

Université de Montréal

Téledétection du carbone organique des lacs boréaux

par

Jean-Baptiste Leguet

Département de géographie, Université de Montréal

Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des arts et des sciences

en vue de l'obtention du grade de maîtrise

en géographie

avril 2013

© Jean-Baptiste Leguet, 2013

Université de Montréal
Faculté des études supérieures et postdoctorales

Ce mémoire intitulé :

Téledétection du carbone organique des lacs boréaux

Présenté par :
Jean-Baptiste Leguet

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Thora Herrmann, présidente-rapporteuse
Jeffrey Cardille, directeur de recherche
Paul Del Giorgio, co-directeur
Roxane Maranger, examinatrice externe

Résumé

Une estimation des quantités de carbone organique dissous dans les millions de lacs boréaux est nécessaire pour améliorer notre connaissance du cycle global du carbone. Les teneurs en carbone organique dissous sont corrélées avec les quantités de matière organique dissoute colorée qui est visible depuis l'espace. Cependant, les capteurs actuels offrent une radiométrie et une résolution spatiale qui sont limitées par rapport à la taille et l'opacité des lacs boréaux. Landsat 8, lancé en février 2013, offrira une radiométrie et une résolution spatiale améliorées, et produira une couverture à grande échelle des régions boréales. Les limnologues ont accumulé des années de campagnes de terrain dans les régions boréales pour lesquelles une image Landsat 8 sera disponible. Pourtant, la possibilité de combiner des données de terrain existantes avec une image satellite récente n'a pas encore été évaluée. En outre, les différentes stratégies envisageables pour sélectionner et combiner des mesures répétées au cours du temps, sur le terrain et depuis le satellite, n'ont pas été évaluées. Cette étude présente les possibilités et les limites d'utiliser des données de terrain existantes avec des images satellites récentes pour développer des modèles de prédiction du carbone organique dissous. Les méthodes se basent sur des données de terrain recueillies au Québec dans 53 lacs boréaux et 10 images satellites acquises par le capteur prototype de Landsat 8. Les délais entre les campagnes de terrain et les images satellites varient de 1 mois à 6 ans. Le modèle de prédiction obtenu se compare favorablement avec un modèle basé sur des campagnes de terrain synchronisées avec les images satellite. L'ajout de mesures répétées sur le terrain, sur le satellite, et les corrections atmosphériques des images, n'améliorent pas la qualité du modèle de prédiction. Deux images d'application montrent des distributions différentes de teneurs en carbone organique dissous et de volumes, mais les quantités de carbone organique dissous par surface de paysage restent de même ordre pour les deux sites. Des travaux additionnels pour intégrer les sédiments dans l'estimation sont nécessaires pour améliorer le bilan du carbone des régions boréales.

Mots-clés : Québec, lacs boréaux, matière organique dissoute colorée, carbone organique dissous, Advanced Land Imager, Landsat 8.

Abstract

A remote sensing approach to estimate carbon stocks in the millions of boreal lakes is highly desirable to improve our understanding of carbon cycles. Lakes carbon content is often correlated to colored dissolved organic matter (CDOM) content, which is visible from space. Meanwhile, current sensors offer limited radiometry and spatial resolution in regard to boreal lakes opacity and size. Landsat 8, launched in February 2013, offers improved radiometry and spatial resolution, and will provide large-scale coverage of boreal regions. Limnologists gathered years of field campaigns in the boreal regions for which a clear Landsat 8 image will be available. Yet the possibility to combine legacy field data with new satellite imagery has not been assessed yet. Furthermore, the different strategies to select and combine timely repeated lakes measurements in the field and on the satellite have not been assessed either. In this study, we address the opportunities and limits to combine legacy field data with new satellite imagery to develop CDOM predictive models. Methods are based on field data from Quebec collected in 53 boreal lakes and 10 satellite images acquired with the prototype of Landsat 8. Delays between field campaigns and satellite overpasses varied from 1 month to 6 years. Results show that a CDOM predictive model based on existing field data compares favorably with models based on carefully coordinated field campaigns. The quality of the model does not improve by adding repeat measurements in the field and on the satellite, or by using atmospherically corrected images. Two images from different sites show different distributions of lakes dissolved organic carbon concentrations and volumes, but the total dissolved organic carbon storage per landscape unit in the two sites are in the same range. Additional work to link satellite data to lakes sediments carbon content is needed to refine the global carbon budget in the boreal regions.

Keywords: Quebec, boreal lakes, CDOM, DOC, Advanced Land Imager, Landsat 8.

Table des matières

Chapitre 1: Contexte de l'étude.....	4
1.1 Les lacs boréaux jouent un rôle majeur dans le cycle du carbone atmosphérique	4
1.1.1 L'inventaire des lacs a presque doublé avec l'arrivée des images satellites.....	5
1.1.2 Les lacs boréaux sont très actifs dans les processus d'échange de carbone.....	6
1.1.3 Carbone des lacs et changements climatiques	7
1.2 Les images satellites rendent possible l'étude du carbone des lacs boréaux à l'échelle régionale	9
1.2.1 Un suivi régional ne peut pas reposer uniquement sur des mesures de terrain..	9
1.2.2 Principe d'estimation d'un composé dissous par satellite.....	11
1.2.3 La matière organique dissoute colorée est visible depuis l'espace	13
1.2.4 Développement d'un modèle de prédiction du carbone organique dissous par satellite	17
1.3 Premiers modèles de prédiction par satellite.....	19
1.3.1 Les lacs boréaux limitent les possibilités de télédétection.....	20
1.3.2 Premier modèle établi en Suède et en Finlande	22
1.3.3 Landsat 8 permettra d'estimer le carbone organique dissous des lacs boréaux	23
Chapitre 2: Objectifs de l'étude	25
2.1 Développer un modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée des lacs boréaux.....	25
2.1.1 Développer un modèle avec des données de terrain existantes.....	26
2.1.2 Évaluer les bénéfices des mesures multiples	26
2.1.3 Évaluer les bénéfices des corrections atmosphériques.....	28
2.2 Appliquer le modèle dans deux sites d'étude au Québec	29
2.2.1 Distribution de l'eau douce et de la matière organique dissoute colorée.....	29
2.2.2 Relation entre taille des lacs et teneurs en matière organique dissoute colorée	30
2.2.3 Quantités de carbone organique dissous évaluées sur les images.....	30

Chapitre 3: Méthodologie	32
3.1 Données de terrain	32
3.1.1 Région d'Eastmain : 2005-2009	34
3.1.2 Région d'Abitibi : 2010-2011	35
3.1.3 Mise en forme des données de terrain.....	36
3.2 Données satellite	38
3.2.1 Mission <i>Earth Observing-1</i>	38
3.2.2 Acquisition des images <i>Advanced Land Imager</i>	39
3.2.3 Format des images	41
3.2.4 Traitement des images.....	43
3.2.5 Chaînes de traitement des images satellites	48
3.3 Création des modèles	49
3.3.1 Modèle basé sur des mesures uniques et non-synchronisées.....	49
3.3.2 Mesures multiples vs mesures uniques	50
3.3.3 Images corrigées vs non corrigées pour l'atmosphère.....	52
3.4 Application du modèle à deux sites d'étude du Québec	53
3.4.1 Extraction des lacs sur les images satellite	54
3.4.2 Estimation de la matière organique colorée dans les deux régions.....	55
3.4.3 Diagrammes de densité entre l'aire des lacs et leur absorbance en matière organique dissoute colorée.....	55
3.4.4 Calcul des teneurs en carbone organique dissous	56
3.4.5 Calcul des quantités de carbone organique dissous	57
Chapitre 4: Résultats	58
4.1 Prédiction de la matière organique dissoute colorée par satellite	58
4.1.1 Relation entre les données satellitaires et les mesures de terrain.....	58
4.1.2 Modèle basé sur des mesures uniques et non-synchronisées.....	60
4.1.3 Bénéfices des mesures multiples sur le terrain et par satellite.....	62
4.1.4 Bénéfices des corrections atmosphériques.....	63

4.2 Application du modèle à deux sites d'étude au Québec	66
4.2.1 Distribution de l'eau douce dans les deux régions.....	66
4.2.2 Distribution de la matière organique dissoute colorée dans les deux régions..	69
4.2.3 Aire des lacs et matière organique dissoute colorée	72
4.2.4 Quantités de carbone organique dissous dans les deux régions.....	74
Chapitre 5: Discussion.....	78
5.1 Limites des conclusions de l'étude.....	78
5.1.1 Utilisation de données non-synchronisées et gammes de valeurs.....	79
5.1.2 Mesures répétées sur le terrain et par satellite	79
5.1.3 Bénéfices des corrections atmosphériques.....	80
5.1.4 Résolution spatiale et étude de la distribution des lacs.....	82
5.1.5 Quantités de carbone organique dissous dans le paysage	83
5.2 Recommandations pour construire des modèles similaires	84
5.2.1 Travail de terrain.....	84
5.2.2 Acquisition et traitement des images satellite.....	85
5.3 Articulation entre deux disciplines : biologie et géomatique	86
5.3.1 Créateurs et utilisateurs des outils de télédétection	87
5.3.2 Implications biologiques des modèles issus de la géomatique	88

Liste des tableaux

Tableau 1 : Intervalles de longueurs d'onde des trois couleurs du visible des principaux satellites d'observation de la Terre	12
Tableau 2 : Campagnes d'échantillonnage dans les régions d'Eastmain et Abitibi et fréquences de revisite pour les lacs présents sur l'imagerie satellitaire.....	36
Tableau 3 : Récapitulatif des images <i>Advanced Land Imager</i> acquises pour les régions d'Eastmain et d'Abitibi. Les coordonnées géographiques sont indiquées en degrés décimaux.....	40
Tableau 4 : Les 9 bandes spectrales d'une image <i>Advanced Land Imager</i> et la bande panchromatique.....	42
Tableau 5 : Facteurs de calibration des valeurs numériques des images <i>Advanced Land Imager</i> établis par Chander et al. (2009).....	45
Tableau 6 : Données utilisées pour les 5 modèles envisagés pour associer les mesures de terrain de matière organique dissoute colorée et les images satellite.....	51
Tableau 7 : Modèles de prédiction de la matière organique dissoute colorée. N représente les effectifs d'entraînement des modèles, a et b les paramètres des régressions sous la forme $Y=aX^b$. L'erreur type est calculée en unités d'absorbance a-440 et se base sur l'effectif de test n du modèle.....	62
Tableau 8 : Surfaces d'eau douces observées dans les deux images satellites représentatives des régions d'Eastmain et d'Abitibi.....	67
Tableau 9 : Distribution de la taille des lacs observée dans deux images satellites représentatives des régions d'Eastmain et d'Abitibi.....	68
Tableau 10 : Surfaces cumulées des lacs selon leur superficie dans les régions boréales d'Eastmain et d'Abitibi.....	69
Tableau 11 : Absorbance de la matière organique dissoute colorée à 440 nm observée sur le terrain et calculée sur l'imagerie.....	70
Tableau 12 : Volumes d'eau et quantités de carbone organique dissous estimés dans deux régions boréales du Québec.....	76

Liste des figures

Figure 1 : Transport en hélicoptère pour l'échantillonnage des lacs boréaux du Québec par l'équipe de limnologues du département de Biologie de l'Université du Québec à Montréal (photographie : Marie-Ève Ferland, 2005).....	10
Figure 2 : Mesure d'une valeur d'absorbance à 440 nm. Cette valeur indique la quantité de matière organique dissoute colorée.....	14
Figure 3 : Courbes d'absorbance typiques pour la matière organique (tirets larges), l'eau (points tillés) et la chlorophylle (ligne pleine) dans une masse d'eau. Les limites des bandes bleue, verte et rouge des principaux satellites d'observation de la Terre sont indiquées.	15
Figure 4 : Schéma de développement d'un modèle de prédiction par satellite des valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorée à 440 nm (a-440) et des valeurs de carbone organique dissous (COD).	18
Figure 5 : D'après Kutser et al. (2005a). Corrélation entre des valeurs de matière organique dissoute colorée mesurées à 420 nm et des valeurs de ratio de bandes B2/B3 modélisées en 8-bit (B) et 16-bit (D).	21
Figure 6 : Relation entre le ratio de bandes B2/B3 calculé à partir d'images <i>Advanced Land Imager</i> acquises en Suède le 27 juin 2003 et en Finlande le 14 juillet 2002, et les mesures d'absorbance de la matière organique dissoute colorée à 420 nm (a-420). La ligne pleine indique la courbe de régression (d'après Kutser et al. 2005b).	23
Figure 7 : Localisation des lacs échantillonnés à Eastmain (triangles) et en Abitibi (losanges) dans la province du Québec.....	33
Figure 8 : Histogramme de fréquences dans la bande infrarouge (MS 5) de l'image <i>Advanced Land Imager</i> du 15 juin 2010 pour la région d'Eastmain. La barre verticale indique la valeur seuil sélectionnée pour séparer l'eau de la végétation sur l'image. .	54
Figure 9 : Ratios de bandes B2/B3 des images satellites et valeurs d'absorbance a-440 mesurées dans 53 lacs des deux régions.	59
Figure 10 : Représentation en échelle \log_{10} du modèle 5 (ligne en pointillé) basé sur 27 lacs d'entraînement et testé sur 26 lacs.	60

- Figure 11** : Résidus standardisés des régressions de deux modèles basés sur 4 images de 2010 corrigées (triangles) ou non corrigées pour l'atmosphère (croix)..... 64
- Figure 12** : Valeurs de ratio B2/B3 obtenus à partir de 4 images *Advanced Land Imager* corrigées (ordonnées) et non corrigées pour l'atmosphère (abscisses)..... 65
- Figure 13** : Histogrammes de fréquences pour l'absorbance de la matière organique dissoute colorée des lacs observées sur les images d'Eastmain (noir) et d'Abitibi (blanc). La couleur grise représente la superposition des deux histogrammes. 71
- Figure 14** : Diagrammes de densité pour la relation entre l'aire des lacs et l'absorbance a-440 estimée à l'aide d'images *Advanced Land Imager* et du modèle 5 dans deux régions du Québec. Le graphe est constitué d'une matrice de 200 cellules de densité. L'échelle indique la probabilité de trouver un point dans chaque cellule..... 73
- Figure 15** : Relation entre l'absorbance de la matière organique dissoute colorée à 440 nm et la teneur en carbone organique dissous pour 94 échantillons de la région d'Abitibi (ligne pleine) et 356 échantillons de la région d'Eastmain (ligne en pointillés)..... 75

Liste des abréviations

a-CDOM : Absorbance of Colored Dissolved Organic Matter

a-440 : Valeur d'absorbance mesurée à 440 nm

ALI : Advanced Land Imager

CDOM : Colored Dissolved Organic Matter pour Matière Organique Dissoute Colorée

DOC: Dissolved Organic Carbon, pour Carbone Organique Dissous

EO-1 : Earth Observing-1

GPS : Global Positioning System

L1GST : Level 1 Geometric Systematic Terrain Corrected

LDCM : Landsat Data Continuity Mission (aussi appelé Landsat 8)

NASA : National Aeronautics and Space Administration

SIG : Système d'Information Géographique

STRM : Shuttle Radar Topographic Mission

UdeM : Université de Montréal

UQÀM : Université du Québec À Montréal

USGS : United States Geological Survey

Remerciements

J'aimerais remercier toutes les personnes que j'ai rencontrées lors de cette maîtrise pour leur aide et leur attention. Je remercie donc tout d'abord mes co-directeurs Jeffrey Cardille et Paul de Giorgio pour leur encadrement. J'ai beaucoup apprécié leurs façons de travailler et d'encadrer mon travail. Je suis conscient que ce projet de recherche a bénéficié d'une grande visibilité sur la scène scientifique. Je remercie mes co-directeurs pour leur confiance, leurs encouragements, et surtout leur aide dans l'interprétation des résultats de recherche, car ils ont su identifier des conclusions intéressantes que je n'aurais jamais formulées sans eux.

