

CONTRAT DEB15-146

**Élaboration d'indicateurs de biodiversité spatiaux-temporels intégrant
la télédétection et portrait partiel de la biodiversité du Québec**

Chargées de projet

Anouk Simard, Chargée de projet
Direction de la biodiversité et des maladies de la faune
Direction générale sur la faune et ses habitats,
Ministère des Forêts de la Faune et des Parcs (MFFP),
et
Sabrina Courant, Chargée de projet
Chargée de projets en biodiversité
Direction de l'expertise en biodiversité
Ministère du Développement durable, de l'Environnement
et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC)

Préparé par

Monique Bernier, Chercheuse principale
Professeure en télédétection

Maria Dissanska, Associée de recherche

Benoît Lachapelle, stagiaire,
Étudiant en génie géomatique

INRS Centre Eau Terre Environnement (R-1697)

Rapport d'étape #2, livrable #3

28 juillet 2016

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2016
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-898-5 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2018
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2018

TABLE DES MATIERES

Table des matières	2
Liste des abréviations et des acronymes.....	4
1. Introduction.....	8
1.1. Contexte du projet	8
1.2. Bénéfices pour le ministère.....	9
1.3. Objectifs.....	10
1.4. Portée du rapport d'étape.....	12
2. Suivi de la biodiversité par télédétection - revue.....	13
2.1. Capteurs passifs.....	14
2.2. Capteurs passifs multispectraux.....	14
2.3. Capteurs passifs hyperspectraux.....	16
2.4. Capteurs actifs	16
3. Inventaire d'indicateurs ou de données/produits existants issus de la télédétection potentiellement pertinents pour le réseau de suivi BdQc	21
A. Images satellitaires qui sont largement utilisées pour des suivis de biodiversité	21
B. Produits issus des images satellitaires	22
C. Suivis existants basés sur les données satellitaires ou aéroportées.....	22
D. Indicateurs de la biodiversité issus des données de télédétection	22
4. Produits satellitaires recommandés pour le suivi des indicateurs	27
4.1. I1. Phénologie de la végétation– 1. Longueur de la période de croissance de la végétation / 2. indice de végétation en différence normalisée (NDVI)	27
4.2. I2. Caractérisation des habitats - Proportion et taille des écosystèmes dans le paysage... 28	
4.3. I3. Caractérisation physique des plans d'eau – 1. Taille et caractéristiques des mares et des rivières/ 2. Apparition ou disparition des mares ou thermokasts	29
4.4. I4. Présence de perturbations naturelles – 1. Intensité et superficie des feux de forêts / 2. Distribution des insectes ravageurs et maladies des arbres	30
4.5. I5. Caractérisation des écosystèmes forestiers et des écotones – 1. Répartition des espèces arborescentes / 2. Structure d'âge des peuplements forestières /3. Reboisement et déplacement de la ligne des arbres / 4. Perte d'habitat ouvert versus forestier	34
4.6. I6. Productivité des espèces arborescentes et arbustives (croissance) -1 Forme de croissance / 2. Évolution du couvert végétal de la toundra – pourcentage de couverture végétale – Landsat.	35

4.7.	17. Caractérisation de la neige et du couvert de glace – 1. Épaisseur et caractéristiques de la neige ou de la glace / 2. Période de fonte	35
4.8.	18. Physico-chimie des plans d'eau – couleur de l'eau, carbone organique dissous, abondance de chlorophylle	37
4.9.	19. Superficie des étangs temporaires	39
4.10.	MI 1. Indices climatiques (Priorité A)	40
4.11.	MI 2. Utilisation des terres (Priorité A).....	41
4.12.	MI 4. Fragmentation et connectivité des écosystèmes naturels (Priorité A).....	44
4.13.	MI 7. Productivité primaire nette (Priorité C).....	46
5.	Conclusion	48
	Références.....	50
	Annexe I. Principales sources d'information consultées.....	58
	Annexe II. Inventaire d'indicateurs ou des données/ produits existants issus de la télédétection....	60
	Annexe III. Images et produits satellitaires recommandés pour chaque indicateur de biodiversité .	60

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES ACRONYMES

AAC	Agriculture et Agroalimentaire Canada
AMSER	Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSER-E) NASA Aqua satellite
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Capteur à bord desatellite Terra (NASA)
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer – Capteur à bord de NOAA satellites
AWIFS	Advanced Wide Field Sensor - Indian Remote Sensing Satellites
BdQc	Suivi de biodiversité du Québec
BHI	Biodiversity Habitat Index
BioSpace	Projet conjoint du Service canadien des forêts et de l'Agence spatiale canadienne de surveillance nationale de la biodiversité, à l'aide des données d'observation de la Terre
BNDFFC	Base nationale de données sur les feux de forêt du Canada
CASI	Compact Airborne Spectrographic Imager –Capteur hyperspectral
CC	Changements climatiques
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques
CDB	Convention sur la diversité biologique
Chl-a	Chlorophylle - A
COD	Carbone organique dissous
DEPF	Direction de l'environnement et de la protection des forêts du MFFP
DI	Indice de perturbations (Disturbance index)
DMC	Constellation satellitaire à très haute résolution (Disaster Monitoring Constellation)
EBV	Variables essentielles de la biodiversité (Essential Biodiversity Variable)
ESA	Agence spatiale européenne (European Space Agency)
EVI	Enhanced vegetation index

FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FIMAQ	Système d'information sur les feux, les insectes et les maladies des arbres du Québec
Fire M3	Système de surveillance, de cartographie et de modélisation des feux de forêt
fPAR	Fraction of absorbed photosynthetically active radiation
FRQ	Fonds de recherche du Québec.
fRPA	Fraction du rayonnement photosynthétiquement actif
GEO BON	Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network
GeoEye	Système satellitaire et capteur optique à très haute résolution
GERI	Global Ecosystem Restoration Index (GERI)
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
ICDE	Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement
IKONOS	Système satellitaire et capteur optique à très haute résolution
IHD	L'indice des habitats dynamiques
INRS	Institut national de recherche scientifique
LAI	Indice de surface foliaire
Landsat	Système satellitaire et capteur optique à haute résolution
LBII	Local Biodiversity Intactness Index
LIDAR	«Light Detection And Ranging» - Capteurs opérant dans la partie visible du spectre électromagnétique qui ont la capacité à caractériser avec précision la structure à la fois horizontale et verticale du couvert terrestre
MA	Milieux aquatiques
MDDELCC	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer – Capteur optique à bord de satellite ENVISAT

MFFP	Ministère des Forêts de la Faune et des Parcs
MFo	Milieux forestiers
MH	Milieux humides
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MS	Minéraux en suspension
MSI	Imageur multi spectral à bord du satellite Sentinel-2
MT	Milieux toundriques
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation (Index l'indice de la végétation par différence normalisée)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OTDD	Observation de la Terre pour le développement durable des forêts
PARC	Protected Area representativeness & Connectedness Indices
PIR	Bande proche infrarouge (~ 0,7 - 1,1 µm)
PPB	Productivité primaire brute
PPN	Productivité primaire nette
QuickBird	Satellite et capteur optique à très haute résolution
QuickSCAT	Quick Scatterometer - Mission satellitaire de NASA, équipé avec un capteur microonde actif (SeaWinds)
RapidEye	Constellation satellitaire et capteurs optiques à très haute résolution
RADAR	« Radio Detection And Ranging » - Capteurs opèrent dans la partie du spectre électromagnétique couvert par les micro-ondes (1 mm à 1 m) -
RADARSAT	Satellites de l'Agence spatiale canadienne équipé d'un radar à synthèse d'ouverture
RIN	Rapport d'inventaire national

RNCAN	Ressources naturelles Canada
SCIFV	Système canadien d'information sur les feux de végétation
Sentinel	Constellation satellitaire d'Agence Spatial Européen
SHI	Species Habitat Index
SOPFEU	Société de protection des forêts contre le feu du Québec
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre - une famille de satellites développés par l'agence spatiale française
SSM/I	Special Sensor Microwave Imager Capteur microonde passif à bord de satellites de Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)
SSII	Species Status Information Index (SSII)
SAR	Radars à synthèse d'ouverture
SeaWIFS	Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor à bord de OrbView-2 satellite, conçu pour recueillir des données biologiques de l'océan (i.e. quantifier la chlorophylle produite par le phytoplancton marin). Mission terminée
SCF	Service Canadien des Forêts
SIG	Système d'information géographique
TerraSAR-X	Satellite d'observation de la Terre radar de l'agence spatiale allemande (DLR)
UBC	University of British Columbia
UT	Utilisation des terres
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suit – Capteur qui recueille des images visibles et infrarouges
VIS	Partie visible du spectre électromagnétique (~ 0,39 - 0,7 µm)
WorldView	Mission satellitaire optique à très haute résolution

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE DU PROJET

Les changements climatiques récents sans précédent et l'accroissement de la pression anthropique ont un impact significatif sur les écosystèmes et la biodiversité associée (WWF, 2014). Cependant, dû aux interactions biotiques et abiotiques parfois très complexes, il existe une grande hétérogénéité spatiale, tant dans la vitesse et l'ampleur de ces changements environnementaux que dans la réponse des écosystèmes et des organismes vivants. Ainsi, un suivi multi-sites est nécessaire afin de faire des avancées considérables dans notre compréhension des systèmes naturels (Bêty, 2015). À l'heure actuelle, plusieurs suivis spécifiques et partiels existent au Québec. Bien que les données recueillies soient très importantes, ces suivis fournissent généralement une information isolée, sporadique et incomplète sur la biodiversité québécoise. Il manque donc une vision intégratrice et structurante à l'échelle du territoire, de sorte qu'il est extrêmement difficile de faire un portrait et un suivi de l'état de la biodiversité au Québec. Il est impératif de se doter de moyens pour évaluer l'effet global des changements climatiques (CC) et des nombreuses autres pressions anthropiques sur les écosystèmes et des enjeux qui en découlent (Suivi BdQc : Mise en œuvre, 2016). Dans cette optique, le gouvernement du Québec souhaite se doter d'un réseau de suivi de la biodiversité à l'échelle du Québec pouvant dresser périodiquement un portrait de l'état de la biodiversité ainsi que son évolution.

Ce réseau de suivi de la biodiversité s'inscrit dans une mouvance internationale, telle que la Convention sur la diversité biologique (CDB) (Secades, 2014) qui vise à mieux documenter l'état de la biodiversité et le progrès vers un ensemble d'objectifs ambitieux pour enrayer sa perte à échelle globale. Il est donc important d'arrimer le suivi québécois avec les efforts internationaux. Cela permettrait de suivre et de comparer l'évolution de la biodiversité et des écosystèmes à une échelle globale (GEO BON, 2015). Dans ce contexte, lors de la première étape d'implémentation du réseau, un inventaire des indicateurs potentiels et utilisés dans les réseaux de suivi hors Québec ont été identifiés par des groupes d'experts (MDDELCC, 2015) et ensuite analysés pour leur pertinence pour le Québec. Ces indicateurs devraient permettre d'obtenir un portrait de l'état de la biodiversité, détecter les changements et leur ampleur, et identifier leurs causes.

Souvent, ces indicateurs sont basés sur les mesures in situ car ils offrent le potentiel d'extraire des informations précises sur l'existence, l'abondance, la répartition et la diversité des espèces. Toutefois, dans l'optique d'une vue globale sur l'état et les tendances de la biodiversité à l'échelle du Québec, la tâche de recueillir des données en utilisant des techniques traditionnelles sur des zones de grandes étendues et sur des intervalles de temps réguliers reste difficile, voire impossible. Ces inventaires nécessitent une quantité importante de temps sur le terrain et peuvent être extrêmement coûteux. De plus, pour certains écosystèmes situés dans des zones éloignées, l'observation sur le terrain pourrait être difficile.

Les données issues de la télédétection telles que les images numériques prises par des capteurs satellitaires peuvent surmonter ce défi et contribuer au suivi de la biodiversité de manière efficace. Ces images comportent un avantage majeur dans l'implantation d'un réseau de suivi de la biodiversité, car elles permettent de couvrir des zones spatialement étendues et ne nécessitent pas ou peu de campagnes de terrain. De plus, les données de télédétection peuvent être générées de façon systématique selon l'intervalle de temps souhaité (annuel, triennal, décade) pour peu que le protocole soit connu et constant. Les données de télédétection provenant de capteurs aéroportés ou de satellites sont de plus en plus employées pour les études sur le suivi de la biodiversité (Petrou *et al.*, 2015; Ker et Ostrovsky, 2003; Nagendra *et al.*, 2013). Plusieurs indicateurs essentiels (phénologie, couvert de neige, etc.) peuvent être extraits pour chacun des cinq (5) types de milieux (humides, forestiers, toundriques, aquatiques, fluvial). De plus, le traitement géomatique et l'intégration de différentes données de télédétection déjà existantes permettent d'élaborer des indicateurs composites (ou méta-indicateurs) de biodiversité, c'est-à-dire associés à plus d'un milieu et couvrant l'ensemble du territoire québécois (ex. composition du paysage, empreinte humaine, indice de fragmentation) (Petrou *et al.* 2015). La télédétection offre un avantage significatif dans le cadre du réseau de suivi de la biodiversité québécoise, car les données générées peuvent contribuer de façon essentielle à la mise en œuvre des premières étapes du réseau de suivi de la biodiversité. Elles permettraient, par exemple, de produire un portrait initial basé sur ces indicateurs.

Dans le cadre du projet de mise en œuvre du Réseau de suivi de la Biodiversité du Québec (Suivi BdQc : Mise en œuvre, 2016), notre équipe de recherche a obtenu le mandat d'élaborer les méthodologies permettant l'extraction des données associées aux indicateurs issus de la télédétection, sélectionnés par les experts.

1.2. BÉNÉFICES POUR LE MINISTÈRE

Ce projet fournira au gouvernement une liste des indicateurs de biodiversité pouvant être extraits par télédétection et des protocoles faciles à reproduire afin de suivre la biodiversité des milieux humides, forestiers, toundriques, aquatiques, fluviaux et via des indicateurs globaux de biodiversité. Ce projet permettra aussi d'établir un inventaire des indicateurs satellitaires ou issus de la télédétection et de répertorier les suivis issus de la télédétection développés par les différents ministères du gouvernement du Québec concernant la biodiversité dans un contexte de changements climatiques afin de ne pas dupliquer les efforts et de prioriser les indicateurs à suivre dans le temps et l'espace.

Le protocole d'analyse des images satellites sera aussi appliquée sur une série d'images afin d'extraire un portrait sommaire des indicateurs de biodiversité issus de la télédétection. Cette étape d'application permettrait de dresser un portrait de l'état de la biodiversité du Québec avec des indicateurs sélectionnés et d'initier la création d'un bilan des changements observés depuis les années 1990 pour ces indicateurs.

1.3. OBJECTIFS

L'objectif principal du projet est de valider les indicateurs de télédétection sélectionnés pour quatre différents milieux (Tableau 1) ainsi que les indicateurs de télédétection composites (Tableau 2) pour l'ensemble du Québec et d'en montrer le potentiel en appliquant quelques-uns des protocoles à partir d'images satellites gratuites ou disponibles au gouvernement. Les indicateurs de télédétection présentés au tableau 1 pour les milieux humides (MH), forestiers (MFo), toundriques (MT) et aquatiques (MA; lacs et rivières) ont été priorisés (A, B, C) par des groupes de travail issus des milieux universitaires et gouvernementaux. Les X signifient que certains indicateurs n'ont pas encore fait l'objet d'une priorisation et ne seront donc pas traités dans cette étude. Les indicateurs classés A et B seront priorisés.

Tableau 1. Liste des indicateurs de biodiversité issus de la télédétection pour les milieux humides (MH), forestiers (MFo), toundriques (MT) et aquatiques (MA; lacs et rivières) et sélectionnés comme A-essentiels, B-importants ou C-pertinents.

Indicateurs de biodiversité par télédétection	MH	MFo	MT	MA
Phénologie de la végétation – 1. Longueur de la période de croissance de la végétation / 2. Indice de végétation en différence normalisée (NDVI)	A	B	A	
Caractérisation des habitats – Proportion et taille des écosystèmes dans le paysage	A	A	A	A
Caractérisation physique des plans d'eau – 1. Taille et caractéristiques des mares et des rivières / 2. Apparition ou disparition des mares ou thermokasts	B		B	A
Présence de perturbations naturelles – 1. Intensité et superficie des feux de forêts / 2. Distribution des insectes ravageurs et maladies des arbres		A		
Caractérisation des écosystèmes forestiers et des écotones – 1. Répartition des espèces arborescentes / 2. Structure d'âge des peuplements forestiers / 3. Reboisement et déplacement de la ligne des arbres / 4. Perte d'habitat ouvert versus forestier	C	A	B	
Productivité des espèces arborescentes et arbustive (croissance) – 1. Forme de croissance / 2. Évolution du couvert végétal de la toundra Pourcentage de couverture végétale – Landsat		B	A	
Caractérisation de la neige et du couvert de glace – 1. Épaisseur et caractéristiques de la neige ou de la glace / 2. Période de fonte			A	A
Physico-chimie des plans d'eau - Couleur de l'eau, carbone organique dissout, abondance de chlorophylle				A
Superficie des étangs temporaires	X			

Le tableau 2 présente la priorisation (A, B, C) pour les indicateurs composites touchant l'aspect plus global de la diversité biologique ou des services écosystémiques.

Tableau 2. Liste des indicateurs de biodiversité issus de la télédétection comme indicateurs composites pour l'ensemble du Québec.

Indicateur composites de biodiversité par télédétection	Priorisation	Télédétection
Indices climatiques	A	oui
Utilisation des terres	A	oui
Impacts cumulés	B	oui
Fragmentation et connectivité des écosystèmes naturels	A	oui
Biodiversité en milieu urbain	B	?
Distribution et abondance des espèces exotiques envahissantes (EEE)	C	oui
Productivité primaire net	C	oui
Statut des espèces menacées et vulnérables (EMV)	B	?

OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

- 1) Vérifier ce qui est déjà en cours au MDDELCC et au MFFP et s'assurer qu'il n'y ait pas de redondance dans les indicateurs de télédétection et les travaux à l'interne ou ailleurs (p. ex., PSL ou au fédéral). Ce volet devra se faire en collaboration avec les intervenants concernés par la production de données géomatiques au gouvernement.
- 2) Faire une liste des indicateurs de télédétection qui ont déjà été développés dans les différents ministères (provinciaux et fédéraux) ou universités, afin ne pas refaire ce qui est déjà fait. Le spécialiste devra contacter d'autres experts dans différents ministères et nous renseignera sur les indicateurs/outils utilisés.
- 3) Identifier si certains indicateurs, issus de la télédétection et utilisés à l'international, auraient été omis mais pourraient s'avérer utiles pour un suivi de la biodiversité (Petrou et al. 2015) et les ajouter dans la liste (tableaux 1 et 2).
- 4) Arrimer les indicateurs envisagés (tableaux 1 et 2) avec les autres indicateurs de télédétection répertoriés au Québec et au Canada.
- 5) Documenter les indicateurs de télédétection sélectionnés par les équipes d'experts pour les différents milieux (tableau 1) ou comme méta-indicateurs (tableau 2), afin de mieux cerner les avantages et limites, la couverture et les méthodes disponibles, le coût d'achat des images, le temps d'extraction, la série temporelle et la complexité d'analyse.
- 6) Développer pour chaque indicateur retenu la méthodologie et un protocole afin d'avoir une démarche facile à reproduire.
- 7) Remplir les fiches d'information pour chacun des indicateurs sélectionnés.

- 8) Appliquer le protocole d'analyse des images satellites sur des séries d'images satellitaires (Landsat, MODIS ou autres) afin d'extraire un portrait sommaire des indicateurs de biodiversité issus de la télédétection pour les milieux humides, forestiers, toundriques, et aquatiques, fluviaux et pour certains méta-indicateurs. Le choix des indicateurs à cartographier sera établi avec le comité de suivi en fonction des résultats préliminaires.

1.4. PORTÉE DU RAPPORT D'ÉTAPE

Ce 1^{er} rapport d'étape présente les résultats associés aux objectifs 1 à 4 ci-dessus. Plus précisément, cet étape a permis d'établir un inventaire des indicateurs et de répertorier les suivis concernant la biodiversité qui ont été faits par les différents ministères du gouvernement du Québec, du Canada et à l'international, et d'arrimer ceux-ci avec les indicateurs de télédétection sélectionnés pour les différents milieux (tableau 1) ou comme méta-indicateurs (tableau 2) par les équipes d'experts. Ce rapport contient quatre chapitres et deux annexes. Suite à l'introduction, le second chapitre présente une revue de la littérature concernant le suivi de la biodiversité par télédétection. Dans ce chapitre, se retrouvent des informations sur les capteurs satellitaires, les démarches les plus utilisées et les types d'images potentielles existantes ayant déjà subi un traitement algorithmique qui pourraient être utilisées.

Le troisième chapitre décrit l'inventaire que nous avons créé avec une brève description des quatre catégories d'information associées (images satellitaires, produits issus des images satellitaires, suivis existants basés sur les données satellitaires ou aéroportées et indicateurs de la biodiversité).

Le quatrième chapitre présente pour chacun indicateurs sélectionnés pour le suivi BdQc et priorisés au tableau 1 et 2, l'arrimage que nous recommandons avec des images ou produits issus des données de télédétection.

Une liste des principales sources d'information consultées est incluse dans l'Annexe I. Toutes les données issues de la télédétection avec lesquelles les indicateurs sélectionnés pourraient être arrimés sont répertoriées dans l'Annexe II. L'Annexe 3 présente pour chaque indicateur sélectionné, la liste des imageries, des produits, des suivis et des indicateurs déjà développés, qui pourraient être arrimés avec celui-ci. La source (i.e. imagerie, produit) la plus appropriée pour un indicateur donné est surligné en vert.

2. SUIVI DE LA BIODIVERSITÉ PAR TÉLÉDÉTECTION - REVUE

La télédétection est la science, la technologie et l'art d'obtenir de l'information sur des objets ou des phénomènes à partir d'une certaine distance (Ahern *et al.*, 2011). Plus particulièrement pour le cas présent, les données de télédétection de type satellitaire sont obtenues au moyen de capteurs enregistrant l'énergie du rayonnement électromagnétique réfléchi ou émis à la surface de la Terre (Centre canadien de télédétection, 2005) via leur orbite en très haute altitude. Ces capteurs enregistrant ces émissions sont dits *passifs*, car ils enregistrent du rayonnement provenant naturellement de la Terre. Certains sont plutôt de type *actifs*, comme les satellites radar ou lidar, utilisant respectivement des ondes radios et lasers. Ils sont considérés actifs car ceux-ci envoient une onde de façon artificielle prioritairement à la captation, et c'est le retour de cette onde qui est alors enregistré. La télédétection comprend un large éventail d'outils et de techniques pour l'extraction et l'analyse de ces données dépendamment du type de capteur utilisé et de l'information recherchée. Afin de faciliter les choix à faire pour l'intégration des données de télédétection dans le réseau de suivi de la biodiversité du Québec, les paragraphes suivants présentent un bref résumé sur les données, les outils et les démarches appropriées.

Les données issues de la télédétection sont utilisées très souvent dans différentes études environnementales (caractérisation des habitats, état et suivis des écosystèmes, pollution, etc.). Il existe quelques revues exhaustives et récentes qui discutent l'utilisation de la télédétection pour le suivi de la biodiversité (Duro *et al.*, 2007; Petrou *et al.*, 2015). Certaines de ces publications (Petrou *et al.*, 2015; Secades *et al.*, 2014; Strand *et al.*, 2007; Ahern *et al.*, 2011; MS. MONINA, 2012) sont concentrées sur l'étude de la capacité de la télédétection à extraire des indicateurs de biodiversité et d'autres évaluent les progrès réalisés vers les objectifs internationaux (p. ex. les Objectifs d'Aichi de la Convention sur la diversité biologique (CDB)).

Tout d'abord, il est important de noter que les informations obtenues par satellite ne sont pas dans un format qui peut être facilement utilisé comme un indicateur de biodiversité (Secades *et al.*, 2014), mais nécessite quelques manipulations algorithmiques afin de devenir un indicateur (Strand *et al.*, 2007). La donnée seule mesurée (ou observée) devient un indicateur à partir du moment où elle est associée à un effet, où elle est utilisée pour faire un diagnostic (AAMP, 2015).

Il existe différentes approches pour le suivi de la biodiversité par télédétection. En général, elles pourraient être divisées en deux catégories (Secades, 2014; Duro, 2007; Turner, 2003).

- **Approche directe**

L'approche directe permet de cartographier directement la composition, l'abondance et la distribution des espèces ou des assemblages individuels. Les progrès récents de la résolution spectrale et spatiale des images ont contribué au développement de cette approche. Les mesures directes sont possibles avec les images à très haute résolution (< 2 m) telles que celles fournies avec les capteurs WorldView, GeoEye et QuickBird, qui permettent de détecter et classer de grandes plantes individuelles (p. ex. arbres, arbustes) (Nagendra, 2001). Les capteurs hyperspectraux qui enregistrent le spectre électromagnétique réfléchi dans des

dizaines ou même centaines de bandes discrètes rendent possible la distinction des signatures uniques de différentes espèces végétales (Duro, 2007). Les mesures directes des animaux sont aussi possibles mais sont restreintes aux grands animaux (p.ex. éléphants, gnous et zèbres) (Yang *et al.*, 2014), aux colonies (p. ex. les colonies de reproduction du manchot empereur dans l'Antarctique ou celles d'oiseaux) (Fretwell *et al.*, 2012; Lynch et Schwaller, 2014) ou à leurs traces de passage dans un environnement ouvert, i.e. avec un faible couvert végétal (Secades, 2014).

- **Approche indirecte**

Cette approche implique une déduction des informations sur la biodiversité à partir des données satellitaires qui ont des significations biophysiques directes, telles que la couverture végétale, la biomasse verte à partir de produits NDVI, l'altitude à partir des modèles numériques d'élévation, ou la température de surface (Secades, 2014). Dans ce cas indirect, les données issues de la télédétection ont un rôle de variables explicatives qui ont un lien direct avec la biodiversité (Secades, 2014).

L'approche la plus efficace et la plus appropriée dépend de l'environnement dans lequel la biodiversité est à surveiller, des caractéristiques des espèces concernées dans ces écosystèmes et de la disponibilité des données de télédétection (Secades, 2014). Les mesures indirectes sont plus largement utilisées pour le suivi de la biodiversité. Cependant, pour capter l'état d'un système ou son changement, tout d'abord, il faut déterminer quelles variables explicatives de la diversité biologique sont nécessaires. Ensuite, un produit de télédétection approprié pouvant être lié à cette variable devrait être sélectionné. Comme le même produit (p. ex. NDVI) pourrait être fourni par différents capteurs, un choix doit être fait selon le niveau de détail (résolution spatiale) et la fréquence requise (résolution temporelle).

Dépendamment du capteur utilisé, différents types d'information peuvent être extraits. Les systèmes de télédétection peuvent être classés en deux groupes principaux : les capteurs passifs et actifs.

2.1. CAPTEURS PASSIFS

Les capteurs passifs enregistrent l'énergie disponible naturellement, c.-à-d. l'énergie solaire réfléchie (la portion visible) ou absorbée et retransmise (l'infrarouge thermique) par la surface terrestre. L'énergie réfléchie peut être mesurée seulement lorsque le Soleil illumine la Terre, tandis que l'énergie émise naturellement par la surface de la Terre (l'infrarouge thermique) peut-être mesurée de jour comme de nuit (NRCAN, 1999). Les capteurs passifs couvrent différents bandes du spectre électromagnétique.

2.2. CAPTEURS PASSIFS MULTISPECTRAUX

La majorité des capteurs passifs en orbite sont multispectraux, i.e. ils collectent des données dans plusieurs bandes spectrales relativement larges et non contiguës. Ces bandes spectrales sont choisies pour collecter le rayonnement dans les parties spécifiques du spectre qui sont optimisées pour

permettre de ressortir des informations spécifiques. Par exemple, la plupart des capteurs multispectraux ont 3 bandes (bleu, vert et rouge) dans la partie visible du spectre électromagnétique (VIS, $\sim 0,39 - 0,7 \mu\text{m}$) ainsi que une bande dans le proche infrarouge (PIR). Il faut noter que les limites des bandes varient légèrement entre capteurs et cette différence devrait être prise en considération lors de comparaison des données provenant de différentes sources. La bande bleue ($\sim 0,45 - 0,52 \mu\text{m}$) est utilisée pour la discrimination entre le sol et la végétation, la bathymétrie, la cartographie côtière ainsi que pour l'identification des traits urbains. La bande verte ($\sim 0,52 - 0,6 \mu\text{m}$) fournit de l'information utile pour la végétation verte (mesure le sommet de réflectance) et pour l'identification des zones urbaines. La bande rouge ($0,6-0,69 \mu\text{m}$) est sensible à l'eau, le sol, la végétation et la chlorophylle. La bande proche infrarouge ($0,7 - 1,1 \mu\text{m}$) est utilisée principalement pour la distinction des différents types de végétation et de plantes, la santé et le contenu de la masse biologique, la délimitation des étendues d'eau et l'humidité du sol (NRCAN, 1999). Les bandes de moyenne infrarouge ($1,1 - 3,0 \mu\text{m}$) sont sensibles à l'humidité du sol et des plantes. Ces bandes sont également utilisées pour la discrimination entre la neige et les nuages.

Les bandes infrarouges thermiques sont associées au rayonnement qui est émis sous forme de chaleur par des objets et s'étend approximativement de 3 à $100 \mu\text{m}$. Ces bandes sont utilisées dans plusieurs domaines, comme par exemple la détection des feux de forêts, la sécheresse, la reconnaissance militaire, ou celle des êtres vivants à sang chaud qui deviennent facilement visibles si la résolution spatiale le permet (NRCAN, 1999).

En fonction de la résolution spatiale, spectrale et temporelle du capteur utilisé, différentes informations peuvent être extraites.

- **Les images satellitaires à très haute résolution** (moins de 10 m), telles que GeoEye, QuickBird, RapidEye, et Spot fournissent des informations très détaillées, permettant de détecter les changements dans la structure ou la morphologie des écosystèmes à une échelle très fine. Cependant, ces images ont généralement une résolution spectrale assez limitée ainsi qu'une plus faible résolution temporelle (i.e. la période de revisite au même endroit est plus grande). Toutefois, certains nouveaux capteurs ont des capacités d'acquisition très flexibles (rotation du capteur gauche-droite, avant-arrière) qui augmentent la répétitivité jusqu'à 2-4 jours. La couverture temporelle couverte par ces images est également plus courte, ce type de données n'étant disponible qu'à partir de 1999 (Ikonos-2). De plus, elles ont une plus faible couverture spatiale et un volume élevé de données qui augmente le temps d'analyse (Secades, 2014). Une autre contrainte, c'est leur prix. En général, les images à très haute résolution sont fournies par les satellites commerciaux.
- **Les images à résolution spatiale moyenne** (de 10 à 100 m), comme Landsat, Sentinel-2, SPOT et ASTER offrent également une information assez détaillée pour être utilisées pour la surveillance de zones précises. Un des avantages de certaines de ces images (Landsat, Sentinel-2) est qu'elles sont gratuites. Cela est un aspect très important pour l'implantation d'un suivi comme celui de la biodiversité au Québec (Suivi BdQc) qui a

l'intention de couvrir tout le territoire de la province. De plus, les images Landsat (MSS, TM, ETM+) archivées remontent aux années 1970 (Ahern, 2011). Cela les rend très intéressantes pour les objectifs poursuivis par le réseau de suivi de la biodiversité. Cependant, ce type d'images a également quelques limites comme une période de revisite d'une même zone de plus de 10 jours (ex. tous les 16 jours pour Landsat). En conséquence, ces données ont un usage limité pour suivre la spécificité saisonnière en détail, ainsi que pour repérer les zones de changements imprévus (Ahern, 2011). Un autre désavantage est qu'un grand nombre d'images sera nécessaire pour couvrir tout le territoire du Québec et le temps d'analyse de ces images sera assez long.

- **Les images à base résolution spatiale** (plus de 250 m) ont, par contre, l'avantage d'avoir une haute résolution temporelle (par exemple NOAA AVHRR ou MODIS). Elles peuvent fournir de l'information de manière cohérente à grande échelle (provinciale, dans l'ensemble du Canada ou globale) quotidiennement. Cela permet de l'utiliser pour le suivi de spécificités saisonnières (Ahern, 2011). Par contre, leur basse résolution spatiale limite leur usage à la détection de changements qui touchent un grand territoire, comme les feux de forêt ou le ravage par les insectes. Les images NOAA AVHRR existent depuis 1970 et offrent une longue série temporelle d'un territoire donné. C'est pourquoi elles sont utilisées très souvent pour étudier les changements spatio-temporelles des indices de végétation, du couvert nival ou des feux de forêt à l'échelle régionale et continentale. L'accès gratuit favorise aussi leur utilisation.

2.3. CAPTEURS PASSIFS HYPERSPECTRAUX

Les capteurs hyperspectraux ou spectromètres-imageurs (ex. CASI) mesurent l'énergie dans de nombreuses (plus de 100) bandes contiguës et étroites (de 10-20 nm de large). Ces instruments sont plus sensibles, par rapport des instruments multispectraux, aux variations subtiles de l'énergie réfléchi et ont un plus grand potentiel à détecter les différences entre les caractéristiques du sol, de la végétation et de l'eau. Par exemple, l'imagerie multispectrale peut être utilisée pour cartographier les zones boisées, tandis que l'imagerie hyperspectrale peut être utilisée pour cartographier/distinguer les espèces d'arbres dans la forêt, si la résolution spatiale est appropriée (Secades, 2014).

2.4. CAPTEURS ACTIFS

Les capteurs actifs comme RADAR et LiDAR, dégagent un rayonnement électromagnétique qui illumine la cible et enregistrent la partie du rayonnement réfléchi par la cible dans la direction du capteur. Les capteurs RADAR (« Radio Detection And Ranging ») opèrent dans la partie du spectre électromagnétique couvert par les micro-ondes (1 mm à 1 m) où l'énergie solaire est très faible. Ce type de capteurs a l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou de la saison car le signal peut pénétrer les nuages (Secades, 2014). LiDAR signifie « Light Detection

And Ranging» et fonctionne de manière très similaire au RADAR. Cependant, au lieu d'un signal de micro-ondes, une impulsion laser est envoyée vers la cible. Les photons qui reviennent vers le récepteur sont détectés avec un photodétecteur et comptabilisés en fonction du temps. Comme la vitesse de la lumière est connue, la distance à l'objet peut être facilement calculée (Secades, 2014).

Les données des RADAR actifs (RADARSAT, ENVISAT, etc.) sont également très utilisées pour les suivis environnementaux. Elles permettent, entre autres, de détecter des changements dans le couvert végétal dû aux coupes forestières et aux feux, de faire un suivi de l'agriculture, des inondations, de l'humidité du sol, du couvert de glace, etc. (Gauthier et al. 2014; Filion et al. 2015; Duguay et al. 2015). Les données LiDAR sont de plus en plus répandues surtout grâce à leur capacité à caractériser avec précision la structure à la fois horizontale et verticale du couvert végétal. La structure 3-D du couvert végétal est une caractéristique importante des habitats qui pourrait être liée à la richesse des espèces, ainsi qu'avec d'autres paramètres de la biodiversité, permettant de modéliser ainsi la biomasse écoforestière.

Un exemple de quatre types d'images, notamment QuickBird, RADARSAT-2, Landsat-7 ETM+ et MODIS, ayant respectivement une résolution spatiale de 2,4 m, 6,5 m, 25 m et 250 m, est présenté à la Figure 1. Les rectangles jaune et rouge encerclent deux tourbières minérotrophes structurées avec des mares et lanières très fines du bassin de la rivière La Grande.

La combinaison de données satellitaires ou aéroportées offrant la meilleure solution pour surveiller la biodiversité dépend fortement des cibles ou des phénomènes à surveiller. En général, la taille minimale d'unités homogènes dans un système détermine la taille du pixel qui est acceptable. De la même manière, la variation temporelle des phénomènes ou des variables suivis (ex. la phénologie des espèces, la récurrence de feux, la régénération, etc.) détermine si la résolution temporelle d'un produit issu de la télédétection peut aider à identifier les changements de la biodiversité.

Il est généralement nécessaire de valider les approches ou algorithmes par des relevés au sol avant que les données issues de la télédétection puissent devenir un indicateur utilisable (vérifications *in situ*).

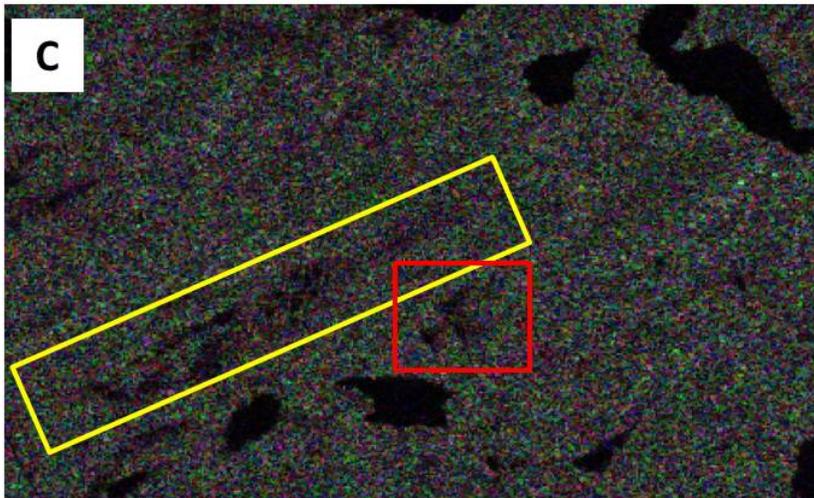
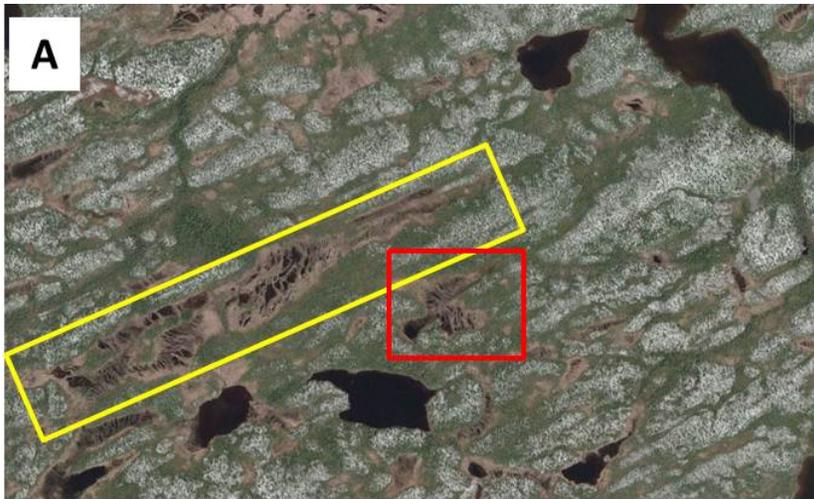


Figure 1. A) QuickBird, résolution 2.4 m, composée couleur : Rouge (bande 3), Vert (bande 2), Bleu (bande 1); B) Landsat-7 ETM+, résolution 30 m, composée couleur : Rouge (bande 3), Vert (bande 2), Bleu (bande 1); C) RADARSAT-2 , résolution 6.25 m, composée couleur : Rouge (C11), Vert (C22), Bleu (C33) et D) MODIS, résolution 250 m, composée couleur : Rouge (bande 1), Vert (bande 4), Bleu (bande 3);

Des listes très détaillées résumant les capteurs utilisés pour le suivi de la biodiversité, leur arrimage avec la CDB ainsi que leur résolution, coût et références, peuvent être trouvées dans la littérature (MERN, 2015; Annexe 2 de Secades, 2014; Tableau 3 de Petrou *et al.*, 2015). Basé sur cette revue de littérature et d'une réflexion sur le potentiel d'utilisation de certains types d'images pour le suivi BdQc, l'annexe II (section A) dénombre quelques capteurs et une brève description des caractéristiques des images y est présentée. Les principaux critères choisis pour un suivi efficace et optimal de la biodiversité sont:

- 1) la résolution spatiale appropriée,
- 2) l'existence de longues séries de données,
- 3) la fréquence d'acquisition des images,
- 4) la perspective d'avoir une continuité de la mission spatiale (i.e. d'avoir le même type de données dans le futur),
- 5) la gratuité ou le faible coût de l'imagerie,
- 6) la forte probabilité d'être utilisée par d'autres groupes de suivi de la biodiversité à l'échelle nationale ou mondiale (i.e. d'être un outil standard).

Généralement, les données issues de la télédétection peuvent apporter une contribution importante à six des domaines d'intérêt identifiés par la CDB (Petrou *et al.*, 2015; Secades, 2014; Strand, 2007). Notamment :

- Tendances de l'étendu, de l'état et de la vulnérabilité des écosystèmes, biomes et habitats **(CDB 1: Étendu)**;
 - Cartographie terrestre
 - Déforestation et dégradation des écosystèmes
 - Fragmentation et connectivité des écosystèmes
 - Cartographie aquatique (eau douce, biomes marines et côtières)
- Tendances de l'abondance, la distribution, et le risque d'extinction des espèces **(CDB 2 : Espèces)**.
 - Plantes
 - Animaux
- Tendances des pressions exercées par l'agriculture non durable, de la sylviculture, de la pêche et de l'aquaculture **(CDB 4 : Pressions anthropiques)**
 - Surveillance de l'agriculture
 - Surveillance de la foresterie
- Tendances des pressions exercées par la conversion des habitats, la pollution, les espèces envahissantes et le changement climatique **(CDB 5 : Pressions variées)**.
- Tendances de la répartition, l'état et la durabilité des services écosystémiques pour le bien-être humain **(CDB 6 : Services)**
 - Services d'approvisionnement (nourriture, matières premières, eau)
 - Services de régulation (stockage du carbone, la lutte antiparasitaire)

- Tendances en matière de couverture, d'état, de représentativité et d'efficacité des aires protégées et d'autres approches (CDB **11** : Aires protégées).

Ils existent déjà des indicateurs de la biodiversité et des suivis écologiques basés sur les données de télédétection, développés et réalisés par les différents ministères du gouvernement du Québec, du Canada et à l'international. Ainsi, la première étape de notre travail a consisté à établir un inventaire de ces indicateurs, des suivis et de produits issues des données de télédétection qui ont le potentiel d'être arrimés avec les indicateurs sélectionnés pour le suivi BdQc. Les résultats de notre recherche sont présentés au chapitre (3) suivant.

3. INVENTAIRE D'INDICATEURS OU DE DONNÉES/PRODUITS EXISTANTS ISSUS DE LA TÉLÉDÉTECTION POTENTIELLEMENT PERTINENTS POUR LE RÉSEAU DE SUIVI BDQC

La revue de littérature et les sites internet des différents organismes gouvernementaux provinciaux et fédéraux ont permis d'identifier plusieurs types de données et de produits issus de la télédétection qui ont un potentiel intéressant pour le suivi BdQc et pourraient être arrimés avec les indicateurs sélectionnés pour le réseau de suivi BdQc.

En réalité, il existe un grand nombre de données de télédétection qui pourraient être d'intérêt pour le suivi BdQc. Cependant, les informations qui y sont associées et les données elles-mêmes sont réparties dans une mosaïque d'organismes institutionnels (provinciaux et fédéraux). Nous avons donc créé un inventaire permettant d'avoir un vue d'ensemble des données disponibles, ce qui facilitera le choix des indicateurs à privilégier pour le suivi BdQc. Les principales sources d'informations consultées pour la réalisation de cet inventaire sont présentées à l'Annexe I. Les informations inventoriées sont regroupées en 4 catégories (A/B/C/D) et présentées à l'Annexe II (voir le fichier Excel). Pour chaque élément de l'inventaire, des informations concernant le type d'imagerie, la résolution spatiale, la couverture spatiale, la couverture temporelle, la fréquence, la disponibilité, l'accès, les références, ainsi que l'arrimage avec les indicateurs des tableaux 1 et 2 ont aussi été incluses. Les prochains paragraphes résument les données et les indicateurs que nous retrouvons dans chacune des quatre catégories.

A. Images satellitaires qui sont largement utilisées pour des suivis de biodiversité

Dans cette première catégorie (Section A, fichier Excel), nous avons dénombré les images satellitaires qui étaient les plus souvent utilisées pour les suivis environnementaux à l'échelle nationale ou mondiale, qui ont des longues séries de données ainsi qu'une résolution spatiale et temporelle qui permettent de suivre la majorité des indicateurs de BdQc (Tableaux 1 et 2). Les images à résolution spatiale moyenne et basse de l'Annexe II (Section A) sont disponibles sans frais. Les images à très haute résolution sont généralement assez dispendieuses et le prix varie selon le niveau de prétraitement, la surface couverte, la disponibilité dans les archives ou s'il s'agit d'une nouvelle acquisition. Il est intéressant de noter que dans le cadre du Plan Nord, de 2010 à 2012, le ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF) en partenariat avec le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), a procédé à l'acquisition d'une couverture d'images satellite RapidEye (résolution spatiale de 5 m après le prétraitement) afin d'obtenir un portrait global de l'occupation du territoire couvert par le Plan Nord.

B. Produits issus des images satellitaires

Dans cette seconde catégorie (section B), des produits satellitaires à valeur ajoutée sont présentés, c'est-à-dire des images satellitaires qui ont subies certains traitements en appliquant des algorithmes afin de produire des données adaptées à des applications cohérentes de surveillance. Dans cette catégorie, on compte notamment des mosaïques d'images satellitaires, des cartes de couverture terrestre, des inventaires forestiers, des indices de végétation comme l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI), des couvertures de neige (p. ex. MODIS), des indices de productivité primaire net (p. ex. MODIS), des zones brûlées (p. ex. MODIS). Ces produits sont pertinents pour la cartographie et le suivi des changements.

C. Suivis existants basés sur les données satellitaires ou aéroportées

Dans cette troisième catégorie (section C), nous avons regroupé certains suivis environnementaux qui tentent d'évaluer les changements qui s'opèrent dans différents habitats ou écosystèmes sur le territoire du Québec et qui ont été réalisés à l'aide d'images satellitaires. Voici quelques exemples qui illustrent cette catégorie :

- Les milieux humides (Dissanska *et al.*, 2009; Dribault *et al.*, 2011; Martin et Létourneau, 2011; Beaulieu *et al.*, 2012)
- Changements de la toundra arbustive (Provencher-Nolet, 2014; Duguay *et al.*, 2015),
- Mares de thermokarst (Beck *et al.*, 2015; Bouchard *et al.*, 2014)
- Perturbations de la forêt par les insectes et le feu
- Couleur de l'eau, carbone organique dissout, abondance de chlorophylle (El-Alem, 2014)

Les résultats de ces suivis pourraient servir comme une base de comparaison. Les informations incluses dans cette catégorie pourraient être arrimées dans plupart des cas avec les indicateurs du Tableau 1.

D. Indicateurs de la biodiversité issus des données de télédétection

Dans cette dernière catégorie (section D), sont dénombrés des indicateurs de biodiversité ou de paramètres environnementaux différents de ceux des Tableaux 1 et 2, mais qui pourraient être d'intérêt pour le réseau de suivi BdQc.

D1 BioSpace (Canada) un projet conjoint du Service canadien des forêts et de l'Agence spatiale canadienne de surveillance nationale de la biodiversité, à l'aide des données d'observation de la Terre (Wulder *et al.*, 2012). Comme il permet de surveiller les paramètres du paysage terrestre au fil du temps et dans l'ensemble du pays, le projet **BioSpace** constitue, en quelque sorte, un système national d'alerte précoce, montrant où

se produisent les changements les plus critiques et ciblant les interventions. Cependant, il faut mentionner que le projet BioSpace est basé sur des images couvrant la période de 2000 à 2005 (i.e. 6 ans). Il s'agit donc d'une information de référence détaillée sur l'état des paysages pour cette période seulement.

Le projet **BioSpace** visait la collecte des données concernant cinq paramètres du paysage terrestre qui sont des indicateurs clés pour la diversité biologique. Notamment :

L'indice des habitats dynamiques (IHD), qui permet de mesurer la productivité de la végétation (ou de la « verdure »), la couverture de neige en hiver, ainsi que les variations saisonnières de la verdure (un indicateur de la disponibilité des aliments pour les animaux). L'estimation de l'IHD annuelle est basée sur le calcul de la productivité annuelle minimale, de la productivité annuelle totale et des variations saisonnières de la productivité extraites du produit fPAR (*fraction of absorbed photosynthetically active radiation*) de MODIS, MERIS ou AVHRR. Les détails sur ces capteurs pourraient être trouvés dans la section A de l'Annexe II. L'IHD est un outil précieux qui aide les chercheurs à suivre les changements de la composition et la diversité des espèces dans une région donnée. La pertinence de l'IHD a été testée pour le suivi de la biodiversité d'oiseaux et de papillons. Cet indice a été également utilisé en Chine (Zhang, 2015).

L'indice de perturbations (Disturbance Index - DI), qui détecte le moment, la localisation et l'étendue des perturbations de la couverture terrestre par divers événements naturels tels que les incendies, les infestations d'insectes et les sécheresses, et par des activités telles que la mise en valeur des ressources. Le DI est estimé en utilisant la température de la surface terrestre ainsi que les indices de végétation EVI qui proviennent des données satellitaires (MODIS, Landsat).

La topographie, qui a une grande incidence sur le climat. À son tour, le climat influe sur la composition et la croissance de la végétation (par ex., les montagnes).

La couverture terrestre, un paramètre qui permet de surveiller différents types de couvertures terrestres et leur agencement spatial (p. ex., continus ou fragmentés).

La couverture de la neige, laquelle peut être un facteur de contrôle dominant de la biodiversité dans les climats froids. L'épaisseur et la dynamique du couvert de la neige peuvent avoir un impact direct sur la phénologie des plantes et des animaux, sur le bilan hydrique, ainsi que sur la qualité des habitats et leur productivité. L'équivalent en eau de la neige est estimé quotidiennement à partir de températures mesurées à l'aide de capteur passive micro-onde tel que *Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I)* ou ses successeurs AMSR-E et AMSR-2.

Les indicateurs IHD, DI et couverture de neige sont intéressants pour le BdQc.

D2. Indicateurs globaux du changement de la biodiversité (GEO BON, 2015)

GEO BON (*Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network*) est un partenariat de plus de 70 nations et 50 organisations participantes dont le but est d'améliorer la coordination d'ensembles (nouveaux et existants) de données d'observation de la Terre. Un ensemble de cinq indicateurs globaux a été proposé par **GEO BON** afin d'adresser les lacunes dans la compréhension du changement dans la biodiversité à différentes échelles. Ces indicateurs vont permettre d'évaluer le progrès vers les objectifs d'Aichi 5, 11, 12, 14, 15, et 19. Ils sont dérivés en intégrant des données de trois variables essentielles de la biodiversité (*Essential Biodiversity Variable* - EBV) : distribution des espèces, diversité taxonomique et étendue des écosystèmes. Cette nouvelle série d'indicateurs est caractérisé par l'intégration basée sur un modèle de multiples sources et types de données, y compris les observations *in situ* et de grands ensembles globaux de données de télédétection d'accès ouvert. Ces indicateurs couvrent toute la surface terrestre à une résolution assez fine de **1 km**. À cette résolution, les indicateurs globaux proposés peuvent effectivement tenir compte d'importants liens entre la distribution des espèces et les particularités du changement des habitats. À cette résolution, les indicateurs proposés sont aussi appropriés pour l'évaluation du changement à tous les niveaux de l'agrégation spatiale (national, régional et non seulement global).

Species Habitat Index (SHI) – quantifie les changements dans les habitats appropriés pour les espèces individuelles et fournit des estimations globales des pertes potentielles de la population et du risque d'extinction dans une région ou dans le monde entier. Cet indice est basé sur l'information (de la littérature ou connaissances des experts) sur les restrictions d'habitat d'une espèce donnée, ainsi que sur la couverture terrestre des images Landsat et MODIS disponible annuellement depuis 2001. Toutes les données sous-jacentes et les paramètres sont disponibles par le biais du Map of Life web Interface.

Biodiversity Habitat Index (BHI) – estime l'impact de la perte d'habitat, la dégradation et la fragmentation sur la biodiversité terrestre à l'échelle mondiale, en liant le changement dans le couvert forestier (*Global Forest Change dataset*) depuis 2000 et la base de données *MODIS Land Cover Change* (MCD12Q1) depuis 2001 avec le PREDICTS meta-analysis afin d'attribuer une note (score) pour la qualité de l'habitat des classes d'utilisation des terres résultantes.

Species Protection Index (SPI) – cet indice quantifie la qualité de l'habitat pour une espèce protégée donnée et estime la représentativité régionale ou globale de la biodiversité des aires protégées. Pour estimer cet indice, des informations sur le couvert végétal (produits MODIS ou Landsat) ainsi que des informations sur les restrictions d'habitat d'une espèce donnée sont utilisées.

Protected Area representativeness & Connectedness Indices (PARC) –évalue la mesure dans laquelle les aires protégées terrestres sont écologiquement représentatives et bien reliées en utilisant les données sur les aires protégées (World Database on protected Areas, WDPA), MODIS Land Cover Change Product et les modèles de la variation spatiale de la composition de la biodiversité (*Beta diversity*).

Local Biodiversity Intactness Index (LBII) – l'indice fournit des estimations des impacts humains sur le caractère intact de la biodiversité locale dans le monde entier, et comment cela peut changer au fil du temps.

Global Ecosystem Restoration Index (GERI) – cet indice composite intègre les aspects structuraux et fonctionnels du processus de restauration des écosystèmes. Notamment, il intègre les changements dans la productivité primaire, les changements dans le bilan d'énergie des écosystèmes (ex. évapotranspiration), et la transition entre les classes de couverture terrestre.

Species Status Information Index (SSII) - cet indice mesure la pertinence des données sur la distribution des espèces individuelles et sur la composition des assemblages d'espèces dans un lieu ou une région.

D3. ICDE (Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement) – ces indicateurs mesurent les progrès de la Stratégie fédérale de développement durable, ils rapportent aux Canadiens l'état de l'environnement, et décrivent le rendement du Canada à l'égard d'enjeux clés en matière de durabilité de l'environnement (Environnement Canada, 2015). Ces indicateurs sont regroupés en trois groupes : Air et climat, eau et nature. Dans le groupe « nature » il y a plusieurs indicateurs concernant la biodiversité (espèces), la santé des écosystèmes et les aires protégées. Un des indicateurs de ce groupe qui pourrait être suivi par la télédétection est l'étendue des milieux humides au Canada.

Étendue des milieux humides - L'indicateur est la mesure de l'étendue des milieux humides au Canada et peut servir de base pour suivre les changements au fil du temps. En l'absence d'un système national de suivi des milieux humides, les données issues de multiples sources ont été combinées (Environnement Canada, 2015). Selon les ensembles de données, diverses méthodes ont été utilisées pour identifier les milieux humides, bien que la plupart reposent sur des données de télédétection. Les milieux humides sont cartographiés en tant que données vectorielles, qui sont intégrées dans une base de données géospatiales à l'échelle nationale. Les cartes produites représentent la proportion des terres humides dans une grille de 25 km sur 25 km vers l'année 2000. Ces proportions ont été cartographiées en tant que classes de densité en utilisant des seuils préalablement définis.

D4. Indicateurs d'aménagement durable des forêts (MFFP) – Projet INDI

Le MFFP a mis en place un projet de suivi des indicateurs de l'aménagement durable des forêts : le projet INDI. À ce jour, près d'une vingtaine d'indicateurs ont été développés¹. Parmi ces indicateurs quelques-uns pourraient être arrimés facilement avec ceux sélectionnés pour le suivi BdQc et être évalués à l'aide de la télédétection :

État de la diversité des écosystèmes forestiers :

- Les superficies des types de forêts
- L'organisation spatiale des écosystèmes
- La représentativité des aires protégées

Évolution et l'état de la productivité des écosystèmes forestiers

- Le boisement et le déboisement
- **Superficies affectées par les feux de forêt**
Les perturbations naturelles peuvent modifier temporairement ou à long terme l'état des écosystèmes. Par conséquent, le suivi continu des superficies touchées par les perturbations permet de documenter, en partie, l'évolution de l'état des écosystèmes. Ce suivi est très important, surtout dans un contexte où des changements climatiques sont anticipés. Par leur effet sur la composition et la répartition des peuplements forestiers, les feux jouent un rôle déterminant dans la dynamique des écosystèmes. Un indicateur a été développé par le MFFP pour évaluer l'état des forêts en mesurant, notamment, l'ampleur et les impacts des feux qui affectent le territoire du Québec. Plus particulièrement, cet indicateur est un portrait annuel du nombre de feux répertoriés et de la superficie de forêt affectée dans la zone de protection intensive au cours de la période 1973-2004 (32 ans).
- Les superficies touchées par les insectes et les maladies
- Les superficies affectées par la récolte
- **La régénération de la forêt**

Pour compléter le portrait de l'état de la forêt, il est essentiel d'évaluer le degré de récupération des écosystèmes après une perturbation (soit naturelle ou anthropique), c'est-à-dire leur résilience. La présence et les caractéristiques de la régénération forestière, témoignent de cette résilience et pourrait être suivi par la télédétection.

¹ <https://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/amenagement/amenagement-criteres.jsp>

4. PRODUITS SATELLITAIRES RECOMMANDÉS POUR LE SUIVI DES INDICATEURS

Les images issues des capteurs satellitaires permettent non seulement l'étude de la distribution globale de type de végétation mais également ses propriétés biophysiques et structurales ainsi que ses variations spatiales et temporelles. Dans les paragraphes suivants, une brève description de chacun des indicateurs sélectionnés par les groupes d'experts comme appropriés pour le suivi de la biodiversité issus de télédétection est présentée. Cette description est également accompagnée par un tableau donnant les produits, les suivis ou les indicateurs existants inventoriés (Annexe III) qui pourrait être utiles pour le suivi de l'indicateur en question. Les avantages et désavantages des éléments inclus dans ces tableaux sont discutés et une recommandation est proposée (surligné en vert dans le tableau).

4.1. 1. PHENOLOGIE DE LA VEGETATION– 1. LONGUEUR DE LA PERIODE DE CROISSANCE DE LA VEGETATION / 2. INDICE DE VEGETATION EN DIFFERENCE NORMALISÉE (NDVI)

La phénologie représente la dynamique saisonnière de la végétation. La température et les précipitations (la disponibilité de l'eau) sont des facteurs principaux qui contrôlent la saisonnalité du développement de la végétation. Plusieurs études ont associé le changement de longueur de la saison de croissance avec des changements climatiques et écologiques. Ainsi, la phénologie de la végétation est un indicateur efficace pour le suivi de la dynamique des écosystèmes en réponse aux changements climatiques.

Pour le suivi de la phénologie à l'aide de la télédétection, un certain nombre d'images acquises au cours d'une saison végétative sera nécessaire afin de détecter les éléments principaux dans le développement de la végétation. Les images Landsat proposent une résolution spatiale de 30 m. Cependant, comme chaque zone est échantillonnée aux 16 jours, il est possible qu'aucune image sans nuages ne soit disponible pour une zone au cours d'une période donnée. Ainsi, les images à plus haute fréquence temporelle devrait être privilégiées afin de capturer les moments principaux du développement saisonnier de la végétation. MODIS propose un compromis entre la résolution spatiale (250 m) et temporelle pour le suivi de la phénologie d'une région donnée. Avec la fréquence temporelle d'une journée, ces images offrent plus de chance d'acquérir un nombre suffisant d'images sans nuages afin de caractériser la phénologie. Il y a deux choix concernant l'imagerie MODIS – les images brutes ou les produits issus des images MODIS. L'avantage des produits par rapport aux images brutes est qu'ils ont subi un certain prétraitement basé sur des algorithmes déjà approuvés pour leur efficacité. Par exemple, le produit MODIS le plus pertinent pour le suivi de la phénologie sera « MODIS VI » (série MOD13) qui contient les indices de végétation NDVI et EVI [User Guide MODIS VI].

Dans le cas des images brutes, après le prétraitement (correction atmosphérique, radiométrique, géométrique, etc.), les données satellitaires sont transformées en indice de végétation en

différence normalisée (NDVI). Les séries temporelles de NDVI permettent d'estimer neuf (9) paramètres (indicateurs) annuels de la phénologie :

1. Amplitude de l'activité photosynthétique par rapport à une référence (scaled NDVI);
2. Longueur de la saison de croissance (jours);
3. Niveau de l'activité photosynthétique à la fin de la saison de croissance (NDVI);
4. Fin de la saison de croissance (jour de l'année);
5. Niveau maximal de l'activité photosynthétique (max NDVI);
6. Moment du maximum de l'activité photosynthétique (jour de l'année);
7. Niveau de l'activité photosynthétique au début de la saison de croissance (NDVI);
8. Moment du début de la saison de croissance (jour de l'année);
9. Activité photosynthétique durant toute la saison de croissance (*time-integrated* NDVI).

Ces paramètres sont un outil efficace pour détecter les tendances dans le cycle saisonnier des végétaux. Cependant, un certain degré d'incertitude et de variabilité entre les données issues de différents capteurs tels que AVHRR, MODIS, Landsat et Quickbird est souvent rapporté (Théau *et al.*, 2010; Abuzar *et al.*, 2014, Hirano et Batbileg, 2014). Il sera important de valider les paramètres estimés à partir des images satellites avec des données in situ pour différents milieux (p.ex. forêt, tundra, etc.).

4.2. 12. CARACTERISATION DES HABITATS - PROPORTION ET TAILLE DES ECOSYSTEMES DANS LE PAYSAGE

Pour estimer la proportion et la taille des écosystèmes et leur modification avec le temps, les images ou la mosaïque Landsat (30 m) est un bon choix. Cependant, malgré l'avantage d'avoir une longue série de données (depuis 1985), les images Landsat ne permettent pas de caractériser en détails la morphologie des écosystèmes, ainsi que de détecter et d'estimer correctement la taille de certains écosystèmes (p. ex. les tourbières minérotrophes qui comblent les dépressions très étroites dans la région du réservoir hydroélectrique Laforge-1). Les images optiques MSI de Sentinel-2 (nouveau satellite de l'ESA lancé en 2015) offrent des possibilités similaires à celles des images/mosaïque Landsat, et peuvent être utilisées en complément des images Landsat-8 mais avec une meilleure résolution temporelle (10 jours).

Pour la caractérisation générale des milieux et, plus particulièrement, pour être capable de déterminer la morphologie, la taille et la typologie des milieux, des images à une résolution plus élevée devraient être privilégiées. Comme le montre la Figure 1B, les détails comme la morphologie pourraient être mieux détectés avec des images à une résolution spatiale supérieure à celle de Landsat. Ainsi, parmi les éléments inventoriés dans le tableau associé à cet indicateur (12), la couverture satellitaire du Québec avec les images à très haute résolution RapidEye (5 – 6,5

m) (images acquises en 2010-2013, MRNF) offre une bonne solution pour une caractérisation en détails des différents écosystèmes pour circa 2010. De plus, la classification de ces images est en train d'être réalisée. Par contre, pour l'instant, on ignore si une autre série d'acquisition de ces images est envisagée dans le futur. Cependant, vu l'utilité de ces images pour plusieurs des agences provinciales, il est fort possible, que, dans le futur, il y ait une acquisition périodique de ces images.

4.3. 13. CARACTERISATION PHYSIQUE DES PLANS D'EAU – 1. TAILLE ET CARACTERISTIQUES DES MARES ET DES RIVIERES/ 2. APPARITION OU DISPARITION DES MARES OU THERMOKASTS

Pour la caractérisation de la structure physique des habitats aquatiques, des images à très haute résolution seront nécessaires. Comme il a été discuté pour l'indicateur **I2**, la couverture satellitaire du Québec avec les images à très haute résolution (5 - 6.5m) RapidEye (images acquises de 2010-2013, MRNF) offre une bonne solution pour une caractérisation en détail des plans d'eau (rivières et lacs, circa 2010). Cependant, avec la résolution spatiale de 5 m qui caractérise les images RapidEye, la détection de l'apparition ou la disparition des petites mares (< 25m²) n'est pas si évidente. De plus, dépendamment des pressions exercées sur les plans d'eau, les exigences pour la fréquence temporelle pourraient être différentes. Par exemple, les plans d'eau dans les milieux peu perturbés par l'Homme, dont la principale pression est les changements climatiques vont normalement subir des modifications plus graduelles et un suivi aux 10 ans serait suffisant. Par contre, les plans d'eau situés dans les milieux anthropiques risquent d'être plus touchés et la fréquence de suivi devrait être plus élevée. Les lacs thermokasts également sont très sensibles et devraient être suivi avec une fréquence plus élevée (ex. 5 ans). Compte tenu que la future fréquence de l'acquisition des images RapidEye par le gouvernement du Québec est inconnue, des commandes d'images à très haute résolution (RapidEye, Quickbird, WorldView) devraient être envisagées pour les zones à haute densité de mares de thermokasts.

À l'aide de la télédétection, les éléments suivants caractérisant les plans d'eau pourraient aussi être évalués :

Taille – la taille surfacique influence les habitats aquatiques sur le plan énergétique et physicochimique en régulant la quantité de lumière qui entre dans le lac, l'évaporation surfacique, l'effet du vent (fetch) et les échanges gazeux entre la surface de l'eau et l'atmosphère (Wetzel, 2001). En général, pour les lacs et les plans d'eau calmes (ex. réservoirs) on estime la superficie, alors que les rivières sont caractérisées par leur largeur relative, de par leur nature plus ouverte (Brassard *et al.*, 2009).

Forme – en limnologie, la forme (et plus particulièrement la sinuosité) des lacs est considérée comme un bon indicateur du potentiel d'habitats pour la faune (Brassard *et al.*, 2009).

Connectivité – la connectivité des plans d'eau au reste du réseau hydrographique, a un impact sur leurs fonctions motrices qui, de leur côté, ont un lien avec certaines caractéristiques physicochimiques des lacs.

Milieu physique environnant – le milieu physique a une influence sur certains aspects des fonctions motrices et sur la physicochimie de l'eau des habitats aquatiques.

Afin de mieux préciser les outils les plus appropriés pour ces éléments, nous aurions besoin de savoir lesquels le Ministère veut caractériser et le niveau de détails (ex. superficie minimale des lacs à mesurer).

4.4. I4. PRESENCE DE PERTURBATIONS NATURELLES – 1. INTENSITE ET SUPERFICIE DES FEUX DE FORETS / 2. DISTRIBUTION DES INSECTES RAVAGEURS ET MALADIES DES ARBRES

Les perturbations naturelles, notamment le feu, l'épidémie d'insectes, les maladies, chablis ou verglas, sont des phénomènes isolés, parfois cycliques, qui jouent un rôle majeur dans la dynamique naturelle des écosystèmes. Elles modifient constamment le paysage (la structure et la composition) d'un écosystème. L'envergure, la fréquence, la gravité, le cycle saisonnier et la durée de la perturbation déterminent les répercussions sur la biodiversité (Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010).

Le régime de feu affecte la biodiversité à travers deux processus principaux. Tout d'abord, l'historique d'incendie spécifique d'un site individuel influe sur les espèces qui sont capables de persister sur ce site, la disponibilité de la lumière et des éléments nutritifs, la qualité du substrat. Deuxièmement, la variabilité du régime des feux dans le paysage donne lieu à l'hétérogénéité environnementale à travers le paysage - favorisant différents assemblages d'espèces². Ainsi, les perturbations naturelles comme le feu ne sont pas un désastre pour les communautés fauniques et végétales (Drapeau *et al.*, 2010). Au contraire, il entraîne plutôt une réorganisation des communautés avec plusieurs espèces qui sont nettement favorisées par les nouvelles conditions d'habitat.

Feux de forêt

La forêt boréale est régulièrement touchée par le feu. Des espèces, des communautés et des écosystèmes entiers se sont adaptés à son passage plus ou moins fréquent³. Le feu est une partie intégrante de son cycle de vie et constitue une force de premier ordre pour le maintien du cycle normal de reproduction et de croissance de ces écosystèmes. Il contribue au renouvellement de la forêt (MFFP).

² <http://ibis.geog.ubc.ca/biodiversity/FireandBiodiversityinBritishColumbia.html>

³ <http://www.mffp.gouv.qc.ca/forets/fimaq/feu/fimaq-feu.jsp>

Les données disponibles montrent une grande variabilité du nombre de feux et un grand écart entre la dimension des superficies incendiées d'une année à l'autre⁴. De plus, la superficie affectée et le nombre de feux répertoriés chaque année sont très faiblement corrélés. Cette grande variabilité pourrait être le résultat des conditions météorologiques et de l'état des combustibles au moment du déclenchement de chaque feu. Toutefois, la modification du régime des feux (la fréquence, la sévérité, l'étendue, le début de la saison des feux, la période la plus active de la saison, ou le patron spatial) peuvent entraîner des changements importants au sein des écosystèmes.

Pour le suivi de perturbations naturelles, la télédétection s'avère un outil très efficace car elle permet de détecter des feux dans des régions éloignées et inhabitées, là où la surveillance conventionnelle des incendies est moins intensive⁵. Les images satellites MODIS, AVHRR et Landsat se prêtent bien au suivi des feux de forêt⁶. En l'absence de couverture nuageuse, les images MODIS et AVHRR permettent de surveiller d'immenses territoires et, grâce à leurs bandes infrarouges thermiques (4 µm et 11 µm), d'y détecter les feux en activité (i.e. les points chauds). De plus, leur haute fréquence de revisite permet de suivre l'évolution des feux en temps quasi-réel ainsi que d'estimer rapidement les superficies affectées par le feu. Pour cartographier avec une plus grande précision l'étendue des zones brûlées une fois le feu éteint, des images Landsat sont utilisées.

Cependant, il faut noter que les perturbations naturelles au Canada et au Québec (surtout dans la zone de forêt exploitable) sont suivies très rigoureusement depuis des décennies (voir les lignes surlignées dans l'inventaire, section C, correspondant à cet indicateur).

Le Système canadien d'information sur les feux de végétation (SCIFV) est un système d'information de gestion des incendies de forêt qui fait le suivi des conditions de risques d'incendie dans l'ensemble du pays. Les conditions météorologiques journalières sont recueillies à l'échelle du pays et utilisées afin de produire des cartes de forêt météo et de comportement du feu. On fait aussi appel à des satellites afin de détecter des incendies en temps quasi réel (Points chauds **Fire M3**).

Le Système de surveillance, de cartographie et de modélisation des feux de forêt (**Fire M3**) fournit une vue d'ensemble complète de l'activité des feux de forêt en temps quasi réel. Les feux actifs sont suivis à l'aide des images satellitaires (AVHRR, MODIS et VIIRS), dans le but de déterminer quotidiennement la localisation d'un incendie, d'estimer quotidiennement et annuellement les superficies brûlées, le comportement du feu ainsi que sa sévérité⁷.

La Base nationale de données sur les feux de forêt du Canada (**BNDFFC**) réunit les données sur les feux de forêt compilées par diverses sources, y compris les données sur la position (données

⁴ <https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/enligne/forets/criteres-indicateurs/2/213/impression.asp>

⁵ <http://scifv.scf.rncan.gc.ca/renseignements/faq/fm3>

⁶ <https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/enligne/forets/criteres-indicateurs/2/213/precisions.asp>

⁷ <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/renseignements/sommaire/fm3>

ponctuelles) et les périmètres (données polygonales) des feux telles que fournies par les agences canadiennes de gestion des feux (des provinces, des territoires et de Parcs Canada). Elle inclut les feux de toute taille. Également, des cartes de position des feux de forêt ainsi que des périmètres, pour la période de 1980 à 2014, sont disponibles. Cependant, ces cartes n'illustrent que des feux dont la taille finale est supérieure à 200 hectares — ces derniers ne constituent qu'un faible pourcentage du total des feux mais sont à l'origine de la majeure partie de la superficie brûlée (habituellement plus de 97 %) ⁸.

Le SCIFV fournit également des statistiques de l'activité des feux de forêt concernant :

- le nombre d'incendies par province
- la superficie incendiée par province
- la fréquence hebdomadaire des incendies
- la superficie incendiée - variation hebdomadaire
- la fréquence saisonnière des incendies
- la superficie incendiée - variation saisonnière
- les principaux feux par nombre et superficie

Au Québec, la Direction de l'environnement et de la protection des forêts (DEPF) du MFFP répertorie les feux de forêt en collaboration avec la Société de protection des forêts contre le feu (**SOPFEU**). L'information recueillie provient du public ainsi que de relevés aériens et de l'imagerie satellitaire.

Les données sont emmagasinées dans le système d'information sur les feux, les insectes et les maladies des arbres du Québec (**FIMAQ**), qui fait office de dépôt officiel de l'information sur les agents perturbateurs naturels présents dans les forêts québécoises ⁹.

Les données disponibles sur les feux de forêt et qui pourraient être exploitées pour les buts du suivi BdQc, correspondent aux :

1. points d'origine des feux (position)
2. contours des feux pour lesquels la superficie est supérieure ou égale à une valeur minimale variant de 2ha à 14ha (selon les années)
3. année du feu
4. cause d'allumage du feu (humaine ou foudre)
5. date à laquelle le feu a débuté (parfois une estimation), date à laquelle le feu a été rapporté et date à laquelle il a été déclaré éteint.
6. mois auquel le feu a débuté (parfois une estimation), a été rapporté et a été déclaré éteint.

⁸ <http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/ah/nfdb>

⁹ <https://www.mffp.gouv.qc.ca/publications/enligne/forets/criteres-indicateurs/2/213/precisions.asp>

7. superficie officielle (hectare)
8. superficie non-officielle calculée à partir d'une source d'information complémentaire (ex. télédétection) (hectare)
9. source de la dernière mise à jour de la délimitation cartographique (pour les contours de feux seulement) selon que cette délimitation provient d'un organisme de protection (ex. SOPFEU), d'un relevé aérien ou de la télédétection.

Ces données couvrent la période de 1972 à aujourd'hui. Chaque année depuis 1998, un rapport est émis concernant les perturbations naturelles (les insectes, maladies et feux) dans la forêt québécoise. L'information hebdomadaire et la cartographie cumulative sur la situation des feux au Québec est aussi disponible.

Les données disponibles permettent de dresser un portrait de la situation des feux qui affectent chaque année les forêts québécoises. Dans ce cadre, un indicateur a été développé par le MFFP (**projet INDI**), mesurant l'ampleur et les impacts des feux qui affectent le territoire du Québec. Plus particulièrement, cet indicateur est un portrait annuel du nombre de feux répertoriés et de la superficie de forêt affectée dans la zone de protection intensive (i.e. au sud du 52^e parallèle) au cours de la période 1973-2004 (32 ans).

Il faut noter que les données sur les feux ne sont pas disponibles pour l'ensemble du territoire québécois. Les données sont plus complètes pour les zones situées au sud de la limite de protection intensive (i.e. forêt boréale au sud du 52^e parallèle). Les feux ayant eu lieu au nord de cette limite n'ont pas tous été répertoriés. Les statistiques de la SOPFEU pour la zone nordique ne sont disponibles sur une base mensuelle et par origine que depuis l'année 2014.

Les insectes et les maladies font également partie intégrante de l'écologie des forêts québécoises. Certains de ces organismes, considérés souvent comme nuisibles, peuvent causer de sérieux retards de croissance aux arbres, voire une mortalité importante. Chaque année, depuis 1967, la DEPF du MFFP procède par voie aérienne à un relevé des dommages causés par les principaux insectes et maladies qui s'attaquent aux arbres. Les données des relevés aériens effectués de 1967 à 2013 sont regroupées en trois périodes (1967-1991, 1992-2006 et 2007-2013). À partir de 2014, les données sont présentées par année. Les relevés aériens permettent d'évaluer l'intensité et l'étendue des dégâts associés non seulement aux insectes et aux maladies, mais aussi à d'autres perturbations naturelles (feux de forêt, chablis, verglas, etc.).

Ainsi, compte tenu de la richesse de données disponibles, ces informations pourraient être mises à profit pour le suivi BdQc.

Pour la partie nord du Québec (au nord du 52^e parallèle), la cartographie de la végétation, qui est en cours de réalisation par le MFFP et le MDDELCC, fournira également l'information sur les perturbations (superficie et l'âge). Cependant cette information représentera l'état en 2010-2013 selon la date d'acquisition des images.

4.5. 15. CARACTERISATION DES ECOSYSTEMES FORESTIERS ET DES ECOTONES – 1. REPARTITION DES ESPECES ARBORESCENTES / 2. STRUCTURE D'AGE DES PEUPEMENTS FORESTIERES /3. REBOISEMENT ET DEPLACEMENT DE LA LIGNE DES ARBRES / 4. PERTE D'HABITAT OUVERT VERSUS FORESTIER

Les conditions d'habitat (structure verticale et horizontale de la végétation, âge, volume et densité des arbres, type de peuplement, etc.) ainsi que leurs variations spatio-temporelles sont les principaux facteurs écologiques responsables de la distribution des communautés animales et des populations d'espèces dans les écosystèmes forestiers¹⁰.

Pour caractériser ainsi que pour suivre le développement des écosystèmes forestiers à l'aide de la télédétection, dépendamment du niveau de détails et des attributs recherchés, différentes images satellitaires pourraient être utilisées. Pour suivre le déplacement de la ligne des arbres ainsi que la perte d'habitat ouvert versus forestier, des capteurs à très haute résolution spatiale sont préférables (RapidEye). Le LiDAR est un outil efficace qui permet de mesurer la structure verticale et horizontale des couverts forestiers. Un projet d'acquisition provinciale de données LiDAR aérien est en cours d'être réalisé par le MFFP en collaboration avec d'autres ministères et l'industrie forestière. Toutefois, ni les images à très haute résolution, ni les données LiDAR ne peuvent offrir de longues séries temporelles permettant de suivre l'évolution. Ainsi, les images Landsat offrent toujours le meilleur compromis entre la résolution spatiale et la couverture spatiale et temporelle (Banskota et al, 2014).

Cependant, il faut noter que parmi les produits inventoriés, pour la partie méridionale du Québec, la meilleure source d'information concernant les écosystèmes forestiers reste l'inventaire forestier réalisé par le MFFP (cartographie écoforestière). Ces couches d'information contiennent des détails concernant les peuplements forestiers (type de couvert forestier, groupements d'essences, origine, densité et hauteur des peuplements, perturbations, classes d'âge, classes de pente, dépôts de surface, classes de drainage et types écologiques). Les inventaires forestiers couvrent une période de 50 ans, ce qui est particulièrement pratique pour suivre l'évolution des écosystèmes forestiers. Malgré le fait que l'inventaire complet de la zone forestière du Québec méridional prend environ 10 ans, les couches d'information sont mises à jour deux fois par année et reflètent les modifications dues aux perturbations naturelles et anthropiques. Ce sont les images satellites qui sont utilisées pour délimiter et cartographier les secteurs touchés par les chablis, les épidémies d'insectes et les feux de forêt. Trois types d'images satellite, notamment Landsat, RapidEye et Quickbird sont utilisés de façon opérationnelle dans le processus d'inventaire forestier.

Pour la partie nord du Québec (au nord de 53e parallèle, 700 000 km²), la cartographie récente de la végétation et des dépôts de surface, réalisée par le MFFP et le MDDELCC, est un produit intéressant, qui reflète l'état des écosystèmes terrestres, autant forestiers que non forestiers vers les années 2010 -2013. Chaque polygone de cette carte est caractérisé par 8 attributs : type du couvert, essence dominante, végétation dominante du sous-bois, classe de densité, classe de

¹⁰ <http://bio.uqam.ca/personnel/pierre-drapeau.html>

hauteur, perturbation d'origine (si plus de 75 % de la surface terrière d'un peuplement a disparu), stade de développement (pour les peuplements passés au feu), dépôt de surface.

Ainsi, une approche combinée, qui utiliserait les séries temporelles des images Landsat et les informations issues des inventaires forestiers mentionnées ci-dessus, pourrait être envisagée pour la caractérisation des écosystèmes forestiers.

4.6. 16. PRODUCTIVITE DES ESPECES ARBORESCENTES ET ARBUSTIVES (CROISSANCE) -1 FORME DE CROISSANCE / 2. ÉVOLUTION DU COUVERT VEGETAL DE LA TOUNDRA – POURCENTAGE DE COUVERTURE VEGETALE – LANDSAT.

La réponse des écosystèmes nordiques face au réchauffement est rapide et importante et peut être observée par des changements marqués dans l'étendue, la composition et la distribution de la végétation (Provencher-Nolet L., 2014, McManus *et al.*, 2012, Ropars et Boudreau, 2012). Plusieurs études ont signalé le phénomène de verdissement (changement de NDVI) pan-Arctique (Myneni *et al.*, 1997; Olthof *et al.*, 2008; Fraser *et al.*, 2011; Beck et Goetz, 2012). Des études rapportent que ces changements sont principalement attribuables à l'expansion et à la densification de la toundra arbustive (McManus *et al.*, 2012). Une étude toute récente, réalisée avec des séries d'images Landsat 5 et Landsat 7, couvrant l'Alaska et le Canada sur une période de 32 ans (de 1984 à 2012), a démontré que le changement dans la végétation durant ces décennies est plus prononcé au Nord du Québec (Junchang et Masek, 2016).

Aussi, pour être capable de suivre la dynamique du couvert végétal sur une grande étendue, de la même manière que pour la forêt, la préférence sera accordée aux séries des images (ou mosaïques) Landsat. La cartographie récente de la végétation des régions nordiques, réalisée par le MFFP et le MDDELCC, pourrait aussi être utilisée comme base de référence pour le type du couvert, l'essence dominante, la végétation dominante du sous-bois, le stade de développement, etc.

4.7. 17. CARACTERISATION DE LA NEIGE ET DU COUVERT DE GLACE – 1. ÉPAISSEUR ET CARACTERISTIQUES DE LA NEIGE OU DE LA GLACE / 2. PERIODE DE FONTE

La couverture de la neige peut être un facteur de contrôle dominant de la biodiversité dans les climats froids. L'épaisseur et la dynamique du couvert de la neige peuvent avoir un impact direct sur la phénologie des plantes et des animaux, sur le bilan hydrique, ainsi que sur la qualité des habitats et leur productivité (Wulder *et al.* 2012).

Au Canada et au Québec, le couvert nival s'établit et disparaît à l'intérieur d'une période de six mois. Les caractéristiques uniques de la neige, notamment sa réflectance plus élevée et sa température plus froide, sont exploitées par les algorithmes de détection à l'aide de la télédétection (Muñoz *et al.*, 2013; Roberge, 2013). Le couvert nival peut être détecté et suivi avec

une variété de capteurs satellitaires. Les capteurs optiques (AVHRR, MODIS, Landsat, SPOT VEGETATION, etc.) sont efficaces pour suivre l'étendue du couvert nival au sol, cependant ils ne permettent pas d'estimer d'autres caractéristiques de la neige comme l'épaisseur, la densité ou l'équivalent en eau. Pour l'estimation de l'équivalent en eau et de l'épaisseur de la neige, des capteurs micro-onde passives (SSM/I, AMSR-E, AMSR-2) et actives (ERS, RADARSAT, QuickSCAT, etc.) sont utilisés (Bernier et al, 1999; Goïta et al., 2003; Pulliainen, (2006), Royer et al., 2010, De Sève et al., 2012). Les capteurs micro-ondes (passives et actives) ont la capacité de pénétrer les nuages et de fonctionner autant de jour que de nuit. Toutefois, les capteurs micro-ondes passives sont limités par leur résolution grossière, variant entre 12 km et 25 km (Roberge, 2013). Ainsi, une combinaison des capteurs optiques et micro-ondes peut être utilisée afin d'allier la plus haute résolution spatiale du capteur optique à la capacité de pénétrer les nuages du capteur de micro-ondes passives (Kongoli *et al.*, 2007; Chokmani *et al.*, 2013; Roberge, 2013). Une autre alternative est les radars à synthèse d'ouverture (p. ex. RADARSAT, TerraSAR-X, et Sentinelle-1A et 1B). Ils existent depuis le début des années quatre-vingt-dix. Ils offrent une résolution plus fine (25m, 10m, 3m), mais une résolution temporelle de 5-6 jours, ce qui limite leur utilisation pour le suivi BdQc dans les périodes de transition (automne et printemps) Néanmoins, le lancement d'un second SAR, jumeau à Sentinelle-1, par l'Agence spatiale européenne et la future mission canadienne Constellation (trois satellites SAR en 2018), va de beaucoup améliorer la répétitivité des acquisitions au-dessus d'un site donné.

Pour le suivi BdQc, compte tenu de la nature éphémère de la neige et de la glace, les images qui offrent une haute fréquence de revisite et qui couvrent une grande étendue terrestre et disposent de longues séries de données, telles AVHRR et MODIS, sont préférables pour le suivi de la dynamique du couvert nival ainsi que la glace de milieu aquatique. Les images MODIS offrent une meilleure résolution (250 m), par contre les images AVHRR ont une plus longue série de données (≈45 ans).

Comme la variation spatio-temporelle du couvert nival a une haute importance dans les activités anthropiques, et en tant qu'une composante clé dans les études de changements climatiques, elle est suivie constamment. Il existe différents produits opérationnels pour suivre l'évolution du couvert de neige issus de données de télédétection. Parmi ces produits, les produits MODIS Snow-Cover offrent la meilleure résolution spatiale. Les produits MODIS sont des images composites, c.-à-d. des images produites par la fusion de plusieurs orbites pour une seule date d'acquisition ou par la fusion de plusieurs dates d'acquisition afin d'obtenir des images à ciel clair. De plus, les produits MODIS incorporent un ajustement pour le couvert végétal dense qui réduit les imprécisions dans la cartographie de la neige en présence de couvert forestier qui cache la neige sous la canopée (Nolin, 2010). Seul le produit MODIS offre de l'information sur la sous-fraction de neige (pourcentage de couverture de neige présente dans un pixel) (Roberge, 2013). Cette information est préférée à la classification binaire de pixel (neige/ pas de neige), car elle pourrait plus précisément tenir compte de la variabilité spatiale de la couverture neigeuse lorsque la couverture est inférieure à 100% (Nolin, 2010). Cependant, même si ces produits montrent une

haute précision pour la cartographie de la neige, il faut noter que, à ce jour, ils ne sont pas validés au Québec (Roberge, 2013).

La variabilité et les tendances dans la dynamique de couvert de glace des milieux aquatiques pourraient également être suivies à l'aide des images optiques ou micro-ondes passives ou actives. Cependant, les méthodes opérationnelles pour la détermination de l'étendue de la glace sont basées sur l'interprétation visuelle (p. ex. NOAA Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping (IMS), NOAA charts for the Great Lakes et Canadian Ice Service (CIS)) (Duguay *et al.*, 2014). Les trois produits mentionnés ci-dessus utilisent des images provenant de différents satellites (p. ex. AVHRR, GEOS, SSM/I). Cependant, la résolution spatiale de ces images est très grossière et s'applique uniquement pour les suivis de lacs très grands. Il existe peu d'algorithmes pour cartographier automatiquement la glace de plans d'eau. Un de ces algorithmes, notamment SNOWMAP, est à la base des produits MODIS Snow Cover qui fournit de l'information sur le couvert nival des surfaces terrestres ainsi que le couvert de glace des plans d'eau intérieurs, à une résolution spatiale de 500 m et une fréquence temporelle de 1 jour, 8 jours ou mensuelle (Duguay *et al.*, 2014). Quelques études (Brown et Duguay (2012); Kropachek *et al.*, 2013) ont démontré les capacités de ce produit à suivre la phénologie de glace des lacs. Latiphovic et Pouliot (2007) ont développé un algorithme pour extraire la phénologie de glace. Ils ont appliqué cet algorithme sur des images AVHRR (1.1 km spatial résolution) historiques (i.e. 1985 – 2004) et l'ont validé pour 36 lacs canadiens. À noter que, selon les auteurs, la méthode est applicable pour des données provenant d'autres satellites.

Toutefois, malgré la plus haute résolution spatiale et temporelle des images optiques, l'acquisition de ces images est souvent problématique à cause de la présence d'une couverture nuageuse (surtout durant la période de gel de lacs). Dans ces conditions, ainsi que dans les conditions de nuit polaire, les capteurs micro-ondes sont plus avantageux.

4.8. 18. PHYSICO-CHIMIE DES DES PLANS D'EAU – COULEUR DE L'EAU, CARBONE ORGANIQUE DISSOUS, ABONDANCE DE CHLOROPHYLLE

Dans les dernières décennies, la qualité d'eau est devenue un problème préoccupant face aux changements climatiques et aux pressions d'origine anthropique. La couleur des plans d'eau est un des indicateurs de qualité d'eau, car elle est principalement le résultat de la concentration de trois matières dans l'eau (IOCCG 2000).

- Chlorophylle - un pigment vert trouvé dans les cellules végétales et des cyanobactéries. Les cellules d'algues suspendues dans l'eau produisent une couleur jaune-vert; Leur apparence diffère selon les conditions environnementales et les espèces de cyanobactéries (Lavoie *et al.*, 2007; Vincent et Quesada, 2012).

- Carbone organique dissous (COD) – le carbone organique produit par le métabolisme des micro-organismes ou la décomposition de la végétation. Il apparaît en couleur jaune à brun ;
- Minéraux en suspension (MS) : matière particulaire inorganique.

L'eau pure est transparente et sans couleur et la lumière passe à travers. Cependant, la couleur de l'eau varie selon la concentration de ces trois composantes qui absorbent et réfléchissent la lumière différemment. La concentration de ces trois matières dans l'eau influence aussi la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau, ce qui est facteur important pour la croissance du phytoplancton et des plantes benthiques. La matière organique dissoute sert aussi comme source de nutriments et de protection de la radiation solaire pour les plantes et les animaux aquatiques. Le changement de la couleur d'eau pourrait donc être une indication d'un changement des concentrations des composantes mentionnées, ce qui pourrait induire des changements dans la composition des communautés aquatiques.

À l'aide de la télédétection, le changement de la couleur de l'eau pourrait être utilisé comme un proxy (indicateur) pour l'estimation des concentrations des différentes composantes. En général, il existe des algorithmes bien établis pour les milieux marins. Cependant, les plans d'eau douce sont des systèmes plus complexes du point de vue optique, car les facteurs qui affectent la distribution des composantes varient sur des échelles spatiales et temporelles plus courtes que dans l'océan, relativement plus homogène et où la chlorophylle-a est la seule composante optiquement active (IOCCG 2000).

Ainsi, parmi les capteurs satellitaires capables d'enregistrer les ondes caractéristiques reflétant les propriétés de l'eau, on peut dénombrer les capteurs optiques tels SeaWiFS, MERIS, MODIS, Landsat, IKONOS, Quickbird, etc. Parmi ces nombreux capteurs, MERIS possédait le meilleur rapport entre la résolution spatiale (300m) et temporelle (3 jours) pour suivre la qualité d'eau. Cependant, depuis avril 2012, la connexion avec le satellite ENVISAT qui portait le capteur MERIS a été interrompue et l'Agence spatiale européenne (ESA) a déclaré la fin de la mission.

Comme dans le cas de plusieurs autres indicateurs envisagés pour le suivi BdQc, l'utilisation des images MODIS serait plus avantageuse pour le suivi des variations saisonnières dans la concentration de la Chl-a ou du carbone en raison de sa fréquence temporelle plus élevée (1 journée). Il existe également des produits MODIS concernant la Chl-a et le carbone. Toutefois, les bandes du capteur MODIS destinées à l'étude des propriétés de l'eau (i.e. bandes 8 à 16), ainsi que les produits MODIS, sont à 1 km de résolution spatiale. Une telle résolution limite leur utilisation aux grands lacs et en haute mer (El-Alem *et al.*, 2014; Kallio, 2012). De plus, les capteurs avec une résolution plus élevée, tel Landsat, Quickbird, etc., sont principalement destinés pour des applications terrestres et leur résolution spectrale, radiométrique et temporelle ne sont pas optimales pour le suivi de la qualité de l'eau. Les études de qualité de plan d'eau douce sont souvent réalisées à l'aide de capteurs hyperspectraux aéroportés qui offrent une résolution

spectrale et spatiale adéquate, mais à une échelle locale (i.e. un lac ou petit groupe de lacs)¹¹. Les images satellitaires sont utilisées à l'échelle régionale pour l'évaluation de la qualité de l'eau, les tendances temporelles, ainsi que pour suivre les fleurs d'eau d'algues (Kallio, 2012).

Cependant, de nouveaux capteurs maintenant en orbite, Sentinel-2A MSI (2015) et Landsat-8 OLI (2015), ont des caractéristiques (radiométriques et spectrales) plus performantes pour les suivis de l'eau (Kutser *et al.*, 2005; Kallio, 2012). Cependant, les algorithmes concernant l'extraction d'information concernant la qualité de l'eau douce sont au stade de développement (El-Alem *et al* 2014). De plus, il faut tenir compte aussi de la résolution temporelle qui, en cas de suivi de processus comme p. ex. éclosion de fleurs d'eau d'algues, est importante.

Récemment, une approche adaptée aux lacs du Québec méridional a été développée à l'INRS. Cette approche permet d'estimer la concentration en Chl-a, via les 7 premières bandes du capteur MODIS désagrégées à 250 mètres de résolution spatiale, non-conçues initialement pour l'étude des propriétés de l'eau (El-Alem *et al*, 2014). Ces bandes spectrales sont également sensibles à la fois à l'activité bio-optique de la Chl-a et à la présence de la COD (Kutser *et al.* (2005a, 2005b) et de la MS. Par conséquent, l'exploitation de l'information spectrale issue de ces bandes désagrégées serait très utile pour discriminer la Chl-a des autres éléments optiquement actifs (El-Alem *et al*, 2014).

Suite à ces travaux, un autre projet de l'INRS financé par Les Fonds de recherche du Québec (FRQ) vise à créer un portrait complet des épisodes de fleur d'eau d'algues (i.e. de forte concentration de Chl-a) dans les lacs du Québec méridional avec une superficie supérieure à 3.5 km². L'étude sera réalisée à l'aide d'environ 1600 images MODIS désagrégées et va couvrir la période entre 2000-2016. Les résultats de ce projet pourraient être d'intérêt pour le suivi BdQc.

4.9. 19. SUPERFICIE DES ÉTANGS TEMPORAIRES

Même s'ils sont peu étudiés au Québec, les étangs temporaires sont les milieux humides les plus répandus et les plus menacés au nord-est de l'Amérique du Nord¹². Ils se retrouvent dans différents types d'écosystèmes : en milieu agricole, forestier ou boisé urbain.

Les étangs temporaires sont de petites étendues d'eau saisonnière, peu profonde (< 1 m), non reliée au réseau hydrographique (Blouin et Guérin, 2015). La plupart du temps, ils couvrent moins de 0.1 ha (< 1000 m²), ce qui correspond par exemple à environ un pixel de l'image Landsat (30 x 30 m = 900 m²). Ils sont rarement d'une superficie supérieure à 1 ha. Comme il s'agit de plans d'eau saisonniers, il n'y a habituellement de l'eau qu'au printemps lors de la fonte des neiges. Ils sont souvent asséchés l'été. Pour être considéré comme étang temporaire, il doit y avoir de l'eau au moins deux mois par année. En fonction des conditions climatiques, il peut arriver qu'il y ait de

¹¹ http://www.glerl.noaa.gov/res/HABs_and_Hypoxia/habTracker.html

¹² <http://www.agence->

[bsl.qc.ca/Services_multiresources/Publications/Etang_temporaire_ARMVFPBSL.pdf](http://www.agence-bsl.qc.ca/Services_multiresources/Publications/Etang_temporaire_ARMVFPBSL.pdf)

l'eau toute l'année, mais ce n'est pas une condition obligatoire. Une des caractéristiques principales, c'est que cette étendue d'eau n'est pas reliée au réseau hydrographique, donc à aucun cours d'eau permanent. Ils sont plus fréquents dans les stations recouvertes d'un dépôt de texture fine ou sur des dépôts très minces où les affleurements rocheux sont près de la surface.

En raison de la présence d'eau sur une période de temps variable (saisonnier ou semi permanent), la surface est recouverte par de la matière organique, d'épaisseur variable, plus ou moins décomposée. Ainsi, ces étangs sont caractérisés par une grande variété de plantes typiques des milieux humides, que ce soit des sphaignes, des mousses, des arbustes, des latifoliées, des fougères et des arbres. Les étangs temporaires sont des habitats de qualité pour la reproduction et le développement des plusieurs espèces d'amphibiens (crapauds, grenouilles, salamandres, etc.) et d'invertébrés (insectes, crustacés, mollusques, etc.) (Blouin et Guérin, 2015). Un grand nombre de ces espèces sont classées vulnérables ou en danger et la plupart des populations sont en régression dans le monde entier (FAO 2009). Les étangs sont d'une grande importance pour leur survie. Le facteur clé est l'absence de poissons, ce qui a pour effet de diminuer la prédation, favorisant ainsi l'éclosion des œufs et la maturation des larves vers l'âge adulte¹³ (Hanley, 2015).

L'évolution de la dynamique saisonnière des étangs temporaires serait donc un bon indicateur des changements climatiques ou d'autres perturbations, et ainsi, une alerte efficace pour évaluer l'état de la biodiversité.

Cependant, compte tenu de leur petite taille, des images à très haute résolution spatiale sont nécessaires (QuickBird, GeoEye, RapidEye, etc.). De plus, leur caractère temporaire exige une haute fréquence temporelle d'observation (au moins 2-3 fois durant le printemps et l'été). Ainsi, le suivi de cet indicateur s'avère assez dispendieux.

4.10. MI 1. INDICES CLIMATIQUES (PRIORITÉ A)

Les variables climatiques sont un des principaux facteurs pour la distribution des espèces. Ainsi, le suivi des changements climatiques est un moyen indirect de suivre la biodiversité. Les observations météorologiques sont l'application la plus développée de la télédétection (Vaughan et Cracknell, 2013). Ces applications sont opérationnelles depuis plusieurs années. Les observations systématiques et à long terme des principaux paramètres météorologiques, comme la température de l'air et les précipitations, permettent d'identifier les modifications des conditions climatiques. Cependant, les changements climatiques ne se manifestent pas uniquement par la modification des températures et des précipitations, il pourrait aussi se traduire par l'évolution d'autres indices climatiques. Dans la liste ci-dessous, sont dénombrés

¹³ http://www.agence-bsl.qc.ca/Services_multiresources/Publications/Etang_temporaire_ARMVFPBSL.pdf

quelques-uns de ces indices qui pourraient être extraits des données de télédétection et qui sont potentiellement d'intérêt pour le suivi BdQc.

- Température de la surface
- Début (jour) de la période de croissance
- Fin (jour) de la période de croissance
- Longueur de la période de croissance
- Jours avec couverture neigeuse
- Début (jour) d'enneigement
- Fin (jour) du couvert de neige
- L'équivalent en eau de la neige
- Début (jour) de gel des plans d'eau
- Dégel (jour) de plans d'eau
- Longueur de la période de gel des plans d'eau
- Changement du couvert végétal

L'arrimage de la plupart de ces indices avec les données/produits issus de la télédétection a été discuté dans les paragraphes précédents (i.e. images/produits MODIS, AVHRR, Landsat). Afin de détecter les tendances et d'éviter d'évaluer la variabilité interannuelle typique pour certains de ces indices, la résolution temporelle et l'existence de longues séries de données est de grande importance.

4.11. MI 2. UTILISATION DES TERRES (PRIORITÉ A)

L'utilisation des terres (UT) est un aspect de l'occupation du sol (i.e. couverture physique de la surface terrestre) qui réfère à la modification par l'homme de son environnement naturel au niveau du sol. En général, on distingue cinq types d'empreinte humaine qui illustrent les modes d'utilisation du territoire québécois :

- Opérations forestières
- Routes et chemins
- Territoire agricole

- Réservoirs hydroélectriques
- Zone urbaine

L'utilisation du territoire et son changement au fil de temps est suivi par différents organismes et pour différents besoins mais, dans plupart des cas, sur une échelle locale. Compte tenu que le Québec fait l'objet d'empreinte humaine sur 14 % de son territoire, principalement concentrée dans sa portion sud (Gouvernement du Québec (2010)), la plupart des études sur le changement de l'occupation du sol concernent la partie méridionale du Québec (p. ex. Jobin *et al.*, 2007; Comptes des terres au Québec méridional" de l'institut de la statistique du Québec (2015), etc.).

Les images/mosaïques Landsat offrent une résolution spatiale suffisante ainsi qu'une très bonne couverture temporelle et spatiale pour suivre les changements de l'utilisation du sol. Il existe également différents produits issus des données de la télédétection qui pourraient être utilisés pour suivre l'évolution de l'empreinte humaine sur la couverture du sol (Voir l'Annexe 3). Cependant, chacun de ces produits cartographiques a été préparé pour répondre à des besoins particuliers et les classes thématiques pourraient n'être pas adaptées pour le suivi BdQc. Différents couches d'informations (forestière, agricole, développement résidentiel ou industriel) pourraient être assemblées afin de suivre les modifications de l'utilisation du territoire. Certaines de ces informations proviennent de l'imagerie satellitaire (p.ex. l'inventaire annuel des cultures au Canada, Agriculture Canada ¹⁴). L'avantage de cette approche est que ces couches d'informations sont actualisées sur une base annuelle. Un tel produit a été réalisé par le MDDELCC à partir d'un ensemble de données géographiques disponibles selon différentes ententes, notamment celle établie dans le cadre de l'entente ACRIGéo (Bissonnette et Lavoie, 2015). Puisque les données disponibles pour le nord et le sud de la province diffèrent, deux différentes stratégies ont été mises en place. Pour le sud du Québec, soit au sud du 52ème parallèle, la couche des peuplements forestiers sert d'assise au processus de classification parce qu'elle couvre pratiquement l'ensemble du Québec méridional. Tandis que pour le nord du Québec, la couche de base est la cartographie terrestre du Québec 2010, produite par Ressources naturelles Canada (RNCAN) et le MDDELCC à partir des images satellitaires Landsat classifiées, qui couvre pratiquement l'ensemble du Québec.

Ce dernier produit propose trois regroupements des classes d'occupation du sol afin de mieux s'adapter aux différents besoins du MDDELCC. Il y a d'abord un regroupement en huit grandes catégories permettent de décrire la vocation générale du territoire.

Ces grandes catégories sont :

- Milieux agricoles

¹⁴

http://www.agr.gc.ca/atlas/supportdocument_documentdesupport/aafcCropTypeMapping/fr/Inventaire_annuel_des_cultures_d_AAC_Specifications_de_contenu_informationnel_produites_conformement_a_la_norme_ISO_19131.pdf

- Milieux forestiers et arbustives
- Milieux humides
- Milieux aquatiques
- Milieux anthropiques
- Coupes et régénérations
- Sols nus et landes
- Non classifié

Deux autres schémas de classifications sont également offerts aux utilisateurs. Une première classification met l'accent sur les milieux humides et forestiers et comporte plus de 27 classes. Cette 1^{ère} classification s'applique à l'ensemble du territoire du Québec. Une seconde classification s'applique davantage au territoire agricole du Québec et se limite à 20 classes.

Un autre projet similaire, notamment les "Comptes des terres au Québec méridional" de l'Institut de la statistique du Québec propose aussi une classification d'occupation/utilisation du territoire à l'aide de données existantes¹⁵. Les comptes des terres estiment la superficie des terres par type de couverture terrestre (p. ex., surfaces artificielles, terres agricoles, milieux humides, forêts) et la superficie où se produisent les changements de couverture terrestre au cours d'une période de référence. Les comptes des terres du Québec méridional sont fondés sur un système d'information géographique (SIG) à partir des données des 3^e et 4^e inventaires écoforestiers (Institut de la statistique du Québec, 2015). Par conséquent, les limites géographiques du territoire d'étude sont définies au nord par la couverture géographique du 4^e inventaire écoforestier, dont la limite correspond approximativement au 51^e parallèle.

Au niveau fédéral, en vertu du Protocole de Kyoto, le Canada est tenu depuis 1990 de surveiller les changements qui découlent des activités forestières ainsi que des événements liés aux changements d'affectation des terres afin de comptabiliser les stocks de carbone¹⁶. Ce suivi repose également sur un ensemble des données multi-sources¹⁷:

- Inventaire forestier national du Canada;
- Base de données nationale sur les forêts, tenue à jour par le Conseil canadien des ministres des forêts;
- Recensement agricole, compilé par Statistique Canada

¹⁵ UHDE et KEITH, Institut de la statistique du Québec, le rapport sera diffusé en 2016.
<http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/profils/bulletins/2015/17-Centre-du-Quebec.pdf>

¹⁶ <https://ec.gc.ca/ges-ghg/default.asp?lang=Fr&n=3E38F6D3-1>

¹⁷ http://publications.gc.ca/collections/collection_2014/ec/En40-238-6-1-fra.pdf

- Base de données sur les forêts de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)

Des cartes d'utilisation des terres pour 1990, 2000 et 2010 ont été élaborées en réponse à un besoin de données explicites, très précises et à haute résolution sur l'utilisation des terres, afin de répondre aux engagements d'AAC en matière de rapports internationaux, notamment pour le Rapport d'inventaire national (RIN) présenté à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), le programme agro-environnemental de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et le système FAOSTAT de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO)¹⁸. Ces cartes couvrent toutes les régions du Canada au sud du 60° N, à une résolution spatiale de 30 mètres. Les classes UT suivent le protocole du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et comprennent : forêts, eaux, terres cultivées, prairies, lieux habités et autres terres.

Depuis 2009, le gouvernement du Canada a également entrepris un processus visant à produire annuellement des cartes numériques des types de cultures à l'aide d'images satellitaires optiques (Landsat-5, AWiFS, DMC) et radar (RADARSAT-2) afin d'appuyer la réalisation d'un inventaire national des cultures.

4.12. MI 4. FRAGMENTATION ET CONNECTIVITÉ DES ÉCOSYSTÈMES NATURELS (PRIORITÉ A)

Les paysages forestiers sont modifiés depuis des millénaires par des perturbations naturelles comme les feux et les épidémies d'insectes. Toutefois, au cours des dernières décennies, la forme dominante des perturbations forestières est l'exploitation industrielle des ressources ligneuses. Cette modification de la structure des paysages a un effet sur la distribution des espèces. La composition et la configuration des habitats adjacents influencent la présence et l'abondance des espèces. La division de l'habitat contigu en petits morceaux est connue sous le terme « fragmentation » (Fleishman et Mac Nally, 2007). Comme résultat de la fragmentation, la connectivité de l'habitat diminue, la densité de sa lisière ainsi que l'isolement des zones restantes augmentent (Ahern *et al.*, 2011). Les répercussions de la fragmentation des forêts dépendent de l'espèce et de l'échelle spatiale. La fragmentation de la forêt peut causer la diminution des oiseaux migrateurs et résidents néotropicaux nécessitant un habitat forestier à l'intérieur des terres; le déclin des espèces requérant de grands habitats, par exemple le grizzli et le caribou; l'augmentation des espèces préférant brouter à la lisière des forêts, notamment l'original; l'augmentation de l'exposition des espèces de l'intérieur des forêts aux prédateurs et aux parasites; le bouleversement de la structure sociale de certaines espèces et les obstacles à la dispersion (Les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010)

¹⁸<http://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/18e3ef1a-497c-40c6-8326-aac1a34a0dec>

La fragmentation des habitats est considérée comme l'une des plus sérieuses menaces sur la biodiversité, et une des causes majeures de l'extinction des espèces (Betbeder, 2015). La connectivité du paysage est un facteur clé pour la survie des espèces puisqu'elle facilite les mouvements et les échanges des organismes.

Ainsi, l'évaluation des effets des perturbations naturelles et anthropiques sur la biodiversité repose donc sur une prise en considération des modifications dans la composition du paysage. Pour estimer cet indicateur, une connaissance du territoire (i.e. une carte détaillée) est tout d'abord nécessaire. Comme précédemment discuté dans le paragraphe concernant la caractérisation des écosystèmes forestiers (I5), les images/mosaïques Landsat ou des produits générés à partir de ces images (p. ex. la carte de la couverture forestière établie grâce au projet Observation de la Terre pour le développement durable des forêts ((OTDD), RNCAN¹⁹) offrent une résolution satisfaisante pour suivre la fragmentation. Une autre source potentielle pour l'étude de la fragmentation et de la connectivité demeure l'inventaire forestier (cartographie écoforestière) réalisé par MFFP. Toutefois, pour caractériser des continuités écologiques à échelle fine (p. ex. les corridors écologiques en milieu agricole), des images à très haute résolution, comme RapidEye, seraient plus appropriées. Il faut noter que cet indicateur est très dynamique, car les perturbations naturelles combinées aux perturbations anthropiques peuvent avoir un impact considérable sur une échelle de temps très courte. Ainsi, une période de suivi plus courte (p. ex. 5 ans) devrait être privilégiée.

Il existe différentes approches pour estimer cet indicateur. Par exemple, Wulder *et al.* (2008) ont réalisé une analyse des patrons de forêt pour quatre étendues spatiales souvent utilisées pour la cartographie ou la modélisation basées sur le produit OTDD (produites à partir de données Landsat à une résolution de 25 m représentant les conditions en date de l'année 2000):

- (1) 13 000km² (correspond à la superficie d'une feuille cartographique de 1: 250 000);
- (2) 800 km² (correspondant à la surface d'une feuille cartographique de 1:50 000;
- (3) 1 km²
- (4) 1 ha.

Plus de 95 métriques caractérisant les parcelles ont été dénombrées par les auteurs. Parmi ces métriques, l'accent a été mis sur neuf qui illustrent mieux la fragmentation de la forêt :

- 1) Proportion de la forêt
- 2) Nombre de parcelles de forêt

¹⁹ OTDD : nos forêts surveillées de l'espace - Prise 2. 2007. Beaudoin, A. Ressources naturelles Canada, Service canadien des forêts, Centre de foresterie des Laurentides, Québec, QC. L'Éclaircie No. 37. 2 p.

- 3) Proportion des parcelles de forêt (%)
 - 4) Taille moyenne des parcelles de forêt (ha)
 - 5) Écart-type de la taille des parcelles forestières (ha)
 - 6) Somme des périmètres des parcelles forestières
 - 7) Densité des lisières forestières (m/ha)
 - 8) *Forest / Forest join count*
 - 9) *Forest / nonforest join count*
- 1) densité forestière (proportion de pixels forestiers à l'intérieur d'une unité d'analyse de 1 km²)
 - 2) densité des lisières forestières (longueur de toutes les lisières entre les pixels forestiers et les pixels non forestiers à l'intérieur de chaque unité d'analyse de 1 km²).

Cette analyse est aussi basée sur les cartes de couverture terrestre du produit OTDD.

Afin de préciser l'approche à retenir pour le calcul de la connectivité et la fragmentation, une discussion avec les experts en biodiversité de MDDELCC et MFFP sera nécessaire.

4.13. MI 7. PRODUCTIVITE PRIMAIRE NET (PRIORITE C)

La production primaire est le taux de croissance de la biomasse organique ou l'accumulation par les plantes²¹. La production primaire est généralement divisée en deux composantes, la productivité primaire brute (PPB) et de la productivité primaire nette (PPN). La productivité primaire brute est le taux global de la production de biomasse par les plantes, alors que la productivité primaire nette est la fraction restante de la biomasse produite après comptabilisation de l'énergie perdue en raison de la respiration cellulaire et de l'entretien des tissus de la plante. La PPN est une composante importante du budget global du carbone et est utilisée comme un indicateur de la fonction de l'écosystème.

À l'aide de données de télédétection, des modèles de la fraction du rayonnement photosynthétiquement actif (fRPA) et de l'efficacité de l'utilisation de lumière, la productivité primaire nette (PPN) pourrait être évaluée. La fraction de RPA (fRPA) est un paramètre qui mesure la partie du RPA utilisée par les plantes. Il est un paramètre important dans la mesure de la

²⁰ <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=36eab06817184842885e4b8cfc79bc36>

²¹ http://wiki.landscapetoolbox.org/doku.php/remote_sensing_methods:net_primary_productivity

production de biomasse, car le développement de la végétation est lié à la vitesse à laquelle l'énergie rayonnante est absorbée par la végétation²². Les précipitations et la température de l'air sont deux des principaux facteurs qui déterminent la proportion de PAR absorbée par les plantes. Ainsi, les entrées communes aux modèles PPN comprennent la couverture des sols, la phénologie, la météorologie de surface et l'indice de surface foliaire (LAI)²³.

Il existe des produits satellitaires opérationnels, comme le **MOD17A3H V006**, basé sur des données recueillies par les capteurs MODIS des satellites Terra et Aqua du système d'observation de la Terre de la NASA et des données météo, qui fournit le PPN à une résolution de 500 m.

L'indice des habitats dynamiques (Coops *et al.*, 2008), mentionné dans le chapitre 3 (Section D1), est également une mesure de la productivité de la végétation (Ahern *et al.*, 2011). Il est dérivé d'estimations de la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif qui est absorbé par la surface terrestre (fPAR), obtenue au moyen des capteurs MODIS. Même si la fPAR est semblable au NDVI, l'estimation de la fPAR est plus directement reliée à la physiologie des plantes que celle du NDVI, puisqu'elle est calculée à partir d'un modèle fondé sur la physique de la propagation de la lumière dans le feuillage (Coops *et al.*, 2008). En outre, ces données sont calibrées par la NASA de manière à tenir compte de l'angle du soleil, de la réflectance de fond et de l'angle de visualisation (Ahern *et al.*, 2011). L'IHD est constitué des trois composantes suivantes (Coops *et al.*, 2008):

1. La fPAR annuelle cumulative : la fPAR annuelle intégrée, fondée sur les valeurs mensuelles maximales de la fPAR pour l'année. On interprète cette valeur comme étant la verdure annuelle cumulative.
2. La fPAR minimale annuelle : la valeur la moins élevée parmi les valeurs mensuelles maximales de la fPAR pour l'année. On interprète cette valeur comme représentant le couvert annuel minimal de végétation verte. Toutefois, cette interprétation n'est pas exacte en hiver en raison des effets d'ombre.
3. Le coefficient annuel de variation de la fPAR : l'écart-type des valeurs mensuelles maximales de la fPAR pour l'année divisé par la moyenne des valeurs mensuelles maximales de la fPAR pour l'année. On interprète cette valeur comme étant le degré annuel de saisonnalité de la végétation.

Coops *et al.* (2008) ont obtenu des estimations des valeurs maximales mensuelles de la fPAR pour le Canada à une résolution de 1 km pour la période de 2000 à 2005. Les valeurs maximales mensuelles de la fPAR sont utilisées pour réduire au minimum l'incidence des nuages, de la couverture de neige, de la variation atmosphérique et d'autres conditions environnementales confondantes. Les auteurs ont calculé les trois composantes de l'IHD pour chaque année de 2000

²²

http://wiki.landscapetoolbox.org/doku.php/remote_sensing_methods:fraction_of_photosynthetically_active_radiation

²³ http://wiki.landscapetoolbox.org/doku.php/remote_sensing_methods:net_primary_productivity

à 2005. Ils ont ensuite calculé une moyenne à partir de l'ensemble des données sur six ans pour chacune des trois composantes, puis ils ont produit une carte pour chaque composante ainsi qu'une carte composite (Coops *et al.*, 2008). Dans le rapport d'Ahern *et al.* (2011), ces résultats sont analysés par écozone aux fins du rapport sur la *Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010* (Les gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, 2010). Comme les données représentent une moyenne sur six ans, elles ne fournissent à l'heure actuelle qu'une estimation de la situation dans chaque écozone, sans information sur les tendances (Ahern *et al.*, (2011). Les données sont disponibles sur <https://databasin.org/datasets/9906cd5535314a9ab8dab2ef5b78f8f3>.

5. CONCLUSION

Ce rapport d'étape ne présente pas les résultats finaux de notre mandat. Il est destiné à fournir un inventaire des données/produits existants et disponibles et discute de leur pertinence et de leur utilité potentielle pour les objectifs du projet. Cette inventaire a permis d'assembler plusieurs informations (images, produits à valeur ajoutée, suivis, indicateurs) issues de la télédétection et éparpillées dans différentes bases de données ou sites WEB. Chacun des éléments répertoriés de la liste a été arrimé avec les indicateurs envisagés pour le suivi BdQc (tableaux 1 et 2). Cet inventaire nous a permis d'identifier les données/produits de télédétection existants concernant la biodiversité qui correspondent aux besoins du réseau de suivi BdQc et, ainsi, d'éviter de dupliquer les efforts et de prioriser les indicateurs à suivre dans le temps et l'espace. Au chapitre 4, certains produits ou données satellitaires ont été recommandés pour les indicateurs prioritaires au Tableau 1 et 2. Ils sont détaillés à l'Annexe III et synthétisés au tableau 3 ci-dessous.

Un protocole spécifique pour chacun des indicateurs de télédétection retenus sera développé à l'étape suivante. Ces protocoles vont fournir un ensemble de lignes directrices pour le traitement des données et l'extraction de l'information désirée. Cependant, pour une intégration optimale des données de télédétection dans le réseau de suivi BdQc, une collaboration étroite avec les spécialistes en biodiversité (biologistes, écologues, etc.) sera nécessaire afin de clairement définir les besoins, les objectifs, les niveaux de détails, les classes, la fréquence et la validation pour chacun des indicateurs.

De plus, certains indicateurs comme le NDVI sont un outil efficace pour détecter les tendances dans le cycle saisonnier des végétaux. Cependant, un certain degré d'incertitude et de variabilité entre les données issues de différents capteurs satellitaires existent. Lors de l'étape de démonstration, il sera important de valider les paramètres estimés à partir des images satellites avec des données in situ pour différents milieux (p.ex. forêt, toundra, etc.), quelque soient les indicateurs choisis.

Tableau 3. Recommandations de types d’images ou de produits pour la liste des indicateurs de biodiversité des tableaux 1 et 2.

Indicateurs de biodiversité par télédétection	MODIS	LANDSAT	Haute Résolution	SAR	PRODUITS
Phénologie de la végétation 1. Longueur de la période de croissance de la végétation 2. Indice de végétation en différence normalisée (NDVI)	X X				MODIS-VI
Caractérisation des habitats – Proportion et taille des écosystèmes dans le paysage		X	X		
Caractérisation des plans d’eau 1. Taille et caractéristiques des mares et des rivières 2. Apparition ou disparition des mares ou thermokasts			X X		
Présence de perturbations naturelles 1. Intensité et superficie des feux de forêts 2. Distribution des insectes ravageurs et maladies des arbres					SCIFV,FIMAQ INDI Inv. MFFP
Caractérisation des écosystèmes forestiers et des écotones 1. Sud 2. Nord du 53 ^e					Cartographie Écoforestière MFFP 2010-2013
Productivité des espèces arborescentes et arbustive 1. Forme de croissance 2. Évolution du couvert végétal de la toundra 3. Pourcentage de couverture végétale		X	X X		
Caractérisation de la neige et du couvert de glace 1. Étendue et caractéristiques de la neige ou de la glace 2. Période de fonte	X X			X X	Snowcover
Physico-chimie des plans d’eau - Couleur de l'eau, carbone organique dissout, abondance de chlorophylle	X				Sentinelle-2
Superficie des étangs temporaires			X		
Indices climatiques					Ouranos
Utilisation des terres		X			
Productivité primaire nette	X				MOD17A3H
Fragmentation et connectivité des écosystèmes naturels		X			

RÉFÉRENCES

- AAMP, (2015). *Plans de gestion des Parcs naturels marins. Note méthodologique. Fiche sur indicateurs / tableau de bord.* (Document interne). Brest, Agence des Aires Marines Protégées, 9 p.
- Abuzar M., Sheffield K., Whitfield D., O'Connell M., McAllister A., (2014). Comparing Inter-Sensor NDVI for the Analysis of Horticulture Crops in South-Eastern Australia. *American Journal of Remote Sensing*. 2(1): 1-9.
- Ahern F., Frisk J., Latifovic R., Pouliot D., (2011). *Surveillance à distance des écosystèmes : sélection de tendances mesurées à partir d'observations par satellite du Canada. Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010*, Rapport technique thématique no 17. Conseils canadiens des ministres des ressources. Ottawa, (Ont.), 70p.
- Banskota A., Kayastha N., Falkowski M., Wulder M.A., Froese R., White J.C., (2014). Forest monitoring using Landsat time-series data- A review. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. 40, No. 5, pp. 362-384.
- Beaulieu J., Murray S., Villeneuve C., (2012). *Cartographie détaillée des milieux humides du territoire du Centre-du-Québec*. Rapport synthèse. Canards Illimités et le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction du patrimoine écologique et des parcs. Québec, 44 p.
- Beck I., Ludwig R., Bernier M, Lévesque E., Boike. J., (2015). *Assessing Permafrost Degradation and Land Cover Changes (1986–2009) using Remote Sensing Data over Umiujaq, Sub-Arctic Québec*. *Permafrost and Periglac. Process*. 26: 129–141
- Bernier M., Fortin J.-P., Gauthier Y., Vincent P., (1999). Determination of snow water equivalent using RADARSAT SAR data in eastern Canada. *Hydrological Processes* 13(18):3041-3051.
- Betbeder J., (2015). *Evaluation des données de télédétection pour l'identification et la caractérisation des continuités écologiques*. Thèse de doctorat, Université Rennes 2, 354 p.
- Bêty J., Gravel D., Legagneux P., Naud M.-J. (2015). *Suivis environnementaux en territoires nordiques: priorités et défis associés à la recherche multidisciplinaire en milieux éloignés*. Rimouski.
- Bissonnette J., Lavoie S., (2015). *Utilisation du territoire : Méthodologie et description de la couche d'information géographique*. MDDELCC
- Blouin J., Guérin D., (2015). *Guide de terrain pour l'identification des étangs vernaux*. MRNF. ftp://ftp.mern.gouv.qc.ca/Public/DGR_03/PRAN/01_TSC/03151/2014-

- Bouchard F., Francus P., Pienitz R., Laurion I., Feyte S., (2014). *Subarctic Thermokarst Ponds: Investigating Recent Landscape Evolution and Sediment Dynamics in Thawed Permafrost of Northern Québec (Canada)* Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 46(1):251-271.
- Brandt J., (2009). The extent of the North American boreal zone. Environmental Reviews 17: 101-161. doi:10.1139/A39-004
- Brassard F., Bouchard A.R., Boisjoly D., Poisson F., Bazoge A., Bouchard M-A., Lavoie G., Tardif B., Bergeron M., Perron J., Balej R., Blais D., (2009). Portrait du réseau d'aires protégées au Québec Période 2002 – 2009. Direction du patrimoine écologique et des parcs, MDDEP.
- Chokmani K., Bernier M. & Royer A., (2013). *A merging algorithm for regional snow mapping over eastern Canada from AVHRR and SSM/I data. Remote Sensing* 5(11):5463-5487.
- Chokmani K, Benjamin R.-A., Bernier M., (2008). *Développement d'un prototype d'atlas interactif du couvert nival pour l'est du Canada*. Rapport de recherche (R1025). INRS, Centre Eau, Terre et Environnement, Québec.
- Convention sur la diversité biologique (2015). *Plan stratégique 2011-2020 pour la diversité biologique, incluant les Objectifs d'Aichi pour la biodiversité*. <https://www.cbd.int/sp/default.shtml>. Page consultée en avril 2016.
- Coops N.C., Wulder M.A., Iwanicka D., (2008). *Demonstration of a satellite based index to monitor habitat at continental-scales*. Ecological Indicators 9: 948-95
- Coops N.C., Wulder M.A., Duro D., Han T., Berry S., (2008). *The development of a Canadian dynamic habitat index using multi-temporal satellite estimates of canopy light absorbance*. Ecological Indicators, pp. 754-766.
- De Sève D, Vachon F & Choquette Y., (2012) *A dynamic algorithm for mapping of snow cover using SSMI data*. IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium (IGARSS). p 4875-4878.
- Dissanska M., Bernier M., Payette S., (2009). *Object-based classification of very high resolution panchromatic images for evaluating recent change in the structure of patterned peatlands*. Canadian Journal of Remote Sensing 35: 189-215
- Drapeau P., Nappi A., Saint-Germain M., Larrivée M., (2010). *La biodiversité des forêts brûlées: résultats des recherches effectuées après le feu de 1999 au parc national des Grands-Jardins*. Le naturaliste canadien, 134(2): 83 - 92.

- Dribault Y., Chokmani K., Bernier M., (2012). *Monitoring seasonal hydrological dynamics of minerotrophic peatlands using multi-date GeoEye-1 very high resolution imagery and object-based classification*. *Remote Sensing*, 4(7): 1887-1912.
- Duguay Y., Bernier M., Lévesque E., Tremblay B., (2015). *Potential of C and X Band SAR for Shrub Growth Monitoring in Sub-Arctic Environments*. Special Issue Remote Sensing of Changing Northern High Latitude Ecosystems, *Remote Sensing*. no 7, 9410-9430.
- Duguay C., Bernier M., Gautghier Y., Kouraev A., (2014). Remote sensing of lake and river ice, Chapitre dans: *Remote Sensing of the Cryosphere*. John Wiley & Sons, Ltd, pp 273-306. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118368909.ch12>.
- Duro D., Coops N. C., Wulder M.A., Han T., (2007). *Development of a large area biodiversity monitoring system driven by remote sensing*. *Progress in Physical Geography*, 31, 235-260.
- El Alem, A., (2014). Développement d'une approche de suivi des fleurs d'eau d'algues à l'aide de l'imagerie désagrégée du capteur MODIS, adaptée aux lacs du Québec méridional. Thèse. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Doctorat en sciences de l'eau, 265 p.
- El-Alem, A.; Chokmani, K.; Laurion, I., El-Adlouni, S.E., (2014). An Adaptive Model to Monitor Chlorophyll-a in Inland Waters in Southern Quebec Using Downscaled MODIS Imagery. *Remote Sens.* 6, 6446-6471
- El-Alem A., (2014). Development of an algorithm using MODIS images for monitoring harmful algal blooms in inland waters of southern Quebec. (PhD Thesis).
- FAO – ORGANISATION DES NATIONS UNIES POUR L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE. 2005. Land Cover Classification System. Classification Concepts and User Manual – Software Version 2. Site Internet : www.fao.org/docrep/008/y7220e/y7220e00.htm#Contents.
- Fleishman E., Mac Nally R., (2007). *Measuring the response of animals to contemporary drivers of fragmentation*. *Candian Journal of Zoology*, Vol. 85, No. 10, 1080-1090
- Gouvernement du Québec (2010). *Portrait du réseau d'aires protégées au Québec : période 2002-2009*. Direction du patrimoine écologique et des parcs, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, 229 p. Page web consultée le 12 mai 2016. http://www.mddep.gouv.qc.ca/biodiversite/aires_protegees/portrait02-09/fr/intro.pdf
- Gouvernements fédéral, provinciaux et territoriaux du Canada, (2010). Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010. Conseils canadiens des ministres des ressources. Ottawa, (Ont.) vi + 148 p. http://www.biodivcanada.ca/A8E1EFFD-FCC0-4502-832A-359A50BAB5A3%5CFR_Biodiversit%C3%A9_canadienne_POUR_IMPRESSION.pdf
- Filion R., Bernier M., Paniconi C., Chokmani K., Massimo M., Soddu A., Talazac M., Lafortune F.X., (2015). *Remote Sensing for Monitoring Soil Moisture of Agricultural Fields during the Dry*

Season in the Campidano Plain of Sardinia, Italy. Science of the Total Environment, Numéro spécial CLIMB. Elsevier.

Fraser R.H., Cihlar J., (2000). Hotspot and NDVI differencing synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest. *International Journal of Remote Sensing*, 74(3): 362–376.

Fretwell P.T., Larue M.A., Morin P., Kooyman G.L., Wienecke B., Ratcliffe N., Fox A.J., Fleming A.H., Porter C., Trathan P.N.. (2012). An emperor penguin population estimate: the first global, synoptic survey of a species from space. *PLoS One*, 7(4): e33751.

Gauthier Y., Jasek , M., Poulin J., Bernier M., (2014). *Understanding ice processes in a dynamic river section using multipolarisation Radarsat-2 data*. IEEE-Explore, IGARSS 2014, July 13-18

Gedalof Z, (2015). Biodiversity of British Columbia. Lab for Advanced Spatial Analysis, Department of Geography, University of British Columbia, Vancouver. [www.biodiversity.bc.ca].

GEO BON, (2015). *Global Biodiversity Change Indicators*. Version 1.2. Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network Secretariat. Leipzig, 20 pages.

GEO BON, (2011). *Adequacy of Biodiversity Observation Systems to support the CBD 2020 Targets*. A report prepared by the Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network (GEO BON) for the Convention on Biological Diversity

Goïta K., Walker AE. & Goodison BE., (2003). *Algorithm development for the estimation of snow water equivalent in the boreal forest using passive microwave data*. *International Journal of Remote Sensing* 24(5):1097-1102.

Hanley C.J., (2015). Using VHSR multispectral imagery and object-based extraction to discover vernal meadows through vegetative persistence at Fort Ord, California. Master Thesis.

Hirano A. ,Batbileg B., (2014). On exchangeability of spectral measurements obtained from multi-platform satellite sensors - Case study for Mongolian steppe, Proceedings, the 35th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS), Nay Pyi Taw, Myanmar, October 27-31, 2014

Institut de la statistique du Québec, (2015). Bulletin statistique régional : Centre-du-Québec.

IOCCG, (2000). Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and Other Optically-Complex, Waters. Sathyendranath, S. (ed.), Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group, No. 3, IOCCG, Dartmouth, Canada.

Jobin, B., C. Latendresse, C. Maisonneuve, A. Sebbane et M. Grenier. 2007. Changements de l'occupation du sol dans le sud du Québec pour la période 1993-2001. Série de rapports techniques n° 483, Environnement Canada, Service canadien de la faune, région du Québec, Sainte-Foy, Québec. 112 p. <https://www.mffp.gouv.qc.ca/faune/habitats-fauniques/pdf/occupation-sol.pdf>

- Junchang J., Masek J.G., (2016). *The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data*. *Remote sensing of environment*, 176(4), 1-16.
- Kallio K., (2012). *Water quality estimation by optical remote sensing in boreal lakes*. PhD thesis. Department of Environmental Sciences, Faculty of Biological and Environmental Sciences, University of Helsinki
- Kerr J.T., Ostrovsky M., (2003). *From space to species: ecological applications of remote sensing*. *Trends in Ecology and Evolution*, 18, pp. 299-305
- Kongoli C., Dean C.A., Helfrich S.R., Ferraro R.R., (2007). *Evaluating the potential of a blended passive microwave-interactive multi-sensor product for improved mapping of snow cover and estimations of snow water equivalent*. *Hydrological Processes* 21(12):1597-1607.
- Krezek-Hanes C.C., Ahern F., Cantin A., Flannigan M.D., (2011). *Tendances des grands incendies de forêts au Canada, de 1959 à 2007. Biodiversité canadienne : état et tendances des écosystèmes en 2010, Rapport technique thématique no 6. Conseils canadiens des ministres des ressources*. Ottawa, (Ont.). vi + 56 p.
<http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=137E1147-1>
- Kutser T., Pierson D.C., Tranvik L., Reinart A., Sobek S., Kallio K., (2005). *Using Satellite Remote Sensing to Estimate the Colored Dissolved Organic Matter Absorption Coefficient in Lakes*. *Ecosystems* 8: 709–720
- Latendresse, C., B. Jobin, A. Baril, C. Maisonneuve, A. Sebbane and M. Grenier. 2008. *Changements de l'occupation du sol dans le Québec méridional entre 1993 et 2001*. *Le Naturaliste Canadien* 132(1): 14–23.
- Lavoie I., Laurion I. et Vincent W.F., 2007. *Les fleurs d'eau de cyanobactéries*, document d'information vulgarisée. INRS rapport no 917, 25 p.
- Lynch H.J. , Schwaller M.R., (2014). *Mapping the abundance and distribution of Adélie penguins using Landsat-7: first steps towards an integrated multi-sensor pipeline for tracking populations at the continental scale*. *PLoS One*, 9(11): e113301.
- Martin J., Létourneau G., (2011). *Changements dans les milieux humides du fleuve Saint-Laurent de 1970 à 2002, Environnement Canada, Direction générale des sciences et de la technologie, Monitoring et surveillance de la qualité de l'eau au Québec*, Rapport technique numéro 511, 302 pages.
- 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 Quebec from 1986 to 2010*. *Global Change Biology*, 18(7): 2313–2323.

- MDDELCC, MFFP et CSBQ. (Novembre 2015). *Perspective globale sur les réseaux de suivis et les indicateurs de biodiversité.*
- MERN, Caractéristiques de différents satellites d'observation de la Terre, 2013. Ministère des Ressources naturelles, Direction générale de l'information géographique, <http://mern.gouv.qc.ca/publications/territoire/notions/satellites.pdf>. Page consultée en avril 2016
- Muñoz J., Infante J., Lakhankar T., Khanbilvardi R., Romanov P., Krakauer N., Powell A., (2013). *Synergistic use of remote sensing for snow cover and snow water equivalent estimation.* British Journal of Environment & Climate Change, 3(4): 612-627
- Nagendra H., (2001). *Using remote sensing to assess biodiversity.* International Journal of Remote Sensing, 22, 2377-2400.
- Nolin A.W., (2010). Recent advances in remote sensing of seasonal snow. Journal of glaciology 56(200): 1141-1150.
- NRCAN, *Notions fondamentales de télédétection.* [1999, en ligne], http://www.rncan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_f.pdf, 1999.
- Petrou Z., Manakos I., Stathaki T., (2015). Remote sensing for biodiversity monitoring: a review of methods for biodiversity indicator extraction and assessment of progress towards international targets. Biodiversity and Conservation, 24(10): 2333–2363
- Pereira H., Cooper D., (2006). Towards the global monitoring of biodiversity change. Trends in Ecology and Evolution. 21(3):123-129
- Pereira H. M., Ferrier S., Walters M., Geller G.N., Jongman R. H. G., Scholes R. J., Bruford M. W., Brummitt N., Butchart S. H. M., Cardoso A. C., Coops N.C., Dulloo E., Faith D. P., Freyhof J., Gregory R. D., Heip C., Höft R., Hurr G., Jetz W., Karp D. S., McGeoch M. A., Obura D., Onoda Y., Pettorelli N., Reyers B., Sayre R., Scharlemann J. P. W., Stuart S. N., Turak E., Walpole M., Wegmann M., (2013). *Essential Biodiversity Variables.* Science, 339: 277-278
- 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.* Ecoscience, 21(3-4), 419-433.
- Pulliainen J., (2006). Mapping of snow water equivalent and snow depth in boreal and sub-arctic zones by assimilating space-borne microwave radiometer data and ground-based observations. Remote Sensing of Environment 101(2):257-269.
- Review on the use of remotely-sensed data for monitoring biodiversity change and tracking progress towards the CBD Aichi Biodiversity Targets.* Secrétariat de la Convention sur la

diversité biologique (2014) 4ème édition des Perspectives mondiales de la diversité biologique. Montréal, 155 pages.

Roberge S., (2013). *Développement d'un algorithme satellitaire à seuils évolutifs pour le suivi de l'étendue spatiale du couvert nival adapté aux conditions régionales du Québec et du Labrador et son adaptation à l'estimation d'ensemble*. Mémoire de maîtrise (Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement, Québec, Canada). 105 pages

Ropars P. and Boudreau S., (2012). Shrub expansion at the forest–tundra ecotone: spatial heterogeneity linked to local topography. *Environmental Research Letters*, 7(1).

Royer A., Goïta K., Kohn J. & De Sève D., (2010). Monitoring Dry, Wet, and No-Snow Conditions from Microwave Satellite Observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 7(4):670-674.

Secades C., O'Connor B., Brown C., Walpole M., (2014). *Earth Observation for Biodiversity Monitoring: A review of current approaches and future opportunities for tracking progress towards the Aichi Biodiversity Targets*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montréal, Canada. Technical Series No. 72, 183 pages.

Strand H., Höft R., Strittholt J., Miles L., Horning N., Fosnight E., Turner W., eds., (2007). *Sourcebook on Remote Sensing and Biodiversity Indicators*. Secretariat of the Convention on Biological Diversity, Montreal, Technical Series no. 32, 203 pages.

MS. MONINA, *Technical synthesis on the possibilities and limits of remote sensing for mapping natural habitats*, EU, Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture, Montpellier, octobre 2012

Théau J., Sankey T.T., Weber K.T., (2010). Multi-sensor analyses of vegetation indices in a semi-arid environment. *GIScience and Remote Sensing*, Vol. 47, No. 2, pp. 260-275.

Turner W., Spector S., Gardiner N., Fladeland M., Sterling E., Steininger M., (2003). *Remote sensing for biodiversity science and conservation*. *Trends in Ecology and Evolution* 18.

Vaughan R.A., Cracknell A. P. (Eds.), (2013). *Remote Sensing and Global Climate Change*. Nato ASI Subseries I: Volume 24. Springer Science & Business Media, 495 pages.

Vincent W.F. and Quesada A., 2012. *Cyanobacteria in high latitude lakes, rivers and seas*. In: Whitton, B. A. (ed.) *Ecology of Cyanobacteria II: Their Diversity in Space and Time*, Springer, New York, pp. 371-385.

Wetzel R.G., (2001). *Limnology. Lake and River Ecosystems*. 3rd Edition. Academic Press, San Diego, 1006 p.306–14

- Wulder M., Coops N., Andrew M., (2012). *BIOSPACE: Biodiversity monitoring with Earth Observation data*. Technical report.
- Wulder, M.A., White, J., Han, T., Coops, N., Cardille, J., Holland, T., and Grills, D. (2008) Monitoring Canada's forests - Part 2: National forest fragmentation and pattern. *Canadian Journal of Remote Sensing* 34: 563-584
- WWF, (2014). *Rapport Planète Vivante 2014. Des hommes, des espèces, des espaces, et des écosystèmes*. WWF International, Gland, Swiss.
- Yang Z., Wang T., Skidmore A. K., de Leeuw J., Said M.Y., Freer, J., (2014). Spotting East African mammals in open savannah from Space. *PLoS One*, 9(12) : e115989.
- Zhang C., Cai D., Guo S., Guan Y., Fraedrich K., Nie Y., Liu X., Bian X., (2016). *Spatial-Temporal Dynamics of China's Terrestrial Biodiversity: A Dynamic Habitat Index Diagnostic*. *Remote Sens.*, 8, 227.

ANNEXE I. PRINCIPALES SOURCES D'INFORMATION CONSULTÉES

Source d'information	Description
Portail Québec géographique	Accès à toutes les cartes, atlas et produits d'information géographique disponibles dans les ministères et organismes du gouvernement du Québec.
Géoboutique Québec	
Portail Données Québec	Un site qui permet l'accès aux données ouvertes des administrations publiques québécoises
Géoinfo	Un moteur de recherche et un navigateur cartographique qui met en valeur des données géographiques acquises et produites par l'État.
Chroniques GÉOinfo	Présente des articles sur des projets réalisés par les ministères et organismes du gouvernement du Québec
Centre GéoStat	Information géographique et statistique http://www.bibl.ulaval.ca/services/centregeostat/donnees-geospaciales
Géoindex+	Plateforme de découverte, de consultation et d'extraction de données géospaciales du Centre d'information géographique et statistique (Centre GéoStat) de la Bibliothèque de l'Université Laval. http://geoindex-plus.bibl.ulaval.ca/
Banque de données satellitaires du Québec (BDSQ)	Toutes les images achetées par les différents ministères et organismes du Québec sont versées dans la BDSQ. Contient environ 2700 images satellitaires captées à partir de 1972. Mise à jour en continu selon les besoins et les achats. Les données sont accessibles uniquement pour les ministères et les organismes gouvernementaux. http://mern.gouv.qc.ca/publications/territoire/notions/satellites.pdf
Catalogue national des données d'observation de la Terre (CNDOT)	Permet aux utilisateurs publics et autorisés du GC d'explorer les archives des données brutes et produits du GC (niveau 1+), Le système du CNDOT, qui comprend le CNDOT-Cat, est conçu, développé et tenu à jour par Ressources naturelles Canada. https://neodf.nrcan.gc.ca/neodf_cat3/
Données ouvertes du gouvernement du Canada.	
Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques	
Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles	Plusieurs bases de données géographiques de référence qui servent de support aux systèmes d'information de nombreux organismes.
Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs	Le Québec en images satellites Landsat (Mosaïques Landsat) Orthophotographies Données d'inventaire et de classification écologique, Cartes et données forestières : Feux de forêt (Carte hebdomadaire cumulative des incendies forestiers; Portrait statistique pour les feux de forêts, Combustibles forestiers – cartes annuelles) Insectes et maladies (Relevés aériens des dommages causés par les insectes)
Ministère de la Sécurité publique	Portrait de l'état des glaces sur les rivières du Québec
Ressources naturelles Canada	http://www.nrcan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/imagerie-satellitaire-photos-aeriennes/imagerie-satellitaire-produits/9268

Environnement Canada	Données utiles dans de nombreux domaines, y compris la faune, la biodiversité, l'eau, l'air, le sol, le climat, la pollution, la prévision environnementale et les technologies environnementales. Indicateurs environnementaux (cartes interactives) http://maps-cartes.ec.gc.ca/indicators-indicateurs/default.aspx?lang=fr
Centre canadien de Télédétection	Images et produits satellitaires Projets d'observation de la Terre
NASA	Imagerie et produits satellitaires
NASA Earth Observations	Images, stories, and discoveries about the environment, Earth systems, and climate that emerge from NASA research, including its satellite missions, in-the-field research, and models Global view of what's happening on our planet. http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/?eocn=topnav&eoci=globalmaps
Le laboratoire d'optique Aquatique et de Télédétection, AquaTel, Université du Québec à Rimouski (UQAR)	Technologies de télédétection et d'optique aquatique pour diagnostiquer la qualité des eaux à la surface de la Terre. glace littorale par télédétection Radar à synthèse d'ouverture de RADARSAT-2 http://aquatel.uqar.ca/recherche.html
Plan d'action Saint-Laurent	Fiches de suivi qui résument, pour chaque indicateur, l'état des connaissances issues du programme <i>Suivi de l'état du Saint-Laurent</i> . Elles portent sur l'eau, les ressources biologiques, les rives, les sédiments et les usages http://planstlaurent.qc.ca/fr/publications.html?tx_solr%5Bfilter%5D%5B0%5D=categories%253ABiodiversit%25C3%25A9
Réseau Canadien de Biosurveillance Aquatique (RCBA)	Programme de biosurveillance aquatique pour évaluer la santé des habitats des eaux douces du Canada
biodivcanada.ca	http://www.biodivcanada.ca/default.asp?lang=Fr&n=DABC84B3-1
Centre de la science de la biodiversité du Québec (CSBQ)	Réseau de chercheurs en biodiversité dans la province http://qcbs.ca/fr
quebio.ca	Inventaire des données de terrain sur la biodiversité du Québec

ANNEXE II. INVENTAIRE D'INDICATEURS OU DES DONNÉES/ PRODUITS EXISTANTS ISSUS DE LA TÉLÉDÉTECTION

Voir le fichier Excel.

ANNEXE III. IMAGES ET PRODUITS SATELLITAIRES RECOMMANDÉS POUR CHAQUE INDICATEUR DE BIODIVERSITÉ

Voir le fichier Excel.