Environnement Canada Environment Canada

Diminution de la couverture végétale dans le delta de la rivière Anderson, dans les Territoires du Nord-Ouest, d'après des images Landsat prises de 1972 à 2003

Gary A. Borstad, Mar Martínez de S. Álvarez, James E. Hines, et Jean-François Dufour

Prairie and Northern Region

Service canadien de la faune
Série de rapports techniques n° 496

Canada

Environnement Canada Environment Canada

SÉRIE DE RAPPORTS TECHNIQUES DU SERVICE CANADIEN DE LA FAUNE

Cette série de rapports, créée en 1986, donne des informations scientifiques et techniques sur les projets du Service canadien de la faune (SCF). Elle vise à diffuser des études qui s'adressent à un public restreint ou sont trop volumineuses pour paraître dans une revue scientifique ou une autre série du SCF.

Ces rapports techniques ne sont habituellement demandés que par les spécialistes des sujets traités. C'est pourquoi ils sont produits à l'échelle régionale et en quantités limitées. Ils sont toutefois numérotés à l'échelle nationale. On ne peut les obtenir qu'à l'adresse indiquée au dos de la page titre. La référence recommandée figure à la page titre.

Les rapports techniques sont conservés dans les bibliothèques du SCF et figurent dans le catalogue de Bibliothèque et Archives Canada, que l'on retrouve dans les principales bibliothèques scientifiques du Canada.

CANADIAN WILDLIFE SERVICE TECHNICAL REPORT SERIES

This series of reports, introduced in 1986, contains technical and scientific information on Canadian Wildlife Service projects. The reports are intended to make available material that is either of interest to a limited audience or is too extensive to be accommodated in scientific journals or in existing CWS series.

Demand for the Technical Reports is usually limited to specialists in the fields concerned. Consequently, they are produced regionally and in small quantities. They are numbered according to a national system but can be obtained only from the address given on the back of the title page. The recommended citation appears on the title page.

Technical Reports are available in CWS libraries and are listed in the catalogue of Library and Archives Canada, which is available in science libraries across the country.

CHOIX ENVIRONNEMENTAL · ENVIRONMENTAL CHOICE

Ce document est imprimé sur le papier certifié par Éco-Logo[M].

Diminution de la couverture végétale dans le delta de la rivière Anderson, dans les Territoires du Nord-Ouest, d'après des images Landsat prises de 1972 à 2003

Gary A. Borstad[1]
Mar Martínez de S. Álvarez[1]
James E. Hines[2]
Jean-François Dufour[2]

Série de rapports techniques numéro 496
Le 8 février 2008

[1] G. A. Borstad Associates Ltd., 114–9865 West Saanich Road, Sidney, BC V8L 5Y8
[2] Canadian Wildlife Service, Suite 301, 5204–50th Avenue, Yellowknife, NT X1A 1E2

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, représentée par le ministre de l'Environnement, 2008.
Numéro de catalogue CW69-5/496F
ISBN 978-1-100-10656-4

Le présent rapport devrait être cité comme suit :

Borstad, G.A., M.M. de S. Álvarez, J.E. Hines et J.-F. Dufour. 2008.
Diminution de la couverture végétale dans le delta de la rivière Anderson, dans les Territoires du Nord-Ouest, d'après des images Landsat prises de 1972 à 2003, Série de rapports techniques n° 496
Service canadien de la faune, Yellowknife (Territoires du Nord-Ouest).

Pour obtenir d'autres exemplaires :

Service canadien de la faune
Direction générale de l'intendance environnementale
Environnement Canada
Bureau 301, 5204, 50e Avenue
Yellowknife (Territoires du Nord-Ouest)
X1A 1E2

RÉSUMÉ

Des rapports de recherches qualitatives et isolées font état de la diminution de la couverture végétale dans la partie extrême du delta de la rivière Anderson, dans les Territoires du Nord-Ouest, attribuable à une augmentation de la salinité des sols. Le delta, enchâssé dans un refuge d'oiseaux migrateurs du gouvernement fédéral, compte parmi les principales aires de reproduction et d'estivage dans les Territoires du Nord-Ouest. Toute perte ou dégradation de l'habitat dans cette zone pose donc un problème de taille en matière de conservation. À cet égard, la présente étude vise principalement à quantifier les pertes de l'habitat dans le delta de la rivière Anderson et à déterminer à quand remontent ces pertes.

Nous avons cartographié les changements dans la couverture végétale du delta de la rivière Anderson sur une période de 31 années (de 1972 à 2003), à partir de 13 images multispectrales saisies par les capteurs de la série américaine de satellites Landsat. Toute analyse de séries chronologiques de ce type exige de prendre en compte la variabilité entre les images satellitaires (p. ex. en raison des différents types de capteurs, du vieillissement des satellites, des effets atmosphériques et des écarts annuels dans les températures ou la saison de croissance) qui peut influer sur les résultats. Afin de nous assurer de prendre en compte les effets d'appareil et de corriger partiellement les effets atmosphériques, nous avons essayé de convertir le coefficient de luminance des images satellitaires codées sur 8 bits au capteur à 32 bits, puis de nouveau au coefficient de réflectance du sommet de l'atmosphère, en nous fondant sur les constantes d'étalonnage des fournisseurs de données. Cependant, les données d'étalonnage n'étaient pas disponibles pour toutes les scènes. Nous avons donc fait une mise en correspondance précise de toutes les images de la série, puis nous avons effectué un transfert d'étalonnage entre les images de 1986, réputées bien étalonnées, aux scènes non accompagnées de données d'étalonnage ou accompagnées de données douteuses. Afin de restreindre les effets saisonniers, nous avons retenu des images saisies durant une période précise qui correspondait au maximum de la croissance végétative estivale pour chaque année, soit du 30 juin au 8 août. Il n'est pas exclu que des écarts minimes subsistent entre les dates « biologiques » des images après la mise en correspondance, puisque les saisons

de croissance varient considérablement d'une année à l'autre. Nous avons par conséquent pris en compte les variations météorologiques du printemps (températures de juin) dans nos analyses et nos évaluations des changements à long terme dans la végétation.

L'indice de végétation par différence normalisée (IVDN), un indice quantitatif de la phytomasse verte chlorophyllienne ou de la couverture végétale, a été mesuré pour chacune des images de la série chronologique. Nous avons analysé les changements à long terme de l'IVDN selon trois procédés : (1) en mesurant la superficie des changements dans l'habitat au cours de la période d'étude de 31 ans; (2) en estimant les variations temporelles de l'IVDN moyen dans diverses régions d'intérêt à l'intérieur de la zone d'étude; (3) en créant des cartes thématiques des variations temporelles de l'IVDN par une méthode de télédétection non dirigée.

Les résultats des trois types d'analyses concordent relativement bien. La superficie des pertes d'habitat dans la région d'intérêt des îles extérieures où nichent la majorité des Petites Oies des neiges (*Chen caerulescens caerulescens*) et des Bernaches noires (*Branta bernicla nigricans*) s'établit à 45 %, et la valeur moyenne de l'IVDN dans cette même région d'intérêt a chuté de 37,5 %. Les taux de diminution de la superficie de la couverture végétale (de 7 % à 92 %) et de l'IVDN (de 7,9 % à 78,6 %) varient énormément entre les sept sous-régions composant la région d'intérêt des îles extérieures. Dans une autre grande région d'intérêt (la partie occidentale du delta), la superficie de la couverture végétale a diminué de 18 %, et l'IVDN moyen a pour sa part chuté de 11,9 %. Si l'on fait un examen visuel des changements dans l'habitat, on peut voir que d'importantes parties du delta sont maintenant recouvertes d'arbustes morts et de vasières stériles, alors que, auparavant, on y trouvait apparemment des saules, des plantes herbacées et du carex. Les échantillons de sol prélevés dans les zones où l'habitat s'est dégradé ont une haute teneur en sels, ce qui donne à penser que l'eau salée de la mer de Beaufort qui inonde ces terres pourrait être une cause de la disparition de la végétation. Les valeurs de l'IVDN dans les îles extérieures et certaines zones de la partie occidentale du delta varient d'une année à l'autre, et nous n'avons pas pu associer ces variations à des pertes catastrophiques d'habitat qui seraient attribuables à des ondes de tempête dévastatrices survenues durant une année ou deux. Il semble au contraire que les pertes de végétation progressent depuis 1972 ou même avant.

À l'inverse de ce qui a pu être constaté dans la partie externe du delta, le lieu le plus touché par les pertes de végétation, nos analyses révèlent que les valeurs de l'IVDN correspondant à la toundra des hautes terres à proximité du delta de la rivière Anderson ont augmenté de 21,1 % de 1972 à 2003. De plus, nous avons relevé une corrélation significative entre l'IVDN et les températures printanières dans la zone des hautes terres. De telles constatations concordent avec celles d'autres études menées depuis les années 1980 en Sibérie et en Alaska à partir des données obtenues par radiomètre perfectionné à très haute résolution AVHRR visant à expliquer l'augmentation plus ou moins constante de l'IVDN sur une période de 25 ans. Toutefois, notre série chronologique, qui couvre une plus longue période, indique des variations interannuelles considérables de l'IVDN durant une certaine période; nous avons également constaté que l'IVDN a connu des hausses et des baisses appréciables au début de notre série chronologique qui seraient respectivement le fruit de températures printanières relativement chaudes (en 1972 et en 1982) ou froides (en 1974 et en 1978). Cette relation positive importante entre l'IVDN des hautes terres et l'année disparaît lorsque l'incidence des températures de juin (température diurne moyenne) fait l'objet d'un « contrôle statistique ».

REMERCIEMENTS

Le présent rapport est le fruit d'une collaboration entre le Service canadien de la faune (SCF) et G. A. Borstad Associates Ltd., une société de Sidney en Colombie-Britannique. L'analyse et la rédaction du rapport ont été financées par le SCF (aux termes de la Convention définitive des Inuvialuit) ainsi que par Borstad Associates Ltd. Nous tenons à remercier Peter Willis, Randy Kerr, José Lim et Leslie Brown (de Borstad Associates Ltd.) qui ont prêté leur assistance au cours de l'analyse des images. Nous remercions en outre Michael Harb, Robert Landry et Burt Guindon (du Centre canadien de télédétection), Don Leckie (du Service canadien des forêts) et Phil Teillet (de la University of Lethbridge) qui ont apporté d'importantes précisions en matière de normalisation radiométrique.

TABLE OF CONTENTS

RÉSUMÉ iii

REMERCIEMENTS vi

1. INTRODUCTION 1

2. ZONE D'ÉTUDE 2

3. MÉTHODOLOGIE 3

Collecte et traitement des données Landsat 3

Indice de végétation par différence normalisée 6

Analyse des tendances temporelles dans la couverture végétale terrestre 7

4. RÉSULTATS 9

Changements observés au fil des années selon les zones de couverture végétale 9

Tendances de l'IVDN moyen dans différentes régions d'intérêt 10

Classification non dirigée des variations de l'IVDN 11

5. DISCUSSION 12

Commentaires sur les données et la méthode 12

Changements écologiques 14

6. BIBLIOGRAPHIE 16

LIST OF TABLES

Tableau 1. Données Landsat utilisées pour la téléanalyse des changements dans la végétation au Refuge d'oiseaux migrateurs du delta de la rivière Anderson, Territoires du Nord-Ouest, de 1972 à 2003 20

Tableau 2. Indice de végétation par différence normalisée (IVDN) moyen dans les régions d'intérêt du Refuge d'oiseaux migrateurs du delta de la rivière Anderson, et températures moyennes de juin à Tuktoyaktuk, Territoires du Nord-Ouest, de 1972 à 2003 21

Tableau 3. Variations temporelles des indices de végétation par différence normalisée (IVDN) dans chacune des régions d'intérêt du Refuge d'oiseaux migrateurs du delta de la rivière Anderson, de 1972 à 2003 22

Tableau 4. Variations temporelles des indices de végétation par différence normalisée (IVDN) dans chacune des classes thématiques du Refuge d'oiseaux migrateurs du delta de la rivière Anderson, de 1972 à 2003 23

LIST OF FIGURES

Figure 1. Refuge d'oiseaux migrateurs du delta de la rivière Anderson, Territoires du Nord-Ouest, avec les quatre grandes régions d'intérêt visées par l'étude et les sept sous-régions d'intérêt situées dans les îles extérieures du delta de la rivière Anderson 24

Figure 2. Image de l'indice de végétation par différence normalisée (IVDN) au 18 juillet 1986, montrant les graphiques de réflectance et la valeur de l'IVDN résultante aux 8 points numérotés dans l'image 25

Figure 3. Images de l'indice de végétation par différence normalisée (IVDN) dans le delta de la rivière Anderson, de 1972 à 2003. L'augmentation de l'IVDN est marquée par le passage du bleu au blanc dans l'image. Les plans d'eau paraissent en noir 26

Figure 4. L'image du haut est une représentation en fausses couleurs de la zone d'étude dérivée des bandes 3, 2 et 1 d'une scène du capteur TM de Landsat-5 prise le 2 août 2003. Les photos du bas ont été prises aux sites n°s 1a, 1b et 2 le 10 août 2004, et au site n° 3 le 2 août 2003. Le site 1a correspond à une zone stérile ou pratiquement dénuée de toute végétation dont l'indice de végétation par différence normalisée (IVDN) est de 0,25 ou moins. Le site 1b correspond à des zones ayant habituellement un peu de végétation (IVDN de 0,25 à 0,30). Le site 2 comprend une végétation relativement abondante (IVDN de 0,3 ou plus). La photographie 3 présente la couverture végétale abondante des zones de végétation de plaine abondante ou de toundra d'arbustes nains (IVDN de 0,4 ou plus).....27

Figure 5. A : Tracé des quatre grandes régions d'intérêt montrant les zones de variation de l'IVDN au cours des 31 années à l'étude. B : Graphique de la série chronologique de l'IVDN de chaque région. C : Tracé des sept sous-régions d'intérêt dans les îles extérieures, montrant les zones de variation. D : Graphique de la série chronologique de l'IVDN dans chaque région. 28

Figure 6. Cinq classes thématiques de changements dans la végétation au fil du temps dans le Refuge d'oiseaux migrateurs du delta de la rivière Anderson, Territoires du Nord-Ouest, de 1972 à 2003. Des tendances à la baisse statistiquement significatives des indices de végétation par différence normalisée (IVDN) apparaissent dans les classes I et II des basses terres, et une tendance positive est observée dans la toundra des hautes terres (classe V). 29

1. INTRODUCTION

Le Refuge d'oiseaux migrateurs du delta de la rivière Anderson, situé dans la partie occidentale de l'Arctique canadien, est l'une des principales aires de reproduction et d'estivage pour la sauvagine et d'autres espèces d'oiseaux migrateurs dans les Territoires du Nord-Ouest (Latour *et al.*, 2008). Plusieurs basses terres insulaires qui couvrent une superficie de quelque 12,5 km^2 dans la partie externe du delta de la rivière Anderson sont particulièrement prisées par la Petite Oie des neiges (*Chen caerulescens caerulescens*) et la Bernache noire (*Branta bernicla nigricans*) en période de nidification. Dans les années 1970 et 1980, de 4 000 à 8 000 Petites Oies des neiges nichaient dans la partie externe du delta de la rivière Anderson (Kerbes, 1986; Kerbes *et al*., 1999). Les terres insulaires ainsi que les territoires adjacents du delta procuraient aussi un habitat de nidification à une population pouvant aller jusqu'à 2 500 Bernaches noires, soit presque 6 % de la population canadienne de cette sous-espèce (Latour *et al*., 2008). Depuis les années 1980, les populations de Petites Oies des neiges et de Bernaches noires ont grandement diminué (Armstrong, 1998; Hines et Wiebe Robertson, 2006), en raison sans doute des changements dans la végétation dans la partie externe du delta, dont les premiers signes ont été relevés dès 1991 (Armstrong, 1995), mais qui ont probablement commencé bien avant. Depuis, la population locale des Inuvialuit, qui voyage, pêche et chasse dans la région, de même que les biologistes du Service canadien de la faune (SCF) constatent une dégradation constante de l'habitat. Dans les zones de végétation morte, les sols sont très salins (SCF, données inédites); on pourrait donc croire que l'inondation du delta par l'eau salée est une cause possible de la perte d'habitat. Aucune observation systématique des sols n'a été réalisée dans la région au fil du temps. Toutefois, des images satellitaires multispectrales de la série américaine Landsat sont disponibles depuis 1972 et ont été utilisées pour cartographier quantitativement les changements environnementaux partout dans le monde, y compris dans l'Arctique (voir par exemple Tucker *et al*., 1985; Ferguson, 1991; Gould, 1998). Des images Landsat ont récemment été utilisées pour déceler les changements qualitatifs dans les habitats arctiques de prédilection chez les oies et bernaches qui nichent dans les basses terres voisines de la baie d'Hudson (Jefferies *et al*., 2006).

La présente étude visait à quantifier les pertes d'habitat relevées dans le delta de la rivière Anderson à l'aide de l'imagerie satellitaire, à repérer les zones touchées et à

déterminer si les changements étaient survenus dans des intervalles de temps donnés. Ultimement, notre objectif était de déterminer si la perte d'habitat était plutôt de nature progressive (indiquant peut-être une dégradation plus lente à long terme du site) ou ponctuelle, c'est-à-dire qu'elle serait plutôt liée à un événement environnemental particulièrement important (notamment une onde de tempête automnale anormalement violente survenue dans la mer de Beaufort ou une crue printanière exceptionnelle de la rivière Anderson).

2. ZONE D'ÉTUDE

La rivière Anderson se jette dans la mer de Beaufort à la baie Wood (69° 42' N, 129° 00' O), à mi-chemin environ entre les collectivités de Paulatuk et de Tuktoyaktuk, dans les Territoires du Nord-Ouest, dans la partie occidentale de l'Arctique canadien. La région du delta de la rivière et ses environs est très prisée par les oiseaux migrateurs, ce qui lui a valu la désignation de refuge d'oiseaux migrateurs en 1961 (figure 1). Selon la description de Latour *et al*. (2008), la rivière traverse la zone de transition entre la forêt d'épinettes et la toundra d'arbustes nains, et coule sur une plaine inondable qui s'élargit progressivement en bordure de terrasses fluviatiles. Latour *et al.* précisent également que le delta formé par une série d'îlots alluviaux bas, de chenaux et de lacs débouche vers le nord dans les eaux peu profondes de la baie Wood, que les terres environnantes, généralement basses et vallonnées, sont parsemées de lacs et d'étangs, et que le cours inférieur de la rivière traverse une zone de roches sédimentaires du Crétacé. Ils mentionnent enfin que des polygones de toundra se sont formés dans les sols mal drainés qui entourent l'embouchure de la rivière. Les levées alluviales le long des côtes insulaires favorisent les crues printanières. La partie externe du delta de la rivière Anderson, composée de plusieurs basses terres insulaires, se distingue par ses vasières, son couvert herbacé et de carex dans certaines zones humides basses, ses saules arctiques nains (moins de 1 m de hauteur), ainsi que par une grande variété de plantes herbacées sur les levées alluviales et autres terrains un peu moins humides. Les amoncellements de bois de grève au-delà de la ligne des eaux estivale normale sont les témoins d'une inondation quasi totale de la partie externe du delta à la crue printanière de la rivière Anderson ou lors des ondes de tempête automnales au large de l'océan. Dans la baie Wood, les marées atteignent environ 0,5 m (Pêches et Océans Canada, 2007), mais les

variations peuvent être énormes, autant à la hausse ou à la baisse, lorsque les conditions de vent de mer ou de vent de reflux sont extrêmes.

L'importance biologique de la région pour les oiseaux migrateurs a été décrite par Barry (1967), Alexander *et al.* (1991) et Latour *et al.* (2008), notamment, de même que par les nombreux auteurs cités ici. Depuis des siècles, les îles et les zones avoisinantes de la partie externe du delta revêtent une importance particulière pour la Petite Oie des neiges (*Chen caerulescens caerulescens*) et la Bernache noire (*Branta bernicla nigricans*). Comme nous l'avons mentionnée précédemment, les populations de ces deux espèces subissent déclin notable depuis les années 1980, en raison probablement des changements dans la végétation de la partie externe du delta.

3. MÉTHODOLOGIE

Collecte et traitement des données Landsat

Les premiers capteurs de moyenne résolution embarqués à bord de satellites et dotés d'une fonction d'imagerie multispectrale capables de cartographier de façon quantitative de la végétation ont été lancés dans le cadre de la série Landsat américaine, en 1972 (U. S. Geological Survey, 2005; 2007). Depuis, cette série Landsat fournit des images planétaires presque sans arrêt, et la qualité des caractéristiques de résolution spatiale, de réduction des bruits de capteur et de toutes les autres fonctions des capteurs grandit sans cesse (tableau 1).

Nous avons réuni une série de 13 images sans nuage prises en été sur une période de 12 ans, entre 1972 et 2003 (tableau 1). À des fins de validation, nous avons choisi 2 images prises à la même date, soit le 18 juillet 1986 (nous en discutons plus loin), mais d'autres images retenues sont réparties à des intervalles aussi égaux que possible en fonction de la disponibilité et de la qualité des images. Nous avons limité notre analyse sur les images saisies du 30 juin au 8 août, période où la croissance de la végétation est à son apogée et qui précède les premières fortes gelées automnales. De même, Stow *et al*. (2004) ont constaté que la végétation de toundra dans la région près de Barrow, en Alaska, atteint son maximum à la fin de juillet et au début d'août.

Les données d'image du scanneur multispectral (MSS) des séries Landsat 1, 2 et 3, du capteur TM (Thematic Mapper) de Landsat 5 et du capteur ETM (Enhanced Thematic Mapper) de Landsat 7 proviennent de trois fournisseurs :

(1) Global Land Cover Facility (GLCF), de la University of Maryland – archives mondiales en ligne, regroupant des données choisies des séries Landsat et autres; accessible à l'adresse www.landcover.org (University of Maryland, 2008);
(2) MacDonald, Dettweiller and Associates Ltd. (MDA) – fournisseur commercial donnant accès aux archives du gouvernement du Canada;
(3) U. S. Geological Survey (USGS) EROS Data Center (EDC), situé à Sioux Falls, dans le Dakota du Sud – dépositaire de l'une des plus importantes collections d'images aériennes et satellitaires de la surface terrestre.

Le traitement d'image a été réalisé avec le progiciel sous licence ENVI^{md}, version 4.3 (Research Systems, 2004). Chacune des scènes Landsat de 180 km sur 180 km a été convertie au préalable à la zone UTM 9 du système WGS84, puis recadrée afin de porter exclusivement sur la région immédiate du delta de la rivière Anderson, en vue de réduire le temps de traitement. Les images acquises ayant des formats et des géométries variables, nous avons fait une mise en correspondance manuelle de toutes les images après le recadrage afin de circonscrire la zone d'intérêt. Les données MSS de 80 m ont été rééchantillonnées à 30 m afin qu'on puisse en faire l'analyse parallèle à celle des données TM de 30 m.

La possibilité que les calculs réalisés sur les données des capteurs MSS et TM ne donnent pas des résultats identiques nous préoccupait quelque peu puisque les bandes spectrales étaient différentes. D'autres organismes (examinés par Coppin *et al*., 2004) n'ont signalé aucun écart entre les résultats des calculs à partir des données des deux capteurs, mais leurs analyses portaient sur des milieux de plus faible latitude et ne s'appliquaient pas forcément à l'Arctique. Pour notre part, nous avons comparé une scène MSS et une scène TM captées le même jour en 1986 et nous avons également constaté une très faible variation de l'IVDN. Les capteurs MSS et TM donnant des résultats similaires en présence d'une quantité égale de riche végétation, nous avons utilisé les deux types d'images pour notre analyse de la série chronologique. Pour 1986, nous nous sommes servis de la scène TM.

De nombreuses études (examinés par Coppin *et al.*, 2004) insistent sur l'importance d'étalonner les images Landsat en données numériques brutes en réflectances, ou de les normaliser par une méthode quelconque afin de supprimer les écarts d'étalonnage et de capteurs d'une image à l'autre. Une telle précaution était capitale pour notre étude, puisque des variations importantes dans la clarté des images d'une scène à l'autre ajoutaient une

difficulté à l'interprétation des données brutes. La clarté varie principalement selon les procédés de « prétraitement » utilisés par les fournisseurs et aussi en raison des paramètres d'étalonnage des divers capteurs au fil du temps. La réflectance est le rapport de l'énergie lumineuse rayonnante réfléchie entre une cible et la densité de l'énergie lumineuse qui l'atteint. Dans la couche supérieure de l'atmosphère, les unités de réflectance tiennent compte des variations du rayonnement solaire en raison de la distance entre la Terre et le Soleil, ainsi que des changements saisonniers et diurnes de l'élévation solaire (Olsson, 1995; Chander et Markham, 2003). Toutefois, on ne peut calculer la réflectance que si on dispose de données d'étalonnage fiables. Les facteurs d'absorption et de diffusion dans l'atmosphère ne sont pas pris en compte lorsqu'on établit la réflectance dans la couche supérieure.

Pour chacune des scènes, nous avons mesuré la réflectance au capteur dans la couche supérieure de l'atmosphère, à l'aide du progiciel ENVI^{md}, pour convertir les données numériques codées sur 8 bits à 32 bits de luminance au capteur (la luminance étant le flux énergétique parvenant au capteur par unité de surface, dans un angle solide, à l'intérieur d'une gamme de longueurs d'onde donnée), selon les coefficients d'étalonnage fournis pour chacune des scènes ou, s'il n'existait pas de métadonnées pour une scène en particulier, pour la scène la plus rapprochée dans le temps. Les valeurs de la luminance mesurée au capteur étaient ensuite converties en unités de réflectance dans la couche supérieure de l'atmosphère selon un modèle de prévision de l'éclairement lumineux en fonction de la latitude, de la longitude, de la date et de l'heure. Toutefois, nous n'avions pas de constantes d'étalonnage pour certaines scènes et, dans certains cas (notamment la scène à laquelle nous avons attribué des constantes d'étalonnage), les données fournies étaient très douteuses.

Nous avons eu recours à deux procédés d'étalonnage des images. Pour la période de 1985 à 2003, nous avons utilisé le procédé dit d'*étalonnage absolu* des images du capteur TM de Landsat-5 et du capteur ETM de Landsat-7; nous nous sommes fondés sur les métadonnées fournies pour mesurer la réflectance dans la couche supérieure de l'atmosphère. Afin d'étendre l'analyse aux images MSS de 1972 à 1982 et aux scènes TM de 1988 et de 1992 issues de la base de Global Land Cover Facility, qui semblaient avoir été prétraitées selon des procédés différents et qui n'étaient pas accompagnées de données d'étalonnage fiables, nous avons eu recours à l'*étalonnage relatif*, fondé sur la technique de la cible pseudo-invariante (Hall *et al*., 1991). Chaque scène exigeant un étalonnage relatif a été

comparée à la scène TM de 1986. Nous avons isolé des paires de valeurs de réflectance correspondant aux 2 scènes pour 15 à 30 points dont la réflectance est réputée constante dans le temps (p. ex. l'eau des fonds marins et les zones non végétalisées). Nous avons dérivé le paramètre d'ajustement de gain et de décalage (en fonction de la scène de 1986) pour chacune des scènes à normaliser à partir d'une régression des paires de valeurs de réflectance (tableau 1). Les valeurs de R^2 de ces régressions excédaient 0,95, ce qui confirme la pertinence des ajustements.

Indice de végétation par différence normalisée

Pour évaluer les changements dans la couverture végétale au fil des années, nous avons utilisé l'indice de végétation par différence normalisée (IVDN), un indice souvent utilisé pour mesurer la phytomasse verte photosynthétique (voir par exemple Tucker *et al*. [1985]). L'IVDN exprime le rapport des intensités mesurées dans les bandes spectrales rouge et proche infrarouge. L'IVDN repose sur le principe de l'absorption importante de la lumière entrante en présence de chlorophylle dans la zone rouge du spectre électromagnétique, alors que le mésophylle, le tissu spongieux des feuilles, correspond à un niveau élevé de réflectance dans la zone proche infrarouge du spectre. Il s'ensuit que les végétaux sains dont la croissance est vigoureuse reflètent très peu le rouge et beaucoup l'infrarouge, ce qui donne un IVDN élevé. L'IVDN est directement et quantitativement lié à la phytomasse verte chlorophyllienne et il est plus facile à interpréter que les images en fausses couleurs qui imitent les photographies aériennes à l'infrarouge. Les éléments non végétalisés comme les roches et les sols stériles, l'eau et les nuages sont associés à des valeurs IVDN proches de zéro ou inférieures à zéro.

L'IVDN de chacun des pixels de toutes les images a été mesuré selon la formule suivante :

$$\text{IVDN} = (\text{infrarouge} - \text{rouge}) / (\text{infrarouge} + \text{rouge})$$

où « rouge » correspond à la réflectance de la bande MSS de 650 nm ou des bandes TM et ETM de 660 nm, et « infrarouge », à la réflectance de la bande MSS de 950 nm ou des bandes TM, et ETM de 830 nm, normalisée selon cette formule.

La figure 2 présente les valeurs de réflectance de chaque bande spectrale et l'IVDN mesuré à 8 points d'échantillonnage de l'image TM de juillet 1986. L'IVDN est plus élevé

lorsque la bande infrarouge centrée sur 840 nm est plus large et que la bande rouge centrée sur 650 nm est plus étroite. La figure 3 reproduit la série chronologique complète de l'IVDN pour la zone à l'étude.

Analyse des tendances temporelles dans la couverture végétale terrestre

Dans les images examinées, on remarque d'emblée que les niveaux d'eau ont fluctué au cours de la période d'étude. L'IVDN des plans d'eau est négatif, et il n'est pas rare qu'on sous-estime l'IVDN des végétaux qui poussent dans les zones inondables. Nous avons donc exclu de notre analyse les zones qui avaient été submergées au cours d'une année donnée et, par prudence, nous avons appliqué un masque sur les plans d'eau de toutes les images jusqu'à une distance de 3 pixels (100 m environ) vers l'intérieur depuis le rivage.

À défaut d'une méthode qui se démarque pour analyser les données ou diffuser les résultats, nous avons amalgamé trois méthodes pour étudier les changements dans la végétation : (1) nous avons mesuré les superficies des changements survenus dans l'habitat au cours de la période d'étude de 31 ans; (2) nous avons estimé les variations temporelles des valeurs moyennes de l'IVDN dans plusieurs régions d'intérêt à l'intérieur de la zone d'étude; (3) nous avons créé des cartes thématiques des variations temporelles des valeurs de l'IVDN, au moyen d'un procédé de classification non dirigée.

La superficie touchée par des variations de l'IVDN dans les parties terrestres de la zone d'étude a été mesurée par régression linéaire de l'IVDN en fonction de l'année, pixel par pixel. Le graphique des valeurs de R^2 et de la pente ainsi créé nous a permis de cartographier le rythme et l'orientation des changements, ainsi que leur portée. Nous avons établi que des changements dans la végétation s'étaient produits dans un pixel d'image ponctuel lorsque la valeur R^2 de la droite de régression était statistiquement significative ($P < 0,05$). Les coefficients de pente (b) des régressions significatives indiquent la variation moyenne annuelle négative ou positive de l'IVDN. En nous fondant sur la pente correspondant à chaque pixel comme indicateur de changement, nous avons cartographié et mesuré la superficie où des changements dans l'habitat étaient statistiquement significatifs dans plusieurs régions d'intérêt.

Comme seconde méthode de quantification des changements dans la végétation, nous avons utilisé la pente d'une régression linéaire simple de l'IVDN (selon la valeur moyenne pour l'ensemble d'une région d'intérêt donnée) en fonction de l'année. La pente de la droite

de régression correspond à la variation moyenne de l'IVDN par année dans une région d'intérêt. De plus, pour chaque région d'intérêt, le pourcentage total de variation de l'IVDN au cours de la période de 1972 à 2003 a été calculé selon la formule suivante :

$$100 \times (IVDN_{2003} - IVDN_{1972}) / IVDN_{1972}$$

où les variables $IVDN_{2003}$ et $IVDN_{1972}$ ont été estimées à partir de l'équation de régression.

L'examen des données indique que l'IVDN est inférieur aux valeurs attendues lorsque les températures printanières sont exceptionnellement froides. Afin d'évaluer l'effet potentiel des températures printanières annuelles sur nos résultats, nous avons analysé la série chronologique de l'IVDN par rapport à la température moyenne en juin. Cette évaluation repose sur une analyse de corrélation partielle de l'IVDN en fonction de l'année afin de tenir compte, statistiquement, de l'effet des températures de juin sur l'IVDN. Les données météorologiques sont celles de Tuktoyaktuk (160 km à l'ouest de la zone d'étude), où se trouve la station météorologique la plus proche fonctionnant en continu (Environnement Canada, 2007).

Les analyses mentionnées plus haut ont permis d'isoler quatre grandes régions d'intérêt (les hautes terres, les îles extérieures, la partie occidentale du delta et le delta intérieur) et sept sous-régions dans les îles extérieures (figure 1). Les grandes régions d'intérêt ont été désignées en fonction de leurs caractéristiques physiographiques et de la fréquentation des oies et bernaches. Parmi les régions d'intérêt, les îles extérieures constituent l'aire de nidification de prédilection de la Petite Oie des neiges et de la Bernache noire et sont les plus exposées aux crues. Les oies et bernaches fréquentent principalement la partie occidentale du delta, une autre zone inondable, au cours de la saison de l'élevage des couvées et de la mue. Les crues annuelles atteignent plus rarement le delta intérieur, ce qui favorise la croissance plus continue des arbustes, des plantes herbacées non graminoïdes et des plantes graminoïdes, un milieu moins prisé par les oies et bernaches. La région d'intérêt des hautes terres, où la végétation est riche, se situe au-dessus du niveau des crues. Nous en avons fait une région de contrôle ou de référence pour le suivi des niveaux naturels de changement dans les milieux non inondés qui sont peu fréquentés par les oies et bernaches.

L'analyse révèle clairement une variabilité importante dans certaines des régions d'intérêt susmentionnées (qui correspondent grosso modo à des unités géographiques ou d'aménagement artificielles) et un IVDN tantôt en hausse, tantôt en baisse, dans certaines

parties. Nous avons donc élaboré une troisième méthode pour déceler les changements à long terme dans la végétation du delta de la rivière Anderson, laquelle fait intervenir une classification multitemporelle des valeurs de l'IVDN, analogue à une classification multispectrale. Cette méthode nous a permis de cartographier des groupes de pixels en fonction des diagrammes d'évolution et, par le fait même, d'établir des cartes globales des changements dans l'habitat survenus dans toute la zone et non seulement dans les régions d'intérêt. En utilisant cette méthode, nous avons regroupé les images de l'IVDN de chaque année en un seul fichier multitemporel contenant les 12 années de collecte de données; les pixels présentant des similitudes dans l'évolution de l'IVDN ont été groupés au moyen d'une technique de classification non dirigée (ISODATA, dans ENVI^{MD}). Au départ, 15 classes temporelles ont été établies, mais celles qui étaient semblables ont été regroupées manuellement afin de simplifier la carte résultante et les analyses subséquentes de régression de l'IVDN moyen en fonction de l'année.

4. RÉSULTATS

Changements observés au fil des années selon les zones de couverture végétale

La figure 3 illustre les valeurs de l'IVDN associées à chacune des 12 images. Les valeurs sont les plus élevées dans les hautes terres avoisinant la rivière Anderson et sont les plus basses à proximité de la partie externe du delta (figure 3, tableau 2). Selon ce que nous connaissons de la zone d'étude, lorsque l'IVDN est égal ou inférieur à 0,25 sur une importante étendue, cette étendue serait dénuée ou presque de toute végétation. Là où l'IVDN se situe entre 0,25 et 0,30, on devrait trouver un peu de végétation; s'il est égal ou supérieur à 0,30, la végétation devrait y être relativement abondante (se reporter aux photos de la figure 4). Lorsque l'IVDN est au maximum (0,40 ou plus), on devrait trouver une végétation de plaine abondante ou de la toundra d'arbustes nains avec une abondance de plantes couvre-sol.

À la figure 5, on peut voir les zones où nous avons remarqué des tendances positives ou négatives statistiquement significatives au chapitre des changements dans l'habitat au cours de la période d'étude de 31 ans. La végétation a diminué de façon plus marquée dans la région d'intérêt des îles extérieures, où nous avons estimé que 45 % de l'habitat avait disparu ou avait été altéré (tableau 3). Même si ces changements se font sentir partout dans la région

d'intérêt, la majorité des habitats perdus ou dégradés se trouvait sur l'île Fox Den et l'archipel voisin formé des îles Flat, Jaeger et Brant (tableaux 2 et 3, figure 5). La région d'intérêt de la partie occidentale du delta a aussi subi une importante réduction de sa couverture végétale (18 %), plus particulièrement dans la zone voisine du ruisseau Snow Goose. Dans le sud et vers l'intérieur du delta, les valeurs de l'IVDN suivent généralement une tendance neutre ou positive, même si, dans 1 % de la région, la perte ou la dégradation de l'habitat était évidente. Dans la majorité des secteurs de la région d'intérêt des hautes terres, les variations temporelles de l'IVDN sont positives, et presque aucune portion de cette région ne présentait de tendance négative. Globalement, l'étendue de l'habitat dégradé ou perdu est estimée à 878 ha dans le delta de la rivière Anderson (tableau 3, figure 5); les îles extérieures (567 ha, soit 65 % de la superficie totale) et la partie occidentale du delta (256 ha ou 29 % de la superficie totale) sont les deux régions d'intérêt les plus touchées.

Tendances de l'IVDN moyen dans différentes régions d'intérêt

La régression de la moyenne de l'IVDN en fonction du temps dans chaque région d'intérêt produit des modèles généraux qui se rapprochent de ceux qui sont issus de l'analyse des superficies précédemment décrite. Les valeurs de l'IVDN ont connu une baisse significative dans la région d'intérêt des îles extérieures dans son ensemble, ainsi que dans la plupart de ses sous-régions (tableau 3; figure 5). Selon l'analyse initiale, nous ne discernons aucune tendance significative à long terme pour ce qui est de l'IVDN moyen dans les régions d'intérêt de la partie occidentale et de l'intérieure du delta, mais nous notons une tendance à la hausse significative dans la région d'intérêt des hautes terres. La corrélation entre l'IVDN des hautes terres et les températures (R = 0,680, P = 0,015) est significative, mais, si l'effet des températures de juin est statistiquement contrôlée par corrélation partielle, cette relation positive n'est plus significative (R partiel = 0,382, P = 0,246). L'analyse de corrélation partielle indique plutôt une variation négative de l'IVDN dont la signification statistique est marginale dans la région d'intérêt de la partie occidentale du delta (R partiel = –0,597, P = 0,052, contre R = –0,292, P = 0,358 dans l'analyse initiale), et une corrélation négative plus forte de l'IVDN que celle qui a été calculée précédemment pour la région d'intérêt des îles extérieures (R partiel = –0,818, P = 0,002, contre R = –0,684, P = 0,014 dans l'analyse initiale). Aucune de ces méthodes d'analyse de corrélation n'a détecté de variation

temporelle significative de l'IVDN moyen dans la région d'intérêt du delta intérieur (*R* partiel = 0,104, *P* = 0,761 contre *R* = 0,508, *P* = 0,091).

Classification non dirigée des variations de l'IVDN

À l'issue de la classification non dirigée et du regroupement subséquent des classes similaires, nous avons obtenu cinq classes d'évolution temporelle de l'IVDN (figure 6). Le texte qui suit donne une brève description des classes établies en fonction des tendances de l'IVDN et de notre connaissance des conditions environnementales et de la couverture végétale prédominantes dans les différentes zones.

La classe I (bleu clair dans la figure 6) se trouve dans la partie inférieure de la partie extérieure du delta de la rivière Anderson. La couverture végétale dans la superficie correspondant à cette classe a généralement subi une importante diminution depuis 1972. Selon les estimations, les valeurs de l'IVDN avaient chuté de 47 % en 2003 par rapport aux valeurs de 1972 (tableau 4). De nos jours, le territoire est essentiellement couvert de vasières et de levées alluviales stériles où poussent des touffes clairsemées ou des parcelles éparses d'herbes basses et de carex. Les saules morts abondent à certains endroits.

La classe II (bleu foncé dans la figure 6) se trouve dans les régions d'intérêt des îles extérieures et de la partie occidentale du delta, un peu plus à l'intérieur que la classe précédente, sur un relief un peu plus élevé. Les valeurs de l'IVDN y sont relativement plus élevées, mais elles ont diminué au même rythme que celles de la classe I (variation de – 48 %) au cours de la période d'étude de 31 ans (tableau 4). Les saules morts sont très abondants dans certaines zones de cette classe thématique. D'après la figure 3, il est évident que, au début de la série chronologique, la couverture végétale y était plus dense et que les vasières étaient nettement moins étendues dans les zones de la classe II que dans celles de la classe I.

La classe III (en vert sur la figure 6) est située encore plus à l'intérieur du delta, sur un terrain légèrement plus élevé que celui des classes précédentes. La variabilité annuelle y est considérable, mais aucune tendance significative à long terme de l'IVDN ne se dessine pour cette classe au cours de la période d'étude (tableau 4; figure 6). La couverture végétale amalgame saules et autres arbustes, plantes graminées et plantes herbacées non graminoïdes. On n'y trouve aucune grande vasière.

La classe IV (orange dans la figure 6) se retrouve essentiellement dans des parties du delta intérieur et dans certaines portions des hautes terres. Contrairement aux classes précédentes, le couvert arbustif y est manifestement plus dense et les plantes herbacées y sont abondantes. On n'a relevé aucune variation significative à long terme de l'IVDN dans cette classe thématique, bien qu'on y ait observé une forte variabilité annuelle. Comme il a été mentionné plus haut dans la section sur les changements survenus dans les régions d'intérêt, les valeurs de l'IVDN étaient relativement basses lorsque les printemps étaient plus froids (sans doute à cause de la croissance plus tardive des nouvelles pousses de verdure). Des températures en deçà des moyennes en juin sont probablement la source des valeurs de l'IVDN relativement basses en 1974 et en 1978 dans cette classe thématique, et également dans d'autres classes (tableau 4).

La classe V (marron dans la figure 6) domine dans les hautes terres situées bien au-dessus du delta de la rivière Anderson et dans certaines parties du delta intérieur. Cette classe se distingue par un couvert arbustif très étendu et ses clairières où poussent des plantes graminoïdes et des plantes herbacées non graminoïdes. Cette classe thématique a connu une augmentation statistiquement significative de l'IVDN de 21 % depuis 1972 (tableau 4). Comme nous l'avons déjà mentionné, il est difficile de savoir si cette tendance est réelle et permanente, ou s'il s'agit tout simplement d'une conséquence passagère des températures froides de juin (et de leurs répercussions sur la phénologie) qui ont été enregistrées au cours des premières années de l'étude.

5. DISCUSSION

Commentaires sur les données et la méthode

L'un des avantages reconnus de la méthode de télédétection utilisée pour la présente étude a trait à la quantité imposante de la série chronologique pouvant être tirées des données Landsat. Il existe en effet d'impressionnantes bases de données Landsat historiques qui sont regroupées dans diverses archives partout dans le monde. Malheureusement, nous avons vite découvert qu'une grande partie des premières données archivées pour notre zone d'étude n'étaient pas facilement utilisables. Les premiers scanneurs multispectraux Landsat n'étaient pas équipés de systèmes d'étalonnage embarqués, et, par conséquent, les écarts radiométriques sont importants entre les données des différents capteurs (Elvidge *et al*.,

1998). De plus, la dégradation des bandes des capteurs n'était pas constante au fil du temps, et les procédés de traitement au sol de même que les fonctions d'étalonnage publiées ont constamment changé (Chander et Markham, 2003; Chander *et al*., 2007). Souvent, nous avions très peu de métadonnées sur les données MSS acquises, voire aucune, ou alors les unités étaient non précisées ou inconnues ; d'autres données présentaient des distorsions qui requéraient une attention spéciale. Nous avons eu recours à une variante de la technique dite de la cible pseudo-invariante (Hall *et al*., 1991) pour normaliser les mesures de la réflectance des cinq images du capteur MSS et des images du capteur TM de la Global Land Cover Facility qui nous paraissaient douteuses ou qui n'étaient pas accompagnées de données d'étalonnage (tableau 1) au capteur TM de 1986, dont l'étalonnage est fiable.

Les difficultés décrites ci-dessus expliquent sans doute l'hésitation des chercheurs à utiliser les premières données MSS pour quantifier les changements à long terme et l'existence de nombreux rapports sur les méthodes d'étalonnage relatif des premières données Landsat (Song *et al*., 2001; Du *et al*., 2002; Janzen *et al.*, 2006; Schroeder *et al*., 2006). Des travaux sont en cours pour améliorer l'étalonnage et la cohérence à long terme des données du Landsat Thematic Mapper, mais on attend toujours des solutions pour ce qui est des données MSS (Groupe de travail ad hoc sur l'étalonnage Landsat TM, 2006; P. Teillet, comm. pers.). Selon notre expérience, il faut éviter de mélanger les données historiques Landsat issues de diverses sources archivistiques; le mieux est de s'en tenir aux données de la USGS traitées récemment.

Plusieurs études ont été réalisées ces dernières années sur l'IVDN des régions arctiques, mais la plupart se fondent sur le jeu de données du radiomètre perfectionné à très haute résolution AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) du Global Inventory Monitoring and Modeling Studies (GIMMS), qui ont été recueillies depuis le début des années 1980 (Tucker *et al*., 2001). Les valeurs de l'IVDN de la toundra que nous avons mesurées à l'aide des données Landsat sont en corrélation étroite (R^2 = 0,69, P = 0,01) avec une série chronologique de l'IVDN de crête de la toundra sibérienne portant sur la période de 1982 à 2000, mesuré avec l'AVHRR (Fetterer et Savoie, 2007). De même, nous constatons une forte corrélation (R^2 = 0,77, P = 0,01) entre l'IVDN de la toundra que nous avons calculé pour la période de 1985 à 2003 et les valeurs publiées de l'IVDN de la toundra du versant Nord de l'Alaska (Jia *et al*., 2003). Il convient de souligner que les rapports sur les données

du GIMMS font tous invariablement état d'une hausse de l'IVDN depuis 1982, une période marquée par une hausse constante des températures. En étendant notre analyse de la série chronologique jusqu'en 1972, nous avons constaté que les études réalisées jusqu'à maintenant peuvent avoir omis une période marquée par des hausses et des baisses relativement fortes de l'IVDN au cours des années 1970. Ce faisant, il se pourrait que les études existantes aient sous-estimé l'importance de la variabilité interannuelle des températures arctiques qui influe sur l'IVDN. Aucune tendance à long terme n'a été observée dans l'IVDN du secteur de toundra des hautes terres à proximité du delta de la rivière Anderson lorsque la variation interannuelle des données météorologiques de juin était contrôlée statistiquement.

Changements écologiques

Les principaux objectifs de la présente étude en matière d'écologie et d'aménagement consistaient à quantifier les pertes d'habitat signalées dans le delta de la rivière Anderson et à recenser les zones perturbées. Nous voulions en outre déterminer si la perte de végétation mesurée s'était produite dans un intervalle de temps précis ou par suite d'un événement environnemental qui pourrait potentiellement expliquer cette perte (p. ex. une inondation d'eau salée dans le sillage d'une onde de tempête).

Comme il fallait s'y attendre, nos résultats indiquent une diminution substantielle de la couverture végétale des îles extérieures du delta de la rivière Anderson de 1972 à 2003. (Cependant, nous avons découvert non sans surprise que les IVDN pouvaient varier considérablement d'une année à l'autre, sans conséquence apparente à long terme pour l'habitat. Il appert que les changements seraient plutôt le résultat des écarts interannuels dans les températures printanières.) La couverture végétale a diminué sur une superficie qui correspond à 45 % au moins de la région d'intérêt des îles extérieures, dont l'IVDN moyen a baissé de 37,5 % au cours de la période de référence. Les régions les plus touchées sont les parties basses du delta, qui sont également des aires de nidification extrêmement importantes pour la Petite Oie des neiges et la Bernache noire (Armstrong, 1995; Kerbes *et al*., 1999).

De même, l'IVDN a connu des fluctuations importantes dans la partie occidentale du delta, autre région d'intérêt majeure. Nous avons estimé que 18 % de cette région d'intérêt a été perturbé, l'IVDN moyen ayant diminué de 11,9 % au cours de la période de référence. La

variabilité spatiale des changements dans la végétation de cette zone a été mesurée par la méthode de la classification non dirigée des diagrammes d'évolution de l'IVDN (figure 6).

Plus on pénètre au cœur de la région d'intérêt du delta intérieur et plus on se dirige vers la zone des hautes terres, moins la végétation paraît perturbée. D'après les données Landsat analysées dans le cadre de notre étude, l'IVDN de la région d'intérêt des hautes terres a effectivement connu une hausse significative dans le temps, ce que corroborent d'autres études menées en Alaska et en Sibérie (Jia *et al*., 2003; Fetterer et Savoie, 2007). Ces dernières ont estimé les variations des IVDN de la toundra à partir de données du GIMMS couvrant la période de 1982 à 2004. Notre série chronologique plus longue a notamment révélé un taux de variabilité important de l'IVDN, ce qui suggère que les valeurs changeantes de l'IVDN de la région d'intérêt des hautes terres de notre zone d'étude sont plutôt indicatives de la variabilité aléatoire des températures annuelles que des changements climatiques à long terme. Aucune tendance dans les valeurs de l'IVDN des hautes terres ne se dégagent lorsque l'effet des températures de juin est contrôlée statistiquement. Par conséquent, on peut présumer que la hausse statistiquement significative dans le temps de l'IVDN des hautes terres est due, en partie du moins, aux températures printanières très froides qui ont été enregistrées durant les premières années de la série chronologique (en 1974 et en 1978) et qui ont retardé la croissance de la végétation.

Bien qu'il n'existe pas de données de terrain quantitatives et historiques comme base de comparaison de la situation actuelle dans le delta de la rivière Anderson, les changements relevés dans la série chronologique satellite sont corroborés par des rapports descriptifs. Dans les années 1960, Barry (1967) écrivait que l'île Brant, située dans la région d'intérêt des îles extérieures, constituait une aire de nidification de choix pour la Bernache noire et que l'habitat y était composé de vasières, de grappes herbeuses ou de hummocks, de petites mares peu profondes et de flaques d'eau, ainsi que de mottes de carex subspathacé (*Carex subspathacea*) et de *Puccinellia phryganodes*. En 1991, Armstrong (1995) faisait état de modifications de l'habitat et de l'aire de nidification. Il décrivait l'île Brant comme étant un milieu formé surtout de vasières, parsemé de peuplements épars de *Carex* et de *Puccinellia* sur les côtés nord et ouest. Armstrong a aussi remarqué que des peuplements de saules nains (*Salix* spp.) couvraient auparavant une grande partie de l'île Flat et de l'extrémité nord de l'île Fox Den, mais que, depuis 1991, seuls restent en témoignage les troncs morts. Des

études de terrain effectuées par le Service canadien de la faune de 2003 à 2007 révèlent que la zone d'habitat dominée par une couverture végétale clairsemée et des saules morts (figure 4 : sites 1a et 1b) dans la région d'intérêt des îles extérieures a gagné l'intérieur des terres et qu'elle correspond maintenant à la zone en rouge délimitée à la figure 5. Les seuls peuplements arbustifs permanents dans les îles extérieures (figure 4, site 3) se trouvent dans la partie méridionale de l'île Fox Den et sur l'île Bluff voisine (figures 5 et 6). Les valeurs de l'IVDN dans ces zones demeurent élevées (> 0,4). Les autres « zones vertes » qui ont résisté sont formées principalement de peuplements de gazon où dominent les espèces d'herbes et de carex tolérantes au sel (figure 4, site 2), ainsi que d'autres graminoïdes qui poussent près des chenaux d'eau douce. Cette composition engendre un modèle de la distribution des plantes plutôt linéaire que l'on peut apercevoir dans certaines images plus récentes de l'IVDN (figure 3).

Dans l'ensemble, et malgré la forte variabilité interannuelle des valeurs de l'IVDN de la région d'intérêt des îles extérieures et de certaines zones de la région d'intérêt de la partie occidentale du delta, les résultats que nous avons obtenus indiquent que le recul de la végétation a été progressif depuis 1972 et peut-être avant. Ce constat va à l'encontre de la thèse voulant que les changements observés dans l'habitat soient consécutifs aux ondes de tempête qui ont provoqué l'inondation du delta par l'eau salée pendant une saison ou deux.

6. BIBLIOGRAPHIE

ALEXANDER, S.A., R.S. FERGUSON et K.J. MCCORMICK. 1991. *Habitats terrestres clés pour les oiseaux migrateurs dans les Territoires du Nord-Ouest*, Publications hors série nº 71, Service canadien de la faune, Yellowknife (Territoires du Nord-Ouest), 182 p.

ARMSTRONG, W.T. 1995. *Breeding biology of Black Brant* Branta bernicla nigricans *and Lesser Snow Geese* Chen caerulescens caerulescens *at Anderson River, NWT, 1991–1993*, rapport non publié, University of Saskatchewan, Saskatoon (Saskatchewan), et Service canadien de la faune, Yellowknife (Territoires du Nord-Ouest), 25 p.

ARMSTRONG, W.T. 1998. *Predation and antipredator tactics of nesting Black Brant and Lesser Snow Geese*, thèse de doctorat, University of Saskatchewan, Saskatoon (Saskatchewan), 129 p.

BARRY, T.W. 1967. *Geese of the Anderson River Delta, Northwest Territories*, thèse de doctorat, University of Alberta, Edmonton (Alberta), 212 p.

CHANDER, G. et B. MARKHAM. 2003. « Revised Landsat 5 TM radiometric calibration procedures and pos-calibration dynamic ranges », *IEEE Piansactions on Geoscience and Remote Sensing,* vol. 41 n° 11, p. 2674-2677. Accessible à l'adresse http://landsat.usgs.gov/resources/files/L5_TM_Cal_2003.pdf

CHANDER, G., B.L. MARKHAM et J.A. BARSI. 2007. « Revised Landsat 5 Thematic Mapper radiometric calibration », *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 4, n° 3, p. 490-494. Accessible à l'adresse http://landsat.gsfc.nasa.gov/pdf_archive/publications/L5TM_postcal_v11.pdf

COPPIN, P., I. JONCKHEERE, K. NACKAERTS, B. MUYS et E. LAMBIN. 2004. « Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, n° 9, p. 1565-1596.

DU, Y., P.M. TEILLET et J. CIHLAR. 2002. « Radiometric normalization of multitemporal high-resolution satellite images with quality control for land cover change detection », *Remote Sensing of Environment*, vol. 82, p.123-134.

ELVIDGE, C.D., D. YUAN, R.D. WEERACKOON et R.S. LUNETTA. 1998. « Relative radiometric normalization of Landsat Multispectral Scanner (MSS) data using an automatic scattergram-controlled regression », p. 11-22, *in* R. Singh et S. Murai (éd.), Space Informatics for Sustainable Development, Taylor & Caancis, Londres (Angleterre), 262 p.

ENVIRONNEMENT CANADA. 2007. Données climatiques en ligne, intervalle horaire. Accessible à l'adresse http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climateData/canada_f.html

FERGUSON, R.S. 1991. « Detection and classification of muskox habitat on Banks Island, Northwest Territories, Canada, using Landsat Thematic Mapper data », *Arctic*, vol. 44, p. 66-74.

FETTERER, F., et M. SAVOIE. 2007. Cryospheric climate indicators, Greenness: overview, National Snow and Ice Data Center. Accessible à l'adresse http://nsidc.org/noaa/search/indicators/greenness_index.html

GOULD, W. *1998.* « Remote sensing of vegetation, plant species richness, and regional biodiversity hotspots », *Ecological Applications*, vol. 10, n° 6, p. 1861-1870.

GROUPE DE TRAVAIL AD HOC SUR L'ÉTALONNAGE LANDSAT TM. 2006. Cohérence à long terme des données Landsat – Travaux visant à établir les paramètres d'étalonnage radiométrique finaux pour Landsat-5 TM. Accessible à l'adresse http://ccrs.nrcan.gc.ca/optic/calval/effort_f.php

HALL, F.G., D.E. STREBEL, J.E. NICKESON et S.J. GEOETS. 1991. « Radiometric rectification: Toward a common radiometric response among multidate, multisensor images », *Remote Sensing of Environment*, vol. 35, n° 1, p. 11-27.

HINES, J.E., et M.O. WIEBE ROBERTSON. (éd.). 2006. *Relevés d'oies, de bernaches et de cygnes dans la région désignée des Inuvialuits, ouest de l'Arctique canadien, 1989-2001*, Publications hors série n° 112, Service canadien de la faune, Ottawa (Ontario), 73 p. Accessible à l'adresse http://www.cws-scf.ec.gc.ca/publications/papers/112/index_f.cfm

JANZEN, D.T., A.L. FREDEEN et R.D. WHEATE. 2006. « Radiometric correction techniques and accuracy assessment for Landsat TM data in remote forested regions », *Journal canadien de télédétection*, vol. 32, p. 330-340.

JEFFERIES, R.L., A.P. JANO et K.F. ABRAHAM. 2006. « A biotic agent promotes large-scale catastrophic change in the coastal marshes of Hudson Bay », *Journal of Ecology*, vol. 94, p. 234-242.

JIA, G.J., H.E. EPSTEIN et D.A. WALKER. 2003. « Greening of arctic Alaska, 1981-2001 », *Geophysical Research Letters*, vol. 30, p. 2067.

KERBES, R.H. 1986. « Lesser snow geese, *Anser caerulescens caerulescens*, nesting in the western Canadian Arctic in 1981 », *Canadian Field-Naturalist*, vol. 100, p. 212-217.

KERBES, R.H., K.M. MEERES et J.E. HINES (éd.). 1999. *Distribution, survival, and numbers of Lesser Snow Geese of the Western Canadian Arctic and Wrangel Island, Russi*a, Publications hors série nº 98, Service canadien de la faune, Ottawa (Ontario), 120 p.

LATOUR, P.B., J. LEGER, J.E. HINES, M.L. MALLORY, D.L. MULDERS, H.G. GILCHRIST, P.A. SMITH et D.L. DICKSON. 2008. *Habitats terrestres clés pour les oiseaux migrateurs dans les Territoires du Nord-Ouest et au Nunavut*, 3e édition, Publications hors série nº 114, Service canadien de la faune, Ottawa (Ontario). Accessible à l'adresse http://www.cws-scf.ec.gc.ca/publications/papers/114/index_f.cfm

PÊCHES ET OCÉANS CANADA. 2007. Marées et niveaux, Région centrale et Arctique: station 6449 (Wood Bay). Accessible à l'adresse http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/meds/Databases/TWL/TWL_station_list_f.asp?user=MEDS&region=CA&tst=1

OLSSON, H. 1995. « Reflectance calibration of Thematic Mapper data for forest change detection », *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, p. 81-96.

RESEARCH SYSTEMS. 2004. ENVI, Version 4.0 SP 1, The environment for visualizing images, ITT Visual Information Solutions, Boulder (Colorado).

SCHROEDER, T.A., W.B. COHEN, C. SONG, M. CANTY et A. YANG. 2006. « Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional

forest patterns in western Oregon », *Remote Sensing of Environment*, vol. 103, p. 16-26.

SONG, C., C. WOODCOCK, K. SETO, M. PAX LENNEY et S. MACOMBER. 2001. « Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? », *Remote Sensing of Environment*, vol. 75, p. 230-244.

STOW, D.A., A. HOPE, D. MCGUIRE, D. VERBYLA, J. GAMON, F. HUEMMRICH, S. HOUSTON, C. RACINE, M. STURM, K. TAPE, L. HINZMAN, K. YOSHIKAWA, C. TWEEDIE, B. NOYLE, C. SILAPASWAN, D. DOUGLAS, B. GRIFFITH, G. JIA, H. EPSTEIN, D. WALKER, S. SAESCHNEER, A. PETERSON, L. ZHOU et R. MYNENI. 2004. « Remote sensing of vegetation and land-cover change in arctic tundra ecosystems », *Remote Sensing of Environment*, vol. 89, p. 281-308.

TUCKER, C., D. SLAYBACK, J. PINZON, S. LOS, R. MYNENI et M. TAYLOR. 2001. « Higher northern latitude IVDN and growing season trends from 1982 to 1999 », *International Journal of Biometeorology*, vol. 45, p. 184-190.

TUCKER, C.J., C.L. VANPRAET, J. SHARMAN et G. VAN ITTERSUM. 1985. « Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980-1984 », *Remote Sensing of Environment*, vol. 17, p. 233-249.

U. S. GEOLOGICAL SURVEY. 2005. Landsat project. Accessible à l'adresse http://landsat.usgs.gov/

U. S. GEOLOGICAL SURVEY. 2007. Landsat 5 Thematic Mapper (TM) lookup table (LUT). Accessible à l'adresse http://landsat.usgs.gov/science_L5_cpf.php

UNIVERSITY OF MARYLAND. 2008. Global Land Cover Facility. *Landsat imagery*. Accessible à l'adresse http://glcf.umiacs.umd.edu/data/landsat/

Tableau 1. Données Landsat utilisées pour la téléanalyse des changements dans la végétation au Refuge d'oiseaux migrateurs du delta de la rivière Anderson, Territoires du Nord-Ouest, de 1972 à 2003

Année	Jour julien	Mois-jour	Landsat (capteur)	Archive[a]	Piste, cadre	Bande rouge[b]		Bande proche infrarouge[b]	
						Pente	Décalage	Pente	Décalage
1972	208	26 juil.	1 (MSS)	USGS	Pi65Ca11	***1,235***	***–0,0006***	***0,795***	***0,0217***
1974	197	16 juil.	1 (MSS)	USGS	Pi65Ca11	***1,342***	***–0,0034***	***1,686***	***0,0283***
1978	184	3 juil.	2 (MSS)	GLCF	Pi67Ca11	***2,280***	***0,0091***	***3,417***	***–0,0175***
1982	192	11 juil.	3 (MSS)	MDA	Pi66Ca11	***1,685***	***0,0294***	***1,478***	***0,0158***
1985	219	7 août	5 (TM)	MDA	Pi62Ca11	1,040	–1,1700	0,873	–1,510
1986	199	18 juil.	5 (MSS)	USGS	Pi60Ca11	1,386	3,0000	0,945	3,0000
1986	199	18 juil.	5 (TM)	MDA	Pi60Ca11	1,040	–1,1700	0,873	–1,5100
1988	182	30 juin	5 (TM)	GLCF	Pi60Ca11	***1,362***	***-0,0068***	***1,167***	***–0,0076***
1992	200	18 juil.	5 (TM)	GLCF	Pi61Ca11	***1,082***	***0,0084***	***0,937***	***0,0285***
1995	185	4 juil.	5 (TM)	MDA	Pi60Ca11	1,040	–1,1700	0,873	–1,5100
1997	206	25 juil.	5 (TM)	MDA	Pi60Ca11	1,040	–1,1700	0,873	–1,5100
2000	205	23 juil.	7 (ETM)	MDA	Pi62Ca11	0,619	–5,0000	0,637	–5,1000
2003	214	2 août	5 (TM)	MDA	Pi61Ca11	1,040	–1,1700	0,873	–1,5100

[a] Archives de données : U. S. Geological Survey EROS Data Center (USGS); Global Land Cover Facility de la University of Maryland (GLCF); MacDonald, Dettweiller and Associates Ltd. (MDA).

[b] Les valeurs de gain et de décalage utilisées pour l'étalonnage à la luminance (lorsqu'elles étaient disponibles) sont en caractères ordinaires. Lorsque ces valeurs n'étaient pas disponibles ou justes, les coefficients de pente et de décalage ont été normalisés à la valeur numérique en gras et en italique en fonction de la scène du Thematic Mapper de 1986.

Tableau 2. Indice de végétation par différence normalisée (IVDN) moyen dans les régions d'intérêt du Refuge d'oiseaux migrateurs du delta de la rivière Anderson, et températures moyennes de juin à Tuktoyaktuk, Territoires du Nord-Ouest, de 1972 à 2003

		Indice de végétation par différence normalisée et température selon l'année											
Région d'intérêt	Sup. (km^2)	1972	1974	1978	1982	1985	1986	1988	1992	1995	1997	2000	2003
Hautes terres	60,46	0,570	0,474	0,449	0,570	0,525	0,555	0,535	0,557	0,605	0,595	0,614	0,583
Îles extérieures	12,52	0,369	0,259	0,212	0,277	0,286	0,262	0,231	0,185	0,259	0,246	0,187	0,174
Partie occidentale du delta	14,37	0,418	0,326	0,266	0,377	0,349	0,348	0,312	0,281	0,372	0,347	0,355	0,263
Delta intérieur	38,62	0,540	0,453	0,382	0,528	0,525	0,543	0,507	0,498	0,557	0,553	0,538	0,539
Île Canoe	0,14	0,388	0,273	0,247	0,348	0,360	0,353	0,291	0,193	0,270	0,261	0,183	0,178
Île Bluff	0,31	0,386	0,302	0,270	0,378	0,402	0,402	0,328	0,292	0,346	0,354	0,291	0,317
Îles Flat, Jaeger et Brant	3,01	0,304	0,200	0,170	0,199	0,217	0,183	0,161	0,121	0,201	0,182	0,106	0,120
Îles Oil Drum et Gull	0,72	0,211	0,087	0,055	0,127	0,150	0,141	0,141	0,072	0,156	0,137	0,089	0,073
Île Fox Den	6,41	0,426	0,317	0,256	0,338	0,343	0,322	0,282	0,236	0,303	0,291	0,248	0,218
Île Triangle	1,71	0,328	0,202	0,170	0,222	0,225	0,199	0,185	0,151	0,230	0,225	0,135	0,130
Grassy Point	0,15	0,499	0,408	0,276	0,361	0,310	0,262	0,239	0,091	0,214	0,181	0,142	0,116
Température moyenne en juin (^oC) à Tuktoyaktuk, T.N.-O.	—	4,7	1,9	2,6	5,4	6,0	4,5	7,9	6,3	8,0	8,6	6,6	5,2

Tableau 3. Variations temporelles des indices de végétation par différence normalisée (IVDN) dans chacune des régions d'intérêt du Refuge d'oiseaux migrateurs du delta de la rivière Anderson, de 1972 à 2003

Région d'intérêt	Régression de l'IVDN en fonction de l'année (x)[a]	R^2	P[b]	Pourcentage total de variation de l'IVDN, de 1972 à 2003	% de la superficie montrant :			Quantité de l'habitat (ha) perdu ou dégradé[c]
					des amélio-rations importantes	des dommages importants	aucun changement important	
Grandes régions d'intérêt								
Hautes terres	0,0034x + 0,4994	0,463	**0,015**	21,1	64	–0,01	36	0,9
Îles extérieures	–0,0037x + 0,3031	0,467	**0,014**	–37,5	3	45	52	567,2
Partie ouest du delta	–0,0014x + 0,3559	0,085	0,358	–11,9	9	18	73	256,3
Delta intérieur	0,0025x + 0,4738	0,259	0,091	16,6	30	1	69	53,3
Sous-régions d'intérêt (dans les îles extérieures)								
Île Canoe	–0,0048x + 0,3544	0,455	**0,016**	–42,2	0	52	48	7,6
Île Bluff	–0,0009x + 0,3531	0,039	0,536	–7,9	3	7	90	2,2
Îles Flat, Jaeger et Brant	–0,0038x + 0,2401	0,524	**0,008**	–49,3	0	50	50	151,5
Îles Oil Drum et Gull	–0,0012x + 0,1394	0,077	0,3835	–27,6	2	12	86	8,6
Île Fox Den	–0,0039x + 0,3601	0,483	**0,0121**	–33,9	6	50	44	322,6
Île Triangle	–0,0032x + 0,2504	0,361	**0,0387**	–39,6	0	35	64	60,4
Grassy Point	–0,0109x + 0,4284	0,803	**< 0,0001**	–78,6	0	92	8	13,6

[a] Le point d'intersection de l'équation de régression correspond à la valeur estimée de l'IVDN au début de l'étude (1972), et le coefficient de pente (*b*) correspond au changement attendu de l'IVDN par année. L'estimation du pourcentage total de variation de l'IVDN est fondée sur les équations de régression.

[b] Les régressions statistiquement significatives ($P < 0,05$) de l'IVDN en fonction de l'année figurent en caractères gras.

[c] Superficie des zones de réduction statistiquement significative de l'IVDN selon une évaluation pixel par pixel et par régression linéaire.

Tableau 4. Variations temporelles des indices de végétation par différence normalisée (IVDN) dans chacune des classes thématiques du Refuge d'oiseaux migrateurs du delta de la rivière Anderson, de 1972 à 2003

Classe thématique définitive	Régression de l'IVDN en fonction de l'année (x)[a]	R^2	P[b]	Variation totale de l'IVDN de 1972 à 2003	Pourcentage total de variation de l'IVDN de 1972 à 2003
Classe I	–0,0035x + 0,2339	0,412	**0,025**	–0,110	–46,9
Classe II	–0,0059x + 0,3816	0,639	**0,002**	–0,184	–48,2
Classe III	0,0001x + 0,3673	0,001	0,932	0,004	1,1
Classe IV	0,0022x + 0,4487	0,231	0,114	0,069	15,4
Classe V	0,0034x + 0,5091	0,477	**0,013**	0,106	20,9

[a] Le point d'intersection de l'équation de régression correspond à la valeur estimée de l'IVDN au début de l'étude (1972), et le coefficient de pente (*b*) correspond au changement attendu de l'IVDN par année. Les estimations de la variation totale de l'IVDN et du pourcentage total de variation de l'IVDN sont fondées sur les équations de régression.

[b] Les régressions statistiquement significatives ($P < 0,05$) de l'IVDN en fonction de l'année figurent en caractères gras.

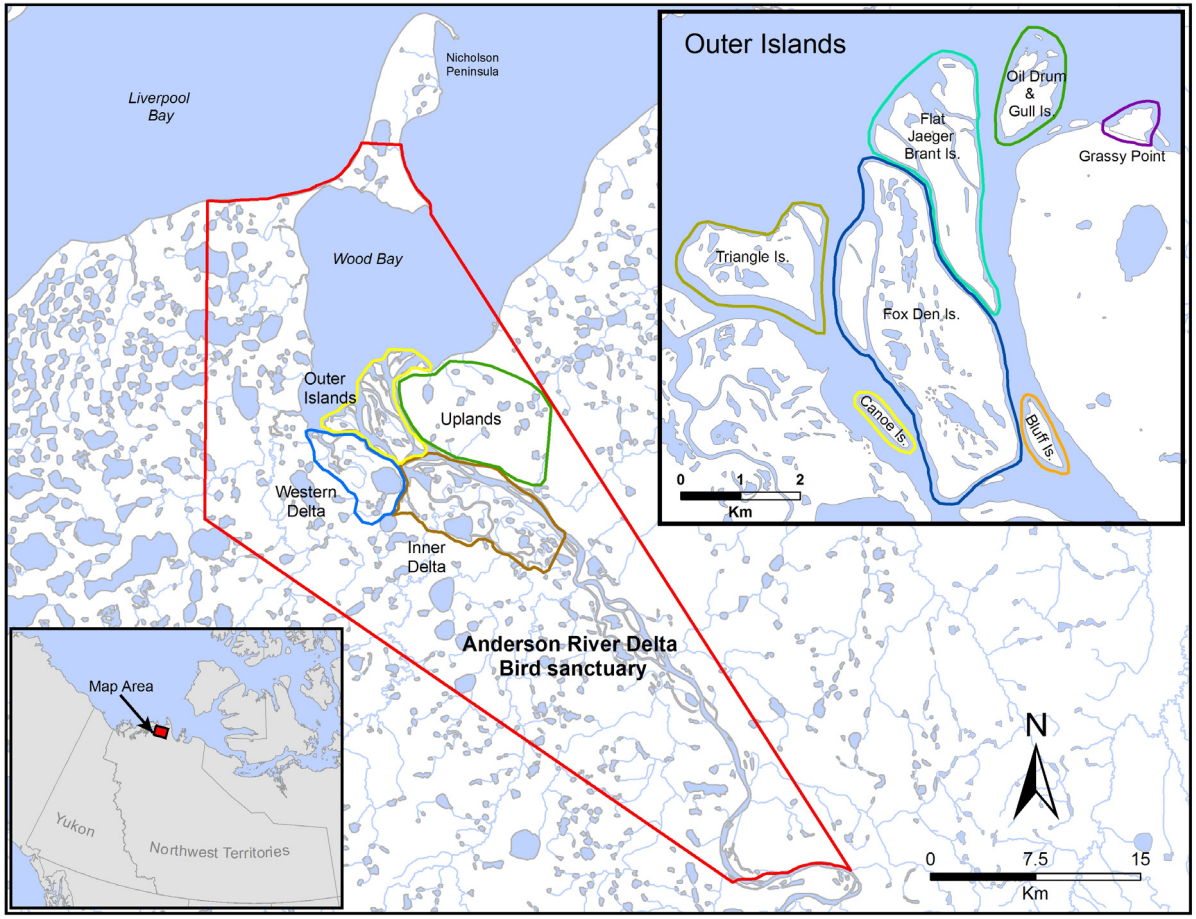
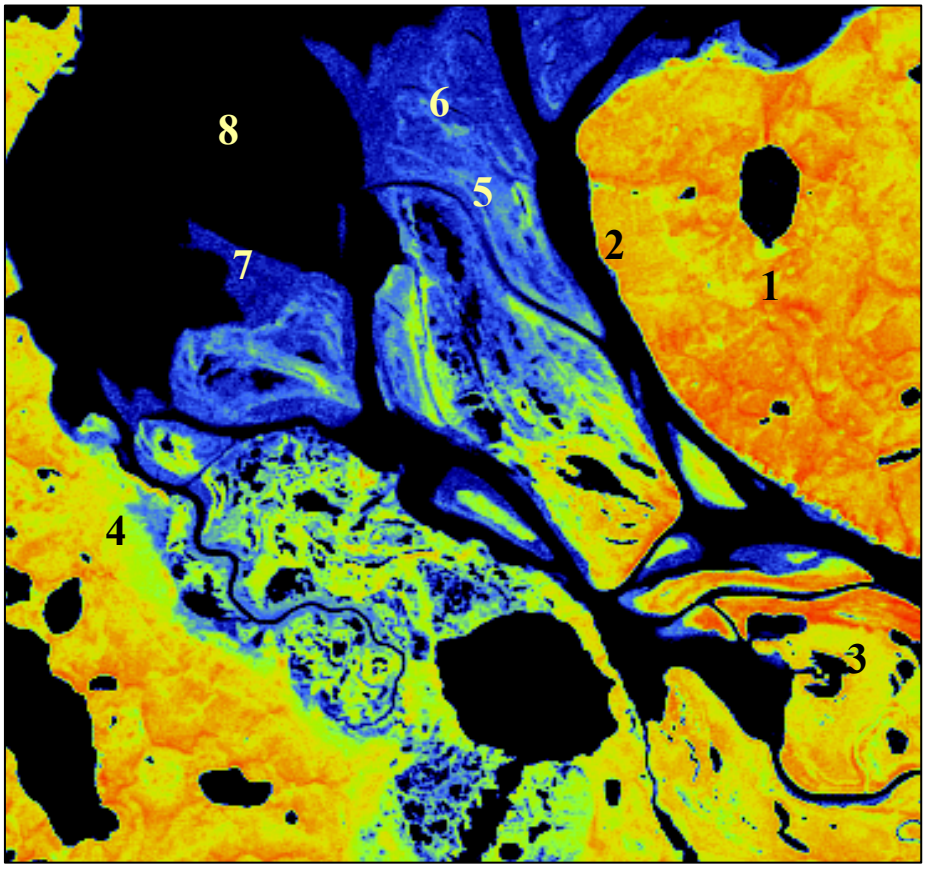


Figure 1. Refuge d'oiseaux migrateurs du delta de la rivière Anderson, Territoires du Nord-Ouest, avec les quatre grandes régions d'intérêt visées par l'étude et les sept sous-régions d'intérêt situées dans les îles extérieures du delta de la rivière Anderson



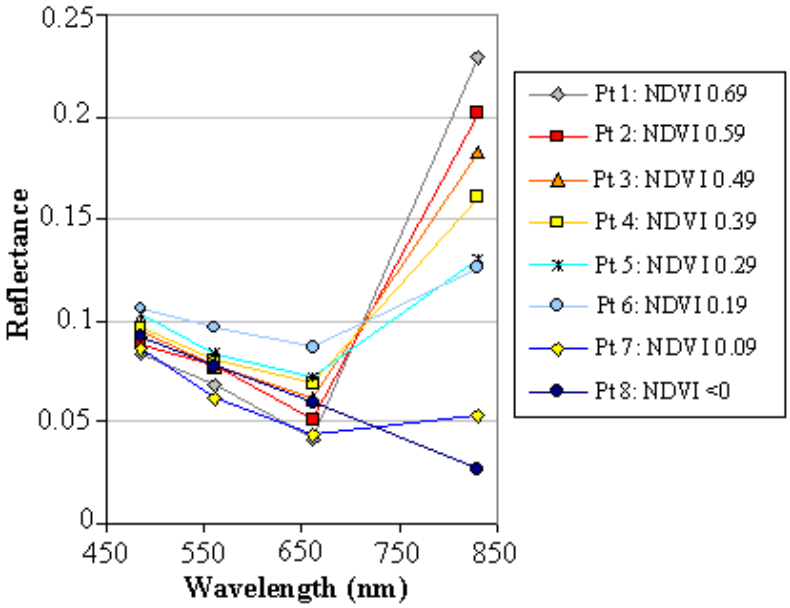


Figure 2. Image de l'indice de végétation par différence normalisée (IVDN) au 18 juillet 1986, montrant les graphiques de réflectance et la valeur de l'IVDN résultante aux 8 points numérotés dans l'image

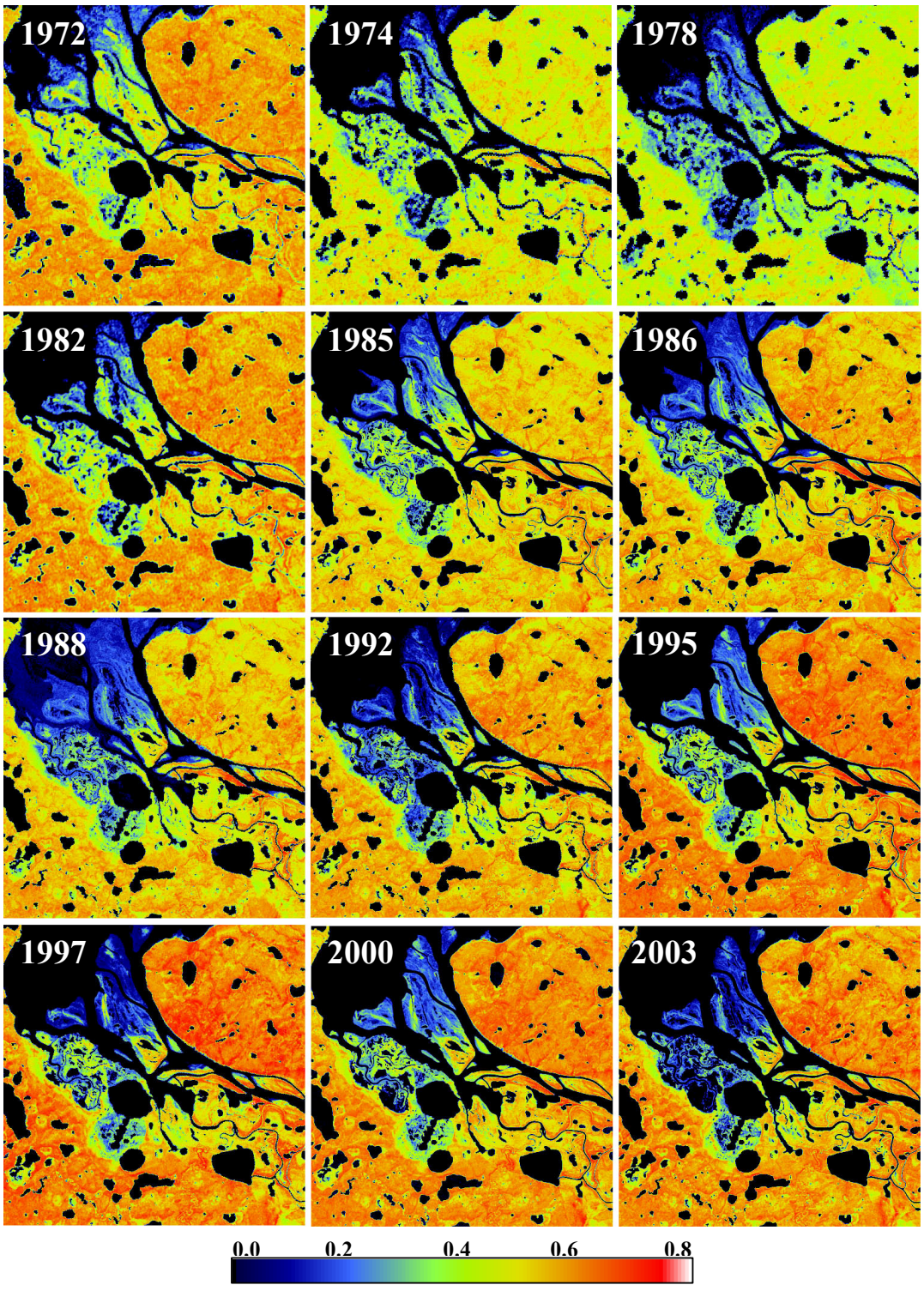


Figure 3. Images de l'indice de végétation par différence normalisée (IVDN) dans le delta de la rivière Anderson, de 1972 à 2003. L'augmentation de l'IVDN est marquée par le passage du bleu au blanc dans l'image. Les plans d'eau paraissent en noir

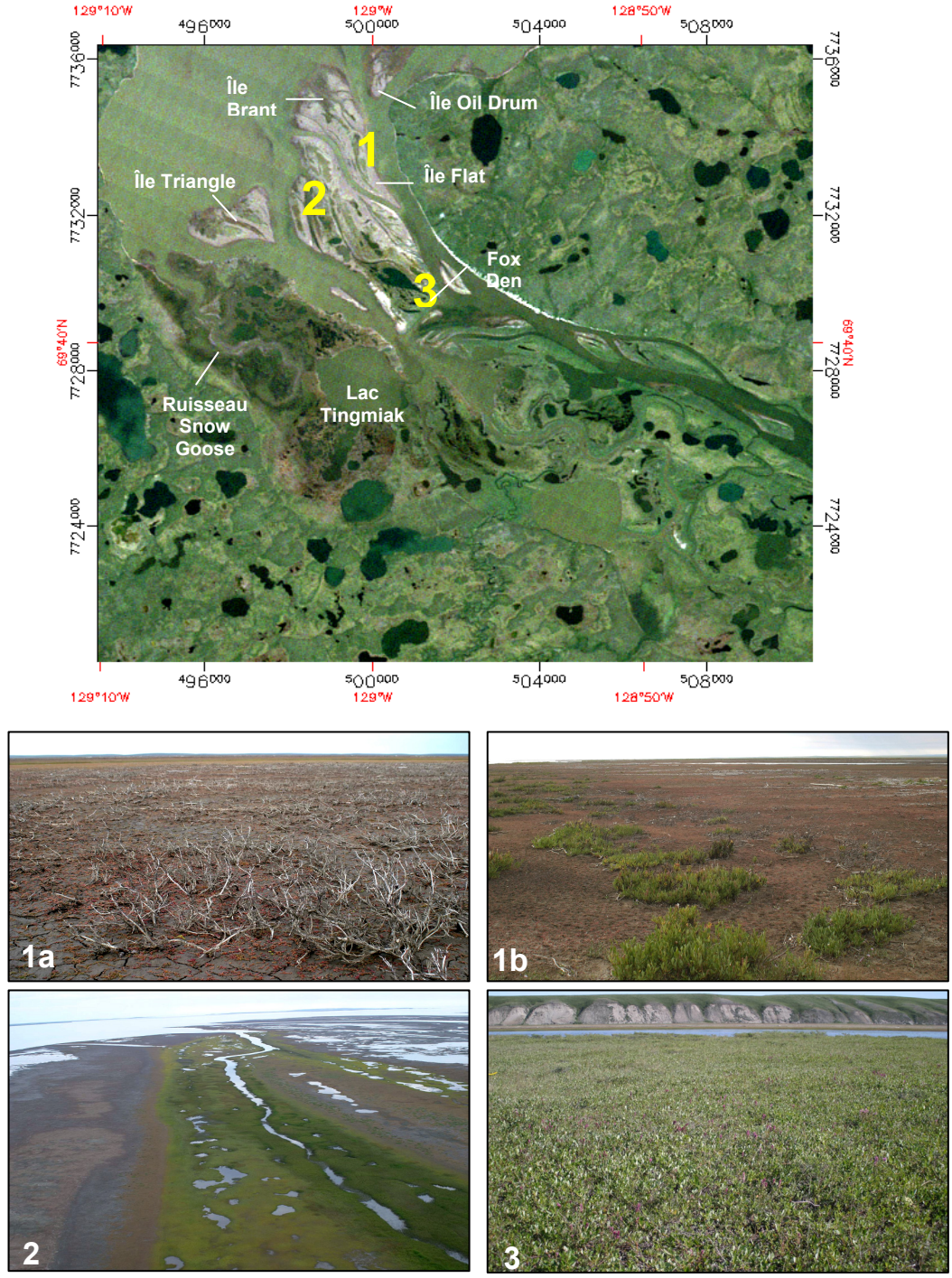


Figure 4. L'image du haut est une représentation en fausses couleurs de la zone d'étude dérivée des bandes 3, 2 et 1 d'une scène du capteur TM de Landsat-5 prise le 2 août 2003. Les photos du bas ont été prises aux sites n°s 1a, 1b et 2 le 10 août 2004, et au site n° 3 le 2 août 2003. Le site 1a correspond à une zone stérile ou pratiquement dénuée de toute végétation dont l'indice de végétation par différence normalisée (IVDN) est de 0,25 ou moins. Le site 1b correspond à des zones ayant habituellement un peu de végétation (IVDN de 0,25 à 0,30). Le site 2 comprend une végétation relativement abondante (IVDN de 0,3 ou plus). La photographie 3 présente la couverture végétale abondante des zones de végétation de plaine abondante ou de toundra d'arbustes nains (IVDN de 0,4 ou plus)

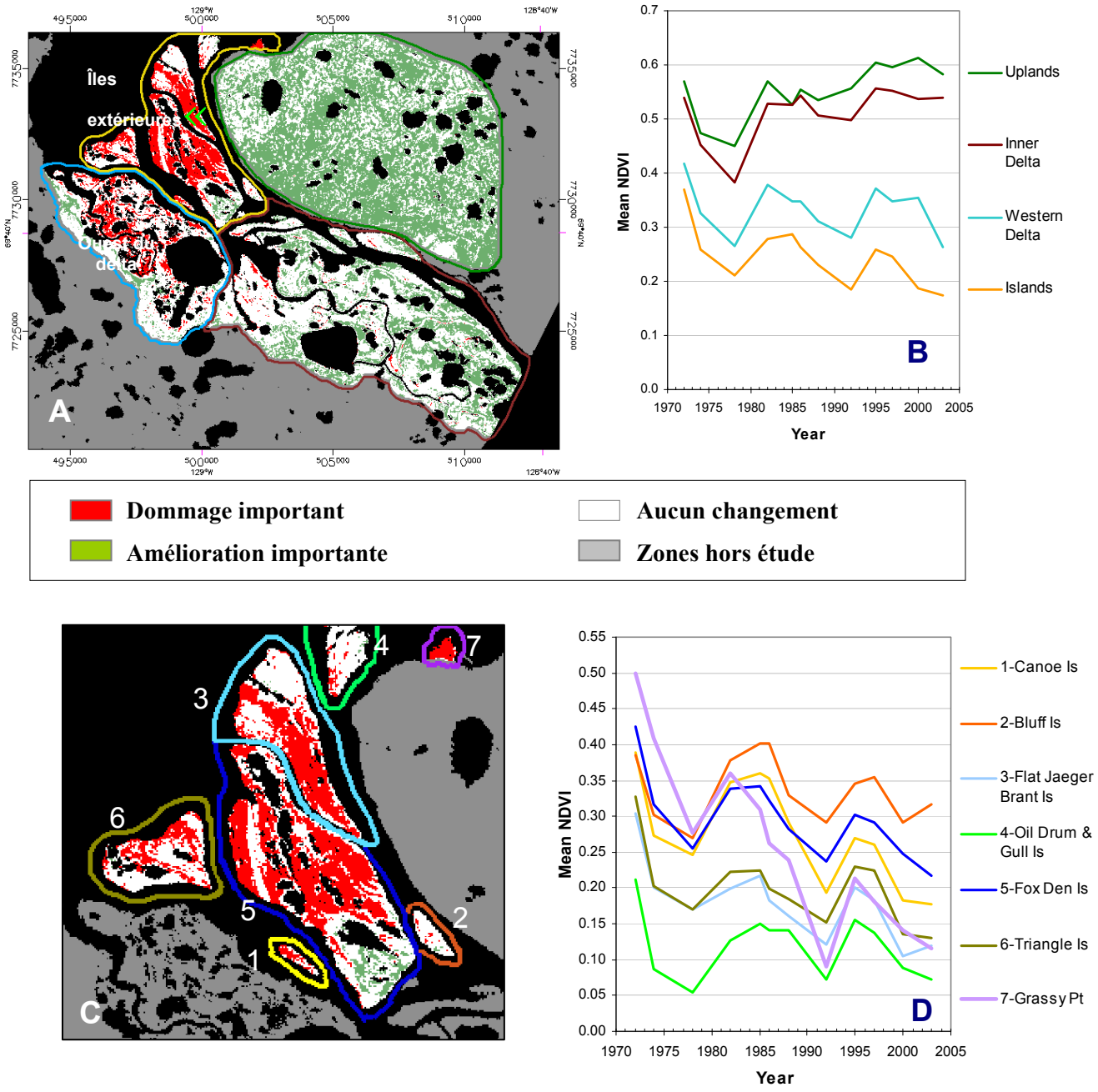


Figure 5. A : Tracé des quatre grandes régions d'intérêt montrant les zones de variation de l'IVDN au cours des 31 années à l'étude. B : Graphique de la série chronologique de l'IVDN de chaque région. C : Tracé des sept sous-régions d'intérêt dans les îles extérieures, montrant les zones de variation. D : Graphique de la série chronologique de l'IVDN dans chaque région

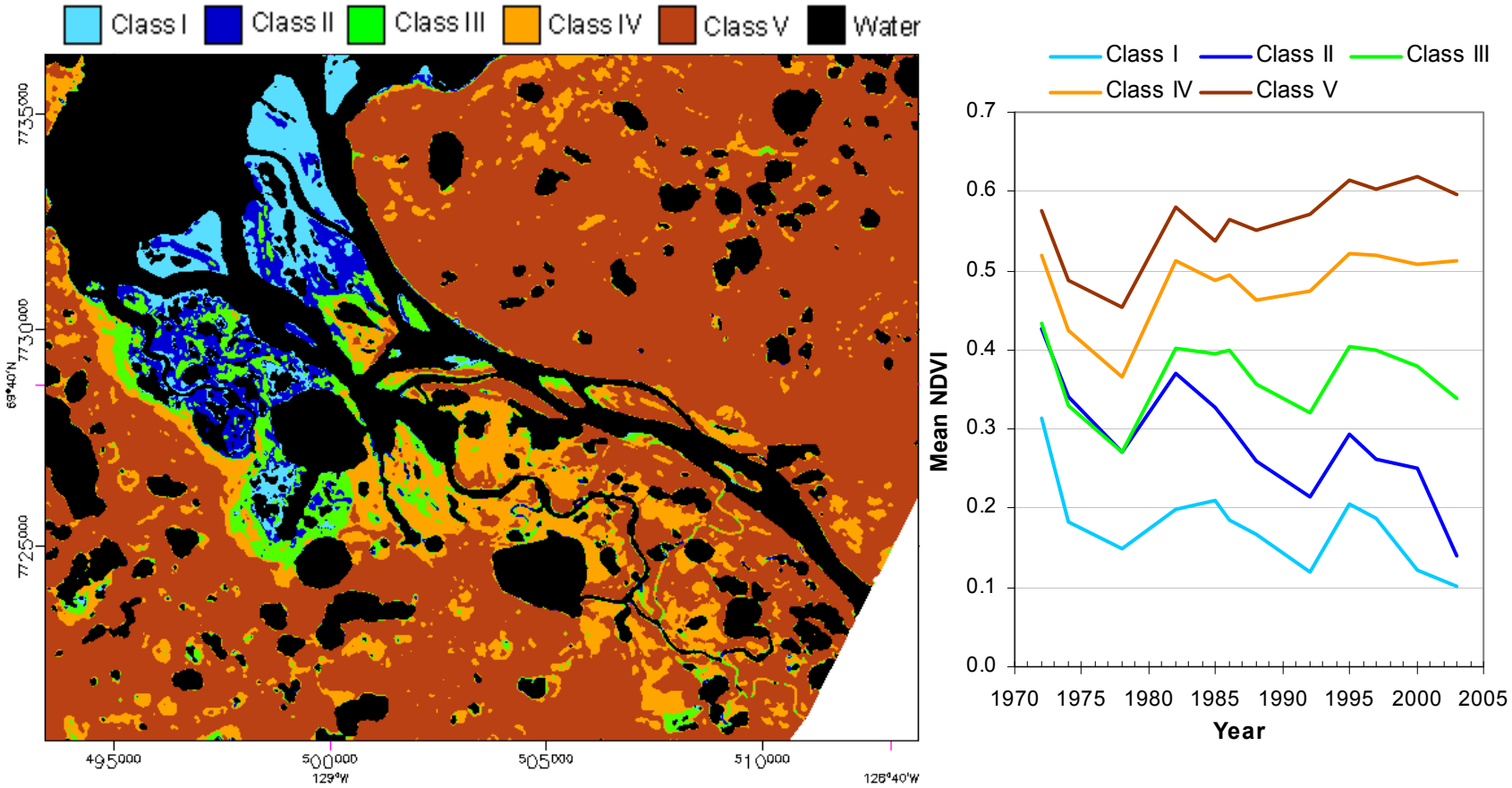


Figure 6. Cinq classes thématiques de changements dans la végétation au fil du temps dans le Refuge d'oiseaux migrateurs du delta de la rivière Anderson, Territoires du Nord-Ouest, de 1972 à 2003. Des tendances à la baisse statistiquement significatives des indices de végétation par différence normalisée (IVDN) apparaissent dans les classes I et II des basses terres, et une tendance positive est observée dans la toundra des hautes terres (classe V)