En outre, ce projet a bénéficié de nombreux apports de spécialistes. Je remercie Stuart Fry pour son aide dans la commande des images et Yacine Bouroubi pour ses explications pour mener les corrections atmosphériques. Je remercie l'ensemble des membres du groupe de limnologie de l'UQAM pour leurs conseils durant nos échanges. Je garde un bon souvenir de ces belles rencontres avec les étudiants de l'UQAM que je trouve très sympathiques.

Je salue les collègues du labo, Kevin, Katerine, Marc-Élie, David et Alexis pour leur humour et leur bienveillance. Je remercie aussi les membres du groupe des Croque-Complexe avec qui nous partageons quelques repas autour de questions complexes, avec Lael, Rodolphe, Guillaume, Kristel, Caroline, Cristiane, Samuel et Clément. Je remercie aussi le personnel du département de géographie pour leur soutien dans toutes mes démarches.

Enfin, j'embrasse ma famille qui m'a toujours soutenu dans la poursuite de mes études et je les remercie pour toutes les valeurs que j'ai reçues.

Introduction

Le rôle des lacs boréaux dans le cycle du carbone atmosphérique est aujourd'hui en redéfinition pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'inventaire des lacs a doublé avec l'arrivée des premières images satellites (Thienemann 1925 ; Downing et al. 2006). De plus, ces inventaires ont montré que la majorité des eaux continentales ne se concentrent pas dans les grands lacs, mais dans les millions de lacs de moins de 1 km². Les écologistes ont longtemps omis les lacs des processus écologiques globaux car ils représentaient une partie infime de la surface terrestre. Pourtant, les bilans de carbone du biome boréal augmentent radicalement si l'on considère le carbone contenu dans les lacs boréaux (Molot & Dillon 1996). De plus, les émissions de carbone atmosphériques semblent se concentrer dans les lacs de plus petites tailles (Kelly et al. 2001). Enfin, les modèles globaux du cycle du carbone du plus récent rapport sur les changements climatiques ne prennent pas en considération l'activité des écosystèmes aquatiques continentaux. En effet, les lacs et rivières sont modélisés comme des convoyeurs inactif du carbone depuis les écosystèmes terrestres jusqu'aux océans. Pourtant, sur la totalité du carbone exporté vers les lacs, seulement 21% rejoindrait effectivement les océans (Cole et al. 2007). Un suivi global des quantités de carbone organique dissous des eaux continentales permettrait donc de réajuster le rôle des lacs boréaux dans le cycle du carbone atmosphérique.

L'estimation d'un bilan régional en carbone des lacs boréaux repose sur des mesures de terrain qui sont coûteuses en logistique et implique souvent l'utilisation d'hydravions ou d'hélicoptères. Un échantillonnage représentatif des millions de lacs boréaux ne peut pas reposer seulement sur un travail de terrain et nécessite une méthode d'extrapolation. Heureusement, les teneurs en carbone organique dissous des lacs sont souvent corrélées avec leur quantité de matière organique dissoute colorée, qui est visible depuis l'espace. Les images satellites permettent donc théoriquement d'estimer la matière organique dissoute colorée.

Le développement de modèles de prédiction par satellite a vu le jour tardivement (Kutser et al. 2005a, 2005b) en raison des limitations imposées par les lacs boréaux. En effet, les satellites utilisés pour la détection de la matière organique des milieux aquatiques comme MODIS et SeaWiFS excluent la majorité des lacs en raison de leur résolution spatiale (300 à 1200 m). En outre, les satellites d'observation de la Terre comme Landsat ou SPOT offrent une résolution spatiale plus adaptée (30 m) mais leur radiométrie (8-bit) est encore insuffisante. En effet, la gamme d'opacité des lacs boréaux est relativement étroites et demande une radiométrie du capteur supérieure à 11-bit (Kutser et al. 2005a).

Le satellite Landsat 8 lancé en février 2013 offre une radiométrie améliorée (16-bit) qui est adaptée à l'étude des lacs boréaux. En effet, des images acquises par le prototype de Landsat 8 lancé en 2000, *Advanced Land Imager*, ont été utilisées par Kutser et al. (2005a) pour développer un modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée dans les lacs boréaux en Suède et en Finlande. Leur modèle a été appliqué dans 5 régions riches en lacs pour estimer le carbone organique dissous (Kutser et al. 2009). Les campagnes de terrain menées en Suède et en Finlande pour le développement du modèle de prédiction ont été coordonnées dans un délai maximal d'un mois avec les dates d'acquisition des images satellite. En effet, la synchronisation de l'acquisition des données de terrain avec les images satellites permet de limiter les variations temporelles des quantités de matière organique. La synchronisation est souvent préconisée dans les études du genre (Brando & Dekker 2003 ; Hirtle & Rencz 2003 ; Kutser et al. 2005a, 2005b ; Lunetta et al. 2009 ; Winn et al. 2009). Cependant, la synchronisation de l'acquisition des données limite beaucoup le temps passé sur le terrain et donc le nombre de lacs échantillonnés.

Des jeux de données de terrain déjà existants regroupent des centaines de mesures réalisées dans le biome boréal. Par exemple, les limnologues du Québec ont visités des centaines de lacs et ont construit des jeux de données d'excellente qualité. Avec l'arrivée prochaine des images de Landsat 8, les nombreux sites étudiés pourront bénéficier d'images de bonne qualité ayant des spécificités adaptées à l'étude du carbone des lacs boréaux. Pourtant, la possibilité d'utiliser des données de terrain existantes avec des images

récentes n'a pas encore été explorée. En outre, lorsqu'un lac présente plusieurs mesures au cours du temps sur le terrain, ou par le satellite, différentes stratégies de sélection des données sont possibles : regrouper les valeurs les plus proches dans le temps, du même mois, ou établir une moyenne par exemple. Ces différentes stratégies n'ont pas encore été étudiées et comparées. Ainsi, l'étude de la qualité des modèles basés sur des mesures de terrains existantes est parfaitement pertinente avec l'arrivée prochaine des images de Landsat 8 car elle permet de donner les premières recommandations de travail.

Cette étude évalue la possibilité d'utiliser des données de terrain existantes avec de nouvelles images satellites à radiométrie améliorée pour estimer le carbone organique dissous des lacs. L'étude se base sur un jeu de mesures de terrain collectées au Québec et des images satellites acquises par le prototype de Landsat 8, *Advanced Land Imager*. Les délais entre les campagnes de terrain et l'acquisition d'image satellite varient de 1 mois à 6 ans. Différentes stratégies d'utilisation des mesures répétées sur le terrain et sur le satellite sont envisagées et les différents modèles résultants sont comparés. Les distributions des lacs, les teneurs en matière et en carbone organiques dissous, sont évaluées dans deux régions boréales d'application. Enfin, les aspects pratiques de cette étude ainsi que les questions liées à l'articulation entre la biologie et la géomatique sont discutées.

Chapitre I : Contexte de l'étude

Le rôle des lacs boréaux dans le cycle du carbone atmosphérique a été mis en question avec l'arrivée des premières images satellites. En effet, les nouveaux inventaires réalisés à l'aide d'images satellites ont montré que les inventaires précédents sous-estimaient de moitié le nombre de lacs de moins de 1 km². De plus, les lacs boréaux sont très actifs dans les processus d'échanges de carbone entre les écosystèmes forestiers et l'atmosphère. Ainsi, l'incorporation des lacs boréaux dans les modèles de cycle de carbone est essentielle. Un suivi global des quantités de carbone organique dissous dans les lacs permettrait d'affiner les modèles de prédiction climatique. Cependant, un échantillonnage représentatif des 304 millions de lacs inventoriés ne peut pas reposer uniquement sur des mesures de terrain. D'autre part, l'utilisation de satellites d'observation de la Terre pose plusieurs limitations pour étudier le carbone organique des lacs boréaux. Avec l'arrivée d'une nouvelle génération de satellites d'observation de la Terre, plusieurs de ces limitations sont dépassées, et une mesure à l'échelle régionale du carbone organique dissous dans les lacs boréaux est maintenant possible.

I.1 Les lacs boréaux jouent un rôle majeur dans le cycle du carbone atmosphérique

Les lacs boréaux jouent un rôle majeur dans le cycle du carbone atmosphérique pour plusieurs raisons. Les premiers recensements globaux des lacs ont montré que les lacs recouvraient une infime surface de la planète. Les écologistes ont ainsi longtemps omis les lacs dans l'étude des processus écologiques globaux. Pourtant, des inventaires par satellites réalisés en 2006 ont montré que la planète abriterait deux fois plus de lacs qu'on ne le pensait lors de précédents recensements (Downing et al. 2006). De plus, l'avancement des

recherches en biologie dans les milieux boréaux montre que les lacs sont extrêmement actifs dans les processus d'échange de matière organique entre les écosystèmes forestiers et l'atmosphère. Ainsi, le rôle des lacs boréaux dans les processus écologiques globaux est en pleine redéfinition par la communauté scientifique.

1.1.1 L'inventaire des lacs a presque doublé avec l'arrivée des images satellites

Les lacs ont longtemps été complètement ignorés des processus écologiques globaux. En effet, les écologistes considéraient que les écosystèmes de très petite surface ne pouvaient pas jouer un rôle majeur dans les processus globaux. Ainsi, hormis les quelques grands lacs, les lacs ont été résolument écartés des études écologiques à grande échelle (Downing 2010). Deux découvertes récentes ont modifié cette conception. Premièrement, les plus petits lacs s'avèrent beaucoup plus nombreux qu'on ne le pensait. Deuxièmement, la surface cumulée des plus petits lacs représente une plus grande surface que celle des grands lacs. En effet, l'arrivée de nouvelles sources de données satellitaires ayant une résolution spatiale améliorée a permis d'ajuster l'inventaire des lacs, qui n'avait pas été mis à jour depuis près d'un siècle :

- En 1925, on estimait que les lacs recouvraient 2.5 millions de km², soit 1.8% des terres émergées (Thienemann 1925) ;
- Depuis 2006, on estime que les lacs recouvrent 4.2 millions de km², soit 3% des terres émergées (Downing et al. 2006).

Ainsi, depuis les six dernières années, notre estimation de la surface couverte par des lacs a presque doublé. Durant le siècle dernier, les scientifiques assumaient que les grands lacs représentaient la majorité des eaux continentales. En réalité, ce sont les plus petits lacs qui détiennent la majorité des eaux continentales : plus de la moitié des 4.2 millions de km² d'eau douce se trouve dans des lacs de moins de 1 km² (Downing et al.

2006). Ce constat dérouté le raisonnement qui visait à étudier uniquement les grands lacs en pensant qu'ils occupaient la majorité de l'espace. Ainsi, il semble que les petits lacs soient au moins aussi importants que les grands lacs dans les études écologiques globales.

En considérant l'ensemble des lacs, petits et grands, leur surface représente environ 3% des surfaces émergées, mais leur émission annuelle de carbone équivaldrait celle des écosystèmes terrestres (Tranvik et al. 2009). La part des plus petits lacs dans ces bilans est prépondérante.

1.1.2 Les lacs boréaux sont très actifs dans les processus d'échange de carbone

Les plus petites étendues d'eau semblent échanger la plupart du carbone avec les écosystèmes terrestres et l'atmosphère. De plus, une grande partie du carbone contenu dans les écosystèmes boréaux se concentre dans les lacs (Molot & Dillon 1996). Aucun bilan n'a été complété à ce jour. Néanmoins, des travaux d'estimation permettent de donner une première idée de l'amplitude du phénomène.

Les lacs boréaux étudiés au Québec sont tous saturés en CO₂ et dégagent du CO₂ dans l'atmosphère (Roehm et al. 2009). Spécifiquement, l'émission de CO₂ atmosphérique serait plus importante dans les lacs de petite taille que les lacs de grande taille (Kelly et al. 2001). Deux phénomènes expliquent un tel niveau de transfert de carbone : Premièrement, l'activité biologique est très forte dans les eaux continentales boréales. Deuxièmement, le carbone transport du carbone de puis les écosystèmes terrestres vers les océans est un « transport actif ».

Les lacs boréaux sont extrêmement riches en énergie et en nutriments, et les échanges de matière et d'énergie entre les organismes vivants sont très importants. On mesure ces échanges par l'activité biologique, qui est très importante dans les eaux continentales boréales :

- par rapport aux écosystèmes terrestres (33 fois plus d'activité) ;
- par rapport aux océans (115 fois plus d'activité).

De plus, le « transport actif » du carbone dans le réseau hydrographique depuis les écosystèmes terrestres vers les océans modifie les bilans globaux. Cole et al. (2007) a étudié le devenir de 2.9 Pg de carbone organique originaire des écosystèmes terrestre boréaux, et sur l'ensemble du carbone présent au départ :

- 21% rejoint les océans ;
- 31% sédimente dans les réseaux des lacs et rivières ;
- 48% est dégagé sous forme de CO₂ atmosphérique.

Concernant la fraction de carbone qui est dégagée sous forme de CO₂ atmosphérique, le réseau de ruisseaux est responsable de 25% des émissions de carbone depuis les milieux aquatiques. Pourtant, les ruisseaux représentent moins de 1% de la surface des eaux continentales boréales (Teodoru et al. 2011). Les eaux continentales jouent donc un rôle particulièrement important dans l'importation de carbone depuis les écosystèmes terrestres et l'émission de CO₂ vers l'atmosphère.

Ainsi, si près de la moitié du carbone originalement dissous est dégagé sous forme de CO₂ atmosphérique, le rôle des eaux continentales dans le cycle global du carbone semble être à redéfinir.

1.1.3 Carbone des lacs et changements climatiques

Le suivi global des quantités de carbone des lacs boréaux est nécessaire pour plusieurs raisons. Premièrement, il permettrait d'ajuster les modèles de prévision des changements climatiques. En effet, malgré la prise de conscience de l'importance du rôle des eaux continentales boréales dans le cycle du carbone, les modèles globaux de prédiction

de changements climatiques considèrent toujours les eaux continentales comme des convoyeurs « inactifs » du carbone depuis les écosystèmes terrestres vers les océans¹. De plus, les modèles couplés entre climat et cycle du carbone utilisés par le Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat pour produire les scénarios climatiques ignorent compétemment les lacs (Tranvik et al. 2009). Ainsi, un bilan régional du carbone organique dissous dans les lacs permettrait d'ajuster les modèles de changements climatiques. En outre, l'étude des variations de quantités de carbone organique dissous dans les lacs boréaux permettrait aussi d'affiner les modèles d'échanges de carbone dans le biome boréal.

D'autre part, un suivi global des quantités de carbone dans les lacs boréaux permettrait d'indiquer des changements à l'échelle des bassins versants. En effet, les milieux aquatiques sont à la plus basse altitude des paysages. Ainsi, les lacs et les rivières reçoivent la matière organique dérivée des terres environnantes. La matière organique est ensuite en partie acheminée vers les océans et en partie dégagée dans l'atmosphère sous forme de CO₂. Des changements de températures, de régimes de précipitations et de climat au niveau du bassin versant ont donc un impact direct sur les exportations de matières organiques vers les lacs et les rivières. Le suivi des quantités de carbone organique dissous dans les lacs permettrait ainsi d'identifier des changements dans les écosystèmes forestiers environnants en lien avec des changements d'ordre climatique. Réciproquement, la connaissance de l'évolution des quantités de carbone organique dissous permet de prédire l'impact des changements climatiques à la fois sur les écosystèmes aquatiques et sur les écosystèmes terrestres.

¹ *Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth Assessment Report on Climate Change (2007).*

En résumé

- Les lacs de moins de 1 km² représentent la moitié de la surface des eaux continentales.
 - Les lacs boréaux jouent un rôle majeur dans le cycle global du carbone, mais les bilans régionaux sont encore incertains.
 - Les lacs boréaux peuvent servir de sentinelles pour étudier les changements climatiques.
-

1.2 Les images satellites rendent possible l'étude du carbone des lacs boréaux à l'échelle régionale

Le suivi du carbone organique dissous dans lacs boréaux est nécessaire pour mieux comprendre le rôle des lacs boréaux dans le cycle du carbone atmosphérique. Cependant, les lacs boréaux sont très nombreux et difficiles d'accès. Ainsi, un suivi à grande échelle ne peut pas reposer uniquement sur des mesures terrain. L'utilisation d'images satellites est aujourd'hui possible mais présente plusieurs limitations.

1.2.1 Un suivi régional ne peut pas reposer uniquement sur des mesures de terrain

Un suivi régional des teneurs en carbone organique dissous dans les lacs boréaux implique d'échantillonner un très grand nombre de lacs. On dénombre plus de 304 millions de lacs sur la planète (Downing et al. 2006). Ainsi, peu d'études présentent des données représentatives d'une échelle régionale ou mondiale. La plus grande étude globale a été réalisée par des chercheurs en Suède qui ont compilé un jeu de données de plus de 7 500 lacs présents dans différentes zones climatiques (Sobek et al. 2007). Ces jeux de données ont permis d'établir des relations entre la concentration en carbone organique et les conditions climatiques. Hormis cette étude, aucune évaluation à cette échelle n'a été réalisée.

Les régions boréales sont très riches en lacs, mais sont aussi difficilement accessibles par les scientifiques. L'échantillonnage des lacs dans les régions boréales demande une logistique considérable. Par exemple, l'équipe de limnologues de l'Université du Québec à Montréal doit fréquemment de se déplacer en hélicoptère ou en hydravion pour étudier certains lacs boréaux reculés (Figure 1).



Figure 1: Transport en hélicoptère pour l'échantillonnage des lacs boréaux du Québec par l'équipe de limnologues du département de Biologie de l'Université du Québec à Montréal (photographie : Marie-Ève Ferland, 2005).

Chaque année, l'équipe de limnologues de l'Université du Québec à Montréal échantillonne une cinquantaine de lacs. À titre indicatif, on dénombre près de 2 millions de lacs dans la province du Québec. Ainsi, un suivi régional des teneurs en carbone organique

dissous des lacs boréaux ne peut pas se baser uniquement sur des campagnes de terrain, et une méthode d'extrapolation est nécessaire.

Des modèles de simulation permettent de prédire des teneurs en carbone dans un grand nombre de lacs (Cardille et al. 2007 ; Cardille et al. 2009) mais repose sur un échantillonnage représentatif de la zone étudiée. Dans le cadre de régions boréales reculées, l'utilisation de ces modèles de simulation demanderait un travail d'échantillonnage considérable. Ainsi, une méthode basée sur l'imagerie spatiale serait bienvenue. Les images satellites permettent de recouvrir de grandes régions, souvent à l'échelle d'un pays. La matière organique dissoute colorée des lacs est visible depuis l'espace, et permet de prédire la teneur en carbone organique dissous. Cependant, les techniques d'analyse d'images satellite pour estimer la matière organique dissoute colorée se sont d'abord développées pour les océans. Les premiers résultats concluants pour étudier le carbone dans les lacs boréaux par satellite ont vu le jour en 2005 (Kutser 2005a, 2005b).

1.2.2 Principe d'estimation d'un composé dissous par satellite

Une image satellite est une mesure optique d'un spectre réfléchi par la Terre. La lumière du soleil est réfléchi par la surface de la Terre, et cette lumière est altérée par les constituants qui la réfléchissent. L'étude du spectre de la lumière réfléchi permet de caractériser les constituants dissous dans la masse d'eau qui la réfléchit. C'est souvent la couche superficielle de la masse d'eau qui réfléchit la lumière. La profondeur de pénétration de la lumière dépend de l'inclinaison du soleil, de la qualité de l'atmosphère, de la turbidité de l'eau, et la concentration en matières en suspension ou dissoutes dans l'eau. Les constituants dissous dans l'eau modifient à la fois l'intensité du spectre lumineux réfléchi, mais aussi la qualité du spectre. Enfin, les composés présents dans l'eau absorbent de la lumière dans des plages de couleurs différentes. Cette propriété d'absorbance sélective de certains constituants permet d'estimer leur présence par satellite.

Dans une image numérique, la couleur affichée est décomposée en valeurs de bleu, vert et rouge. La couleur visible résulte donc d'une combinaison de valeurs dans les canaux bleu, vert et rouge. Pour chaque pixel, la couleur résulte de l'addition des trois valeurs. Par exemple, des valeurs égales de rouge et de bleu, donnent une couleur violette. Le capteur enregistre la couleur de la même façon que l'image numérique la restitue. Le capteur reçoit le spectre réfléchi par la planète et mesure les luminances dans les canaux bleu, vert et rouge. À l'inverse, si l'on ne sépare pas la couleur réfléchie en trois canaux (i.e. on enregistre la luminance dans un seul canal), on obtient une image en noir et blanc que l'on appelle aussi panchromatique (i.e. qui rassemble toutes les gammes de couleurs).

Couleur	Bande	Longueurs d'ondes regroupées
Bleu	1	450 – 520 nm
Vert	2	520 – 600 nm
Rouge	3	630 – 690 nm

Tableau 1 : Intervalles de longueurs d'onde des trois couleurs du visible des principaux satellites d'observation de la Terre

Chaque canal regroupe une gamme de couleurs voisines. Par exemple, le canal bleu regroupe les gammes de bleu foncé et le bleu clair. On appelle longueur d'onde une mesure exacte de couleur. Ainsi, chaque canal regroupe une gamme de longueurs d'ondes voisines (Tableau 1).

La détection d'un composé chimique repose sur l'étude de son spectre réfléchi. Le spectre réfléchi étudié est décomposé en bandes spectrales par le capteur. Si le composé étudié absorbe sélectivement de la lumière dans certaines longueurs d'ondes, les bandes spectrales qui contiennent ces couleurs peuvent indiquer la présence de ce composé.

Pour illustrer ce principe, l'exemple le plus simple est la télédétection de la végétation. Les espèces végétales utilisent l'énergie lumineuse pour croître. Les cellules

responsables de la récupération de l'énergie lumineuse contiennent des molécules de chlorophylle. Cette molécule de chlorophylle absorbe l'énergie lumineuse et la transforme en énergie utilisable par les cellules végétales. La chlorophylle absorbe spécifiquement l'énergie lumineuse dans les couleurs bleu à violet (riche en énergie) et rouge (faible en énergie). Ainsi, le vert n'est pas absorbé. C'est pourquoi les végétaux nous apparaissent verts. Sur une image satellite, on pourra donc utiliser les canaux bleu et rouge, où l'absorption d'énergie lumineuse par la chlorophylle y est maximale, pour identifier les pixels qui recouvrent de la végétation.

Si le principe est très simple pour le cas des végétaux, il l'est moins pour le cas du carbone des lacs boréaux. En effet, une partie du carbone est incolore, et l'autre partie se trouve dans des molécules qui absorbent dans différentes régions du spectre lumineux.

1.2.3 La matière organique dissoute colorée est visible depuis l'espace

Une partie du carbone organique est sous forme de carbone libre, qui est incolore. Par conséquent, cette partie du carbone n'affecte pas le spectre réfléchi et reste indétectable sur une image satellite. Une autre partie du carbone organique se trouve sous forme de matière organique dissoute colorée. La matière organique est issue de la décomposition des êtres vivants dans l'eau et des apports de matière organique provenant des milieux environnants.

On mesure la quantité de matière organique colorée avec un spectromètre, qui mesure la quantité de lumière qui traverse une cuvette d'eau (Figure 2). En comparant la valeur obtenue pour l'échantillon et une cuvette de référence, on calcule une valeur d'absorbance. Pour la matière organique colorée, on utilise un faisceau lumineux réglé à la valeur de 440 nm, qui correspond à une lumière bleue (Figure 2).

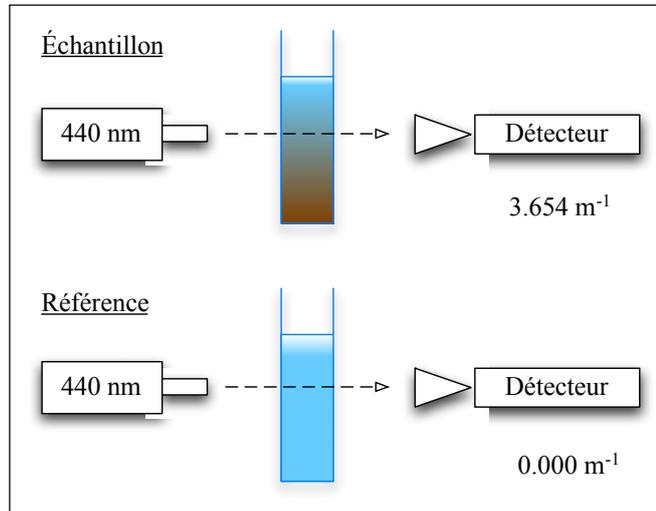


Figure 2 : Mesure d'une valeur d'absorbance à 440 nm. Cette valeur indique la quantité de matière organique dissoute colorée.

La quantité de matière organique colorée est très souvent proportionnelle à la quantité de carbone organique dissous : plus il y a de matière organique dissoute colorée, plus il y a de carbone organique dissous (Sipelgas et al. 2003). Cette relation est souvent spécifique à une zone géographique et reste influencée par la saison. D'autre part, les quantités de carbone organique dissous et de matière organique dissoute colorée varient de façon synchrone au cours du temps (Pace & Cole 2002). Ainsi, les relations établies pour une région semblent se maintenir dans le temps. L'absorbance de la matière organique dissoute colorée est donc une valeur qui permet d'estimer la quantité de carbone organique dissous dans un lac.

La matière organique dissoute colorée absorbe la lumière dans de nombreuses longueurs d'ondes. Elle est responsable de la couleur brunâtre de certains lacs. Il n'y a pas de plage de longueurs d'ondes qui soit spécifiquement absorbée par la matière organique colorée. L'absorption de la lumière par la matière organique dissoute décroît exponentiellement pour des longueurs d'ondes croissantes (ligne en tirets larges, Figure 3).

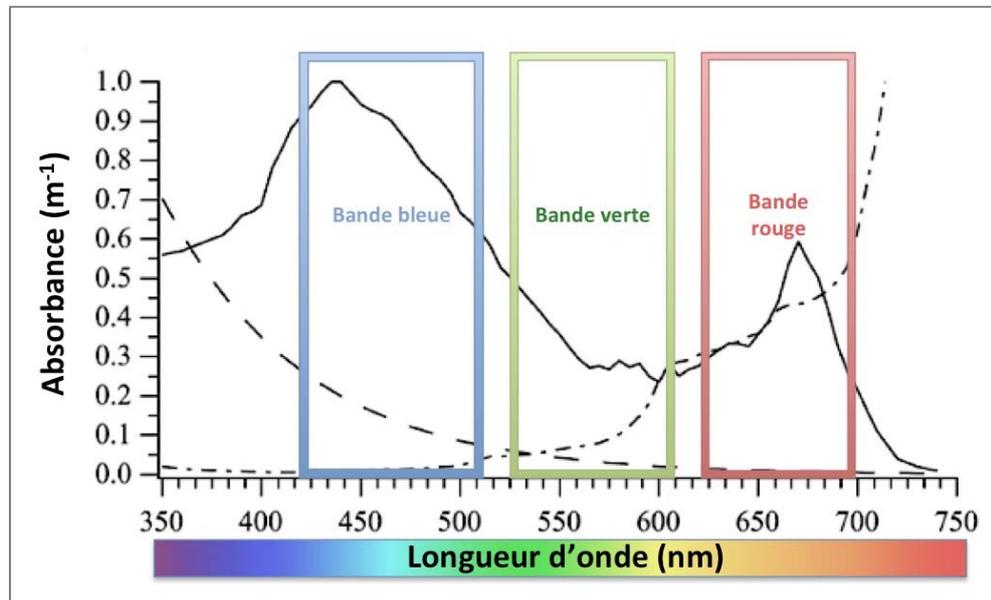


Figure 3 : Courbes d'absorbance typiques pour la matière organique (tirets larges), l'eau (points tillés) et la chlorophylle (ligne pleine) dans une masse d'eau². Les limites des bandes bleue, verte et rouge des principaux satellites d'observation de la Terre sont indiquées.

La bande bleue (Figure 3) semble initialement la plus pertinente pour étudier la matière organique dissoute colorée, puisque l'absorption par la matière organique dissoute colorée y est maximale. Cependant, l'utilisation de la bande bleue pose deux problèmes :

1. L'eau en suspension dans l'atmosphère reflète beaucoup de lumière bleue. C'est pour cette raison que le ciel nous apparaît bleu. Cette bande présente donc beaucoup de bruit et augmente l'incertitude sur la mesure.

² D'après *Ocean Optics Protocols For Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume 4* (NASA/TM-2003-211621/Rev4-Vol.IV), basé sur les données de Prieur et Sathyendranath (1981), Mobley et Sundman (2000), et Morel et Maritnorenna (2004). Rapport disponible sur <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/docs/>

2. La chlorophylle des végétaux absorbe beaucoup dans cette bande (ligne pleine, Figure 3) et peut masquer l'effet d'absorption de la matière organique dissoute colorée.

Afin de contourner ces deux problèmes, l'utilisation de l'information fournie par les deux autres bandes du visible (bandes verte et rouge) est nécessaire. La solution proposée par Kutser et al. (2005) pour étudier la matière organique dissoute colorée des lacs boréaux est d'utiliser les bandes verte et rouge suivant un ratio. La matière organique colorée absorbe plus dans la bande verte que dans la bande rouge. Inversement, la chlorophylle absorbe beaucoup plus dans la bande rouge que dans la verte. Ainsi, un ratio entre les bandes verte et rouge normalise l'effet d'absorption de la chlorophylle. Cette méthode est aussi beaucoup utilisée pour l'étude de la matière organique des océans.

Les océanographes ne sont pas confrontés aux limitations spatiales imposées par la taille des lacs, et peuvent donc utiliser des images à faible résolution spatiale. Les images à faible résolution spatiale (avec des pixels de 300 à 1200 m de côté, contre 5 à 30 m pour les images à haute résolution spatiale) offrent un plus grand nombre de bandes spectrales et ainsi une détection plus fine des constituants. En effet, l'énergie lumineuse est partagée dans un moindre nombre de pixels, et peut être partagée dans un plus grand nombre de bandes spectrales.

Selon Mannino et al. (2008) l'approche la plus pratique pour estimer la matière organique dissoute colorée des océans est l'application d'un ratio de bandes. Étrangement, ces auteurs furent en 2008 les premiers à valider un algorithme d'estimation de la matière organique dissoute colorée par les satellites MODIS-Aqua et SeaWiFS. En 2009, Morel & Gentili ont étudié la matière organique avec les ratios de réflectance $R(412)/R(443)$ et $R(490)/R(555)$ sur l'ensemble des océans du globe. Dans leur étude, le premier ratio est plus sensible à la matière organique qu'à la chlorophylle, et le second ratio est principalement influencé par la chlorophylle. Dans une autre étude, Doxaran et al. (2004) ont mesuré les réflectances *in situ* des eaux de surfaces (2 à 20 cm de profondeur) dans un

estuaire du Royaume Uni. Ils ont obtenu une très bonne corrélation entre le ratio $R(400)/R(600)$ et la concentration de matière organique colorée.

Ainsi, les canaux vert et rouge des satellites d'observation de la Terre permettent d'évaluer la quantité de matière organique dissoute colorée, qui est elle-même corrélée à la concentration en carbone organique. L'étude de la corrélation entre les valeurs de ratio de bandes verte et rouge et les teneurs en matière organique dissoute colorée permet de développer un modèle de prédiction par satellite.

1.2.4 Développement d'un modèle de prédiction du carbone organique dissous par satellite

Pour développer un modèle de prédiction du carbone organique dissous, deux courbes de régressions sont nécessaires. La première courbe est une régression entre des données extraites de l'image satellite et des données mesurées sur le terrain. Les valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorée mesurées sur le terrain (par exemple à 440 nm) sont corrélées avec les valeurs de ratio de bandes B2/B3 extraites des images satellites pour les pixels correspondant aux lacs échantillonnés. Cette régression permet de construire un modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée par satellite.

La seconde courbe est une corrélation entre des mesures de terrain d'absorbance de matière organique dissoute colorée et des mesures de terrain de teneurs en carbone organique dissous. Cette régression se base sur des mesures de terrain régionales. En effet, les relations entre les valeurs d'absorbance et les teneurs en carbone organique dissous sont souvent bien corrélées mais la forme de la relation varie d'une région à une autre. De même, la relation entre le taux de carbone organique dissous et la saturation en dioxyde de carbone pCO_2 , qui indique la quantité de carbone potentiellement dégazé dans l'atmosphère, varie aussi d'une région à une autre (Roehm et al. 2009 ; Lapierre & Del Giorgio 2012). Ainsi, l'étude du carbone organique dissous, et potentiellement des dégagements de carbone vers l'atmosphère, doit être régionalisé.

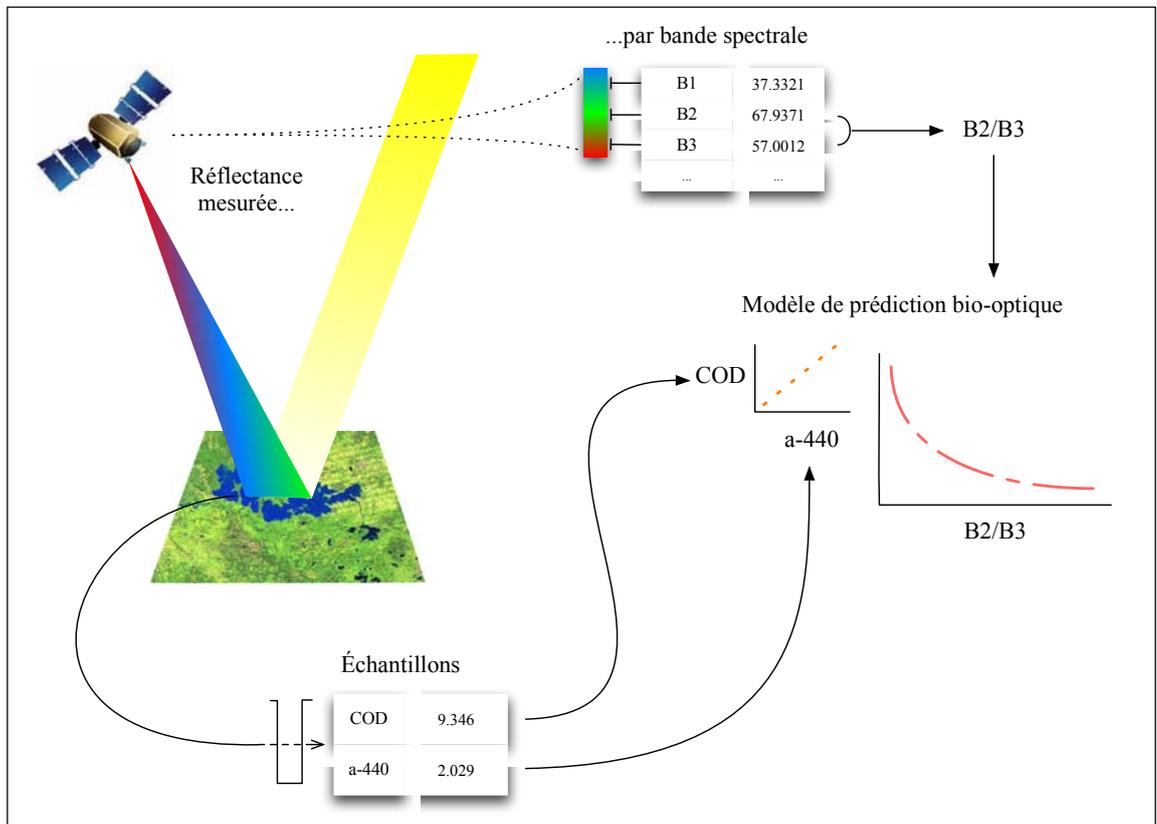


Figure 4 : Schéma de développement d'un modèle de prédiction par satellite des valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorée à 440 nm (a-440) et des valeurs de carbone organique dissous (COD).

La première régression permet de prédire la matière organique par satellite, et la seconde courbe permet d'estimer la teneur en carbone organique des lacs. Finalement, trois types de données sont nécessaires pour développer un modèle de prédiction du carbone organique dissous par satellite (Figure 4). Le carbone organique dissous et l'absorbance de la matière organique dissoute colorée sont mesurés à partir des échantillons d'eau collectés sur le terrain. Une relation est établie entre les mesures de carbone et de matière organique sur le terrain. L'imagerie satellitaire de la région est acquise. Les coordonnées

géographiques des lacs étudiés permettent d'extraire les valeurs des pixels environnant les zones d'échantillonnages dans les canaux verts et rouges (B2 et B3). Une courbe de régression entre la mesure d'absorbance de la matière organique dissoute colorée avec le ratio de bandes B2/B3 complète le modèle de prédiction (Figure 4).

Ainsi, l'utilisation d'une image satellite prise par un satellite d'observation de la Terre permet d'estimer des teneurs en carbone organique dissous dans un grand nombre de lacs, et d'estimer leur teneur en carbone organique dissous à partir de régressions régionales.

En résumé

-
- Un échantillonnage représentatif des 304 millions de lacs ne peut pas se baser uniquement sur des mesures de terrain.
 - Les images satellites permettent d'estimer l'absorbance de la matière organique dissoute colorée, qui est corrélée avec la teneur en carbone organique dissous des lacs.
 - Un modèle de prédiction des teneurs en carbone organique dissous par satellite peut être établi à partir de mesures de terrain et d'images satellites correspondantes.
-

1.3 Premiers modèles de prédiction par satellite

Les premiers modèles de prédiction par satellite de la matière organique dissoute colorée des lacs boréaux par satellite sont apparus relativement tardivement. En l'état actuel des connaissances lors de la réalisation de cette étude, un seul laboratoire a obtenu un modèle de prédiction concluant. Le faible nombre d'études sur le sujet s'explique par les limitations des satellites actuels pour étudier les lacs boréaux. En effet, les lacs boréaux sont très petits et opaques vis-à-vis des résolutions spatiales et radiométriques des satellites. Un satellite prototype a cependant donné de bons résultats dans une étude réalisée en Suède et en Finlande. Ainsi, il semble que la prochaine génération de satellites d'observation de la

Terre, qui bénéficiera des avancées technologiques de ce prototype, permettra un grand nombre d'études à grande échelle du carbone organique dissous dans les écosystèmes boréaux.

1.3.1 Les lacs boréaux limitent les possibilités de télédétection

Le développement d'un modèle d'estimation du carbone organique dissous des lacs boréaux est principalement limité au niveau du choix du capteur satellite. En effet, deux caractéristiques des lacs boréaux limitent le choix du capteur :

- Les lacs boréaux sont petits, et les instruments de télédétection adaptés aux milieux aquatiques comme les océans ont une trop faible résolution spatiale pour les lacs (250 à 1200 m pour SeaWiFS, MERIS et MODIS). La quasi-totalité des lacs boréaux ne sont pas détectables à cette résolution spatiale.
- Les lacs boréaux sont très opaques et réfléchissent peu de lumière. La gamme de réflectance des lacs boréaux est étroite, et implique une très forte sensibilité radiométrique du capteur satellite pour distinguer les valeurs (i.e. supérieure à 11-bit ; Landsat et SPOT ont actuellement une radiométrie de 8-bit).

Ainsi, malgré la promesse des satellites d'observation des milieux aquatiques qui offrent des bandes spectrales spécialement adaptées à l'étude des constituants dissous ou en suspension dans les milieux aquatiques, leur résolution spatiale est inadaptée aux lacs boréaux. D'autre part, et les principaux satellites d'observation de la Terre ont une résolution spatiale plus adaptée (10 à 30 m) mais ne peuvent pas être envisagées pour l'étude des lacs boréaux en raison de leur faible radiométrie. En effet, la gamme de réflectance des lacs boréaux est trop étroite vis-à-vis des plus petites gammes de valeurs discernables par les capteurs actuels. L'opacité des lacs boréaux exige en effet un capteur à forte radiométrie. Les satellites d'observation de la Terre comme Landsat 7 distinguent mal les valeurs très proches de réflectance des lacs boréaux. Cette capacité de distinguer des

valeurs très proche est reliée à la radiométrie du capteur. La radiométrie est en effet le nombre de valeurs possibles que peut prendre un pixel :

- Une radiométrie de 8-bit correspond à 256 valeurs possibles ;
- Une radiométrie de 16-bit correspond à 65 536 valeurs possibles.

Avec l'arrivée de la nouvelle génération de satellites d'observation de la Terre, ces limitations appartiennent aujourd'hui au passé. Lancé en 2000 à bord du satellite américain *Earth Observing-1*, le prototype de Landsat 8, *Advanced Land Imager*, continue de nous envoyer des images de la Terre.

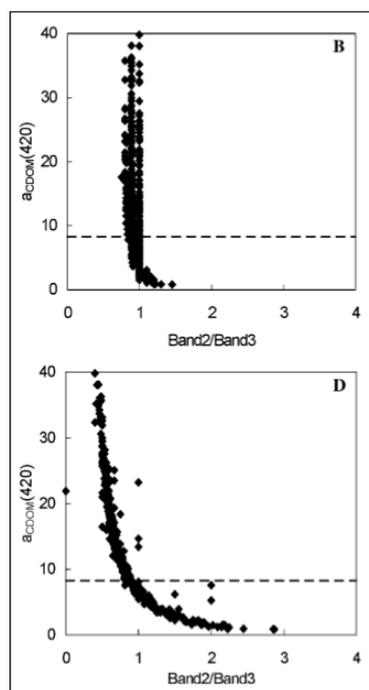


Figure 5 : D'après Kutser et al. (2005a). Corrélation entre des valeurs de matière organique dissoute colorée mesurées à 420 nm et des valeurs de ratio de bandes B2/B3 modélisées en 8-bit (B) et 16-bit (D).

La principale innovation de ce capteur est sa sensibilité radiométrique de 16-bit. Kutser et al. (2005a) ont étudié l'effet de la radiométrie du capteur sur la courbe de réponse entre l'image satellite et la matière organique dissoute colorée des lacs boréaux (Figure 5). Un capteur 8-bit ne permet pas de différencier la quantité de matière organique de la majorité des lacs boréaux en Suède. En revanche, un capteur 16-bit comme *Advanced Land Imager* offre une courbe de réponse sur toute la gamme de valeurs de matière organique colorée. Les valeurs fournies par un capteur 16-bit permettent de construire un modèle de prédiction de la matière organique colorée par satellite.

1.3.2 Premier modèle établi en Suède et en Finlande

Le premier modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée des lacs boréaux a été établi par Kutser et al. (2005b) à partir de données de terrain en collectées Suède et en Finlande. Les données d'absorbance de la matière organique dissoute colorée ont été mesurées dans 34 lacs en Suède et en Finlande, et deux images ont été acquises par le capteur *Advanced Land Imager*. Un modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée des lacs boréaux par satellite a été obtenu ($r^2 = 0.73$, Figure 6). L'équipe suédoise a ensuite validé l'algorithme de prédiction ($r^2 = 0.83$) sur une troisième image *Advanced Land Imager* acquise en Finlande le 16 juin 2002 avec des mesures de terrain réalisées en juin 2002 (Kutser 2005b).

Ce premier modèle a été établi pour les lacs boréaux et soulève la question de l'universalité de la méthode de prédiction de la matière organique dissoute colorée par satellite. En effet, de nouvelles études basées sur la méthodologie développée par Kutser et al. (2005a, 2005b) permettrait de valider à terme l'universalité de la méthode à l'ensemble des régions boréales.

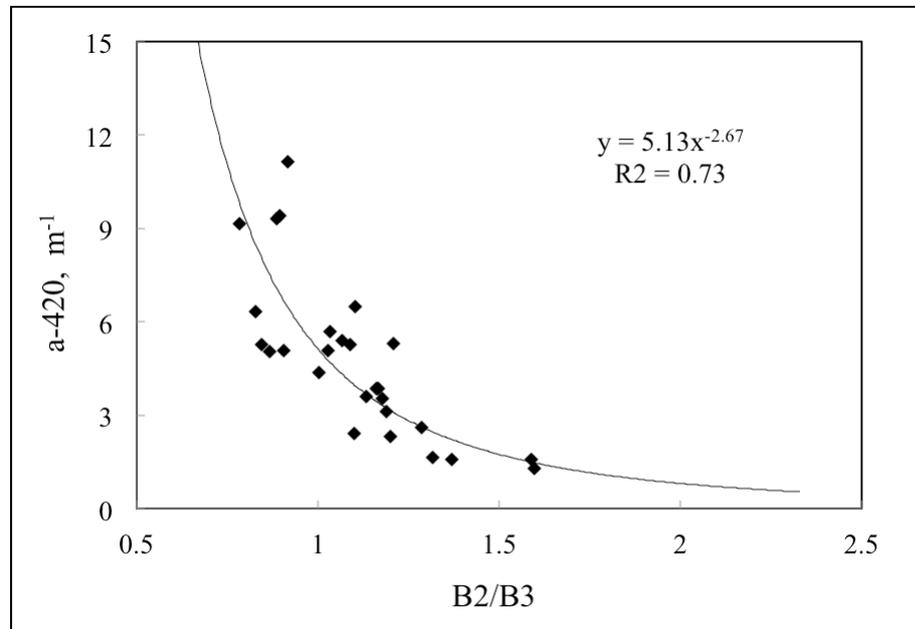


Figure 6 : Relation entre le ratio de bandes B2/B3 calculé à partir d'images *Advanced Land Imager* acquises en Suède le 27 juin 2003 et en Finlande le 14 juillet 2002, et les mesures d'absorbance de la matière organique dissoute colorée à 420 mn (a-420). La ligne pleine indique la courbe de régression (d'après Kutser et al. 2005b).

L'étude approfondie par Kutser et al. (2005a) des caractéristiques du capteur prototype *Advanced Land Imager* pour étudier la matière organique dissoute colorée des lacs boréaux est une avancée majeure dans le domaine. En effet, leurs conclusions ouvrent la voie à de nombreuses études par satellite des lacs boréaux dans les années à venir à l'aide du satellite Landsat 8.

1.3.3 Landsat 8 permettra d'estimer le carbone organique dissous des lacs boréaux

Le satellite Landsat 8 a été mis en orbite en février 2013. Les images auront pour dimensions 185 km par 185 km, similaires à celles de l'actuel Landsat 7. Les

caractéristiques techniques du capteur Landsat 8 sont similaires à celle de son prototype *Advanced Land Imager*. Ainsi, Les modèles développés à l'aide d'images prises par le prototype *Advanced Land Imager* pourront s'appliquer avec les images qui seront prises par Landsat 8. Les caractéristiques techniques du satellite Landsat 8 constituent donc une opportunité pour réaliser une cartographie à large échelle du carbone organique dissous. Cependant, beaucoup de questions demeurent avant de réaliser une cartographie globale. En effet, différentes stratégies de traitement des données peuvent être envisagées lorsque plusieurs images satellites existent pour une même région, lorsque différents traitements d'image sont possibles, et lorsque les données terrain offrent des répétitions au cours du temps. L'étude de l'impact du choix de différentes stratégies sur la qualité du modèle de prédiction est essentielle pour l'avancement des recherches dans les milieux boréaux basées sur les images de Landsat 8.

En résumé

-
- Seuls les satellites d'observation de la Terre offrent une résolution spatiale suffisante pour étudier les lacs boréaux.
 - Le premier modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée des lacs boréaux a été établi à partir de données de Suède et de Finlande en 2005.
 - Landsat 8 offrira des images adéquates pour étudier la matière organique dissoute colorée des lacs boréaux à grande échelle.
-

Chapitre 2: Objectifs de l'étude

Cette étude comporte plusieurs objectifs pour mieux comprendre les possibilités de télédétection du carbone organique des lacs boréaux. Le premier objectif est d'évaluer la possibilité d'utiliser des données de terrain déjà existantes plutôt que de coordonner une campagne de terrain spécialement pour construire un modèle. En effet, les mesures de terrain sont difficiles à acquérir, et de nombreuses données existent déjà. Le second objectif est d'évaluer les bénéfices apportés par les mesures répétées sur le terrain et par le satellite pour la qualité du modèle. En effet, les lacs peuvent être revisités, et plusieurs images peuvent être acquises pour un même site. La question de la nécessité des corrections atmosphériques est abordée dans le troisième objectif. En effet, une chaîne de traitement simplifiée, voire automatisable, permettrait aux écologistes d'étudier l'évolution des teneurs en carbone organique dissous à l'échelle du paysage à l'aide de la grande couverture de Landsat 8. Enfin, le quatrième objectif de cette étude est d'appliquer le modèle de prédiction à deux régions du Québec. Cette application permet d'étudier les distributions en tailles de lacs, en quantités de matière organique et de carbone organique dissous.

2.1 Développer un modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée des lacs boréaux

L'objectif principal de cette étude est de développer un premier modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée des lacs boréaux à partir des données de terrain existantes. Puis les bénéfices apportés par les mesures multiples sur le terrain, sur le satellite, les corrections atmosphériques ainsi que l'application du modèle seront envisagés dans d'autres objectifs.

2.1.1 Développer un modèle avec des données de terrain existantes

Le premier objectif est d'établir un modèle de prédiction de la matière organique colorée dissoute dans des lacs boréaux du Québec à partir de données existantes. En effet, la plupart des modèles de prédiction de la matière organique dissoute colorée reposent sur des campagnes de terrain synchronisées avec la prise d'image satellite (Brando & Dekker 2003 ; Hirtle & Rencz 2003 ; Kutser et al. 2005a, 2005b ; Lunetta et al. 2009 ; Winn et al. 2009). La synchronisation de l'acquisition des données de terrain et des images satellites permet en effet de limiter la variabilité temporelle des quantités de matière organique dans les lacs. Cependant, les campagnes de mesures demandent une logistique importante, surtout pour les zones boréales reculées. En conséquence, le nombre de lacs échantillonnés par campagne reste limité par le temps : 18 lacs pour Hirtle & Rencz (2003), 34 lacs pour Kutser et al. (2005b), et 19 lacs pour Winn et al. (2009). En outre, les limnologues du Québec ont visité des centaines de lacs et ont construit des jeux de données de très bonne qualité. Avec l'arrivée des images satellites de Landsat 8 permettant l'étude des lacs boréaux, l'utilisation de données de terrain existantes est une opportunité à explorer.

Le premier objectif de cette étude est donc d'acquérir des images satellites et d'utiliser des données de terrain existantes, non-synchronisées avec la prise d'image, pour développer un modèle de prédiction. Cet objectif permettrait de répondre à la nécessité d'utiliser des données synchronisées pour établir un modèle de prédiction par satellite. Les mesures de terrain demandent une logistique importante et sont souvent acquises dans un objectif de recherche précis. La possibilité de réutiliser des données existantes, ou en acquisition pour une autre recherche, dans un modèle de prédiction par satellite permettrait d'étudier le carbone organique dissous des lacs boréaux dans de nombreuses régions.

2.1.2 Évaluer les bénéfices des mesures multiples

Le second objectif de cette étude est d'étudier l'impact de différents choix méthodologiques sur la qualité du modèle résultant. En effet, pour des données de terrain non-synchronisées et non-contemporaines, plusieurs images peuvent être acquises pour une

même zone géographique, et plusieurs mesures de terrains peuvent être collectées au cours du temps pour un même lac. L'objectif est donc d'évaluer les bénéfices potentiels d'utiliser des mesures répétées sur le terrain ou par le satellite. Les conclusions de cet objectif permettront d'établir des recommandations pour l'utilisation des images du satellite Landsat 8 pour lequel plusieurs images d'une même zone seront disponibles, dans lesquelles des mesures de terrains peuvent présenter des répétitions.

Mesures répétées sur le terrain

Les jeux de données de terrain peuvent présenter plusieurs mesures répétées au cours du temps dans certains lacs. Ainsi, plusieurs stratégies d'utilisation de ces mesures de terrain répétées sont offertes :

- les données peuvent être sélectionnées suivant leur proximité temporelle avec la date d'acquisition de l'image satellite ;
- les données peuvent être sélectionnées suivant leur correspondance à la période saisonnière de l'image satellite (même mois par exemple) ;
- les données peuvent être moyennées sur l'ensemble des périodes.

La méthodologie d'utilisation des données de terrain répétées a une influence directe sur la qualité du modèle de prédiction. Des modèles basés sur différentes méthodes d'utilisation de mesures répétées sont comparés dans cet objectif.

Mesures répétées depuis le satellite

Dans le cadre d'une étude non-synchronisée entre l'acquisition de données satellites et de données de terrain, plusieurs images peuvent être acquises pour une région étudiée. Les images acquises peuvent présenter des différences de qualité en termes de couverture nuageuse, d'angle de prise de vue, de proximité temporelle avec la visite du terrain. Ainsi, plusieurs stratégies d'utilisation des mesures satellites répétées peuvent être envisagées :

- les images peuvent être sélectionnées suivant leur proximité temporelle avec la date d'acquisition des données de terrain ;
- les images peuvent être sélectionnés suivant leur correspondance à la période saisonnière du travail de terrain (même mois par exemple) ;
- les images peuvent être moyennées sur l'ensemble des périodes.

La comparaison de modèles basés sur différentes méthodes d'utilisation des images satellites permet de fournir des indications sur la meilleure stratégie à suivre dans le cas où plusieurs images de bonnes qualités sont offertes pour une même zone.

2.1.3 Évaluer les bénéfices des corrections atmosphériques

Le troisième objectif de cette étude est d'évaluer l'impact des corrections atmosphériques sur la qualité du modèle de prédiction. Cet objectif permet de choisir la meilleure méthode de traitement pour les images utilisées dans cette étude, et de donner des recommandations pour le traitement d'image dans des études similaires.

Les corrections atmosphériques permettent d'éliminer une grande source de variabilité dans la création de modèle de prédiction par satellite. Elles permettent de limiter l'incertitude de la mesure liée à l'atmosphère (Vermote et al. 2002), et sont souvent effectuées lors d'études comparant plusieurs images satellites. Les corrections atmosphériques permettent d'estimer les valeurs de réflectance au niveau du sol. Les valeurs de réflectance au sommet de l'atmosphère sont corrigées des effets d'absorption et de réfraction des rayons lumineux par l'atmosphère. Les corrections atmosphériques s'avèrent donc nécessaires pour rendre comparable différentes images satellites.

Cependant, dans le cas précis des lacs boréaux, les corrections atmosphériques sont problématiques et requièrent une grande part de jugement. Les corrections sont ainsi peu reproductibles d'une étude à une autre. Dans le cas des lacs boréaux, les valeurs de réflectance au sol sont très faibles. Les lacs absorbent beaucoup de lumière et apparaissent

très opaques. En conséquence, il est très difficile de corriger des valeurs qui sont déjà très faible et une sur-corrrection peut aboutir à des valeurs négatives et donc aberrantes.

En outre, les lacs sont souvent utilisés comme « cibles obscures » afin de niveler les images selon les valeurs les plus sombres. Le principe est de considérer que les « cibles obscures » (les lacs) ne réfléchissent pas de lumière, et d'ajuster les valeurs du reste de l'image suivant la différence entre la réflectance observée et la réflectance théorique de zéro des « cibles obscures ». Bien entendu, cette méthode ne s'applique pas pour étudier les lacs, qui auraient tous une valeur de réflectance nulle, et montre que la correction des valeurs de réflectance des lacs est très délicate. Ainsi, dans le cas où les images sont claires, les corrections atmosphériques peuvent être mises en question.

Une partie des images utilisées dans cette étude seront corrigées pour l'atmosphère afin d'étudier l'impact des corrections atmosphérique sur la qualité du modèle de prédiction. Ainsi, deux modèles seront comparés dans cette étude, l'un reposant sur des images non corrigées pour l'atmosphère, et l'autre sur des images corrigées pour l'atmosphère. Les conclusions de cette comparaison permettront de fournir des indications sur la meilleure stratégie de traitement des images fournies par le satellite Landsat 8.

2.2 Appliquer le modèle dans deux sites d'étude au Québec

Le quatrième objectif de cette étude est d'appliquer le modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée dans deux régions boréales du Québec. Cette application permet de générer des statistiques sur la distribution de l'eau douce, de la matière organique, des teneurs en carbone organique dissous, et d'estimer des quantités de carbone organique dissous dans les deux régions.

2.2.1 Distribution de l'eau douce et de la matière organique dissoute colorée

Deux images claires des deux régions boréales seront utilisées pour comparer les distributions d'eau douce et de matière organique dissoute colorée. Les données

hydrographiques permettent de comparer le nombre de lacs, la densité en lacs, le taux de couverture par l'eau douce, et les tailles des lacs dans les deux régions. Cette première analyse permettra de qualifier les deux régions au niveau hydrographique. Dans un second temps, le modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée sera appliqué pour les deux images. Les données de matière organique moyenne observées sur les deux images seront comparées entre les deux régions afin de déterminer des caractéristiques régionales.

2.2.2 Relation entre taille des lacs et teneurs en matière organique dissoute colorée

Un second objectif lié à la cartographie des lacs boréaux est d'étudier l'effet de l'aire du lac sur la teneur en matière organique dissoute colorée. En effet, les données d'aires des lacs peuvent être obtenues à l'aide de couvertures satellites existantes comme Landsat ou SPOT, sans nécessairement utiliser un capteur à radiométrie améliorée comme le capteur *Advanced Land Imager*. De plus, des données hydrographiques existent déjà pour le Canada³. Ainsi, si une relation existait à l'échelle régionale entre l'aire et la matière organique dissoute colorée, une première évaluation à grande échelle pourrait reposer sur de simples cartes hydrographiques. Au contraire, si cette étude montre que l'aire n'est pas corrélée avec la teneur en matière organique dissoute colorée, la nécessité de reposer sur des couvertures satellites de nouvelle génération pour cartographier la matière organique dissoute colorée sera alors justifiée.

2.2.3 Quantités de carbone organique dissous évaluées sur les images

Le troisième objectif lié à la cartographie des lacs boréaux est d'estimer des quantités de carbone organique dissous dans les deux régions boréales étudiées. En effet, les quantités de carbone organique dissous dans une image satellite peuvent être estimés à l'aide de :

³ <http://geogratis.gc.ca/>

- la cartographie de la matière organique dissoute colorée ;
- les relations entre la matière organique dissoute colorée et carbone organique dissous ;
- les données de bathymétrie des lacs et les équations de calcul du volume à partir de l'aire.

L'étude des quantités de carbone organique dissous permettra par la suite de mettre en évidence des propriétés écologiques à l'échelle des paysages boréaux. En effet, les quantités de carbone moyennes par unité de paysage pourront être comparées pour les deux régions.

En résumé

-
- Le premier objectif est d'utiliser un jeu de données de terrain existant pour développer un modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée.
 - Le second objectif est d'évaluer les bénéfices des mesures multiples sur le terrain et par satellite sur la qualité de la prédiction.
 - Le troisième objectif est d'évaluer la nécessité des corrections atmosphériques.
 - Le quatrième objectif est de cartographier la matière organique dissoute colorée dans deux régions et comparer les bilans en carbone dans les deux régions.
-

Chapitre 3: Méthodologie

Cette étude repose sur l'utilisation de données de terrain analysées par l'équipe de limnologues de l'Université du Québec à Montréal et sur l'utilisation d'images satellites acquises par le capteur prototype *Advanced Land Imager*. Pour les données de terrain, deux jeux de données correspondent à deux régions boréales : la région d'Eastmain, et la région d'Abitibi. Certains lacs ont été échantillonnés plusieurs fois au cours du temps et permettent d'envisager différentes combinaisons de données. Pour les données satellites, 10 images claires ont été acquises pour 6 sites différents. Ainsi, 4 images furent une répétition d'une image précédente, et différentes combinaisons d'images ont été envisagées. Enfin, des corrections atmosphériques ont été réalisées pour 4 images satellites. Enfin, les données de carbone organique dissous, et des données bathymétriques ont permis de construire un modèle de prédiction des quantités de carbone dans deux images.

3.1 Données de terrain

Les données de terrain ont été fournies par le laboratoire de limnologie de l'Université du Québec à Montréal. Les mesures de terrains comprenaient quasi-systématiquement des mesures de carbone organique dissous et des mesures de matière organique dissoute colorée dans les lacs. Les teneurs en carbone organique dissous ont été mesurées sur le terrain avec une station totale OI-1010 à partir de prélèvements d'eau à 1 m de profondeur filtrés à 0.2 μm . Les prélèvements d'eau filtrés ont ensuite été analysés en laboratoire à l'aide d'un spectromètre. La mesure de l'absorbance de la matière organique dissoute colorée est effectuée à une longueur d'onde de 440 nm (Cuthbert & Del Giorgio 1992).

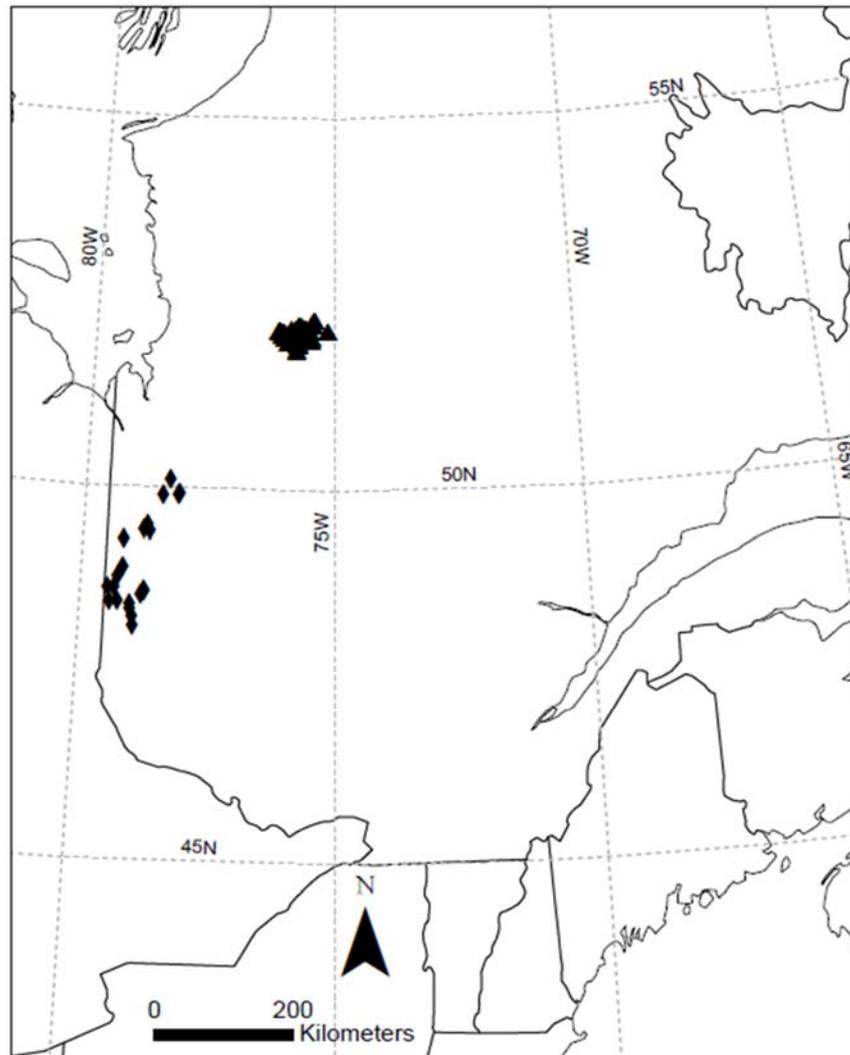


Figure 7 : Localisation des lacs échantillonnés à Eastmain (triangles) et en Abitibi (losanges) dans la province du Québec.

Deux jeux de données distincts sont utilisés dans cette étude. Le premier correspond à la région d'Eastmain qui a été étudiée de 2005 à 2009. Le second correspond à la région d'Abitibi qui a été étudiée en 2010 et 2011. Ces deux régions correspondent à deux projets de recherche différents.

3.1.1 Région d'Eastmain : 2005-2009

Cette région est localisée à l'est de la baie James dans la partie Nord du Québec. La végétation de cette région est la forêt boréale, les lacs sont majoritairement hétérotrophes.

Les données de la région d'Eastmain ont été recueillies dans le cadre d'un projet de recherche portant sur l'émission des gaz à effets de serres de la rivière Eastmain. L'équipe scientifique du projet était composée de membres du département des sciences biologiques de l'Université du Québec à Montréal, de membres du département de géographie de l'université McGill, et de techniciens et biologistes de la société Environnement Illimité⁴. Ce projet a été financé par Hydro-Québec Production et la Fondation Canadienne pour les sciences du climat et de l'atmosphère (FCSA). L'équipe de terrain a intensément étudié les lacs et les rivières de la région d'Eastmain durant la construction du barrage hydroélectrique. L'objectif du projet de recherche était de comparer les émissions de gaz à effet de serre par le réservoir hydroélectrique Eastmain-1 à celles qui auraient été émises par le milieu naturel si le barrage n'avait pas été construit. Durant la construction du barrage, plusieurs lacs de référence ont été suivis pour leur teneur en carbone et leurs émissions de CO₂ et de CH₄. Les émissions de CO₂ des milieux forestiers ont aussi été mesurées. Ce projet est terminé, et la présente étude permet de réutiliser ces jeux de données, très complet, dans une nouvelle application.

Les limnologues ont suivi les paramètres biologiques de 70 lacs durant cinq ans, de 2005 à 2009 (Brothers et al. 2012 ; Teodoru et al. 2011). En résulte un jeu de données de plus de 470 mesures de carbone et de matière organique dissoute colorée dans les lacs. De nombreux lacs présentent des mesures répétées au cours du temps (Tableau 2). Ainsi, certains lacs ont été revisités jusqu'à 12 fois au cours des 5 années de l'étude. Concernant les lacs visibles sur les images satellites acquises pour cette étude, 32 lacs sont visibles pour

⁴ Liste détaillée des membres de l'équipe scientifique du projet disponible sur le site internet : <http://www.eastmain1.org/fr/equipe-scientifique.html>

la région d'Eastmain. Parmi ces 32 lacs, 10 lacs ont été visités entre 5 à 12 fois, 7 lacs ont été visités entre 2 et 4 fois, et 15 lacs ont été visités 1 fois (Tableau 2).

3.1.2 Région d'Abitibi : 2010-2011

Cette région est localisée à la frontière entre le Québec et l'Ontario. Le paysage de cette région est caractérisé par une importante occupation du sol par l'agriculture. Les lacs peuvent être argileux, oligotrophes ou hétérotrophes.

La région d'Abitibi a été étudiée par l'équipe de limnologues de l'Université du Québec à Montréal dans le cadre d'une chaire de recherche établie entre le Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG), la compagnie Hydro Québec, et l'Université du Québec À Montréal, et intitulée « Chaire de recherche en biogéochimie du carbone des écosystèmes aquatiques boréaux ». Cette chaire de recherche est programmée sur cinq ans et a débuté en janvier 2010. Cette chaire s'intéresse à la dynamique qui relie le carbone des écosystèmes aquatiques du grand Nord du Québec (réservoirs hydroélectriques, lacs et rivières) à la production de gaz à effet de serre. La chaire vise également à améliorer la compréhension des effets des changements climatiques, des modifications de l'utilisation du territoire, et des perturbations naturelles, sur les écosystèmes naturels boréaux. En outre, l'étude approfondie des cycles de carbone permettra de mieux comprendre le rôle des systèmes aquatiques dans l'écosystème boréal. Dans cette chaire, certains étudiants s'intéressent à l'écologie interne des lacs, d'autres à l'interface air-eau et les échanges gazeux. Il s'agit d'un projet collaboratif dans lequel cette étude par satellite apporte une base pour visualiser les teneurs en carbone organique dissous sur l'ensemble d'une région.

Durant les étés 2010 et 2011, l'équipe de limnologues a étudié 100 lacs dans la région d'Abitibi (Tableau 2). Sur les images acquises pour cette étude, 21 lacs sont visibles. Parmi ces 21 lacs, 1 lac a été revisité 5 fois, 3 lacs entre 2 et 4 fois, et 17 lacs ont été visités 1 fois chacun.

	Eastmain	Abitibi
Dates des campagnes	2005 à 2009	2010 et 2011
Nombre de campagnes par année	3	1
Nombre de lacs échantillonnés	70	100
Nombre de lacs visibles sur l'imagerie	32	21
Nombre de lacs visités 5 à 12 fois	10	1
Nombre de lacs visités 2 à 4 fois	7	3
Nombre de lacs visités 1 fois	15	17

Tableau 2 : Campagnes d'échantillonnage dans les régions d'Eastmain et Abitibi et fréquences de revisite pour les lacs présents sur l'imagerie satellitaire.

Les revisites des lacs apportent plusieurs choix pour incorporer ces mesures de terrain dans la construction du modèle. En effet, le modèle peut faire correspondre les mesures de terrain avec les mesures satellite les plus proches dans le temps, du même mois, ou une moyenne au cours du temps. Ces jeux de données très riches permettent d'explorer l'impact de différentes méthodes de sélection de données de terrain sur la qualité du modèle de prédiction.

3.1.3 Mise en forme des données de terrain

Les données brutes ont été organisées par année de travail par l'équipe de terrain. Les jeux de données comportaient de nombreux paramètres biologiques qui ne sont pas utilisés dans cette étude. Les données correspondant à la matière organique dissoute colorée et au carbone organique dissous ont été regroupées dans une table à deux entrées :

- La liste des lacs étudiés présents sur l'imagerie ;
- L'axe temporel organisé par mois sur les 7 années de campagne de 2005 à 2012.

Certains lacs présentaient des mesures de terrain en différents endroits. Autrement dit, les revisites des lacs ne se trouvaient pas exactement aux mêmes coordonnées de positionnement géographique dans le lac. Après avoir vérifié que les coordonnées correspondaient raisonnablement à la même région du lac en question, toutes les données ont été agrégées suivant le nom du lac. Les points excentrés ont été exclus des regroupements de mesures. En conséquence, une variabilité spatiale a été introduite en faisant ce regroupement. Deux valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorée extrêmes ont été écartées de l'étude car identifiées comme erreur de mesure.

La table de données de terrain a permis de calculer des valeurs moyennes par année et toutes campagnes confondues. Les différentes méthodes de sélection des données de terrain ont permis de créer différents modèles de régression avec les valeurs fournies par les images satellites.

En résumé

-
- Les données de terrain ont été collectées dans le cadre de deux projets de recherche à Eastmain (2005-2009) et en Abitibi (2010-2011).
 - Certains lacs ont été revisités plusieurs fois au cours du temps.
 - Les données ont été mise en forme suivant la liste des lacs visibles sur l'imagerie et l'axe temporel des différentes valeurs mesurées au cours du temps.
-

3.2 Données satellite

Les images satellites utilisées dans cette étude ont été prises par le capteur prototype *Advanced Land Imager*. Ce capteur prototype est porté par le satellite *Earth Observing-1*. Au total, 10 images claires ont été acquises et plusieurs niveaux de traitement d'image ont été effectués.

3.2.1 Mission *Earth Observing-1*

La mission *Earth Observing-1* a pour objectif de valider les technologies qui équiperont la nouvelle génération de satellites de la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Le satellite expérimental *Earth Observing-1* a été lancé en novembre 2000 sur la même orbite que Landsat 7 afin de pouvoir comparer les images de l'actuel capteur avec celles du capteur prototype. Cette mission a fait l'objet de plusieurs applications scientifiques pour démontrer les capacités des capteurs (Ungar et al. 2003).

Earth Observing-1 transporte à son bord deux capteurs prototypes. Le premier capteur, *Advanced Land Imager*, est le prototype de la nouvelle génération de satellites d'observation de la Terre de la NASA et apporte des avancées majeures à l'actuel Landsat 7 ETM qui fut lancé en avril 1999. Les images fournies par les satellites Landsat sont utilisées dans de nombreuses applications scientifiques et écologiques à grande échelle. En effet, les images recouvrent une surface de 185 km par 185 km, elles sont multi-spectrales, acquises en continu, et publiques. La prochaine génération est Landsat 8, et était nommée *Landsat Data Continuity Mission* avant le lancement du satellite. Landsat 8 a été lancé le 11 février 2013 (près de 14 ans après Landsat 7) et les premières images seront accessibles environ un an plus tard⁵. Le capteur prototype *Advanced Land Imager* comporte les mêmes spécificités que le capteur présent sur Landsat 8, hormis la taille des images qui est réduite à 40 km par 180 km au lieu de 185 km par 185 km pour Landsat 8.

⁵ Site officiel : ldcm.nasa.gov

Le second capteur à bord du satellite *Earth Observing-1* est le capteur hyper-spectral *Hyperion* qui permet d'enregistrer plus de 220 bandes spectrales (contre 9 pour le capteur *Advanced Land Imager*) sur des images de 7.5 km par 100 km. Le découpage très fin du signal spectral par le capteur *Hyperion* offre de nombreuses applications en géologie, agriculture et environnement. De plus, les images *Hyperion* sont couplées avec les images *Advanced Land Imager*, ce qui permet de nombreuses applications, comme par exemple des corrections atmosphériques (Kutser et al. 2005). Les données *Hyperion* ne sont pas utilisées dans cette étude, notamment car le couple de données multi-spectrales et hyper-spectrales ne sera plus offert avec le satellite Landsat 8, car il ne portera pas de capteur hyper-spectral.

3.2.2 Acquisition des images *Advanced Land Imager*

Les images *Advanced Land Imager* sont accessibles au public depuis l'été 2008. Le site de l'*United States Geological Survey* (USGS) permet de télécharger les images acquises par *Advanced Land Imager*. Une plateforme spéciale coordonne les activités de recherche en lien avec l'acquisition des images par le satellite expérimental *Earth Observing-1*. Avec les permissions adéquates, les laboratoires de recherche peuvent s'enregistrer dans la plateforme d'acquisition des images nommée Geobliki⁶. La plateforme Geobliki permet aux scientifiques de commander des images satellites *Advanced Land Imager* et *Hyperion* pour plusieurs cibles. La plateforme actualise les dates possibles d'acquisition en fonction des prévisions météorologiques et la quantité d'images en commande pour la date demandée.

Six cibles d'acquisition ont été créées pour cette étude : 2 cibles pour la région d'Eastmain, où l'échantillonnage était relativement concentré autour du barrage hydroélectrique Eastmain-1, et 4 cibles pour la région d'Abitibi, où l'échantillonnage était très étendu car les limnologues ont souhaité explorer des lacs ayant des propriétés très différentes, et donc éloignés les uns des autres. L'acquisition des images a été réalisée

⁶ geobpms.geobliki.com, eo1.geobliki.com

durant les étés 2010, 2011 et 2012. Au total, 10 images de bonne qualité ont été acquises (Tableau 3), 10 autres images acquises se sont révélées inutilisables en raison de leur couverture nuageuse trop forte, ou de la présence de glace sur les lacs.

Région	Image	Nombre de lacs visibles	Date	Couverture nuageuse	Coordonnées
Eastmain	A ₁	23	15 juin 2010	Clair	52.171, -75.812
	A ₂	11	11 aout 2010	Cumulus	52.171, -75.812
	A ₃	23	4 octobre 2010	Léger voile	52.171, -75.812
	A ₄	23	28 juillet 2012	Clair	52.171, -75.812
	B	9	8 aout 2011	Cumulus	52.092, -76.012
Abitibi	C ₁	8	25 mai 2010	Clair	48.471, -79.247
	C ₂	8	15 juillet 2012	Clair	48.471, -79.247
	D	4	16 juillet 2010	Cumulus	48,878, -79.251
	E	5	8 aout 2010	Clair	49.864, -78.342
	F	4	6 septembre 2011	Clair	49.387, -78.885

Tableau 3 : Récapitulatif des images *Advanced Land Imager* acquises pour les régions d’Eastmain et d’Abitibi. Les coordonnées géographiques sont indiquées en degrés décimaux.

Pour la région d’Eastmain, 5 images de bonne qualité ont été acquises, dont 4 images correspondant au même site (A₁, A₂, A₃, A₄, Tableau 3). La première image, acquise le 15 juin 2010, est de très bonne qualité, et permet de visualiser 23 lacs échantillonnés lors du projet Eastmain. La seconde image, acquise le 11 aout 2010, présente quelques cumulus, et par conséquent seulement 11 lacs échantillonnés sont visibles sur l’image. La troisième image, acquise le 4 octobre 2010, présente seulement un léger voile, et donc chacun des 23 lacs visible sur la première image claire sont visibles. Enfin, une image acquise deux ans plus tard, le 28 juillet 2012, est d’excellente qualité et permet de

visualiser les 23 lacs échantillonnés. Un second site de la région d'Eastmain, en continuité à l'ouest du premier site, a été visualisé dans une image acquise le 8 août 2011 (image B, Tableau 3). L'image présente quelques cumulus, mais permet de visualiser 9 lacs échantillonnés qui ne sont pas visualisés sur les autres images d'Eastmain.

Pour la région d'Abitibi, 5 images de bonne qualité ont été acquises, dont 2 images correspondant au même site (images C₁, C₂, Tableau 3). La première image a été acquise le 25 mai 2010, dans des conditions nuageuses excellentes, et permet de visualiser 8 lacs échantillonnés. La seconde image du même site a été acquise deux ans plus tard, le 15 juillet 2012, toujours dans des conditions nuageuses excellentes et permet de visualiser les 8 lacs échantillonnés. D'autre part, trois autres images ont été acquises pour trois autres sites afin de visualiser un maximum de lacs échantillonnés dans cette vaste région (images D, E, F, Tableau 3). Une image acquise le 16 juillet 2010 se situe au nord-ouest de la première image. Cette image présente quelques cumulus localisés en dehors des lacs échantillonnés. On visualise 4 lacs échantillonnés sur cette image. Une autre image, acquise le 8 août 2010, se trouve au nord-est de la première image. Cette image est parfaitement claire, on visualise 5 lacs échantillonnés sur l'image. Enfin une image acquise le 6 septembre 2011, se trouve au sud-est de la première image. Cette image est claire, on visualise 4 lacs échantillonnés.

Ainsi, pour la région d'Eastmain, 32 lacs sont visibles sur l'imagerie qui se répartie sur 2 sites. Pour la région d'Abitibi, 21 lacs sont visibles sur l'imagerie qui se répartie sur 4 sites. Au total, 53 lacs sont visibles sur l'imagerie, dont 31 lacs présentant des mesures répétées au niveau du satellite.

3.2.3 Format des images

Les images *Advanced Land Imager* sont fournies au format *Level 1 Geometric Systematic Terrain Corrected* (L1GST). Les images dans ce format ont déjà subi une orthorectification par rapport à la géométrie du terrain et l'angle de la prise de vue. Pour la

région du Québec, le modèle numérique de terrain utilisé est le *Shuttle Radar Topographic Mission-2* (STRM-2) qui est issu d'un consortium international de recherche en géomatique chapeauté par la NASA. Ainsi, les images ne nécessitent pas de corrections géométriques en fonction de la topographie du terrain.

La surface de couverture des images *Advanced Land Imager* varie de 2 800 à 7 200 km². La taille des images est variable car elles se présentent sous forme de bandes orientées nord-sud dont les dimensions varient de 70 km par 40 km jusqu'à 180 km par 40 km suivant la durée d'acquisition du capteur. En effet, le capteur enregistre l'image sous forme d'une bande lors de son passage et le temps d'acquisition détermine la longueur de l'image, la largeur étant fixe. Dans le cadre de cette étude, le temps d'acquisition est constant et toutes les images recouvrent environ 70 km par 40 km⁷.

Canal	Bande	Bornes (nm)	Résolution (m)
1	PAN	480-690	10
2	MS 1'	433-453	30
3	MS 1	450-515	30
4	MS 2	525-605	30
5	MS 3	633-690	30
6	MS 4	775-805	30
7	MS 4'	845-890	30
8	MS 5'	1200-1300	30
9	MS 5	1550-1750	30
10	MS 7	2080-2350	30

Tableau 4 : Les 9 bandes spectrales d'une image *Advanced Land Imager* et la bande panchromatique

⁷ Les dimensions varient légèrement d'une image à une autre suivant l'angle de prise de vue par rapport au site visé.

Le capteur enregistre le signal dans 9 bandes spectrales simultanément. Les images *Advanced Land Imager* gagnent 2 bandes spectrales (MS 1' dans le bleu et MS 4' dans l'infrarouge, Tableau 4) par rapport aux images de Landsat 7. Les images sont fournies sous la forme de 10 fichiers dont une image noir et blanc (panchromatique) et 9 images correspondant aux 9 bandes spectrales. Les couleurs verte et rouge correspondent aux canaux 4 et 5 soit MS 2 et MS 3 (Tableau 4). La résolution spatiale du capteur *Advanced Land Imager* est de 10 m pour l'image panchromatique et 30 m pour les autres canaux. En comparaison, celles de Landsat 7 sont de 15 m pour l'image panchromatique, 30 m pour les images couleur et 60 m pour l'infrarouge thermique. Enfin, la radiométrie des valeurs des images *Advanced Land Imager* est de 16-bit, ce qui autorise 65 536 valeurs possibles pour chaque pixel et chaque bande spectrale. Cette caractéristique est la principale avancée technologique par rapport à la précédente version de Landsat. En effet Landsat 7 propose seulement 255 valeurs possibles (8-bit) par pixel et par bande spectrale, ce qui limite fortement la distinction entre des couleurs très proches.

Ainsi, les images *Advanced Land Imager* ne nécessitent pas de corrections géométriques et leur résolution radiométrique permet d'étudier les réflectances des lacs boréaux. Cependant les valeurs numériques ne correspondent pas à des valeurs physiques de réflectance des lacs, et ne permettent pas de comparer les valeurs de plusieurs images différentes. Un traitement du signal est donc nécessaire.

3.2.4 Traitement des images

Les valeurs numériques des images au format L1GST correspondent à des valeurs calibrées sur la gamme de valeurs propre de l'image. Ces gammes de valeurs sont indépendantes d'une image à une autre. En conséquence, les images ne peuvent pas se comparer sur la base des valeurs calibrées par le capteur. Les valeurs numériques des images ont donc été converties en valeurs physiques de luminance et de réflectance afin de rendre les images comparables entre elles.

Calcul des valeurs de luminance

Les valeurs digitales calibrées des images *Advanced Land Imager* ont été converties en unités physiques de luminance L_λ . Cette conversion dépend des facteurs de calibration du capteur qui évoluent durant la mission du satellite *Earth Observing-1*.

Les valeurs numériques calibrées des images $Qcal$ ont été converties en valeurs de luminance L_λ à l'aide des facteurs de calibration indiquant les limites inférieures et supérieures pour :

- les radiances spectrales enregistrées par le satellite ($L_{min\lambda}$, $L_{max\lambda}$) ;
- les valeurs numériques des pixels correspondants ($Qcal_{min}$, $Qcal_{max}$).

La luminance spectrale a été calculée selon:

$$L_\lambda = G_{rescale} \times Qcal + B_{rescale} \quad (1)$$

Avec :

$$G_{rescale} = \frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{Qcal_{max} - Qcal_{min}} \quad (2)$$

$$B_{rescale} = L_{min\lambda} - \left(\frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{Qcal_{max} - Qcal_{min}} \right) \times Qcal_{min} \quad (3)$$

Où:

$G_{rescale}$ = facteur de calibration du gain en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$;

$B_{rescale}$ = facteur de calibration du biais en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$.

Les valeurs limites supérieures et inférieures $L_{min\lambda}$ et $L_{max\lambda}$ pour chaque bande sont fournies par l'USGS (Tableau 5). Les valeurs limites Q_{calmin} et Q_{calmax} ont été estimées sur les histogrammes de valeurs des bandes spectrales.

Bande	Fichier	$L_{min\lambda}$	$L_{max\lambda}$	$G_{rescale}$	$B_{rescale}$	ESUN
PAN	1	-2.18	784.2	0.024	-2.2	1724
1'	2	-3.36	1471	0.045	-3.4	1857
1	3	-4.36	1405	0.043	-4.4	1996
2	4	-1.87	915.5	0.028	-1.9	1807
3	5	-1.28	588.5	0.018	-1.3	1536
4	6	-0.84	359.6	0.011	-0.85	1145
4'	7	-0.641	297.5	0.0091	-0.65	955.8
5'	8	-1.29	270.7	0.0083	-1.3	452.3
5	9	-0.597	91.14	0.0028	-0.6	235.1
7	10	-0.209	29.61	0.00091	-0.21	82.38

Tableau 5 : Facteurs de calibration des valeurs numériques des images *Advanced Land Imager* établis par Chander et al. (2009).

Les valeurs de luminance L_λ correspondent à des valeurs physiques. Cependant, les images sont acquises suivant différents angles de prise de vue, distances au soleil, et illuminations de la scène. Ainsi, afin de pouvoir comparer plusieurs images, les données ont donc été converties en valeur de réflectance au sommet de l'atmosphère.

Calcul de la réflectance au sommet de l'atmosphère

La conversion des valeurs de luminance L_λ en valeurs de réflectance au sommet de l'atmosphère $\rho(\text{sat})$ est une étape importante pour réduire la variabilité entre différentes

scènes car elle supprime l'effet d'angle zénithal du soleil et corrige la variation de distance Terre-Soleil entre différentes dates. La conversion a été faite suivant :

$$\rho(sat)_\lambda = \frac{\pi.L_\lambda.d^2}{ESUN_\lambda.\cos\theta_s} \quad (4)$$

Avec :

L_λ = Radiance spectrale au niveau du capteur en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$;

$ESUN_\lambda$ = Irradiance solaire exo-atmosphérique moyenne en $W.m^{-2}.\mu m^{-1}$;

d = Distance Terre-Soleil ;

θ_s = Angle zénithal du soleil en degrés.

Les valeurs de $ESUN_\lambda$ sont fournies avec les facteurs de calibration (Tableau 5). Les valeurs de distance Terre-Soleil d sont accessibles dans des tables (Chandler et al. 2009), et la valeur d'angle zénithal du soleil θ_s est fournie dans le fichier de métadonnées associées aux images.

Ainsi, les images présentant des valeurs de réflectances au sommet de l'atmosphère sont comparables entre elles. Cependant, les images sont acquises dans des conditions climatiques différentes. Suivant le degré de différence de conditions climatiques, les corrections atmosphériques peuvent limiter cette source de variabilité.

Corrections atmosphériques

Afin d'étudier l'impact des corrections atmosphériques sur la qualité du modèle de prédiction, 4 images de 2010 ont été corrigées afin de comparer les modèles obtenus avec des images corrigées pour l'atmosphère (valeurs de réflectance au sol), et des modèles

obtenus avec ces mêmes images non corrigées pour l'atmosphère (valeurs de réflectance au sommet de l'atmosphère). Les 4 images sont celles du 15 juin 2010 à Eastmain et celles des 25 mai, 16 juillet, et 8 août 2010 en Abitibi (images A₁, C₁, D, E, Tableau 3).

La méthodologie de correction utilisée se base sur l'équation du transfert radiatif, qui est une modélisation physique de l'absorption et la diffusion de la lumière par les gaz, particules et aérosols. La simulation est effectuée à l'aide du code 6S (*Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum*) utilisé dans le logiciel Reflect⁸ (Bouroubi 2009). À l'aide des dates et coordonnées d'acquisition de l'image, les données météorologiques ont été récupérées des stations météorologiques les plus proches⁹. Les données de température, d'humidité, de visibilité et d'altitude ont été utilisées dans le logiciel Reflect pour calculer la transmittance de l'atmosphère T_{atm} suivant :

$$T_{atm} = T_{gaz} + (T_{dir} + T_{diff})_{up} + (T_{dir} + T_{diff})_{down} \quad (5)$$

Les valeurs de réflectance au sommet de l'atmosphère $\rho(sat)$ ont ensuite été converties en valeurs de réflectance au niveau du sol $\rho(sol)$ selon :

$$\rho(sol) = \frac{\rho(sat) - \rho_{atm}}{T_{atm}} \quad (6)$$

Les valeurs de réflectance au niveau du sol ont ainsi été calculées pour les 4 images de 2010. Le modèle basé sur ces 4 images a ensuite été comparé au modèle basé sur les 4 mêmes images corrigées au niveau du sommet de l'atmosphère (i.e. sans corrections atmosphériques).

⁸ Logiciel développé en 2009 par M. Yacine Bouroubi dans le cadre de sa thèse.

⁹ http://climat.meteo.gc.ca/climateData/canada_f.html

Calcul du ratio de bandes B2/B3

La matière organique dissoute colorée absorbe sur l'ensemble du spectre enregistré par le capteur *Advanced Land Imager* (Figure 3). Cependant, les meilleures corrélations entre l'image satellite et les valeurs mesurées sont obtenues avec l'utilisation des bandes B2 et B3 (verte et rouge) suivant le ratio B2/B3 (Kutser et al. 2005a, 2005b, 2009).

Afin de confirmer l'utilisation de ce ratio pour prédire la matière organique dissoute colorée, les valeurs de réflectance ont été extraites pour les 9 bandes de l'image du 15 juin 2010 (image A₁, Tableau 3) dans 23 lacs échantillonnés. L'ensemble des 81 différents ratios de bandes possibles a été mis en relation avec la matière organique dissoute colorée mesurée sur le terrain dans les 23 lacs échantillonnés. Bien que d'autres ratios aient montré des corrélations acceptables, le ratio B2/B3 a montré la meilleure corrélation avec la matière organique dissoute colorée.

Les ratios de bandes B2/B3 ont été calculés pour les 10 images satellite *Advanced Land Imager*. Les fichiers ont été préalablement convertis en données à virgule flottante pour calculer le ratio. À l'aide des coordonnées GPS des points de prélèvement sur le terrain, les pixels ayant des valeurs relativement homogènes environnant les points de mesure (avec un minimum de 10 pixels) ont été sélectionnés, et ont servi de masque d'extraction pour les valeurs B2/B3 des images.

3.2.5 Chaînes de traitement des images satellites

Le calcul des valeurs de réflectance au sommet de l'atmosphère pour les 10 images *Advanced Land Imager* a été automatisé à l'aide de l'outil de géo-traitement « Model Builder » du logiciel ESRI ArcGIS. L'outil « Model Builder » représente sous forme de diagrammes des commandes de calcul ou de transformation de fichiers d'image. Cette représentation permet de visualiser la chaîne de traitement en entier.

Un premier modèle a été conçu pour convertir les valeurs numériques calibrées des 10 images (images fournies au niveau L1GST) en valeur de luminance à l'aide des facteurs

de conversion du capteur, puis en valeurs de réflectance au sommet de l'atmosphère à l'aide des données d'orientation du capteur et de distance au soleil. Un modèle complémentaire a permis de générer les valeurs de réflectance au sol pour les 4 images à corriger pour l'atmosphère à l'aide des paramètres atmosphériques générés sous Reflect. Une fois les images traitées, un dernier modèle a permis d'extraire les pixels recouvrant les étendues d'eau, et ainsi que les valeurs B2/B3 des pixels.

En résumé

-
- 10 images satellite ont été acquises pour 6 sites localisés au Québec.
 - Les valeurs ont été converties en valeurs de réflectance au sommet de l'atmosphère qui corrigent les effets d'angle de prise de vue et d'ensoleillement.
 - 4 images d'essai ont été corrigées pour les effets atmosphériques.
 - Les ratios B2/B3 ont été extraits pour les 53 lacs échantillonnés visibles sur l'imagerie.
-

3.3 Création des modèles

Un premier modèle a été envisagé en se basant sur des données uniques et non-synchronisées entre le terrain et le satellite. Le jeu de données présentant des mesures répétées au niveau du satellite et au niveau du terrain, 4 autres modèles ont été envisagés suivant différentes méthodes de sélection de données multiples ou uniques. Pour les corrections atmosphériques, deux modèles basés sur des images corrigées pour l'atmosphère, ou non corrigées, ont été comparés.

3.3.1 Modèle basé sur des mesures uniques et non-synchronisées

Ce modèle (modèle 5, Tableau 6) a été envisagé en se basant sur une sélection aléatoire de 27 sites d'entraînement parmi les 53 lacs (au lieu des 21 lacs ayant spécifiquement des mesures répétées), et sur l'utilisation des images les plus claires

(comme pour les modèles 1 et 2, Tableau 6). Ce modèle permet de simuler un jeu de données ne comportant que des mesures uniques sur le terrain et sur le satellite.

3.3.2 Mesures multiples vs mesures uniques

L'impact des mesures multiples sur le terrain, et par satellite, sur la qualité du modèle de prédiction a été évalué avec 4 modèles différents. Les 4 modèles ont été comparés dans une étude 2x2 en se basant sur des données de terrain avec ou sans mesures répétées, et des données satellites avec ou sans mesures répétées.

Mesures répétées sur le terrain

Parmi les 53 lacs échantillonnés visibles sur l'imagerie, 21 lacs présentent des mesures répétées sur le terrain (Tableau 2). Ces 21 lacs ayant des mesures répétées ont servi de jeux d'entraînement pour les modèles qui ont ensuite été testés sur les 32 lacs restants (Tableau 6). Deux méthodes d'utilisation des mesures répétées sur le terrain ont été envisagées :

- Une utilisation de la moyenne des différentes valeurs de matière organique dissoute colorée pour chaque lac (modèles 2 et 4, Tableau 6) ;
- la sélection aléatoire d'une valeur de matière organique dissoute colorée parmi les différentes mesures (modèles 1 et 3, Tableau 6).

La sélection aléatoire a permis de simuler le cas où une seule mesure était disponible. Des méthodes de sélection des données de terrain basées sur la proximité temporelle entre la mesure de terrain et la mesure satellite ont aussi été envisagées mais ont abouti à des modèles similaires à ceux basés sur une sélection aléatoire des données.

Modèle	Données de terrain	Données satellite	Images	Entrainement	Test
1	Aléatoires	Uniques	A ₁ , B, C ₁ , D, E, F	21 lacs	32 lacs
2	Moyennes	Uniques	A ₁ , B, C ₁ , D, E, F	21 lacs	32 lacs
3	Aléatoires	Répétées	A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄ , B, C ₁ , C ₂ , D, E, F	21 lacs	32 lacs
4	Moyennes	Répétées	A ₁ , A ₂ , A ₃ , A ₄ , B, C ₁ , C ₂ , D, E, F	21 lacs	32 lacs
5	Aléatoires	Uniques	A ₁ , B, C ₁ , D, E, F	27 lacs	26 lacs

Tableau 6 : Données utilisées pour les 5 modèles envisagés pour associer les mesures de terrain de matière organique dissoute colorée et les images satellite.

Mesures répétées par satellite

Parmi les 53 lacs échantillonnés visibles sur l'imagerie, 31 ont été visualisé plusieurs fois dans le temps sur différentes images. En effet, parmi les 10 images acquises pour les 6 sites, 4 images furent une répétition d'une image antérieure (Tableau 3). Ces mesures répétées ont permis d'envisager deux types de modèles (Tableau 6) :

- des modèles basés sur l'image la plus claire lorsqu'il y en a plusieurs (modèles 1 et 2, avec l'image A₁ choisie parmi A₁, A₂, A₃, A₄, et l'image C₁ choisie parmi C₁ et C₂, Tableau 6) ;

- des modèles basés sur la moyenne des images lorsqu'il y en a plusieurs (modèles 3 et 4 avec les images A₁, A₂, A₃, A₄ moyennées, et images C₁ et C₂ moyennées, Tableau 6).

Régressions linéaires et ANCOVA

Les équations des modèles ont calculées suivant une régression linéaire des lacs sélectionnés pour l'entraînement. Les données d'absorbance de la matière organique dissoute colorée et les données de ratios B₂/B₃ ont été converties suivant échelle logarithmique log₁₀. Les lacs de test ont été utilisés pour calculer l'erreur type qui est la racine du carré moyen des écarts entre valeurs observées et valeurs prédites (RMSE pour *Root Mean Square Error*).

Une analyse de covariance ANCOVA a permis de déterminer si les modèles étaient significativement différents les uns des autres à l'aide de la fonction d'analyse de variance « AOV » du logiciel libre R¹⁰.

3.3.3 Images corrigées vs non corrigées pour l'atmosphère

L'impact des corrections atmosphériques sur la qualité du modèle résultant a été évalué sur les 4 premières images acquises en 2010. Ces 4 images ont été corrigées pour les effets atmosphériques, et ont servi à la création d'un modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée. Ce modèle a été comparé avec un modèle basé sur les 4 mêmes images corrigées au niveau du sommet de l'atmosphère (i.e. sans corrections atmosphériques). Les deux modèles se basent sur le même jeu de données uniques de terrain pour les valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorée. Lorsqu'un lac présentait plusieurs mesures de terrain, une mesure unique a été sélectionnée aléatoirement (comme pour les modèles 1 et 2, Tableau 6). Les 4 images sont l'image du 15

¹⁰ <http://r-eco-evo.blogspot.ca/2011/08/comparing-two-regression-slopes-by.html>

juin 2010 à Eastmain et les images du 25 mai, 16 juillet, et 8 août 2010 en Abitibi (Tableau 3). Sur ces images, 40 lacs sont visibles, dont 23 à Eastmain et 17 en Abitibi.

Afin de comparer les performances des deux modèles sur la gamme de valeurs de matière organique dissoute colorée, les résidus des deux régressions ont été convertis en résidus standardisés. La répartition graphique de ces résidus suivant la gamme de valeurs de matière organique dissoute colorée a permis d'étudier l'effet des corrections atmosphériques sur les performances du modèle dans les gammes de lacs clairs et dans les gammes de lacs plus riches en matière organique.

Enfin, une comparaison des valeurs de ratio de bandes B2/B3 des 4 images satellites corrigées pour les effets atmosphériques avec les valeurs de ratio B2/B3 des 4 mêmes images non corrigées pour l'atmosphère a permis d'étudier l'effet des corrections atmosphériques sur la précision du modèle dans les différentes gammes de clarté des lacs.

En résumé

-
- Le modèle le plus simple (modèle 5) associe des mesures de terrain uniques avec des images satellites claires.
 - L'impact de la répétition des mesures sur le terrain et sur le satellite est évalué dans une étude 2x2 avec 4 différents modèles.
 - Les bénéfices des corrections atmosphériques sont évalués sur 4 images de 2010.
-

3.4 Application du modèle à deux sites d'étude du Québec

Le modèle de prédiction de l'absorbance de la matière organique dissoute colorée permet de cartographier et d'étudier la distribution de la matière organique sur une image satellite. Deux images satellites représentatives des deux régions boréales d'Eastmain et d'Abitibi ont été sélectionnées. Il s'agit des images du 15 juin 2010 à Eastmain et du 25 mai 2010 en Abitibi (images A₁ et C₁, Tableau 3) qui ne présentent pas de couverture

nuageuse. Après une analyse de la distribution de l'eau douce dans les deux régions, les valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorée ont été estimées à l'aide du modèle de prédiction retenu.

3.4.1 Extraction des lacs sur les images satellite

Afin d'isoler les étendues d'eau du reste de l'image, le canal infrarouge a été utilisé pour discriminer la végétation et l'eau. Dans les sites sélectionnés pour l'étude, les scènes sont composées de boisés, de terres agricoles et d'eau.

La limite entre l'eau et le reste du paysage est très marquée sur les histogrammes des bandes infrarouges des images (Figure 7). L'utilisation du canal infrarouge pour classifier les étendues d'eau a été validée par plusieurs études (Frazier & Page 2000).

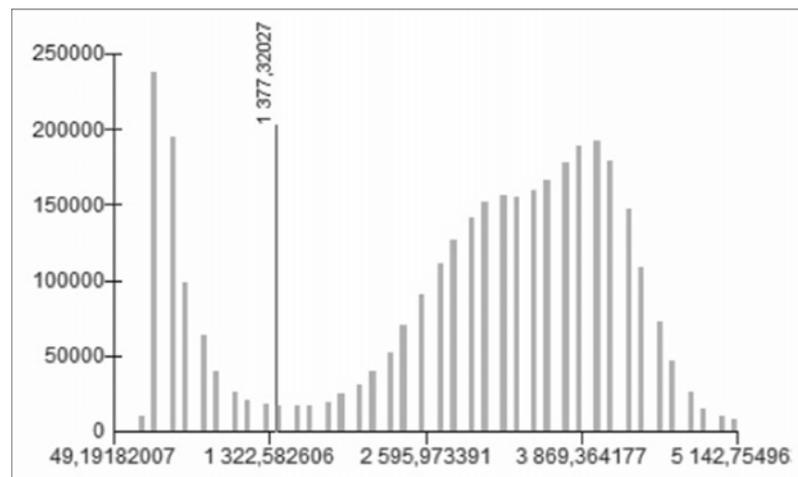


Figure 8 : Histogramme de fréquences dans la bande infrarouge (MS 5) de l'image *Advanced Land Imager* du 15 juin 2010 pour la région d'Eastmain. La barre verticale indique la valeur seuil sélectionnée pour séparer l'eau de la végétation sur l'image.

En pratique, la valeur seuil eau-végétation a été identifiée sur les histogrammes des canaux infrarouges de chacune des 10 images, puis les pixels ont été redistribués les deux

classes. Une zone tampon de 30 m a permis d'éviter d'éliminer les pixels recouvrant à la fois du terrain et de l'eau¹¹. Dans un second temps, le fichier image binaire a permis de délimiter un masque pour extraire les pixels correspondant aux étendues d'eau dans les images.

Les surfaces des lacs extraites des 2 images représentatives des régions d'Eastmain et d'Abitibi ont été utilisées pour générer des statistiques sur les surfaces totales d'eau douce, les densités de lacs, les tailles moyennes de lacs et leurs distributions.

3.4.2 Estimation de la matière organique colorée dans les deux régions

La matière organique dissoute colorée a été estimée dans les lacs des deux images claires représentatives des régions d'Eastmain et d'Abitibi. À partir des images de ratios de bandes B2/B3, la matière organique dissoute colorée a été estimée à l'aide du modèle de prédiction retenu pour l'ensemble des lacs visibles sur les images. Les valeurs de ratios de bandes B2/B3 moyennes par lacs ont été extraites dans une table à l'aide du module d'extraction « Zonal Statistic » d'ESRI ArcGIS. L'équation du modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée a été appliquée à l'aide d'un script sur le logiciel R. Les statistiques et les figures sur la distribution de la matière organique dissoute colorée ont été générées à l'aide de scripts sur le logiciel R.

3.4.3 Diagrammes de densité entre l'aire des lacs et leur absorbance en matière organique dissoute colorée

Les relations entre les superficies des lacs et leurs valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorée ont d'abord été visualisées sur des graphiques en nuages de points. Cependant, la grande densité de points (jusqu'à plus de 2200 points par graphique) rendait le graphique illisible. Pour rendre l'information lisible, des diagrammes de densités ont été générés pour les deux régions. Les diagrammes ont été créés sous R

¹¹ Les aires des lacs ont été calculées avant la classification des pixels d'eau et incluent ces zones tampon.

avec les fonctions « density » et « kde2d » pour le calcul des valeurs de densité, et « filled.contour » pour la représentation graphique¹².

La représentation en densité a ainsi permis de comparer les formes des deux nuages de points ayant une très grande densité pour les deux régions.

3.4.4 Calcul des teneurs en carbone organique dissous

Une fois le modèle de prédiction par satellite de la matière organique dissoute colorée obtenu, les teneurs de carbone organique ont été calculées à l'aide de la relation entre la matière organique et le carbone organique dissous pour les deux régions boréales étudiées. Les relations entre les teneurs en carbone et les valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorée à 440 nm (absorbance a-440) ont été établies pour les deux régions. Les données de terrain utilisées ont été récoltées dans le cadre des recherches menées à Eastmain (2005-2009) et en Abitibi (2010-2011). Dans la région d'Eastmain, 356 échantillons comportaient des mesures de carbone organique dissous et d'absorbance a-440. Dans la région d'Abitibi, 94 lacs comportaient des mesures de carbone organique dissous et d'absorbance a-440. