les sols non-végétalisés

La classe « Sols non-végétalisés » est un groupe thématique très inclusif. En effet, ce groupe réfère à l'ensemble des surfaces non-aquatiques et non-cryosphériques que l'on reconnaît dans l'image satellitaire, et dont le taux de végétalisation est inférieur au seuil que nous avons défini pour l'ensemble thématique Végétation (section 4.1.). Les textures y sont diverses, allant des argiles alluvionnaires aux falaises, en passant par les dépôts éoliens, les graviers fluvioglaciaires et les champs de blocs gélifractés. Toutes ces surfaces ne sont donc pas des « sols » au sens du Système canadien de classification des sols (Agriculture et agroalimentaire Canada, 2008), mais nous retenons cette appellation à défaut d'un meilleur terme.

On peut départager les sols non-végétalisés de chacun des autres grands ensembles thématiques par le recours à des fonctions d'appartenance faisant appel à divers attributs. Par rapport aux ombres, les sols non-végétalisés se distinguent par un signal plus fort dans le proche infrarouge (bande ETM4). Bien que cet attribut permette aussi de retrancher une grande partie des classes d'eau, l'infrarouge moyen (bande ETM5) s'avère utile pour préciser cette séparation,

particulièrement avec les eaux plus limpides. Quant aux surfaces plus « froides », elles se distinguent des sols non-végétalisés dans la partie thermique du spectre (bande ETM6). Cet attribut est spécialement utile pour retrancher la glace encombrée de dépôts morainiques et les eaux turbides proximales aux glaciers. Comme nous l'avons évoqué plus haut, la séparation avec la végétation est fonction du pourcentage de couverture végétale, dont le NDVI est un indicateur éprouvé. Ce sont principalement les critères exclusifs de la classe Végétation qui contrôleront l'appartenance possible des objets à ce groupe. Mais nous avons remarqué que la valeur minimale du NDVI dans le segment (la valeur du pixel le plus faible) s'avère une aide additionnelle pour bien séparer les deux groupes.

4.5.1. Les complexes de haute altitude clairs et foncés

Les complexes de haute altitude (CHA) forment une zone de transition entre la végétation continue et les dénudés rocheux, en particulier lorsque s'opère sur la végétation l'effet progressif de l'altitude. Pour toutes les raisons qui ont été explicitées à la section 4.1.1, cette classe est reléguée aux classes non-végétales, contrairement à ce qu'ont proposé Manseau *et al.* (2003).

En comparant entre elles les surfaces non-végétalisées, nous avons remarqué que plusieurs classes se départagent assez bien le long du gradient que forme l'indice $ETM6/(ETM1+2+3)$. Ceci est particulièrement vrai pour les CHA, qui en portent les valeurs les plus élevées. En se basant sur les relevés de terrain et en créant en plus des échantillons par photo-interprétation, nous nous sommes aperçus que ce seul critère suffit pour délimiter de façon satisfaisante l'espace qu'occupent les CHA. Sur l'image satellitaire, on remarque que les complexes de haute altitude ont une apparence qui varie grandement entre des teintes claires et plus foncées. Or, pour ce qui concerne les plus foncées, ces teintes semblent refléter la présence d'un type de surface bien particulier. En effet, là où les teintes sont les plus foncées sur l'image satellitaire, on trouve sur le terrain des champs de gros blocs anguleux dont la surface est encroûtée de lichens. Ces champs de blocs, qu'on appelle aussi *felsenmeers*, parviennent à se développer là où la gélifraction du substratum rocheux a pu agir pendant une très longue période de temps, sans perturbation importante (figure 42). Cette longue durée pourrait d'ailleurs expliquer l'abondance de lichens encroûtants. Andrews et Dyke (1974) avancent l'idée que la limite altitudinale inférieure des

étendues de felsenmeers correspondrait à la limite supérieure atteinte par la glace au maximum de la glaciation du Wisconsin. Bien que tout CHA foncé ne soit pas forcément un felsenmeer, il est probable que la grande majorité des felsenmeers du secteur à l'étude se retrouvent dans cette catégorie. La présence de CHA foncé en indique donc la présence probable. À ce titre, nous avons cru bon de scinder la classe CHA en deux : les « clairs » et les « foncés ». Nous nous sommes bornés à employer une classification au plus proche voisin, qui range tout objet de CHA dans l'une ou l'autre des deux catégories en fonction de sa proximité avec les nuages de points des échantillons créés pour ces deux groupes. Les attributs retenus pour la réalisation de ce tri sont :

- ETM3/(ETM1+2+3) ;
- ETM1/(ETM2+3) ;
- ETM1/(ETM1+2+3+4).

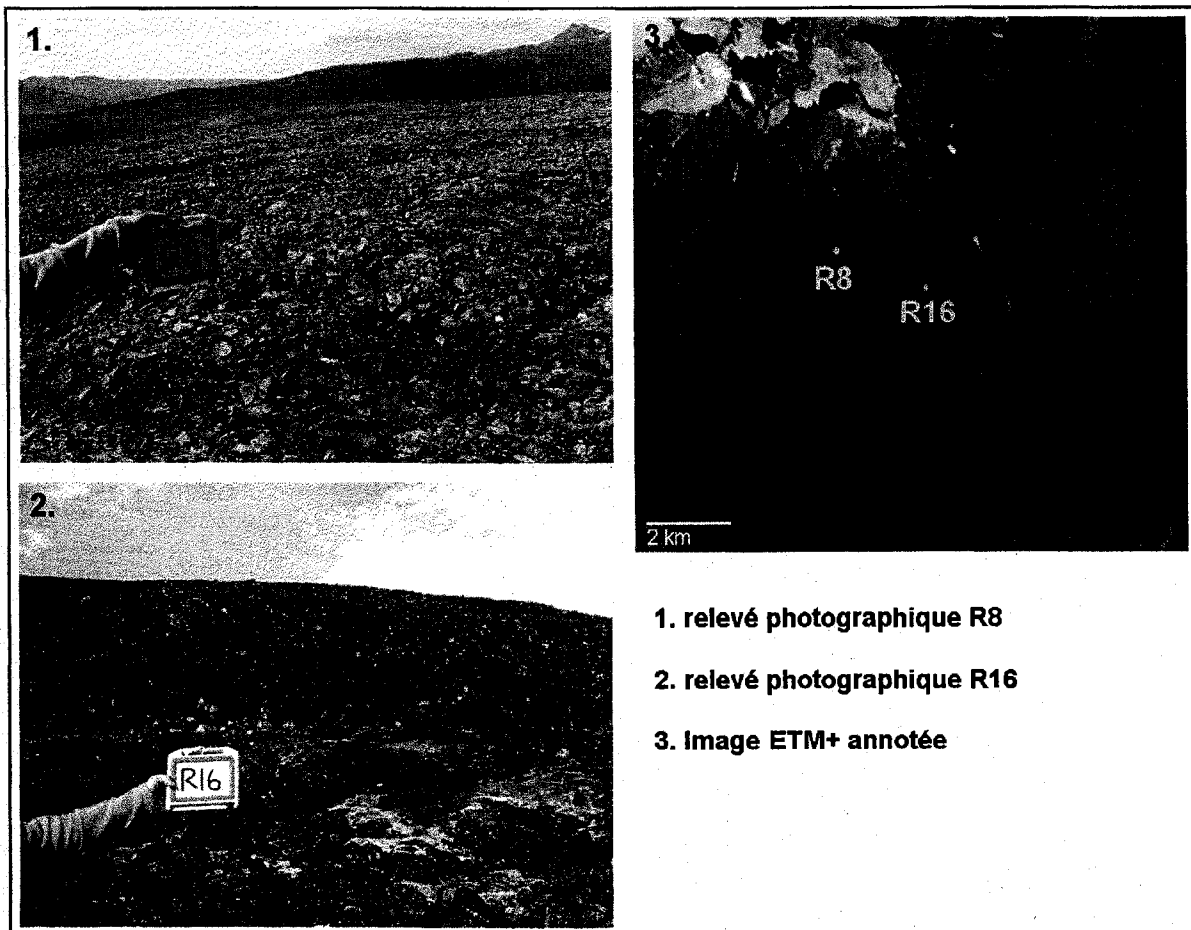


Figure 42: Les relevés effectués sur le terrain nous permettent de localiser sur l'image ETM⁺ des exemples de différentes classes

Le relevé R8 donne un exemple d'un « Complexe de haute altitude clair » ; le relevé R16 montre à l'arrière-plan un exemple de *felsenmeer*, que l'on classe avec les « Complexes de haute altitude foncés ».

4.5.2. Les dépôts fluvioglaciaires secs

Dans un milieu comme le parc national du Canada Auyuittuq, les glaciers et les torrents transportent de grandes quantités de sédiments qui se déposent en différents endroits selon divers modes de transport. Lorsque les processus de transport sont encore actifs, ou lorsque les dépôts sont suffisamment récents, ceci donne lieu à des formes de terrain qui conservent une surface essentiellement minérale (encore peu colonisées par la végétation). C'est le cas de deux catégories de dépôts particulièrement bien représentées dans le parc : les tills récents et les alluvions.

Il existe des moraines de différents âges au PNC Auyuittuq, mais les plus récentes et donc les plus visibles sont de loin celles qui ont été formées lors de la dernière avancée des glaciers, qui remonte au Petit Âge glaciaire (Mercier, 2004). Depuis cette période, on observe un recul des fronts glaciaires (figure 43). Les moraines terminales qui ont été formées à l'apogée de cette avancée se trouvent aujourd'hui à bonne distance des glaciers. En raison de leur âge relativement jeune, ces moraines ainsi que le till de fond laissé par le recul sont peu végétalisés. C'est essentiellement de ces surfaces qu'il est question ici.

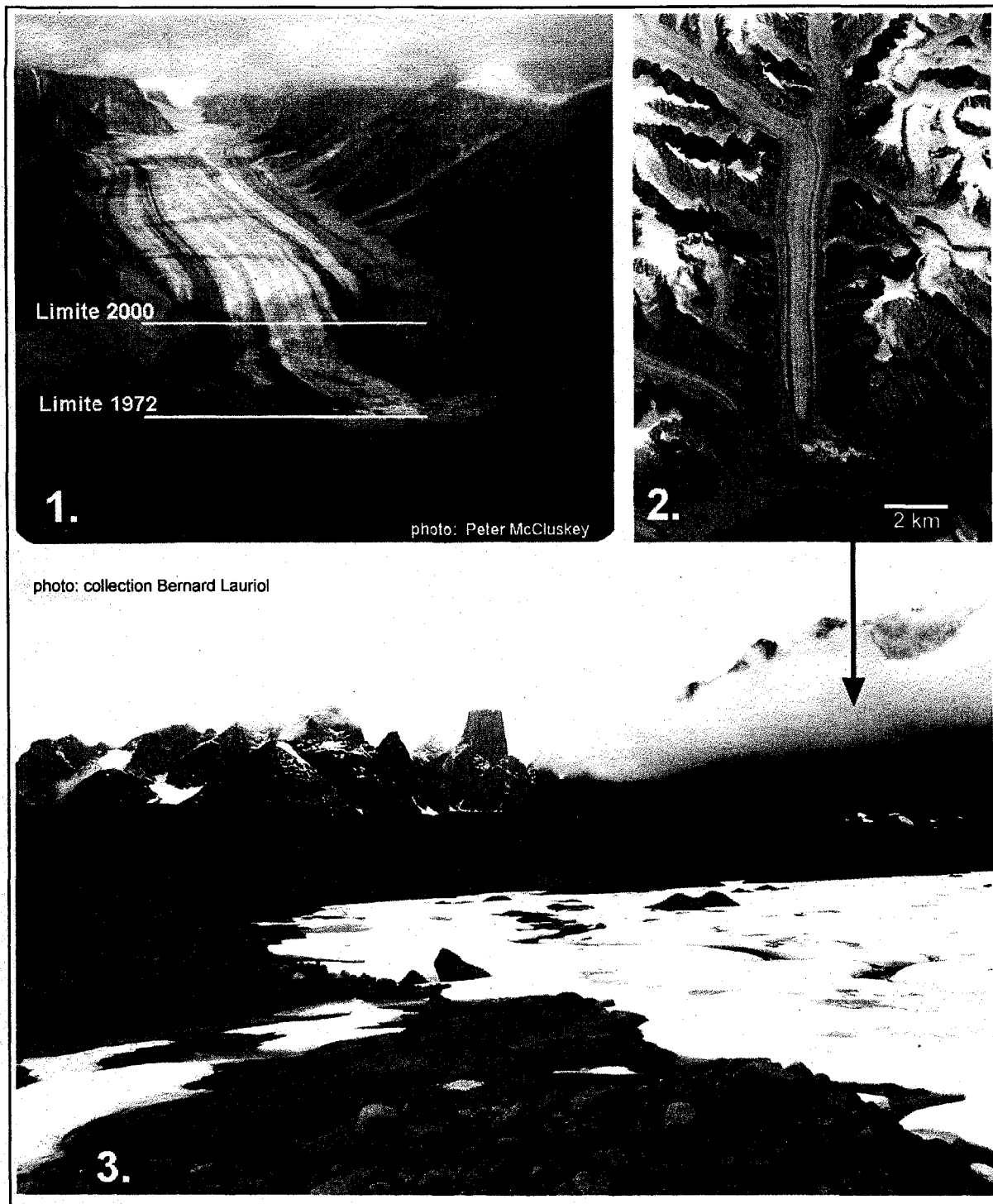


Figure 43: Les glaciers du parc national du Canada Auyuittuq ont connu une avancée lors du Petit Âge glaciaire

Comme en témoigne le taux de recul du glacier Highway (1.), de grandes parties des moraines aujourd'hui libres de glace ne sont exposées que depuis peu. L'image ETM⁺ (2.) montre l'étendue de la moraine de ce glacier. En plus du phénomène d'aufeis particulier à cette moraine, on notera la texture typique des dépôts qu'on y trouve : un mélange hétérogène de sable, gravier et blocs arrondis (3).

Au PNC Auyuituq, les plaines alluviales forment de vastes lits de graviers et de dépôts fins. Ces plaines doivent leur origine aux inondations récurrentes des rivières qui s'y creusent par ailleurs un ensemble de chenaux anastomosés (figure 44). En raison de la glace qui les recouvre aussi pendant l'hiver, les plaines alluviales sont exemptes de végétation sur de grandes superficies.

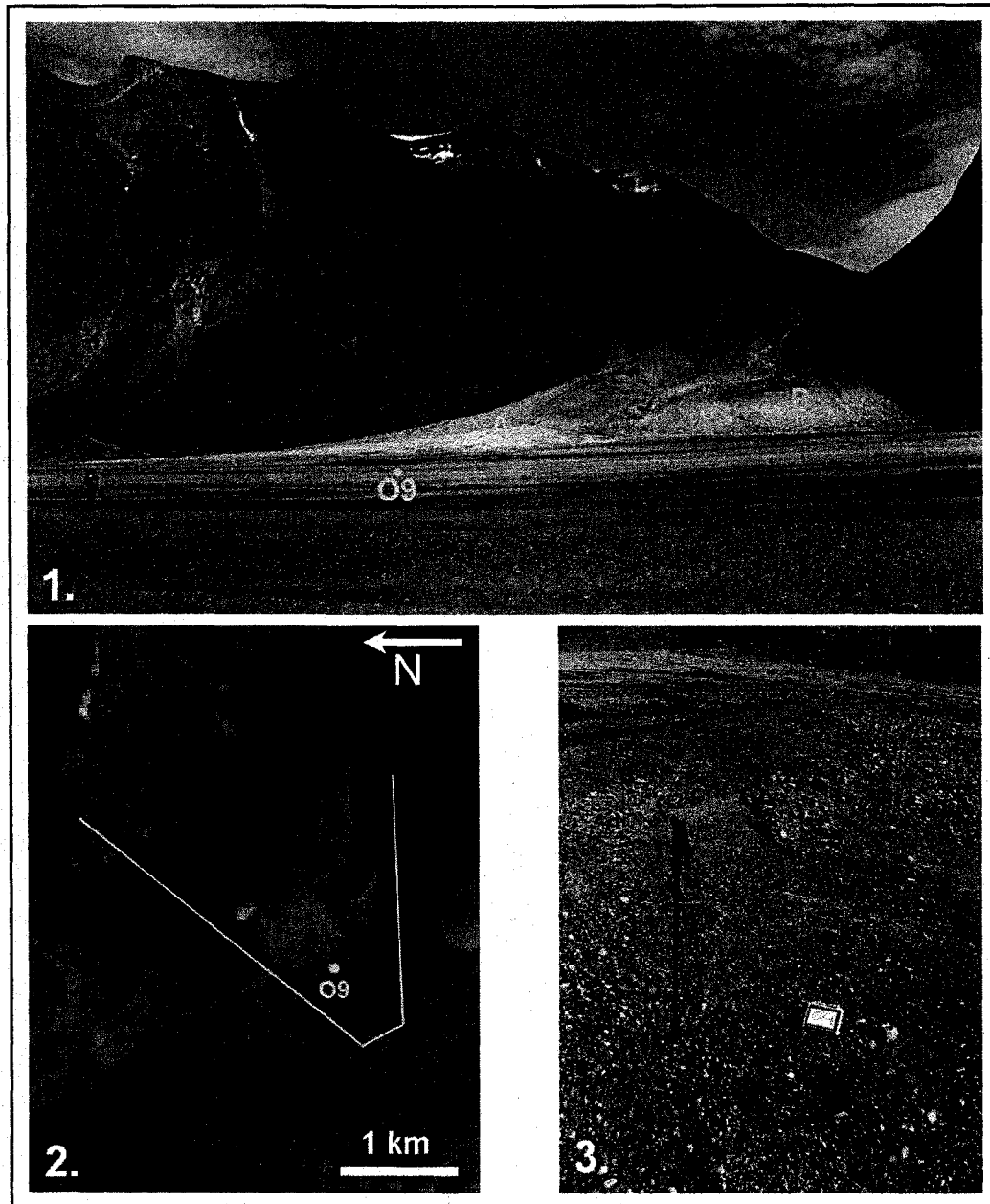


Figure 44: Les plaines alluviales qui bordent la rivière Weasel

La plaine atteint plusieurs centaines de mètres de largeur au pied de la moraine du glacier Turnweather (1.). L'image ETM⁺ montre, en plus des plaines d'alluvions, l'épandage proglaciaire (A) et la moraine (B) du glacier (photo 2.; la prise de vue de la photo 1 est délimitée par les lignes jaunes). Le relevé photographique O9 (3.) montre la texture des dépôts fluviaux; noter l'épandage et la moraine en arrière-plan.

De par leur contexte, on est capable de différencier les moraines et les plaines alluviales par interprétation de l'image satellitaire. Il nous a donc été possible de créer une banque d'échantillons pour chacune de ces deux formes de terrain. L'étude détaillée de ces deux groupes d'échantillons ne nous a cependant pas permis de trouver un moyen satisfaisant de classer les deux surfaces séparément, et ce même en ayant recours à des critères topographiques. Nous avons donc été contraints de regrouper ces deux types de surfaces en une seule classe que nous avons appelée « Dépôts fluvio-glaciaires secs ». Cette classe se distingue des « Complexes de haute altitude » par des valeurs plus faibles pour l'indice $ETM6/(ETM1+2+3)$. De même, elle détient des valeurs faibles pour l'indice $ETM5/(ETM1+2+3)$, ce qui la sépare de la classe « Dénudés rocheux ». Enfin, la classe se limite aux pentes moins fortes, ce qui aide à limiter la confusion avec les flancs de montagne rocheux.

4.5.3. L'alluvium-eau

Par opposition aux « Dépôts fluvio-glaciaires secs », la classe « Alluvium-eau » touche des parties de l'image qui semblent comprendre des alluvions dont le contenu en eau est élevé. D'ailleurs, la très grande majorité des objets qui se retrouvent dans cette classe jouxte un plan d'eau turbide. La mixture spectrale entre l'eau et les dépôts fluvioglaciaires pourrait aussi expliquer la présence d'un objet dans cette classe. Bien qu'elle soit rangée parmi les « Sols non-végétalisés », il faut considérer cette classe comme une transition entre le milieu purement aquatique et les dépôts alluviaux qu'on retrouve principalement le long des chenaux anastomosés des grandes rivières.

La classe « Alluvium-eau » montre des valeurs plus faibles pour l'indice $ETM4/ETM3$. Cet attribut permet de la séparer de toutes les autres surfaces du groupe des « Sols non-végétalisés », à l'exception du mélange « Neige et roc ». Pour la départager de cette dernière, la classe « Alluvium-eau » est limitée aux altitudes inférieures à 475 m, ce qui est en accord avec l'origine fluviatile de cette classe.

4.5.4. Les dénudés rocheux : falaise, sable et roc

Au sens de la présente classification les dénudés rocheux sont les surfaces minérales qui n'ont pas pour origine les processus de transport fluvioglaciaires. On les distingue des dépôts fluvioglaciaires et des complexes de haute altitude par les valeurs intermédiaires qu'ils prennent pour l'indice $ETM6/(ETM1+2+3)$. On reconnaît trois classes parmi les dénudés rocheux : la falaise, le sable et le roc (figure 45). Les propriétés spectrales de ces trois classes sont très semblables et les transitions que nous avons définies entre elles sont empiriques et relativement arbitraires. Ceci dit, nous faisons appel à divers critères spectraux, topographiques et contextuels pour séparer ces classes. Comme nous l'avons déjà mentionné à la section 4.3.2, il existe un degré de pente au-delà duquel les dépôts meubles ne peuvent s'accrocher au substratum rocheux. Sont ici désignées comme « Falaises » les surfaces qui excèdent les 35 degrés de pente (cette valeur est tirée du MNA, mais est vraisemblablement une sous-estimation du degré de pente réel).

Les multiples agents d'érosion qui agissent sur les roches cristallines du PNC Auyuittuq y génèrent d'importantes quantités de sable. Comme le font remarquer Hines *et al.* (1988), plusieurs types de sols du parc sont modifiés à divers degrés par l'apport de sable éolien. Ces auteurs rangent la vallée Akshayuk parmi les sites où on trouve le plus de dépôts de sable. Les forts vents qui balayent les vallées trouvent dans les moraines d'importantes sources de sable. Canalisés par la forme des vallées, les vents sont forcés de suivre un parcours défini. Le long de ce parcours se trouvent des puits de sable là où le relief favorise un ralentissement éolien (Neuman, 1987). À certains endroits, le sable se mélange à un colluvium plus grossier, mais il réussit parfois à former des dunes plus homogènes qui couvrent plusieurs hectares de terrain. On trouve les dépôts de sable les plus homogènes au pied des grandes pentes des vallées, le long de certains cours d'eau et sous le vent de certains obstacles topographiques comme les moraines. Par rapport aux autres « Dénudés », les dunes de sable se distinguent d'abord par leur position topographique, où tant l'altitude que la pente sont relativement faibles. Ces deux critères sont donc employés pour définir la classe. Par ailleurs, le sable renvoie un signal légèrement plus fort que les autres surfaces dans l'infrarouge (bande ETM5). La combinaison de ces trois attributs rend possible une classification satisfaisante de dépôts de sable du parc.

La classe « Roc » est la dernière des trois catégories de « Dénudés ». Elle comprend les vastes étendues désertiques qu'on retrouve en haute altitude dans le parc et ses environs. Sa surface est constituée de blocs et d'affleurements rocheux. Du point de vue spectral, c'est la classe par défaut du groupe. C'est-à-dire qu'aucune contrainte spectrale n'est ajoutée à celle que la classe hérite de la classe parente « Dénudés ». Par contre, la classe « Roc » inclut plusieurs critères topographiques et contextuels. D'abord, elle se limite aux altitudes les plus élevées et aux pentes faibles et moyennes. Puis elle exclut tous les objets qui jouxtent la glace distale et la glace entremêlée de débris, car ils ont plus de chance d'être en fait des moraines.

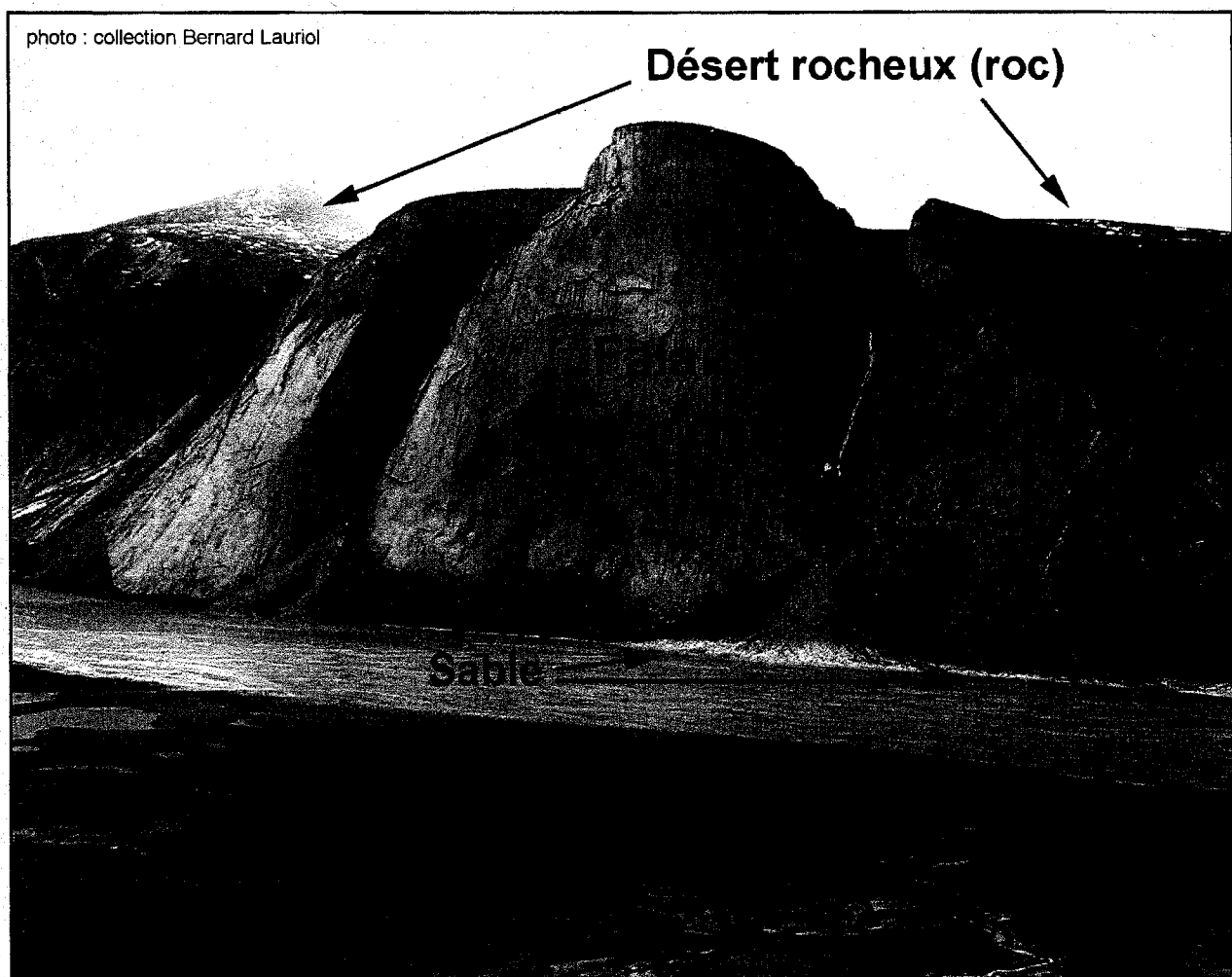


Figure 45: Falaises, sable et roc au PNC Auyittuq

Sur les hautes terres, les dénudés prennent la forme de déserts de roc. Des falaises comme celle-ci ($66^{\circ}46,0' N$ $66^{\circ}44,0' O$), haute de 1 000 m, se forment là où la pente est forte. Au pied des pentes, le vent dépose par endroit suffisamment de sable pour modifier visiblement les propriétés de la surface.

4.5.5. Le mélange neige et roc

Il existe au PNC Auyuittuq d'innombrables petits couloirs de neige dans les zones en altitude. Si l'on considère aussi le pourtour des nombreux champs de neige du parc, on s'aperçoit qu'un nombre considérable de pixels de l'image satellitaire présentent un mélange entre les propriétés spectrales de la neige et des surfaces rocheuses. Or, ces zones donnent souvent lieu à de petits segments ne contenant que des pixels mélangés. Du point de vue spectral, ces objets sont distincts autant des surfaces exclusivement neigeuses que des surfaces exclusivement rocheuses. Parmi les classes du groupe de « Sols non-végétalisés », le mélange de neige et de roc est celle dont les valeurs sont les plus faibles pour l'indice $ETM6/(ETM1+2+3)$. Une fonction d'inclusion sur la base de ce seul critère suffit pour inclure la grande majorité des petits segments affectés par ce problème de mixture spectrale.

4.6. La classe «No data»

Le coin sud-ouest de l'image que nous avons utilisée ne contient pas de données, car on y déborde de l'image satellitaire. Cette portion de l'image a été segmentée malgré tout. De manière à soustraire ces segments du projet, nous avons simplement créé une classe qui isole tous les segments dont le signal est nul dans les bandes 1, 2 et 3.

4.7. Les segments non-classifiés

Au terme des nombreuses itérations de classification et de validations qualitatives, on obtient une structure complexe de fonctions d'inclusion, d'exclusion, de classification au plus proche voisin et de critères relationnels liés aux classes du projet. De par les nombreux critères restrictifs que comportent cette structure, un certain nombre de segments dans l'image se trouvent à ne répondre aux critères d'aucune classe. Par des ajustements fins, nous sommes parvenus à rendre certaines descriptions de classes plus inclusives, mais il y a une limite à ces ajustements. En effet, si l'on assouplit trop la description des classes, on se trouve à ouvrir la porte aux erreurs. Une fois la structure finale érigée, il y a donc un nombre de segments qui demeurent non-classifiés. Dans

notre cas, ce problème touche 2 604 segments, soit moins de 1 % de tous les segments, pour environ 0,2 % (1 960 ha) du territoire étudié.

Le problème des segments non-classifiés peut être en partie résolu en contournant les critères d'inclusions des classes. Il s'agit de créer une nouvelle catégorie dont le critère d'inclusion repose justement sur l'attribut *classified as "unclassified"*. Ce groupe a été nommé « Segments non-classifiés ». Sans être un ensemble thématique, ce groupe peut quand même faire l'objet d'un tri secondaire. En effet, parmi les segments non-classifiés, plusieurs peuvent être associés à une des classes déjà existantes. Par exemple, on voit que certains segments non-classifiés sont des ombres portées sur les glaciers, semblables à celles que nous avons déjà classifiées. En créant une classe pour chacun des principaux types de surfaces que touchent les segments non-classifiés, on obtient la liste suivante :

- Roc non-classifié ;
- Eau noire non-classifiée ;
- Eau turbide non-classifiée ;
- Fluvio-glaciaire non-classifié ;
- Ombre non-classifiée.

En utilisant la fonction « optimisation de l'espace-attribut », on peut comparer chacune de ces classes avec chacune des autres prise une à une. Cet exercice révèle que certains attributs reviennent plus régulièrement comme attributs utiles pour discriminer entre ces classes. C'est le cas des attributs suivants :

- valeur du pixel au signal le plus faible dans la bande ETM5 ;
- valeur du pixel au signal le plus faible dans la bande ETM6 ;
- l'indice $ETM1/(ETM1 + ETM2 + ETM3 + ETM4)$;
- l'indice $ETM2/(ETM1 + ETM3 + ETM4)$;
- écart-type des valeurs de NDVI.

Une classification au plus proche voisin des segments non-classifiés a été réalisée sur la base de ces cinq attributs. Certains critères contextuels sont aussi ajoutés à cette description (annexe 8). Les classes résultantes seront fusionnées à leur classe jumelle pour la création des niveaux hiérarchiques supérieurs.

4.8. La classification hiérarchique : groupes spectraux et regroupements thématiques

Au terme des classifications qui ont été décrites aux sections précédentes, on se retrouve avec une première hiérarchie de classes, qui est définie essentiellement par les propriétés spectrales des surfaces. Cette hiérarchie spectrale est schématisée à la figure 46. Les « objets spatiaux » des 39 « classes enfant » de cette hiérarchie constituent le premier niveau hiérarchique du projet. Parallèlement à leur inclusion dans un groupe aux propriétés spectrales similaires, les classes peuvent aussi être regroupées selon des critères thématiques. Aux sections suivantes, nous verrons comment cette classification brute a pu être épurée et synthétisée en fonction des caractéristiques géographiques et thématiques des objets des différentes classes.

4.8.1. Fusion de polygones et création du second niveau de segmentation hiérarchique

Nous nous souviendrons que le niveau de segmentation le plus fin de l'image ne sert qu'à fournir les cellules de base de la classification. Une fois la classification brute terminée, il importe de synthétiser, en polygones signifiants, la classification de ces nombreuses cellules. En effet, si plusieurs objets voisins font partie de la même classe (dans un lac, par exemple), alors on voudra éliminer ces subdivisions et ne retenir que le contour qui marque la transition entre le plan d'eau et les surfaces avoisinantes. De plus, on sait que différentes classes ont dû être créées pour représenter des entités écologiquement équivalentes (par exemple, les classes « Eau turbide » et « Eau turbide 2 »). À nouveau, le concept de la classification écologique justifie que de telles classes soient regroupées.

En fusionnant les objets voisins faisant partie de la même classe ou de classes équivalentes, nous avons fait passer de 375 312 à 102 239 le nombre de segments dans l'image. La figure 47 illustre le résultat de cette telle fusion. Sur l'ensemble, la taille moyenne des objets au sol passe de 2,2 à 7,9 ha, mais cette taille varie considérablement d'une classe à l'autre, ce qui reflète la nature écologique des classes en question. Par exemple, les étendues neigeuses ont une dimension moyenne de 47 ha alors que les dépôts de sable ont en moyenne moins de 3 ha.

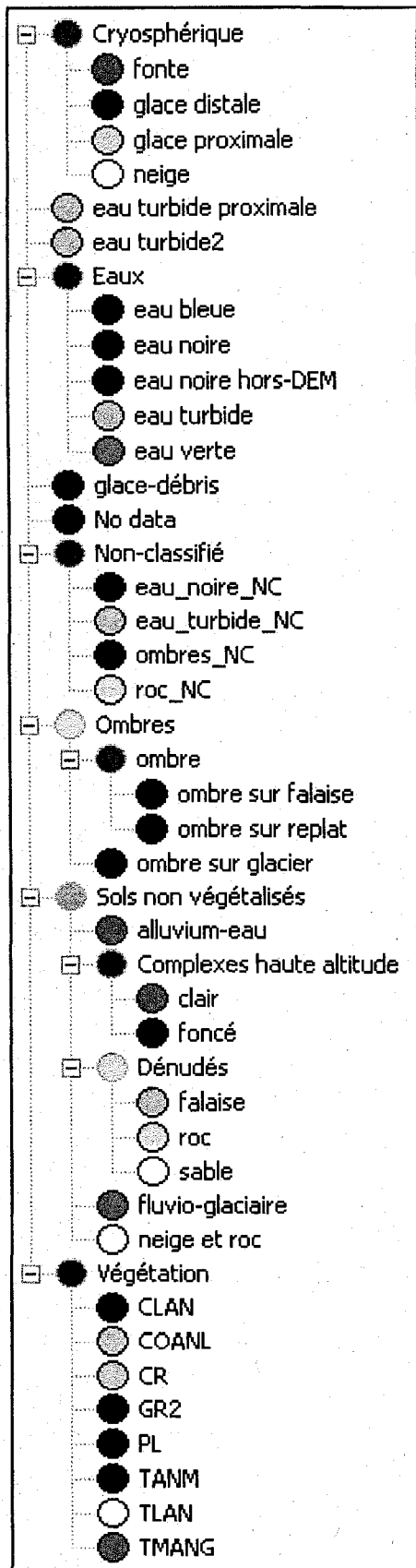
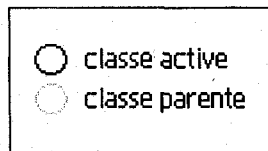


Figure 46 :

La structure hiérarchique des classes qui ont été créées pour la région du parc national du Canada Auyuittuq

Le diagramme montre, de gauche à droite, les classes parentes et les classes subalternes auxquelles elles transmettent leurs fonctions d'inclusion. Les segments de l'image ne peuvent être classifiés que dans les classes terminales des branches, au nombre de 36. Celles-ci forment le premier niveau hiérarchique du projet.



La portée thématique du second niveau hiérarchique reste la même que celle du niveau de la classification brute. En effet, ce second niveau n'a fait qu'éliminer les frontières entre objets de la même classe ou de classe équivalentes, sans fusionner de classes différentes. Nous savons que le présent projet mettait un accent plus grand sur le détail des classes végétales. Pour cette partie du projet, on pourrait suggérer que la classification se rapproche du niveau de la « phase écologique » (annexe 1). D'ailleurs, la taille moyenne des polygones de végétation y est de 3,5 ha, ce qui est plus près de ce que suggère Parcs Canada pour le niveau « phase écologique » (1 ha) que pour le niveau « type écologique » (100 ha). Cependant, la végétation ne touche 21,7 % de la portion de l'image que nous avons utilisée. Le reste du secteur à l'étude présente une surface exempte de végétation. Une fois les objets voisins fusionnés, les classes non-végétales ont en moyenne des polygones de 10,7 ha. Au sens de l'inventaire écologique, notre classification se situe donc à un niveau intermédiaire entre la cartographie des phases écologiques et des types écologiques. Mais, comme le territoire est dominé par des surfaces non-végétales, qui se définissent surtout par la nature des formations meubles, nous avons jugé plus convenable de désigner le second niveau de notre classification comme celui des « types écologiques », ou « écotypes ». On pourra cependant dire qu'il s'agit d'une classification relativement détaillée des écotypes du secteur.

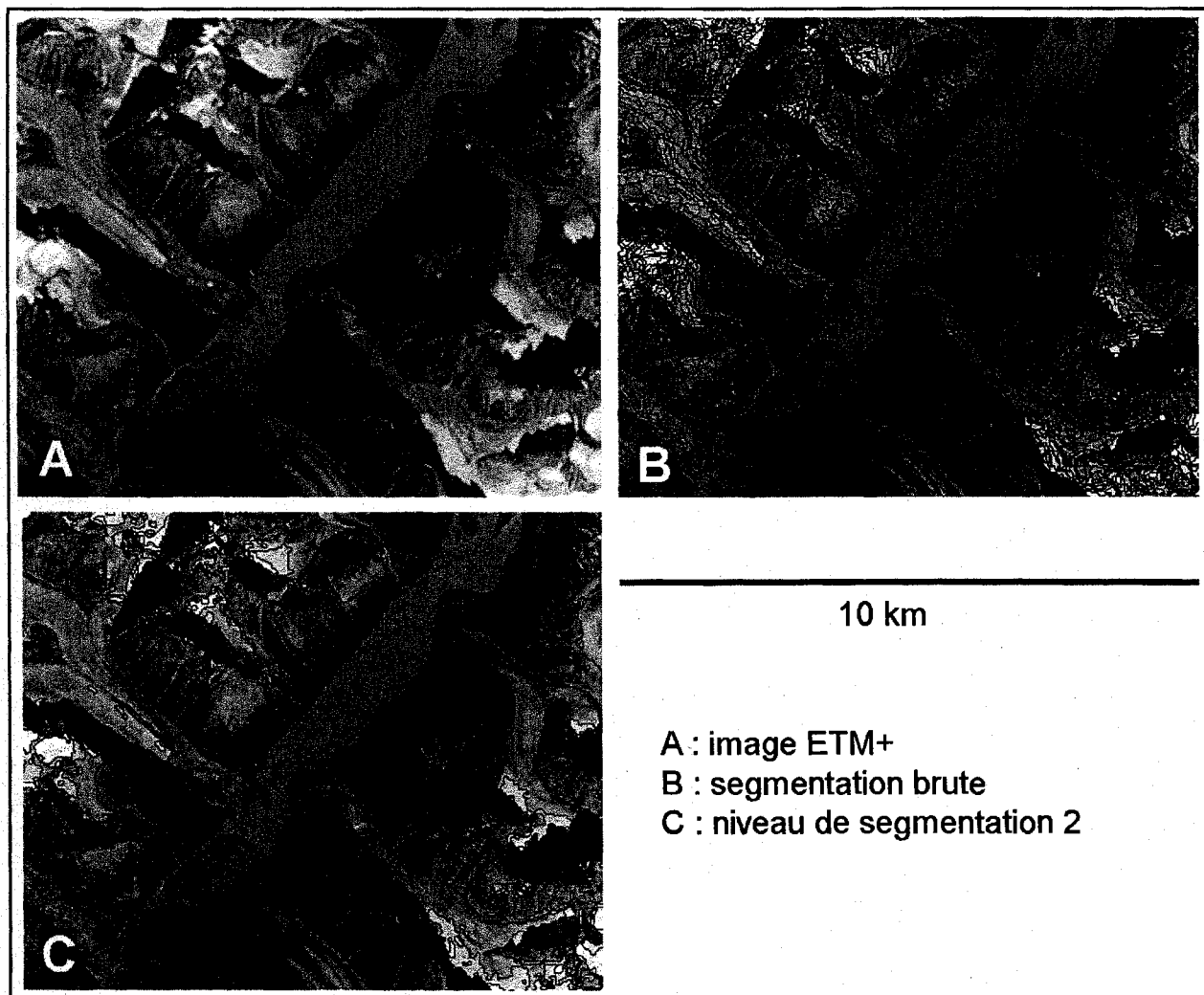


Figure 47: L'image satellitaire (A) est segmentée en cellules fines (B) en vue de l'étape de classification brute

Suite à la classification, un second niveau de segmentation est créé, où les polygones tracent le pourtour des surfaces faisant partie de la même classe ou de classes équivalentes (C). On remarque que des surfaces comme les moraines ou le lac (Lac Summit) donnent lieu à de grands polygones alors que les flancs de la vallée, plus hétérogènes, présentent des segments plus petits.

4.8.2. Regroupement de classes et création du troisième niveau de segmentation

À la section précédente, nous avons vu que les cellules de base de chacune des classes ont pu être regroupées sur une base essentiellement spatiale. On a ainsi créé un deuxième niveau dans la hiérarchie de la segmentation. À partir des objets du deuxième niveau, il est possible de faire une seconde généralisation, cette fois sur la base de critères thématiques. En effet, nous pouvons fusionner les polygones du deuxième niveau selon leur l'appartenance à un groupe de classes apparentées. Nous nous sommes inspirés de la hiérarchie spectrale de la classification pour recréer les grands ensembles thématiques, tout en faisant certaines permutations (figure 48). Si on prend pour exemple l'ensemble des surfaces cryosphériques, on note que sept classes du deuxième niveau y ont été incluses. On remarque en particulier que la classe « Ombre sur neige » s'y retrouve même si ses propriétés spectrales la lient à la classe « Ombres ».

Le regroupement des classes permet de créer un troisième niveau dans la segmentation hiérarchique de l'image (figure 49). Cette opération réduit de 102 239 à 36 887 le nombre de segments, en ramenant par ailleurs le nombre de classes à 9. Si on ne considère que la taille des objets résultants, on pourrait dire que ce niveau s'apparente encore à celui du « types écologiques » de l'inventaire écologique, mais le niveau de généralisation thématique se rapproche plutôt de celui du « système écologique » (Wiken *and* Ironside, 1977 *in* Parcs Canada, 1980). C'est pourquoi nous désignons ce niveau hiérarchique comme celui des « écosystèmes ».

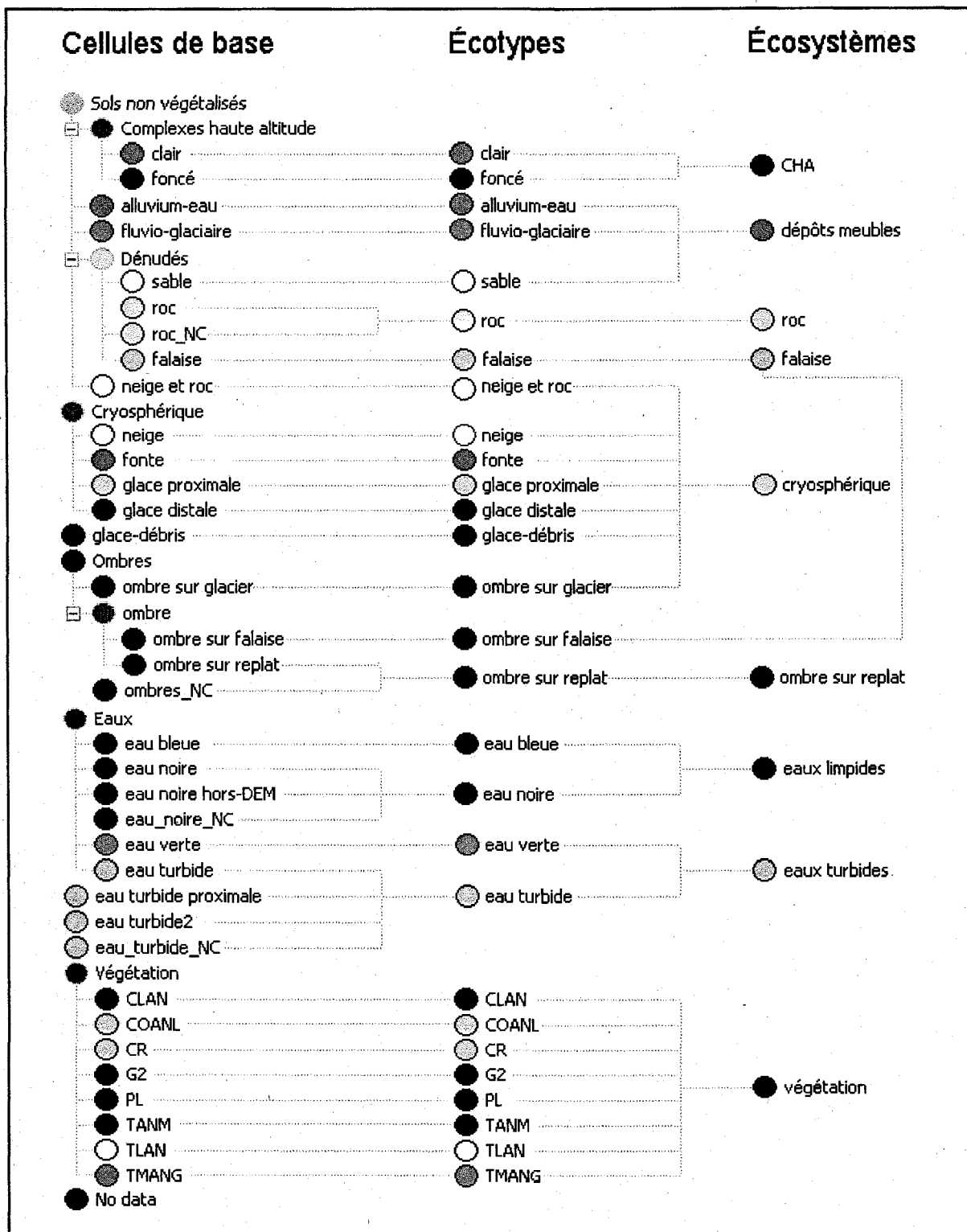


Figure 48: Le niveau de classification brute vise les cellules de base que procure la segmentation fine de l'image
 Par une synthèse d'abord spatiale puis thématique de l'information contenue dans la classification brute, on cartographie ensuite les écotypes et les écosystèmes du secteur à l'étude respectivement.

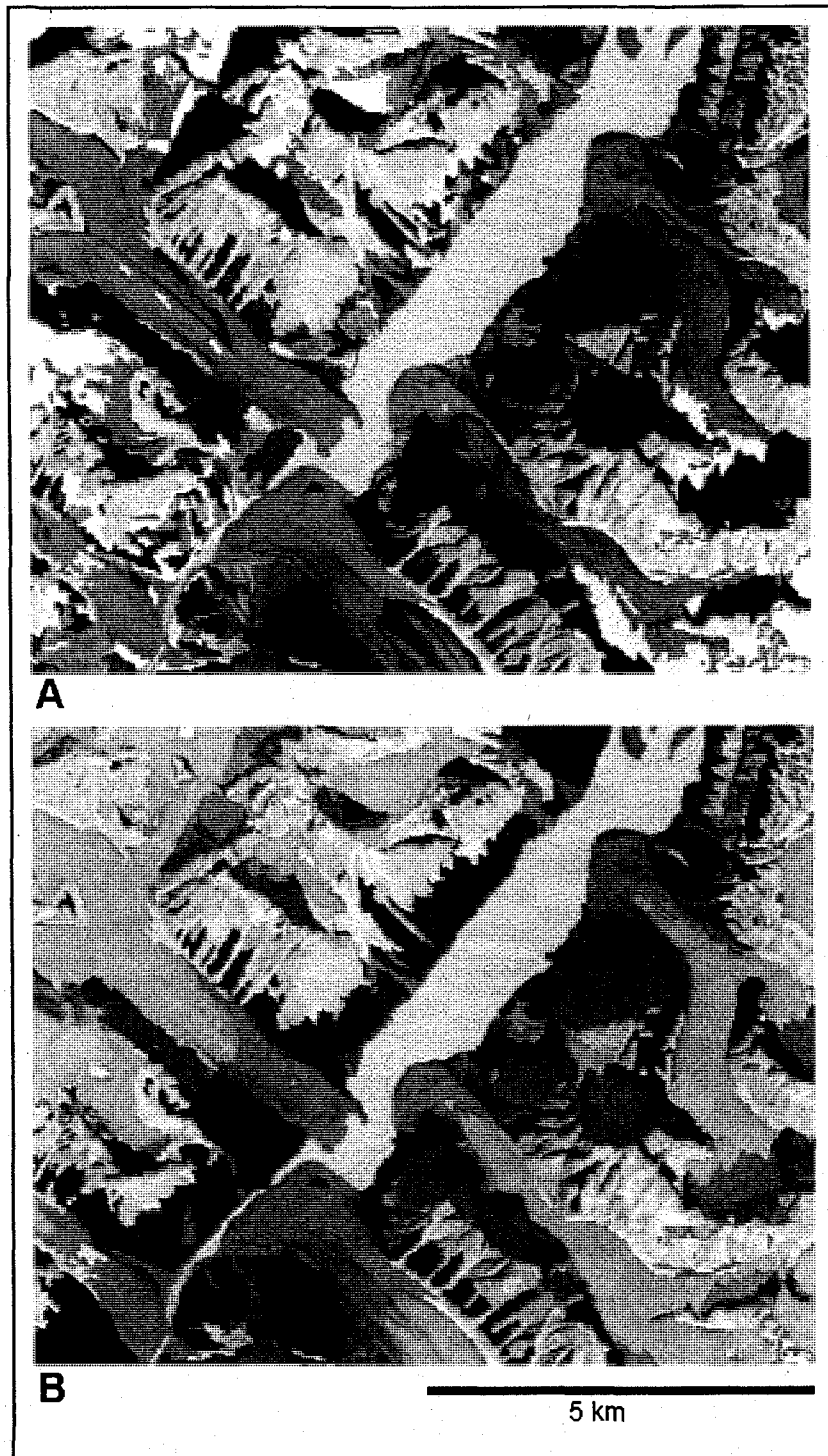


Figure 49: Entre le second (A) et le troisième (B) niveau hiérarchique, il se fait un **regroupement des classes selon leur contenu thématique**. Ainsi, l'ensemble des surfaces cryosphériques sont rassemblées en une seule classe, laquelle comprend les ombres qui sont portées sur les glaciers. De même, les falaises qui sont dans l'ombre sont rangées avec les falaises plutôt que de rester au rang des ombres. Les classes de végétation, elles, sont regroupées dans la même classe. Pour tous les détails et pour les codes de couleurs, référer à la figure 48.

5. L'évaluation des résultats de la classification

L'exactitude de la classification a été évaluée en examinant les classes auxquelles ont été attribués les échantillons de chacune des classes du projet. Les échantillons de végétation sont basés sur les relevés de terrain. Pour les classes non-végétales, les échantillons ont été créés par interprétation d'image. Les sections suivantes donnent les résultats de ces évaluations.

5.1. Validation de la classification de la végétation

Les échantillons des classes de végétation s'appuient sur les relevés photographiques, qui donnent la localisation de 315 exemples des classes décrites par Manseau *et al.* (2003). Une fois associés à l'image segmentée, certains relevés ne peuvent cependant pas donner lieu à un segment-échantillon. Dans certains cas, le segment d'image est inutilisable (s'il est ombragé, par exemple). Dans d'autres cas, des relevés rapprochés se retrouvent dans un seul et même segment. Le nombre total de segments-échantillons qui ont pu être créés pour les classes de végétation est de 135. Pour permettre la validation de notre travail de classification, nous avons divisé cette banque en deux groupes de 71 et 64 échantillons. Ainsi, les huit classes végétales pouvaient être représentées par un groupe de 71 échantillons au moment de l'entraînement de la classification, puis par 64 échantillons lors de la validation.

Sur la base des 64 segments-échantillons qui ont été mis de côté pour cet exercice, l'exactitude de la classification de la végétation est de l'ordre de 54,7 % (tableau 2). Plusieurs facteurs pourraient nous pousser à dire que cette évaluation est conservatrice. D'abord, le taux ne tient pas compte du fait que les quatre échantillons non-classifiés de la classe « Complexes ripicoles » pourraient en fait ne pas figurer à ce tableau. En effet, nous savons que les objets moins végétalisés de cette classe avaient été retranchés au moment de la créer la classe parente « Végétation ». Si nous faisons abstraction de ces échantillons non-classifiés, alors le nombre total d'échantillons passe de 64 à 60, ce qui porte à 58 % l'exactitude de la classification. En étendant ce raisonnement à la classe G2 alors le taux de succès grimpe de 1 %. Enfin, on remarque qu'une partie de la confusion concerne particulièrement les classes « Prairie de lâches » et « G2 ». Cette dernière ayant été ajoutée *a posteriori* et ayant des similarités avec sa voisine PL, il ne serait pas déraisonnable de

proposer un regroupement de ces deux classes, ce qui se rapprocherait de ce que proposent Manseau *et al.* (2003). Dans un tel scénario, le nombre d'échantillons correctement classifiés passe alors de 35 à 40. Sur un total de 59 échantillons, ceci porte l'exactitude de la classification à un taux de 67,8 %. Évidemment, il s'agit alors d'une valeur optimiste.

Tableau 2: Matrice d'erreur pour les huit classes végétales

Les échantillons pour la validation sont issus des relevés photographiques de la végétation. Les classes sont présentées dans un ordre allant des groupements de milieux humides et protégés vers ceux des milieux bien drainés et exposés. La confusion touche surtout des classes voisines, donc plus semblables.

Échantillon	PL	G2	TMANG	TANM	CLAN	COANL	TLAN	CR	Total
Classification									
PL	7	4			2				10
G2	1	4							9
TMANG	1		3	1					4
TANM	1		1	3		1			8
CLAN	1	1	2	1	6				10
COANL		1				2	1		3
TLAN					1	3	7		9
CR								3	6
autre		1			1			4	6
Total	11	11	6	5	10	6	8	7	64
	64%	36%	50%	60%	60%	33%	88%	43%	
Exactitude générale	54,7%								

En plus des remarques faites au paragraphe précédent, on peut souligner le fait que la confusion entre les classes végétales affecte préférentiellement les classes qui ont des similitudes sur le plan écologique. On voit en effet au tableau 2 que ce sont les classes voisines qui créent le plus de confusion dans la classification. Or, les classes y sont présentées dans un ordre qui reflète grossièrement un gradient de drainage et d'exposition. À titre indicatif, nous avons calculé ce que serait le taux de succès si l'on considérait comme acceptables les erreurs qui impliquent les classes qui sont des voisines immédiates. Le taux de succès est alors de 80 %. C'est donc dire que sur les 45 % de confusion (100 % - 55 %) seuls 20 % sont des erreurs plus sérieuses (100 % - 80 %).

Mentionnons que l'entraînement de la classification finale du projet s'est opéré sur la base de 135 échantillons, en incluant donc les 64 échantillons que nous avons dû mettre de côté pour la validation. Ceci améliore probablement l'exactitude de la classification, bien qu'il nous soit impossible de le vérifier quantitativement. Par contre, on peut se questionner sur l'effet qu'à eu, sur nos résultats de validation, le tri des relevés-photographiques qui a été fait en amont de la classification. En effet, pour les besoins de l'entraînement de la classification au plus proche voisin, il était raisonnable de ne retenir que les relevés de végétation les plus caractéristiques de chacune des classes. Or, les échantillons de validation ont été tirés de ce groupe. C'est donc dire que les relevés de végétation que nous n'avons pas pu associer de façon catégorique à l'une ou l'autre des classes n'ont pas participé au processus de validation. Il est probable que leur inclusion aurait introduit plus de confusion entre les classes et que la mesure de l'exactitude de la classification en aurait été plus faible. Une campagne de validation indépendante sur le terrain serait requise pour préciser le taux de succès que nous avons avancé ici.

5.2. Validation de la classification du couvert non-végétal

L'évaluation que nous avons faite pour les classes non-végétales a porté sur le second niveau hiérarchique du projet, celui des écotypes, qui contient le détail thématique fin tout en offrant des contours d'objets plus significatifs que le premier niveau hiérarchique.

Cinquante segments-échantillons furent sélectionnés aléatoirement dans l'image pour chacune des 20 classes d'écotypes non-végétaux. Notons que, dans le cas de la classe « Eau bleue », il y a seulement 42 objets au total dans toute l'image. L'ensemble des objets de la classe ont été retenus comme échantillons de validation. Le nombre total d'échantillons créés pour l'exercice de validation était de donc de 992. Mentionnons que la probabilité qu'un segment soit sélectionné comme échantillon était proportionnelle à sa superficie : un segment de 50 pixels avait 10 fois plus de chances d'être sélectionné qu'un segment de 5 pixels.

La validation de la classification du couvert non-végétal fut réalisée par interprétation d'image. Chacun des 992 échantillons créés a été évalué et classé dans une des 20 classes non-végétales selon l'avis-expert de l'interprète. De manière à faciliter l'interprétation, certaines aides furent

parfois employées : images satellitaires à haute résolution spatiale; photos aériennes obliques et verticales; habillage du MNA utilisé en vue oblique; photographies documentaires prises sur le terrain. Enfin, il faut mentionner que lorsque l'interprète hésitait entre les classes « Roc » et « Falaise », nous avons référé de façon systématique au degré de pente donné par le MNA. Nous avons procédé de la même manière pour départager « Ombre sur replat » et « Ombre sur falaise ». Dans ces cas, c'est la valeur du degré de pente qui permettait à l'interprète de ranger l'objet dans la catégorie appropriée. Le résultat de cette validation est donné au tableau 3.

L'exactitude générale de la classification du couvert non-végétal est de 83,2 %. Un peu comme nous l'avons fait pour les classes végétales, nous avons disposé les classes dans un ordre où les classes voisines présentent des affinités écologiques. Par exemple, les classes « Complexe de haute altitude clair » et « Complexe de haute altitude foncé » sont voisines. Étant donné la démarcation relativement arbitraire que fait la classification entre ces deux classes, il ne faut pas s'étonner que l'interprétation donne lieu à un peu de confusion entre ces deux classes. Du moins, il ne s'agit pas là d'une erreur grossière. Or on peut faire la même observation pour la plupart des classes voisines.

Pour évaluer l'importance de la confusion entre classes voisines, nous avons calculé un indice plus général. Pour donner un exemple de ce calcul, prenons les deux classes de « Complexes de haute altitude ». Si on ajoute aux échantillons correctement classifiés ceux qui se retrouvent dans la classe immédiatement voisine, on obtient alors un total de 98 échantillons (46 + 3 + 6 + 43). Ces deux classes comptent 100 échantillons au total (2 x 50). L'exactitude de la classification pour ce sous-groupe est donc de 98 %. En calculant cet indice pour l'ensemble des classes non-végétales, on obtient un indice de 92,5 % (918/992). On en déduit que, sur les quelques 17 % de confusion qu'on observe entre les classes non-végétales, seul environ 8 % concerne des classes non-voisines. Et parmi ces erreurs, plusieurs concernent des classes apparentés. Par exemple, certaines surfaces d'eau ont été interprétées comme de l'eau de fonte (de par leur localisation sur les glaciers) alors que la classification les range dans diverses classes d'eau.

Tableau 3: Matrice d'erreur pour les 20 classes non-végétales du second niveau hiérarchique du projet

Cinquante échantillons par classe sont tirés des objets classifiés. Un avis expert est donné pour chacun des échantillons, lequel constitue la donnée de référence pour l'évaluation de l'exactitude de la classification.

Classification	Avis expert																				Somme	
	Ombre sur replat	Ombre sur falaise	Ombre sur glacier	Foncé	Clair	Roc	Falaise	Glace-débris	Neige et roc	Neige	Glace proximale	Fonte	Glace distale	Fluio-glaciaire	Sable	Alluvium-eau	Eau turbide	Eau verte	Eau bleue	Eau noire		
Écotype ombre sur replat	42	1	3	1																3	50	
Écotype ombre sur falaise		50																				50
Écotype ombre sur glacier			50																			50
Écotype foncé	1			46	3																	50
Écotype clair				6	43								1									50
Écotype roc				4	45									2								50
Écotype falaise				2		46								2								50
Écotype glace-débris			1			3	43	1						2								50
Écotype neige et roc						3	44	1						1								50
Écotype neige								48	2													50
Écotype glace proximale								7	43													50
Écotype fonte			2					2	13	29	4											50
Écotype glace distale								1	1	1	5	1	42									50
Écotype fluvioglaciaire																				43		50
Écotype sable															3	39	4	1				50
Écotype alluvium-eau	1											1		3	3	36	3	3				50
Écotype eau turbide								2	2	1		1				1	36	8				50
Écotype eau verte								1				1	1					46			1	50
Écotype eau bleue			4															3	16	19		42
Écotype eau noire	4	2	2															1	2	39		50
Somme	48	53	62	53	55	54	46	50	49	58	63	33	48	55	42	41	41	61	18	62		992
Exactitude (producteur)	88%	94%	81%	87%	78%	83%	100%	86%	90%	83%	68%	88%	88%	78%	93%	88%	88%	75%	89%	89%		63%
Exactitude (utilisateur)	84%	100%	100%	92%	86%	90%	92%	86%	88%	96%	86%	58%	84%	86%	78%	72%	72%	92%	38%	38%		78%
Exactitude générale	83,2%																					

Parmi les erreurs plus problématiques que révèle l'exercice de validation, mentionnons que :

- environ 15 % des surfaces classifiées en tant qu'eau noire semblent en réalité être des zones d'ombre ; inversement, 6 % des objets attribués à la classe *ombre sur replat* seraient de l'eau noire ; cette confusion est due en bonne partie à l'imprécision positionnelle du MNA, qui nous force à être plus inclusif dans la description spectrale de la classe *Eau noire* sans pourtant nous permettre de toujours bien classifier les bords de lacs ;
- il y a une confusion de l'ordre d'environ 5 % entre certaines surfaces rocheuses (roc, clair, falaise) et des formations meubles (sable, fluvio-glaciaire) ;
- l'étroite frange qui marque la transition en l'ombre et les surfaces cryosphériques est parfois classifiée comme étant de l'eau bleue ; cette confusion touche 4 des 42 objets de la classe; ces chiffres donnent à penser que la confusion affecte 10 % de cette classe, mais ce n'est pas le cas ; contrairement aux autres classes, la classe *Eau bleue* a vu tous ses objets utilisés pour la validation (il y en a seulement 42 au total dans toute l'image) ; or les 4 segments mal classifiés ne touchent que quelques pixels alors que la classe en compte plus de 40 000 ; l'erreur réelle est donc de moins de 1 % en superficie.

Au-delà des classes immédiatement voisines au tableau 3, on peut calculer l'exactitude qu'atteint la classification des « écosystèmes ». Rappelons que ceux-ci résultent du regroupement des écotypes en catégories plus générales, tel qu'illustré à la figure 48. En regroupant les échantillons de validation d'après cette structure, on obtient les résultats présentés au tableau 4. On y voit que, du second au troisième niveau hiérarchique du projet, l'exactitude de la classification passe de 83,2 % à 92,7 %.

Une mise en garde s'impose ici : l'interprète qui a réalisé la validation est aussi l'auteur du projet. Ceci ne signifie pas pour autant que la validation est biaisée. En effet, les échantillons de validation ont été choisis au hasard et l'auteur n'avait aucune indication de leur classification au moment d'en faire l'interprétation dans l'image. Il se trouve simplement que la relation qui existe entre la nature du terrain et l'apparence que prend ce terrain sur l'image satellitaire est très bien connue de l'auteur. Par ailleurs, sa connaissance intime de la classification lui permet de connaître mieux que quiconque la portée thématique exacte des différentes classes et plus particulièrement

les seuils qui marquent la transition entre les classes apparentées (les CHA clairs et les CHA foncés en sont de bons exemples).

Tableau 4: Matrice d'erreur pour la classification du troisième niveau hiérarchique du projet

Les segments-échantillons de validation du second niveau de classification ainsi que les échantillons de végétation sont ici réemployés pour donner une mesure de l'exactitude de la classification au troisième niveau.

Classification	Avis expert									
	CHA	DM	R	F	SC	O	EL	ET	V	Somme
Complexes de haute altitude (CHA)	98				1	1				100
Dépôts meubles (DM)	3	131	6		2	1		7		150
Roc (R)	4	1	45							50
Falaise (F)	2	2		96						100
Surfaces cryosphériques (SC)		3	3		343			1		350
Ombres (O)	1			1	3	42	3			50
Eaux limpides (EL)				2	6	4	76	4		92
Eaux turbides (ET)		1			8		1	90		100
Végétation (V)	2	4							58	64
Somme	110	142	54	99	363	48	80	102	58	1 056
Exactitude Écosystèmes	92,7%									

6. Discussion

Rappelons que l'étude visait à examiner deux questions principales. D'abord nous cherchions à mieux connaître le potentiel de l'analyse d'image par objets spatiaux (*object-based image analysis*) comme outil de classification pour le secteur du parc national du Canada Auyuittuq. Puis, nous souhaitions savoir si la segmentation hiérarchique d'une image ETM⁺ pouvait servir d'analogie au concept de l'inventaire écologique tel qu'on l'entend pour les parcs nationaux. Nous faisons état de la méthode que nous avons employée et des résultats encourageants que nous avons obtenus en regard de ces deux questions. Ceci étant dit plusieurs précisions et mises en garde s'imposent, ce à quoi nous nous attarderons dans les sections suivantes.

6.1. Nombre d'échantillons

L'annulation de la campagne de terrain de 2004 constitue sans contredit une faiblesse du projet. En effet, le nombre de données de référence acquises en 2003 est somme toute limité. Ceci affecte la performance de la classification de la végétation (classification au plus proche voisin). Ce petit nombre compromet aussi la validité statistique de notre exercice de validation. En effet, une telle validation requiert un nombre minimal d'échantillons. Congalton et Green (1999) proposent à cet effet une règle empirique. Cette règle stipule qu'un minimum de 50 échantillons est requis pour la validation des classes qui serviront à bâtir la table de contingence. Avec huit classes végétales, ceci représente un minimum de 400 échantillons. Dans notre cas, 315 relevés photographiques ont été réalisés. Mais, pour diverses raisons, plusieurs ont dû être éliminés et seuls 135 relevés ont été retenus. Ce groupe a de plus été divisé en deux pour les étapes successives d'entraînement et de validation. Au terme du projet, la meilleure classification végétale que nous pouvons proposer est celle où les 135 échantillons obtenus en 2003 sont mis au service de l'entraînement de la classification. Une fois cette classification faite, il aurait été possible de sélectionner, pour chaque classe et de façon indépendante, un nombre suffisant d'objets d'image en vue d'une validation systématique sur le terrain. Cette étape fait défaut dans notre projet. Seuls 64 échantillons ont servi à la validation de la classification du couvert végétal. Il faut donc considérer que la classification que nous proposons de la végétation du parc peut être

améliorée en constituant un plus grand nombre d'échantillons d'entraînement et que l'exactitude que nous avons mesurée pour la classification de la végétation comporte une grande incertitude.

Quant aux classes non-végétales, le recours à la validation par interprétation d'image s'imposait. Ceci dit, certaines vérifications sur le terrain auraient peut-être permis d'évaluer la validité de cette méthode de validation. En effet, nous prenons pour acquis que l'interprétation d'image est toujours exacte. Des vérifications sur le terrain nous auraient permis de nuancer cette prémisse.

6.2. La segmentation d'image : potentiels et limites

La segmentation d'image est un moyen utile de synthétiser l'information que contiennent les pixels tout en bénéficiant, pour la classification, des caractéristiques géométriques et des propriétés spectrales internes des zones segmentées. Elle permet aussi de réconcilier la dimension de l'unité d'échantillonnage (le segment plutôt que le pixel) avec l'erreur de positionnement des données de référence (GPS et géoréférence de l'image).

Nous avons réalisé plusieurs tests pour vérifier la stabilité des résultats de l'étape initiale de segmentation. Nous avons observé que la segmentation donnait toujours exactement les mêmes résultats lorsqu'elle était appliquée de la même manière à la même banque de couches matricielles, et ce peu importe que l'on segmente une image complète ou seulement une sous-section (*spatial subset*). Toutefois, la segmentation d'image qui se fait dans eCognition livre des contours d'objets relativement arbitraires, où des entités très homogènes, tels les lacs, sont néanmoins divisés en segments. C'est seulement après que l'utilisateur en ait fait des regroupements logiques que les contours fusionnés deviennent plus signifiants. C'est pourquoi les concepteurs du logiciel désignent les segments bruts comme des « objets primitifs » (*object primitives*). C'est aussi pourquoi il est recommandé de segmenter une image finement en début de projet.

Dans une image ETM⁺ des environs du PNC Auyuittuq, toutes les surfaces ne présentent pas le même niveau de détail, de contraste et de texture. Les grandes étendues de neige, par exemple, sont très uniformes. Une rivière anastomosée, pour sa part, présentera un fort contraste entre deux

surfaces uniformes qui s'entrecroisent en formant un motif détaillé. Quant à elle, la végétation présente à la fois une texture et un niveau de détail élevés tout en offrant un contraste relativement faible. Les variations locales dans la répartition des communautés végétales sont imputables à des différences dans le drainage, au contenu des sols, à la persistance estivale de champs de neige et à leur degré de protection contre le vent. À ce sujet, Blouin *et al.* (1975) citent Church (1972, *in* Elliott, 1973) pour dire que « cette variation, le plus souvent sur de courtes distances, des conditions auxquelles sont sensibles les groupements végétaux, rend leur représentation cartographique, aux dires de l'auteur, presque impossible ou vraisemblablement sans signification à l'intérieur du parc ». Ce commentaire est tiré d'un rapport qui date d'avant l'avènement des systèmes d'informations géographiques et des moyens de télédétection que nous connaissons aujourd'hui, mais on peut dans une certaine mesure étendre cette mise en garde à la classification que nous avons faite. Pour avoir parcouru à pied diverses parties de la zone d'étude avec des imprimés d'images ETM⁺ à la main, nous pouvons dire que bon nombre de patrons de végétation que l'on observe sur le terrain sont aussi visibles sur l'image Landsat. Cependant, il existe aussi des secteurs où les transitions d'un type de couvert à l'autre sont tellement rapides que l'image satellitaire n'en reflète qu'un mélange relativement estompé. Or, la position topographique est souvent en cause. En effet, la végétation ne se présente pas de la même manière partout et plusieurs facteurs contribuent à rendre les groupements de vallée plus difficiles à cartographier que le couvert végétal des hautes terres. D'abord, il y a une diversification, en nombre d'espèces, du couvert végétal, ce que relèvent plusieurs auteurs (Blouin *et al.*, 1975; Elliott, 1973; Hines *et al.*, 1986; Hines *and* Moore, 1988; Deshayes, 2000). À ceci s'ajoute le fait que le fond des vallées est l'endroit où agissent préférentiellement divers facteurs de perturbation : ruissellement, ravinement, érosion et sédimentation éolienne, éboulis, inondations, avancées glaciaires, etc. Il en résulte des patrons de végétation souvent complexes, qui dépassent parfois notre capacité à les représenter adéquatement à l'aide d'une image ETM⁺ segmentée.

Les figures 50 et 51 montrent que des groupements végétaux très divers peuvent se succéder dans l'espace sur de très courtes distances. En effet, sur une superficie d'à peine quelques hectares, on peut retrouver des exemples de presque toutes les classes végétales décrites par Manseau *et al.* (2003), de la toundra de lichen (TLAN et CLAN), aux prairies hygrophiles (PL), en passant par l'arbustaie (TANM et COANL) et la prairie de graminoides (TMANG).

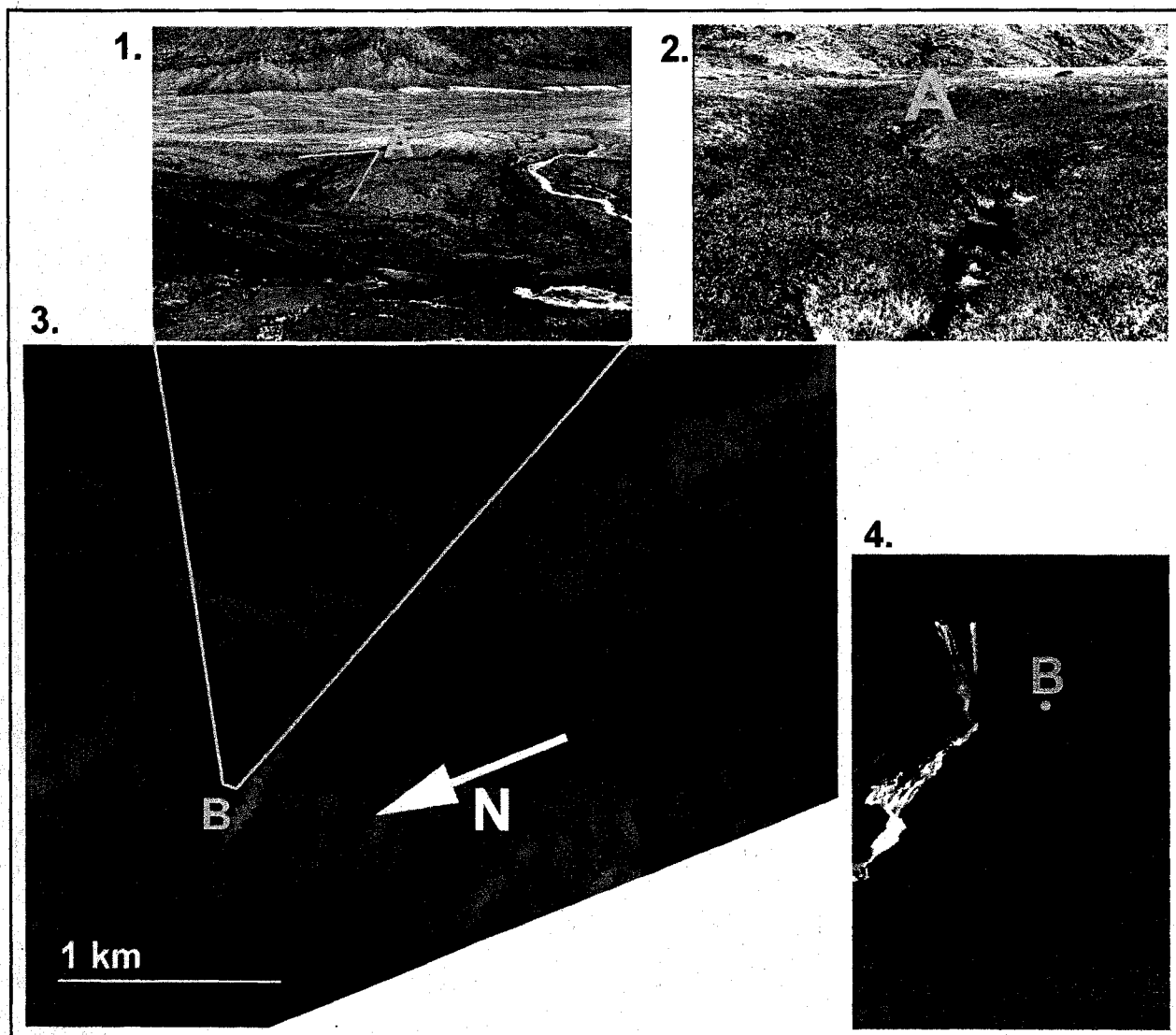


Figure 50: La chute Schwarzenbach (4.) se jette dans la vallée Akshayuk
 Une photo oblique (1.) prise depuis les abords de la chute (B) montre la rivière et la végétation qui occupe le fond de la vallée (66°30'14"N 65°31'12"O). La microtopographie y crée une mosaïque contrastée de couverts végétaux. Par exemple, le petit ravin que crée un ruisseau (prise de vue A) permet l'établissement d'une saulaie nettement plus luxuriante que les groupements voisins.

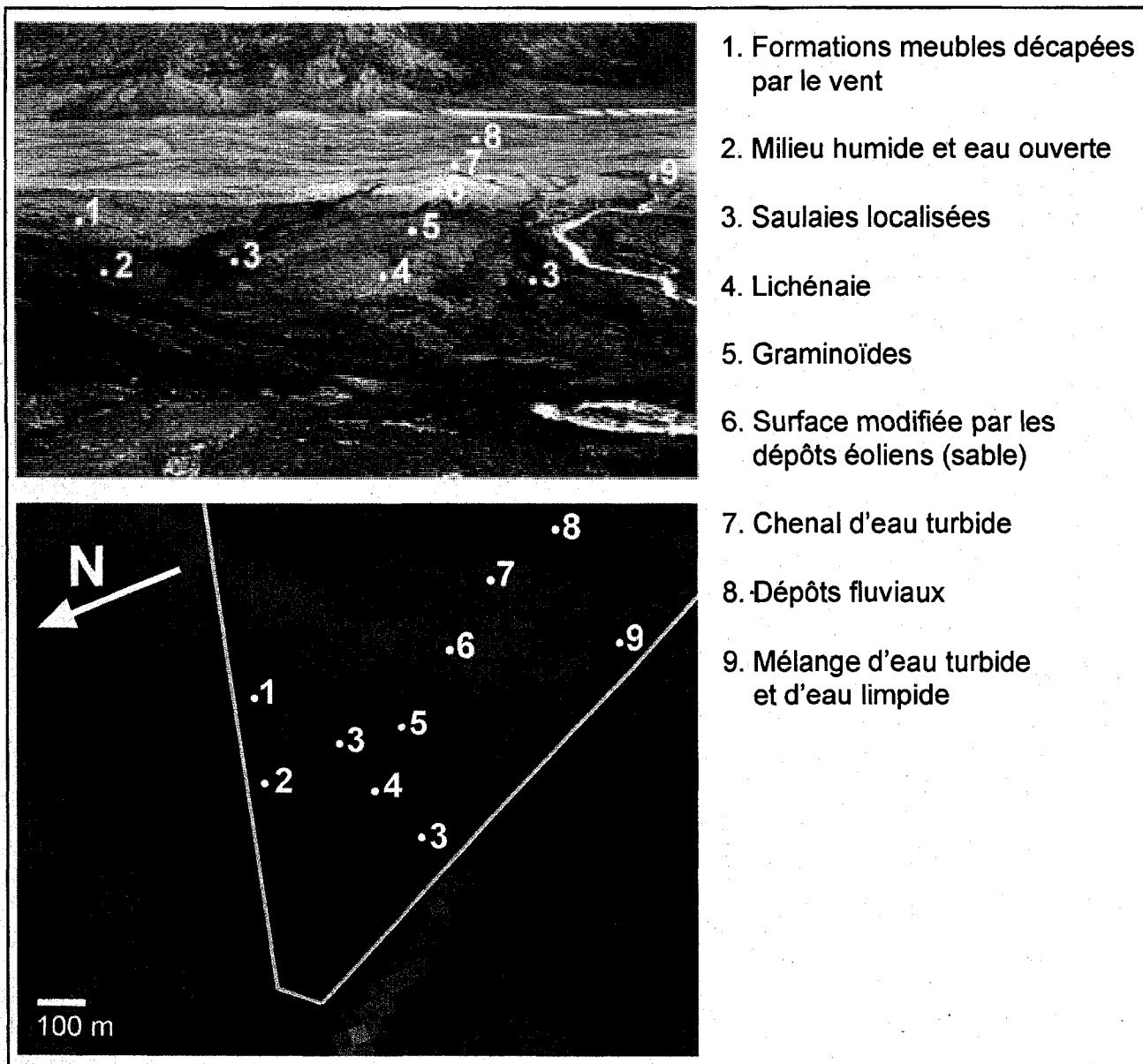


Figure 51: Le fond d'une vallée encaissée

Divers processus (ruissellement, inondation, protection par la neige, éboulements rocheux, solifluxion, érosion, déposition éolienne, etc.) se conjuguent sur de courtes distances pour créer un milieu très hétérogène dans le fond des vallées. La végétation répond à cette hétérogénéité et prend des formes très diverses selon la nature et la position du terrain qu'elle occupe. La dimension des pixels dans l'image ETM⁺ est tout juste assez fine pour relever les principaux contrastes entre ces types de végétation.

Évidemment, tous les moindres détails du terrain ne peuvent pas être représentés sur une image ETM⁺. D'ailleurs l'objectif d'une classification est justement de représenter le terrain dans une forme synthétisée. Lorsqu'on cherche à cartographier la végétation, il est souhaitable que la résolution à laquelle on travaille corresponde à la manière dont se présentent les transitions importantes sur le terrain à l'égard du couvert végétal. Comme l'illustre la figure 51, l'image ETM⁺ est dans certains cas tout juste assez détaillée pour relever ces transitions. En effet la mosaïque qu'on y observe est parfois constituée d'unités de seulement quelques pixels. Or, dans le cas d'une analyse par « objet spatiaux », on ne travaille plus à l'échelle du pixel, mais bien à l'échelle des segments de l'image. Pour la végétation, ceux-ci couvrent en moyenne 3,2 ha (ou 36 pixels). L'image segmentée (figure 52) montre que la végétation qu'on retrouve au pied de la chute Schwarzenbach a été divisée en « objets » de cette dimension environ. À cette échelle, on voit que si plusieurs transitions se démarquent bien dans l'image segmentée, d'autres ne sont pas relevées. Il en résulte des objets à l'intérieur desquels s'opère parfois un effet de moyenne qui estompe sensiblement les caractéristiques spectrales de la surface (de façon analogue au problème de mixture spectrale qui affecte parfois le pixel). D'ailleurs, on note que la classification finale (figure 52, encart n° 3) fait une simplification qui, selon l'utilisation souhaitée, pourrait être jugée trop grande.

Il convient de préciser ici que le problème potentiel que nous venons d'exposer ne touche que des petites parties du territoire. Nous avons mentionné que l'enjeu concernait principalement les vallées encaissées. À elle seule, cette considération restreint le problème à un petit pourcentage du territoire à l'étude. En effet, les hautes terres et les vallées plus évasées des plateaux ne présentent pas la même hétérogénéité que le fond et les flancs des vallées en auge. Par conséquent, la segmentation y est généralement très satisfaisante. De plus, comme nous le montre la figure 53, de grandes portions de la vallée Akshayuk ont aussi été segmentées et classifiées de façon adéquate avec les paramètres de classification que nous avons retenus. C'est donc dire que le problème de sur-simplification de la classification n'affecte que les quelques secteurs les plus hétérogènes.

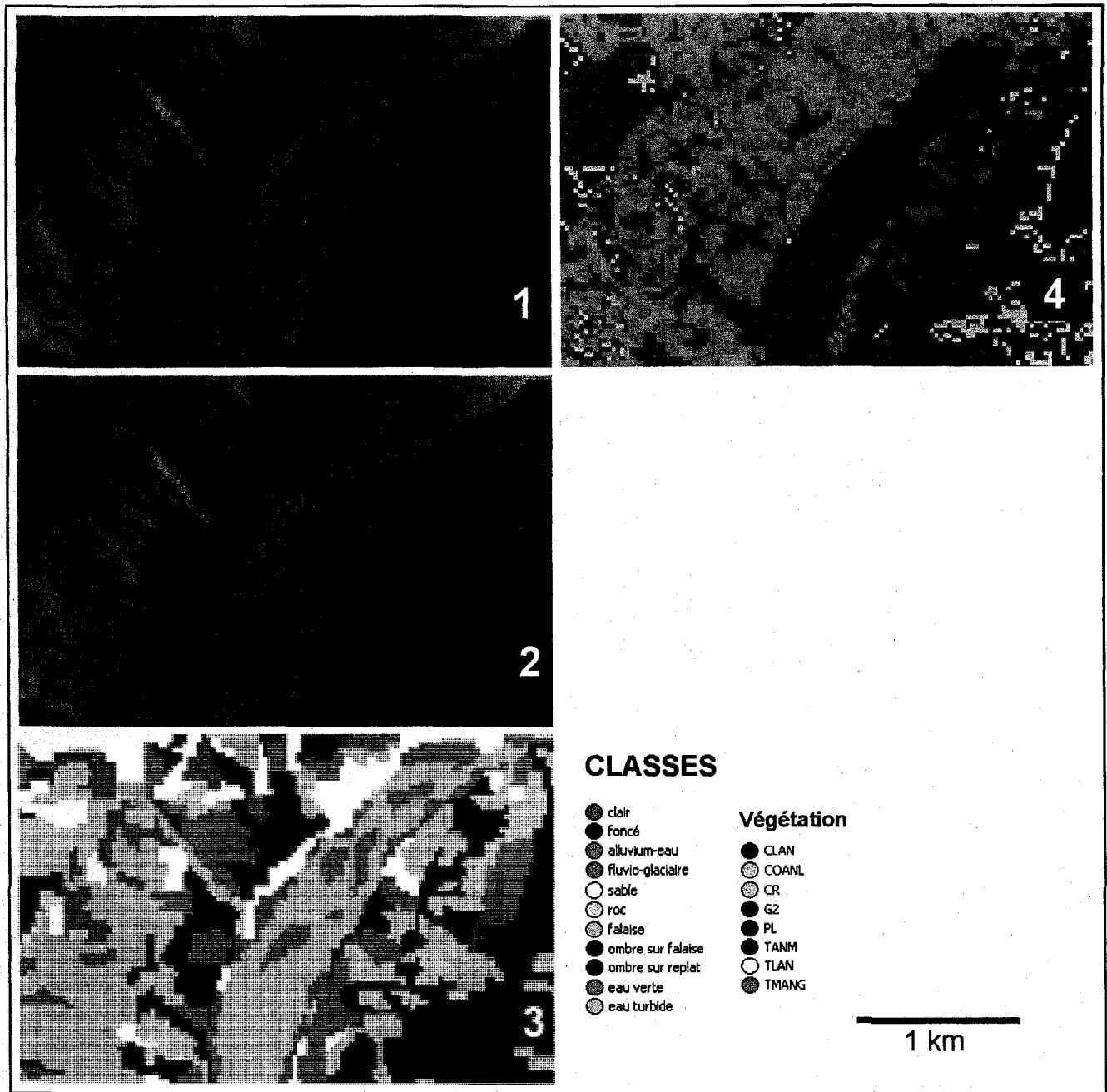


Figure 52: L'analyse d'image basée sur le pixel et l'analyse par « objets spatiaux »
 Contrairement à l'analyse d'image basée sur le pixel, l'analyse par « objets spatiaux » réfère aux patrons que contient l'image brute (encart 1) pour livrer des objets qui délimitent ces patrons (encart 2). Toutes les transitions ne sont pas parfaitement relevées au moment de la segmentation et il en résulte des objets dont la classification peut être une sur-simplification. Une classification non-dirigée de la même portion de l'image ETM⁺ (4) montre une analyse un peu plus finement détaillée, mais l'effet «poivre et sel» en rend la représentation cartographique moins synthétique.
 Note: la légende ne s'applique qu'à l'encart 3, il n'y a pas de légende pour l'encart 4.

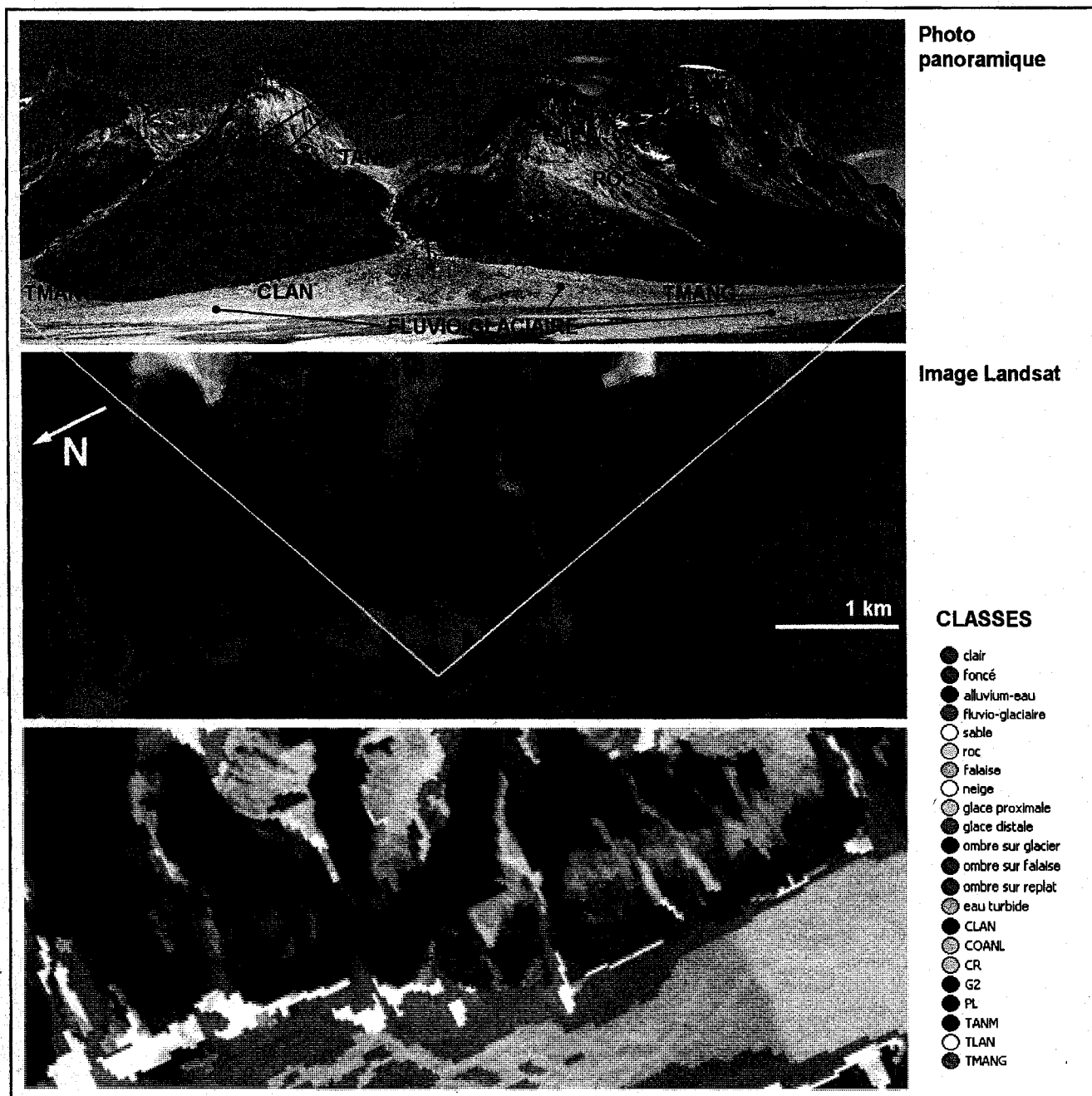


Figure 53: Le flanc de la vallée Akshayuk

Au pied du mont Overlord (le sommet enneigé, 1 400 m), le flanc est de la vallée présente de grandes pentes végétalisées. La segmentation de l'image et la classification du couvert végétal semblent répondre adéquatement à la forme que prend le couvert végétal sur le terrain. Les classes dominantes y sont :

- la toundra de mousses, d'arbustes nains et de graminoides (TMANG) ;
- la communauté de lichens et d'arbustes nains (CLAN) ;
- la communauté ouverte d'arbustes nains et de lichens (COANL) ;
- la toundra d'arbustes nains et de mousses (TANM).

Bien que la sur-simplification de la classification ne soit potentiellement un problème que sur de petites superficies du secteur d'étude, il n'en demeure pas moins que, par rapport à une analyse basée sur le pixel, l'effet de moyenne qui s'opère sur les objets d'une image réduit la variabilité spectrale des unités à classifier. Ceci a pour avantage que les objets sont moins à risque d'être affectés par la mixture spectrale aléatoire, mais vont plutôt intégrer un certain niveau de mélange spectral sur une plus grande superficie. De plus cette superficie sera délimitée par un contour dicté par la nature du terrain plutôt que par les bordures arbitraires des pixels. Quoique ceci soit un avantage du point de vue de la cartographie écologique, le passage du pixel au segment réduit peut-être le nombre de surfaces qu'on doit s'attendre à pouvoir discerner. Pour répondre, entre autres, à cette question, nous avons comparé les résultats de notre étude avec ceux qu'ont obtenus Manseau *et al.* (2003), ce que nous discuterons à la section suivante.

6.3. Comparaison des résultats avec ceux de Manseau *et al.* (2003)

Lors de la conception du projet, nous avons adopté la stratification végétale qu'ont proposée Manseau *et al.* (2003) au terme de l'effort considérable qu'ils ont déployé pour l'échantillonnage de la végétation sur le terrain et l'analyse des données en laboratoire (les classes non-végétales que nous proposons, elles, diffèrent grandement de celles qu'ont choisies ces auteurs). En comparant les résultats des deux projets, on peut faire plusieurs remarques quant à l'arrimage des deux classifications de la végétation, à la validité des stratégies d'échantillonnage choisies, à l'utilité des descriptions de classes comme outil pratique, à la performance de l'analyse d'image par objets spatiaux, etc.

6.3.1. Classification de la végétation et arrimage avec Manseau *et al.* (2003)

L'analyse des relevés photographiques de végétation qui fut faite pour notre projet reposait sur la description que donnent Manseau *et al.* (2003) de leur stratification végétale. Cette description se limite à de courts textes commentant les listes d'espèces et les pourcentages de couverture végétale des classes. Elle n'est appuyée d'aucun guide visuel. Il nous a semblé utile d'examiner l'arrimage de nos résultats avec ceux qu'ont obtenus ces auteurs. À la suite de communications personnelles avec l'auteure principale, ci-après désignée Manseau, nous avons obtenu quelques

photographies de terrain et un document fournissant la localisation et la classe de végétation attribuée par Manseau *et al.* (2003) pour 85 relevés de végétation effectués dans le secteur d'étude (tableau 5).

Tableau 5 : Nombre de relevés fournis par Manseau pour chacune des classes végétales décrites dans Manseau *et al.* (2003)
Les équivalences entre ces classes et celles du présent projet sont données.

Nombre de relevés	Stratification végétale de Manseau <i>et al.</i> (2003)	Stratification du présent projet
5	MOGRSH Sedge Meadows	PL Prairie de laïches
n/a	n/a	G2
6	MOSHGR Moss, Dwarf-Shrub, Graminoid Tundra	TMANG Toundra de mousses, arbustes nains et graminoides
3	MOSH Moss, Dwarf-Shrub Tundra	TANM Toundra d'arbustes nains et mousses
30	LISHMO Dwarf-shrub Lichen Tundra	CLAN Communauté de lichens et arbustes nains
11	LISHMO-B Open Dwarf-Shrub Lichen Tundra	COANL Communauté ouverte d'arbustes nains et lichens
26	STMOSH Lichen (stereocaulon) Dwarf-Shrub Tundra	TLAN Toundra de lichens et arbustes nains
0	RIP(h) Riparian Complexes (high)	CR Complexes ripicoles
0	RIP(l) Riparian Complexes (low)	Surfaces reléguées aux classes non-végétales
4	LUCA High Elevation Barrens	Complexes de haute altitude

À partir des données fournies par Manseau, nous avons pu vérifier, pour chacun de leurs sites d'échantillonnage, si la classification que donne notre projet est équivalente à celle que donne Manseau *et al.* (2003). Il arrive à l'occasion que plus d'un site d'échantillonnage de Manseau se retrouvent dans un seul et même segment de notre projet. S'il y a alors divergence dans la classification des échantillons, l'objet ne peut pas être retenu pour la comparaison. Cependant, ces échantillons rapprochés confirment généralement l'homogénéité des sites à l'échelle du segment d'image (figure 54).

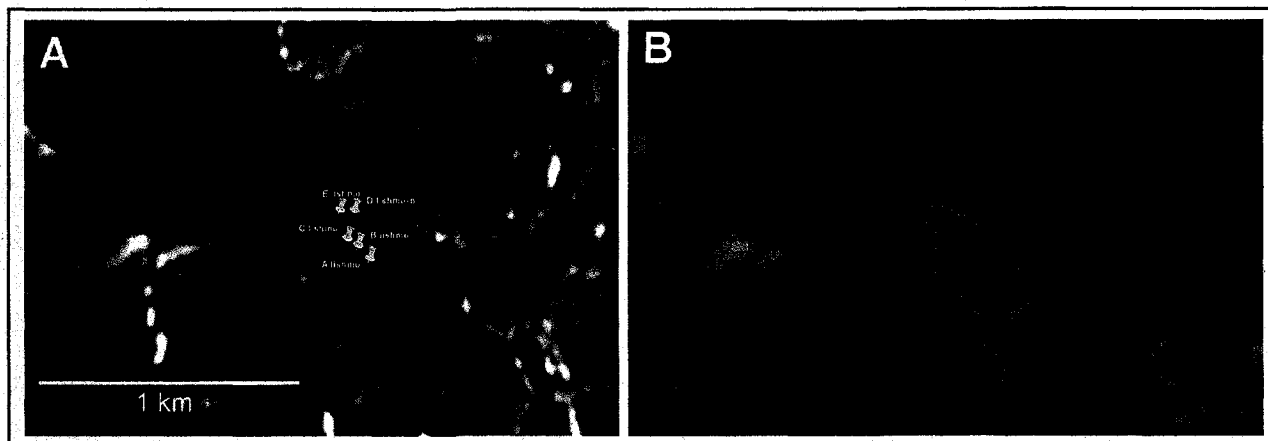


Figure 54: Par endroits, la sélection des sites d'échantillonnage dans Manseau *et al.* (2003) donne une représentation serrée de certains secteurs
 Ici, cinq sites d'échantillonnage de Manseau *et al.* (A) se retrouvent dans le même segment d'image de notre projet (B) (66°50'30"N 66°26'13"O). Dans ce cas-ci, 4 des 5 sites sont de la classe *LISHMO*, ce qui suggère une relative homogénéité du site à l'échelle du segment.

Soixante-neuf segments-échantillons ont été constitués à partir des données fournies par Manseau. La matrice d'erreur présentée au tableau 6 montre la classification que donne notre projet pour les relevés fournis par Manseau. L'arrimage n'est correct que dans 30 % des cas. Ce taux est d'environ 24 % inférieur à celui qu'on attendrait si les deux projets étaient équivalents. En effet, l'exactitude des deux projets pour la classification de la végétation est d'environ 54 %, soit 54,7 % pour le présent projet et 53,4 % pour Manseau *et al.* (2003) (annexe 9). Cet écart suggère que les classes qui sont censées être équivalentes d'un projet à l'autre ne le sont pas. D'ailleurs, nous pouvons faire quatre observations importantes :

- 1) aucun des échantillons de MOSHGR et MOSH n'est classifié dans la classe correspondante ;
- 2) la plupart des échantillons de la classe STMOSH se retrouvent dans des objets que nous associons à des classes où le couvert arbustif est plus grand ;
- 3) plusieurs échantillons de LISHMO et LISHMO-B se retrouvent dans ce que nous avons déterminé comme étant des surfaces non-végétales ;
- 4) la classe PL semble être plus inclusive que ne l'est sa classe équivalente MOGRSH.

Tableau 6: Matrice d'erreur pour les échantillons fournis par Manseau

Les cases ombragées marquent les classes équivalentes de Manseau *et al.* (2003) et de la stratification du présent projet (ex. MOGRSH = PL).

Échantillon Classification	MOGRSH	n/a	MOSHGR	MOSH	LISHMO	LISHMO-B	STMOSH	LUCA	Total
PL	4		2		4	2	2		14
G2			1	1					2
TMANG			0	1					1
TANM				0	1		1		2
CLAN			1		6	1	8		16
COANL	1		1		3	3	2	2	12
TLAN					3		6		9
foncé								2	2
clair					5	3			8
CR					1		1		2
roc					1				1
Total	5		5	2	24	9	20	4	69
	80 %		0 %	0 %	25 %	33 %	30 %	50 %	
Exactitude générale	30,4 %								

Pour tenter d'expliquer les problèmes d'arrimage entre notre classification et celle de Manseau *et al.* (2003), nous avons examiné le comportement spectral des objets auxquels sont associés les relevés des deux projets. Sans même prendre en considération leur classification, on s'aperçoit d'une première différence importante entre les deux groupes d'échantillons. En effet, les relevés de Manseau sont associés à des objets dont la valeur de NDVI ne dépasse jamais 0,30. Dans notre cas, environ le tiers des nos échantillons ont un NDVI supérieur à 0,3. D'ailleurs, des classes comme TANM ou TMANG ont même un NDVI moyen supérieur à cette valeur (figure 55). On voit donc bien qu'il y a un décalage important entre le groupe de relevés effectués sur le terrain par Manseau *et al.* et le groupe de relevés effectués par notre équipe. À ceci, il y a une explication assez simple.

À la lecture de leur rapport, on s'aperçoit que sur les 335 relevés effectués par Manseau *et al.* (2003), aucun ne touche la riche végétation des profondes vallées glaciaires du parc. Or, la flore des extrémités nord et sud de la vallée Akshayuk (col de Pagnirtung), de même que de la vallée Maktak, est caractérisée par des groupements à densité beaucoup plus forte, qui remontent la pente en plusieurs endroits. Blouin *et al.* (1975) ajoutent que cette densification de la couverture végétale s'accompagne d'un appauvrissement important du cortège lichénique. Ces remarques

reflètent bien la différence que nous avons observée entre la végétation de la vallée Akshayuk et celle de la vallée Naqsaq. On en déduit que les échantillons que nous avons obtenus dans la vallée Akshayuk sont probablement sensiblement plus riches que les relevés les plus verdoyants obtenus par Manseau *et al.* (2003). Cette première constatation explique en bonne partie pourquoi aucun des échantillons de MOSHGR et MOSH ne sont classifiés dans leur classe correspondante, soit TMANG et TANM respectivement.

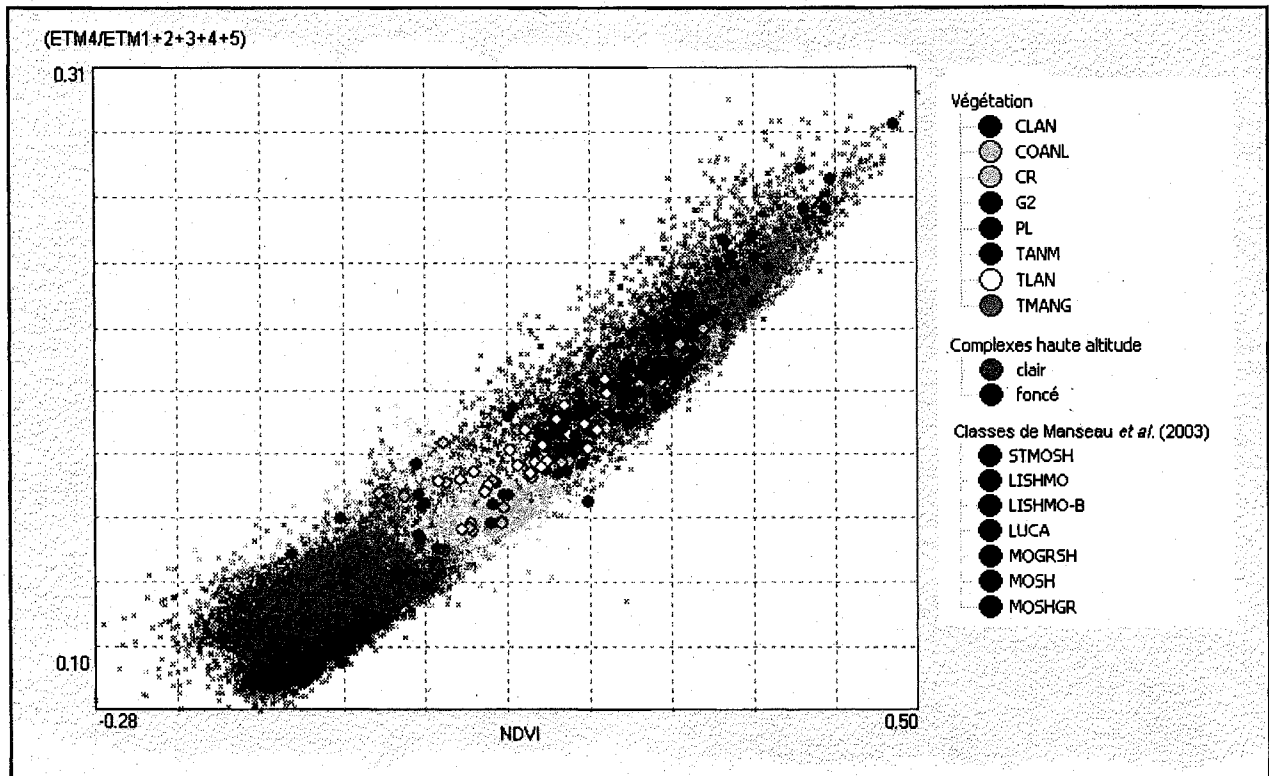


Figure 55: Classes de végétation et gradient de NDVI
 Les échantillons fournis par Manseau dans le secteur d'étude couvrent une plage plus étroite de NDVI que les échantillons du présent projet

Contrairement à ce que nous pourrions le penser, le décalage entre nos groupes de relevés et ceux de Manseau n'est pas partout égal. En effet, on constate que les relevés que nous avons obtenus pour la classe *tundra de lichens et arbustes nains* (TLAN) ont, à l'inverse, un NDVI plus faible que ceux de la classe équivalente, STMOSH (figure 55). Il semble que nos échantillons puissent avoir été situés dans des lichénaies plus denses que ceux de Manseau *et al.* (2003) (figure 56). C'est d'ailleurs ce que confirme la comparaison visuelle des échantillons des deux projets sur l'image satellitaire.

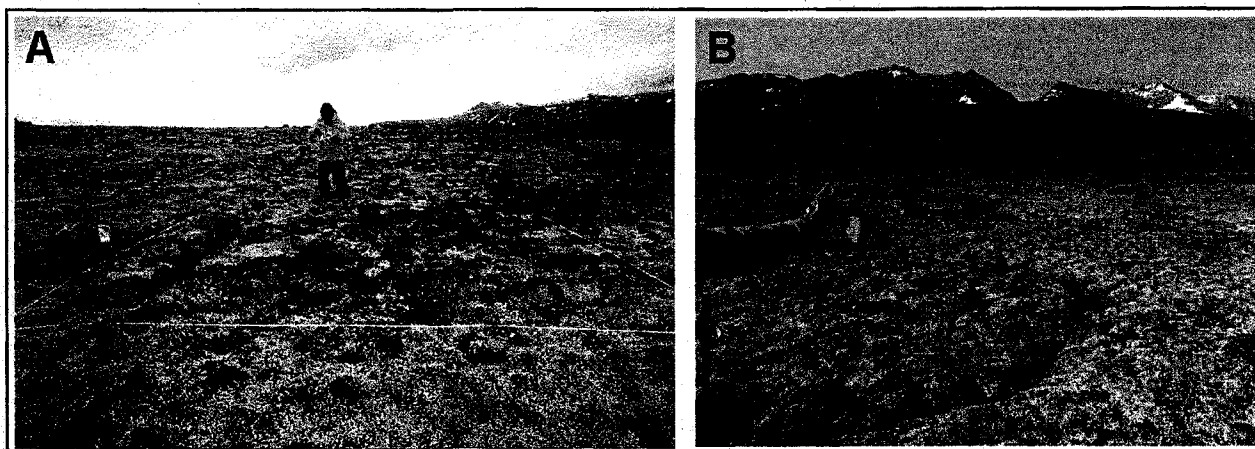


Figure 56: Classe STMOSH et classe TLAN

La photo en A donne un exemple jugé typique de la classe que Manseau *et al.* (2003) dénomment STMOSH. Le relevé S26, donné en B, suggère que certaines lichénaies (TLAN) échantillonnées dans le cadre de notre projet ont un couvert lichénique moyen plus élevé que la classe STMOSH, alors que ces deux classes sont censées être équivalentes. Rappelons que la photo en A ne nous a pas servi de guide visuel, car nous ne l'avons obtenue qu'après la fin de notre projet de classification.

Au terme de la comparaison que nous avons faite entre les deux projets, nous pouvons avancer les deux observations suivantes :

- 1) de par l'effort d'échantillonnage qui a été fait par Manseau *et al.* (2003) sur les hautes terres et dans la partie nord du parc, il semble y avoir une bonne représentation des types de végétation qui dominent sur une grande partie de ce territoire ; dans le cadre de notre projet, les hautes-terres sont représentées par les relevés que nous avons réalisés dans la vallée Naqsaq ; par contraste avec cela, l'attention que nous avons accordée aux groupements plus riches des flancs de la vallée Akshayuk semble apporter un complément important, voire crucial pour l'élaboration d'une stratification pleinement représentative des types de végétation présents au PNC Auyuittuq.
- 2) les différences observées entre les groupes d'échantillons des deux projets suggèrent qu'un simple outil textuel (les listes d'espèces et les pourcentages de couverture) n'est pas suffisant pour bien transmettre la description des classes végétales utilisées par Manseau *et al.* (2003) ; un guide visuel détaillé, voire une clé de classification, serait sans doute souhaitable comme outil de travail pour la classification de la végétation du parc par du personnel non spécialisé.

6.3.2. Les exactitudes des deux projets de classification : quelques comparaisons

Sans avoir examiné la carte de la classification de Manseau *et al.* (2003), nous avons tout de même jugé utile de commenter les exactitudes qui ont été mesurées pour les classifications de notre projet et du leur.

Plusieurs nuances peuvent être apportées aux exactitudes respectives calculées pour la classification de la végétation des deux projets. Cependant, nous les jugeons sensiblement équivalentes (53,4 % contre 54,7 %). Il y a toutefois quelques différences dans la manière dont ces chiffres ont été obtenus. Dans le cas de Manseau *et al.* (2003), un échantillon est considéré comme ayant été correctement classifié s'il tombe dans un rayon de 1 pixel d'un pixel correctement classifié. C'est-à-dire que neuf pixels différents (un carré de 3 par 3) peuvent potentiellement servir pour valider la classification d'un seul et même relevé de terrain. Ceci vise à prendre en compte l'erreur positionnelle combinée du GPS et de la donnée-image. Si la classification finale produit des régions homogènes de bonne taille, alors ceci est un biais acceptable. Par contre, si l'effet « poivre et sel » de la classification est grand, alors l'évaluation de l'exactitude sera biaisée à la hausse. C'est là un biais qui, dans notre cas, a pu être éliminé grâce à l'analyse par objets spatiaux. Mais, plusieurs nuances ont aussi été apportées au taux de succès de 54,7 % que nous avons avancé pour notre projet. Il ne semble donc pas justifié de prendre position en faveur de l'un ou l'autre des deux projets pour la classification de la végétation.

Manseau *et al.* (2003) soulignent qu'un plus grand nombre d'échantillons pourrait contribuer à améliorer les résultats de la classification. En regard du faible taux de succès obtenu dans les deux projets pour la classification de la végétation, il pourrait néanmoins s'avérer utile de réduire le nombre de classes de végétation pour la PNC Auyuittuq. C'est ce que suggère la structure hiérarchique de l'analyse d'ensemble (*cluster analysis*) qu'on a réalisée Manseau *et al.* (2003, p.27), où « les ensembles plus grossiers semblent refléter des différences physionomiques alors que les plus fins reflètent des différences floristiques » (traduction libre). Pour les besoins d'une classification à l'échelle du parc, une stratification végétale se limitant aux caractères physionomiques de la végétation pourrait peut-être s'avérer suffisante. C'est d'ailleurs la conclusion à laquelle parvinrent Hines et Moore (1988), qui proposèrent une stratification

végétale en six classes. Quant à Manseau *et al.* (2003, p. 28), ils concluent leur discussion en proposant que les résultats de leur étude « soient revus au fil des développements dans la classification de la végétation pour l'arctique et que des efforts soient faits pour développer un système de classification et un langage plus universels pour la typologie de la végétation arctique » (traduction libre).

La classification réalisée par Manseau *et al.* (2003) repose, tout comme la nôtre, sur une structure hiérarchique. La stratification la plus détaillée que donnent ces auteurs peut dans une certaine mesure se comparer à celle que nous proposons au niveau des « écotypes ». Mais, notre projet comporte beaucoup plus de classes : mis à part les classes végétales, ce niveau comprend 20 classes dans notre projet contre seulement 9 chez Manseau *et al.* (2003). En conséquence, nous proposons une stratification dont la portée thématique est beaucoup plus explicite. Malgré le nombre plus élevé de classes, notre classification semble aussi plus précise que celle de Manseau *et al.* (2003), avec un taux de succès de 83,2 % contre 69,1 %. À nouveau, la façon dont ces chiffres ont été obtenus diffère d'un projet à l'autre. Quant à la faveur à donner à l'une ou l'autre des méthodes, on ne pourrait espérer clarifier cette question qu'en menant une campagne de validation sur le terrain. Ainsi, on pourrait obtenir un nombre suffisant d'échantillons indépendants pour évaluer les deux projets sur la même base.

6.4. Exportabilité de la structure de classification

Parmi les retombées potentielles d'un travail comme le nôtre, il y a la possibilité d'appliquer, sur de nouvelles images, les règles élaborées pour l'analyse de l'image classifiée. Dans notre cas, nous savons d'ores et déjà que l'application directe de ces règles n'est pas possible car plusieurs classes requièrent que des segments-échantillons soient étiquetés dans l'image avant que ne s'opère la classification. Nous savons aussi qu'une telle démarche exigerait qu'une correction atmosphérique parfaite puisse être faite des images avant la classification. Song *et al.* (2001) affirment cependant qu'il n'est pas nécessaire de faire cette correction lorsque les signatures spectrales des classes peuvent être dérivées indépendamment dans chacune des images à classifier. Partant donc du principe qu'un ajustement des règles de classification serait requis, nous avons évalué si la structure de notre analyse pouvait être appliquée à une image différente et

livrer une classification comparable. À cette fin, nous avons transposé les règles de segmentation et de la classification adoptées pour l'image ETM⁺ du 13 août 2000 à une image ETM⁺ acquise le 1^{er} août 2002. Ces deux images ont en commun une portion de territoire située entre la calotte glaciaire de Penny et la baie de Cumberland, dans le secteur sud-ouest du PNC Auyuittuq (figure 57). Comme les deux images sont prises sensiblement à la même saison et avec seulement deux ans d'écart, on peut s'attendre à ce que la réalité de terrain soit restée relativement la même. C'est aussi ce qui nous permet de vérifier si de simples ajustements suffiront à adapter la structure de notre classification à la nouvelle image. L'exercice de transposition réalisé se limite aux classes plus générales de notre structure, dont la description ne repose que sur des règles chiffrées, sans faire appel à la classification au plus proche voisin.

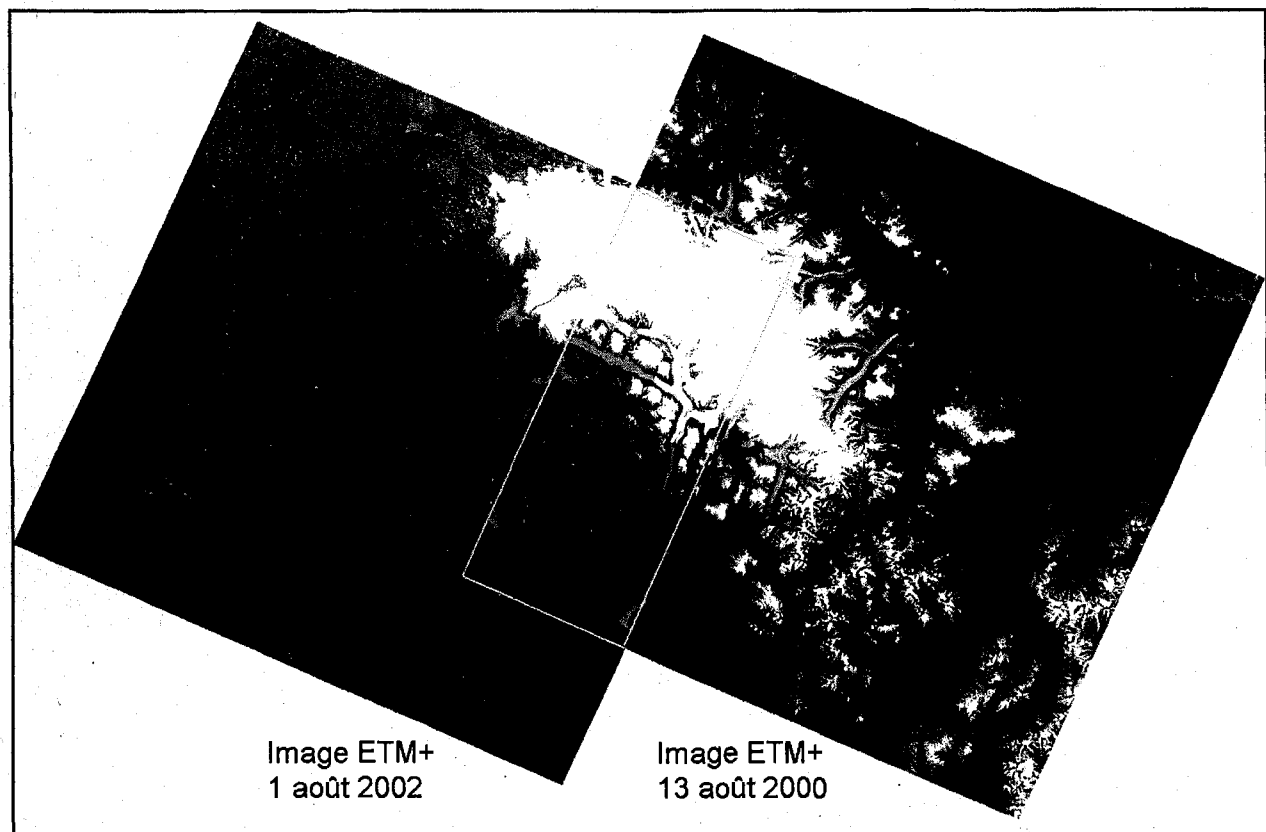


Figure 57: La partie sud-ouest du parc national du Canada Auyuittuq est couverte tant par l'image ETM⁺ du 13 août 2000 que par celle du 1^{er} août 2002. Le rectangle jaune délimite le territoire que partagent les deux images.

Aux fins de la comparaison, nous nous sommes concentrés sur une région d'environ 4 600 km² située juste au sud du lac Greenshield (figure 58). Cette portion d'image a été segmentée puis classifiée en suivant exactement les mêmes étapes pour l'image de 2002 que pour celle de 2000. Évidemment, la limite neige-glace ou la turbidité de l'eau peuvent différer d'une saison à l'autre. D'ailleurs, c'est ce qu'on observe en inspectant les deux images. On s'attend donc à ce que la classification diffère quelque peu d'une image à l'autre. Par contre, l'étendue de la végétation ou encore la position des plans d'eau devraient normalement être à peu près équivalentes dans les deux images.

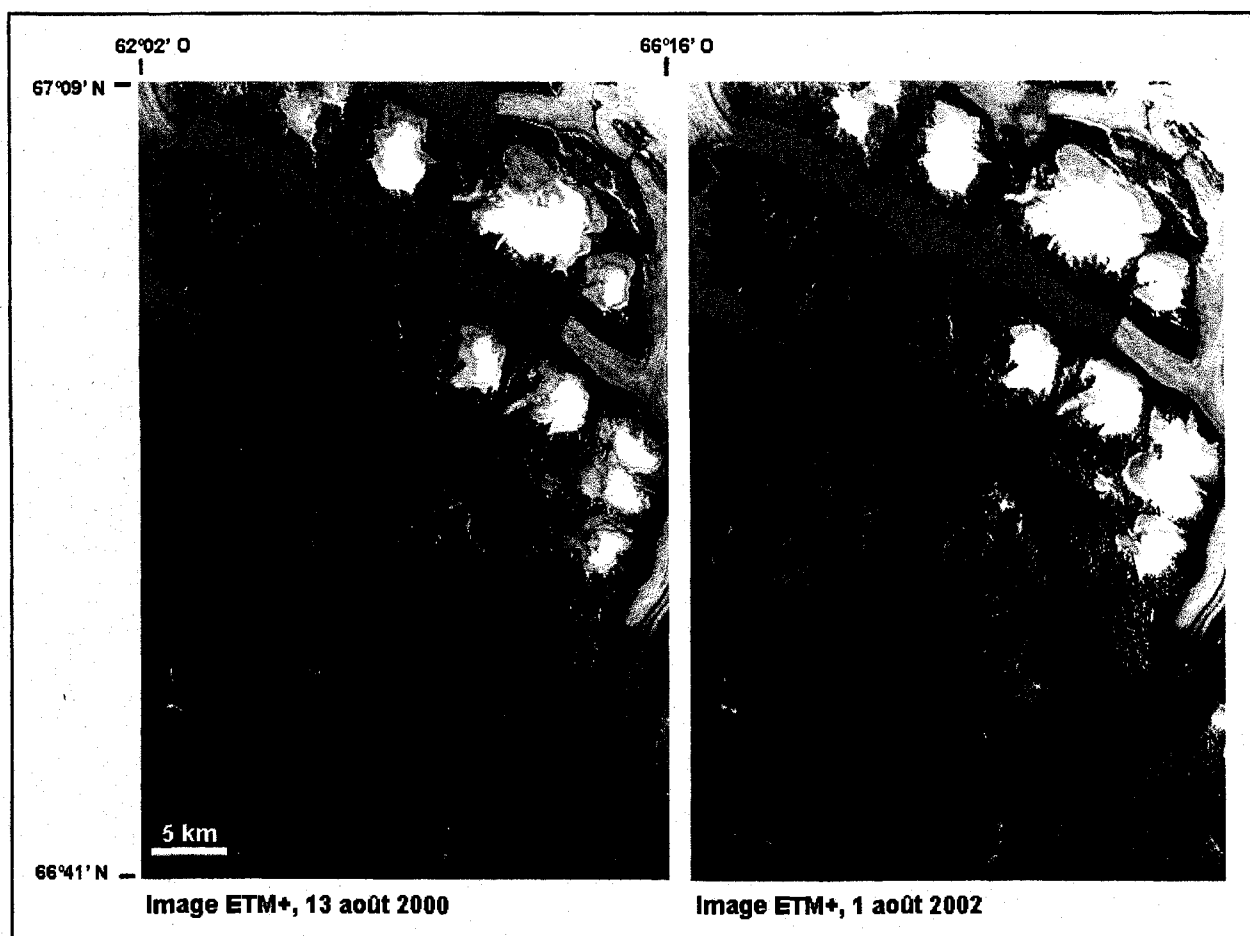


Figure 58: Une portion de territoire d'environ 4 600 km² a été tirée de deux images satellitaires pour tester la stabilité de la structure de classification. La limite neige-glace ou la turbidité de l'eau peuvent différer d'une image à l'autre, mais on s'attend à ce que la limite de la végétation et position des plans d'eau y soient à peu près équivalentes. Note : la portion plus pâle qu'on voit dans la partie centre-gauche de l'image de 2002 est due à un nuage.

L'application directe de notre structure de classification à l'image de 2002 donne des résultats très différents de ceux qu'on a obtenus avec l'image de 2000 (figure 59). En effet, les « Dénudés » et les « Complexes de haute altitude » y disparaissent presque complètement au profit de la végétation, ce qui n'est pas du tout raisonnable. La végétation y englobe aussi de nombreux plans d'eau. On doit donc conclure que la structure que nous avons donnée à notre classification n'est pas facilement « exportable ». Toutefois, il nous a été possible, au terme de plusieurs ajustements, d'adapter cette structure aux propriétés de cette nouvelle image, et ainsi en faire une classification se rapprochant de ce que suggère l'interprétation visuelle de l'image.

À titre d'exemple, voyons comment les valeurs de NDVI changent d'une image à l'autre. Le NDVI figure parmi les attributs importants pour la classification de la végétation. Dans le cadre de notre projet, les relevés effectués sur le terrain nous ont aidés à fixer à -0,05 la limite en-deçà de laquelle un objet serait exclu de la classe Végétation. Cette valeur est spécifique à l'image acquise le 13 août 2000. En effet, divers facteurs contribuent à faire varier le NDVI sur diverses échelles de temps. Pour l'image de 2002, qui fut prise plus tôt dans la saison végétative, nous noterons que l'angle solaire est de presque 10 % supérieur ($40,5^\circ$ vs $37,5^\circ$). En appliquant le même seuil de NDVI à cette image, on s'aperçoit qu'un beaucoup plus grand territoire respecte ce critère minimal (figure 60). Or, on sait pertinemment que plusieurs surfaces non-végétales sont incluses dans ce territoire. Les propriétés spectrales de cette image nous obligent donc à fixer un nouveau seuil pour en délimiter correctement les parties végétalisées. On fait alors grimper à 0,2 le NDVI que doit posséder un objet pour pouvoir potentiellement être admis dans la classe Végétation.



1. Classification, image du 13 août 2000



2. Classification, image du 1 août 2002 avant les ajustements

- Cryosphérique
- fonte
- glace distale
- glace proximale
- neige
- eau turbide proximale
- eau turbide2
- Eaux
- eau bleue
- eau noire
- eau turbide
- eau verte
- glace-débris
- No data
- Non-classifié
- Ombres
- ombre
- ombre sur glacier
- Sols non végétalisés
- alluvium-eau
- Complexes haute altitude
- Dénudés
- fluvio-glaciaire
- neige et roc
- Végétation

20 km



3. Classification, image du 1er août 2002 après les ajustements

Figure 59: L'application, à une nouvelle image, des règles de classification développées pour l'image ETM⁺ du 13 août 2000
L'application directe des règles livre des résultats insatisfaisants mais la structure peut en être ajustée, ce qui améliore nettement la nouvelle classification.

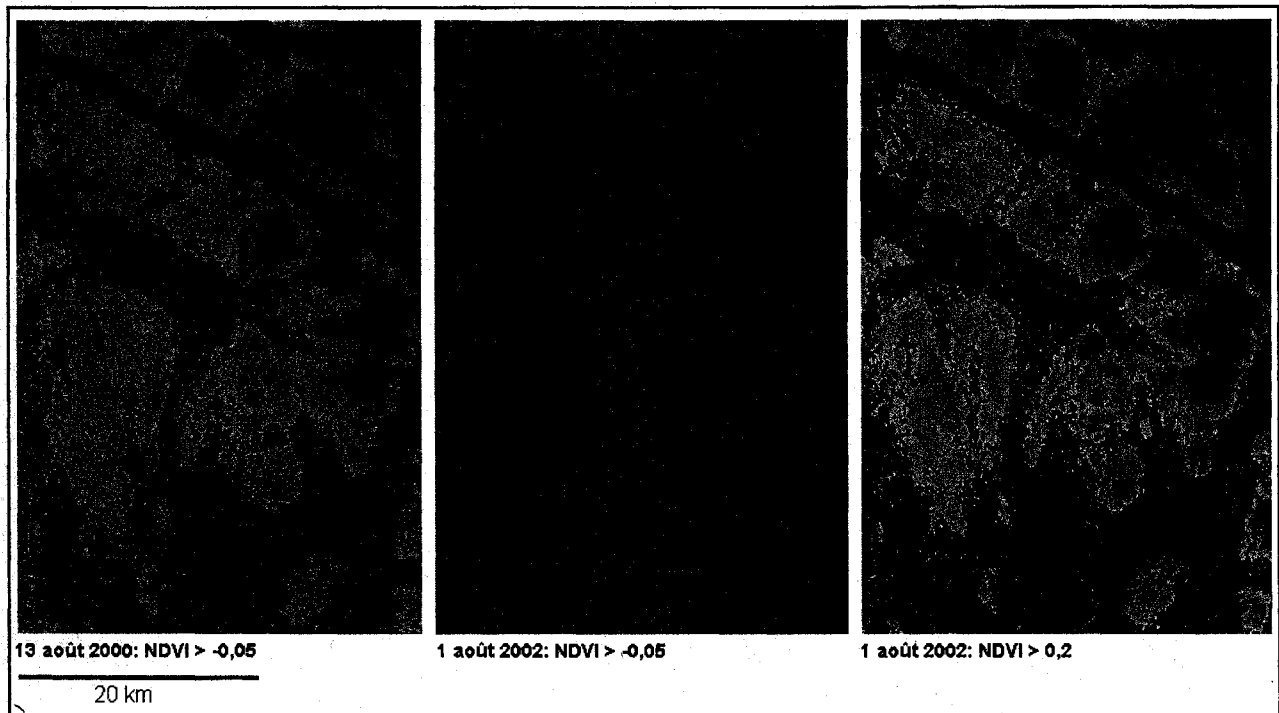






























Figure 60: Les segments ayant un NDVI supérieur à un seuil donné sont affichés en couleur

Pour l'image du 13 août 2000, le seuil minimal pour la végétation fut fixé à -0,05. Si on utilise ce même seuil pour l'image de 2002, c'est un territoire beaucoup plus grand qui est admis. Pour retrouver une répartition spatiale similaire à celle qui fut déterminée pour l'image de 2000, il nous faut déplacer le seuil de NDVI à la valeur de 0,2.

Comme nous l'avons fait pour le NDVI, nous avons ajusté 14 des 74 règles de classification pour les adapter à l'image du 1^{er} août 2002 (rappelons que cette structure est simplifiée par rapport à celle du projet principal, qui comporte beaucoup plus de règles). Ces ajustements touchent plus particulièrement sept attributs. Les détails sont présentés au tableau 7.

Tableau 7 : Les ajustements apportés pour adapter les règles de classification d'une première image aux propriétés spectrales d'une seconde image
 L'attribut visé, le type de fonction utilisée et les valeurs limites sont donnés pour les diverses classes touchées par ces ajustements.

Classe	Attribut	Avant ajustement		Après ajustement	
Végétation	NDVI	-0,05	 0,05	0,38	 0,42
Sols non-végétalisés	NDVI	-0,4	 0,2	-0,3	 0,52
CHA	ETM6/(ETM1+2+3)	1	 2,2	1	 24
Dénudés	ETM6/(ETM1+2+3)	0,4	 1,3	0,2	 3,2
Fluvioglacière	ETM6/(ETM1+2+3)	1	 1,2	2,2	 2,9
Fluvioglacière	ETM5/(ETM1+2+3)	0,4	 0,7	1,1	 1,8
Neige et roc	ETM6/(ETM1+2+3)	0,4	 0,5	0,2	 0,5
Eau bleue	ETM3/(ETM1+2+3)	0,2 et -	 0,27 et -	0,27 et -	
Eau noire	ETM1	1	 40	0,01	 40
Fonte	ETM4/ETM3	0,52	 0,53	0,72	 0,73
Glacé distale	ETM4/ETM5	5,9	 6,1	11	 12
Glacé proximale	ETM4/ETM5	5	 10	7	 14
Neige	ETM4/ETM5	7,5	 8,5	11	 12
Eau turbide	ETM2/(ETM1+2+3)	0,31 et +	 0,28 et +	0,28 et +	

Les ajustements qui sont listés ci-hauts sont assez simples à faire et ne demandent pas un grand effort d'analyse. Ceci nous encourage donc à dire que la classification est relativement facile à transposer d'une image à l'autre. Par contre, quand on s'attarde aux détails de la seconde classification, on s'aperçoit que de nombreux ajustements fins seraient nécessaires pour atteindre une classification vraiment satisfaisante. Dans le cadre du test que nous avons mené, par exemple, on remarquera que plusieurs plans d'eau « noire » n'ont pas été relevés. Or, les attributs utilisés lors de la classification originale ne suffisent pas pour éliminer cette confusion. Dans de tels cas, il conviendrait de reprendre les analyses spectrales dans l'espoir d'identifier des attributs nouveaux qui, pour cette nouvelle image, livreraient la séparabilité voulue.

7. Conclusion

Au fil des ans, plusieurs projets d'envergure ont été menés pour décrire et inventorier les ressources naturelles du parc national du Canada Auyuittuq. Les avancées technologiques et techniques dans le domaine de la télédétection ont poussé les gestionnaires de territoire et les chercheurs à explorer le potentiel des images satellitaires pour la cartographie écologique. Cet effort en est encore aux phases exploratoires pour ce qui concerne l'inventaire écologique des parcs nationaux de l'Arctique canadien. En effet, il n'y pas de consensus clair quant à la typologie à retenir pour la cartographie écologique d'une telle aire protégée. Dans ce contexte, la recherche en télédétection prend toute son importance, car l'imagerie satellitaire constituera sans contredit la donnée de référence pour les efforts futurs en matière d'inventaire écologique pour les territoires arctiques. La portée et le détail thématique de ces inventaires sera donc largement tributaire des possibilités offertes par la télédétection. La synthèse géospatiale que permet l'analyse d'image par objet spatiaux s'avère une voie prometteuse pour réconcilier le concept de l'inventaire écologique dans les parcs nationaux et la classification détaillée d'images satellitaires. Les résultats que nous avons obtenus à cet égard sont encourageants. En effet, nous avons pu tirer de cette analyse une stratification détaillée du couvert non-végétal du parc et ce, avec un niveau d'exactitude relativement élevé. Pour ce qui concerne la classification de la végétation, les travaux antérieurs pour le PNC Auyuittuq ont proposé plusieurs stratifications. Les plus récents avaient mené à l'identification de huit classes. Malheureusement, ni nous, ni les auteurs antérieurs n'ont réussi à cartographier ces classes de façon satisfaisante. Le nombre limité de données de référence sur le terrain est peut-être en cause, mais on ne peut écarter l'idée que la stratification proposée puisse être trop détaillée pour la capacité de discrimination du capteur ETM⁺. Une simplification de la stratification pourrait être nécessaire. Le cas échéant, il serait souhaitable de retenir une typologie qui s'arrime aux efforts internationaux en matière de classification végétale pour l'arctique. Un guide détaillé, voire une clé de classification, sera requise pour assurer une continuité dans les travaux d'inventaire et de suivi que continueront de mener les chercheurs et le personnel dans les parcs de l'arctique. Les travaux réalisés à ce jour au PNC Auyuittuq s'avèrent une excellente base pour le développement d'un tel outil. Il est primordial que soit considérés tous les types de couverture végétale présents au PNC Auyuittuq dans la sélection d'une stratification pour le parc. Sur ce point, la majorité des travaux antérieurs sont incomplets. Une mise en commun des connaissances sur la végétation du parc s'avérerait un effort de synthèse utile. Les documents

photographiques sont des aides inestimables à cet égard, et les relevés photographiques géo-positionnés méritent de figurer au rang des outils-clé pour l'inventaire et le suivi écologique de la couverture du sol pour le parc. À cet effet, une méthode standard mériterait d'être développée et diffusée. Une telle méthode pourrait être grandement mise à profit dans l'éventualité d'une validation des travaux de classification de la présente étude ou d'études analogues à l'échelle du réseau des parcs de l'Arctique.

8. Références

- Adler, P., Raff, D. and Lauenroth, W. (2001) The effect of grazing on the spatial heterogeneity of vegetation. *Oecologia*, vol. 128, n° 4, p. 465-479.
- Agriculture et agroalimentaire Canada (2008) Système canadien de classification des sols *in* Système d'information sur les sols du Canada, <http://sis.agr.gc.ca/siscan/taxa/soil/intro.html>.
- Aitken, A.E. and Gilbert, R. (1989) Holocene nearshore environments and sea-level history in Panguit Fiord, Baffin Island, N.W.T., Canada. *Arctic and Alpine Research*, vol. 21, n° 1, p. 34-44.
- Alling, M.T., Reid, J.B.Jr and Davis, P.T. (1987) Lichenometric dating of debris flow levees, Panguit Pass, Baffin Island; a proxy paleoclimatic record? *in* Geological Society of America, Northeastern Section, 22nd annual meeting, Pittsburgh, PA, The Geological Society of America, Mar. 4-7, vol. 19, no 1, p. 1.
- Anderson, L.W. (1976) Source of cirque glacier debris, Panguit Fiord area, Baffin Island, N.W.T., Canada. American Quaternary Association. Conference, n° 4, p.120.
- Anderson, L.W. (1978) Cirque glacier erosion rates and characteristics of Neoglacial tills, Panguit Fiord area, Baffin Island, N.W.T., Canada. *Arctic and Alpine Research*, vol. 10, n° 4, p. 749-760.
- Andrews, J.T., Barry, R.G. and Jacobs, J.D. (1973) University of Colorado 1972 Field Season on East Baffin Island. *Arctic*, vol. 26, n° 2, p. 171-172.
- Andrews, J.T and Dyke, A.S. (1974) A geomorphological-geological inventory and interpretation of Baffin island national park and surrounding area. Final report to Applied Research Division, Parks Canada, Ottawa, 309 p.
- Baird, P.D., Ward, W.H., Roethlisberger, H., Orvig, S., Bonnländer, B.H., Kidd, D.J., Thompson, H.R., Watson, A., Schwarzenbach, F.H., Marmet, J., Thomson, J.A. and Weber, J.R. (1953) Baffin Island Expedition, 1953: a preliminary field report. *Arctic*, vol. 6, n° 4, p. 227-251.
- Blaschke, T. and Strobl, J. (2001) What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. *GIS-Zeitschrift für Geoinformationssysteme*, vol. 6, p. 12-17.
- Blouin, J.L, Desloges, C. et Guimond, A. (1975) Parc National Auyuittuq Classification Biophysique du col de Panguit. Gauthier, Poulin, Thériault Limitée. Parcs Canada, Ottawa, Ontario, 385 p. + annexes.
- Blouin, J.L, Desloges, C. and Guimond, A. (1978) Auyuittuq National Park Biophysical Classification of Panguit Pass. Parks Canada, Ottawa, Ontario, 371 p.

- Broll, G., Tarnocai, C. and Mueller, G. (1999) Interactions between vegetation, nutrients and moisture in soils in the Pangnirtung Pass area, Baffin Island, Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 10, n° 3, p. 265-277.
- Buchroithner, M.F., Bolch, T., Kunert, A. and Kamp, U. (2006) Morphometry-based mapping of debris-covered glaciers *Geophysical Research Abstracts*, vol. 8, 10360.
- Callaghan T.V., Jonasson, S., Nichols, H., Heywood, R.B. and Wookey P.A. (1995) Arctic Terrestrial Ecosystems and Environmental Change [and Discussion]. *Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering*, vol. 352, n° 1699, The Arctic and Environmental Change, p. 259-276.
- CAVM Team. (2006). Circumpolar Arctic Vegetation Map. Scale 1:7,500,000. Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF) Map No. 1. U.S. Fish and Wildlife Service, Anchorage, Alaska.
- Chapin III, F.S., Bret-Harte, M.S., Hobbie, S.E. and Zhong, H. (1996) Plant Functional Types as Predictors of Transient Responses of Arctic Vegetation to Global Change. *Journal of Vegetation Science*, vol. 7, n° 3, p. 347-358.
- Church, M. (1972) Baffin Island sandurs; a study of arctic fluvial processes. *Geological Survey of Canada Bulletin* 216, 208 p.
- Church, M., Stock, R.F., and Ryder, J.M. (1979) Contemporary sedimentary environments on Baffin Island, N.W.T., Canada; debris slope accumulations *Arctic and Alpine Research*, vol. 11, no 4, p.371-402.
- CLC-Camint Inc. (2003) Rapport final, Banc d'essai sur les fonctionnalités du logiciel eCognition, Cas du Parc National Auyuittuq et du Parc national de la Péninsule-Bruce, Hull, 46 p.
- Congalton, R.G. and Green, K. (1999) *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed data: principles and practices*. Lewis Publishers, Boca Raton, 137 p.
- Crist, E.P. and Cicone, R.C. (1984) A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data - The TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-22, n° 3, p. 256-263.
- Davis, P.T. (1982) Late Holocene glacial history, Pangnirtung area, Baffin Island, Canada, *Geological Society of America*, vol. 14, n° 1-2, p. 13.
- Definiens Imaging (2004) *eCognition Professional 4.0 User Guide* 4, 475 p.
- Deshaye, J. (2000) Vegetation mapping for Auyuittuq National Park using Landsat images. Field report - Summer 2000. presented to Parks Canada Nunavut Ecosystems Secretariat, FORAMEC, Québec, 39 p. + appendices.

Elliot, R.C. (1973) A Report on the Reconnaissance of the National Park on Baffin Island, 1972. Final Report to the Applied Research Division, Parks Canada, Department of Indian and Northern Affairs, Ottawa, Ontario. 210 p.

Epstein, H. E., Beringer, J., Gould, W.A., Lloyd, A.H., Thompson, C.D., Chapin III, F.S., Michaelson, G. J., Ping, C. L., Rupp T. S. and Walker D. A. (2004) The nature of spatial transitions in the Arctic. *Journal of Biogeography*, vol. 31, no 12, p. 1917.

Flanders, D., Hall-Beyer, M. and Pereverzoff, J. (2003) Preliminary evaluation of eCognition object-based software for cut block delineation and feature extraction. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 29, n° 4, p. 441-452.

Hines, J.E., Fournier, M.A., Moore, S., Seidel, K.H., Sutherland, M. and Wilkinson, L.J. (1988) A Natural Resource Survey of Auyuittuq National Park Reserve, Baffin Island. Department of Renewable Resources, Government of the Northwest Territories, Yellowknife, N.W.T. A project completed under contract to Environment Canada, Canadian Parks Service, Winnipeg, Manitoba, contract report n° 4, 361 p.

Hines, J.E. and Moore, S. (1988) The vegetation and flora of Auyuittuq national Park Reserve, Baffin Island. Department of Renewable Resources, Government of the Northwest Territories, File Report n° 74, 93 p.

Hobbie, S.E., Gough, L. and Shaver, G.R. (2005) Species compositional differences on different-aged glacial landscapes drive contrasting responses of tundra to nutrient addition. *Journal of Ecology*, vol. 93, n° 4, p. 770-782.

Huete, A.R. (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* vol. 25, n° 3, p. 295-309.

Jacobs, J.D., Andrews, J.T., Barry, R.G., Bradley, R.S., Weaver, R. and Williams, L.D. (1973) Glaciological and meteorological studies on the Boas Glacier, Baffin Island, for two contrasting seasons (1969-70 and 1970-71). *The Role of Snow and Ice in Hydrology. Properties and Processes of Glaciers- International Association of Scientific Hydrology- International Union of Geodesy and Geophysics, publication, Louvain*, vol. 107, p. 371-382.

Jensen, J.R. (2005) *Introductory Digital Image Processing A Remote Sensing Perspective*, 3e éd., Prentice Hall, Upper Saddle River, 526 p.

Jia, G.J., Epstein, H.E. and Walker, D.S. (2006) Spatial heterogeneity of tundra vegetation response to recent temperature changes. *Global Change Biology*, vol. 12, n° 1, p. 42-55.

Jurdant, M., Bélair, J.L., Gerardin, V. et Ducruc, J.-P. (1977) L'Inventaire du Capital-Nature : méthode de classification et de cartographie écologique du territoire, Québec : Service des études écologiques régionales Direction régionale des terres. Pêches et environnement Canada, Série de la classification écologique du territoire, n° 2, 202 p.

Klijn, F. and Udo de Haes, H.A. (1994) A hierarchical approach to ecosystems and its implications for ecological land classification. *Landscape Ecology*, vol. 9, n° 2, p. 89-104.

Lacate, D.S. 1969. Guidelines for bio-physical land classification. Canadian Forestry Service, Ottawa, Publication n° 1264, 61p.

Laidler G.J. and Treitz P. (2003) Biophysical remote sensing of arctic environments. *Progress in Physical Geography*, vol. 27, n° 1, p. 44-68.

Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W. (2000) *Remote Sensing and Image Interpretation*. 4th Edition. John Willey and Sons, New York, 724 p.

Manseau, M. and Hughson, P. (2000) Identification of plant communities for the conduct of the supervised classification of the Landsat image and protocols for the 2000 field survey. Parks Canada Agency, Nunavut. 14 p. + appendices (rapport non publié)

Manseau, M., O'Brien, D., Hughson, P., Didion, M. (2003) Vegetation mapping in Auyuittuq National Park of Canada using Multi-Spectral Landsat Satellite ETM Imagery. Draft Report, Western Canada Service Centre and the Nunavut Field Unit of Parks Canada, Winnipeg, 105 p. (rapport non publié)

Meinel, G. and Neubert, M. (2004) A Comparison of Segmentation programs for High Resolution Remote Sensing Data. *in* International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Leibniz Institute of Ecological and Regional Development, Dresden, Germany <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm4/papers/506.pdf>.

Mercier, G. (2004) Fluctuations des fronts glaciaires dans le sud de la Passe d'Akshayuk, parc national d'Ayuittuq, Nunavut. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université d'Ottawa, 181 p.

Myneni, R.B., Hall, F.G., Sellers, P.J. and Marshak, A.L. (1995) The interpretation of spectral vegetation indexes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 33, p. 481-486.

Neuman, C.L. (1987) Aeolian processes and landforms in south Pangnirtung Pass, Southeast Baffin Island, N.W.T., Canada. Ph.D. Thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 235 p.

Oswald, W.W., Brubaker, L.B., Hu, F.S. and Kling, G.W. (2003) Holocene pollen records from the central Arctic Foothills, northern Alaska: testing the role of substrate in the response of tundra to climate change. *Journal of Ecology*, vol. 91, no 6, p. 1034-1048.

Paradis, S., Morrison, N.R. and Rampton, V.N. (1986) Ecoresions of Auyuittuq National Park Reserve. Unpublished Report prepared for NWT Department of Renewable Resources, Yellowknife. Terrain Analysis and Mapping Services, Carp, Ontario, 63 p.

Parcs Canada (1980) Les inventaires écologiques dans les parcs nationaux du Canada, Concept et méthodologie. Division des ressources naturelles, Direction des parcs nationaux, 192 p.

Parcs Canada (2005) Utilisation de la télédétection par satellite pour surveiller et évaluer l'intégrité des écosystèmes et les changements climatiques dans les parcs nationaux du Canada, Rapport technique sommaire de l'an 1, version 1.0 - Juin 2005, 18 p.

Parcs Canada (2008) Végétation *in* Parc national du Canada Auyuittuq.
http://pc.gc.ca/pn-np/nu/ayuittuq/natcul/natcul4_F.asp.

Parrot, J.F., Lyberis, N., Lefauconnier, B., Manby, G. (1993) SPOT multispectral data and digital terrain model for the analysis of ice-snow fields on arctic glaciers, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 14, n° 3, p. 425-440.

Paul, F., Kääb, A., Maisch, M., Kellenberger, T. and Haerberli, W. (2002) The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods, *Annals of Glaciology*, vol. 34, n° 1, p. 355-361.

Pouliot, J.; Thomson, K., Chevallier, J.-J., Chumova, M. et Boussema, M.R. (1995) Intégration de la pente lors du processus de segmentation des images satellitaires pour la cartographie de l'occupation du sol; résultats préliminaires, vol. 5, p.43-51, in Dubois, J. M.M., Boussema, M.R., Boivin, F. et Lafrance, P. *Télédétection des ressources en eau*. Presses de l'Université du Québec et AUPELF. Ste-Foy et Montréal, 304 p.

Sidjak, R.W. and Wheate, R.D. (1999) Glacier mapping of the Illecillewaet icefield, British Columbia, Canada, using Landsat TM and digital elevation data. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 20, n° 2, p. 273-284.

Sugita, M., Yasuoka, Y., Yamagata, Y. and Tamura, M. (1996) Scaling of NDVI and VSW index between LANDSAT TM and NOAA AVHRR data. *in* GIS Development, National Institute for Environmental Studies, Onogawa, Japan.
<http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1996/ts12/ts12004a.asp>

Schiewe, J., Tufte, L. and Ehlers, M. (2001) Potential and problems of multiscale segmentation methods in remote sensing. *GIS-Zeitschrift für Geoinformationssysteme*, vol 6, p. 34-39.

Sellers, P. J. (1985) Canopy reflectance, photosynthesis, and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 6, p. 1335-1372.

Thompson, H.R. (1954) Pangnirtung Pass, Baffin Island: an exploratory regional geomorphology, Ph. D. thesis, McGill University, Arctic Institute of North America, Montreal, 320 p.

van der Wal, R. (2006) Do herbivores cause habitat degradation or vegetation state transition? Evidence from the tundra. *Oikos*, vol. 114, n° 1, p. 177-186.

Virtanen, R., Oksanen, J., Oksanen, L. and Razzhivin, V.Y. (2006) Broad-scale vegetation-environment relationships in Eurasian high-latitude areas. *Journal of Vegetation Science*, vol. 17, p. 519-528.

Walker, D.A. (2000) Hierarchical subdivision of Arctic tundra based on vegetation response to climate, parent material and topography. *Global Change Biology*, vol. 6, n° S1, p.19

Walker, D.A., Raynolds, M.K., Daniëls, F.J.A., Einarsson, E., Elvebakk, A., Gould, W.A., Katenin, A.E., Kholod, S.S., Markon, C.J., Melnikov, E.S., Moschalenko, N.G., Talbot, S.S., Yurtsev, B.A. and the CAVM Team (2005) The Circumpolar Arctic Vegetation Map. *Journal of Vegetation Science*, vol. 16, p. 267-282.

Weier, J. and Herring, D. (2008) Measuring Vegetation (NDVI & EVI) in NASA Earth Observatory, <http://earthobservatory.nasa.gov/Library/MeasuringVegetation>.

Wessels, K. J., Prince, S. D., Zambatis, N., MacFadyen, S., Frost, P. E. and Van Zyl, D., (2006) Relationship between herbaceous biomass and 1 km² Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) NDVI in Kruger National Park, South Africa. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 27, n° 5, p. 951-973.

Wiken, E.B. and Ironside, G. (1977) The Development of Ecological (Bio-Physical) Land Classification in Canada. *Landscape Planning*, vol 4.

Wilson, R. (1976) *The Land That Never Melts*, Peter Martin Associates Ltd., Toronto (Ontario), 212 p.

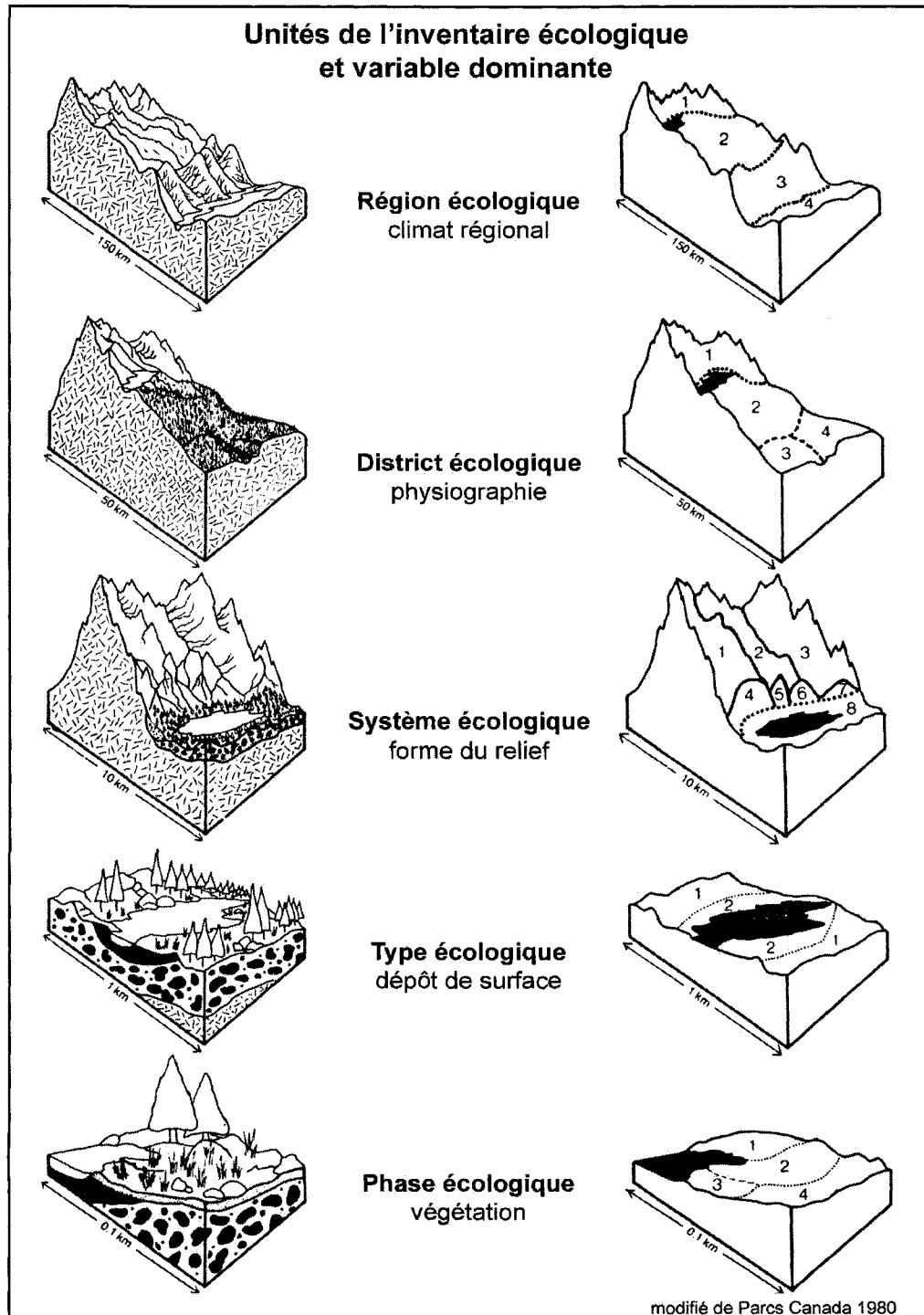
Zielinski, G.A. (1998) Ice core records from the Penny Ice Cap, Baffin Island, *PALEo Times*. *The Paleoclimates from Arctic Lakes and Estuaries Newsletter*, vol. 6, p. 45.

Zoltai, S.C. (1979) Ecological land classification projects in northern Canada and their use in decision making, dans *Applications of Ecological (biophysical) Land Classification in Canada*. *Ecological Land Classification Series*, n° 7, Lands Directorate, Environment Canada, Hull (Québec), 396 p.

Annexe 1

Le concept de l'inventaire écologique

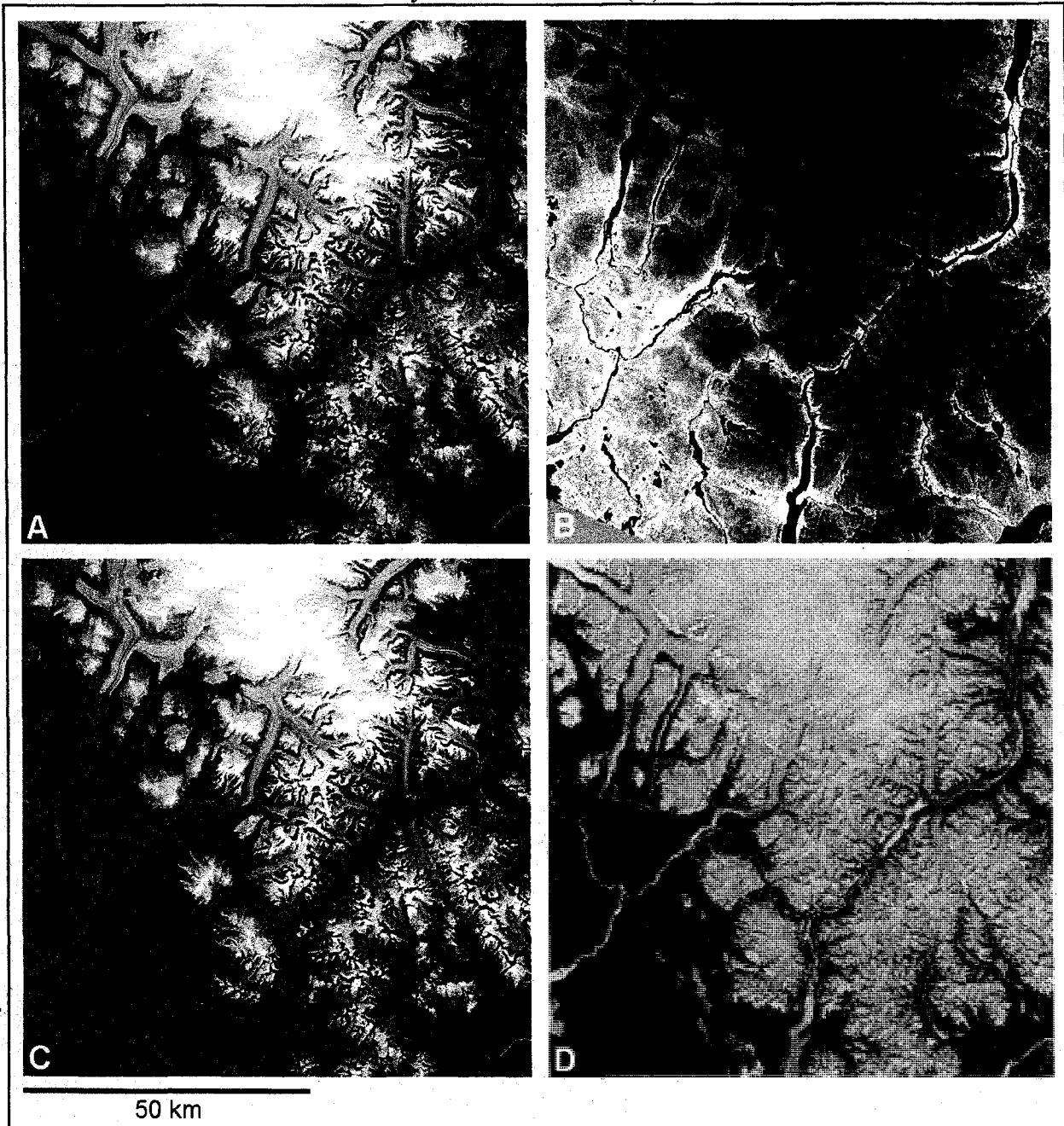
L'inventaire écologique prévoit la subdivision du territoire en unités cartographiques à divers niveaux de perception. Remarquer l'échelle.



Annexe 2

Le secteur d'étude

Le secteur d'étude (A) est centré sur les hautes-terres de Penny, que domine la calotte glaciaire du même nom. Le climat rude et l'effet de l'altitude contraignent la végétation au fond des vallées et à la partie sud-ouest du secteur d'étude. Les valeurs les plus fortes de l'indice de végétation NDVI (B) sont liées à l'activité photosynthétique. La représentation en fausses couleurs (C) aide à apprécier la répartition de la végétation sur le territoire à l'étude (le NDVI est affiché en rouge en plus des trois bandes du spectre visible). La végétation, toutes classes confondues, est affichée en vert dans la classification des écosystèmes du secteur (D).



Annexe 3

Métadonnées conformes au profil du FDGC pour les métadonnées au niveau de l'acquisition

Ortho-image Landsat 7

Métadonnées :

Information sur l'identification :

Citation :

Information sur la citation :

Source : Centre d'information topographique, Géomatique Canada

Forme de présentation des données géospatiales : image de télédétection

Information sur la série :

Nom de la série : Landsat ETM

Identification de l'édition :

La charge utile du satellite Landsat 7 comprend le capteur ETM+. Le capteur ETM+ est une version améliorée du capteur TM à bord des satellites Landsat 4 et 5. Figurent parmi les améliorations au capteur l'ajout de la bande panchromatique et deux portées de gain, une résolution spatiale améliorée pour la bande thermique et l'ajout de deux calibreurs solaires.

Description :

Résumé :

Le jeu de données de l'ortho-image est créé avec les données de contrôle les plus précises disponibles au moment de sa création. L'imagerie a été corrigée avec soit les données de l'aérotriangulation fédérale ou des données provinciales, soit, en cas de non-disponibilité, avec les données BNDT les plus précises. L'objectif est d'obtenir une précision de 30 mètres ou supérieure dans le sud et de 50 mètres ou supérieure dans le nord avec un niveau de confiance de 90 %. La précision est évaluée pour chaque jeu de données de l'orthoimage. Les données de contrôle, qui ont été extraites de sources comme cela est mentionné plus haut, peuvent être constituées de données vectorielles d'intersections de routes ou de centres de gravité de lacs et îles. Dans certains cas, l'intersection de la ligne du centre d'une rivière surfacique peut avoir été utilisée. Les points de contrôle sont répartis de manière homogène à l'intérieur de l'image dans des secteurs spécifiques. Les secteurs se trouvent dans le pourtour de l'image, dans les élévations les plus basses et les plus hautes de l'image, ainsi que dans les secteurs de recouvrement des images adjacentes.

Objet :

L'objectif national des ortho-images est la production d'un jeu complet d'ortho-images sans nuage couvrant la masse continentale canadienne, et ce à l'aide des données fournies par le capteur Thematic Mapper du satellite Landsat 7.

Information supplémentaire :

Les données Landsat 7 sont captées à une altitude nominale de 705 kilomètres dans une orbite quasi polaire, quasi circulaire, synchrone au Soleil, à une inclinaison de 98,2 degrés, en imageant la même bande de 183 kilomètres de large de la surface terrestre à chaque intervalle de 16 jours. Chaque cadre est marqué par une voie et une rangée séquentielles déterminées par le cycle répétitif de 16 jours. Les capteurs de Landsat nécessitent 233 orbites. Les rangées, indexées est-ouest, sont générées en fractionnant chaque voie en 23,92 secondes de temps satellite dans les deux directions à l'équateur, ce qui donne 248 rangées par orbite complète. Les capteurs Landsat recueillent continuellement des données qui sont ensuite segmentées au sol, à l'aide de données éphémérides de télémétrie, en scènes encadrées individuelles. Les pistes orbitales peuvent se décaler avec le temps à cause de divers facteurs; elles sont ajustées au besoin. Le cadrage est unique pour chaque orbite. Par conséquent, les emplacements de cadres ne sont pas exacts mais plutôt à l'intérieur d'une tolérance de mouvement en dehors de

l'orbite de satellite originelle. L'orbite du satellite fournit un chevauchement latéral de couverture d'au moins 7,3 % à l'équateur, augmentant à environ 85 % à 80 degrés de latitude.

Information sur la qualité des données :

Précision des attributs :

Rapport sur la précision des attributs :

Six (6) bandes multispectrales sont disponibles avec une résolution de 30 mètres. Une bande panchromatique 8 ayant une résolution de 15 mètres a été ajoutée. La bande 6 comporte désormais des bandes à gain élevé et à gain bas avec une résolution de 60 mètres.

Rapport sur la cohérence logique :

Des points de contrôle sont choisis dans des zones prédéfinies sur l'image afin d'assurer une bonne répartition équitable. La surface de l'image prévue pour la sélection des points de contrôle a été réduite de 4,5 km aux limites est et ouest de l'image. Cette réduction permettra de réutiliser les mêmes points de contrôle dans la prochaine mise à jour de l'image. On a fait des essais sur trois images pour déterminer le meilleur emplacement des points de contrôle à l'intérieur d'une image afin d'obtenir une plus grande précision. Ces images contenaient divers types de terrains et étaient très représentatives de la masse continentale canadienne. On a eu recours à différentes sortes de données de contrôle ainsi qu'à différentes précisions pour ces images. Les essais ont démontré que les points de contrôle dans six secteurs de base dans le pourtour de l'image ainsi que dans les secteurs d'élévation minimum et maximum fournissaient la meilleure précision. Les images chevauchantes sont prises en considération et les secteurs de base correspondants sont ajoutés. Ces secteurs supplémentaires (entre 4 et 10) n'améliorent pas la précision mais elles assurent l'utilisation des mêmes points de contrôle dans les recouvrements d'images.

Quand on utilise un contrôle précis (sous-pixels), le modèle de correction est un bon indice de la dérivation de la précision de l'ortho-image.

Rapport sur la complétude :

Le jeu de données provient du niveau L1G des images brutes de Landsat 7. Il a été traité à l'aide de points de contrôle basés sur les données de contrôle les plus précises disponibles au pays. La méthodologie utilisée assure une répartition homogène des points de contrôle à l'intérieur de l'image. Le modèle paramétrique a été mis au point par le Dr Thierry Toutin du Centre canadien de télédétection (CCT), Ressources naturelles Canada. Ce modèle repose sur des principes reliés à l'orbitographie, à la photogrammétrie, à la géodésie et à la cartographie. Il reflète la réalité physique de toute la géométrie de prise de vue et corrige les distorsions qui se produisent à cause de la projection de la plate-forme, du capteur, de la Terre et de la cartographie. Le modèle numérique d'élévation (MNE) est la source la plus précise disponible en date de la rectification ortho. Il peut être constitué d'un mélange de données provinciales, de données numériques d'élévation du Canada (DNEC) à 50 K ou de DNEC à 250 K.

Précision positionnelle :

Précision positionnelle horizontale :

Rapport sur la précision positionnelle horizontale :

La précision horizontale est basée sur les données de contrôle, sur le MNE et sur la méthodologie utilisée pour extraire et positionner les points de contrôle sur l'image. Des essais ont été réalisés sur des images situées à Kamloops (Colombie-Britannique), à Winnipeg (Manitoba) et à Montréal (Québec). Ces régions ont été choisies pour leurs différences de terrains et pour la disponibilité de données de contrôle. Différentes sources de données de contrôle, telles que données vectorielles provinciales, routes contrôlées par GPS, Base nationale de données topographiques (BNDT) à 50 K et BNDT à 250 K, ont été utilisées. Différents types de distribution de points de contrôle et l'incidence du MNE ont été mis à l'essai et évalués. La précision signalée dans les métadonnées provient d'une analyse du modèle paramétrique et de la précision du MNE. L'analyse inclut l'élimination des erreurs grossières (3 sigmas). Pour les MNE, la précision altimétrique et planimétrique de la carte d'origine doit être considérée pour calculer la précision altimétrique combinée qui influe sur l'ortho-image. Dans le but d'évaluer l'impact sur l'orthoimage de la précision planimétrique du MNE, une évaluation de la pente des MNE 250K du pays

a été réalisée (à l'exception de la Colombie-Britannique puisqu'un MNE provincial a été fourni). Le résultat de cette évaluation a indiqué que pour 95 % de la surface couverte par une image, la pente est inférieure à 25 %. Le MNE servant à l'orthorectification des images est construit en fusionnant les MNE de différentes provenances (fédérales ou provinciales). Pour chacun de ceux-ci, une précision verticale est calculée. Ces calculs incluent l'erreur du MNE dans les 3 axes (x,y,z) ainsi que les plus fortes pentes de la région couverte par ce dernier. La précision verticale la plus élevée calculée précédemment est ensuite déterminée. Finalement, l'incidence de cette dernière est combinée à l'erreur moyenne quadratique (EMQ) fournie par le modèle paramétrique pour obtenir la précision planimétrique d'ortho-image résultante avec un degré de confiance de 90 %. Les entités bien définies situées dans des régions ayant une pente supérieure à 25 % peuvent ne pas respecter ce degré de précision. Des essais ont démontré que très peu d'entités bien définies sont situées dans des régions où la pente est supérieure à 25 %.

La formule suivante est utilisée :

$$(((\text{Model_EMQX}^{**2} + (\tan(\theta) * \text{DEM précision})^{**2}) + \text{Model_EMQY}^{**2})^{**1/2}) * 1.5174$$

alors que

Model_EMQX = EMQ fournie par le modèle paramétrique;

tan (θ) = incidence en X de l'élévation à la position angulaire maximale;

DEM précision = précision du pire MNE utilisé en rectification
(pente < 40 %)

Model_EMQY = EMQ fournie par le modèle paramétrique et

1.5174 = facteur d'erreur circulaire pour une probabilité à 90 %.

Lignage :

Information_source :

Plusieurs sources différentes peuvent avoir été utilisées pour contrôler l'image. On a utilisé les meilleures données de contrôle disponibles au moment de la production. Les types de données de contrôle possibles sont les suivants : données provinciales (lacs, îles, rivières et intersections de routes), données vectorielles précises de la BNDT (moins de 30 mètres), routes captées par GPS, et vecteurs extraits de photographies de l'aérotriangulation fédérale. L'information source sur chacun des points de contrôle utilisés pour contrôler l'image peut être fournie par le CITS avec l'identifiant de l'ortho-image Landsat 7 PathRow_EditionVersion_YYMMDD_L7.

Citation_source :

Information_sur_la_citation :

Source : U.S. Geological Survey (image brute), CITS (Centre d'information topographique, Sherbrooke) (BNDT), CITO (Centre d'information topographique, Ottawa) (aérotriangulation)

Forme_de_présentation_des_données_géospatiales : image de télédétection et données vectorielles numériques

Abréviation_de_la_citation_source : nom de la Province, Federal ou MultiSource

Contribution_source : quand l'abréviation de la citation source est Province, les données vectorielles numériques et le MNE (dans certains cas) ont été utilisés comme données de contrôle. Si l'abréviation de citation source est Federal ou MultiSource, les données fédérales (réseau routier, BNDT, aérotriangulation) et/ou provinciales ont été utilisées. La précision des ortho-images a été calculée en fonction des données de contrôle utilisées. Les points de contrôle ont été dérivés des intersections de routes et de rivières, ainsi que des centres de gravité de lacs et îles.

Étape du processus :

Description_du_processus : Les ortho-images sont produites à partir de points de contrôle situés dans des secteurs dans les coins des images ainsi que dans le milieu des limites est et ouest (6 secteurs de base). Des secteurs supplémentaires sont utilisés dans des régions d'élévation minimum et maximum à l'intérieur de l'image. La limite théorique

des images chevauchantes a été utilisée pour créer des secteurs supplémentaires (là où des secteurs de base projetés d'images chevauchantes sont situés). Un minimum de trois points de contrôle par secteur a été sélectionné. Une moyenne de 14 secteurs renfermant des points de contrôle permet la création du modèle de correction. La pire hypothèse donne un minimum de 42 points de contrôle bien distribués pour le modèle de correction. La précision du modèle numérique d'élévation (MNE) comporte une petite incidence sur la précision de l'ortho-image ($\tan 7 \times$ précision du MNE). Les élévations reliées aux entités utilisées comme points de contrôle sont dérivées des MNE provinciaux et fédéraux ainsi que des modèles de triangulation aérienne. Plusieurs MNE peuvent être utilisés pour la rectification selon leur disponibilité. La précision horizontale signalée pour l'ortho-image utilise la pire précision de MNE dans le calcul. Les MNE utilisés peuvent être constitués de données provinciales, de la BNDT à 50 K ou de la BNDT à 250 K, selon leur disponibilité. Le processus utilise les MNE d'origine provinciale quand ils sont disponibles, comble les lacunes avec des MNE dérivés des courbes de niveau BNDT à 50 K, pour finalement combler les lacunes qui restent avec des MNE dérivés des courbes de niveau à 250 K. Vu que la précision des MNE a peu d'incidence sur la précision des images, la pire précision de MNE (y compris l'incidence de pente) sert à évaluer la précision de l'ortho-image. À la fin du processus, toutes les données de contrôle valides et toutes les entités d'images sont stockées dans une base de données. La base de données est reliée à la Couche de cohérence des données de l'ICDG (CCDI). Le modèle de correction peut être recréé à n'importe quel moment à l'aide des données de contrôle et de l'information sur l'image. Le modèle de correction n'est pas fourni.

Information_sur_les_algorithmes : ortho-image du satellite PCI et ensemble MNE

Identifiant_des_algorithmes : modèle paramétrique

Référence_sur_les_algorithmes :

Toutin, Thierry. 1993. *Multisource data fusion with an integrated and unified geometric modelling*. Rapport interne, Centre canadien de télédétection, 588, rue Booth, Ottawa (Ontario), Canada.

Toutin, Thierry et Carboneau, Yves. 1992. *La Création d'ortho-images avec MNE : Description d'un nouveau système*, Canadian Journal of Remote Sensing. vol. 18, n° 3. Juillet 1992. Pages 136 à 141.

Information_sur_le_traitement :

Identifiants_de_traitement :

Citation :

Information_sur_la_citation :

Source : Centre d'information topographique, Sherbrooke

Forme_de_présentation_des_données_géospaciales : images de télédétection

Information_sur_la_série :

Nom_de_la_série : Landsat ETM

Identification_de_l'édition : La charge utile du satellite Landsat 7 comprend le capteur ETM+. Le capteur ETM+ est une version améliorée du capteur TM à bord des satellites Landsat 4 et 5. Les améliorations incluent l'ajout de la bande panchromatique et de deux portées de gain, une résolution spatiale améliorée pour la bande thermique et l'ajout de deux calibreurs solaires. Le traitement des images Landsat 7 est une rectification ortho réalisée à partir des meilleures données de contrôle précises disponibles de la part des gouvernements fédéral et provinciaux. Les points de contrôle sont bien distribués et réutilisés dans les images chevauchantes pour permettre une meilleure mise en mosaïque.

Logiciel_de_traitement :

Référence_sur_le_logiciel_de_traitement :

Citation :

Information_sur_la_citation :

Source : PCI Geomatics

Titre : *Satellite Ortho and DEM Package*

Contact_pour_les_métadonnées :

Information_sur_le_contact :

Adresse_du_contact :

Type_d'adresse : postal et physique

Adresse : Centre d'information topographique, Sherbrooke (CITS)

Adresse : 2144, rue King Ouest

Adresse : Bureau 010

Ville : Sherbrooke

État ou province : Québec

Code postal : J1J 2E8

Pays : Canada

Numéro_de_téléphone_du_contact : 1-800-661-2638

Numéro_de_télocopieur_du_contact : 819-564-5698

Heures de service : 8 h à 16 h HE

Désignation des normes des métadonnées : *Content Standards for Digital Geospatial Metadata*

Version_des_normes_des_métadonnées : FGDC-STD-001-1998

Convention_horaire_des_métadonnées : heure locale

Contraintes_d'accès_aux_métadonnées : aucune

Information_sur_la_sécurité_des_métadonnées :

Classification_de_sécurité_des_métadonnées : non classifiées

Annexe 4

Métadonnées pour le produit orthoimage ETM⁺ de Landsat-7

Landsat 7 Orthoimage product metadata

Product_id - 017013_0100_000813_L7

Media_id/control_source_id - 017013_0100_000813_L7_UTM20_PIX

Product_Date - 2002/01/07

Edition - 01

Version - 00

Number_of_pixels_panchro - 16324

Number_of_lines_panchro - 16056

Number_of_pixels_multi - 8162

Number_of_lines_multi - 8028

Number_of_pixels_thermal - 4081

Number_of_lines_thermal - 4014

LL latitude - 066.468220734

LL longitude - -067.73554255

UL latitude - 067.980536549

UL longitude - -066.27718771

LR latitude - 065.890836072

LR longitude - -063.91968513

UR latitude - 067.361066457

UR longitude - -062.23437857

Resampling - CC

Datum - NAD83 (CSRS)

Projection - UTM

UTM_zone - 20

Format - PIX

Horizontal_Positional_Accuracy_Value - 16

Digital_Elevation_Model_Accuracy_Value - 147

Source_used_citation_abreviation - Federal

Digital_Elevation_Model_source - Federal

Originator - Geomatic Canada, Centre for Topographic Information / Géomatique Canada, Centre d'information topographique

Landsat 7 Raw image metadata

Raw_Image_Number - LE7017013000022650

Path - 017

Starting_row - 013

Ending_row - 013

Start_acquisition_date/time - 2000/08/13/ 15:41:42

End_acquisition_date/time - 2000/08/13/ 15:42:09

Raw_Image_Process - L1G

Orientation - NOM

Cloud_Percent - Less than 10%

Metadata_Reference_Information

Metadata_Date - 2002/01/07

Metadata_Review_Date - 2002/01/07

Annexe 5

Métadonnées pour l'orthoimage ETM⁺ de Landsat-7 du 13 août 2000

```
startTime = "2000 08 13 15:41:43.226";
endTime = "2000 08 13 15:42:09.693";
centreTime = "2000 08 13 15:41:51.819";
centreLocation =
  latitude = 6.693742203274675e+01;
  longitude = -6.503265203044698e+01;
corners =
  upperLeft =
    latitude = 6.799467057582956e+01;
    longitude = -6.639086237107864e+01;
  upperRight =
    latitude = 6.735468083389847e+01;
    longitude = -6.219651210054792e+01;
  lowerRight =
    latitude = 6.586912924617316e+01;
    longitude = -6.378827154262393e+01;
  lowerLeft =
    latitude = 6.647148289597826e+01;
    longitude = -6.776744978231113e+01;
productFramingMethod = "Path Row";
path = 17;
row = 13;
sceneShift = 0;
productOrientation = "Satellite";
numLines = 6000L;
numPixels = 6386L;
width = 1.915800000000000e+02;
height = 1.800000000000000e+02;
correctionLevel = "Systematic Geocorrection";
correctionParams =
  mapProjection = "UTM";
  zoneNumber = 20;
  earthEllipsoid = "NAD83";
  resamplingKernel = "CC";
  elevationCorrection = "None";
opticalParams =
  sensorInfo =
    offNadirAngle = -1.079150795208294e-02;
    sunAzimuth = 1.679889505935082e+02;
    sunElevation = 3.753785547448174e+01
```

Annexe 6

Les numéros et les plages spectrales des bandes du capteur ETM+ utilisé sur la plateforme Landsat-7

Le numéro de bande indiqué dans le champ BandList représente ce qui suit:

- 01 multi-spectrale (0,45 to 0,515 um)
- 02 multi-spectrale (0,525 to 0,605 um)
- 03 multi-spectrale (0,63 to 0,69 um)
- 04 multi-spectrale (0,75 to 0,90 um)
- 05 multi-spectrale (1,55 to 1,75 um)
- 6l thermique (10,40 to 12,5 um)
- 6h thermique (10,40 to 12,5 um)
- 07 multi-spectrale (2,09 to 2,35 um)
- 08 panchromatique (0,52 to 0,90 um)

Annexe 7

Création du modèle numérique d'altitude (MNA)

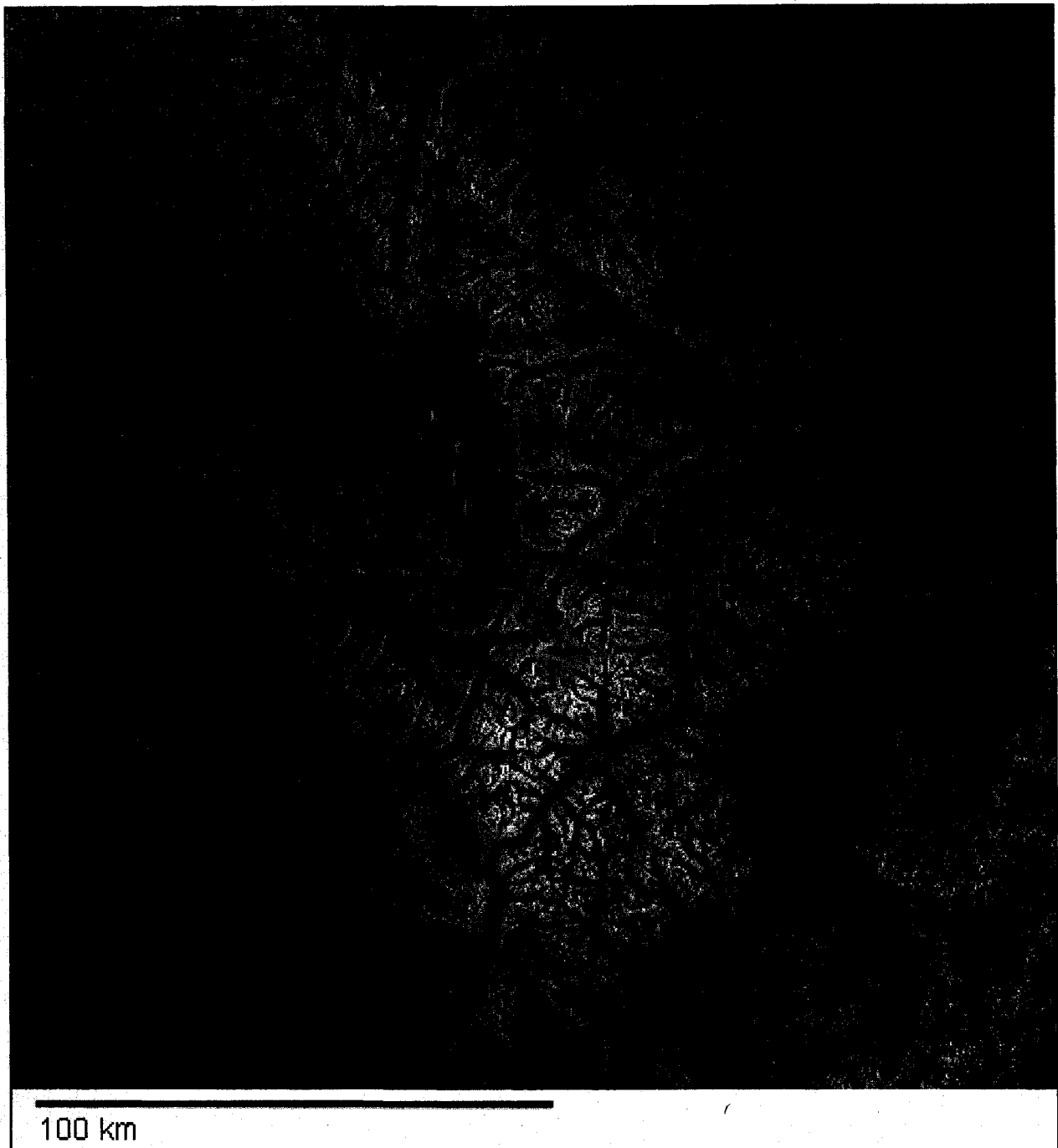
Les étapes suivantes ont été suivies pour créer un MNA pour le secteur à l'étude:

- Téléchargement des jeux de données pour 10 feuillets au 1 : 250 000 à partir du portail internet *geobase.ca* :
 - 016L ouest
 - 016M ouest
 - 026I est et ouest
 - 026J est et ouest
 - 026O est et ouest
 - 026P est et ouest
- Fusion des couches matricielles des feuillets-source en un seul et même fichier matriciel
- Reprojection du MNA selon le datum « Nad 83 » : les pixels sont alors compressés dans le sens de la longitude
- Rééchantillonnage du MNA en pixels de 30 m par 30 m au sol, qui donne une représentation visuelle plus facile à comparer avec la donnée ETM⁺
- En raison de décalages observés avec la donnée image, une rectification du MNA a été effectuée pour obtenir un meilleur habillage de l'image ETM⁺ (en utilisant l'outil *point to point reprojection* du logiciel ENVI 4.0)
- Rééchantillonnage final à 30 m par 30 m au sol de sorte que les coins de pixels soient situés aux mêmes endroits que les coins de pixels de l'image satellitaire

Une représentation du MNA créé est donnée par l'image de la page suivante. Certains fichiers-source semblent comporter des erreurs. En particulier, on voit que la surface marine du coin supérieur droit du MNA présente un relief qui n'a pas lieu d'être. On note très nettement la jonction entre les fichiers-source du nord-est de la région d'étude. À première vue, il semble que le problème se limite à la surface marine, mais nous ne pouvons exclure la possibilité que des problèmes existent également dans d'autres parties des fichiers-source.

Annexe 7 (suite)

MNA de la région d'étude



Annexe 8


Règles de classification

Les fonctions d'inclusion qui ont été imposées à divers attributs pour donner la description des classes. Les courbes des fonctions peuvent prendre différentes formes standard. On peut manipuler ces formes, mais par souci de reproductibilité, nous nous sommes limités aux formes standard. Les courbes indiquent l'évolution du degré d'appartenance entre deux valeurs que précise l'utilisateur. Dans le premier exemple ci-dessous, un objet ne peut pas appartenir à la classe « végétation » s'il a un NDVI inférieur à -0,05. D'après cette fonction, l'appartenance d'un objet à la classe végétation ne sera totale (100 %) que s'il a un NDVI de plus de 0,05. Entre les deux, le pourcentage d'appartenance à la classe est déterminé par la forme de la courbe. À ce critère s'ajoutent d'autres fonctions. À moins d'avis contraire, le descripteur logique est toujours « et » (*and*), de sorte que c'est la fonction la plus restrictive qui déterminera l'appartenance potentielle (en pourcentage) d'un objet à une classe.


VÉGÉTATION

NDVI : -0,05  0,05

Les valeurs de la fonction d'inclusion sont basées sur les valeurs de NDVI des objets échantillons de classes de végétation au couvert continu, particulièrement pour l'inclusion de la classe TLAN.

ETM4/(ETM1+2+3+4+5) : 0,12  0,18

Cet index permet de distinguer le nuage compact des classes «végétation» de celui des complexes de haute altitude (CHA), soit les classes F et CLAIR avec lesquelles la végétation partage certaines valeurs de NDVI.

Moyenne ETM1 : 1  2

Ce critère permet d'exclure de cette classe les objets de la classe "no data" qui seraient sinon inclus par les autres fonctions d'inclusion.

N.B.: la combinaison de ces critères crée une classe qui inclut aussi des franges de classes telles EAU ou NON-VEG, lesquelles devront être retranchées au moment de choisir les critères pour la création de ces classes.

G2; CLAN; COANL; CR; PL; TANM; TLAN; TMANG (Classes individuelles de végétation)

Une classification au plus proche voisin (*standard nearest neighbour*) sépare ces classes. Ce type de classification est préférable en raison de la faible séparabilité des classes entre elles. Les attributs employés pour cette opération sont choisis en fonction de leur récurrence dans une suite d'optimisations de l'espace-attribut (*feature space optimisation*). Ces attributs sont les suivants:

ETM3/(ETM1 + ETM2)

NDVI

ETM4/ETM3

ETM6/(ETM1 + ETM2 + ETM3)

valeur du pixel au signal de plus faible pour le NDVI


valeur du pixel au signal de plus faible pour la bande ETM5


ETM2/(ETM1 + ETM2 + ETM3)


ETM4/(ETM1 + ETM2 + ETM3 + ETM4 + ETM5)

À ceci s'ajoutent quelques critères plus restrictifs touchant les classes CR et PL :


CR (complexes ripicoles)

ETM4/ETM3 : 1,2  1,3

Moyenne (en degrés) dans la couche matricielle « Pente » : 8  12

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM5 : 75  80


et

Distance (en mètres) par rapport à la classe « Eau turbide » : 200  1000

ou

Distance (en mètres) par rapport à la classe « Eau turbide2 » : 200  1000


ou

Distance (en mètres) par rapport à la classe « Eau turbide proximale » : 200  1000


PL (prairies de laïches)

Moyenne dans la couche matricielle « Pente » : 13  18

SURFACES CRYOSPHERIQUES

Moyenne ETM6(gains élevés) : 105  106

L'inspection visuelle des bandes individuelles révèle un contraste important entre les glaciers et les autres types de couverture du sol dans la bande thermique. Ce critère permet de faire une première distinction grossière entre les surfaces glaciaires et plusieurs autres surfaces. Certains objets OMBRES, EAUX et NON-VÉGÉTAL sont toutefois inclus dans cette fonction d'inclusion.

ETM3/(ETM1 + 2 + 3+) : 0,28  0,29

Basé sur échantillons, permet de séparer les surfaces glaciaires de OMBRE SUR SOL


Moyenne ETM1 : 1  2

Ce critère permet d'exclure de cette classe les objets de la classe NO DATA qui seraient sinon inclus par les autres fonctions d'inclusion.

ETM4/ETM5 : 0,9  2


Permet de retrancher des moraines et autres surfaces non-cryosphériques

NEIGE


ETM4/ETM5 : 7,5  8,5


Pour distinguer neige et glace

GLACE PROXIMALE


ETM4/ETM5 : 5  10

GLACE DISTALE

Moyenne dans la couche matricielle *Tasseled Cap* (sixième transformation) : 91  92
Pour distinguer des SOLS NON-VÉGÉTALISÉS


Écart-type dans la bande ETM1 : 0  4

Pour distinguer GLACE DISTALE de EAU TURBIDE PROXIMALE

ETM4/ETM5 : 5,9  6,1

Pour distinguer de GLACE PROXIMALE


FONTE

ETM4/ETM3 : 0,52  0,53


GLACE-DÉBRIS

Moyenne ETM5 : 16 et + 


Pour recouper GLACE DÉBRIS de la classe GLACE DISTALE

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM6(gains élevés) : 77  95


Basé sur échantillons pour distinguer de VÉGÉTATION, NON-VÉGÉTAL et EAU NOIRE

ETM1/(ETM1 + 2 + 3) : 0,37 et + 

Basé sur échantillons pour distinguer de EAU TURBIDE PROXIMALE


ETM2/(ETM1 + 2 + 3) : 0,29  0,31

Basé sur échantillons pour distinguer de EAUX

ETM3/(ETM1 + 2 + 3) : 0,28  0,29


Pour retrancher OMBRE SUR SOL de la classe GLACE DÉBRIS

EAUX


Moyenne dans la couche matricielle *Tasseled Cap* (sixième transformation) : 91  92

Basé sur échantillons pour exclure les SURFACES CRYOSPÉRIQUES de la classe.

EAU VERTE

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM4 : 40  50


Pour retrancher des objets NEIGE-NÉVÉ de la classe EAU VERTE

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM5 : 20  25

Permet de retrancher NON-VÉGÉTAL et VÉGÉTATION de EAU VERTE

Moyenne ETM1: 40 et + 

Basé sur échantillons, pour retrancher OMBRES de EAU VERTE


ETM2/(ETM1 + 2 + 3) : 0,31 et + 

Pour retrancher les objets NON-VÉGÉTAL de EAU VERTE


EAU TURBIDE

Moyenne ETM1 : 40 et + 


Permet de retrancher NON-VÉGÉTAL et VÉGÉTATION de EAU TURBIDE

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM4 : 40  50


Pour retrancher des objets NEIGE-NÉVÉ de la classe EAU TURBIDE

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM5 : 20  25

Permet de retrancher NON-VÉGÉTAL et VÉGÉTATION de EAU TURBIDE


ETM2/(ETM1 + 2 + 3) : 0,31 et + 

Pour retrancher OMBRE SUR NEIGE de EAU TURBIDE

ETM3/(ETM1 + 2 + 3) : 0,28 et + 

Distingue EAU TURBIDE et EAU VERTE

EAU NOIRE

ETM1/(ETM1 + 2 + 3) : 0,42  0,43

Pour l'inclure dans les critères de OMBRES (0.4 et +); pour retrancher PL de EAU NOIRE et contribue à distinguer EAU NOIRE et EAU VERTE

Moyenne ETM1 : 1  40

Pour l'inclure dans les critères de OMBRES

Moyenne dans la couche matricielle « Altitude » : 1000 et - 


Pour aider à distinguer de OMBRES

Écart-type dans la couche matricielle « Altitude » : 4  6


Pour distinguer d'avec OMBRES

EAU NOIRE HORS-DEM

Moyenne ETM1 : 0,5 et + 


ETM2/(ETM1 + 2 + 3) : 0,306  0,307

Lorsque cette fonction est désactivée, la classe eau-noire bord empiète sur la classe OMBRE SUR REPLAT


ETM3/(ETM1 + 2 + 3) : 0,26  0,27

Lorsque cette fonction est désactivée, la classe eau-noire bord empiète sur la VÉGÉTATION


EAU BLEUE


ETM3/(ETM1 + 2 + 3) : 0,2 et - 


Permet de classer en EAU BLEUE des objets NON-CLASSIFIÉ (qui n'étaient donc inclus dans aucune autre classe d'eau) tout en récupérant accidentellement des objets d'autres classes eaux.

Moyenne ETM1 : 0  1



Pour distinguer de NO DATA

Frontière (en mètres) avec les objets classés « Ombre sur falaise » : 1 et - 


Frontière (en mètres) avec les objets classés « Ombre sur glacier » : 1 et - 

Frontière (en mètres) avec les objets classés « Ombre sur replat » : 1 et - 

EAU TURBIDE PROXIMALE

Moyenne ETM6(gains élevés) : 89  91 et 120  123

Ce critère restreint la classe aux eaux et ombres principalement, mais inclut certaines surfaces « froides »: moraines, zone intertidale, etc. Ce critère agit principalement pour recouper la classe GLACE_DISTALE de la description de classe

ETM3/(ETM1 + 2 + 3) : 0,29 et + 


Permet de retrancher de petits segments tels OMBRE et EAU NOIRE de la description de la classe

Écart-type ETM1 : 0  4

Attribut critique pour distinguer EAU TURBIDE PROXIMALE de GLACE DISTALE

ETM4/ETM5 : 0,9  2 et 5,9  6,1

Permet de retrancher des classes telles ROC, FLUVIO-GLACIAIRE et TLAN de la classe


Superficie : 3700 m² et + 

Permet de distinguer de NEIGE ET ROC


EAU TURBIDE 2

Moyenne ETM1: **40** et + 


Pour retrancher OMBRES de EAU TURBIDE 2

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM4 : **40**  **50**


Pour retrancher des objets NEIGE-NÉVÉ de la classe EAU TURBIDE 2

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM5 : **20**  **25**


Permet de retrancher NON-VÉGÉTAL et VÉGÉTATION de EAU TURBIDE 2


ETM2/(ETM1 + 2 + 3) : **0,307** et + 


Plus inclusif que la classe EAU TURBIDE


ETM3/(ETM1 + 2 + 3) : **0,28** et + 

Distingue EAU TURBIDE et EAU VERTE


Frontière (en mètres) avec les objets classés FONTE : **0,5** et - 

Frontière (en mètres) avec les objets classés GLACE DISTALE : **0,5** et - 


Frontière (en mètres) avec les objets classés GLACE PROXIMALE : **0,5** et - 

Frontière (en mètres) avec les objets classés GLACE-DÉBRIS : **0,5** et - 


Frontière (en mètres) avec les objets classés NEIGE ET ROC : **0,5** et - 

Frontière (en mètres) avec les objets classés NEIGE : **0,5** et - 


OMBRES

ETM1/(ETM1 + 2 + 3) : **0,4**  **0,43**

Basé sur l'inspection visuelle des attributs (feature view), fonction d'inclusion permettant de séparer les ombres de la majorité des autres classes, mais incluant des objets des classes NON-VÉGÉTAL et EAUX.


ETM1/(ETM1 + 2 + 3 + 4 + 5) : **0,22** et + 


Permet de retrancher F de OMBRES

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM6(gains élevés) : **135**  **140**

Critère peu restrictif permettant des préciser la distinction entre OMBRES et F

OMBRE SUR GLACIER

Moyenne ETM6(gains élevés) : 92 et - 
Permet de retrancher EAU BLEUE de OMBRE SUR NEIGE

Moyenne ETM1 : 0  1
Pour distinguer de NO DATA.

et

Classification au plus proche voisin sur la base des attributs suivants :

Moyenne ETM1


ETM4/ETM5


$ETM1/(ETM2 + 3 + 4 + 5 + 6)$

$ETM6/(ETM1 + 2 + 3 + 4 + 5)$

ETM1 - ETM2

OMBRES

$ETM2/(ETM1 + 2 + 3)$: 0,297 et - 
permet de retrancher EAU BLEUE de OMBRE

Moyennre ETM1 : 0  1
pour distinguer de NO_DATA

et

Classification au plus proche voisin sur la base des attributs suivants :

Moyenné ETM1


ETM4/ETM5

$ETM1/(ETM2 + 3 + 4 + 5 + 6)$


$ETM6/(ETM1 + 2 + 3 + 4 + 5)$

ETM1 - ETM2

OMBRE SUR REPLAT

Moyenne (en degrés) dans la couche matricielle « Pente » : 35  40
Pour distinguer de la classe OMBRE_SOL_PENTE.


OMBRE SUR FALAISE


Moyenne (en degrés) dans la couche matricielle « Pente » : 30  35
Pour arrimer à la description de la classe PENTE, ce qui correspond aux objets que l'on interprète comme étant les falaises de roc nu.

SOLS NON-VÉGÉTALISÉS


Moyenne ETM4 : 16  30
Pour distinguer de EAUX et OMBRES

Moyenne ETM5 : 10  40
Pour distinguer de EAUX et EAU NOIRE


Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM6(gains élevés) : 80  95
Pour distinguer de CRYOSPHERE, EAU TURBIDE PROXIMALE et GLACE-DÉBRIS


Valeur du pixel le plus faible dans la couche matricielle NDVI : 47  132
Pour distinguer de VÉGÉTATION

DÉNUDÉS

ETM6/(ETM1 + 2 + 3) : 0,4  1,3

CHA (complexes de haute altitude)

ETM6/(ETM1 + 2 + 3) : 1  2,2
Basé sur échantillons, faible recouvrement avec FLUVIO-GLACIAIRE

Moyenne (en mètres) dans la couche matricielle « Altitude » : 200  400

CLAIR

Classification au plus proche voisin sur la base des attributs :


ETM1/(ETM1 + 2 + 3)
ETM1/(ETM1 + 2 + 3 + 4)
ETM1/(ETM2 + 3)
ETM4/(ETM1 + 2 + 3 + 4 + 5)

FONCÉ


Classification au plus proche voisin sur la base des attributs :

ETM1/(ETM1 + 2 + 3)
ETM1/(ETM1 + 2 + 3 + 4)
ETM1/(ETM2 + 3)
ETM4/(ETM1 + 2 + 3 + 4 + 5)


EAU-ALLUVIONS


ETM4/ETM3 : 0,6  0,7


Restreint la classe aux segments CRYOSPHERE et EAUX. Permet de retrancher les classes SABLE, FLUVIO-GLACIAIRE et PENTE

Moyenne (en mètres) dans la couche matricielle « Altitude » : 425  475
Permet de retrancher de nombreux très petits segments de la classe NEIGE ETROC


FLUVIO-GLACIAIRE

ETM6/(ETM1 + 2 + 3) : 1  1,2
Basé sur échantillons, faible chevauchement avec CHA


Moyenne dans la couche matricielle « Pente » : 20  25

ETM5/(ETM1 + 2 + 3) : 0,4  0,7


NEIGE ET ROC


ETM6/(ETM1 + 2 + 3) : 0,4  0,5

FALAISE


Moyenne (en mètres) dans la couche matricielle « Pente » : 30  35
Correspond aux objets que l'on interprète comme étant les falaises de roc nu.


ROC

Frontière (en mètres) avec les objets classés GLACE DISTALE : 1 et - 
Critère permettant de favoriser la présence de la classe FLUVIO-GLACIAIRE en bordure des glaciers.


Frontière (en mètres) avec les objets classés GLACE-DÉBRIS : 1 et - 
Critère facultatif permettant de favoriser la présence de la classe FLUVIO-GLACIAIRE en bordure des classes dominées par la glace.

Note: Si on n'appliquait pas les deux critères ci-haut, la classe FLUVIO-GLACIAIRE serait d'environ 25 % plus petite, tant en nombre d'objets qu'en superficie.


Moyenne (en mètres) dans la couche matricielle « Altitude » : 700  900
Critère permettant de favoriser la présence de la classe FLUVIO-GLACIAIRE et SABLE en basse altitude, ce qui correspond bien à l'interprétation visuelle de l'image, et ce qui répond à une logique qui veut que ces dépôts transportés soient plus prévalents en basse altitude

Moyenne (en degrés) dans la couche matricielle « Pente » : 35  40
Pour distinguer de FALAISE, dont les caractéristiques spectrales sont similaires.


SABLE

Moyenne ETM5 : 80  83

Permet de distinguer SABLE de la classe FLUVIO-GLACIAIRE


Moyenne (en mètres) dans la couche matricielle « Altitude » : 375  425

Permet d'exclure les segments de plus haute altitude et ayant des propriétés spectrales similaires, particulièrement les classes ROC et FLUVIO-GLACIAIRE

Moyenne (en degrés) dans la couche matricielle « Pente » : 10  20

Exclut les segments de forte pente qui ne pourraient vraisemblablement pas retenir le sable mais qui ont pourtant des propriétés spectrales similaires, particulièrement FLUVIO-GLACIAIRE et PENTE

NON-CLASSIFIÉ

Classifié en tant que *unclassified* (non-classifié) : 0  1

Remarquons que la relation est binaire: un objet appartenant à une des classes du projet a une valeur de zéro pour cet attribut alors qu'un objet non-classifié a une valeur de un. Exceptionnellement, la fonction est aplatie, de sorte que lorsque l'objet est non-classifié (valeur de 1), son potentiel d'appartenance à cette classe est limité à 10%. En effet, la logique floue (*fuzzy logic*) qui prévaut dans la classification avec eCognition attribue les objets aux diverses classes selon un pourcentage d'appartenance. De manière à ce que les objets soient préférentiellement classifiés dans une des autres classes plutôt que dans le groupe des objets non-classifiés, il convenait de tempérer ainsi le niveau d'inclusion que procure la présente fonction.

EAU NOIRE NON-CLASSIFIÉE

Classification au plus proche voisin sur la base des attributs :

$ETM2/(ETM1 + 2 + 3)$

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM5


Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM2

Écart-type dans la couche matricielle NDVI

$ETM1/(ETM1 + 2 + 3 + 4)$

$ETM6/(ETM1 + 2 + 3 + 4 + 5)$

et

Écart-type dans la couche matricielle « Altitude » : 6  10

EAU TURBIDE NON-CLASSIFIÉE

Classification au plus proche voisin sur la base des attributs :

$ETM2/(ETM1 + 2 + 3)$

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM5

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM2

Écart-type dans la couche matricielle NDVI

$ETM1/(ETM1 + 2 + 3 + 4)$

$ETM6/(ETM1 + 2 + 3 + 4 + 5)$

et

Moyenne dans la couche matricielle « Altitude » : 600 et - 

OMBRES NON-CLASSIFIÉES

Classification au plus proche voisin sur la base des attributs:

$ETM2/(ETM1 + 2 + 3)$

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM5


Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM2


Écart-type dans la couche matricielle NDVI

$ETM1/(ETM1 + 2 + 3 + 4)$

$ETM6/(ETM1 + 2 + 3 + 4 + 5)$

et

Moyenne ETM5 : 30  40

Écart-type dans la couche matricielle « Altitude » : 4  6

ROC NON-CLASSIFIÉ

Classification au plus proche voisin sur la base des attributs :

$ETM2/(ETM1 + 2 + 3)$

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM5

Valeur du pixel le plus faible dans la bande ETM2

Écart-type dans la couche matricielle NDVI

$ETM1/(ETM1 + 2 + 3 + 4)$

$ETM6/(ETM1 + 2 + 3 + 4 + 5)$

NO DATA

Moyenne ETM1 : 0,05 et - 

restreint la classe aux segments qui ont un signal nul dans cette bande

Moyenne ETM2 : 0,05 et - 

restreint la classe aux segments qui ont un signal nul dans cette bande

Moyenne ETM3 : 0,05 et - 

restreint la classe aux segments qui ont un signal nul dans cette bande

Annexe 9

Matrice d'erreur pour la classification végétale de Manseau et al. (2003)

D'après les informations données dans Manseau et al. (2003), on peut mesurer, pour le groupe des classes de végétation, l'exactitude de la classification qu'ont réalisée ces auteurs. Le tableau ci-bas est la matrice d'erreur confrontant les résultats des relevés botaniques et la classification de l'image qui est donnée pour chaque site de relevé. Les complexes ripicoles peu végétalisés (*Riparian low*) présentent une grande confusion avec *Riparian high* et avec des classes «autres». L'examen des données révèle que cette confusion concerne principalement une classe dénommée *Gravel & Rock*. Si l'on fait abstraction de cette classe, alors l'exactitude générale de cette classification passe de 53,4 % à 62,7 %.

Relevés	Riparian low	Riparian high	LUCA	LISHMO-B	LISHMO	STMOSH	MOGRSH	MOSHGR	MOSH	Autre	Total
Classification											
Riparian low	0										0
Riparian high	14	9	1							3	27
LUCA			3	2							5
LISHMO-B				6	1						7
LISHMO		1		1	27	1	2	2	3		37
STMOSH			1		3	8					12
MOGRSH					1		8		2		11
MOSHGR			1		1		3	12	5		22
MOSH					4	2	1		13	1	21
Autre	10	1	7	1							19
Total	24	11	13	10	37	11	14	14	23	4	161
Exactitude générale											53,4 %

Annexe 10

Les attributs spectraux distinctifs des classes végétales

Les attributs spectraux les plus efficaces pour séparer les classes végétales les unes des autres sont présentées au tableau. Les expressions telles que 2/(1+2+3) donnent les indices calculés à partir des bandes spectrales du capteur ETM+.

	G2	CLAN	COANL	CR	PL	TAMN	TLAN	TMANG
G2	na							
CLAN	2/(1+2+3) min NDVI	na						
COANL	4/(1+2+3+4+5) 2/(1+2+3) min etm5	4/(1+2+3+4+5) min etm5	na					
CR	etm4/3 2/(1+2+3) 6/(1+2+3)	etm4/3 min NDVI 4/(1+2+3+4+5)	min etm5 min NDVI 5/(1+2+3)	na				
PL	4/(1+2+3+4+5) min etm5 2/(1+2+3) 4/(1+2+3+4+5)	min etm5 min NDVI min etm5	4/(1+2+3+4+5) min etm5	etm4/3 4/(1+2+3+4+5) 6/(1+2+3)	na			
TAMN	4/(1+2+3+4+5) 2/(1+2+3) etm4/3	min NDVI etm4/3 4/(1+2+3+4+5)	4/(1+2+3+4+5) etm4/3	etm4/3 4/(1+2+3+4+5) 4/(1+2+3+4)	2/(1+2+3) etm4/3	na		
TLAN	1/(1+2) etm4/3	4/(1+2+3+4+5) 3/(1+2)	3/(1+2) 3/(1+2+3) 1/(1+2+3)	min etm5 min NDVI min etm6	4/(1+2+3+4+5) min etm5 etm4/3 3/(1+2)	etm4/3 4/(1+2+3+4+5)	na	
TMANG	2/(1+2+3) 4/(1+2+3+4+5)	NDVI min NDVI max NDVI	4/(1+2+3+4+5) min NDVI	etm4/3 4/(1+2+3+4+5)	2/(1+2+3) 4/(1+2+3+4+5) min etm5	etm4/3 min NDVI 3/(1+2+3)	4/(1+2+3+4+5) etm4/3	na

a16	20	390289	7370346	65	5	20	1	9	100	0	0	0	0	0	100				4
a17	20	390287	7370361	25	20	15	5	5	70	30	0	0	0	0	100	3			3
a18	20	390301	7370363	65	5	20	5	5	100	0	0	0	0	0	100				3
a19	20	390315	7370365	40	30	10	1	19	100	0	0	0	0	0	100	4			
a21	20	390343	7370369	70	10	10	1	9	100	0	0	0	0	0	100				4
a22	20	390357	7370371	35	25	5	5	30	100	0	0	0	0	0	100	4			
a23	20	390371	7370373	60	5	5	10	5	85	10	0	5	0	0	100				3
a24	20	390388	7370375	50	20	0	0	10	80	10	0	10	0	0	100				3
a25	20	390385	7370390	15	5	0	1	5	26	50	0	24	0	0	100		2		2
a26	20	390369	7370389	30	20	5	5	10	70	20	0	10	0	0	100	4			
a27	20	390355	7370387	25	10	0	0	10	45	25	0	30	0	0	100	3			
a28	20	390341	7370385	40	10	10	1	4	65	15	10	10	0	0	100				3
a29	20	390327	7370383	20	15	20	10	5	70	30	0	0	0	0	100	2			
a30	20	390313	7370381	60	10	5	5	5	85	15	0	0	0	0	100				4
a31	20	390299	7370379	50	5	5	5	10	75	15	0	10	0	0	100				3
a32	20	390285	7370375	20	20	0	0	10	50	5	0	45	0	0	100		4		
b01	750	390931	7373473	45	15	10	0	30	100	0	0	0	0	0	100	4			
b02				45	25	10	0	20	100	0	0	0	0	0	100	4			
b03				25	10	15	0	20	70	0	0	30	0	0	100	3			2
b04		390944	7373523	50	15	20	0	15	100	0	0	0	0	0	100	4			
b05				15	15	15	0	40	85	5	0	10	0	0	100	3			2
b06				35	5	5	0	25	70	30	0	0	0	0	100	3			2
b07				25	5	5	0	15	50	0	0	50	0	0	100	2			3
b08			Les coordonnées de b01, b04, b13 et b16 donnent les quatres coin d'une grille	10	30	20	0	20	80	15	5	0	0	0	100				4
b09				15	40	15	0	30	100	0	0	0	0	0	100				4
b10				20	0	25	15	40	100	0	0	0	0	0	100	4			
b11				30	10	5	5	20	70	0	0	30	0	0	100	2			3
b12				50	15	10	0	20	95	0	0	5	0	0	100	3			
b13		390887	7373524	50	0	10	0	30	90	0	5	5	0	0	100	3			3
b14				20	0	15	10	30	75	0	0	25	0	0	100	4			
b15				15	0	15	5	40	75	15	10	0	0	0	100	3			2
b16		390877	7373479	15	15	15	0	15	60	0	0	40	0	0	100	2			3

e03	616	400331	7390379	15	0	0	10	0	0	0	25	0	0	0	75	0	100	1	2	2	2		
e04	616	400316	7390369	10	0	0	10	0	0	0	20	0	0	0	80	0	100	1	2		1		
e05	584	400439	7390369	20	0	0	15	0	0	0	35	0	0	0	65	0	100	1			2		2
e06	584	400454	7390379	15	0	0	15	0	0	0	50	0	0	0	50	0	100	1	2	2	2		1
e07	584	400469	7390389	15	0	0	10	5	10	40	0	0	0	0	60	0	100	2	2		2		
e08	584	400484	7390399	15	0	0	15	5	10	45	0	0	0	0	55	0	100	1	2		2		
e09	542	400607	7390382	20	10	25	5	5	20	80	0	0	0	0	15	5	100	2	1	1	2		
e10	542	400592	7390372	20	0	20	0	20	0	60	0	0	0	0	40	0	100	2	2	1	2		
e11	542	400577	7390362	25	5	20	5	30	85	0	0	0	0	0	15	0	100	3	1	1	2		
e12	542	400562	7390352	40	0	0	10	0	35	85	0	0	0	0	15	0	100	4			1	1	3
e13	503	400721	7390331	10	15	15	0	40	80	0	5	15	0	0	15	0	100					4	
e14	503	400736	7390341	15	10	10	0	50	85	5	0	10	0	0	10	0	100	1			3	3	
e15	503	400751	7390351	15	0	15	0	15	45	0	0	55	0	0	55	0	100		3	1	2		
e16	503	400766	7390361	15	0	15	0	10	40	0	0	60	0	0	60	0	100		2		2		
e17	462	401004	7390324	40	0	15	0	15	70	0	0	30	0	0	30	0	100	3	2	1	2	3	
e18	462	400989	7390314	20	0	20	5	10	55	0	0	45	0	0	45	0	100	2	3	1	2	1	
e19	462	400974	7390304	40	0	10	0	25	75	0	0	25	0	0	25	0	100	4			1		3
e20	462	400959	7390294	35	0	5	5	25	70	0	0	30	0	0	30	0	100	4	2				3
e22	422	401146	7390265	40	0	5	0	30	75	10	0	15	0	0	15	0	100	3	3				2
e23	422	401131	7390255	5	0	0	5	10	20	10	0	70	0	0	70	0	100	1	3				
e24	422	401116	7390245	20	0	10	0	35	65	0	0	35	0	0	35	0	100	3					3
e25	422	401101	7390235	10	0	5	10	15	40	0	10	50	0	0	50	0	100	1	4				
e26	438	401073	7390007	5	5	20	0	50	80	0	0	20	0	0	20	0	100	2					2
e27	428	400910	7390030	45	0	15	5	20	85	0	0	15	0	0	15	0	100	4	2		1	3	
e28	453	400772	7390050	10	5	10	5	30	60	20	0	15	5			100		3					
e29	482	400590	7390044	20	0	25	0	25	70	5	0	20	5			100		3					
e30	522	400398	7390090	10	0	10	0	40	60	0	0	40	0			100		3					
e31	667	400347	7390627	25	0	30	5	10	70	10	0	20	0			100	3	1					3
f01	321	399901	7388931	25	25	15	0	25	90	0	10	0	0			100					3	5	
f02				25	45	5	0	25	100	0	0	0	0			100					3	4	
f03				40	20	10	0	30	100	0	0	0	0			100		3					3
f04	324	399854	7388973	0	50	25	0	15	90	10	0	0	0			100							5

f05			30	0	10	0	40	80	0	10	10	0	100	4	2				
f06			10	30	15	0	40	95	5	0	0	0	100			4	3		
f07			30	25	10	5	30	100	0	0	0	0	100	4					
f08			15	15	25	5	25	85	0	15	0	0	100	1			3		
f09			25	5	20	10	20	80	10	10	0	0	100	3	2				
f10			20	25	10	0	40	95	5	0	0	0	100			4			
f11			40	25	10	0	20	95	0	5	0	0	100	3				2	
f12			40	15	20	0	25	100	0	0	0	0	100	3				1	2
f13		320	399826	7388938									100	3		2	1	1	
f14													100	4					
f15													100	3			2	3	
f16		313	399871	7388887									100	3			3	2	
g02		271	398882	7387257									100			2	4		
g03		271	398867	7387242									100			4	3		
g05		314	398631	7387365									100					5	
g08		376	398460	7387477									100	3	4				
g09		376	398445	7387462									100	4					
g10		423	398388	7387523									100						
g11		423	398373	7387508									100			3	4		
g12		423	398357	7387493									100			5			
h04		80	388078	7377812									100					5	
h05		78	388102	7377858									100					5	
i04		83	388422	7378405									100			4			
i05		84	388472	7378408									100			4			
i06		87	388494	7378388									100	3					4
i07		86	388549	7378438									100			4			
i08		84	388618	7378469									100	4					
i09		83	388690	7378508									100	3	2				
i10		76	388721	7378499									100	4	2				
i11		74	388690	7378434									100	3	3				4
i12		72	388643	7378398															
j1		92	389209	7379026									100						5

Les coordonnées de f01, f04, f13 et f16 donnent les quatres coin d'une grille

j2	95	389163	7379009	0	35	30	0	35	100	0	0	0	0	0	100					5
j3	96	389132	7378982	0	30	30	0	30	90	0	10	0	0	0	100					5
j4	98	389099	7378966	30	0	15	5	45	95	0	5	0	0	0	100	4				
j5	103	389129	7378994	10	25	30	0	35	100	0	0	0	0	0	100					5
j6	102	389127	7379062	0	35	30	0	35	100	0	0	0	0	0	100					5
j7	102	389137	7379072	30	0	30	0	30	90	5	0	5	0	0	100	4				
j8	84	389208	7378983	25	0	25	5	25	80	20	0	0	0	0	100	3	3			
k1	180	395371	7381162	25	15	20	5	25	90	0	0	10	0	0	100	4				
k2	264	395461	7381178	20	0	30	5	20	75	20	0	0	5	0	100	3	3			
k3	257	395516	7381258	5	25	40	0	20	90	0	0	5	5	0	100		4			
k4	261	395923	7381384	10	0	15	10	20	55	35	0	10	0	0	100					
k5	264	395988	7381568	25	15	10	5	40	95	0	0	5	0	0	100	3	3			
k6	268	396061	7381751						0						0		4			
k7a	252	396042	7381780	15	0	0	0	50	65	0	0	35	0	0	100	3	3			
k7b	252	396042	7381780	0	0	0	20	20	40	0	0	60	0	0	100		4			
k8	295	396228	7382440						0						0					
k9	219	396213	7382733	25	0	25	0	35	85	0	0	15	0	0	100	3			4	
l1	92	388665	7375750	25	0	20	0	30	75	25	0	0	0	0	100	3	3			
l2	98	388697	7375781	15	25	25	0	30	95	5	0	0	0	0	100					4
l3	125	388758	7375746						0						0				4	3
l4	134	388773	7375698	15	0	25	5	30	75	15	0	10	0	0	100	2	2			2
l5a	166	388892	7375615	5	55	25	0	15	100	0	0	0	0	0	100					5
l5b	166	388892	7375615	5	50	20	5	20	100	0	0	0	0	0	100					5
l6	157	388871	7375592	0	50	20	0	30	100	0	0	0	0	0	100					5
l7a	174	388866	7375591						0						0					5
l7b	174	388866	7375591	5	40	15	0	40	100	0	0	0	0	0	100					5
l7c	174	388866	7375591	10	40	10	0	40	100	0	0	0	0	0	100					
l7d	174	388866	7375591	10	40	10	0	40	100	0	0	0	0	0	100					5
l7e	174	388866	7375591	10	40	10	0	40	100	0	0	0	0	0	100					5
l8a	193	388896	7375829	15	45	10	0	30	100	0	0	5	0	0	105					4
l8b	193	388896	7375829	10	40	10	0	30	90	0	0	10	0	0	100					4
l8c	193	388896	7375829	15	60	10	0	10	95	0	0	5	0	0	100					4

p06	120	389831	7365852	10	0	10	0	25	45	40	0	15	0	100		4			
p07a	80	389737	7365930	15	0	20	0	25	60	30	0	10	0	100		4			
p07b	80	389737	7365930	15	0	20	5	25	65	20	0	15	0	100		4			
p08a	65	389718	7366017	35	10	20	0	30	95	0	5	0	0	100	4				
p08b	65	389718	7366017	30	10	20	0	35	95	0	5	0	0	100	4				
p09a	39	389651	7366126	25	0	20	0	50	95	0	5	0	0	100	4				
p09b	39	389651	7366126	20	0	30	0	40	90	0	10	0	0	100	4				
p10a	34	389654	7366181	5	5	30	0	50	90	0	10	0	0	100			4		
p10b	34	389654	7366181	5	15	35	0	40	95	0	5	0	0	100			3	3	
p11a	36	389684	7366253	0	10	30	0	40	80	0	20	0	0	100			3	3	
p11b	36	389684	7366253	0	5	40	0	40	85	0	10	5	0	100			3	3	
p12a	41	389718	7366337	35	0	15	0	40	90	5	5	0	0	100	4				
p12b	41	389718	7366337	20	0	30	0	30	80	5	10	5	0	100	4				
q01	527	382225	7358397	40	0	15	0	5	60	25	0	15	0	100					3
q02a	512	382150	7358340	30	0	10	0	20	60	0	0	40	0	100	1	3			2
q02b	512	382150	7358340	25	0	20	0	20	65	0	0	35	0	100	1	3			2
q03	511	382090	7358281	5	15	40	0	20	80	5	0	10	5	100			3		
q04a	507	381950	7358192	30	0	0	0	35	65	0	0	35	0	100	1	3			1
q04b	507	381950	7358192	30	10	5	0	20	65	0	0	35	0	100	1	3			1
q05a	500	381842	7358075	10	0	25	0	25	60	10	20	10	0	100	1	2			2
q05b	500	381842	7358075	15	5	20	0	20	60	0	30	10	0	100	1	2	2	2	2
q06	495	381769	7358001	5	20	30	0	30	85	0	0	5	10	100			5		
q07	491	381661	7357817	0	30	30	5	30	95	0	0	0	5	100			5		
q08	484	381594	7357746	5	15	50	0	25	95	5	0	0	0	100			5		
q09a	483	381519	7357672	45	10	10	0	10	75	15	0	10	0	100					5
q09b	483	381519	7357672	40	10	10	0	10	70	15	0	15	0	100	3	3			
q10	480	381468	7357558	50	0	15	0	15	80	10	0	10	0	100					5
q11a	?	?	?	5	10	60	0	15	90	5	5	0	0	100			3		2
q11b	?	?	?	5	20	65	5	5	100	0	0	0	0	100			4		
q12	477	381286	7357527	15	5	10	0	10	40	10	40	10	0	100			2		2
q13	475	381229	7357629	10	0	20	0	0	30	65	0	5	0	100		2	2		2
q14a	483	381074	7357829	50	0	25	0	0	75	0	15	10	0	100					5

r34	476	382557	7358096	0	30	60	0	10	100	0	0	0	0	0	0	0	0	100				3					
r35	487	382492	7358137	60	0	10	0	20	90	0	0	10	0	0	0	0	0	100									4
s01a	595	381921	7357612	35	0	10	0	10	55	30	0	15	0	0	0	0	0	100									3
s01b	595	381921	7357612	40	0	40	0	10	90	0	0	5	5	0	0	0	0	100									2
s01c	595	381921	7357612	40	10	20	0	10	80	0	0	15	5	0	0	0	0	100									3
s02a	638	381219	7360291	50	0	20	0	10	80	10	0	10	0	0	0	0	0	100									4
s02b	638	381219	7360291	40	0	35	0	10	85	10	0	5	0	0	0	0	0	100									4
s02c	638	381219	7360291	20	0	10	0	10	40	50	0	10	0	0	0	0	0	100									2
s03a	712	380705	7360575	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100									5
s03b	712	380705	7360575	10	0	10	0	0	20	0	0	80	0	0	0	0	0	100									5
s04	786	380179	7360936	5	0	0	0	0	5	0	0	95	0	0	0	0	0	100									5
s05a	723	379846	7360746	5	0	0	0	0	5	0	0	95	0	0	0	0	0	100									4
s05b	723	379846	7360746	10	0	5	0	0	15	0	0	85	0	0	0	0	0	100									4
s06a	649	379649	7360648	10	0	5	0	5	20	0	0	80	0	0	0	0	0	100				1					1
s06b	649	379649	7360648	15	0	10	0	5	30	0	0	70	0	0	0	0	0	100				1					1
s07	617	379541	7360636	70	0	20	0	5	95	0	0	5	0	0	0	0	0	100									5
s08a	594	379427	7360618	65	0	10	0	15	90	0	0	10	0	0	0	0	0	100									5
s08b	594	379427	7360618	60	0	5	0	10	75	0	0	25	0	0	0	0	0	100									5
s09a	587	379305	7360636	85	0	5	0	5	95	0	0	5	0	0	0	0	0	100									5
s09b	587	379305	7360636	85	0	5	0	5	95	0	0	5	0	0	0	0	0	100									5
s10a	562	378894	7360639	45	0	30	0	15	90	0	0	10	0	0	0	0	0	100									5
s10b	562	378894	7360639	70	0	10	0	10	90	0	0	10	0	0	0	0	0	100									5
s11a	531	378490	7360569	15	5	40	0	20	80	0	0	15	5	0	0	0	0	100				2					2
s11b	531	378490	7360569	10	0	45	0	20	75	0	0	15	10	0	0	0	0	100				3					
s12a	530	378212	7360502	40	0	20	0	20	80	0	0	20	0	0	0	0	0	100									4
s12b	530	378212	7360502	50	0	10	0	20	80	0	0	20	0	0	0	0	0	100									5
s13a	528	377984	7360517	0	40	40	0	0	80	15	0	0	5	0	0	0	0	100				4					
s13b	528	377984	7360517	0	30	50	0	0	80	0	0	5	15	0	0	0	0	100				3					3
s14	530	377801	7360475	0	20	70	0	0	90	0	0	10	0	0	0	0	0	100				3					2
s15a	530	377488	7360396	15	0	0	0	0	15	85	0	0	0	0	0	0	0	100				2					
s15b	530	377488	7360396	50	0	20	0	10	80	15	0	5	0	0	0	0	0	100									5
s16a	488	376898	7359962	70	0	5	0	10	85	0	0	15	0	0	0	0	0	100									5

s16b	488	376898	7359962	70	0	5	0	10	85	0	0	15	0	100										5	
s17	488	377032	7369976	65	0	5	0	10	80	0	0	20	0	100										5	
s18	485	377138	7359966	50	0	20	0	10	80	10	0	10	0	100									5		
s19	479	377248	7359842	5	20	20	0	0	45	45	0	10	0	100								3			
s20a	477	377348	7359683	0	50	30	5	10	95	5	0	0	0	100								3			
s20b	477	377348	7359683	0	25	45	0	15	85	0	15	0	0	100								3			
s21	481	377766	7359568	50	0	20	0	0	70	20	0	10	0	100								2		4	
s22	478	377912	7359487	5	10	10	0	10	35	65	0	0	0	100								2		2	
s23a	478	377981	7359392	0	70	30	0	0	100	0	0	0	0	100								5			
s23b	478	377981	7359392	0	40	40	0	0	80	20	0	0	0	100								5			
s24a	477	378231	7359197	0	50	40	0	0	90	0	0	0	10	100								5		5	
s24b	477	378231	7359197	0	70	5	0	0	75	0	0	0	25	100								5			
s25a	475	378593	7359315	5	15	20	0	0	40	60	0	0	0	100								1		1	
s25b	475	378593	7359315	5	20	25	15	0	65	35	0	0	0	100								2		2	
s26	473	378989	7359064	95	0	0	0	0	95	0	0	5	0	100										6	
s27	473	379102	7358994	5	15	15	0	20	55	35	0	10	0	100								3		3	
s28a	476	379268	7358910	5	5	15	0	10	35	60	0	5	0	100								3		3	
s28b	476	379268	7358910	40	0	10	0	20	70	15	0	15	0	100										4	
s29	476	379403	7358749	10	10	25	0	15	60	30	0	10	0	100								2		2	
s30	475	379325	7358656	5	20	15	0	45	85	10	0	5	0	100								3		3	
s31	475	379302	7358584	0	10	30	0	15	55	35	0	10	0	100								3		3	
s32	475	379592	7358491	5	10	35	0	20	70	20	0	10	0	100								3		3	
s33	477	379848	7358428	10	10	45	0	25	90	5	0	5	0	100								4			
s34a	480	379969	7358342	0	10	30	0	30	70	20	0	10	0	100								3		3	
s34b	480	379969	7358342	10	0	50	0	20	80	10	0	10	0	100								3		3	
s35	477	380328	7358280	5	10	0	0	0	15	50	0	35	0	100										3	
s36a	483	380567	7358335	15	0	30	0	20	65	10	0	25	0	100								2		3	
s36b	483	380567	7358335	20	0	20	0	30	70	15	0	15	0	100								3			
s37	490	380779	7358416	50	0	10	0	15	75	0	0	25	0	100										5	
s38	493	380888	7358565	10	0	15	0	45	70	15	0	15	0	100								2		3	
s39	499	380947	7358663	10	5	25	0	25	65	10	10	15	0	100								2		2	
s40	511	381051	7358748	30	0	10	0	40	80	0	0	20	0	100								2		2	

s41	528	381134	7358900	20	5	0	0	0	50	75	15	0	10	0	100	2	2	2				
s42	528	381737	7358816	30	0	15	0	30	75	20	0	5	0	0	100	3	2	2				
s43a	524	382177	7358757	5	40	30	0	0	75	0	0	10	15		100			5				
s43b	524	382177	7358757	0	30	45	5	5	85	10	0	0	5		100			5				
t01a	490	382664	7355903	30	0	25	0	5	60	0	0	40	0	0	100					3		1
t01b	490	382664	7355903	40	5	30	0	10	85	0	0	15	0	0	100					3		1
t02a	517	382662	7355405	10	35	35	0	10	90	0	0	10	0	0	100			2	3			
t02b	517	382662	7355405	5	35	60	0	0	100	0	0	0	0	0	100			2	3			
t03a	545	382584	7355229	30	30	10	0	10	80	0	0	20	0	0	100	3				1		
t03b	545	382584	7355229	40	30	0	0	10	80	0	0	20	0	0	100	3				3		
t04a	580	382460	7355063	60	30	0	0	0	90	0	0	10	0	0	100			2			4	
t04b	580	382460	7355063	15	30	0	0	30	75	10	0	15	0	0	100					4		1
t05a	634	382300	7354848	30	0	30	0	0	60	0	30	10	0	0	100						2	3
t05b	634	382300	7354848	40	0	40	0	0	80	0	10	10	0	0	100						3	
t06a	639	382038	7354905	25	0	30	0	10	65	0	0	35	0	0	100	2	2					
t06b	639	382038	7354905	15	10	25	0	10	60	10	10	20	0	0	100	2	2					
t07a	665	381656	7355111	15	0	35	0	15	65	10	10	15	0	0	100	2	2					
t07b	665	381656	7355111	20	0	50	0	5	75	10	0	10	5	0	100	1				1		
t08a	665	381333	7355239	40	0	20	0	5	65	0	0	35	0	0	100	2				3		1
t08b	665	381333	7355239	45	0	25	0	10	80	0	0	20	0	0	100	2				3		1
t09a	652	381000	7355290	50	0	25	0	10	85	0	10	5	0	0	100					3		
t09b	652	381000	7355290	50	0	40	0	0	90	0	0	10	0	0	100					3		
t10	653	380429	7355264	10	20	15	0	0	45	0	0	55	0	0	100					2		2
t11a	703	380051	7355165	5	10	15	0	40	70	15	0	15	0	0	100					3		1
t11b	703	380051	7355165	5	25	20	0	20	70	15	0	10	5	0	100					2		1
t12a	737	379813	7355067	10	10	15	0	0	35	30	20	15	0	0	100					1		1
t12b	737	379813	7355067	5	30	20	0	0	55	20	0	25	0	0	100					1		1
t13a	764	379639	7355045	10	5	0	0	0	15	10	0	75	0	0	100							4
t13b	764	379639	7355045	25	5	0	0	0	30	10	10	50	0	0	100							3
t14a	848	379177	7354863	30	0	0	0	0	30	0	0	70	0	0	100							4
t14b	848	379177	7354863	20	0	10	0	0	30	0	0	70	0	0	100							4
t15	819	379265	7355037	0	0	10	0	0	10	0	0	90	0	0	100							4

u04b	481	383284	7355295	40	0	10	0	35	85	0	0	15	0	100	4	1		3									
u05	422	383607	7355410	30	0	10	0	40	80	0	0	20	0	100	3												
u06	414	383630	7355356	0	0	10	0	85	95	0	0	5	0	100			5										
u07	401	383654	7355606	5	5	5	0	70	85	0	0	15	0	100			5										
u08	336	383786	7355191	10	0	10	0	70	90	0	0	10	0	100			5										
u09	222	384082	7355133	5	0	10	0	80	95	0	5	0	0	100			5										
u10a	173	384242	7355067	0	10	10	5	75	100	0	0	0	0	100			5	2									
u10b	173	384242	7355067	0	20	10	0	70	100	0	0	0	0	100	1		5	2									
Les photo-relevés suivants ont été effectués en 2004 dans la portion nord de la vallée Akshayuk par l'équipe de Bernard Lauriol. Ces relevés ont été analysés sommairement. Une évaluation systématique de la stratification végétale n'a pas été réalisée pour ces photos-relevés.																											
I		413299	7398447																		5						
II		414379	7399227																			5					
III		414769	7399527																			5					
IV		414949	7399647																			5					
V		415819	7399767																	4		5					
VI		416419	7399857																	3							
VII		50 m après site 6																		5							
VIII		417769	7400397																	5							
IX		418699	7400967																		5						
X		419269	7400907																		5						
XI		420199	7401417																				3				
XII		420859	7401627																		5						
XIII		421429	7402077																				5				
XIV		422089	7402857																				2				
XV		422779	7403307																				5				
XVI		423229	7403697																		2			2			
XVII		423619	7403997																				5				
XVIII		424729	7405137																		3						
IXX		425929	7406037																5								
XX		426529	7420227																	1				1			
XXI		en face du glacier Naujat																			3						
XXII		426259	7423017																								
XXIII		426709	7425837																4								