UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

TÉLÉDÉTECTION DU VERDISSEMENT DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE KOROC DANS LE PARC NATIONAL DE KUURURJUAQ, NUNAVIK

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
DAVID DE COURVILLE

NOVEMBRE 2024

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT (M. Sc.)

TÉLÉDÉTECTION DU VERDISSEMENT DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE KOROC DANS LE PARC NATIONAL DE KUURURJUAQ, NUNAVIK

PAR

DAVID DE COURVILLE

Alexandre Roy	
Directeur de recherche	Université du Québec à Trois-Rivières
Esther Lévesque	
Codirectrice de recherche	Université du Québec à Trois-Rivières
Vincent Maire	
Évaluateur	Université du Québec à Trois-Rivières
Jean-Pierre Dedieu	
Évaluateur externe	Université de Grenoble Alpes

Mémoire déposé le 2 août 2024

REMERCIEMENTS

Je veux remercier mon directeur de recherche Alexandre Roy et ma co-directrice Esther Lévesque. Tout d'abord pour m'avoir offert l'opportunité de poursuivre mes études en m'offrant l'opportunité de réaliser une maîtrise de recherche et de m'avoir soutenu, encouragé et supporté tout au long de mon parcours et de mon cheminement. Grâce à leur encadrement et leurs supports, j'ai acquis les compétences requises pour accomplir ce projet de recherche et j'ai vécu des événements exceptionnels et mémorables en plus de pouvoir contribuer à la recherche scientifique dans le Nunavik et d'avoir pu visiter des endroits remarquables. J'aimerais aussi remercier et souligner la contribution des membres de mon comité Jean-Pierre Dedieu pour ses conseils et ses recommandations sur la méthodologie et l'interprétation des résultats ainsi que Vincent Maire et Laurent Lamarque pour leurs conseils et les explications des résultats de la recherche.

Je tiens également à remercier et mettre en valeur la collaboration de la communauté de Kangiqsualujjuaq pour son hospitalité, les membres du Parc national de Kuururjuaq : le directeur Charlie Munick, le coordonnateur aux opérations Jari Leduc et le garde-parc Randall Morgan pour la coordination du travail de terrain, pour leur expertise en matière de sécurité et d'organisation en milieu éloigné et du partage de leur connaissance du territoire. Je remercie aussi les employés de Kativik Regional Government, Isabeau Pratt et Olivier Trudel pour leurs présences et de leur aide sur le terrain. De même, je remercie personnellement Estéban Hamel Jomphe pour son temps et son expertise lors des analyses des images satellitaires et sur l'utilisation des logiciels de statistiques, Maxime Clermont pour ses conseils sur l'utilisation du drone et aussi Marilie Trudel et Caroline Macarez pour leurs expertises et la caractérisation de la végétation sur le terrain.

Cette étude a été supportée par l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), le Centre d'Étude Nordique (CEN), le Parc Nunavik, le village Nordique de Kangiqsualujjaq, le Centre de Recherche sur les interactions Bassins Versants - Écosystèmes Aquatiques (RIVE), le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), le Programme de formation scientifique dans le Nord (PFSN).

RÉSUMÉ

Le changement climatique apporte un réchauffement de la température moyenne annuelle sans précédent dans les régions nordiques. L'augmentation de la température favorise la croissance de la végétation et particulièrement celle des arbustes érigés. Le couvert des arbustes érigés est en expansion depuis une trentaine d'années dans les régions de l'Arctique. Ce phénomène est souvent défini par le terme de l'arbustation. L'activité photosynthétique par l'entremise des chloroplastes et de la chlorophylle peut être observée avec les images des satellites. L'indice de végétation du *Normalised Difference Vegetation Index* (NDVI) est basé sur la différence de la réflectance et l'absorption du rayonnement solaire des attributs de la végétation impliqués dans la photosynthèse. Le verdissement est l'interprétation de l'augmentation de la biomasse végétale avec l'indice de végétation du NDVI des images satellitaires. Dans le Parc national de Kuururjuaq au Nunavik, le bassin versant de la rivière Koroc présente une augmentation de sa couverture végétale. Avec l'utilisation des images satellitaires, la télédétection devient un outil efficace afin de quantifier et de spatialiser l'intensité du changement de la végétation. Le but de ce mémoire est de quantifier et de qualifier le verdissement du bassin versant de la rivière Koroc, en utilisant la télédétection jumelée avec une caractérisation *in situ* de la végétation. Le premier objectif spécifique est de quantifier et de spatialiser le verdissement à partir de la série d'images satellitaires Landsat de 1984 à 2020 avec l'indice de végétation du NDVI. Le deuxième objectif spécifique consiste à évaluer la réponse de la végétation impliquée dans les processus du verdissement en utilisant la caractérisation *in situ* de la végétation. Les résultats des images Landsat montrent que le bassin versant de la rivière Koroc verdit. Le verdissement est plus concentré au niveau des vallées et dans le bas des pentes de la rivière Koroc et de ses principaux tributaires. Les zones de la forêt boréale et de la toundra arbustive érigée démontrent la plus forte augmentation de l'indice NDVI depuis 1984. La caractérisation *in situ* et les analyses statistiques de random forest indiquent que le verdissement est influencé par le couvert de *Betula glandulosa*. L'augmentation de l'indice du NDVI ainsi que l'étendu et les nombreux couverts de *B. glandulosa* propose que l'arbustation est l'un des principaux processus du verdissement du bassin versant de la rivière Koroc. Cependant, en forêt boréale, le verdissement n'est pas expliqué par le *B. glandulosa*, mais semble plus associer avec la présence d'un couvert de végétation de sous-bois tels les rhododendrons spp. et les mousses. Le projet permet de mieux comprendre les processus du changement de NDVI par la télédétection et par les observations *in situ*. Les résultats de cette étude serviront d'outil et de base de données pour l'administration et la gestion du parc pour la protection de la végétation et de la faune présente dans le parc national de Kuururjuaq et du bassin versant de la rivière Koroc.

Mots-clés : Verdissement, arbustation, NDVI, Landsat, télédétection, Nunavik

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS iii

RÉSUMÉ iv

LISTE DES TABLEAUX viii

LISTE DES FIGURES ix

CHAPITRE I 1

INTRODUCTION 1

1.1. Mise en contexte 1

1.2. Problématique 9

1.3. Objectifs et hypothèses 10

CHAPITRE II 12

CADRE THÉORIQUE 12

2.1. Les changements de la végétation de l'Arctique 12

2.1.1. Impact du réchauffement sur la végétation 12

2.1.2. Processus général du changement de la végétation 14

2.1.3. Processus général du brunissement 16

2.2. Le verdissement selon le type de végétation 18

2.2.1. Le verdissement de la forêt boréale 18

2.2.2. Le verdissement des arbustes érigés 20

2.2.3. Le verdissement de la toundra prostrée de l'Arctique et du Nunavik 22

2.2.4. Les impacts du verdissement 23

2.4. Télédétection de la végétation 25

2.4.1. Les indices de végétation 25

2.4.2. Les plateformes satellitaires Landsat 27

2.4.3. Complexité de l'interprétation des indices de la végétation 28

2.4.4. Véhicule aérien sans pilote 28

CHAPITRE III 30

CARACTÉRISATION DU CHANGEMENT DE LA VÉGÉTATION DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE KOROC AU NUNAVIK 30

1. Introduction 30

2. Méthode 32
2.1. Site de l'étude 32
2.1.1. Le bassin versant de la rivière Koroc 32
2.1.2. Classification de la végétation 35
2.1.3. Les images satellitaires Landsat 36
2.1.4. Plan d'échantillonnage *in situ* de la végétation 38
2.1.5. Les variables cartographiques 40
2.2. Les analyses 41
2.2.1. Identification du changement de l'indice du NDVI 41
2.2.2. Caractérisation du verdissement du bassin versant de la rivière Koroc 42
2.2.3. L'influence des variables sur le ΔNDVImax 42
3. Résultat 44
3.1. Caractérisation de la végétation du bassin versant de la rivière Koroc 44
3.1.1. Caractérisation de la végétation 44
3.1.2. La matrice de confusion des classes de végétation 45
3.2. Changement de l'indice du NDVI du bassin versant de la rivière Koroc (1984-2020) 47
3.2.1. ΔNDVImax du bassin versant de la rivière Koroc 47
3.2.2. Le ΔNDVImax selon les classes de végétation 48
3.2.3. Le ΔNDVImaxRR du bassin versant de la rivière Koroc 49
3.2.4. Le ΔNDVImaxRR selon les classes de végétation 50
3.3. Les processus du verdissement du bassin versant de la rivière Koroc 51
3.3.1. L'importance des variables prédictives sur le verdissement 51
3.3.2. La modélisation et l'influence des variables sur le ΔNDVImax 53
3.3.3. Les processus du verdissement par les modèles statistiques linéaires 54
4. Discussion 57
4.1. Changement de l'indice NDVI du bassin versant de la rivière Koroc 58
4.2. Processus du verdissement *in situ* 59
5. Conclusion 64
Remerciements 65
Références bibliographiques 66
CHAPITRE IV 70
DISCUSSION ET CONCLUSION 70
4.1. Le projet de recherche et les objectifs du mémoire de maîtrise 70
4.2. Les résultats généraux du mémoire 71

4.2.1. Les résultats de la caractérisation *in situ* et des images satellites de la série Landsat.... 71
4.3. Portée du projet 72
4.3.1. Contribution supplémentaire au projet de recherche sur le verdissement du BVK..... 72
4.3.2. Les images de drones et la série de satellites Sentinel-2 73
4.3.3. Conclusion 74
4.3.4. Applications futures 74
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 76
Annexe A 86
Recouvrement et fréquence des espèces végétales répertoriées et mesurées sur les quadrats dans le bassin versant de la rivière Koroc 86

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Classes de végétation par type de couvert de Bayle et *al*. (2022) selon les normes des codes de terrain de la cartographie de Leboeuf et *al*. (2018)..... 35

Tableau 3.2 : Synthèse des variables prédictives d'analyses du ΔNDVImax et du ΔNDVImaxRR avec le mode d'acquisition de la donnée..... 43

Tableau 3.3 : Recouvrement et fréquence des espèces végétales répertoriées et mesurées sur les quadrats dans le bassin versant de la rivière Koroc. Abrégé à 0,5 % de recouvrement, où C % représente le pourcentage de recouvrement et où F % représente le pourcentage de fréquence..... 46

Tableau 3.4 : Matrice de confusion des 104 quadrats de caractérisation de la végétation observées sur le terrain et entre les classes de végétation de la cartographie écologique de Leboeuf et *al*. (2018)..... 47

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Tendance du NDVI de 1984 à 2012 au Canada (tiré de Ju et Masek, 2016). 4

Figure 1.2 : Les zones bioclimatiques du Nunavik (adapté de Moreau et *al*., 2020). 8

Figure 1.3 : Localisation du bassin versant de la rivière Koroc au Nunavik (en mortaise). 10

Figure 2.1 : Les trois processus de l'arbustation (Myers-Smith et *al.*, 2011)..... 21

Figure 2.2 : Signature spectrale de la végétation. 26

Figure 3.1 : Les quatre régions physiographiques du bassin versant de la rivière Koroc (adapté de Despont, 2004; ARK, 2005 et Leboeuf et *al*., 2018)..... 33

Figure 3.2 : Classe de végétation du bassin versant de la rivière Koroc (adapté de Leboeuf et *al*., 2018). 36

Figure 3.3 : Topographie du bassin versant de la rivière Koroc (a) et les sites d'études du camp Qurlutuarjuq (b) et du haut Koroc et mont d'Iberville (c). 39

Figure 3.4 : Exemple d'une zone d'échantillonnage terrain des quadrats de végétation. Les 25 points montrent la caractérisation de la végétation et les pixels, le changement du ΔNDVImax. 41

Figure 3.5 : ΔNDVImax de 1984-2022 sur le bassin versant de la rivière Koroc. 48

Figure 3.6 : Distribution du ΔNDVImax par classe de végétation du bassin versant de la rivière Koroc. 49

Figure 3.7 : ΔNDVImaxRR de 1984-2022 sur le bassin versant de la rivière Koroc..... 50

Figure 3.8 : Distribution du ΔNDVImaxRR par classe de végétation du bassin versant de la rivière Koroc. 51

Figure 3.9 : Importance des variables prédictrices basée sur le modèle de forêt d'arbres de décision utilisant l'ensemble des variables (RF_ensemble) expliquant les variations du ΔNDVImax. Le modèle RF_ensemble à un coefficient de détermination de R^2 = 0,35. 52

Figure 3.10 : Modèle de forêt d'arbres de décision (RF_raffiné)) de régression de l'importance des 8 plus influentes variables observées et mesurées sur le terrain en lien avec le ΔNDVImax. Le modèle RF_raffiné présente un R^2 =0,40. 53

Figure 3.11 : Arbre de décision de l'influence des variables importantes et de leur influence sur le ΔNDVImax. (R^2 = 0,54)..... 54

Figure 3.12 : La corrélation du couvert de *Betula* caractérisé sur le terrain avec le ΔNDVImax dans chaque classe de végétation..... 55

Figure 3.13 : Relation entre le couvert des *Ericacea* mesuré sur le terrain et le ΔNDVImax dans les classes de végétation des VMH, des SAV, des EST et des PST..... 56

Figure 3.14 : Relation entre le couvert des (a) *Rhododendron* et des (b) lichens avec le ΔNDVImax dans les classes de la forêt boréale (BF) caractérisé sur le terrain..... 57

CHAPITRE I

INTRODUCTION

1.1. Mise en contexte

Le changement climatique influence le climat des régions nordiques en interagissant avec la température de surface, le régime des précipitations, les vents et la pression atmosphérique (ACIA, 2005). L'une de ces influences serait l'augmentation de la température moyenne annuelle de l'Arctique (ACIA, 2005; Brown et *al.*, 2012; Brown et *al.*, 2017; Box et *al.*, 2019; Cohen et *al.*, 2019; Rantanen et *al.*, 2022). L'augmentation de la température de l'Arctique serait plus rapide que la moyenne mondiale (Rantanen et *al.*, 2022). La rapidité de ce changement de la température serait due à des processus de rétroactions positives (ACIA, 2005; Pithan et Mauritsen, 2014) tels que le changement de l'albédo de surface dû à la réduction de la durée d'englacement et de la neige (Pithan et Mauritsen, 2014; Jenkins et Dai, 2021) et des flux de radiation de l'océan Arctique en chaleur latente (Jenkins et Dai, 2021; Rantanen et *al.*, 2022). Ces effets de rétroaction sont connus sous le terme « Arctic Amplification » (AA) (ACIA, 2005; Pithan et Mauritsen, 2014; Previdi et *al*., 2021) ou l'amplification de la température de l'Arctique. L'un des effets de l'AA est une hausse de la température et globalement, l'Arctique se réchauffe environ quatre fois plus rapidement que la moyenne mondiale (Rantanen et *al.*, 2022).

Ce changement climatique vient aussi influencer la température et l'écosystème de l'Arctique canadien (Brown et *al.*, 2017; Derksen et *al.*, 2019; Cohen et *al.*, 2019). La température moyenne de l'Arctique canadien a augmenté de 2,3°C depuis 1948, ce qui est 3 fois plus rapide que le reste du pays (Brown et *al.*, 2012; Cohen et *al.*, 2019). En outre, c'est durant la saison hivernale que la plus forte augmentation a eu lieu avec une moyenne de 4,3°C comparativement à 1,6°C pour la saison estivale (Cohen et *al.*, 2019; Davis et *al*., 2021b). Cette augmentation se fait ressentir au niveau des écosystèmes du nord du Canada (Pearson et *al.*, 2013; Niittynen et *al.*, 2020) et de la cryosphère (Brown et *al.*, 2017;

Derksen et *al.*, 2019), ce qui vient affecter la végétation en y prolongeant la saison de croissance des écosystèmes de la toundra Arctique et de la forêt boréale (Myeni et *al.*, 1997; Hinzman et *al.*, 2005).

La hausse de la température en Arctique réduit la durée du couvert de neige (Brown et *al.*, 2012; Brown et *al.*, 2017; Derksen et *al.*, 2019), ce qui fait augmenter la saison de croissance de la végétation (Brown et *al.*, 2012). Ces changements ont des impacts écologiques sur les écosystèmes (Myneni et *al*., 1997; Walther et *al.*, 2010; Myers-Smith et *al*., 2011, 2019b et 2020; Pearson et *al.*, 2013; Ford et *al.*, 2017). Un des impacts d'une plus longue saison de croissance est l'augmentation de la durée de la production de photosynthèse des végétaux (Myneni et *al*., 1997; Stow et *al.*, 2004; Walther, 2010; Cleland et *al.*, 2012) provoquant généralement une augmentation de la croissance verticale, une augmentation de la surface foliaire végétale (Baruah et *al*., 2017; Bjorkman et *al*., 2018; Myers-Smith et *al*., 2019b) ou un accroissement de leur aire de distribution (Myers-Smith et *al*., 2019b; Pearson et *al.*, 2013; Bjorkman et *al*., 2018). À terme, ces impacts font augmenter la biomasse végétale, qui est fréquemment liée à un plus fort couvert arbustif et ce phénomène est défini par l'arbustation « shrubification » (Myers-Smith et *al*., 2011).

Toutefois, la réponse des écosystèmes face aux changements climatiques n'est pas uniforme (Tremblay et *al.*, 2012; Tape et *al.*, 2012; Martin et *al.*, 2017; Myers-Smith et *al*., 2020; Davis et *al*., 2021b). Certaines régions éprouvent une augmentation des précipitations (nord-ouest de l'Ontario et le nord du Québec), tandis que le centre du Québec, et la taïga à l'ouest de la baie d'Hudson subissent une diminution des précipitations avec des périodes de stress hydriques plus fréquentes (Gautier et *al.*, 2015; Sulla-Menashe et *al.*, 2018). L'augmentation soudaine et rapide de la température de l'air provoque des réponses différentes selon les régions, mais le résultat le plus fréquent reste l'arbustation (Myers-Smith et *al.*, 2011; McManus et *al.*, 2012; Tape et *al.*, 2012; Myers-Smith et *al*., 2020). Par exemple, dans la zone boréale, le réchauffement peut entrainer l'arbustation dans des secteurs ayant subi une perturbation (Stow et *al.*, 2004; Myers-Smith et *al.*, 2011; Myers-Smith et Hik, 2018; Wang et *al.*, 2019; Larking et *al.*, 2021). Le réchauffement peut affecter la forêt boréale par une augmentation du régime de

perturbations qui peuvent faire augmenter le taux de mortalité des arbres (Kurz et *al.*, 2008; Peng et *al*., 2011; Gautier et *al.*, 2015; Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Wang et *al.*, 2019). Ces perturbations peuvent être dues au régime plus fréquent et plus intense de feux forestiers (Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Wang et *al.*, 2019), aux insectes ravageurs qui mènent à une mortalité plus élevée des arbres (Kurz et *al.*, 2008) ou par une augmentation des épisodes de sécheresses (Peng et *al*., 2011; Gautier et *al.*, 2015). Dans les zones qui ont subits une perturbation, les arbustes érigés (*Betula sp*.; *Alnus sp*.; *Salix sp*.) recolonisent souvent plus rapidement que les arbres (Myers-Smith et Hik, 2018) et cette recolonisation peut se faire au détriment des conifères (*Picea sp*.; *Larix sp*.; *Abies sp*.) de la forêt boréale (Dufour-Tremblay et *al.*, 2012; Wang et *al.*, 2019).

Afin de faire un suivi à grande échelle de la végétation de l'Arctique, des indices d'estimation de présence de végétation sont utilisés conjointement avec les images des plateformes satellitaires (Gitelson et *al.*, 1996; Gamon et Qiu, 1999; Sims et Gamon, 2002; Gitelson et *al.*, 2009). En effets, plusieurs espèces végétales communes dans les régions Arctiques (Parviainen et *al.*, 2010) dont les conifères, les plantes vasculaires et de même que certaines bryophytes (Bubier et *al*., 1997) ont des propriétés spectrales observables avec un capteur multispectral (Bubier et *al*., 1997; Gamon et Qiu, 1999; Gitelson et *al.*, 2009; Parviainen et *al.*, 2010; D'Odorico et *al.*, 2021). L'une de ces propriétés est l'absorption de la bande spectrale du rouge et la réflectance de la bande spectrale du proche infrarouge lors de la production de la photosynthèse par les propriétés biophysiques du végétal (Tucker, 1978; Gamon et Qiu, 1999; Gitelson et *al.*, 2009; Viña et Gitelson, 2011).

Cette caractéristique spectrale de la végétation permet de faire un indice spectral de la présence et de la quantité de la végétation observable avec les capteurs multispectral des plateformes satellitaires. L'indice du NDVI (*normalized difference vegetation index*) se base sur la différence entre la bande du rouge (R) et de celle du proche infrarouge (PIR) $NDVI = \frac{(\text{PIR} - \text{Rouge})}{(\text{PIR} + \text{Rouge})}$ lors du processus de la photosynthèse de la végétation (Tucker, 1978; Gitelson et *al.*, 1996; Gamon et Qiu, 1999). Avec le lancement de la série des satellites Landsat, les bandes spectrales du rouge et du proche infrarouge sont disponibles afin de calculer le NDVI (Holben, 1986; Ju et Masek, 2016; Myers-Smith et

al., 2020). L'indice de la végétation du NDVI peut être utilisé pour le suivi de la végétation des régions nordiques (Stow et *al.*, 2004; Ju et Masek, 2016; Myers-Smith et *al.*, 2020). L'observation du changement de la végétation par la télédétection satellitaire, donc de manière indirecte, se fait généralement par le changement de l'indice du NDVI. Communément, sur les images satellitaires, un indice élevé de NDVI est représenté avec la couleur verte, tandis que la couleur brune représente un indice faible ou négatif de cet indice. Ainsi, une augmentation de la biomasse végétale observée par télédétection est régulièrement appelée « greening » ou verdissement (Myers-Smith et *al*., 2011; Ju et Masek, 2016; Myers-Smith et *al*., 2020). Dans certains cas, une diminution de la biomasse végétale peut aussi être observée et ce phénomène est reconnu sous le terme de « browning » ou du brunissement (Ju et Masek, 2016; Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Myers-Smith et *al*., 2020; Berner et *al*., 2020). De façon générale, l'Arctique canadien voit sa couverture végétale augmenter (figure 1.1) (Myneni et *al.*, 1997; Pearson et *al.*, 2013; Ju et Masek, 2016; Myers-Smith et *al*., 2020; Berner et *al*., 2020; Bayle et *al*., 2022).

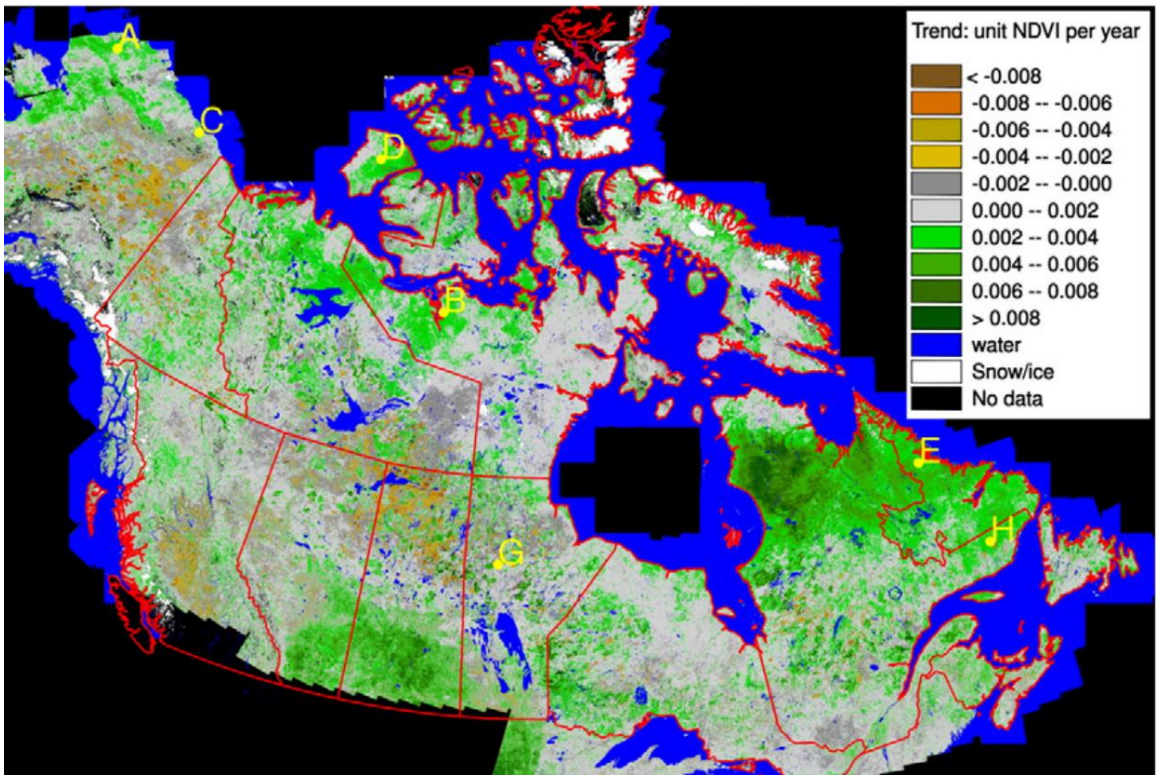


Figure 1.1 : Tendance du changement de l'indice de végétation NDVI entre 1984 et 2012 au Canada (tiré de Ju et Masek, 2016).

Cependant, sur une échelle régionale, l'une des difficultés concernant l'analyse des images satellitaires afin d'obtenir un indice de végétation suffisamment précis, se situe surtout au niveau de la résolution spectrale et de la résolution temporelle qui limitent l'interprétation du changement de la végétation (Gamon et Qiu, 1999; Roy et *al.*, 2008; Ju et Masek, 2016; Myers-Smith et *al.*, 2020). En effet, la qualité de l'interprétation du signal spectrale de la végétation est intrinsèquement reliée aux nombres d'images satellitaires et à la qualité de ceux-ci. La qualité d'une image satellite dépend des conditions météorologiques lors de la prise de l'image soit la luminosité, la couverture nuageuse, l'humidité au sol et le couvert de neige (Holben, 1986; Roy et *al.*, 2008; Ju et Masek, 2016; Myers-Smith et *al.*, 2020). Ces paramètres viennent ajouter une difficulté pour l'interprétation des images satellites afin d'obtenir avec précision un indice de la végétation (Roy et *al.*, 2008; Myers-Smith et *al.*, 2020).

Afin de pallier ces difficultés, des validations terrain peuvent être effectuées (Myers-Smith et *al.*, 2020; Davis et *al.*, 2021b; Larking et *al.*, 2021). Donc le suivi du verdissement peut être fait avec la série d'images satellites Landsat qui survole depuis plusieurs décennies le Nunavik (Davis et *al.*, 2021a). Par contre, l'aspect qualitatif du changement de la végétation reste peu connu dû aux difficultés occasionnées par l'accessibilité de ce territoire et une validation terrain viendrait pallier ce manque d'information (Myers-Smith et *al.*, 2020; Berner et *al.*, 2020; Davis et *al.*, 2021b).

Le changement climatique dans l'Arctique de l'est du Canada (Brown et *al.*, 2012; Rantanen et *al.*, 2022) modifie la composition de la végétation des écosystèmes et des zones bioclimatiques du Nunavik (Martin et *al.*, 2017; Moreau et *al.*, 2020; Davis et *al.*, 2021b) (figure 1.2). Situé dans la région du Nunavik, le Bassin Versant de la rivière Koroc (BVK) dans le parc national de Kuururjuaq près de la communauté de Kangiqsualujjuaq connaît, depuis le début du siècle, un changement environnemental des zones bioclimatiques de la forêt boréale et de la toundra Arctique (Brown et *al.*, 2012). Ce changement résulte en un verdissement de la région comme démontré par les images satellites (McManus et *al.*, 2012).

De ce fait, les études terrain démontrent une augmentation du couvert des arbustes érigés dans la toundra Arctique de l'Est du Canada (Myers-Smith et *al.*, 2011; Tremblay et *al.*, 2012; Davis et *al.*, 2021a et 2021b). L'étude de Moreau et *al.* (2020) rapporte que la croissance radiale de *Picea mariana* (épinette noire) dans les zones d'échantillonnages 1 à 6 (figure 1.2) dans la zone bioclimatique de la forêt boréale du Nunavik répond positivement au changement climatique. L'étude de Dufour-Tremblay et *al.* (2012) détecte une augmentation de croissance pour *Larix laricina* (mélèze laricin), mais pas pour *P. mariana* en bordure de la forêt boréale et de la toundra Arctique près de la communauté de Kangiqsualujjuaq (figure 1.2). Cette étude démontre également que la colonisation de plantules au-dessus de la limite des arbres était commune par *L. laricina* mais absente par *P. mariana*, ce qui suggère un potentiel de changement à la limite des arbres. Enfin, Caccianiga et Payette (2006) ont mesuré une augmentation de volume et en recouvrement pour l'épinette blanche (*Picea glauca*) à l'ouest du Nunavik près de la communauté d'Umiujaq (figure 1.3).

Alors que du côté est du Nunavik, l'étude de Tremblay et *al.* (2012) note également une augmentation du couvert végétal arbustif du *Betula glandulosa* (bouleau glanduleux) à l'écotone de la forêt boréale de l'est du Nunavik. Ces résultats concordent aussi avec ceux des études de Davis et *al.* (2021a et 2021b) notant une forte prolifération des arbustes à proximité des plans d'eau et des berges des rivières des monts Torngat du Labrador. Ce phénomène a aussi été observé par la connaissance traditionnelle des Ainés de trois communautés du Nunavik (Umiujaq, Kangiqsujuaq et Kangiqsualujjuaq) dans l'étude de Cuerrier et *al.* (2015). Dans cette étude, qui documente le savoir traditionnel inuit sur le changement climatique au Nunavik, les Ainés des trois communautés ont observé une augmentation des arbustes érigés sur tout leur territoire. À l'ouest du Nunavik, un verdissement de la végétation a aussi été démontré par l'étude de McManus et *al*. (2012), qui note une augmentation de l'indice de végétation du NDVI entre 1986 et 2010. L'augmentation de cet indice de végétation a été associée avec l'augmentation de la végétation des arbustes érigés et des herbacés de la famille des graminoïdes.

Le changement de la composition de la végétation affecte aussi les activités traditionnelles des communautés autochtones locales. En effets, le rythme de vie des communautés est caractérisé par une forte proximité avec la nature, de l'environnement naturel et des traditions ancestrales intergénérationnelles (Cuerrier et *al.*, 2015; Anderson et *al.*, 2018; Ford et *al.*, 2021). Les perturbations affectent aussi l'interaction entre les communautés locales, la faune et la flore. Les changements climatiques affectent les activités de subsistance traditionnelles et sociales des peuples autochtones. Par exemple, les populations de caribou sont en déclin (Festa-Bianchet et *al.*, 2011; Fauchald et *al.*, 2017) et l'accès aux territoires de chasse est perturbé par les impacts du changement climatique (Ford et *al.*, 2019; 2021) ce qui rend la chasse moins efficace et plus difficile. La distribution des plantes à petits fruits est altérée par l'arbustation, ce qui rend la cueillette (*Bakeapple* et *berry picking*) plus exigeante (Anderson et *al.*, 2018; Davis et *al.*, 2021a) en plus d'être parfois plus tôt durant la saison estivale (Cuerrier et *al.*, 2015).

Depuis quelques décennies, la végétation arbustive couvre une plus grande surface (Stow et *al.*, 2004; Myers-Smith et *al.*, 2011; Tremblay et *al*., 2012; Myers-Smith et Hik, 2018). Durant l'hiver les arbustes viennent modifier la composition de la couverture de la neige (Callaghan et *al.*, 2011; Myers-Smith et *al.*, 2011). Ce processus vient complexifier les déplacements des habitants de la région du Nunatsiavut au Labrador et de la région du Nunavik au Québec par la différente densité des couches de neige accumulée sur la strate arbustive (Cuerrier et *al.*, 2015; Anderson et *al.*, 2018). L'été, l'augmentation accélérée de la croissance verticale du couvert arbustif vient rendre les déplacements à pied plus contraignants (Boulanger-Lapointe et *al.*, 2019). De plus, le changement de la dynamique de la végétation affecte aussi la distribution des plantes à petits fruits (Cuerrier et *al.*, 2015; Boulanger-Lapointe et *al.*, 2019; Davis et *al.*, 2021a et 2021b). Parallèlement, dans les monts Torngat et au Nunatsiavut au Labrador, cette ressource alimentaire serait soit en déclin ou plus difficile à repérer dû au recouvrement et à l'ombrage des arbustes érigés (Davis et *al.*, 2021b) et la cueillette est plus difficile (Siegwart Collier, 2020). Ces facteurs contribuent aux changements culturels et socio-économiques des habitants de la région et de leur relation avec l'environnement naturel (Cuerrier et *al.*, 2015; Ford et *al.*, 2017; Anderson et *al.*, 2018; Boulanger-Lapointe et *al.*, 2019; Davis et *al.*, 2021b).

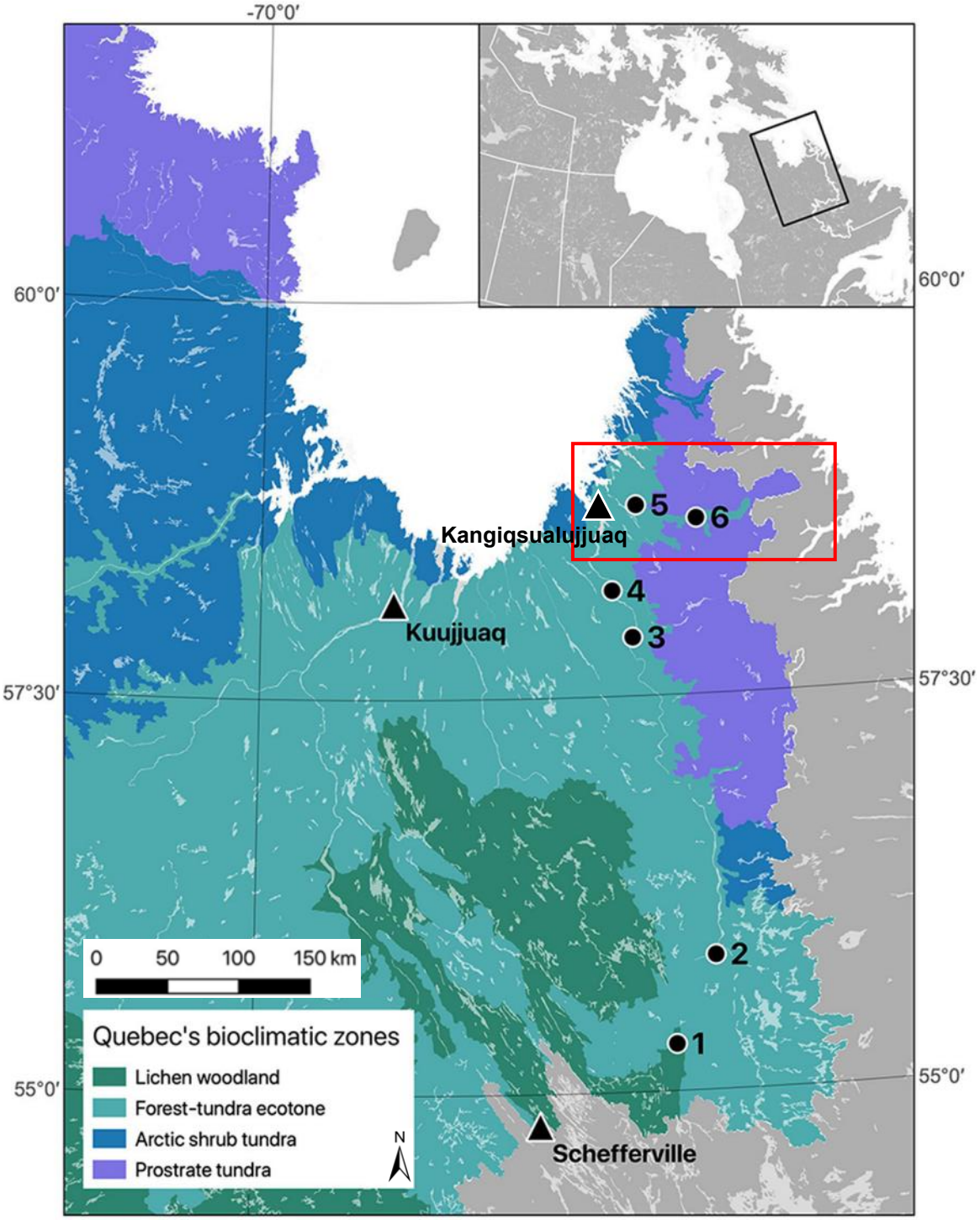


Figure 1.2 : Les zones bioclimatiques du Nunavik (adapté de Moreau et *al*., 2020). Le secteur du bassin versant de la rivière Koroc en encadré rouge, le domaine de la végétation de la toundra forestière en turquoise et la toundra prostrée en mauve. Les points 1 à 6 représentent les sites de collectes des données de disque de *P. mariana* de l'étude de Moreau et *al*. (2020). Le village de Kangiqsualujjuaq à proximité du point 5 où ont eu lieu les études de Dufour-Tremblay et *al*. (2012) et de Tremblay et *al*., (2012).

1.2. Problématique

Les températures de la région du Nunavik sont en augmentation depuis une cinquantaine d'années (Brown et *al.*, 2012) en lien avec le changement climatique en Arctique (Pithan et Mauritsen, 2014; Previdi et *al*., 2021). Ces hausses de températures rapides (Rantanen et *al.*, 2022) apportent des changements dans la végétation de l'Arctique (Baruah et *al.*, 2017; Myers-Smith et *al.*, 2019b) et dans la région du Nunavik (Dufour-Tremblay et *al.*, 2012; Tremblay et *al*., 2012; Moreau et *al*., 2020; Bayle et *al.*, 2022). Ces changements de la végétation résultent souvent à une augmentation des arbustes érigés (Stow et *al*., 2004; Myers-Smith et *al.*, 2011; Zamin et *al*., 2012; Tape et *al*., 2012). Cependant, les processus du verdissement sont hétérogènes et la croissance de la végétation est influencée par les caractéristiques biophysiques du milieu et du climat de la région (Tape et *al*., 2012; Zamin et *al*., 2012; Myers-Smith et *al.*, 2020).

Le BVK est situé dans une région où le relief est accidenté entre les monts Torngat à l'est et les Basse-Terre de l'Ungava à l'ouest (Cossette et Hébert, 2007). Un gradient altitudinal prononcé est présent à partir de la vallée de la rivière Koroc jusqu'au sommet des plateaux et des monts Torgats. Ce relief accidenté est accentué par l'inclinaison des pentes le long de la vallée et des sommets que la rivière Koroc suit à partir de sa source dans les monts Torgats jusqu'à son embouchure dans la baie d'Ungava (Despont, 2004; ARK, 2005; Cossette et Hébert, 2007). La végétation du BVK y est distribuée de façon hétérogène à travers les vallées, sur les pentes et sur les sommets (Desponts, 2004). L'hétérogénéité du relief du BVK rend difficile la compréhension des processus du verdissement. Les communautés locales de Kangiqsualujjuaq en partenariat avec le parc national de Kuururjuaq cherchent à mieux comprendre les changements de la dynamique de la végétation en lien avec le réchauffement de l'Arctique dans le bassin versant de la rivière Koroc (Figure 1.3). Les effets du verdissement sur les espèces végétales importantes soient pour les communautés locales, par exemple les arbustes à petits fruits ou encore les lichens pour la faune sont peu documentés. Cette étude vise à mieux spatialiser, qualifier et quantifier le verdissement du BVK. À terme, les informations obtenues pourront servir à anticiper les effets sur l'écologie de la région et mieux comprendre la dynamique et les processus du verdissement de la végétation locale.

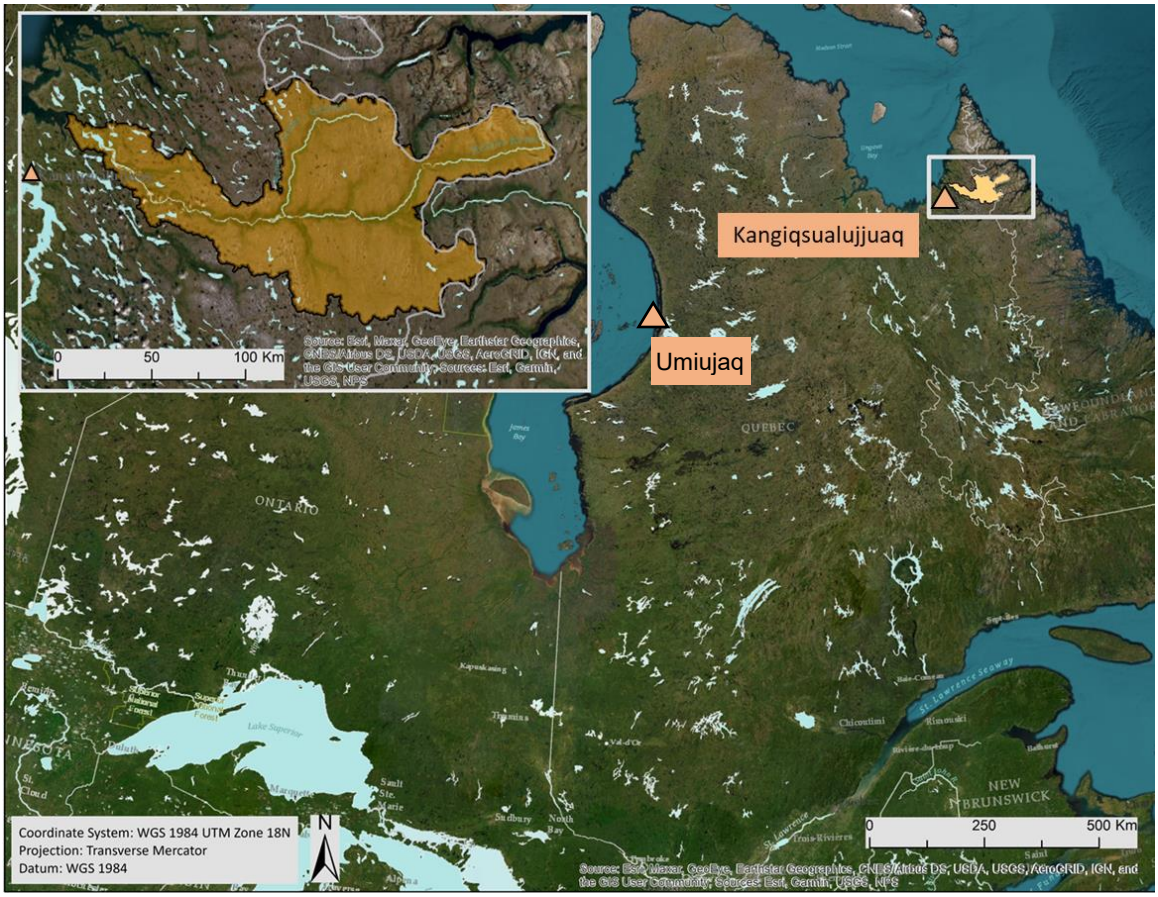


Figure 1.3 : Localisation du bassin versant de la rivière Koroc au Nunavik (en mortaise) et des communautés de Umiujaq et de Kangiqsualujjuaq.

1.3. Objectifs et hypothèses

Le but de ce mémoire est de quantifier et de qualifier le verdissement de la végétation du BVK, en utilisant des outils de la télédétection jumelés avec des caractérisations *in situ* de la végétation. Les images satellitaires permettront de mieux quantifier le verdissement tandis que les caractérisations *in situ* serviront à identifier les espèces végétales impliquées dans les processus du verdissement.

Objectif spécifique 1

Le premier objectif spécifique est de quantifier et de spatialiser le verdissement à partir de la série d'images satellitaires Landsat. Le verdissement sera évalué avec l'indice de végétation NDVI et de la tendance de 1984 à 2020 de celui-ci. L'hypothèse est que le

changement de NDVI dans le BVK est hétérogène et que les processus en lien avec le verdissement sont influencés par les facteurs biophysiques tel le gradient altitudinal et la proximité des cours d'eau dans les vallées (Tape et *al*., 2012; Zamin et *al*., 2012; Myers-Smith et *al.*, 2020). L'objectif permettra de répondre à la question scientifique : Comment le verdissement observable avec les images Landsat évolue-t-il le long du gradient altitudinal dans le bassin versant de la Koroc ?

Objectif spécifique 2

Le deuxième objectif spécifique vise à évaluer la réponse de la végétation impliquée dans les processus du verdissement en lien avec le changement de l'indice de végétation NDVI des images satellitaires Landsat en utilisant des relevés de végétation *in situ*. L'hypothèse est que le verdissement est lié principalement à l'augmentation du recouvrement de la végétation arbustive (Myers-Smith et *al.*, 2011; Tremblay et *al*., 2012; Davis et *al.*, 2021b). Ce qui répondra à la question scientifique : Quelles sont les espèces végétales et les caractéristiques du milieu qui expliquent le verdissement en lien avec l'augmentation du NDVI sur le gradient altitudinal du bassin versant de la rivière Koroc ?

Le mémoire est présenté en quatre chapitres. Le chapitre 1 présente l'introduction, la problématique et les objectifs de la thèse de maîtrise. Le chapitre 2 offre le cadre théorique des sujets de recherches de l'étude. Le chapitre 3 présente les résultats de la recherche sous le format d'article scientifique et le chapitre 4 est la discussion et la conclusion générale de la thèse de mémoire.

CHAPITRE II

CADRE THÉORIQUE

2.1. Les changements de la végétation de l'Arctique

2.1.1. Impact du réchauffement sur la végétation

Le changement climatique interagit à plusieurs niveaux sur les écosystèmes de l'Arctique canadien (Brown et *al.*, 2012; Box et *al.*, 2019). La température annuelle moyenne de l'air augmente depuis plus de 50 ans (Brown et *al.*, 2012; Box et *al.*, 2019). Des changements dans le cycle des précipitations liquide et solide sont constatés (Brown et *al.*, 2012; Brown et *al.*, 2017) et des perturbations dans les cycles du gel et du dégel de la cryosphère ont aussi été observées (Helbig et *al.*, 2016; Brown et *al.*, 2017; Derksen et *al.*, 2018). La hausse de la température de l'air prolonge la saison de croissance de la végétation (Pearson et *al.*, 2013; Martin et *al.*, 2017) d'environ 3 jours par décennie au Nunavik (Brown et *al.*, 2012; Brown et *al.*, 2017). Les températures plus clémentes permettent aussi d'augmenter la répartition de certaines espèces végétales vers le nord (Walther, 2010; Brown et *al.*, 2012; Pearson et *al.*, 2013). Par exemple, la distribution spatiale de *Betula glandulosa* (bouleau glanduleux) est en expansion (Myers-Smith et *al.*, 2011; Tape et *al.*, 2012; Provencher-Nolet et *al.*, 2014; Davis et *al.*, 2021a et b). De plus, le retrait prématuré de la glace de mer augmente l'évaporation annuelle totale, ce qui fait augmenter la couverture nuageuse de basse altitude et donc le taux de précipitation (Brown et *al.*, 2017; Box et *al.*, 2019). La croissance de la végétation peut donc être influencée par plusieurs facteurs. Ces facteurs peuvent être le taux d'humidité du sol (Myers-Smith et *al.*, 2020; Berner et *al.*, 2020), le taux de nutriment disponible dans le sol, la durée du couvert de neige et la température de l'air (Callaghan et *al.*, 2011; Box et *al.*, 2019; Niittynen et *al.*, 2020).

Durant la saison hivernale, le couvert de neige apporte une protection aux végétaux en les isolant durant les périodes de froid extrêmes (Callaghan et *al.*, 2011; Box et *al.*, 2019; Niittynen et *al.*, 2020). Cependant, la réduction du couvert de neige et de sa fonte hâtive

influence aussi la végétation en l'exposant plus tôt dans la saison au rayonnement solaire ou à un épisode de froid tardif (Callaghan et *al.*, 2011; Brown et *al.*, 2017; Myers-Smith et *al.*, 2019b; Niittynen et *al.*, 2020). Le pergélisol est sensible à la durée du couvert de neige durant l'hiver et à la température de l'air (Callaghan et *al.*, 2011; Derksen et *al.*, 2018) et un dégel hâtif de la couche active du pergélisol peut modifier le déplacement de l'eau contenu dans le sol (Derksen et *al.*, 2018). L'eau contenue dans la couche active au dégel, peut déséquilibrer le déplacement de l'eau soit en formant une dépression qui s'inonde, soit par un drainage soudain de l'eau contenue dans le sol (Perreault et *al.*, 2016; Derksen et *al.*, 2018). Ces phénomènes peuvent nuire aux conifères de la forêt boréale, mais sembleraient favoriser l'arbustation (Helbig et *al.*, 2016; Wang et *al.*, 2019; Box et *al.*, 2019). La végétation des milieux humides de l'Arctique est particulièrement sensible au drainage de l'eau du sol provoqué par le dégel du pergélisol (Perreault et *al.*, 2016) et un changement dans les communautés végétales est observé dans ces zones (Myers-Smith et *al.*, 2011; Baruah et *al.*, 2017; Lemay et *al.*, 2018; Davis et *al.*, 2021b). L'étude de Perreault et *al.* (2016) note d'ailleurs un changement de la végétation par une transition rapide de la végétation humide vers une végétation mésique caractéristique des sols drainés.

Ces changements dans l'écosystème viennent perturber la physiologie végétale et la biodiversité des différentes communautés de plante (Baruah et *al.*, 2017; Bjorkman et *al.*, 2018; Myers-Smith et *al.*, 2019). Durant la saison estivale, la végétation peut croitre plus rapidement et plus longtemps (Myers-Smith et Hik, 2018; Bjorkman et *al.*, 2018). Les températures plus clémentes favorisent aussi la foliation des arbustes par un bourgeonnement hâtif, ainsi que des feuilles en plus grand nombre et avec une plus grande surface foliaire (Myers-Smith et Hik, 2018; Myers-Smith et *al.*, 2019a et 2019b). Une croissance radiale plus forte est aussi observée dans des communautés d'arbustes (Myers-Smith et *al.*, 2019a). La hauteur de la végétation et la densité du recouvrement de la surface foliaire influencent positivement l'indice de la végétation NDVI (Holben, 1986; Gamon et Qiu, 1999) et cette tendance est observable à partir des images satellitaires (Myneni et *al.*, 1997; Sim et Gamon, 2002; Stow et *al.*, 2004; Myers-Smith et *al.*, 2020).

2.1.2. Processus général du changement de la végétation

La saison de croissance sur la péninsule de l'Ungava au Nunavik s'étend généralement de juin à septembre, mais peut varier selon la couverture de neige au printemps ou avec la première accumulation de neige à l'automne (Brown et *al.*, 2012; Cohen et *al.*, 2019; Davis et *al.*, 2021a). Les prédictions pour la région de l'est de la baie d'Ungava pour les trois prochaines décennies sont un rallongement de 3 semaines de la saison estivale avec une augmentation des précipitations de 25 %, majoritairement sous forme de pluie (Brown et *al.*, 2012; Cohen et *al.*, 2019; Davis et *al.*, 2021b). Avec la température de l'air, ces facteurs devraient contribuer au verdissement de la péninsule de l'Ungava, des monts Torngat et du bassin versant de la rivière Koroc (Martin et *al.*, 2017; Box et *al.*, 2019; Berner et *al.*, 2020; Moreau et *al.*, 2020; Myers-Smith et *al.*, 2020; Davis et *al.*, 2021b).

Les processus du changement de la végétation sont complexes et s'opèrent de façon hétérogène à travers la région, selon les caractéristiques biophysiques locales, telles que l'altitude, la disponibilité de l'eau, le couvert de neige puis l'inclinaison et l'orientation des pentes (McManus et *al.*, 2012; Tape et *al.*, 2012; Baruah et *al.*, 2017; Berner et *al.*, 2020; Myers-Smith et *al.*, 2020). Ces facteurs interagissent avec le réchauffement de la température, impactant la croissance de la végétation et augmentant la biomasse végétale (Tape et *al.*, 2012; Myers-Smith et Hik, 2018; Davis et *al.*, 2021a). L'augmentation de la biomasse peut être observée au niveau du terrain avec des mesures, des échantillonnages ou des observations (Myers-Smith et *al.*, 2011; Davis et *al.*, 2021a; Larking et *al.*, 2021). Indirectement, elle peut aussi s'observer par télédétection (Lemay et *al.*, 2018; Myers-Smith et *al.*, 2020). À titre d'exemple, l'analyse des indices spectrale de la végétation, telle que le NDVI, est disponible avec les produits satellitaires de la série Landsat (Holden, 1986; Gamon et Qiu, 1999; Sim et Gamon, 2002). Lorsque l'augmentation de la biomasse de la végétation est observée par les indices de végétation spectrale, ce phénomène est souvent reconnu par le terme de verdissement, ou « greening » (Myers-Smith et *al.*, 2011).

Le gain de la biomasse végétale peut se faire par la croissance verticale, la colonisation ou l'empiètement dans des zones dénudées ou peu végétalisées (Myers-Smith et al., 2011; Tremblay et *al.*, 2012; Dufour-Tremblay et *al.*, 2012; Baruah et *al.*, 2017). De plus, le

verdissement se fait dans des zones qui ont été perturbées soit par un brûlis, une dégradation du pergélisol ou une perturbation due à une activité animale ou anthropique (McManus et *al.*, 2012; Helbig et *al.*, 2016; Wang et *al.*, 2019; Berner et *al.*, 2020). Sur le terrain, les observations montrent une augmentation deux fois plus rapide de la végétation arbustive dans les milieux perturbés (McManus et *al.*, 2012) comparée au milieu non perturbé (Myers-Smith et *al.*, 2011; Myers-Smith et Hik, 2018). À plus long terme, une région peut verdir par un processus latitudinal, c'est-à-dire par une colonisation plus au nord par de la végétation typique d'une région plus au sud (Myers-Smith et *al.*, 2019a) ou bien par un processus altitudinal, qui est une progression de la végétation vers un étage de végétation supérieur (Tremblay et *al.*, 2012; Myers-Smith et Hik, 2018; Major et *al*., 2022). Un verdissement altitudinal et latitudinal est démontré par les études Tremblay et *al.* (2012) et de Davis et *al.* (2021a et 2021b) sur le terrain ainsi que par les études d'analyses d'images satellitaires et de photographies aériennes de Lemay et *al.* (2018) et de Larking et *al.*, 2021. Le changement de la végétation se fait aussi à proximité des plans d'eau et le long des rivières (Lemay et *al.*, 2018; Davis et *al.*, 2021b). Le verdissement en longeant les réseaux hydrographiques démontre l'importance du rôle de l'hydrologie (précipitation, dégel du pergélisol et crue) sur la végétation (Brown et *al.*, 2017; Berner et *al*., 2020).

Cependant, le verdissement peut être observé sur une plus grande échelle tant spatiale que temporelle, et ce de façon efficace avec l'utilisation des outils de la télédétection (Myers-Smith et *al.*, 2020). Puisque l'indice de végétation du NDVI est un signal relié à la réflectance de la végétation, l'indice donne peu d'information précises sur les aspects physiologiques du végétal (Berner et *al.*, 2020; Myers-Smith et *al.*, 2020). Par exemple, une diminution de la diversité végétale peut se produire si une espèce végétale mieux adaptée aux effets du changement climatique empiète et recouvre une espèce végétale plus sensible au changement. Ce processus sera perçu comme un verdissement plutôt qu'une perte de biodiversité, puisque cette végétation offre une réflectance plus élevée (Wang et *al.*, 2019; Myers-Smith et *al.*, 2020; Larking et *al.*, 2021).

2.1.3. Processus général du brunissement

Le réchauffement de l'air peut indirectement aussi mener à une perte de la biomasse végétale catégorisée sous le terme de brunissement, ou « browning » (Ju et Masek, 2016; Berner et *al.*, 2020; Myers-Smith et *al.*, 2020). En effet, celui-ci augmente la fréquence des perturbations (Hinzman et *al.*, 2005; Kurz et *al.*, 2008; Peng et *al.*, 2011; Helbig et *al.*, 2016; Sulla-Menashe et *al.*, 2018). Un brunissement soudain est caractérisé par la perte soudaine et localisée d'une biomasse végétale (*browning event*), souvent due à une perturbation (Helbig et *al.*, 2016; Myers-Smith et *al.*, 2020). En revanche, une tendance de brunissement est plutôt caractérisée par une perte de biomasse végétale généralisée dans une zone de façon lente et constante (*browning trend*). Cette tendance est souvent liée aux effets du changement climatique comme la diminution du régime des précipitations et la dégradation de la qualité du sol (Peng et *al*., 2011; Gauthier et *al.*, 2015; Sulla- Menashe et *al.*, 2018; Myers-Smith et *al.*, 2020). Afin de bien comprendre les processus du changement de la végétation de l'Arctique et de la forêt boréale des régions nordiques, une distinction entre un événement de brunissement soudain et localisé et entre une tendance au brunissement lente et constante doit être effectuée (Sulla- Menashe et *al.*, 2018; Myers-Smith et *al.*, 2020; Berner et *al.*, 2020).

Le brunissement peut être observé par la télédétection avec les images satellitaires par une diminution du signal de l'indice de végétation du NDVI entre deux images du même point, mais à des dates différentes (Ju et Masek, 2016; Myers-Smith et *al.*, 2020; Berner et *al.*, 2020). Un brunissement soudain observé avec la télédétection sera caractérisé par une diminution marquée de l'indice de végétation du NDVI étalé sur une courte période (1 à 2 ans) (Helbig et *al.*, 2016; Myers-Smith et *al.*, 2020) et souvent suivi par une augmentation de l'indice NDVI dû à la régénération de la végétation (Ju et Masek, 2016). Cependant, une observation par télédétection d'une tendance de brunissement c'est-à-dire un changement sur une longue période de la composition d'un groupe de végétaux ou encore une perte lente de la biodiversité végétale, sera caractérisée par une faible réduction de l'indice de végétation NDVI ou un indice stable. L'observation d'une tendance de brunissement doit se faire sur plusieurs années (Ju et Masek, 2016; Helbig et *al.*, 2016; Myers-Smith et *al.*, 2020; Berner et *al.*, 2020). Sur le terrain, l'observation d'une tendance

de brunissement est davantage liée à un changement de la composition de la communauté végétale, par une foliation moins dense, une sénescence prématurée ou une croissance végétale lente (Berner et *al.*, 2020; Myers-Smith et *al.*, 2020).

Avec le réchauffement de la température, la végétation peut croître plus rapidement ce qui peut mener à une augmentation de l'évapotranspiration et un assèchement des sols en plus d'augmenter la consommation des nutriments limitants du sol (azote, phosphore et potassium) (Myers-Smith et *al.*, 2011; Baruaha et *al.*, 2017; Davis et *al.*, 2021b). Le taux de renouvellement des nutriments du sol pourrait être plus faible que le taux d'utilisation ce qui appauvrirait le sol et donc une réduction de la biomasse végétale à long terme (Myers-Smith et *al.*, 2011, 2020; Martin et *al*., 2017; Berner et *al.*, 2020). L'assèchement des sols favorise aussi une fréquence plus élevée des feux de forêt boréale (Gauthier et *al.*, 2015; Sulla-Menashe et *al.*, 2018). Malgré le faible pourcentage de brunissement en forêt boréale soit de 11 % (Sulla-Menashe et *al.*, 2018) et de 4 à 5 % en toundra arctique (Berner et *al.*, 2020) le brunissement reste tout de même répandu. Au nord de la forêt boréale, les épidémies d'insectes sont plus fréquentes et ces perturbations contribuent à faire augmenter la mortalité des *Picea sp.* en forêt boréale (Kurz et *al.*, 2008). Bien que ces phénomènes soient fréquemment observables au nord de la forêt boréale, l'étude de Berner et *al.* (2020) démontre une plus forte occurrence de ces perturbations dans la végétation de la toundra du haut Arctique.

Le brunissement peut aussi être dû aux effets du dégel d'une masse de pergélisol qui affecte l'eau contenue dans le sol et en surface en la drainant vers les dépressions (Provencher-Nolet et *al.*, 2014; Perreault et *al.*, 2016; Brown et *al.*, 2017; Derksen et *al.*, 2018). Le sol en surface s'assèche, ce qui augmente le stress hydrique de la végétation, tandis que la dépression s'inonde ce qui fait décliner la biomasse végétale (Helbig et *al.*, 2016; Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Wang et *al.*, 2019). Un changement dans la diversité de la communauté végétale peut se produire, puisque les arbustes érigés ont un fort potentiel de recrutement dans les milieux perturbés, ce qui peut venir contribuer au brunissement de la végétation prostrée (Myers-Smith et *al*., 2011; Provencher-Nolet et *al.*, 2014; Chagnon et Boudreau, 2019). La réduction du couvert de neige expose la végétation aux herbivores ce

qui augmente le broutement et réduit la protection face au piétinement des caribous (Myers-Smith et *al.*, 2011, 2020; Berner et *al.*, 2020). Conséquemment, dans un secteur à prédominance de verdissement le brunissement peut être camouflé s'il se produit à proximité d'un verdissement. La vérification par une étude *in situ* est à considérer dans les études du verdissement afin de pouvoir aussi identifier le brunissement d'une végétation (Perreault et *al.*, 2016; Berner et *al.*, 2020; Myers-Smith et *al.*, 2020).

2.2. Le verdissement selon le type de végétation

2.2.1. Le verdissement de la forêt boréale

Le changement climatique et ses effets influencent l'écologie de la forêt boréale (Caccianiga et Payette, 2006; Gauthier et *al.*, 2015; Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Moreau et *al.*, 2020). La réponse de la forêt boréale face à ces changements est complexe et hétérogène (Peng et *al.*, 2011; Dufour-Tremblay et *al.*, 2012). Le réchauffement de la température permet une plus grande croissance des arbres en rallongeant la saison de croissance et en augmentant la régénération (Caccianiga et Payette, 2006; Dufour-Tremblay et *al.*, 2012; Wang et *al.*, 2019). Cependant, la complexité de la dynamique de la forêt boréale est surtout due au fait que ce sont les différentes perturbations naturelles en lien avec le changement climatique qui influencent cette zone (Sulla-Menashe et *al.*, 2018). En effets, plusieurs perturbateurs associés à la forêt boréale sont en augmentation (Peng et *al.*, 2011; Gauthier et *al.*, 2015; Helbig et *al.*, 2016; Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Wang et *al.*, 2019). Les épisodes de sécheresse sont plus intenses et plus fréquents (Peng et *al.*, 2011; Gauthier et *al.*, 2015), la dégradation et le dégel du pergélisol provoquent des glissements et des effondrements de terrain et par le fait même augmente la mortalité des arbres (Helbig et *al.*, 2016; Wang et *al.*, 2019). Bien que les facteurs bioclimatiques (précipitation; température) influencent positivement le verdissement et le recrutement des arbres (Caccianiga et Payette, 2006; Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Moreau et *al.*, 2020), ce sont les régimes des perturbations (feux; stress hydriques; maladies; insectes ravageurs; dégel pergélisol) et leurs époques (avant 1990 ou après 2003) qui ont la plus grande influence sur le changement de la végétation de la forêt boréale (Peng et *al.*, 2011; Helbig et *al.*, 2016; Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Wang et *al.*, 2019).

Les écosystèmes de la forêt boréale du nord de la Saskatchewan, de l'Alberta et de la Colombie-Britannique ont subi une décroissance de la biomasse végétale ou un brunissement (Ju et Masek, 2016; Wang et *al.*, 2019). Le brunissement de la forêt boréale du Nord-Ouest canadien est dû principalement aux perturbations telles que les stress hydriques, les sécheresses, les infestations et les feux qui sont plus fréquents (Kurz et *al.*, 2008; Gauthier et *al.*, 2015; Wang et *al.*, 2019). Le réchauffement climatique influence aussi la distribution et l'abondance des insectes ravageurs en agrandissant leur niche écologique, en modifiant leur cycle de reproduction et en réduisant les mécanismes de défense des arbres (Kurz et *al.*, 2008). La partie nord de la forêt boréale située dans les Territoires du Nord-Ouest et du Yukon, qui a été perturbé, se voit souvent être succédé par de la végétation de la toundra d'arbuste érigé au détriment des conifères ce qui vient modifier l'écologie de la zone boréale (Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Wang et *al.*, 2019). Cependant, les zones du domaine bioclimatique boréal et Arctique de l'est du Canada, où l'humidité du sol n'est pas limitante, ceux-ci démontrent un verdissement (Dufour-Tremblay et *al.*, 2012; McManus et *al.*, 2012; Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Berner et *al.*, 2020; Moreau et *al.*, 2020). Le verdissement du nord de la forêt est donc hétérogène et plusieurs facteurs biophysiques peuvent venir l'influencer selon la fréquence des régimes des perturbations (Helbig et *al.*, 2016; Martin et *al.*, 2017; Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Box et *al.*, 2019; Wang et *al.*, 2019; Berner et *al.*, 2020).

Au Nunavik, à la limite nord-est, la croissance des arbres est limitée par les perturbations et les conditions climatiques, ce qui rend cet écotone sensible aux variations de la température (Dufour-Tremblay et *al.*, 2012; Moreau et *al.*, 2020). Le *Picea mariana* a réagi positivement lors d'épisodes de température estivale plus élevée que la moyenne saisonnière tandis qu'une réaction négative a été démontrée lors d'épisode de gel tardif au printemps (Moreau et *al.*, 2020). Le nombre de degrés / jours influence la croissance (Brown et *al.*, 2012), mais l'expansion de son aire de répartition altitudinale et latitudinale reste très limitée, voire inerte, démontrant donc un faible succès de reproduction (Dufour-Tremblay et *al.*, 2012). Dans la région de Kangiqsualujjuaq, un verdissement de la forêt boréale est observé par le *Larix laricina*. Ce conifère densifie sa population à sa limite nord tout en démontrant au niveau de l'individu une croissance radiale et verticale plus

prononcée depuis quelques décennies avec un faible taux de mortalité (Dufour-Tremblay et *al.*, 2012). Son abondance régionale est en hausse et des semis ont aussi été retrouvés au-delà de sa limite altitudinale et latitudinale proposant ainsi une future expansion dans ce sens (Tremblay et *al.*, 2012; Dufour-Tremblay et *al.*, 2012).

Par contre, à l'échelle du Canada, la forêt boréale démontre un faible verdissement au nord-est (Ju et Masek, 2016; Sulla-Menashe et *al.*, 2018) tandis que le nord-ouest voit la forêt boréale diminuer (Ju et Masek, 2016; Helbig et *al.*, 2016; Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Wang et *al.*, 2019). La dégradation sur le long terme dans les territoires canadiens et les provinces centrales est surtout attribuable au dégel du pergélisol, et au régime plus fréquent des feux de forêt, que la régénération ne compense pas la mortalité. Les régions des hautes latitudes de l'ouest connaissent une réduction des précipitations ce qui mène à l'assèchement des sols et donc à une augmentation des perturbations et progressivement la diminution de la forêt boréale (Gautier et *al.*, 2015; Helbig et *al.*, 2016; Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Wang et *al.*, 2019). Le verdissement de la forêt boréale est donc en parti dû à l'augmentation de la strate arbustive qui colonise les zones perturbées plus rapidement que les conifères (Helbig et *al.*, 2016; Wang et *al.*, 2019).

2.2.2. Le verdissement des arbustes érigés

La végétation arbustive est très commune au nord de la limite des arbres et elle répond rapidement aux variations et aux changements du climat (Tremblay et *al.*, 2012; Wang et *al.*, 2019; Davis et *al.*, 2021a). Les espèces d'arbustes érigés qui dominent le couvert à l'est de la baie d'Ungava et dans les Monts Torngat sont : le bouleau glanduleux (*Betula glandulosa*), les saules (*Salix sp.*), le thé du Labrador (*Rhododendron groenlandicum*) et l'aulne (*Alnus* sp). Ces espèces peuvent atteindre une hauteur de plus de 1,50 m. Cette strate arbustive connaît depuis une trentaine d'années une augmentation de sa productivité et de sa croissance (McManus et *al.*, 2012; Ju et Masek, 2016; Martin et *al.*, 2017; Larking et *al.*, 2021) et ce phénomène est communément nommé sous le terme « shrubification » ou arbustation en français (Figure 2.1) (Myers-Smith et *al.*, 2011).

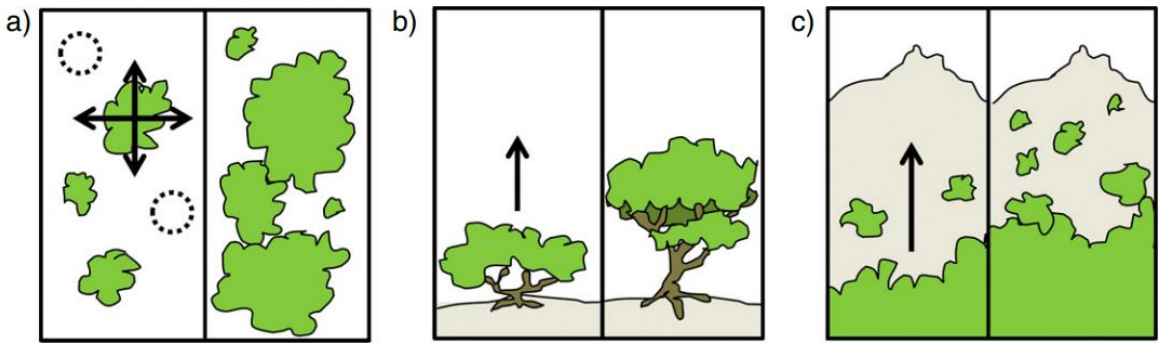


Figure 2.1 : Les trois processus de l'arbustation (Myers-Smith et *al.*, 2011).
a) : Le remplissage « infilling », soit une augmentation du nombre de végétaux et une densification du feuillage
b) : La croissance verticale de l'arbuste
c) : L'agrandissement de son domaine par une colonisation avancée

L'augmentation de la biomasse des arbustes érigés, c'est-à-dire l'arbustation, peut être classée en trois catégories. La plus commune est par le remplissage « infilling », soit une densification du plant ou le recrutement par remplissage dans la mosaïque et entre les mosaïques adjacentes. Le second procédé implique une augmentation verticale de la hauteur de la plante et le troisième procédé est par la colonisation sur de nouveaux secteurs au-delà de sa limite de distribution ou sur des zones sans végétation (Figure 2.1) (Myers-Smith et *al.*, 2011). Dans les régions de l'Arctique, l'arbustation se produit surtout dans les vallées abritées du vent et sur les versants ou la disponibilité en eau est grande (Myers-Smith et *al.*, 2011; Tape et *al*., 2012; Provencher-Nolet et *al.*, 2014; Davis et *al.*, 2021a et 2021b). Sur les sommets montagneux, l'arbustation semble aussi présente et la prédiction est que l'arbustation sera plus présente et plus dense si les conditions climatiques se maintiennent (Provencher-Nolet et *al.*, 2014; Myers-Smith et Hik, 2018).

Souvent, l'arbustation dans les régions de l'Arctique se fait au détriment des lichens (Hollister, 2003), des mousses et des bryophytes et des arbustes prostrés à petits fruits (Pajunen et *al*., 2011; Provencher-Nolet et *al.*, 2014; Perreault et *al.*, 2016; Weijers et *al*., 2018; Chagnon et Boudreau, 2019; Boulanger-Lapointe et *al.*, 2019; Davis et *al.*, 2021b). Le verdissement des arbustes érigés peut donc venir modifier et perturber l'écologie de l'Arctique (Baruah et *al*., 2017; Bjorkman et *al.*, 2018; Myers-Smith et Hik, 2018; Davis et *al.*, 2021b). Globalement, presque toutes les régions de l'Arctique subissent une

arbustation (Martin et *al.*, 2017; Bjorkman et *al.*, 2018; Myers-Smith et Hik, 2018). Ce verdissement est documenté par les observations satellitaires de Ju et Masek (2016) et de Berner et *al.* (2020) et par les études terrain de Myers-Smith et *al*. (2011) et sur la péninsule du Québec-Labrador par les études de Tremblay et *al.* (2012) et de Davis et *al.* (2021a et 2021b).

2.2.3. Le verdissement de la toundra prostrée de l'Arctique et du Nunavik

La végétation de la toundra prostrée au Nunavik est diversifiée et forme des mosaïques végétales caractérisés selon les unités physiographiques de l'habitat. En altitude sur les plateaux des monts Torngat, la végétation est souvent constituée de lichens, de mousses, de graminées et d'herbacés. Cette végétation se retrouve de façon discontinue le long des versants abrupts et des sommets exposés. Mais les mousses et les herbacés se retrouvent plus densément dans les dépressions humides (Desponts, 2004). Cette végétation offre un gradient de verdissement par la colonisation par les graminées des milieux dénudés (Myers-Smith et *al.*, 2019a et 2019b). En revanche, lors d'événement perturbateur, la végétation arbustive envahit plus rapidement le secteur souvent au détriment des lichens (Hollister, 2003; Pajunen et *al*., 2011; Provencher-Nolet et *al.*, 2014; Bjorkman et *al.*, 2018; Weijers et *al*., 2018; Chagnon et Boudreau, 2019; Chagnon et Boudreau, 2019), des mousses et des herbacés (Hinzman et *al.*, 2005; Pajunen et *al*., 2011; Bjorkman et *al.*, 2018). Cette végétation fait partie de la biodiversité et est d'une grande importance pour la faune de l'Arctique (McManus et *al.*, 2012; Chagnon et Boudreau, 2019; Wang et *al.*, 2019; Berner et *al.*, 2020). De plus, la végétation des mousses et des lichens est sensible à la variation de l'humidité dans le sol et du régime hydrique (Hollister, 2003; Chagnon et Boudreau, 2019).

Le verdissement de la végétation de la toundra prostrée est surtout influencé par les précipitations, le dégel du pergélisol et la capacité de drainage du sol (Perreault et *al*., 2016; Lemay et *al.*, 2018; Davis et *al.*, 2021a et 2021b) tandis que l'arbustation peut induire un brunissement de cette végétation en lui faisant ombrage (McManus et *al*., 2012; Chagnon et Boudreau, 2019; Larking et *al.*, 2021). Les éricacées incluant *Vaccinium sp.* et *Empetrum sp*., qui sont des arbustes prostrés à petits fruits et les lichens ne démontrent pas un

verdissement aussi marqués que celui des arbustes érigés (Hollister, 2003; Tremblay et *al.*, 2012; Davis et *al.*, 2021a). Le verdissement des arbustes à petits fruits semble être interférer et ralentie par la progression des arbustes érigés (Pajunen et *al*., 2011; Provencher-Nolet et *al.*, 2014; Weijers et *al*., 2018; Chagnon et Boudreau, 2019).

2.2.4. Les impacts du verdissement

Le verdissement de l'Arctique peut modifier et influencer les échanges chimiques entre le sol et l'atmosphère (Myers-Smith et *al.*, 2011; Box et *al.*, 2019) et peut perturber les interactions entre la distribution des espèces fauniques et les espèces végétales (Myers-Smith et *al.*, 2011; Davis et *al.*, 2021a). L'arbustation entraine une perte de la biodiversité végétale et influence le déplacement des troupeaux d'animaux (Myers-Smith et *al.*, 2011; Davis et *al.*, 2021a). Durant l'hiver, la strate arbustive capte la neige et ce qui crée un isolant pour le sol et influence positivement la température (Myers-Smith et *al.,* 2011) ce qui favoriserait potentiellement le dégel du pergélisol (Box et *al.*, 2019; Derksen et *al.*, 2019). Durant l'été, ce processus est propice pour la croissance des arbustes érigés en augmentant l'humidité du sol. Les lichens qui favorisent un sol moins humide sont donc défavorisés et leur recouvrement tend à diminuer (Hollister, 2003; Provencher-Nolet et *al.*, 2014; Chagnon et Boudreau, 2019; Davis et *al.*, 2021b). Le cycle des nutriments disponibles est aussi affecté. L'arbuste érigé séquestre l'azote du sol (élément le plus limitant de la croissance végétale nordique) dans sa biomasse limitant ainsi la croissance des autres végétaux (Myers-Smith et *al.*, 2011; Martin *et al.*, 2017) ce qui limite les lichens et les arbustes à petits fruits, qui sont utilisés comme plantes fourragères et d'alimentation (Myers-Smith et *al.*, 2011; Davis et *al.*, 2021a) par les lagopèdes et le caribou. La réduction du couvert des lichens influence aussi les déplacements des caribous et vient nuire à leur population (Festa-Bianchet et *al.*, 2011; Fauchald et *al.*, 2017). Cependant, les arbustes érigés peuvent offrir des abris aux ours et des niches écologiques à plusieurs espèces d'oiseaux migrateurs, ce qui favorise la nidification (Myers-Smith et *al.*, 2011; Davis et *al.*, 2021b).

Le verdissement influence aussi la variabilité des échanges chimiques entre l'atmosphère, les végétaux et le sol dans le cycle du carbone et du méthane (Sitch et *al.*, 2007; McGuire

et *al.*, 2009; Virkkala et *al.*, 2018). Le flux annuel de CO_2 capté est aussi influencé par le type de végétation de la forêt boréale et de la toundra (Peng et *al.*, 2011; Bjorkman et *al.*, 2018). En effets, les conifères commencent leur cycle de photosynthèse et de captation de carbone aussitôt que le sol est libre de neige (Virkkala et *al.*, 2018). Tandis que la végétation décidue commence son cycle après l'apparition des premières feuilles (Virkkala et *al.*, 2018; Myers-Smith et *al.*, 2019b). Un brunissement de la végétation des conifères en forêt boréale pourrait venir altérer le cycle du carbone et rendre celle-ci émettrice de carbone plutôt que d'être un capteur de carbone (Peng et *al.*, 2011; Gauthier et *al.*, 2015; Helbig et *al.*, 2016; Sulla-Menashe et *al.*, 2018; Wang et *al.*, 2019). L'activité végétale influence aussi les émissions du méthane du sol de l'Arctique des milieux humides (Sitch et *al.*, 2007). La végétation des milieux humides libère le méthane contenu dans les sédiments par leur activité racinaire qui elle est influencée par l'augmentation de la température (Sitch et *al.*, 2007; Myers-Smith et *al.*, 2018b). Tandis que la végétation des sols plus sèche, comme les lichens, agit comme capteur de méthane (Sitch et *al.*, 2007; McGuire et *al.*, 2009).

La région subit donc un changement dans la diversité végétale du paysage caractérisé par la colonisation des milieux humides situés dans les vallées et les plaines inondables des rivières par les taxons arbustifs (*Betula sp*. et *Salix sp*.) au détriment de la végétation herbacée des milieux humides. En effet, les études de Davis et *al.* (2021 a et 2021b) le bassin versant de la rivière Nakvak Brook, situé dans le parc national des Monts Torngat, démontre une tendance à la hausse de la température annuelle et un changement dans la composition de la végétation depuis 10 ans en lien avec l'augmentation de l'arbustation. La végétation arbustive étend sa couverture en plus de connaitre une croissance radiale et verticale plus forte (McManus et *al.*, 2012; Tremblay et *al.*, 2012; Provencher-Nolet et *al.*, 2014; Davis et *al.*, 2021 a et 2021b). Les études de Hollister (2003) et de Chagnon et Boudreau (2019) mettent aussi en lien l'assèchement des sols avec la réduction du recouvrement des mousses et des lichens qui sont plus sensibles à la dessiccation.

2.4. Télédétection de la végétation

2.4.1. Les indices de végétation

Le suivi à grande échelle de la végétation par la télédétection se fait par le captage optique du signal des indices des propriétés biophysiques végétales (Gamon et Qiu, 1999; Sim et Gamon, 2002; Myers-Smith et *al.*, 2020). Ces indices de la végétation sont dérivés de la signature spectrale caractéristique des éléments physiologiques de la plante (figure 3) (Tucker, 1978; Gamon et Qiu, 1999; Sim et Gamon, 2002; Gitelson et *al.*, 2009; Viña et Gitelson, 2011). Les aspects physiques de sa structure telle la surface de la feuille, son épaisseur et sa masse ou ses aspects physiologiques comme sa santé où la quantité de pigments contenus dans la feuille sont des éléments qui peuvent servir à créer des indices de végétation (Tucker, 1978; Gamon et Qiu, 1999). Ces indices sont surtout utilisés afin d'obtenir une estimation rapide, efficace et non destructive de la quantité de végétation (Sims et Gamon, 2002; Gitelson et *al.*, 2009; Viña et Gitelson, 2011; Bayle et *al.*, 2019; D'Odorico et *al.*, 2021). Les différents pigments des plantes, comme la chlorophylle, l'anthocyanine ou le caroténoïde, ont un schéma spectral distinct et des propriétés physiologiques différentes et peuvent donc être utilisés pour créer des indices d'estimation de la végétation (Tucker, 1978; Gitelson et *al.*, 1996; Sims et Gamon, 2002; Gitelson et *al.*, 2009; Viña et Gitelson, 2011; Bayle et *al.*, 2019). La chlorophylle contenue dans la partie photosynthétique des végétaux absorbe et capte dans les bandes du spectre électromagnétique les rayons visibles du bleu et rouge avec le maximum d'absorption situé entre 660 – 680 nm (Rouge) (Sims et Gamon, 2002). Tandis que le rayonnement du proche infrarouge (PIR) est réfléchi à près de 50 % à 800 nm par le parenchyme spongieux qui se trouve dans la structure de la feuille du végétal (Gamon et Qiu, 1999; Sims et Gamon, 2002). L'indice NDVI selon la formule : $NDVI = \frac{(\text{PIR} - \text{Rouge})}{(\text{PIR} + \text{Rouge})}$ (Tucker, 1978; Gamon et Qiu, 1999) est basé sur les propriétés absorbantes (bande rouge) du pigment de la chlorophylle contenu dans la feuille de la plante et de la réflexion (bande PIR) du parenchyme spongieux (Gamon et Qiu, 1999; Sims et Gamon, 2002; Gitelson et *al.*, 2009) en lien avec la santé des feuilles de la végétation (Myers-Smith et *al.*, 2020) et son contenu en eau absorbé à 950 nm (Gamon et Qiu, 1999) (figure 2.2).

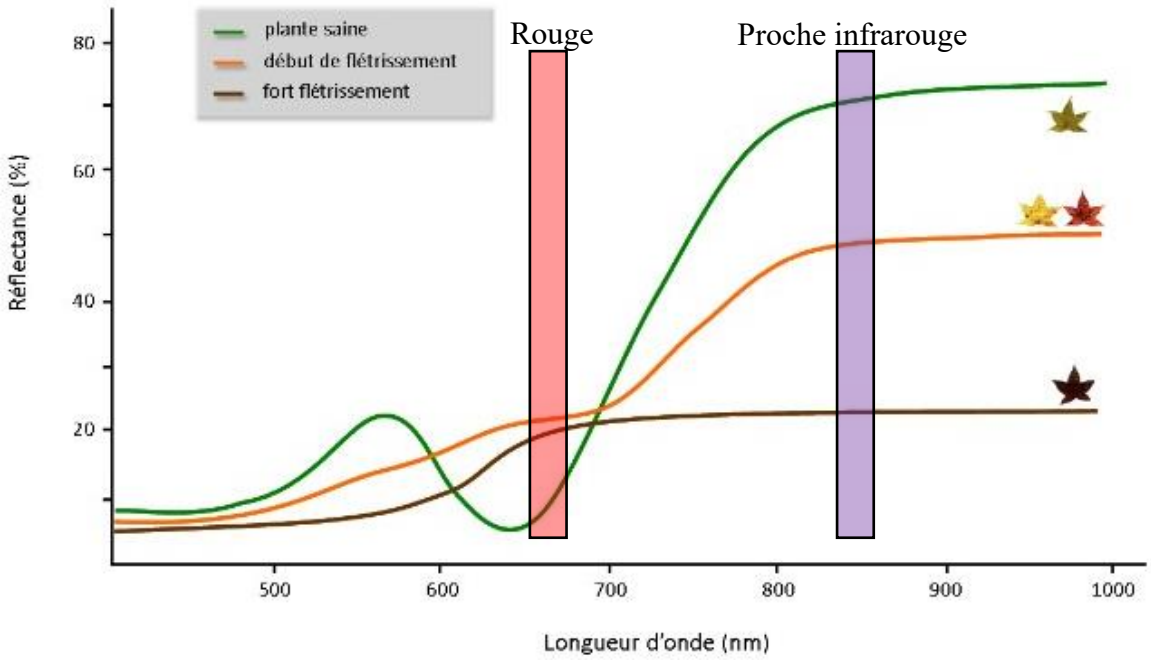


Figure 2.2 : Signature spectrale de la végétation.
Adapté de : *https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uved/envcal/html/*

L'indice de végétation du NDVI est le plus couramment utilisé afin d'obtenir une mesure par proxy de l'activité photosynthétique et de la santé des végétaux de l'Arctique (Stow et *al.*, 2004; Ju et Masek, 2016; Myers-Smith et *al.*, 2020). Cet indice se mesure facilement par la différence entre les bandes spectrales rouge et proche infrarouge et plusieurs capteurs satellitaires dont la série Landsat offre la possibilité d'utiliser ces bandes spectrales depuis la fin des années 1970 (Holben, 1986; Gamon et Qiu, 1999). L'indice NDVI permet une évaluation par estimation de la surface foliaire verte et de l'activité primaire de la photosynthèse des végétaux en plus d'obtenir indirectement le contenu en eau de la feuille (Gamon et Qiu, 1999; Gitelson et *al.*, 2009; Myers-Smith et *al.*, 2020) et des nutriments dans le sol (Gitelson et *al.*, 2009). L'indice de NDVI est donc une estimation générale de la densité et de la santé de la végétation par l'interprétation statistique du signal de la végétation de l'Arctique capté par les plateformes satellitaires (Myers-Smith et *al.*, 2020). L'utilisation de la télédétection permet avec l'indice du NDVI d'obtenir de l'information sur plusieurs caractéristiques du changement de la végétation tel que la croissance de la végétation, la croissance de la surface foliaire, le remplissage végétatif des zones dénudées et les changements de la bordure de l'écotone (Stow et *al.*, 2004; Myers-Smith et *al.*, 2020).

Néanmoins, plusieurs processus en lien avec les changements de la végétation peuvent affecter l'évolution de cet indice de la végétation dans les régions nordiques (Myers-Smith et *al.*, 2020; Davis et *al.*, 2021b) et davantage d'études doivent être menées afin de mieux comprendre et quantifier les effets de ces processus du changement dans la diversité de la végétation sur l'indice du NDVI (Stow et *al.*, 2004; Forkel et *al*., 2013; Berner et *al.*, 2020).

2.4.2. Les plateformes satellitaires Landsat

Depuis presque cinq décennies, les plateformes satellitaires sont employées afin d'acquérir le signal émis par la végétation. En effet, ces plateformes sont munies de capteurs qui peuvent recevoir et interpréter la réflectance dans plusieurs longueurs d'onde. La série de satellites Landsat fut lancée en 1972 avec des observations planétaires prises en continu, ce qui en fait l'une des plus longues séries d'images disponibles (Masek et *al*., 2020). C'est avec le capteur Thematic Mapper (TM) sur Landsat 5 (1984) que la précision des données a augmenté avec les bandes de 30 m de résolution dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge à onde courte. La série d'images Landsat est maintenant assurée par les satellites Landsat 7 avec un capteur Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM^+) (1999) et Landsat 8 avec un capteur Operation Land Imager (OLI) (2013) (McManus et *al.*, 2012; Ju et Masek, 2016; Gascon et *al.*, 2017). Les images satellitaires du satellite Landsat 9 lancé le 27 septembre 2021 (Montanaro et *al*., 2022) sont maintenant disponibles et lorsqu'elles sont couplées avec les images du satellite Landsat 8, la résolution temporelle est de 8 jours (Masek et *al*., 2020; Montanaro et *al*., 2022). Landsat 9 est équipé d'un capteur Operational Land Imager 2 (OLI-2), un capteur semblable au satellite Landsat 8, mais qui améliore la précision de la correction de terrain et la réflectance de surface, avec une résolution de 10 m pour les bandes du visible et du proche infrarouge et de 60 m pour les bandes thermiques (Masek et *al*., 2020; Montanaro et *al*., 2022). La série Landsat offre un fort potentiel pour le suivi historique du changement de l'indice NDVI de la végétation de l'Arctique depuis 1984 avec des images calibrées et géoréférencées d'une résolution spatiale de 30 m et une répétitivité d'environ 16 jours (Ju et Masek, 2016; Masek et *al*., 2020).

2.4.3. Complexité de l'interprétation des indices de la végétation

L'interprétation du NDVI dans les hautes latitudes doit être faite en prenant compte des difficultés et des réalités de la région. En effet, la résolution grossière empêche le suivi à haute précision, les angles bas des rayons solaires, les longues nuits polaires, la courte saison de croissance végétale et les phénomènes météorologiques et atmosphériques (nuages, brouillard, humidité et neige) réduisent la qualité des images et donc l'interprétation du NDVI (Holben, 1986; Roy et *al.*, 2008; Forkel et *al*., 2015; Ju et Masek, 2016; Myers-Smith et *al.*, 2020). Cependant, pour le suivi à grande échelle l'utilisation des images satellitaires est idéale et la précision de l'indice est augmentée avec des validations sur le terrain avec des outils comme les drones et les mesures de la végétation avec des parcelles (Myers-Smith et *al.*, 2020; Assmann et *al.*, 2020; Berner et *al.*, 2020). Par contre, plusieurs autres plateformes satellitaires sont accessibles pour faire le suivi de la végétation comme MODIS (depuis 2002 : Didan, 2015, mais avec des résolutions spatiales de 500 m) et la série Sentinel-2 (depuis 2015 : Gascon et *al.*, 2017; Bayle et *al.*, 2019), mais ces séries offrent une moins grande temporalité. Donc la série de satellites Landsat offre la meilleure série temporelle pour étudier l'évolution dans le temps de la végétation (Ju et Masek, 2016; Gascon et *al.*, 2017).

2.4.4. Véhicule aérien sans pilote

De plus, les avancements technologiques des véhicules aériens sans pilote (UAV) et des capteurs multispectral (visibles, red edge et proche infrarouge) améliorent la capture d'images et permettent le calcul d'une diversité d'indices phénologique de la végétation (Assman et *al.*, 2020; D'Odorico et *al.*, 2021). Les UAV offrent le potentiel d'utilisation de différent proxy d'indice de la végétation tels le NDVI, le NARI (Normalized Anthocyanin Reflectance Index), basé sur la réflectance du pigment de l'anthocyanine au niveau spectrale de la bande du red edge à 700 nm (Gitelson et *al.*, 1996 et 2009; Bayle et *al*., 2019) et le PRI (Photochemical reflectance index) basé sur la réflectance du changement dans le cycle du pigment de la xanthophylle entre 531 et 570 nm (D'Odorico et *al.*, 2021). Ces indices de la végétation (NARI et PRI) sont basés sur la réflectance des pigments (anthocyanine et xanthophylle) qui sont présents ou produits durant certains épisodes de stresse sur le végétal comme la baisse de la luminosité à la fin de la saison

estivale, les périodes de gel la nuit et le manque d'eau (Gitelson et *al.*, 2009; D'Odorico et *al.*, 2021).

De plus, les UAV permettent aussi la capture de différent stade phénologique de la végétation durant l'année (Assman et *al.*, 2020; D'Odorico et *al.*, 2021) et l'hétérogénéité du changement de la végétation (Assman et *al.*, 2020). L'utilisation du drone pour effectuer les suivis écologiques à l'échelle locale devient un outil de grande valeur tant pour la précision, la qualité et le rendement économique des images capturées. Cependant, une incohérence persiste encore dans le suivi des écosystèmes et de la végétation entre les différentes plateformes satellitaires utilisées à l'échelle régionale, les images obtenues avec l'utilisation d'un drone et le suivi par échantillonnage terrain (Assmann et *al.*, 2018, 2020).

L'utilisation d'un UAV permet aussi de couvrir le changement de la végétation à l'échelle régionale plus précisément et plus rapidement que les images satellites ou les études terrains (Assmann et *al.*, 2018, 2020). Ces procédures dans l'étude du changement de la végétation de l'Arctique viennent compléter le jeu de donnée entre les indices de la végétation satellitaires et les relevés des paramètres effectués *in situ* sur une parcelle de végétation (Myers-Smith et *al*., 2020; Assman et *al.*, 2020). L'étude d'Assmann et *al.* (2020) a démontré que l'utilisation d'un UAV avec un capteur multispectral permet de faire une discrimination des végétaux et augmente la précision de l'échantillonnage *in situ*. De plus, cette étude a aussi observé la dynamique de la croissance estivale de la végétation afin de mieux comprendre les stades de la croissance. À fine échelle, les données obtenues avec un UVA et les données de la caractérisation *in situ* augmente la compréhension de la variation végétale sur le paysage et des impacts écologiques sur l'écosystème de l'Arctique (Assman et *al.*, 2020).

CHAPITRE III

CARACTÉRISATION DU CHANGEMENT DE LA VÉGÉTATION DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE KOROC AU NUNAVIK

1. Introduction

Les régions de l'Arctique sont particulièrement sensibles au changement climatique et au réchauffement de la température (ACIA, 2005; Brown et *al.*, 2017; Box et *al.*, 2019). L'Arctique se réchauffe en moyenne quatre fois plus rapidement que le reste de la moyenne du globe (Rantanen et *al.*, 2022). Le réchauffement de l'Arctique vient perturber les cycles naturels météorologiques du climat de la région (Pithan et Mauritsen, 2014; Box et *al.*, 2019; Rantanen et *al.*, 2022). Ces perturbations peuvent être en lien avec la diminution de l'albédo de la glace, le changement du régime des précipitations liquides, le taux d'humidité du sol ou la réduction de la durée de la couverture neigeuse (Pithan et Mauritsen, 2014; Box et *al.*, 2019; Rantanen et *al.*, 2022). Ces phénomènes climatiques peuvent venir influencer et affecter les mécanismes physiologiques et phénologiques naturels des végétaux (Myers-Smith et *al*., 2011; Martin et *al.*, 2017; Box et *al.*, 2019).

Dans la région du Nunavik, située sur la péninsule du Québec-Labrador, la température moyenne annuelle, depuis le début des années 1990, a augmenté d'environ 2°C (Brown et *al.*, 2012). Certains des effets de ce changement de température peuvent être une plus longue saison de croissance de la végétation, une réduction de la durée de la couverture de neige ou une augmentation des précipitations liquides au détriment des précipitations de neige (Brown et *al.*, 2012; Cohen et *al.*, 2019). Ces variables météorologiques viennent agir et influer sur la croissance de la végétation du Nunavik (Brown et *al.*, 2012; Martin et *al.*, 2017). Globalement, les écosystèmes du Nunavik voient leur couverture végétale augmenter soit par une colonisation sur de nouveaux environnements soit par une

augmentation de la biomasse végétale ou par une reproduction plus efficace (Myers-Smith et *al*., 2011; McManus et *al.*, 2012; Tremblay et *al.*, 2012; Martin et *al.*, 2017). Cette augmentation de la couverture végétale est souvent appelée « Arctic Greening » (Myers-Smith et *al*., 2011; Ju et Masek, 2016; Myers-Smith et *al*., 2020) (verdissement de l'Arctique) lorsqu'il est observé à partir des images satellitaires. L'indice de végétation du *normalized difference vegetation index* (NDVI) est basé sur la réflectance du proche infrarouge et de l'absorption du rayonnement rouge par la végétation (Tucker, 1978; Gamon et Qiu, 1999; Sim et Gamon, 2002) capté par les plateformes satellitaires (Myers-Smith et *al*., 2011).

Les études qui utilisent les indices de végétation disponibles avec les images satellites comme celle de McManus et *al.* (2012) ou encore celle de Bayle et *al.* (2022) confirment une augmentation de la végétation et un verdissement sur la majorité du territoire du Nunavik. De plus, les études de Tremblay et *al.*, (2012), qui utilise la dendrologie et la caractérisation *in situ* dans la région de Kangiqsualujjuaq, et celle de Provencher-Nolet et *al.* (2014), qui analysent des photographies aériennes dans la région d'Umiujaq, viennent corroborer l'augmentation de la biomasse végétale. Dans l'ensemble, l'augmentation de l'indice du NDVI dans l'Arctique est majoritairement corrélée avec la croissance des arbustes érigés (Myers-Smith et *al*., 2011; McManus et *al.*, 2012). L'augmentation des arbustes érigés peut être définie soit par une croissance verticale, soit par un comblement de la talle de végétation soit par la colonisation d'un nouvel environnement (Myers-Smith et *al*., 2011) et ce phénomène est fréquemment associé à l'arbustation « shrubification ». Plus spécifiquement, le bassin versant de la rivière George, à proximité de l'embouchure de la rivière Koroc, l'étude de Bayle et *al*. (2022) a démontré un verdissement hétérogène et latitudinal réparti en deux vagues soit la première en 1996 et la seconde en 2011.

La communauté de Kangiqsualujjuaq sur la péninsule de l'Ungava au Nunavik observe des changements dans la répartition de la végétation depuis quelques décennies. En effets, selon leurs observations, la répartition des arbustes érigés aurait augmenté et la répartition des plantes à petits fruits serait en déclin dans la région du bassin versant de la rivière Koroc. Ces observations locales concordent avec les analyses et les interprétations des

images satellitaires et des photographies aériennes du Nunavik (McManus et *al.*, 2012; Tremblay et *al.*, 2012; Dufour-Tremblay et *al.*, 2012; Provencher-Nolet et *al.*, 2014; Lemay et *al*., 2018). En utilisant l'indice du NDVI des images de la série de satellites Landsat, un suivi du changement de la végétation du bassin versant de la rivière Koroc peut être réalisé. Cependant, cet indice ne permet pas de comprendre la complexité et les processus du verdissement en lien avec le réchauffement climatique à l'échelle locale ni de connaitre les espèces végétales qui sont impliquées dans les processus du verdissement.

Le but du projet est de caractériser et de mieux comprendre les processus du verdissement qui s'opère dans le bassin versant de la rivière Koroc. Dans ce cadre nous allons 1) caractériser le verdissement à partir d'image satellitaire Landsat de 1984-2020 sur l'ensemble du bassin versant de la Koroc. Ensuite, 2) avec l'aide de relevés de végétation *in situ*, comprendre les processus du verdissement tel que mesuré par les satellites le long du gradient altitudinal de la rivière Koroc.

2. Méthode

2.1. Site de l'étude

2.1.1. Le bassin versant de la rivière Koroc

Le site de l'étude est le bassin de la rivière Koroc situé dans le parc national de Kuururjuaq au nord-est du Nunavik, Québec (Figure 3.1). Ce parc, fondé en mai 2009, couvre une superficie de 4 460 km^2 et est traversé par la rivière Koroc qui prend sa source dans les monts Torngat (Cossette et Hébert, 2007). La rivière coule sur 165 km en direction de l'ouest vers la baie d'Ungava. Le bassin versant couvre une superficie de 4 011 km^2 et se situe à l'est de la baie d'Ungava et à l'ouest de la frontière du Québec et du Labrador sur un dénivelé de 760 m. Les deux principaux bassins secondaires sont ceux de la rivière Sukaliuk (659 km^2) et celui de la rivière André-Grenier (640 km^2, ARK, 2005). La rivière Koroc s'écoule dans les vallées postglaciaires et traverse trois régions physiographiques (Desponts, 2004; Cossette et Hébert, 2007). La première est le massif des monts Torngats, puis les hauts plateaux de la rivière Koroc, ensuite les Basse-Terre de l'Ungava et la 4e région sont la vallée de la rivière Koroc et de ses tributaires (ARK, 2005; Cossette et Hébert, 2007). Les données climatiques régionales (Kuujjuaq) rapportent une température

moyenne au mois de janvier de -24,3°C et en juillet de 11,5°C et dans les monts Torngat du plateau de la rivière Koroc, une température moyenne annuelle de -7,5°C (ARK, 2005). Les températures sont généralement plus chaudes au niveau des vallées et à l'embouchure de la rivière Koroc dans la baie d'Ungava. La saison de croissance est d'environ de 20 à 40 jours à l'est au niveau des monts Torngat et du plateau et de la vallée de la rivière Koroc et de 40 à 60 jours du côté ouest du bassin versant (ARK, 2005). Le couvert de neige (enregistré à Kuujjuaq) est d'une durée approximative de 204 jours soit de fin septembre à mai et estimé à 270 jours dans le bassin de la rivière Koroc (Brown et *al.*, 2012) avec une précipitation annuelle moyenne entre 200 et 800 mm (ARK, 2005). Le bassin versant se retrouve dans les zones de végétation de la forêt boréale et Arctique. Les domaines bioclimatiques de la forêt boréale de la toundra forestière et de la toundra du Bas-Arctique à arbustes prostrés et à arbustes dressés (MFFP, 2022).

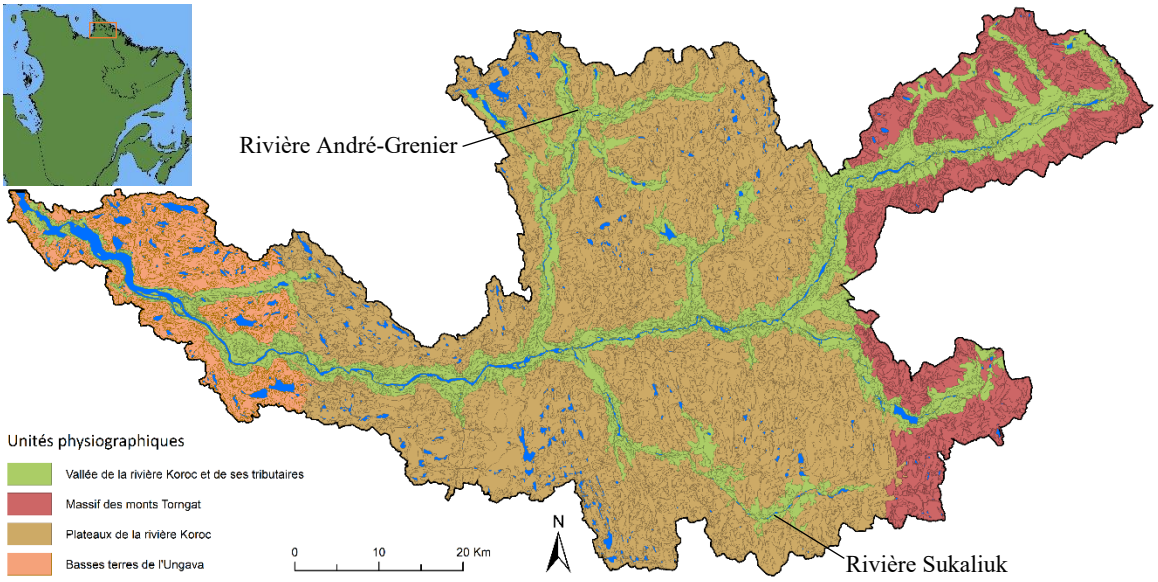


Figure 3.1 : Les quatre régions physiographiques du bassin versant de la rivière Koroc (adapté de Despont, 2004; ARK, 2005 et Leboeuf et *al.*, 2018).

Le territoire présente un paysage caractérisé par un relief de forte amplitude. Au niveau de la chaîne de montagnes des monts Torngat à l'est, le mont d'Iberville culmine à 1646 m et le relief est accidenté avec des sommets escarpés, formés de vallées glaciaires et de cirques, vestiges de la présence passée des glaciers. Les dénivellations entre le fond des vallées jusqu'aux sommets peuvent aller jusqu'à 600 m. Plus au centre du bassin, les sommets

escarpés laissent place à des sommets plus arrondis d'une altitude moyenne de 760 m du haut plateau de la rivière Koroc. Le plateau est caractérisé par des pentes moins abruptes, mais avec des vallées profondes en auge à l'est qui finissent par s'aplanir au niveau des Basse-Terre et de la baie d'Ungava à l'ouest. La rivière Koroc et ses tributaires s'écoulent en formant des vallées profondes en auge à travers des falaises escarpées, ces vallées tracent un gradient altitudinal abrupt (Despont, 2004; ARK, 2005; Cossette et Hébert, 2007). La surface du sol du bassin versant est couverte de dépôts glaciaires et fluvioglaciaires. Les vallées sont remblayées de dépôts de meubles, de sables et de graviers qui drainent bien le sol (ARK, 2005; Cossette et Hébert, 2007). Ce relief accidenté et hétérogène caractérise le bassin versant de la rivière Koroc et celui-ci vient influencer le climat, les précipitations et les vents. Les vents sont fréquents avec une forte vélocité (moyenne : 24 km/h) et s'adoucissent en zone côtière. La température y est plus chaude au niveau des vallées de la zone de forêt boréale et plus rigoureuse en altitude et dans le massif des monts Torngat.

Le relief accidenté du territoire à la frontière de la transition de la forêt boréale ouverte à pessière de lichens et de mousse et de la végétation subarctique et de la toundra du Bas-Arctique permet de soutenir et d'enclaver une grande richesse écologique et diversifiée de la végétation due au chevauchement entre les zones de végétation (Despont, 2004; ARK, 2005; Cossette et Hébert, 2007). La zone de forêt boréale retrouvée au sud en basse altitude est une transition de la forêt boréale continue et fermée vers un milieu ouvert ou les conifères sont dispersés et concentrés dans les zones abritées par le relief des vallées. La toundra arctique est composée de végétation arbustive, herbacée, de lichens et de mousse ou les arbres sont absents (Despont, 2004; ARK, 2005).

La végétation est répartie le long du gradient altitudinal du bassin versant. En basse altitude où le climat est plus favorable, le pergélisol est discontinu et forme des dépressions de milieu humide lors du dégel (Cossette et Hébert, 2007). Tandis que sur les escarpements exposés et en plus haute altitude la végétation la taïga transige vers une végétation de toundra arctique arbustive et sur les sommets la végétation est caractérisée par des herbacées, des lichens, des mousses et des arbustes prostrés (Despont, 2004). Cette

transition se fait lentement le long de la rivière Koroc de l'aval jusqu'à l'amont cependant elle est rapide le long des escarpements abrupts des vallées jusqu'au sommet des montagnes (Despont, 2004; ARK, 2005). Une influence du gradient latitudinal a été démontrée par l'étude de Bayle et *al.* (2022) dans le bassin versant de la rivière George au Nunavik et il est donc intéressant de voir si la même influence sur la végétation peut s'observer, mais de façon altitudinale. Au total en 2005 dans le parc national de Kuururjuaq c'est 269 espèces de plantes vasculaires qui ont été répertoriées (Cossette et Hébert, 2007).

2.1.2. Classification de la végétation

La végétation du territoire à l'étude a été classifiée avec les codes de la cartographie écologique de la végétation du Nord Québécois du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (Leboeuf et *al*., 2018). La correspondance de la cartographie de Leboeuf et *al*. (2018) avec la végétation est adaptée selon le type de couvert de la surface foliaire des résineux (R) et de la végétation dominante du sous-bois. Pour cette étude, la végétation a été regroupée en 8 classes de végétation (Tableau 3.1). Les codes de terrain de la végétation ont ainsi été regroupés tels qu'adaptée de l'étude de Bayle et *al.* (2022).

Tableau 3.1 : Classes de végétation par type de couvert de Bayle et *al*. (2022) selon les normes des codes de terrain de la cartographie de Leboeuf et *al*. (2018).

Code des couverts de la végétation, adapté de Bayle et *al*. (2022)	Code de couleur	Code terrain (Leboeuf et *al.*, 2018)
BF (boreal forest)		RaD, RaL, RcD, RcL, RcmD, RcmL, RmC, RmD et RmL
VMH (wetlands vegetation)		TAR, TMS et TMU
SAV (sub-arctic vegetation)		LS, LSA, LSR et RLS
EST (erect shrub tundra)		AAB, AB, AH, TD, TDA et TDC
ESTR (erect shrub tundra with rock)		RTD et TDR
PST (prostrate shrub tundra)		TP
PSTR (prostrate shrub tundra with rock)		RTP
SN (non-vegetated lands)		AR, NE et SD

Ces classes sont, la forêt boréale (*boreal forest* : BF), la végétation humide et des tourbières sous la classe de la végétation des milieux humides (*wetlands vegetation* : VMH), la végétation subarctique (*sub arctic vegetation* : SAV), la toundra arbustive érigée de hauteur

de plus de 30 cm (*erect shrub toundra* : EST), la toundra arbustive érigée avec substrat rocheux de plus de 50 % (*erect shrub toundra with rock* : ESTR) la toundra arbustive prostrée de moins de 30 cm (*prostrate shrub toundra* : PST) et la toundra arbustive avec substrat rocheux de plus de 50 % (*prostrate shrub toundra with rock* : PSTR), et les sols sans végétation ou dénudés de plus de 80 % (*non-vegetated lands* : SN). Cette classification sépare les principaux regroupements de la végétation du Nunavik. La cartographie de la végétation a été faite avec un tampon de 50 m de chaque côté des berges de la rivière Koroc avec les polygones d'eau de la cartographie de Leboeuf et *al*. (2018) (Figure 3.2).

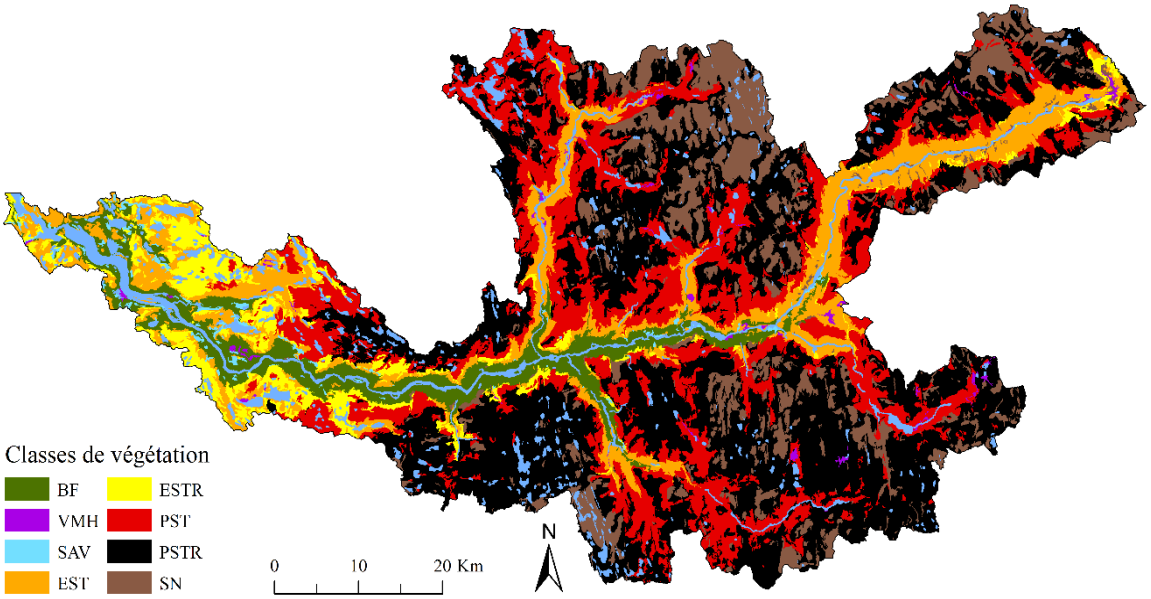


Figure 3.2 : Classe de végétation du bassin versant de la rivière Koroc (adapté de Leboeuf et *al*., 2018).

2.1.3. Les images satellitaires Landsat

La série d'images satellitaires qui a servi pour les analyses de changement de la végétation du territoire à l'étude provient des capteurs de la série Landsat 5 (TM), 7 (ETM^{+}) et 8 (OLI) obtenus avec la collection d'United States Geological Survey (USGS) de 1984 à 2021 pour la saison estivale soit de mi-juin à septembre. Ces images sont disponibles dans le catalogue de Google Earth Engine. Les images ont été traitées avec un masque *CFMASK* afin d'éliminer la neige, la couverture nuageuse et les ombrages (Gorelick et *al.*, 2017). Les images qui provenaient du capteur Landsat 8 (OLI) ont été ajustées selon la correction de l'étude de Roy et *al.*, (2016) afin de compenser la différence de largeur des bandes

spectrales avec les images provenant des capteurs Landsat 5 (TM) et 7 (ETM^+). Avec les classes de végétation adaptées de Leboeuf et *al.* (2018), un masque des surfaces d'eau et un tampon de 50 m sur la rivière Koroc ont été appliqués aux images. Ensuite, pour chaque année (1984 à 2021) la valeur de NDVI annuelle la plus élevée a été calculée pour chaque pixel afin d'obtenir une image annuelle du maximum de NDVI (NDVImax) (Holben, 1986) de la saison de croissance qui s'étend généralement de fin juin à début septembre soit d'environ 60 jours (Despont, 2004; ARK, 2005; Brown et *al*., 2012). Ainsi, 37 images du maximum de NDVI annuelle de la saison de croissance ont été obtenues pour le bassin versant de la rivière Koroc (NDVImax).

a) Tendance du ΔNDVImax

Avec les cartes NDVImax, des tendances ont été calculées avec le test de Theil-Sens afin d'obtenir des tendances de l'indice NDVImax (ΔNDVImax) pour chaque pixel entre 1984 et 2021. Avec cette méthode statistique, le phénomène d'autocorrélation temporelle entre données est réduit (Forkel et *al.* 2013). Avec Google Earth Engine, ce test a été calculé à partir du NDVImax entre une paire d'images correspondant à deux années consécutives (ΔT) pour chaque pixel de la zone d'étude. Une valeur de la médiane des tendances a ensuite été calculée entre les paires d'images de la série selon l'équation 1 :

Équation 1 : $\Delta NDVI_{max} = \sum \tilde{X}\left(\frac{(NDVI_{\max T+1} - NDVI_{\max T})}{(T_{+1} - T)}\right)$

b) Tendance du ΔNDVImaxRR

Une analyse supplémentaire a été effectuée sur l'indice NDVImax relatif (ΔNDVImax RR). Cet indice est le résultat du ΔNDVImax divisé par une valeur de référence. Cette valeur de référence est une valeur modélisée de la série chronologique pour chaque pixel, soit les valeurs des NDVImax, calculés à partir de la régression de l'équation 1. La valeur du NDVImax de 1984 a donc été utilisée dans l'équation du calcul du ΔNDVImaxRR. L'équation 2 a été appliquée sur la série des images de NDVImax. Le ΔNDVImaxRR représente donc un rapport du ΔNDVImax à la valeur initiale du NDVImax de 1984. Cet indice peut permettre de faire ressortir des changements de la végétation où initialement l'indice de végétation du NDVI était faible. Les faibles changements de l'indice du

NDVImax sont plus dans ces zones qui sont plus difficiles à percevoir. L'indice du NDVImaxRR permet d'associer un changement dans l'écosystème avec soit une nouvelle présence de végétation dans des zones où la végétation était faible ou absente (selon l'indice NDVI), soit par une augmentation de la surface végétale présente. Cette méthode permet d'obtenir des valeurs de référence et des taux de changement qui sont comparables pour la période d'analyse de l'ensemble du bassin versant de la rivière Koroc.

Équation 2 : $\Delta NDVI_{max}RR = \frac{(\Delta NDVI_{max})*37}{NDVI_{1984}}$

2.1.4. Plan d'échantillonnage *in situ* de la végétation

Une campagne d'échantillonnage a été faite durant l'été 2022 en deux sorties distinctes. La première sortie a permis d'échantillonner trois secteurs, soit le mont d'Iberville et le haut Koroc (encadré vert) et celui du camp Qurlutuarjuq (encadré bleu) (Figure 3.3). Cette campagne a débuté le 21 juillet au moment où la productivité photosynthétique est à son maximum et la seconde partie de l'échantillonnage a été faite dans le secteur du haut Koroc et du camp Qurlutuarjuq entre le 26 août et le 1er septembre, au moment de la sénescence de la végétation. Le but des deux campagnes distinctes a permis d'observer l'effet du stress causé par la diminution de la température et de la luminosité sur la réflectance de certaines plantes, dont les arbustes à petits fruits.

Le plan d'échantillonnage systématique a été conçu avec l'objectif de couvrir différents gradients altitudinaux et d'associer les gradients du changement du ΔNDVImax pour les différentes classes de végétation (faible; moyen; fort). L'échantillonnage de la végétation a été fait dans le but que chaque quadrat de caractérisation couvre au moins l'équivalent d'un pixel Landsat de 30 m x 30 m. Afin de couvrir sur le terrain l'équivalant d'un pixel Landsat, 25 points de caractérisations ont été placés avec une distance d'environ 10 m entre chaque point (Figure 3.4). Chaque point a été géoréférencé et les espèces végétales présentes sur le point ont été caractérisées. Les trois espèces avec le plus fort couvert sur un rayon de 50 cm ont été identifiées à l'espèce. La hauteur de l'espèce végétale avec le plus fort couvert a été mesurée. L'épaisseur de la couche de matière organique a été mesurée au centre du quadrat de caractérisation. La végétation du paysage a été identifiée

à l'une des 8 classes de végétation. Les 25 points de caractérisations ont été géoréférencés avec GPS de haute précision. Au total, 104 quadrats ont donc été faits dans le bassin versant de la rivière Koroc. Les quadrats de végétation ont été répartis sur les 3 secteurs du bassin versant de la rivière Koroc à l'étude. Au total, 11 quadrats de caractérisation ont été effectués dans le secteur du mont d'Iberville, 48 quadrats dans le secteur du haut Koroc et 45 quadrats dans le secteur du camp Qurlutuarjuq et au moins 5 quadrats de caractérisation ont été placés dans chaque classe de végétation (BF; VMH; SAV; EST; PST; SN) à l'exception des classes de végétation ESTR et PSTR où aucun quadrat de caractérisation n'a pu être placé (Tableau 3.3, section 3. Résultat).

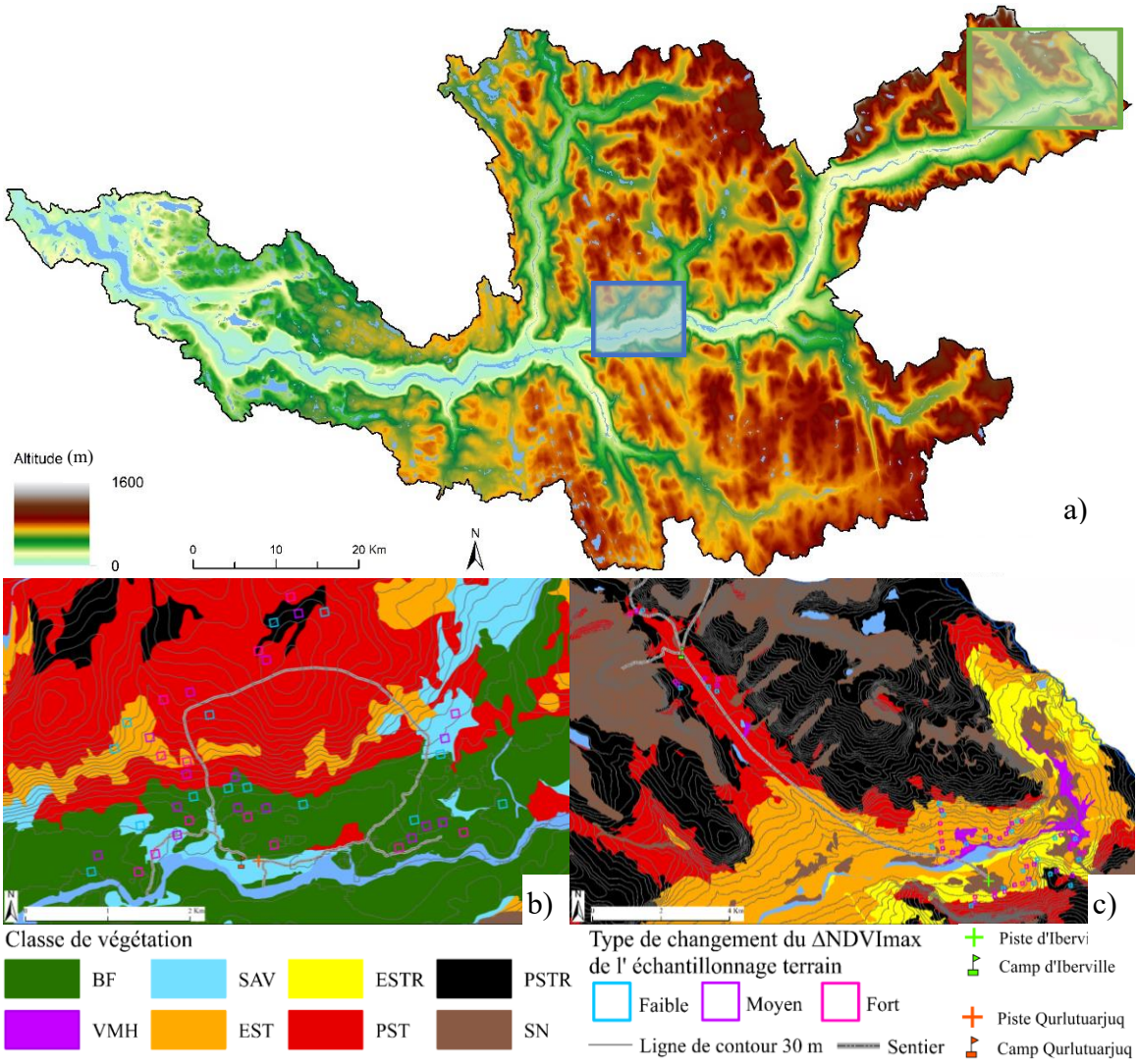


Figure 3.3 : Topographie du bassin versant de la rivière Koroc (a) et les sites d'études du camp Qurlutuarjuq (b) et du haut Koroc et mont d'Iberville (c).

Les espèces identifiées sur le terrain ont été regroupées selon des critères de similitudes et de fonctions. La végétation vasculaire a été réunie en 7 catégories de végétation et la végétation non vascularisée en 2 catégories. Les lichens, les cladonies et les autres espèces non vasculaires des milieux sèches ont été regroupés sous la catégorie des lichens et la végétation non vasculaire (Bryophtes) des milieux humides a été regroupée sous la catégorie des mousses. Les conifères ont été regroupés sous la catégorie couvert de conifère. Les espèces de *Salix* dans la catégorie du couvert des *Salix* et les espèces de rhododendrons ont été regroupées dans la catégorie couvert des *Rhododendron*. Les plantes à petits fruits comestibles dont les *Ericacea* mais en excluant les *Ericacea* sans fruits comestibles ont été regroupés sous la catégorie couvert des *Ericacea*. Cette catégorie comprend les arbustes *Arctous alpina*, *Empetrum nigrum*, *Rubus arcticus*, *Vaccinum vitis-ideae* et *Vaccinum uliginosum*. Les herbacées (phorbes et graminoïdes) et les *Ericacea* sans fruits comestibles ont été regroupés sous la catégorie couvert des *Graminea*. Voir le tableau du recouvrement et fréquence des espèces végétales de l'Annexe A. Les sols dénudés de végétation à plus de 70 %, les zones de neiges, de sol humide, de gravier et sable ou de sol exposé ou des matières ligneuses mortes dues à une perturbation ont été regroupés sous la catégorie couvert des sols nus. Pour l'ensemble des classes, le pourcentage de recouvrement a été calculé en fonction de la dominance de chaque espèce sur les 25 points échantillonnés (Figure 3.4.).

2.1.5. Les variables cartographiques

Les données cartographiques d'élévation, et hydrographiques ont été obtenues sur le répertoire géographique du Ministère des Ressources naturelles et des Forêts du gouvernement du Québec. La couche de la matrice d'élévation est d'une précision de 30 m de côté. Avec la matrice d'élévation de 30 m et l'outil de direction de l'écoulement de l'eau, une carte du niveau d'humidité a été créée (TWI), adaptée de l'étude *Topographic Wetness Index Urban Flooding Awareness Act Action Support* de Clayton Ballerine (2017) afin d'interpréter l'importance de l'humidité sur la végétation. Cet indice permet de distinguer les zones qui seraient plus susceptibles d'être, soit inondées, soit aride en plus de pouvoir discerner l'écoulement de l'eau.

2.2. Les analyses

2.2.1. Identification du changement de l'indice du NDVI

L'évolution temporelle et spatiale du verdissement du bassin versant de la rivière Koroc a été faite avec l'analyse du changement de l'indice du NDVI. Cette analyse a été basée sur la tendance du changement de l'indice du NDVI (ΔNDVImax : équation 1) et sur l'analyse de la tendance relative du changement de l'indice NDVI (ΔNDVImaxRR : équation 2). Ces analyses sont basées sur les variations de ces deux indices en fonction des classes de végétation présentent sur le territoire du pixel de l'indice du NDVI. Ainsi, une analyse des classes de la végétation selon le ΔNDVImax et le ΔNDVImaxRR a été faite afin de mieux comprendre l'évolution du verdissement par le changement du NDVImax par classe de la végétation. Pour ce faire, chaque pixel de chaque centroïde des polygones identifiés par les classes de la végétation a été identifié et des moyennes des ΔNDVImax et des ΔNDVImaxRR avec les 8 pixels adjacents ont été calculées afin de réduire les erreurs dues à un pixel erroné. Cette analyse a permis d'observer l'évolution du verdissement du bassin versant de la rivière Koroc de chacune des classes de végétation, et ce pour la période de 1984 à 2020.

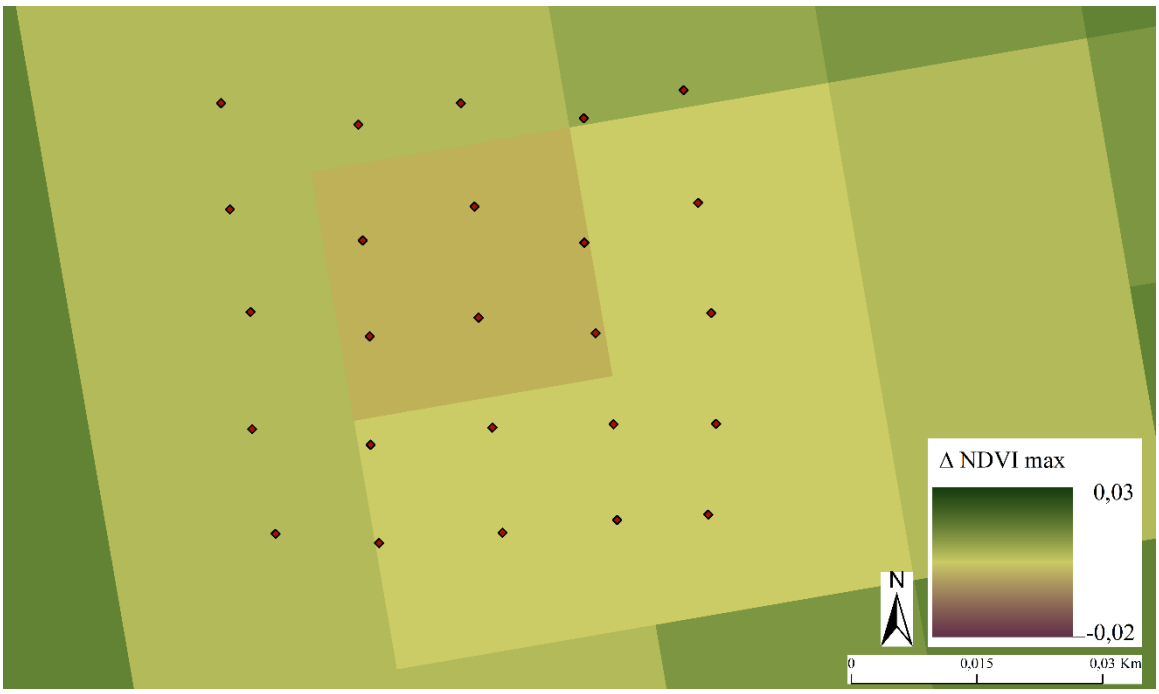


Figure 3.4 : Exemple d'une zone d'échantillonnage terrain des quadrats de végétation. Les 25 points montrent la caractérisation de la végétation et les pixels, le changement du ΔNDVImax.

2.2.2. Caractérisation du verdissement du bassin versant de la rivière Koroc

Le but de ces analyses est de caractériser à l'échelle locale les processus du verdissement de la végétation du bassin versant de la rivière Koroc. Les analyses ont donc été basées sur les paramètres observés sur le terrain, le ΔNDVImax et les paramètres géophysiques. Afin de mieux comprendre ce qui caractérise et influence le verdissement au niveau de la végétation sur le terrain, une analyse plus approfondie des variables a été faite. Cette analyse a été faite en utilisant l'approche du Random Forest (RF) avec le logiciel R et l'application du format Ranger et les paramètres Tunes Ranger afin d'optimiser les paramètres utilisés dans le RF. Le RF a été utilisé pour identifier les variables qui expliquaient le ΔNDVImax observé par les satellites Landsat. Une première série d'analyse par l'approche RF_ensemble utilisant l'ensemble des variables disponibles a permis d'identifier les variables qui exerçaient une certaine influence sur le ΔNDVImax et d'éliminer les variables qui n'avaient pas de pouvoir explicatif. Le tableau 3.2 présente l'ensemble des variables utilisées dans le RF_ensemble, issues de différentes sources, incluant les mesures prises dans les quadrats. Un deuxième RF plus raffiné (RF_raffiné) a été fait avec les variables identifiées comme influentes sur le ΔNDVImax en lien avec le ΔNDVImax. Avec le logiciel R des modèles de régression linéaire simple ont ensuite été appliqués en utilisant les variables influentes selon chaque classe de végétation afin de comprendre le rôle de ces variables sur dans le ΔNDVImax.

2.2.3. L'influence des variables sur le ΔNDVImax

Une autre analyse de l'influence des variables sur le ΔNDVImax a été fait un utilisant l'outil statistique des arbres de décision avec le logiciel R et l'outil 'rpart' de la librairie 'rpart.plot'. Cette approche qui utilise les arbres de décision a permis de comparer l'influence des différentes variables sur le ΔNDVImax et de caractériser l'influence des variables sur la direction du changement du ΔNDVImax. Cette approche permet de mieux cibler certains processus du verdissement de la végétation à l'échelle locale. L'algorithme de l'arbre de décision fonctionne en calculant plusieurs arbres de décision avec un sous-échantillon aléatoire (70 / 30) des données et utilise la moyenne des prédictions de chaque arbre. La précision est améliorée avec cette moyenne et le contrôle du surajustement, c'est à dire que la profondeur du modèle peut être limitée manuellement. Chaque nœud

représente une décision basée sur une caractéristique qui influence la variable recherchée c'est-à-dire le ΔNDVImax.

Tableau 3.2 : Synthèse des variables prédictives d'analyses du ΔNDVImax et du ΔNDVImaxRR avec le mode d'acquisition de la donnée.

Variables	Définition de la variable	Acquisition
Altitude	Matrice d'élévation à partir du niveau de la mer	Cartographique
Classe de la végétation	Code cartographique de la végétation du nord (Leboeuf et *al.*, 2018)	Cartographique
Couvert des *Alnus*	Pourcentage de recouvrement des *Alnus*. Calculé selon le nombre de points par quadrat	Observation
Couvert des *Betula*	Pourcentage de recouvrement du *Betula*. Calculé selon le nombre de points par quadrat	Observation
Couvert des conifères	Pourcentage de recouvrement des espèces de conifères observées sur le terrain. Calculé selon le nombre de points par quadrat	Observation
Couvert des *Ericacea*	Pourcentage de recouvrement de toutes les espèces de plantes à petits fruits observées sur le terrain. Calculé selon le nombre de points par quadrat	Observation et interprétation
Couvert des *Gramineae*	Pourcentage de recouvrement des espèces *Herbaceae* (phorbes) et des *Herbaceae* (graminoïdes) sans petits fruits observés sur le terrain. Calculé selon le nombre de points par quadrat	Observation et interprétation
Couvert des lichens	Pourcentage de recouvrement des *Cladonia sp.* et des lichens observés sur le terrain. Calculé selon le nombre de points par quadrat	Observation et interprétation
Couvert des mousses	Pourcentage de recouvrement de toutes les espèces de mousses observées sur le terrain. Calculé selon le nombre de points par quadrat	Observation et interprétation
Couvert des *Rhododendron*	Pourcentage de recouvrement des *Rhododendron sp.* observé sur le terrain. Calculé selon le nombre de points par quadrat	Observation
Couvert des *Salix*	Pourcentage de recouvrement des *Salix sp.* observé sur le terrain. Calculé selon le nombre de points par quadrat	Observation
Couvert des sols nus	Pourcentage de recouvrement des quadrats des sols nus observés sur le terrain. Calculé selon le nombre de points par quadrat	Observation et interprétation
Hauteur des *Alnus*	Moyenne de la hauteur des *Alnus* mesurés dans le quadrat	Mesuré en cm
Hauteur des *Betula*	Moyenne de la hauteur des *Betula* mesuré dans le quadrat	Mesuré en cm
Hauteur des conifères	Moyenne de la hauteur des conifères mesurés dans le quadrat	Mesuré en cm
Hauteur des *Ericacea*	Moyenne de la hauteur des plantes à petits fruits mesurés dans le quadrat	Mesuré en cm
Hauteur des *Gramineae*	Moyenne de la hauteur des *Graminea* mesurée dans le quadrat	Mesuré en cm
Hauteur des mousses	Moyenne de la hauteur des mousses mesurée dans le quadrat	Mesuré en cm
Hauteur des *Rhododendron*	Moyenne de la hauteur des *Rhododendron sp.* mesurée dans le quadrat	Mesuré en cm
Hauteur des *Salix*	Moyenne de la hauteur des *Salix sp.* mesurée dans le quadrat	Mesuré en cm
Litières organiques	Épaisseur de la matière organique mesuré au centre des quadrats	Mesuré en cm
Texture du sol	Granulométrie et composition du sol au centre du quadrat	Observation et tactile
TWI	Indice d'humidité topographique (proxy)	Cartographique

3. Résultat

3.1. Caractérisation de la végétation du bassin versant de la rivière Koroc

3.1.1. Caractérisation de la végétation

Au total, 104 quadrats de 25 points de contrôles ont été caractérisés lors des campagnes terrain effectuées sur le bassin versant de la rivière Koroc (Tableau 3.3). Les 104 quadrats couvrent 6 classes de végétation et 48 taxa ont été identifiés (Tableau 3.3). L'espèce végétale ayant le plus grand pourcentage de couvert est le *Betula glandulosa* avec plus de 27 % de recouvrement sur le total des zones échantillonné. Cette espèce est retrouvée dans chaque classe de végétation. Le *B. glandulosa* a un recouvrement de plus de 40 % de la classe des EST (n = 39) et a été présent dans 92 % des zones d'échantillonnage de cette classe. Son pourcentage de recouvrement pour la classe de végétation des SAV (n = 5) est de 48 % avec une fréquence de 80 % des zones échantillonné. Son pourcentage de couvert pour les autres classes de végétation est de : 24 % avec une fréquence de 65 % pour les BF (n = 23), 28 % avec une fréquence de 83 % pour les VMH (n = 6), 24 % avec une fréquence de 65 % pour les BF (n = 23), 38 % avec une fréquence de 34 % pour les PST (n = 26) et un couvert de 22 % des SN avec une fréquence de 80 %.

La plante à petit fruit avec le plus grand pourcentage de recouvrement est le *Vaccinium uliginosum* avec 9 %. Il est à noter que cette espèce a été caractérisée dans 53 % des zones d'échantillonnage. C'est dans la classe de végétation des EST que le *V. uliginosum* a le plus de recouvrement avec 15 % (fréquence : 76 %) dans les 39 zones d'échantillonnage. Dans la classe de végétation des PST (n = 26), *V. uliginosum* a un recouvrement de 12 % (fréquence : 65 %) et de 10 % dans la classe de végétation des VMH (fréquence : 66 %). Le recouvrement de *V. uliginosum* dans les sols nus (n = 5) est de 2 % (fréquence : 40 %). Les autres plantes à petits fruits ayant un recouvrement d'au moins 0,5% sont les *A.alpina* (1 %), les *E. nigrum* (1 %) et les *V. vitis-ideae* (0,5 %). *A. alpina* recouvre 6 % des SAV (n = 5) et 3 % des SN (n = 5). Tandis qu'*E. nigrum* recouvre 2 % des SAV (n = 5) (fréquence : 60 %) et des BF (n = 23) (fréquence : 22 %). Le recouvrement du *Picea mariana* dans la forêt boréale (BF, n = 23) est de 37 % (fréquence : 100 %) et de 4 % pour le *Larix laricina* (fréquence : 47 %). La végétation arbustive des espèces de *Rhododendron* (*groenlandicum* et *t. decumbens*) couvre 10 % (fréquence : 70 %) de la classe BF et a plus

de 3 % (fréquence : 17 %) de la classe SAV. Les arbustes de la famille des *Salix* ont été retrouvés sur toutes les classes de végétation (sauf SAV) avec un recouvrement de plus de 10 % au total. La plante à petits fruits avec le plus grand pourcentage de couvert est *V. uliginosum* retrouvé dans toutes les classes de végétation (recouvrement : 9 %). Les lichens ont un recouvrement de 6 % et les mousses de 5 % dans l'ensemble des classes.

3.1.2. La matrice de confusion des classes de végétation

La cartographie écologique de la végétation du Nord Québécois du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (Leboeuf et *al*., 2018) a été utilisée comme base de données afin de déterminer les classes de végétation. Avec les données de végétation recueillies sur le terrain et une comparaison avec la cartographie écologique de Leboeuf et *al*. (2018), une matrice de confusion a pu être générée. Cette matrice de confusion comprend les 104 quadrats caractérisés avec la classe de végétation déterminée selon les espèces végétales à retrouver sur le quadrat et les compare avec celles de la classe de végétation de la cartographie écologique de Leboeuf et *al*. (2018) (Tableau 3.4). La différence est observable surtout au niveau de la classe de végétation EST. Les quadrats de végétation des EST ont été observés dans tous les autres quadrats des classes de la végétation, de la cartographie écologique de Leboeuf et *al*. (2018). Sept quadrats EST ont été caractérisés dans la classe de végétation BF, trois dans les classes SAV et VMH et deux dans les classes PST et SN de la cartographie écologique de Leboeuf et *al*. (2018). Sur les cinq quadrats de la classe de végétation SN cartographiés par Leboeuf et *al*. (2018), deux d'entre eux ont été caractérisés dans la classe EST et deux autres dans la classe PST. La cartographie écologique de Leboeuf et *al*. (2018) comporte ainsi une certaine incertitude qui peut être liée à l'imprécision des données satellitaires utilisées, mais aussi au changement de la végétation depuis la prise des images satellitaires utilisées pour la classification autour de 2010. Néanmoins, pour fin de consistance dans les analyses, la cartographie écologique de Leboeuf et *al*. (2018) a été utilisée afin d'effectuer les analyses du changement et de la caractérisation du bassin versant de la rivière Koroc.

Tableau 3.3 : Recouvrement et fréquence des espèces végétales répertoriées et mesurées sur les quadrats dans le bassin versant de la rivière Koroc. Abrégé à 0,5 % de recouvrement, où C % représente le pourcentage de recouvrement et où F % représente le pourcentage de fréquence. Le tableau complet est en annexe A.

	Pourcentage de recouvrement et fréquence des taxa selon la classe de la végétation												
	BF		VMH		SAV		EST		PST		SN		Total
	C %	F %	C %	F %	C %	F %	C %	F %	C %	F %	C %	F %	C %
Taxa	(n = 23)		(n = 6)		(n = 5)		(n = 39)		(n = 26)		(n = 5)		(n = 104)
Bryophytes													
Mousse sp.	1,9	30,4	2,0	50,0	0,8	20,0	2,3	30,8	12,2	61,5	2,4	40,0	4,6
Lichens													
Lichen sp.	8,9	47,8	2,0	50,0	11,2	80,0	3,1	41,0	6,6	57,7	4,0	60,0	5,6
Arbres													
Larix laricina	3,7	47,8											0,8
Picea mariana	37,0	100,0			12,0	100	0,4	5,1					8,9
Arbustes													
Alnus crispa	1,9	17,4			0,8	20,0	0,8	7,7					0,8
Arctous alpina	0,2	4,3	0,7	16,7	5,6	80,0	2,2	23,1	0,3	7,7	3,2	40,0	1,4
Betula glandulosa	24,0	65,2	28,7	83,3	48,0	80,0	40,4	92,3	38,3	34,6	22,4	80,0	27,8
Empetrum nigrum	2,4	21,7			2,4	60,0	0,3	7,7			0,8	20,0	0,8
Rhododendron groenlandicum	9,2	69,6	0,7	16,7	1,6	40,0	0,6	10,3	0,2	3,8			2,4
Rhododendron t.decumbens	1,0	4,3	2,7	16,7	0,8	20,0	2,5	33,3	1,5	23,1			1,7
Salix arctica			10,7	50,0			0,9	12,8	0,6	15,4	0,8	20,0	1,2
Salix argyrocarpa	5,7	17,4					0,4	10,3					1,4
Salix herbacea			0,7	16,7			2,7	23,1	4,0	38,5	1,6	20,0	2,1
Salix uva-ursi							1,0	15,4	2,6	23,1	1,6	20,0	1,1
Salix sp.	2,1	26,1	4,0	33,3			3,8	33,3			5,6	60,0	2,4
Vaccinium vitis-ideae	0,2	4,3							1,7	26,9			0,5
Vaccinium uliginosum	0,2	4,3	10,0	66,7	0,8	20,0	15,1	76,9	11,5	65,4	1,6	40,0	9,3
Herbacées													
Oxyotropis campestris							1,0	12,8			1,6	40,0	0,5
Cyperaceae sp.			16,6	83,3	0,8	20	11,9	64,1	7,8	53,8	2,4	60,0	7,5

Tableau 3.4 : Matrice de confusion des 104 quadrats de caractérisation de la végétation observées sur le terrain et entre les classes de végétation de la cartographie écologique de Leboeuf et *al*. (2018).

Classes de végétation	BF	SAV	EST	PST	VMH	SN	Total Leboeuf et *al*. 2018
BF	16	0	7	0	0	0	23
SAV	0	2	3	0	0	0	5
EST	0	0	25	7	7	0	39
PST	0	0	2	19	4	1	26
VMH	0	0	3	0	3	0	6
SN	0	0	2	2	0	1	5
Total observé sur le terrain	16	2	42	28	14	2	104
Indice Kappa							0, 5046
Précision							0,634

3.2. Changement de l'indice du NDVI du bassin versant de la rivière Koroc (1984-2020)

3.2.1. ΔNDVImax du bassin versant de la rivière Koroc

L'analyse du bassin versant de la rivière Koroc avec l'indice du ΔNDVImax démontre un verdissement sur l'ensemble du territoire depuis 1984 (Figure 3.5). Globalement, l'augmentation moyenne du ΔNDVImax est de 0,0046. Le verdissement est plus prononcé au niveau des basses terres de l'Ungava à l'ouest avec un ΔNDVImax de 0,0048 et au niveau de la vallée de la rivière Koroc et de ses tributaires avec un ΔNDVImax de 0,0047. Les hauts plateaux (ΔNDVImax de 0,0045) et les monts Torngat (ΔNDVImax de 0,0038) voient aussi l'indice du ΔNDVImax augmenter malgré un changement moindre que la moyenne globale du bassin versant. Dans l'ensemble, le changement du ΔNDVImax suit le gradient altitudinal de la rivière Koroc de façon à être plus élevé en basse altitude et moins prononcé sur les plateaux et les sommets montagneux en altitude.

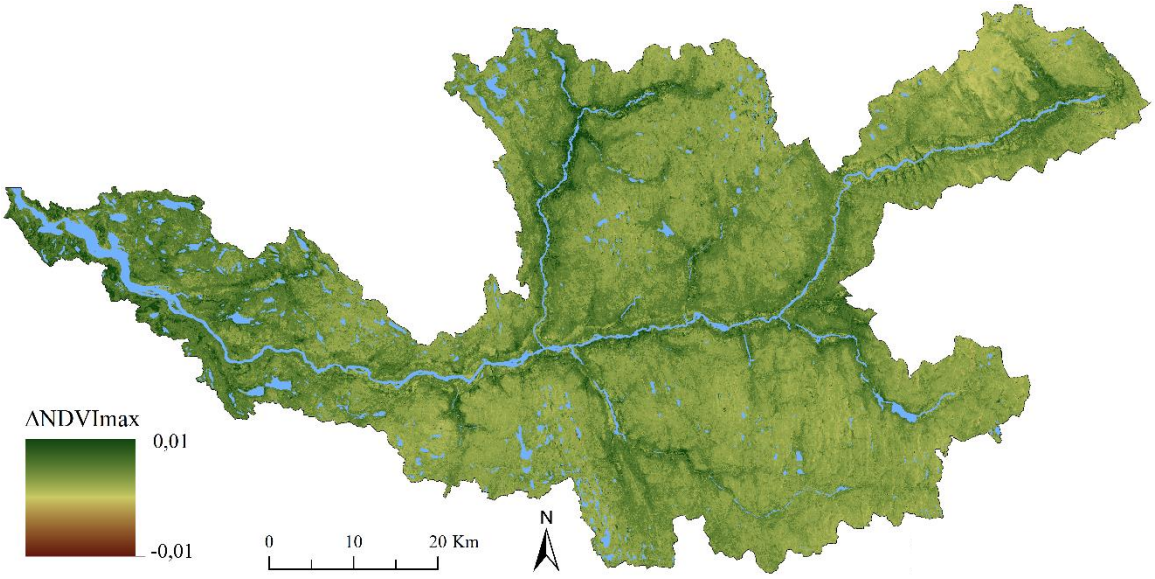


Figure 3.5 : ΔNDVImax de 1984-2022 sur le bassin versant de la rivière Koroc.

3.2.2. Le ΔNDVImax selon les classes de végétation

Chaque classe de végétation apporte son influence individuellement sur le changement de NDVI global. Le changement de ΔNDVImax par classe de végétation est présenté dans la figure 3.6. Les classes de végétation où les ΔNDVImax sont les plus importants sont les classes de la végétation subarctique (SAV) avec une moyenne de 0,0060 et celle des arbustes érigés (EST) avec 0,0057. Les classes de végétation qui sont majoritairement situées en basse altitude et dans les vallées ont aussi une forte croissance du ΔNDVImax. La forêt boréale (BF) avec une croissance de 0,0050 et la végétation des milieux humides (VMH) avec une croissance de 0,0048 dans le ΔNDVImax sont les classes retrouvées au bas du gradient altitudinal. Les classes de végétation subséquentes ont une croissance et une augmentation de leur ΔNDVImax qui est associé aussi au gradient altitudinal, c'est-à-dire que la classe de végétation se retrouvant en plus haute altitude voit son changement de ΔNDVImax moins élevé que celle de la classe de végétation en plus basse altitude. Le changement du ΔNDVImax progresse donc inversement avec l'altitude, avec une légère décroissance des types de végétation la plus basse dans le bassin versant, c'est-à-dire les BF et les VHM. Sur les flancs montagneux, on retrouve un changement de la classe des arbustes érigés avec substrat rocheux (ESTR) de 0,0049, puis la classe des arbustes prostrés (PST) avec un changement de 0,0043. Les sommets sont souvent recouverts par les classes

de végétation des arbustes prostrés avec un substrat rocheux (PSTR) et par des sols dénudés (SN). Le changement du ΔNDVImax de la classe de végétation PSTR est de 0,0033 et de celle du SN de 0,0027. Ces résultats concordent avec l'analyse du ΔNDVImax moyen de l'ensemble du bassin versant de la rivière Koroc présenté par la figure 3.5.

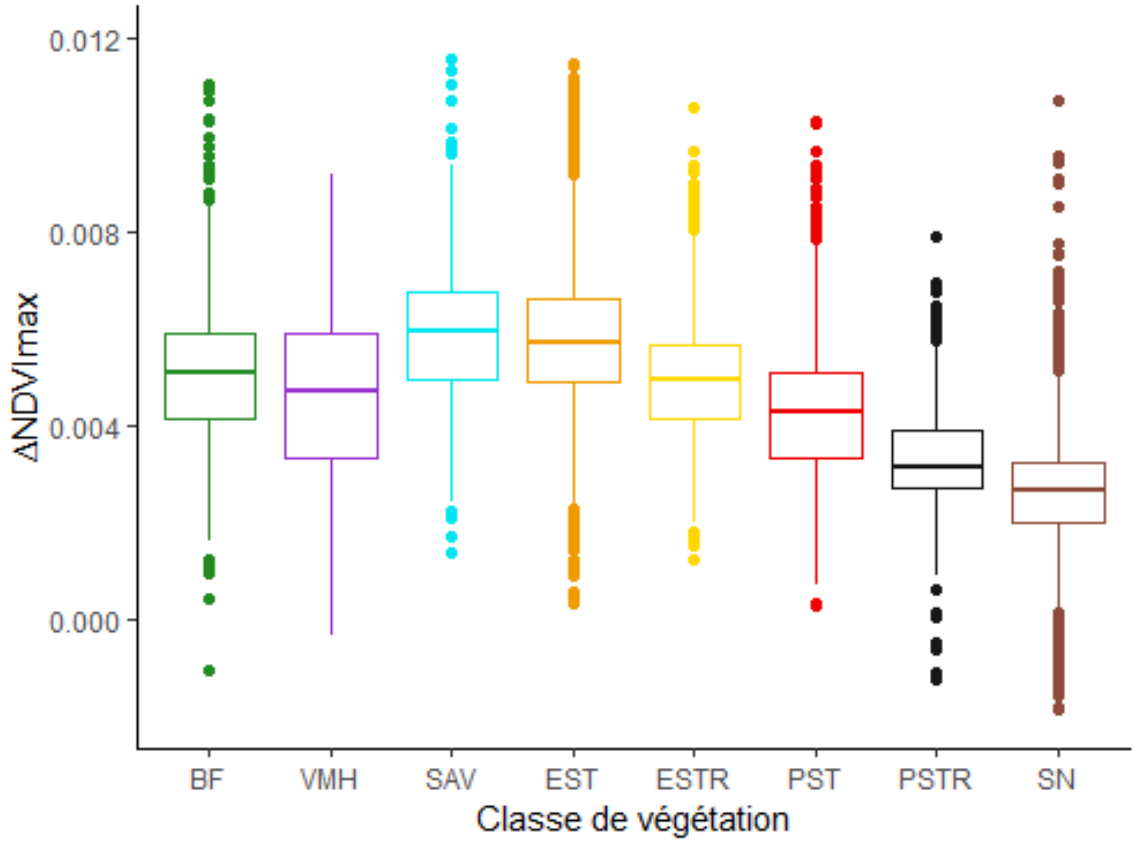


Figure 3.6 : Résultat du ΔNDVImax selon le gradient altitudinal des classes de végétation du bassin versant de la rivière Koroc.

3.2.3. Le ΔNDVImaxRR du bassin versant de la rivière Koroc

Le ΔNDVImaxRR est associé à un changement des NDVImax en prenant le NDVImax de l'année 1984 comme référence de départ afin de calculer l'augmentation relatif du NDVI à partir d'une donnée connue et quantifiée. L'analyse du bassin versant de la rivière Koroc avec le ΔNDVImaxRR propose un résultat contrasté comparativement à l'analyse avec le ΔNDVImax de la figure 3.5. On peut constater que le plus fort pourcentage d'augmentation se situe majoritairement au niveau des hauts plateaux de la rivière Koroc et des monts Torngat (Figure 3.7). Tandis que les vallées de la rivière Koroc et les basses terres de

l'Ungava voient leur pourcentage d'augmentation plus faible que les autres secteurs, par rapport à l'année de référence. Globalement, le bassin de la rivière Koroc connait une croissance du ΔNDVImaxRR sur l'ensemble du territoire et contrairement au ΔNDVImax le plus fort pourcentage d'augmentation du ΔNDVImaxRR se situe en haute altitude et sur le long du gradient altitudinal.

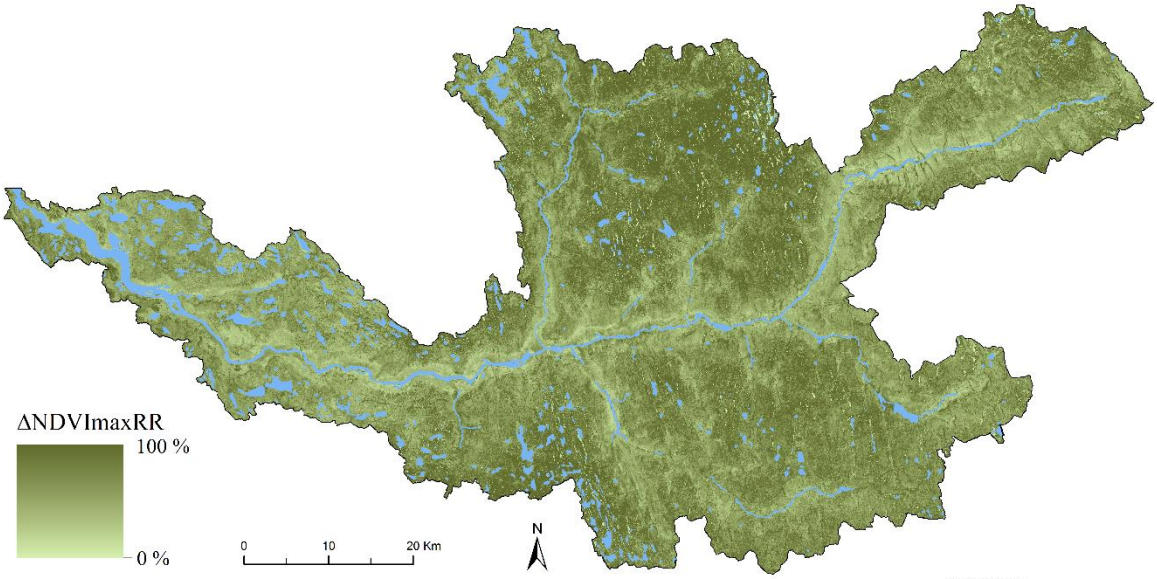


Figure 3.7 : ΔNDVImaxRR de 1984-2022 sur le bassin versant de la rivière Koroc.

3.2.4. Le ΔNDVImaxRR selon les classes de végétation

Le ΔNDVImaxRR analyse le changement de la réflectance végétale par rapport à l'année précédente avec l'année 1984 comme référentiel. Les classes de végétation dont le pourcentage a le plus augmenté sont celles qui présentaient une faible surface de végétal au début de l'analyse soit en 1984. La moyenne la plus élevée du pourcentage d'augmentation est de 124 % pour la classe de végétation SN et de 89 % pour la classe de végétation PSTR (Figure 3.8). Le pourcentage d'augmentation du ΔNDVImaxRR des autres classes de végétation suit le gradient altitudinal du bassin versant. Cependant, le pourcentage d'augmentation est inversé par rapport au ΔNDVImax (figure 3.6). Les classes de végétation en altitude ou sur les flancs montagneux ont eu une moyenne plus élevée que les classes de végétation des vallées ou de basse altitude. Les classes de végétation ESTR et PST se retrouvent régulièrement en flanc de montagne (Figure 3.3) et présentent une augmentation moyenne 63 %. Suivent ensuite les classes de végétation des milieux

humides avec 57 % et de 56 % pour la classe de végétation SAV. Le changement du ΔNDVImaxRR est de 50 % pour la classe EST. Tandis que la plus faible augmentation du ΔNDVImaxRR se retrouve dans la classe de végétation de la forêt boréale (BF) avec une moyenne de 37 %.

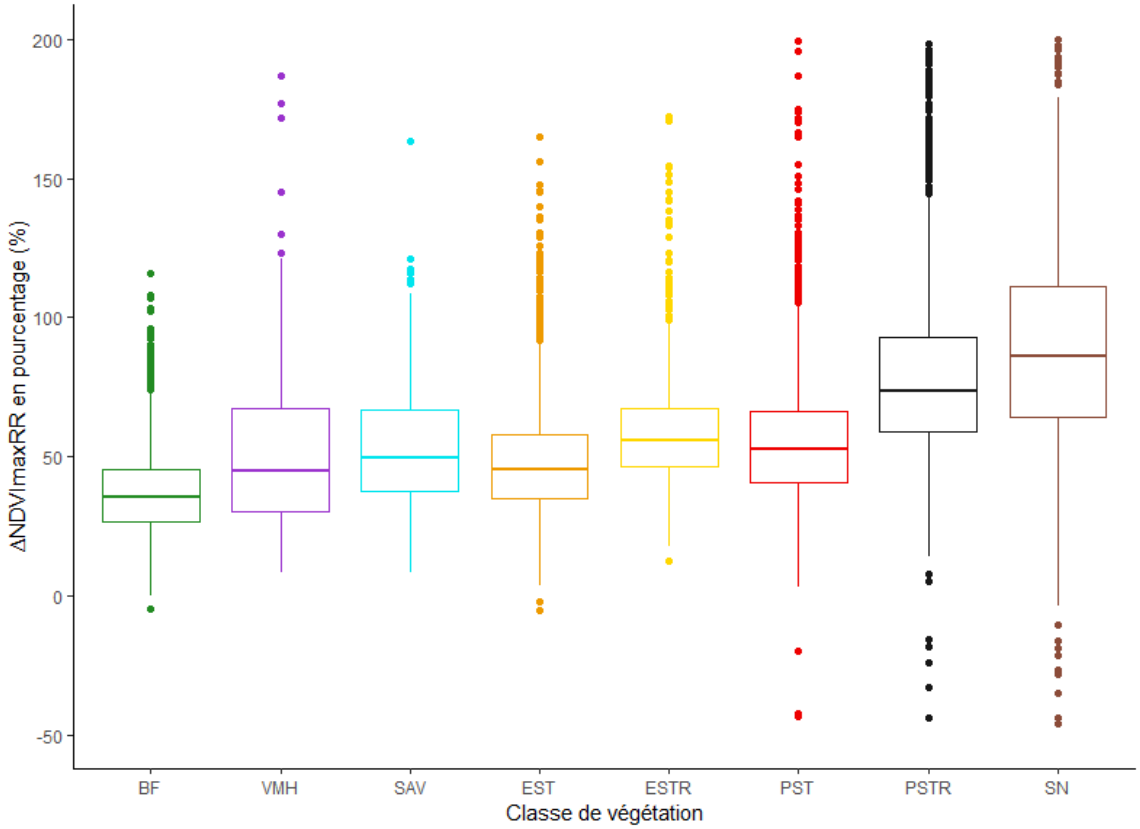


Figure 3.8 : Résultat du ΔNDVImaxRR selon le gradient altitudinal des classes de végétation du bassin versant de la rivière Koroc.

3.3. Les processus du verdissement du bassin versant de la rivière Koroc

3.3.1. L'importance des variables prédictives sur le verdissement

Afin de mieux comprendre les processus de verdissement du bassin versant de la rivière, une première analyse utilisant le RF (RF_ensemble) a été effectuée pour identifier l'importance des différentes variables prédictives (Tableau 3.2) dans l'explication du verdissement tel que vu par les satellites. Le résultat de la modélisation RF_ensemble démontre que le couvert des *Betula* et leur hauteur permettent le mieux d'expliquer les variations du ΔNDVImax. Les autres variables montrant une certaine importance sont le

couvert des conifères et leur hauteur, la litière organique, le couvert des sols nus, ainsi que la végétation du sous-bois, c'est-à-dire, le *Rhododendron*, les *Ericacea* et les *Salix*. Le modèle RF_ensemble généré a un coefficient de détermination (R^2) de 0,35.

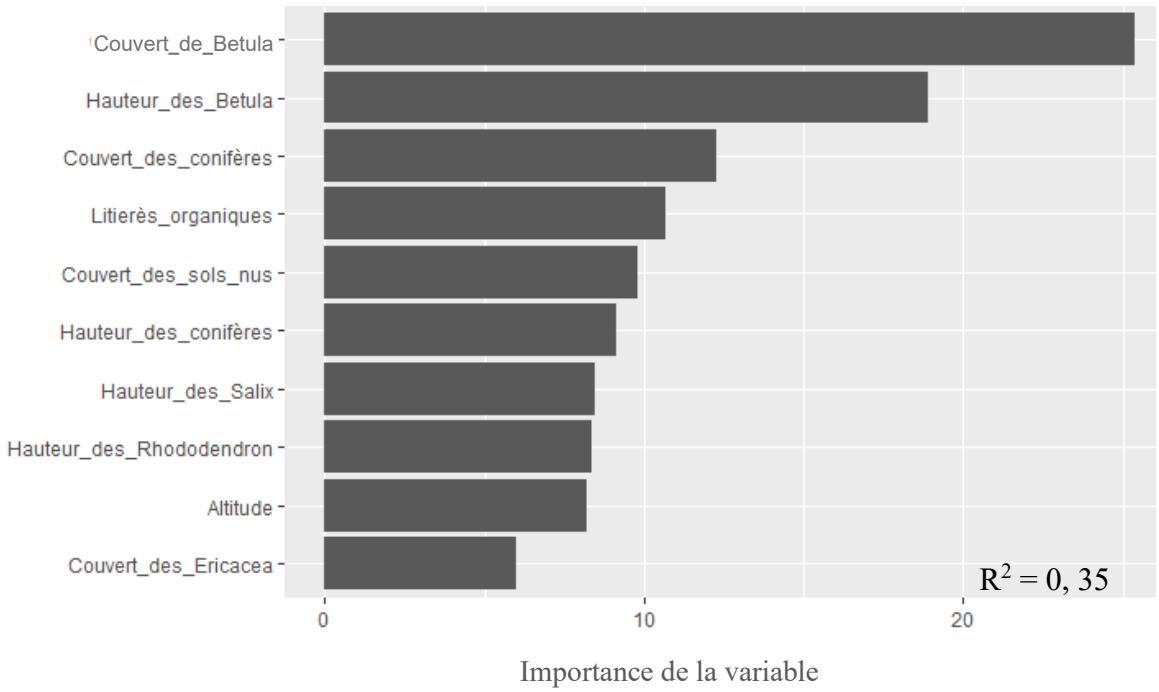


Figure 3.9 : Importance des variables prédictrices basée sur le modèle de forêt d'arbres de décision utilisant l'ensemble des variables (RF_ensemble) expliquant les variations du ΔNDVImax. Le modèle RF_ensemble à un coefficient de détermination de R^2 = 0,35.

Un deuxième modèle RF a été fait (RF_raffiné) en retirant les variables ayant une importance négligeable, le modèle RF_raffiné comporte 8 variables. Le modèle RF_raffiné présente un R^2 de 0,40, ce qui est plus élevé que le modèle RF_ensemble. Les deux variables du *Betula* soit le couvert et la hauteur restent les variables qui présentent la plus grande importance en lien avec le ΔNDVImax. La végétation du couvert des conifères ainsi que la hauteur des *rhododendron* ont aussi de fortes importances. Les variables du couvert des sols nus et de la litière organique présentent une plus forte importance que les arbustes, soit la hauteur des *Salix* et le couvert des *Ericacea,* qui restent tout de même avec une certaine importance non négligeable.

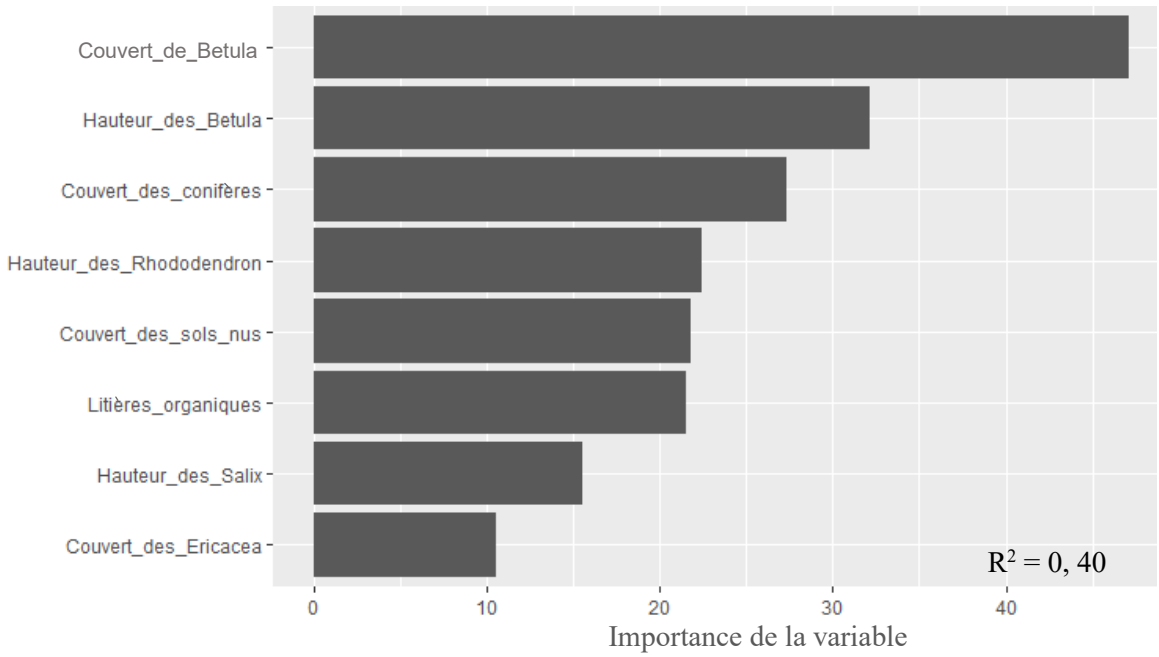
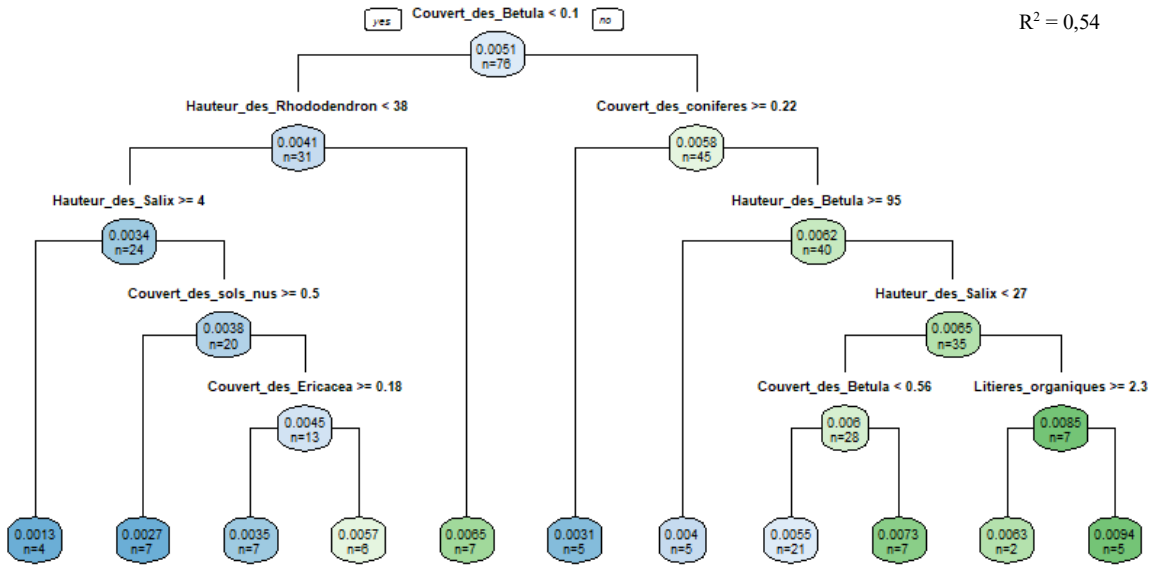


Figure 3.10 : Modèle de forêt d'arbres de décision (RF_raffiné)) de régression de l'importance des 8 plus influentes variables observées et mesurées sur le terrain en lien avec le ΔNDVImax. Le modèle RF_raffiné présente un R^2 =0,40.

3.3.2. La modélisation et l'influence des variables sur le ΔNDVImax

Selon le RF_raffiné, les variables importantes ont ensuite été modélisées avec un modèle de prédiction d'arbre de décision afin de déterminer leur type d'influence sur le ΔNDVImax. La modélisation des variables par l'arbre de décision (Figure 3.11) démontre que le couvert des *Betula* influence l'augmentation du ΔNDVImax lorsqu'il est de plus de 10 % et l'augmente fortement lorsque le couvert est de plus de 46 %. Un couvert de plus de 22 % des conifères influence faiblement l'augmentation du ΔNDVImax, tandis qu'avec un grand recouvrement, l'influence du ΔNDVImax est caractérisée par la présence de végétation du sous-bois tel le les *Salix* les *Betula* et la litière organique au sol. La présence de *Rhododendron* en hauteur (38 cm) semble influencer plus fortement le ΔNDVImax lorsqu'il se retrouve seul. Tandis qu'en présence avec un couvert d'arbuste l'influence de la hauteur du *Rhododendron* est plus faible. La variable du couvert des *Ericacea* semble indiquer que celle-ci n'est que très peu influente sur l'augmentation du ΔNDVImax lorsque son couvert est de plus de 18 %.



$R^2 = 0,54$

Figure 3.11 : Arbre de décision de l'influence des variables importantes et de leur influence sur le ΔNDVImax. ($R^2 = 0,54$).

3.3.3. Les processus du verdissement par les modèles statistiques linéaires

Le couvert de *Betula* est la variable qui démontre la plus grande importance sur le ΔNDVImax. Les *B. glandulosa* ont été retrouvés dans les six classes de végétation caractérisées, c'est-à-dire, la classe des BF, des VMH, des SAV, des EST, des PST et des SN. Les modèles linéaires simples montrent une corrélation positive entre un couvert élevé de *Betula* et l'augmentation du ΔNDVImax (Figure 3.12). La classe de végétation BF est la seule où une forte présence du couvert de *Betula* s'est retrouvée corrélée négativement (r = - 0,41) avec le ΔNDVImax (*p-value* : $5,6\ x\ 10^{-2}$). La classe des arbustes érigés (EST) démontre la plus forte augmentation du ΔNDVImax avec 5 quadrats de plus de 0,009 et un pourcentage de plus de 25 % de *B. glandulosa* et le couvert de *Betula* a une corrélation positive (r = 0,51 et p-value de $9,0\ x\ 10^{-4}$) avec l'augmentation du ΔNDVImax. La présence du couvert de *Betula* dans les autres classes de végétation est aussi corrélée positivement avec l'augmentation du ΔNDVImax. La présence du couvert de *Betula* dans la forêt boréale (BF) semble avoir une tendance opposée puisque le couvert de *Betula* est associé avec un faible ΔNDVImax, tandis que dans les autres classes de végétation le couvert de *Betula* est corrélé positivement avec le ΔNDVImax.

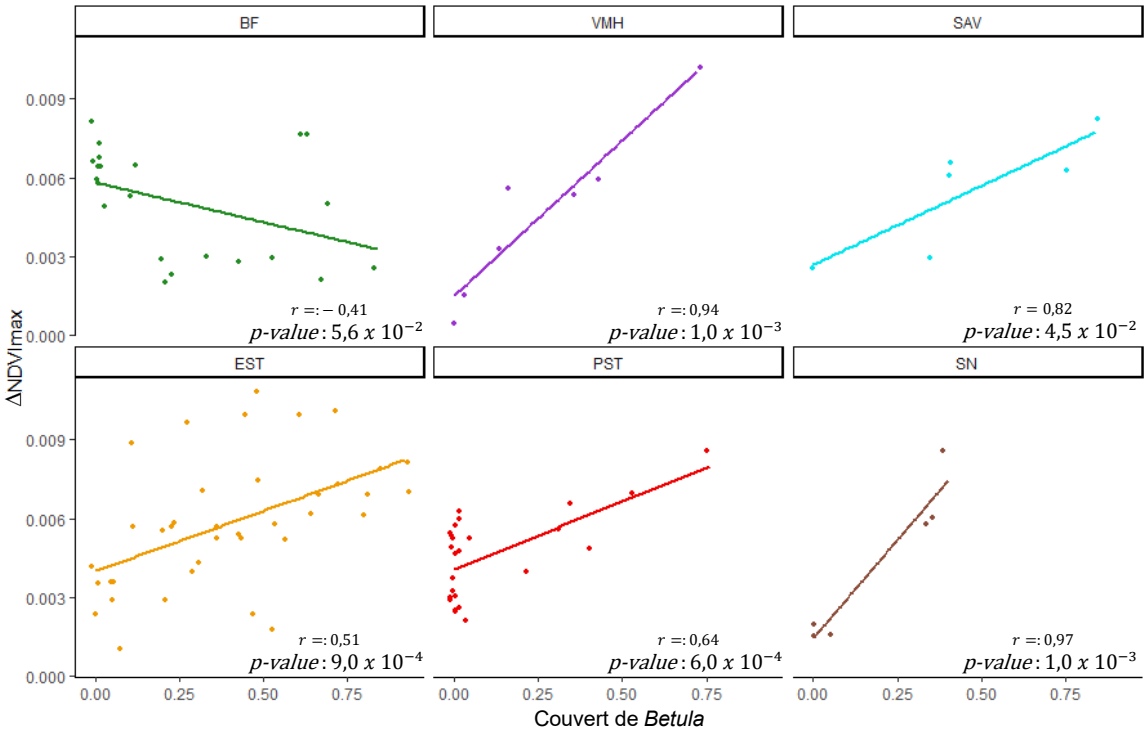


Figure 3.12 : La corrélation du couvert de *Betula* caractérisé sur le terrain avec le ΔNDVImax dans chaque classe de végétation.

La variable du couvert des *Ericacea* était relativement peu corrélée au ΔNDVImax dans les modèles d'importance des variables. Le couvert des *Ericacea* était surtout présent dans les classes de la végétation des VMH, SAV, EST et PST (Figure 3.13). Il y a une corrélation négative dans trois classes de végétation (VMH, EST et PST), alors le couvert des *Ericacea* est peu présent dans la classe des VMH et des SAV. Le couvert des *Ericacea* est fréquemment retrouvé dans les classes de végétation des EST et des PST. Ces deux classes présentent une corrélation négative entre le ΔNDVImax et le pourcentage élevé du couvert des *Ericacea*. La corrélation est de r = -0.38 pour la classe de végétation des EST et de r = 0,-18 pour celle des PST. Le modèle global des 4 classes de végétation présente une corrélation négative de r= -0,26 (p-value : 0,023) avec le ΔNDVImax et donc une certaine relation négative existe entre la présence des *Ericacea* et un plus faible ΔNDVImax.

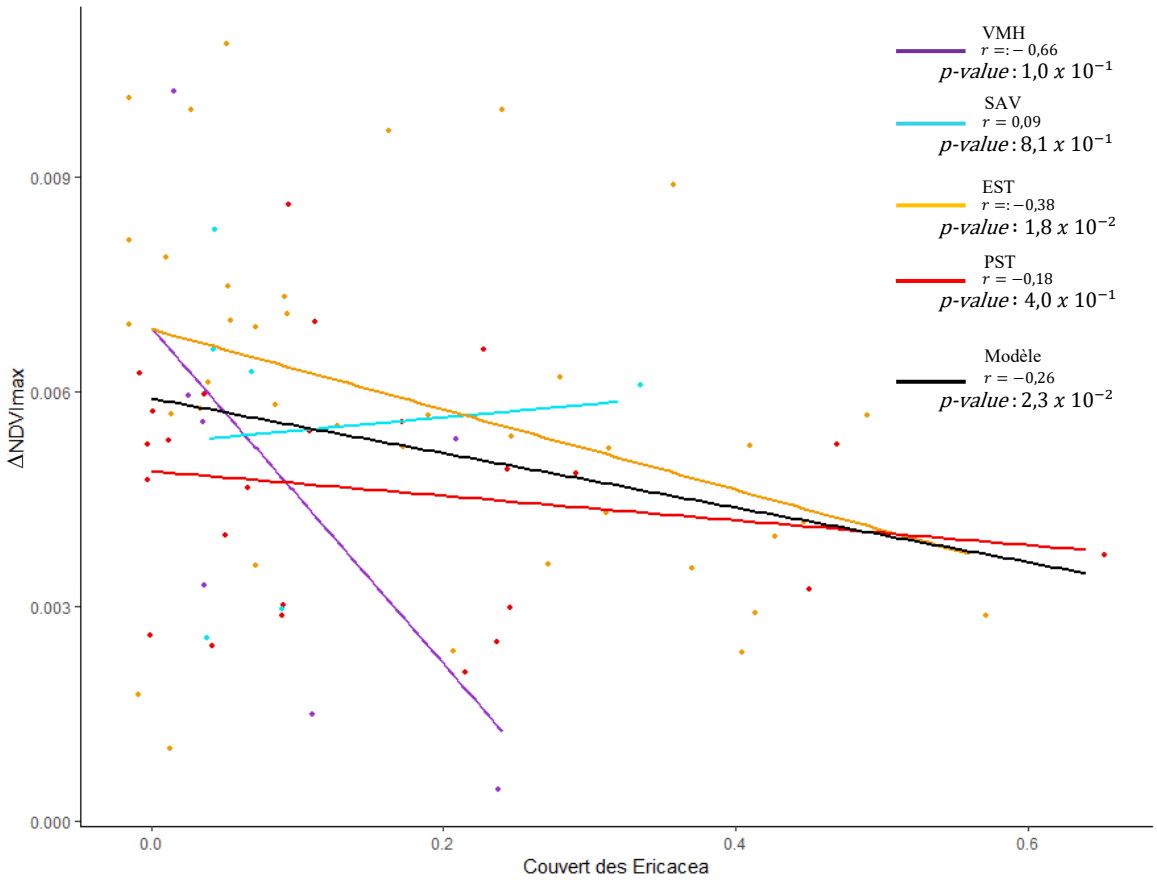


Figure 3.13 : Relation entre le couvert des *Ericacea* mesuré sur le terrain et le ΔNDVImax dans les classes de végétation des VMH, des SAV, des EST et des PST.

La classe de la forêt boréale présente une augmentation du ΔNDVImax (figure 3.6). Cependant, le couvert des conifères (voir figure 3.11) étant majoritairement présent dans cette classe de végétation, ainsi que le couvert des *Betula* (figure 3.12) ne sont pas corrélés à l'augmentation du ΔNDVImax. L'augmentation du ΔNDVImax dans la forêt boréale est mieux expliquée par le couvert de la végétation forestière du sous-bois (Figure 3.14 a et b). La présence d'un couvert de *Rhododendron* et des lichens sont corrélés à une valeur élevée du ΔNDVImax. La corrélation du couvert des rhododendrons avec l'augmentation du ΔNDVImax est de r = 0,78 (p-value $1{,}9\ x\ 10^{-5}$). Tandis que la corrélation d'un tapis de couvert de lichen est de r = 0,56 (p-value $6{,}3\ x\ 10^{-3}$).

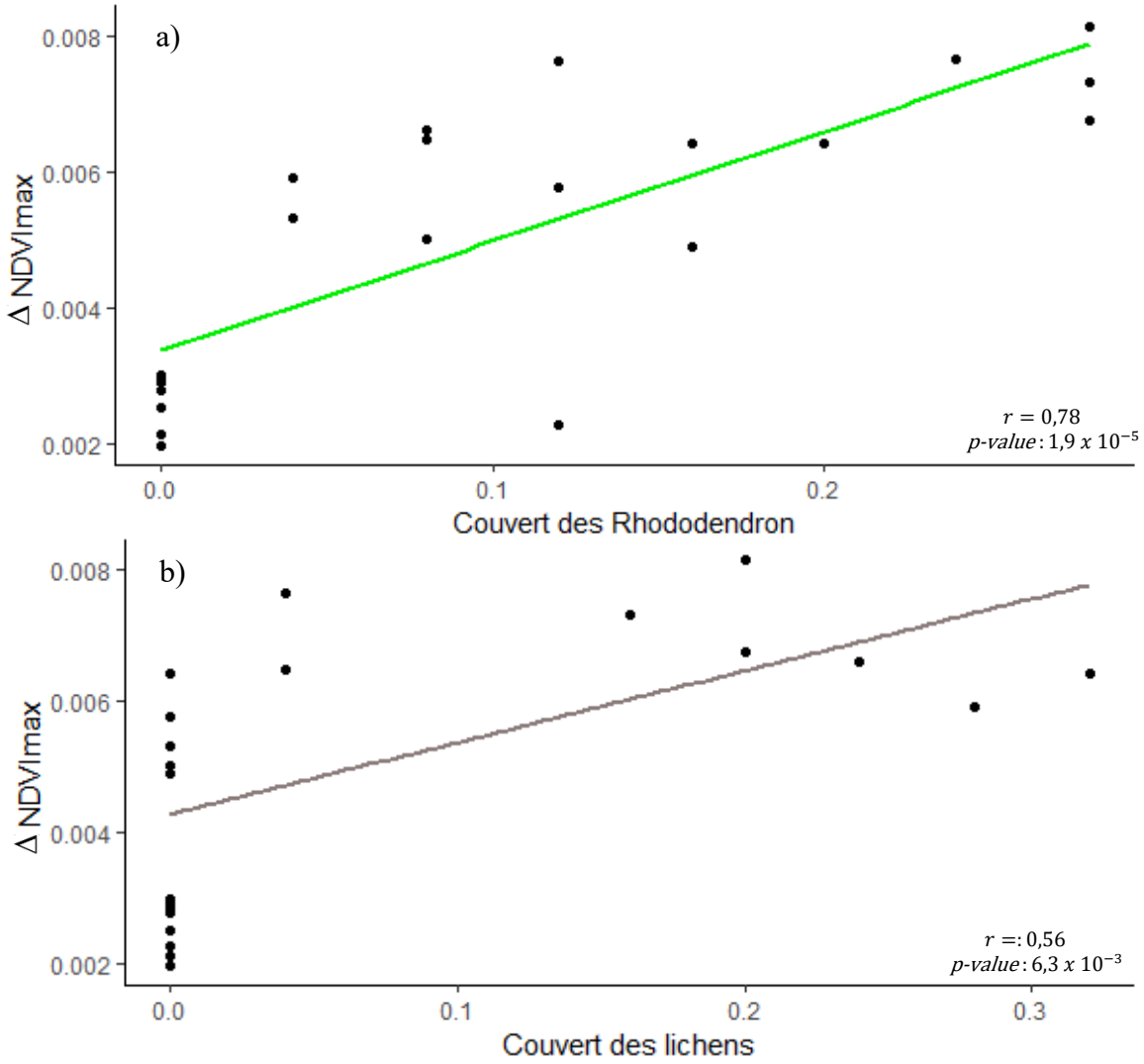


Figure 3.14 : Relation entre le couvert des (a) *Rhododendron* et des (b) lichens avec le ΔNDVImax dans les classes de la forêt boréale (BF) caractérisé sur le terrain.

4. Discussion

L'objectif de cette étude était d'abord de caractériser le changement de l'indice du NDVI du bassin versant de la rivière Koroc pour ensuite mieux comprendre les processus du verdissement à partir d'observations *in situ*. Le changement du NDVI a été identifié à l'aide d'images satellites de la série Landsat (1984-2020) en analysant la variation du ΔNDVImax et du ΔNDVImaxRR. De son côté, l'étude des processus du verdissement a été réalisée à l'aide d'une caractérisation de relevé de végétation *in situ* de 104 quadrats.

4.1. Changement de l'indice NDVI du bassin versant de la rivière Koroc

Le bassin versant de la rivière Koroc présente globalement une augmentation du ΔNDVImax avec une moyenne de 0,0043 d'augmentation par centroïde des classes de végétation. Les centroïdes de la végétation subarctique (SAV) et des arbustes érigés (EST) sont ceux ayant eu la plus forte augmentation du ΔNDVImax (0.006). Concernant les classes de végétation des BF, des VMH et des ESTR, le ΔNDVImax a une moyenne de 0,005. Ces trois dernières classes suivent le gradient altitudinal des cours d'eau des rivières du bassin versant, c'est-à-dire du bas des vallées jusqu'au sommet des plateaux de la rivière Koroc. En effet, la forêt boréale et la végétation des milieux humides se retrouvent en principalement au niveau des vallées et dans le bas des pentes, tandis que la végétation des arbustes érigés avec substrat rocheux (ESTR) se retrouve en plus grande abondance au niveau des basses terres de l'Ungava et sur les flancs des pentes des monts Torngat. Suit ensuite la végétation des arbustes prostrés (PST et PSTR) retrouvés à flanc de montagne, sur le sommet des plateaux et aussi dans le massif des monts Torngat. L'augmentation du ΔNDVImax est aussi démontrée au niveau des sols sans végétation (SN) des plateaux de la rivière Koroc, mais aussi perceptible dans le massif des monts Torngat. Le changement de l'indice du NDVI dans le bassin versant de la rivière Koroc semble ainsi varié en fonction du gradient altitudinal d'est en ouest le long de la rivière Koroc, de sa source située près du mont d'Iberville jusqu'à son embouchure dans la baie d'Ungava. Le changement de l'indice du NDVI varie aussi en suivant le gradient de l'altitude des pentes sur les flancs des monts Torngat et des montagnes du plateau de la rivière Koroc.

Le changement le plus remarqué avec l'indice du ΔNDVImaxRR se retrouve au niveau des classes de végétation des SN et des PSTR. Pour ces deux classes de végétations, l'augmentation de l'indice du ΔNDVImaxRR semble indiquer un changement rapide de l'écosystème présente sur les zones et les secteurs qui semblaient moins végétalisés selon les résultats de la cartographie écologique de Leboeuf et *al*. (2018). La matrice de confusion du tableau 3.4 démontre que sur les cinq classes des SN caractérisés, seulement un a été observé comme un quadrat sans végétation tandis que de la végétation arbustive érigée et prostrée a été observée sur les quatre autres quadrats.

Les résultats obtenus sur la tendance du verdissement (1984-2020) du bassin versant de la rivière Koroc partagent la même particularité avec les résultats obtenus sur le verdissement du nord-est du Québec par l'étude de Bayle et *al*. (2022). Le verdissement a été observé avec l'indice de végétation de la tendance du NDVImax (NDVImax trends). Les résultats de cette étude démontrent un verdissement généralisé de toutes les couvertures végétales. Il faut noter que Bayle et *al*. (2022) ont démontré que sur le bassin versant de la rivière Georges, les changements sont observables principalement sur deux fenêtres temporelles de 11 ans, soit de 1991 à 2001 et de 2006 à 2016, et que les classes de végétation des SAV et des EST sont les classes ayant démontrées la plus forte augmentation de la tendance du NDVImax. Des résultats similaires ont aussi été retrouvés au Labrador à l'est des monts Torngat dans le bassin versant de la rivière Navak Brook (Davis et *al*., 2021a) avec une méthodologie combinant le NDVI des images satellites de la série Landsat (1985 à 2019), des relevés de température de l'air et des transects de caractérisation de la végétation. Une augmentation de l'indice NDVI a été observée dans cette région et le verdissement a été associé avec l'arbustation par la dendrologie. L'étude de Larking et *al*. (2021) mené au Nunatsiavut au Labrador près de la communauté de Nain associe la rapidité et l'intensité du changement de l'indice du NDVI des images Landsat de 1985 à 2018 aux différentes espèces végétales caractérisées sur le terrain. La dynamique du verdissement varie selon la domination et la croissance des espèces végétales retrouvées sur le territoire. Un changement rapide et élevé de l'indice du NDVI a été associé à *Alnus viridis ssp. crispa* (Aulne crispé), tandis qu'un changement plus lent, mais constant était associé à l'augmentation du NDVI à *B. glandulosa*. Les résultats de l'étude présente sont donc en concordance avec les autres études menées sur le verdissement de l'est de l'Arctique canadien. L'études concorde aussi avec des résultats similaires de Jia et Epstein (2003), Hope et *al*. (2003) et Bonta et *al*. (2023) trouvés dans l'Arctique de l'ouest du continent de l'Amérique du Nord qui démontrent également une augmentation de l'indice de végétation du NDVI.

4.2. Processus du verdissement *in situ*

Le verdissement du bassin versant de la rivière Koroc peut donc être observé par les images satellitaires. Cependant, les espèces végétales impliquées dans le processus du

verdissement ont été évaluées avec une caractérisation sur le terrain. Les principaux résultats ressortis de cette étude sont que la présence de *B. glandulosa* est l'espèce végétale la plus fréquemment retrouvée et la plus répandue sur le bassin versant de la rivière Koroc, et ce dans toutes les classes de végétation. Son couvert et sa hauteur exercent une forte influence sur le ΔNDVImax et la variable prédicatrice du couvert de *Betula* a été associée avec un ΔNDVImax élevé dans cinq classes de végétation. Le couvert de *Betula glandulosa* dans les classes de végétation, ainsi que le haut pourcentage de la fréquence, indiquent que le verdissement du bassin versant de la rivière Koroc serait en partie dû à une arbustation par le *B. glandulosa*. Le recouvrement des autres arbustes, soit érigés ou prostrés tels les *Salix*, les *Rhododendron* et les arbustes à petits fruits (*Vaccinium sp.*, *Empetrum nigrum* et *Arctus alpina*) ont aussi été retrouvés dans plusieurs classes de végétation. D'ailleurs, le recouvrement et la hauteur des arbustes érigés exercent une forte influence sur le ΔNDVImax. Toutefois, le recouvrement et la hauteur des arbustes à petits fruits ont sur une moindre mesure une plus faible influence sur le ΔNDVImax.

Ces résultats de recherches corroborent les autres études antérieures sur le changement de la végétation du Nunavik par l'augmentation du couvert des arbustes érigés dans la région avoisinante du village de Kangiqsualujjuaq (Tremblay et *al.*, 2012 ; Dufour-Tremblay et *al.* 2012). En effets, l'étude de Tremblay et *al*. (2012) rapporte une augmentation du couvert des arbustes érigés durant la période de 1964 à 2003 par une colonisation et un remplissage et que l'arbuste le plus abondant fût le *B. glandulosa*. À l'aide de photographies aériennes et d'une analyse numérique de classification basée-objet, l'étude de Provencher-Nolet et *al.* (2014) effectuée dans la vallée Tasiapik près du village d'Umiujaq au Nunavik démontre une augmentation de l'abondance des arbustes érigés et une croissance radiale durant la période de 1994 à 2010 et une réductions des zones dominées par le couvert des lichens dû à l'augmentation du couvert arbustif. L'étude de Lemay et *al*., (2018) au même endroit, rapporte aussi une augmentation du couvert des *Betula glandulosa* mais cette fois-ci à l'aide de modélisation de prédiction corroborée avec des bases de données terrain. Ces résultats de recherches sont aussi corroborés avec l'étude de Chagnon et Boudreau (2019) qui démontre un impact négatif de l'abondance et de la diversité des lichens sous une canopée de *B. glandulosa*. L'évolution de la végétation du

bassin versant de la rivière Koroc vers une arbustation par le *B. glandulosa* semble assez prépondérante et dominante.

Selon l'étude de Myers-Smith et *al.* (2011), l'arbustation suit trois processus distincts. Le premier est le remplissage, défini par la densification de son environnement immédiat par l'accroissement du nombre de végétaux et par une augmentation de son couvert de feuillage. Le deuxième processus est la croissance verticale de l'arbuste, tandis que le troisième est l'agrandissement de son environnement local par une colonisation avancée. Le verdissement de la classe de végétation des EST pourrait être attribué aux processus de l'arbustation du remplissage et de la croissance verticale du *B. glandulosa*. Ces processus du verdissement seraient démontrés par le fort pourcentage de recouvrement (40 %) et de la fréquence (92 %) des *B. glandulosa* dans cette classe jumelée avec les résultats de l'importance des variables du couvert et de la hauteur des *Betula* des RF et de leur influence sur le ΔNDVImax. Le processus de l'arbustation du remplissage et de la colonisation avancée semble être observé dans les classes de végétation des PST et des SN. En effet, par l'observation du ΔNDVImaxRR étant plus élevé dans ces classes et par la forte fréquence de *B. glandulosa* (80 %), ces deux aspects laissent entrevoir qu'une colonisation par *B. glandulosa* est en processus dans ces classes de végétation. Un recouvrement des *Betula* avec une fréquence de plus de 80 % a aussi été observé dans les classes de végétation des VMH et des SAV. Le verdissement de certaines classes de végétation (VMH, SAV, EST, PST et SN) semble être en partie associé à la végétation du *B. glandulosa* par les trois différents processus de l'arbustation le long du gradient altitudinal du bassin versant de la rivière Koroc.

La végétation des plantes à petits fruits (*V. uliginosum*, *V. vitis-ideae* et *A. alpina*) a surtout été retrouvée dans les classes de végétation des PST, des EST et des VMH. Dans ces classes, la présence d'un fort couvert des *Ericacea* n'a pas été associée avec une forte augmentation du ΔNDVImax, mais plutôt le contraire où un plus faible ΔNDVImax a été associé avec un plus fort couvert de *Ericacea*. Pour les classes de végétation des BF et des SAV, ce sont surtout *E. nigrum* et *A. alpina* qui ont été observés. Une présence d'un recouvrement de *A. alpina* a aussi été observée dans les classes de végétation des SAV et

des SN. Ces classes démontrent aussi une forte augmentation du ΔNDVImaxRR, associé à un changement rapide de l'écosystème de la végétation, pouvant indiquer un processus d'arbustation. Les analyses et les résultats obtenus sur le recouvrement des plantes à petits fruits dans le bassin versant de la rivière Koroc semblent indiquer une diminution du recouvrement et celui-ci semble être lié à l'arbustation de *B. glandulosa*. Cette observation a également été soulignée avec l'étude de Siegwart Collier (2020) près de Nain et de Torr Bay au Nunatsiavut au Labrador durant la période de 2011 à 2016. Les auteurs suggèrent une réduction de la performance des plantes à petits fruits et proposent aussi que *V. vitis-idaea* soit sensible à l'arbustation de la toundra. L'étude rapporte également une diminution de l'abondance des arbustes prostrés à petits fruits de la famille des *Vaccinium,* lorsque le couvert de *B. glandulosa* est contraignant à la croissance de la plante. La présence d'une canopée en hauteur au-dessus des plantes à petits d'une plus faible hauteur pourrait venir exercer une pression et un stress sur le végétal et faire diminuer sa production de fruit. Les indications statistiques obtenues du couvert des plantes à petits fruits indiquent une certaine diminution de ceux-ci lorsque le ΔNDVImax est élevé.

La classe de végétation des BF, majoritairement située au centre ouest du bassin versant de la rivière Koroc, se verdit progressivement de façon stable. L'augmentation moyenne du ΔNDVImax et la faible augmentation du ΔNDVImaxRR laissent présager une faible croissance du couvert des conifères (*Picea mariana* et *Larix laricina*) recouvrant plus de 40 % de la forêt boréale caractérisé. Le verdissement de la forêt boréale n'a pas été corrélé avec un fort pourcentage des *B. glandulosa,* mais davantage avec la présence des arbustes de la famille des *Rhododendron* et des *Salix* et du tapis forestier recouvert d'un mélange de bryophytes de lichen et de mousse. Ces résultats corroborent l'étude de Dufour-Tremblay et *al.* (2012) à proximité du village de Kangiqsualujjuaq démontrant une inertie de la croissance et du recrutement du *Picea mariana,* mais également une augmentation de la croissance radiale et verticale du *Larix laricina*. Ces résultats peuvent expliquer l'augmentation moyenne du ΔNDVImax de la forêt boréale (BF) puisque le couvert des *P. mariana* est de 37 % avec une fréquence de 100 % tandis que le couvert du *L. laricina* est de 3,7 % avec une fréquence de 48 %. Le *P. mariana* est l'espèce végétale avec le plus fort recouvrement de la classe de végétation des BF. Le faible recrutement des arbres peut

venir du fait que la classe de végétation des BF est souvent bordée par la classe de végétation des EST, majoritairement composée de *B. glandulosa* et que le dense couvert de celui-ci viendrait interférer et rivaliser avec l'établissement des nouvelles pousses des conifères (Dufour-Tremblay et *al.* 2012).

Un changement de l'écosystème de la végétation de toundra en haute altitude peut être proposé avec les analyses des images satellites du ΔNDVImaxRR et des observations *in situ*. La présence d'un couvert de *Betula* a été observée dans les classes de végétation de toundra en haute altitude (PST et SN) et un changement élevé du ΔNDVImaxRR a été démontré dans les classes de végétation des PSTR et des SN. Le changement de l'écosystème et le verdissement de la végétation en haute altitude avec l'association de l'ensemble des variables satellitaires et *in situ*, combiné avec la présence des *Betula* peuvent être des indicateurs d'une arbustation par le remplissage et par la colonisation. L'arbustation par le *Betula* a été associé, dans certains cas, à une perte du couvert de végétation prostré et basse comme les arbustes à petits fruits et les lichens (Provencher-Nolet et *al*., 2014 ; Chagnon et Boudreau, 2019 ; Siegwart Collier, 2020). L'écosystème de la végétation de la toundra en haute altitude est retrouvé de façon abondante (SN, n = 1146 et PSTR, n = 2020) sur le territoire. Cependant, cet écosystème semble le plus sensible face au changement climatique.

Les observations du verdissement du bassin versant de la rivière Koroc semblent être associées à la couverture végétale de *B. glandulosa* le long du gradient altitudinal. Une arbustation par le *B. glandulosa* est proposée pour expliquer la majeure partie des processus du verdissement. Le pourcentage élevé du recouvrement et la fréquence rependue des *B. glandulosa* observés sur le terrain dans la plupart des classes de végétation propose une arbustation de celui-ci sur la plupart des classes de végétation présentent sur le territoire de l'étude.

Cette étude est limitée par l'étendue du bassin versant de la rivière Koroc d'une superficie de plus de 400 km^2, trois secteurs ont été caractérisés, soit le secteur du haut Koroc, le secteur du mont d'Iberville et le secteur du camp de Qurlutuarjuq. Bien que plusieurs

domaines des zones bioclimatiques de végétation aient été observés soit le domaine de la forêt boréale, de la toundra subarctique et de la toundra à arbuste et lichens, plusieurs secteurs du bassin versant sont restés inexplorés. Le secteur de l'embouchure de la rivière korok à l'ouest dans le secteur des Basse-Terre de l'Ungava et la végétation située sur les sommets des monts Torngat à 700 m et plus sont restés hors d'atteinte de façons sécuritaire. Sur les trois secteurs, 104 zones d'échantillonnage ont été faites. Certains processus du verdissement peuvent être absents ou passés inaperçus dans notre étude faute de données terrain. La végétation a été observée à un seul temps précis, seulement la végétation présente à ce moment a pu être caractérisée c'est-à-dire que si un changement a eu lieu antérieurement ce phénomène serait resté imperceptible. De plus, bien que les images satellitaires de la série Landsat démontrent un verdissement, ces images ne précisent pas les espèces végétales impliquées et malgré les correctifs appliqués sur la série d'images Landsat, certaines imprécisions ont pu être conservées dans les analyses.

5. Conclusion

Cette étude avait comme objectif de spatialiser et de quantifier le verdissement du bassin versant de la rivière Koroc avec les images satellitaires de la série Landsat et d'explorer les processus *in situ* du changement de la végétation. Le verdissement de la végétation de la toundra arbustive a été fortement corrélé avec le couvert des *B. glandulosa*. L'arbustation par le *B. glandulosa* a été associé avec l'augmentation du ΔNDVImax sur l'ensemble des classes de végétation à l'exception de la forêt boréale. L'écosystème de la forêt boréale présente dans la vallée de la rivière Koroc présente une certaine stabilité dans les processus du verdissement qui était plus relié à la présence de la végétation du sous-bois, tandis que l'écosystème de la végétation de la toundra prostrée retrouvé sur les plateaux et les sommets semble démontrer une plus forte sensibilité face au changement rapide de la végétation et semble être la plus vulnérable face au changement climatique. La végétation des plantes à petits fruits a été corrélée négativement avec l'augmentation du ΔNDVImax, ce qui laisse présager une possible diminution de son couvert végétal. Dans l'ensemble, le bassin versant de la rivière Koroc verdit, mais avec une variabilité liée au gradient altitudinal et l'arbustation est le processus avec la plus forte influence sur le verdissement. L'étude permet de mettre en lumière les processus en lien avec le verdissement tel que

mesuré par les satellites dans le bassin versant de la Koroc. Une telle information pourrait mener à une meilleure utilisation des outils satellitaires pour comprendre le verdissement en lien avec le changement climatique dans le parc national de Kuururjuaq afin d'améliorer les aménagements durables.

Remerciements

Cette étude a été supportée par l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR), le Centre d'Étude Nordique (CEN), Parc Nunavik, le village Nordique de Kangiqsualujjuaq, le Centre de Recherche sur les interactions Bassins Versants - Écosystèmes Aquatiques (RIVE), le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), Programme de formation scientifique dans le Nord (PFSN). Les auteurs tiennent à remercier les membres de Parc de Kuururjuaq, le directeur Charlie Munick, le coordonnateur aux opérations Jari Leduc et le garde-parc Randall Morgan, les employés de Kativik Regional Governement, Isabeau Pratt et Olivier Trudel ainsi que Marilie Trudel et Caroline Macarez pour la caractérisation terrain. Nous tenons aussi à remercier la communauté de Kangiqsualujjuaq pour son hospitalité, son appuie et sa contribution.

Références bibliographiques

Administration régionale de Kativik (ARK). (2005). *Projet de parc de la Kuururjuaq : État des connaissances, Septembre 2005*. Administration régionale Kativik.

ARCTIC COUNCIL (ACIA). Huntington, H., & Weller, G. (s. d.). (2005). *An Introduction to the Arctic Climate Impact Assessment*. Ch. 1. Cambridge University Press, New York, 1086 pages.

Ballerine, C. (2017). *Topographic Wetness Index Urban Flooding Awareness Act Action Support*. Illinois State Water Survey. Prairie Research Institute. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Bayle, A., Roy, A., Dedieu, J.-P., Boudreau, S., Choler, P., & Lévesque, E. (2022). *Two distinct waves of greening in northeastern Canada : Summer warming does not tell the whole story*. Environmental Research Letters, 17(6), 064051

Bonta, C., King, G. M., & Danby, R. K. (2023). *Greening on the Bathurst caribou range in northern Canada: are erect shrubs responsible for remotely sensed trends?*. Arctic Science, 9(3), p. 581-599.

Box, J. E., Colgan, W. T., Christensen, T. R., Schmidt, N. M., Lund, M., Parmentier, F.-J. W., Brown, R., Bhatt, U. S., Euskirchen, E. S., Romanovsky, V. E., Walsh, J. E., Overland, J. E., Wang, M., Corell, R. W., Meier, W. N., Wouters, B., Mernild, S., Mård, J., Pawlak, J., & Olsen, M. S. (2019). *Key indicators of Arctic climate change : 1971–2017*. Environmental Research Letters, 14(4), 045010.

Brown, R., Lemay, M., M Allard, N E Barrand, C Barrette, Y Bégin, T Bell, M Bernier, S Bleau, D Chaumont, Y Dibike, A Frigon, P Leblanc, D Paquin, M J Sharp, & R Way. (2012). *Chapter 2: Climate variability and change in the Canadian Eastern Subarctic IRIS region (Nunavik and Nunatsiavut)*. Research Gate, Nunavik and Nunatsiavut: From science to policy. An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of climate change and modernization, p. 57-93.

Chagnon, C., & Boudreau, S. (2019). *Shrub canopy induces a decline in lichen abundance and diversity in Nunavik (Québec, Canada)*. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 51(1), 521-532.

Cohen, S., Bush, E., Zhang, X., Gillett, N., Bonsal, B., Derksen, C., Flato, G., Greenan, B., & Watson, E. (2019). *Changes in Canada's regions in a national and global context*. E. Bush and D.S. Lemmen, Canada's Changing Climate Report. Government of Canada, Ottawa, Ontario, p. 424-443.

Cossette, S. & Hébert, A. (2007). *Plan directeur provisoire : Parc national de la Kuururjuaq*. Direction du patrimoine écologique et des parcs. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Bibliothèque et Archives nationales du Québec.

Davis, E., Trant, A., Hermanutz, L., Way, R. G., Lewkowicz, A. G., Siegwart Collier, L., Cuerrier, A., & Whitaker, D. (2021a). *Plant–Environment Interactions in the Low Arctic Torngat Mountains of Labrador*. Ecosystems, 24(5), 1038-1058.

Davis, E. L., Trant, A. J., Way, R. G., Hermanutz, L., & Whitaker, D. (2021b). *Rapid Ecosystem Change at the Southern Limit of the Canadian Arctic, Torngat Mountains National Park*. Remote Sensing, 13(11), 2085.

Desponts, M. (2004). *Les communautés végétales du territoire du projet de parc des Monts-Torngat-et-de-la-Rivière-Koroc, Nunavik, Québec*. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Québec.

Dufour-Tremblay, G., Lévesque, E., & Boudreau, S. (2012). *Dynamics at the treeline : Differential responses of Picea mariana and Larix laricina to climate change in eastern subarctic Québec*. Environmental Research Letters, 7(4), 044038.

Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M., Neigh, C., & Reichstein, M. (2013). *Trend Change Detection in NDVI Time Series : Effects of Inter-Annual Variability and Methodology*. Remote Sensing, 5(5), 2113-2144.

Gamon, J. A. & Qiu, H. L. (1999). *Ecological applications of remote sensing at multiple scales*. Pugnaire, F. I. and Valladares, F., Eds., Handbook of functional plant ecology, Marcel Dekker, New York, p. 805-846.

Gorelick, Noel, Matt Hancher, Mike Dixon, Simon Ilyushchenko, David Thau & Rebecca Moore. (2017). *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone*. Remote Sensing of Environment, vol 202, p. 18 - 27

Holben, B. N. (1986). *Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data*. International Journal of Remote Sensing, 7(11), 1417-1434.

Hope, A. S., W. L. Boynton, D. A. Stow & D. C. Douglas (2003). *Interannual growth dynamics of vegetation in the Kuparuk River watershed, Alaska based on the Normalized Difference Vegetation Index.* International Journal of Remote Sensing, 24:17, p. 3413-3425

Jia, G. J., Epstein, H. E., & Walker, D. A. (2003). *Greening of arctic Alaska, 1981–2001*. Geophysical Research Letters, vol 30, no 20.

Ju, J., & Masek, J. G. (2016). *The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data*. Remote Sensing of Environment, vol 176, p. 1-16.

Larking, T., Davis, E., Way, R., Hermanutz, L., & Trant, A. (2021). *Recent greening driven by species-specific shrub growth characteristics in Nunatsiavut, Labrador, Canada*. Arctic Science, 7(4), 781-797.

Leboeuf, A., Morneau, C., Robitaille, A., Dufour, É. & Grondin, P. (2018). *Cartographie écologique de la végétation du Nord québécois. Norme de cartographie.* Direction des inventaires forestiers, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

Lemay, M., Provencher-Nolet, L., Bernier, M., Lévesque, E., & Boudreau, S. (2018). *Spatially explicit modeling and prediction of shrub cover increase near Umiujaq, Nunavik*. Ecological Monographs, 88(3), 385-407.

Martin, A. C., Jeffers, E. S., Petrokofsky, G., Myers-Smith, I., & Macias-Fauria, M. (2017). *Shrub growth and expansion in the Arctic tundra : An assessment of controlling factors using an evidence-based approach*. Environmental Research Letters, 12(8), 085007.

McManus, K. M., Morton, D. C., Masek, J. G., Wang, D., Sexton, J. O., Nagol, J. R., Ropars, P., & Boudreau, S. (2012). *Satellite-based evidence for shrub and graminoid tundra expansion in northern Q uebec from 1986 to 2010*. Global Change Biology, 18(7), 2313-2323.

Ministère des Ressources naturelles et des forêts. (2024). *Répertoire des services Web et données géographiques*. Gouvernement du Québec : Répertoire des services Web et données géographiques - Ministère des Ressources naturelles et des Forêts Site web visité le 2024/06/21

Ministère des Ressource naturelles et Forêts (MFFP), 2022, *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*, N° : F24-06-2211, Gouvernement du Québec

Myers-Smith, I. H., Kerby, J. T., Phoenix, G. K., Bjerke, J. W., Epstein, H. E., Assmann, J. J., John, C., Andreu-Hayles, L., Angers-Blondin, S., Beck, P. S. A., Berner, L. T., Bhatt, U. S., Bjorkman, A. D., Blok, D., Bryn, A., Christiansen, C. T., Cornelissen, J. H. C., Cunliffe, A. M., Elmendorf, S. C., … Wipf, S. (2020). *Complexity revealed in the greening of the Arctic*. Nature Climate Change, 10(2), 106-117.

Myers-Smith, I. H., Forbes, B. C., Wilmking, M., Hallinger, M., Lantz, T., Blok, D., Tape, K. D., Macias-Fauria, M., Sass-Klaassen, U., Lévesque, E., Boudreau, S., Ropars, P., Hermanutz, L., Trant, A., Collier, L. S., Weijers, S., Rozema, J., Rayback, S. A., Schmidt, N. M., … Hik, D. S. (2011). *Shrub expansion in tundra ecosystems : Dynamics, impacts and research priorities*. Environmental Research Letters, 6(4), 045509.

Pithan, F., & Mauritsen, T. (2014). *Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models*. Nature Geoscience, 7(3), 181-184.

Provencher-Nolet, L., Bernier, M., & Lévesque, E. (2014). *Quantification des changements récents à l'écotone forêt-toundra à partir de l'analyse numérique de photographies aériennes*. Écoscience, 21(3-4), 419-433.

Rantanen, M., Karpechko, A. Yu., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). *The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979*. Communications Earth & Environment, 3(1), 168.

Roy, D. P., Zhang, H. K., Ju, J., Gomez-Dans, J.L., Lewis, P.E., Schaaf, C.B., Sun, Q., Li, J., Huang, & H., Kovalskyy, V. (2016). *A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance*. Remote Sensing of Environment vol 176, p. 255-271.

Siegwart Collier, L. (2020). *Climate Change Impacts on Berry Shrub Performance In Treeline And Tundra Ecosystems*. A Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Biology / Faculty of Science Memorial University of Newfoundland, Canada.

Sims, D. A. & Gamon, J. A. (2002). *Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages*. Department of Biology and Microbiology, California State University LA. Remote Sensing of Environment vol 81, no 2-3, p. 337-354.

Tremblay, B., Lévesque E. & Boudreau, S. (2012). *Recent expansion of erect shrubs in the Low Arctic: evidence from Eastern Nunavik*. Environmental Research Letters, vol 7, 035501.

Tucker, C. J. (1978). *Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation*. NASA Center for Aerospace Information (CASI).

CHAPITRE IV

DISCUSSION ET CONCLUSION

4.1. Le projet de recherche et les objectifs du mémoire de maîtrise

Le projet de la télédétection du verdissement du BVK visait à apporter une meilleure compréhension des processus et des effets du changement climatique sur les écosystèmes de la végétation du Nunavik. La télédétection avec les images satellitaires de la série Landsat de 1984 à 2020 a permis de couvrir l'ensemble du BVK. C'est donc avec cet aspect que l'objectif premier de ce mémoire a débuté, c'est-à-dire le changement de l'indice de la végétation du NDVI identifié avec les images de la série Landsat (1984-2020), plus précisément le verdissement du BVK.

Cependant, c'est avec le deuxième objectif de ce mémoire, qui est de mieux comprendre les processus *in situ* ainsi que les caractéristiques de la végétation du verdissement, que les résultats sont plus évocateurs sur la tangibilité biophysique du changement de la végétation du BVK. Cet objectif vient pallier la limite de l'objectif 1 des images satellites. En effets, la précision des images Landsat est de 30 m et bien que la série temporelle soit longue (35 ans), la performance de la tendance du changement de NDVI dépend de la qualité du jeu de donnée des images qui est dépendantes des événements météorologiques (pluie, neige, nuages, ensoleillement, vent, humidité au sol) lors du passage du satellite. De plus, malgré la qualité et la précision des images satellites, la télédétection des processus du verdissement reste difficile. C'est donc avec ces limitations de l'objectif 1 que le mémoire vient répondre en partie à un vide scientifique avec l'objectif 2. Ce mémoire vient adresser l'objectif global qui est de mieux comprendre le verdissement et ces processus ainsi que les impacts potentiels sur les activités des communautés nordiques, avec les résultats du verdissement et de la caractérisation in situ de la végétation du BVK.

4.2. Les résultats généraux du mémoire

Avec l'utilisation de la télédétection, soit les images de la série Landsat, une tendance de verdissement a été observée sur pratiquement l'ensemble du BVK, et ce depuis l'année 1984. Certains secteurs ont démontré une plus grande augmentation de l'indice NDVI comme la vallée de la rivière Koroc et ses principaux tributaires et ainsi que les basses terres de l'Ungava à l'embouchure de la rivière Koroc. Dans ces secteurs, la classe de la végétation de la toundra des arbustes érigés influence le changement de l'indice du NDVI. Aussi, la tendance relative du NDVI des écosystèmes de la végétation en haute altitude et des sommets des plateaux semble indiquer que ces secteurs subissent des changements écosystémiques rapides. Les classes de végétation les plus présentes dans ces secteurs sont la toundra prostrée et celle des sols sans végétation. Tandis que le verdissement de la forêt boréale n'a pas été corrélé avec l'arbustation du *B. glandulosa*. Les processus du verdissement du secteur de la forêt boréale ont été plutôt associer avec la forte présence d'un couvert de végétation forestière et du sous-bois, comme les rhododendrons, les lichens, les mousses et dans une moindre mesure par une présence des conifères, soit *L. laricina* et *P. mariana*. Ce qui propose que la forêt boréale verdit, mais sans un changement de végétation apparent ou marqué dans son écosystème.

4.2.1. Les résultats de la caractérisation *in situ* et des images satellites de la série Landsat

La caractérisation terrain de la végétation a été faite sur trois secteurs différents et étalonnés sur deux zones bioclimatiques différentes et sur six classes de végétation. Avec les résultats de cette caractérisation de la végétation du BVK, on a pu observer le recouvrement important de la végétation des arbustes érigés. L'espèce la plus fréquente de cette classe de végétation est le *Betula glandulosa*. Sinon plus à proximité des cours d'eau dans le secteur du camp Qurlutuarjuq, plusieurs espèces d'*Alnus* ont aussi été observés. Le *Betula glandulos*a a été comptabilisé dans les six différentes classes de végétation et sa fréquence est la plus élevée de l'ensemble des 104 zones d'échantillonnage (quadrat de végétation). Plusieurs espèces de *salix* et le *B. glandolusa* ont aussi été observées dans les classes de végétation caractérisée comme des sols sans végétation par la cartographie de Leboeuf et *al*. (2018). Ces observations viennent appuyer l'analyse des images satellites sur le changement de l'indice relatif du NDVI dans les classes de végétation de la toundra

prostrée avec substrat rocheux et des sols sans végétation. La forte fréquence et la grande surface de recouvrement des *B. glandulosa* observé sur le terrain du BVK sont des indicateurs d'une arbustation par celui-ci. Il est donc très probable qu'une arbustation dans le BVK se fait depuis le réchauffement de la température de l'air du Nunavik depuis le milieu des années 1990 (Brown et *al*., 2012). Avec la caractérisation de la végétation qui a été effectuée durant l'été 2022, on a pu dénombrer et comptabiliser les espèces végétales présentes à ce moment dans le BVK. Cet aspect fut la limite de la caractérisation *in situ* de l'objectif 2. Car la caractérisation a pu observer la végétation présente, mais aucun changement ou succession végétale n'a pu être démontré. Avec la caractérisation de la végétation sur le terrain, nous avons pu corroborer le verdissement observé avec les images des satellites du BVK.

4.3. Portée du projet

Durant le projet de maîtrise du verdissement du BVK, une caractérisation de la végétation a été faite sur 104 quadrats qui couvrent plus de 900 m^2, donc environ 93 600 m^2 de végétation observée. Afin de mieux comprendre les processus et les changements qui sont impliqués dans le verdissement du BVK, des études échelonnées sur plusieurs années pourront être réalisées en continuant de caractériser les mêmes quadrats de végétation. Ainsi, l'évolution et la succession de la végétation pourront être suivies à partir des quadrats de végétation caractérisée durant l'été 2022. Un suivi exécuté avec cette méthodologie pourrait venir éclaircir certains processus de la végétation impliqués dans le verdissement en lien avec le réchauffement climatique du Nunavik.

4.3.1. Contribution supplémentaire au projet de recherche sur le verdissement du BVK

Les résultats du mémoire proposent avec les analyses effectuées et les observations de la végétation sur le terrain qu'une arbustation par le *B. glandulosa* est en cours dans le BVK. Cette arbustation pourrait venir affecter et réduire le recouvrement de la végétation de la toundra prostrée et de celle des mousses et des lichens. Afin de pallier cet aspect encore méconnu, un suivie utilisant la télédétection par image provenant d'un capteur multispectral monté sur un drone pourrait être une alternative efficace. En effet, lors du séjour durant l'été 2022 dans le parc de Kuururjuaq, j'ai pu effectuer des vols avec un drone

et un capteur multispectral à 5 bandes soit le bleu, le vert, le rouge, le red edge et le proche infrarouge à 120 m d'altitude. Au total, c'est environ 20 000 000 m^2 de photographie qui sont disponibles. Pour le secteur de Qurlutuarjuq c'est environ 10 000 000 m^2, dans le secteur du haut Koroc c'est environ 9 000 000 m^2 et de 1 000 000 m^2 dans le secteur du mont d'Iberville. Ce jeu de données pourrait permettre d'identifier à large échelle les espèces présentes et faire potentiellement un suivi synoptique temporel des espèces végétales.

4.3.2. Les images de drones et la série de satellites Sentinel-2

Initialement, ce projet visait aussi l'amélioration de la précision des indices de la végétation (NDVI) pour le suivi des espèces végétales de l'Arctique par le développement de l'utilisation d'un drone avec un capteur multispectral. L'étude terrain jumelée avec l'échantillonnage par les images du drone visait à développer des indices de la végétation mieux adaptés aux espèces végétales de l'Arctique. L'indice de végétation du *Normalized Anthocyanine Reflectance Index* (NARI) (Bayle et *al.*, 2019), qui est basé sur la réflectance du pigment de l'anthocyanine de la bande spectrale du red edge à 700 nm (Gitelson et *al.*, 1996 et 2009; Bayle et *al*., 2019), permet de faire une caractérisation plus précise en faisant une discrimination des espèces végétales qui ont un taux plus élevé d'anthocyanine. Par exemple, les plantes à petits fruits et la famille des éricacées sont particulièrement sensibles aux stress climatiques et au changement de la luminosité, ce qui accentue la production du pigment de l'anthocyanine et par conséquent, permet de plus facilement faire la caractérisation de ces espèces avec l'indice de végétation du NARI (Gitelson et *al.*, 1996 et 2009; Bayle et *al*., 2019).

Les indices de végétation du NDVI et du NARI peuvent être utilisés avec le capteur multispectral du drone puisque les bandes du visible, du red edge et du proche infrarouge sont intégrées dans ce capteur. Ces indices pourront être utilisés lors des prochaines recherches sur la végétation du BVK en lien avec le changement climatique. De plus, afin de faire un suivi sur une plus grande échelle de la végétation des écosystèmes du Nunavik l'utilisation de la série de satellites Sentinel-2 pourrait servir puisque les bandes du visible et les bandes du red edge sont disponibles depuis 2015. Les applications de ces indices de

la végétation seraient d'obtenir une meilleure information sur le recouvrement des espèces ou des familles d'espèces végétales du BVK. Un suivi soit par la série de satellites Sentinel-2 ou par un capteur multispectral sur un drone permettrait de mieux comprendre l'évolution de la végétation des plantes à petits fruits durant l'arbustation et ainsi de mieux comprendre les processus du verdissement.

4.3.3. Conclusion

L'objectif principal de ce mémoire de maîtrise était d'évaluer le verdissement par image satellite du bassin versant de la rivière Koroc depuis 1984 et de faire une caractérisation *in situ* de la végétation afin de mieux comprendre les processus du verdissement. L'objectif secondaire était de faire un premier suivi de la végétation avec l'utilisation d'un capteur multispectrale monté sur un drone. Ce mémoire apporte une meilleure compréhension des impacts du changement climatique sur la végétation du nord-est du Nunavik. L'un des processus du verdissement que la hausse de la température favorise semble être celui de l'arbustation par le *Betula glandulosa*. L'arbustation s'est démontrée plus présente dans les zones perturbées et dans les zones peu densément végétalisées. Une application qui pourrait être intégrée dans les stratégies de développement du parc serait la protection des milieux densément couverts comme la forêt boréale et des milieux de végétation plus sensible comme les couverts de lichens et les couverts des plantes à petits fruits. La caractérisation de la végétation a permis de mieux comprendre les processus du verdissement et les résultats obtenus s'intègrent avec les autres études sur le verdissement des régions de l'Arctique. Les résultats de ce mémoire semblent pouvoir s'appliquer aussi sur les autres bassins versants de la région du Nunavik qui démontrent une augmentation de l'indice de végétation du NDVI.

4.3.4. Applications futures

Ce projet de mémoire de maîtrise a été fait avec la collaboration de la communauté nordique de Kangiqsualujjuaq et de l'administration du parc national de Kuururjuaq. Ce mémoire avait pour objectif de permettre un premier survole à grande et à petite échelle de la végétation du bassin versant de la rivière Koroc et d'avoir une compréhension générale des impacts du changement climatique sur les processus du verdissement. Cette étude peut

améliorer la connaissance des changements et de la succession de la végétation présente dans la région du Nunavik. Les résultats pourraient permettre de mieux comprendre l'impact du changement climatique sur les écosystèmes nordiques, en plus d'apporter une plus grande connaissance sur les processus du changement de la végétation. Les résultats pourront aussi apporter une meilleure compréhension sur les adaptations des activités culturelles et socio-économiques des communautés nordiques de la région.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Administration régionale de Kativik (ARK). (2005). *Projet de parc de la Kuururjuaq : État des connaissances, Septembre 2005*. Administration régionale Kativik.

Anderson, D., Ford, J. D., & Way, R. G. (2018). *The Impacts of Climate and Social Changes on Cloudberry (Bakeapple) Picking : A Case Study from Southeastern Labrador*. Human Ecology, 46(6), 849-863.

ARCTIC COUNCIL (ACIA). Huntington, H., & Weller, G. (s. d.). (2005). *An Introduction to the Arctic Climate Impact Assessment*. Ch. 1. Cambridge University Press, New York, 1086 pages.

Assmann, J. J., Myers-Smith, I. H., Kerby, J. T., Cunliffe, A. M., & Daskalova, G. N. (2020). *Drone data reveal heterogeneity in tundra greenness and phenology not captured by satellites*. Environmental Research Letters, 15(12), 125002.

Assmann, J. J., Kerby, J. T., Cunliffe, A. M., & Myers-Smith, I. H. (2019). *Vegetation monitoring using multispectral sensors—Best practices and lessons learned from high latitudes*. Journal of Unmanned Vehicle Systems, 7(1), 54-75.

Ballerine, C. (2017). *Topographic Wetness Index Urban Flooding Awareness Act Action Support*. Illinois State Water Survey. Prairie Research Institute. University of Illinois at Urbana-Champaign.

Baruah, G., Molau, U., Bai, Y., & Alatalo, J. M. (2017). Community and species-specific responses of plant traits to 23 years of experimental warming across subarctic tundra plant communities. Scientific Reports, 7(1), 2571.

Bayle, A., Roy, A., Dedieu, J.-P., Boudreau, S., Choler, P., & Lévesque, E. (2022). *Two distinct waves of greening in northeastern Canada : Summer warming does not tell the whole story*. Environmental Research Letters, 17(6), 064051.

Bayle, A., Carlson, B., Thierion, V., Isenmann, M., & Choler, P. (2019). *Improved Mapping of Mountain Shrublands Using the Sentinel-2 Red-Edge Band*. Remote Sensing, 11(23), 2807.

Berner, L. T., Massey, R., Jantz, P., Forbes, B. C., Macias-Fauria, M., Myers-Smith, I., Kumpula, T., Gauthier, G., Andreu-Hayles, L., Gaglioti, B. V., Burns, P., Zetterberg, P., D'Arrigo, R., & Goetz, S. J. (2020). *Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome*. Nature Communications, 11(1), 4621.

Bjorkman, A. D., Myers-Smith, I. H., Elmendorf, S. C., Normand, S., Rüger, N., Beck, P. S. A., … Weiher, E. (2018). *Plant functional trait change across a warming tundra biome*. Nature, 562(7725), 57-62.

Bonta, C., King, G. M., & Danby, R. K. (2023). *Greening on the Bathurst caribou range in northern Canada: are erect shrubs responsible for remotely sensed trends?*. Arctic Science, 9(3), p. 581-599.

Boulanger-Lapointe, N., Gérin-Lajoie, J., Siegwart Collier, L., Desrosiers, S., Spiech, C., Henry, G. H. R., Hermanutz, L., Lévesque, E., & Cuerrier, A. (2019). *Berry Plants and Berry Picking in Inuit Nunangat : Traditions in a Changing Socio-Ecological Landscape*. Human Ecology, 47(1), 81-93.

Box, J. E., Colgan, W. T., Christensen, T. R., Schmidt, N. M., Lund, M., Parmentier, F.-J. W., Brown, R., Bhatt, U. S., Euskirchen, E. S., Romanovsky, V. E., Walsh, J. E., Overland, J. E., Wang, M., Corell, R. W., Meier, W. N., Wouters, B., Mernild, S., Mård, J., Pawlak, J., & Olsen, M. S. (2019). *Key indicators of Arctic climate change : 1971–2017*. Environmental Research Letters, 14(4), 045010.

Brown, R., Vikhamar-Schuler, D., Bulygina, O., Derksen, C., Luojus, K., Mudryk, L., Wang, L. & Yang, D. (2017). *Ch. 3: Arctic terrestrial snow cover*. (Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic) (SWIPA), 2017. pp. 25-55. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.

Brown, R., Lemay, M., M Allard, N E Barrand, C Barrette, Y Bégin, T Bell, M Bernier, S Bleau, D Chaumont, Y Dibike, A Frigon, P Leblanc, D Paquin, M J Sharp, & R Way. (2012). *Chapter 2: Climate variability and change in the Canadian Eastern Subarctic IRIS region (Nunavik and Nunatsiavut)*. Research Gate, Nunavik and Nunatsiavut: From science to policy. An Integrated Regional Impact Study (IRIS) of climate change and modernization, p. 57-93.

Bubier, J. L., Rock, B. N., & Crill, P. M. (1997). *Spectral reflectance measurements of boreal wetland and forest mosses*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 102(D24), 29483-29494.

Caccianiga, M., & Payette, S. (2006). *Recent advance of white spruce (Picea glauca) in the coastal tundra of the eastern shore of Hudson Bay (Québec, Canada)*. Journal of Biogeography, 33(12), 2120-2135.

Callaghan, T. V., Johansson, M., Brown, R. D., Groisman, P. Ya., Labba, N., Radionov, V., Bradley, R. S., Blangy, S., Bulygina, O. N., Christensen, T. R., Colman, J. E., Essery, R. L. H., Forbes, B. C., Forchhammer, M. C., Golubev, V. N., Honrath, R. E., Juday, G. P., Meshcherskaya, A. V., Phoenix, G. K., … Wood, E. F. (2011). *Multiple Effects of Changes in Arctic Snow Cover*. AMBIO, 40(S1), 32-45.

Caccianiga, Marco & Serge Payette. (2006). *Recent advance of white spruce (Picea glauca) in the coastal tundra of the eastern shore of Hudson Bay (Québec, Canada)*. Journal of Biogeography, vol 33, no 12, p. 2120-2135.

Chagnon, C., & Boudreau, S. (2019). *Shrub canopy induces a decline in lichen abundance and diversity in Nunavik (Québec, Canada)*. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 51(1), 521-532.

Cleland, E. E., Allen, J. M., Crimmins, T. M., Dunne, J. A., Pau, S., Travers, S. E., Zavaleta, E. S., & Wolkovich, E. M. (2012). *Phenological tracking enables positive species responses to climate change*. Ecology, 93(8), 1765-1771.

Cohen, S., Bush, E., Zhang, X., Gillett, N., Bonsal, B., Derksen, C., Flato, G., Greenan, B., & Watson, E. (2019). *Changes in Canada's regions in a national and global context*. E. Bush and D.S. Lemmen, Canada's Changing Climate Report. Government of Canada, Ottawa, Ontario, p. 424-443.

Cossette, S. & Hébert, A. (2007). *Plan directeur provisoire : Parc national de la Kuururjuaq*. Direction du patrimoine écologique et des parcs. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Bibliothèque et Archives nationales du Québec.

Cuerrier, A., Brunet, N. D., Gérin-Lajoie, J., Downing, A., & Lévesque, E. (2015). *The Study of Inuit Knowledge of Climate Change in Nunavik, Quebec : A Mixed Methods Approach*. Human Ecology, 43(3), 379-394.

D'Odorico, P., Schönbeck, L., Vitali, V., Meusburger, K., Schaub, M., Ginzler, C., Zweifel, R., Velasco, V. M. E., Gisler, J., Gessler, A., & Ensminger, I. (2021). *Drone-based physiological index reveals long-term acclimation and drought stress responses in trees*. Plant, Cell & Environment, 44(11), 3552-3570.

Davis, E., Trant, A., Hermanutz, L., Way, R. G., Lewkowicz, A. G., Siegwart Collier, L., Cuerrier, A., & Whitaker, D. (2021a). *Plant–Environment Interactions in the Low Arctic Torngat Mountains of Labrador*. Ecosystems, 24(5), 1038-1058.

Davis, E. L., Trant, A. J., Way, R. G., Hermanutz, L., & Whitaker, D. (2021b). *Rapid Ecosystem Change at the Southern Limit of the Canadian Arctic, Torngat Mountains National Park*. Remote Sensing, 13(11), 2085.

Derksen, C., Burgess, D., Duguay, C., Howell, S., Mudryk, L., Smith, S., Thackeray C. & Kirchmeier-Young, M. (2019). *Chapter 5: Changes in Snow, Ice, and Permafrost Across Canada*. Gouvernement du Canada. Canada's Changing Climate Report, p. 194-260.

Desponts, M. (2004). *Les communautés végétales du territoire du projet de parc des Monts-Torngat-et-de-la-Rivière-Koroc, Nunavik, Québec*. Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Direction de la recherche forestière, Québec.

Didan, K. (2015). *MOD13C2 MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05Deg CMG V006.* NASA EOSDIS Land Processes DAAC, vol 6.

Dufour-Tremblay, G., Lévesque, E., & Boudreau, S. (2012). *Dynamics at the treeline : Differential responses of Picea mariana and Larix laricina to climate change in eastern subarctic Québec*. Environmental Research Letters, 7(4), 044038.

Fauchald, P., Park, T., Tømmervik, H., Myneni, R., & Hausner, V. H. (2017). *Arctic greening from warming promotes declines in caribou populations*. Science Advances vol 3, no 4, p. e1601365.

Festa-Bianchet, M., Ray, J. C., Boutin, S., Côté, S. D., & Gunn, A. (2011). *Conservation of caribou (Rangifer tarandus) in Canada: an uncertain future*. *Canadian Journal of Zoology*, vol 89, no 5, p. 419-434.

Ford, J. D., Pearce, T., Canosa, I. V., & Harper, S. (2021). *The rapidly changing Arctic and its societal implications*. WIREs Climate Change, 12(6), e735.

Ford, J. D., Clark, D., Pearce, T., Berrang-Ford, L., Copland, L., Dawson, J., New, M., & Harper, S. L. (2019). *Changing access to ice, land and water in Arctic communities*. Nature Climate Change, 9(4), 335-339.

Ford, J. D., Couture, N., Bell, T., & Clark, D. G. (2018). *Climate change and Canada's north coast : Research trends, progress, and future directions*. Environmental Reviews, 26(1), 82-92.

Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M., Neigh, C., & Reichstein, M. (2013). *Trend Change Detection in NDVI Time Series : Effects of Inter-Annual Variability and Methodology*. Remote Sensing, 5(5), 2113-2144.

Gamon, J. A. & Qiu, H. L. (1999). *Ecological applications of remote sensing at multiple scales*. Pugnaire, F. I. and Valladares, F., Eds., Handbook of functional plant ecology, Marcel Dekker, New York, p. 805-846.

Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., Lonjou, V., Lafrance, B., Massera, S., Gaudel-Vacaresse, A., Languille, F., Alhammoud, B., Viallefont, F., Pflug, B., Bieniarz, J., Clerc, S., Pessiot, L., Trémas, T., Cadau, E., De Bonis, R., Isola, C., Martimort, P. & Fernandez, V. (2017). *Copernicus Sentinel-2A Calibration and Products Validation Status*. *Remote Sensing*, vol 9, no 6, Article Number 584.

Gauthier, S., Bernier, P., Kuuluvainen, T., Shvidenko, A. Z., & Schepaschenko, D. G. (2015). *Boreal forest health and global change*. Science, 349(6250), 819-822.

Gitelson, A. A., Chivkunova, O. B., & Merzlyak, M. N. (2009). *Nondestructive estimation of anthocyanins and chlorophylls in anthocyanic leaves*. American Journal of Botany, 96(10), 1861-1868.

Gitelson, A. A., Merzlyak, M. N., & Lichtenthaler, H. K. (1996). *Detection of Red Edge Position and Chlorophyll Content by Reflectance Measurements Near 700 nm*. Journal of Plant Physiology, 148(3-4), 501-508.

Gorelick, Noel, Matt Hancher, Mike Dixon, Simon Ilyushchenko, David Thau & Rebecca Moore. (2017). *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone*. Remote Sensing of Environment, vol 202, p. 18 - 27

Helbig, M., Pappas, C., & Sonnentag, O. (2016). *Permafrost thaw and wildfire : Equally important drivers of boreal tree cover changes in the Taiga Plains, Canada*. Geophysical Research Letters, 43(4), 1598-1606.

Hinzman, L. D., Bettez, N. D., Bolton, W. R., Chapin, F. S., Dyurgerov, M. B., Fastie, C. L., Griffith, B., Hollister, R. D., Hope, A., Huntington, H. P., Jensen, A. M., Jia, G. J., Jorgenson, T., Kane, D. L., Klein, D. R., Kofinas, G., Lynch, A. H., Lloyd, A. H., McGuire, A. D., … Yoshikawa, K. (2005). *Evidence and Implications of Recent Climate Change in Northern Alaska and Other Arctic Regions*. Climatic Change, 72(3), 251-298.

Holben, B. N. (1986). *Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data*. International Journal of Remote Sensing, 7(11), 1417-1434.

Hollister, R. D. (2003). *Response of tundra vegetation to temperature: Implications for forecasting vegetation change*. Michigan State University, Department of Plant Biology, UMI no 3092155.

Hope, A. S., W. L. Boynton, D. A. Stow & D. C. Douglas (2003). *Interannual growth dynamics of vegetation in the Kuparuk River watershed, Alaska based on the Normalized Difference Vegetation Index.* International Journal of Remote Sensing, vol 24, no 17, p. 3413-3425

Jia, G. J., Epstein, H. E., & Walker, D. A. (2003). *Greening of arctic Alaska, 1981–2001*. Geophysical Research Letters, vol 30, no 20.

Jenkins, M. & Dai, A. (2021). *The impact of sea-ice loss on Arctic climate feedbacks and their role for Arctic amplification*. Geophysical Research Letters, vol 48, issue 15, e2021GL094599.

Ju, J., & Masek, J. G. (2016). *The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data*. Remote Sensing of Environment, 176, 1-16.

Kurz, W. A., Dymond, C. C., Stinson, G., Rampley, G. J., Neilson, E. T., Carroll, A. L., Ebata T., & Safranyik, L. (2008). *Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change*. Nature, vol 452, 24, April, p. 987-990.

Larking, T., Davis, E., Way, R., Hermanutz, L., & Trant, A. (2021). *Recent greening driven by species-specific shrub growth characteristics in Nunatsiavut, Labrador, Canada*. Arctic Science, 7(4), 781-797.

Leboeuf, A., Morneau, C., Robitaille, A., Dufour, É. & Grondin, P. (2018). *Cartographie écologique de la végétation du Nord québécois. Norme de cartographie.* Direction des inventaires forestiers, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec.

Lemay, M., Provencher-Nolet, L., Bernier, M., Lévesque, E., & Boudreau, S. (2018). *Spatially explicit modeling and prediction of shrub cover increase near Umiujaq, Nunavik*. Ecological Monographs, 88(3), 385-407.

Major, M., Grondin, P. Morneau, C. & Couilard, P-L. (2022). *Étages de végétation du Québec méridional*, ministère des Ressources naturelles et des Forêts, Secteur des forêts, Direction des inventaires forestiers, 293 p.

Martin, A. C., Jeffers, E. S., Petrokofsky, G., Myers-Smith, I., & Macias-Fauria, M. (2017). *Shrub growth and expansion in the Arctic tundra : An assessment of controlling factors using an evidence-based approach*. Environmental Research Letters, 12(8), 085007.

Masek, J. G., Wulder, M. A., Markham, B., McCorkel, J., Crawford, C. J., Storey, J., & Jenstrom, D. T. (2020). *Landsat 9 : Empowering open science and applications through continuity*. Remote Sensing of Environment, 248, 111968.

McGuire A. D, Anderson, L. G., Christensen, T. R., Dallimore, S., Guo, L., Hayes, D. J., Heimann, M., Lorenson, D. T., Macdonald, R. W. & Roulet, N. (2009). *Sensitivity of the carbon cycle in the Arctic to climate change*. Ecological Monographs, vol 79, no 4, p. 523-555.

McManus, K. M., Morton, D. C., Masek, J. G., Wang, D., Sexton, J. O., Nagol, J. R., Ropars, P., & Boudreau, S. (2012). *Satellite-based evidence for shrub and graminoid tundra expansion in northern Q uebec from 1986 to 2010*. Global Change Biology, 18(7), 2313-2323.

Ministère des Ressources naturelles et des forêts. (2024). *Répertoire des services Web et données géographiques*. Gouvernement du Québec : Répertoire des services Web et données géographiques - Ministère des Ressources naturelles et des Forêts Site web visité le 2024/06/21

Ministère des Ressources naturelles et des forêts (MFFP). (2022). *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*., document F24-06-2211, p. 1-8, https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/FE_zones_vegetation_bioclimatiques_MRNF.pdf, Gouvernement du Québec.

Moreau, G., Chagnon, C., Auty, D., Caspersen, J., & Achim, A. (2020). *Impacts of Climatic Variation on the Growth of Black Spruce Across the Forest-Tundra Ecotone : Positive Effects of Warm Growing Seasons and Heat Waves Are Offset by Late Spring Frosts*. Frontiers in Forests and Global Change, 3, 613523.

Montanaro, M., McCorkel, J., Tveekrem, J., Stauder, J., Mentzell, E., Lunsford, A., Hair, J. & Reuter, D. (2022). *Landsat 9 Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2) Stray Light Mitigation and Assessment*. IEEE, Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, p. 1-8, Art no. 5002408.

Myers-Smith, I. H., Kerby, J. T., Phoenix, G. K., Bjerke, J. W., Epstein, H. E., Assmann, J. J., John, C., Andreu-Hayles, L., Angers-Blondin, S., Beck, P. S. A., Berner, L. T., Bhatt, U. S., Bjorkman, A. D., Blok, D., Bryn, A., … Wipf, S. (2020). *Complexity revealed in the greening of the Arctic*. Nature Climate Change, 10(2), 106-117.

Myers-Smith, I. H., Grabowski, M. M., Thomas, H. J. D., Angers-Blondin, S., Daskalova, G. N., Bjorkman, A. D., Cunliffe, A. M., Assmann, J. J., Boyle, J., McLeod, E., McLeod, S., Joe, R., Lennie, P., Arey, D., Gordon, R. & Eckert, C. (2019a). *Eighteen years of ecological monitoring reveals multiple lines of evidence for tundra vegetation change*. Ecological Monographs, vol 89, no 2, e01351.

Myers-Smith, I. H., Thomas, H. J. D. & Bjorkman, A. D. (2019b). *Plant traits inform predictions of tundra responses to global change*. New Phytologist, vol 221, no 4, p. 1742-1748.

Myers-Smith, I. H. & Hik, D. S. (2018). *Climate warming as a driver of tundra shrubline advance*. Journal of Ecology, vol 106, no 2, p. 547-560.

Myers-Smith, I. H., Forbes, B. C., Wilmking, M., Hallinger, M., Lantz, T., Blok, D., Tape, K. D., Macias-Fauria, M., Sass-Klaassen, U., Lévesque, E., Boudreau, S., Ropars, P., Hermanutz, L., Trant, A., Collier, L. S., Weijers, S., Rozema, J., Rayback, S. A., Schmidt, N. M., … Hik, D. S. (2011). *Shrub expansion in tundra ecosystems : Dynamics, impacts and research priorities*. Environmental Research Letters, 6(4), 045509.

Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar G. & Nemani, R. R. (1997). *Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991*. Nature, vol 386, 17 avril, p. 698-702.

Niittynen, P., Heikkinen, R. K., Aalto, J., Guisan, A., Kemppinen, J., & Luoto, M. (2020). *Fine-scale tundra vegetation patterns are strongly related to winter thermal conditions*. Nature Climate Change, 10(12), 1143-1148.

Pajunen, A. M., Oksanen, J., & Virtanen, R. (2011). *Impact of shrub canopies on understorey vegetation in western Eurasian tundra : Impact of shrub canopies on understorey vegetation*. Journal of Vegetation Science, 22(5), 837-846.

Parviainen, M., Luoto, M., & Heikkinen, R. K. (2010). *NDVI-based productivity and heterogeneity as indicators of plant-species richness in boreal landscapes*. Species Richness, 15.

Pearson, R. G., Phillips, S. J., Loranty, M. M., Beck, P. S. A., Damoulas, T., Knight, S. J., & Goetz, S. J. (2013). *Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change*. Nature Climate Change, 3(7), 673-677.

Peng, C., Ma, Z., Lei, X., Zhu, Q., Chen, H., Wang, W., Liu, S., Li, W., Fang, X., & Zhou, X. (2011). *A drought-induced pervasive increase in tree mortality across Canada's boreal forests*. Nature Climate Change, 1(9), 467-471.

Perreault, N., Lévesque, E., Fortier, D., & Lamarque, L. J. (2016). *Thermo-erosion gullies boost the transition from wet to mesic tundra vegetation*. Biogeosciences, 13(4), 1237-1253.

Pithan, F., & Mauritsen, T. (2014). *Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models*. Nature Geoscience, 7(3), 181-184.

Previdi, M., Smith, K. L. & Polvani, L. M. (2021). *Arctic amplification of climate change: a review of underlying mechanisms*. Environmental Research Letters, vol 16, no 9, 093003.

Provencher-Nolet, L., Bernier, M., & Lévesque, E. (2014). *Quantification des changements récents à l'écotone forêt-toundra à partir de l'analyse numérique de photographies aériennes*. Écoscience, 21(3-4), 419-433.

Rantanen, M., Karpechko, A. Yu., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). *The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979*. Communications Earth & Environment, 3(1), 168.

Roy, D. P., Zhang, H. K., Ju, J., Gomez-Dans, J.L., Lewis, P.E., Schaaf, C.B., Sun, Q., Li, J., Huang, H., & Kovalskyy, V. (2016). *A general method to normalize Landsat reflectance data to nadir BRDF adjusted reflectance*. Remote Sensing of Environment vol 176, p. 255-271.

Roy, D. P., Ju, J., Lewis, P., Schaaf, C., Gao, F., Hansen, M. & Lindquist, E. (2008). *Multi-temporal MODIS-Landsat data fusion for relative radiometric normalization, gap filling, and prediction of Landsat data*. Remote Sensing of Environment, vol 112, no 6, p. 3112-3130.

Siegwart Collier, L. (2020). *Climate Change Impacts on Berry Shrub Performance In Treeline And Tundra Ecosystems*. A Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Biology / Faculty of Science Memorial University of Newfoundland, Canada.

Sims, D. A. & Gamon, J. A. (2002). *Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages*. Department of Biology and Microbiology, California State University LA. Remote Sensing of Environment vol 81, no 2-3, p. 337-354.

Sitch, A. D., McGuire, S., Kimball, J., Gedney, N., Gamon, J., Engstrom, R., Wolf, A., Zhuang, Q., Clein, J., & McDonald, K. C. (2007). *Assessing the circumpolar carbon balance of arctic tundra with remote sensing and process-based modeling approaches*. Ecological Applications vol 17, no 1, p. 213-234.

Stow, D. A., Hope, A., McGuire, D., Verbyla, D., Gamon, J., Huemmrich, F., Houston, S., Racine, C., Sturm, M., Tape, K., Hinzman, L., Yoshikawa, K., Tweedie, C., Noyle, B., Silapaswan, C., Douglas, D., Griffith, B., Jia, G., Epstein, H., … Myneni, R. (2004). *Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic Tundra Ecosystems*. Remote Sensing of Environment, 89(3), 281-308.

Sulla-Menashe, D., Woodcock, C. E., & Friedl, M. A. (2018). *Canadian boreal forest greening and browning trends : An analysis of biogeographic patterns and the relative roles of disturbance versus climate drivers*. Environmental Research Letters, 13(1), 014007.

Tape, K. D., Hallinger, M., Welker, J. M., & Ruess, R. W. (2012). Landscape Heterogeneity of Shrub Expansion in Arctic Alaska. Ecosystems, 15(5), 711-724.

Tremblay, B., Lévesque E. & Boudreau, S. (2012). *Recent expansion of erect shrubs in the Low Arctic: evidence from Eastern Nunavik*. Environmental Research Letters, vol 7, 035501.

Tucker, C. J. (1978). *Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation*. NASA Center for Aerospace Information (CASI).

Viña, A. & Gitelson, A. A. (2011). *Sensitivity to foliar anthocyanin content of vegetation indices using green reflectance*. IEEE Geoscience and remote sensing letters, vol 8, no 3, p. 464-468.

Virkkala, A-M., Virtanen, T., Lehtonen, A., Rinne, J. & Luoto, M. (2018). *The current state of CO2 flux chamber studies in the Arctic tundra: A review*. Progress in Physical Geography, vol 42, no 2, p. 162-184.

Walther, G.-R. (2010). *Community and ecosystem responses to recent climate change*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 365(1549), 2019-2024.

Wang, J. A., Sulla-Menashe, D., Woodcock, C. E., Sonnentag, O., Keeling, R. F., & Friedl, M. A. (2020). *Extensive land cover change across Arctic–Boreal Northwestern North America from disturbance and climate forcing*. Global Change Biology, 26(2), 807-822.

Weijers, S., Myers-Smith, I. H., & LÖffler, J. (2018). *A warmer and greener cold world : Summer warming increases shrub growth in the alpine and high Arctic tundra*. Erdkunde, 72(1), 63-85.

Zamin, T. J., & Grogan, P. (2012). *Birch shrub growth in the low Arctic : The relative importance of experimental warming, enhanced nutrient availability, snow depth and caribou exclusion*. Environmental Research Letters, 7(3), 034027.

Annexe A.

Recouvrement et fréquence des espèces végétales répertoriées et mesurées sur les quadrats dans le bassin versant de la rivière Koroc, ou C % représente le pourcentage de recouvrement et ou F % représente le pourcentage de fréquence.

	Pourcentage de recouvrement et fréquence des taxa selon la classe de la végétation												
	BF		VMH		SAV		EST		PST		SN		Total
	C %	F %	C %	F %	C %	F %	C %	F %	C %	F %	C %	F %	C %
	(n = 23)		(n = 6)		(n = 5)		(n = 39)		(n = 26)		(n = 5)		(n = 104)
Taxa													
Bryophytes													
Mousse sp.	1,9	30,4	2,0	50,0	0,8	20,0	2,3	30,8	12,2	61,5	2,4	40,0	4,6
Sphaigne sp.									0,9	15,4			0,2
Lichens													
Lichen sp.	8,9	47,8	2,0	50,0	11,2	80,0	3,1	41,0	6,6	57,7	4,0	60,0	5,6
Arbres													
Larix laricina	3,7	47,8											0,8
Picea mariana	37,0	100,0			12,0	100,0	0,4	5,1					8,9
Arbustes													
Alnus crispa	1,9	17,4			0,8	20,0	0,8	7,7					0,8
Arctous alpina	0,2	4,3	0,7	16,7	5,6	80,0	2,2	23,1	0,3	7,7	3,2	40,0	1,4
Betula glandulosa	24,0	65,2	28,7	83,3	48,0	80,0	40,4	92,3	38,3	34,6	22,4	80,0	27,8
Cassiope tetragona									1,1	11,5			0,3

Dryas integrifolia							0,1	2,6					0,0
Empetrum nigrum	2,4	21,7			2,4	60,0	0,3	7,7			0,8	20,0	0,8
Phyllodoce caerulea							0,2	5,1	0,5	11,5			0,2
Rhododendron groenlandicum	9,2	69,6	0,7	16,7	1,6	40,0	0,6	10,3	0,2	3,8			2,4
Rhododendron laponicum							0,5	10,3	0,6	7,7			0,3
Rhododendron tomentosum decumbens	1,0	4,3	2,7	16,7	0,8	20,0	2,5	33,3	1,5	23,1			1,7
Rubus arcticus									0,2	3,8			0,0
Salix arctica			10,7	50,0			0,9	12,8	0,6	15,4	0,8	20,0	1,2
Salix argyrocarpa	5,7	17,4					0,4	10,3					1,4
Salix calcicola							0,1	2,6					0,0
Salix glauca			2,0	16,7			0,7	5,1			4,0	40,0	0,6
Salix herbacea			0,7	16,7			2,7	23,1	4,0	38,5	1,6	20,0	2,1
Salix planifolia	1,7	21,7	0,7	16,7			0,8	12,8					0,7
Salix uva-ursi							1,0	15,4	2,6	23,1	1,6	20,0	1,1
Salix vestita			1,3	16,7			0,3	5,1					0,2
Salix sp.	0,3	8,7					1,8	15,4			1,6	20,0	0,8
Vaccinium vitis-ideae	0,2	4,3							1,7	26,9			0,5
Vaccinium uliginosum	0,2	4,3	10,0	66,7	0,8	20,0	15,1	76,9	11,5	65,4	1,6	40,0	9,3
Herbacées (phorbes)													
Bistorta vivipara									0,5	7,7			0,1

Chamerion angustifolium							0,7	7,7					0,3
Chamerion latifolium							0,5	5,1			4,8	20,0	0,4
Comarum palustre			0,7	16,7									0,0
Diapensia lapponica							0,1	2,6	0,2	3,8			0,1
Fabaceae sp.							0,1	2,6	0,2	3,8			0,1
Oxyotropis campestris							1,0	12,8			1,6	40,0	0,5
Petasites frigidus palmatus							0,1	2,6					0,0
Polygonum sp.									0,2	3,8			0,0
Pyrola grandiflora									0,2	3,8			0,0
Solidago uliginosa			0,7	16,7									0,0
Viola labradorica							0,1	2,6					0,0
Herbacées (graminoïdes)													
Cyperaceae			16,7	83,3	0,8	20,0	2,3	20,5	7,4	50,0	1,6	40,0	3,8
Carex sp.							9,6	43,6	0,5	7,7	0,8	20,0	3,8
Eriophorum sp.			0,7	16,7			0,3	2,6					0,2
Poacea sp.	0,2	4,3					1,2	18,0	1,4	23,0			0,8
Joncaceae sp.			1,3	33,3			0,3	7,7	0,5	3,8			0,3
Préridophytes et lycopodes													
Equisetum sylvaticum	1,0	21,7											0,2
Dipbasiastrum alpinum							0,2	2,6	0,2	3,8			0,1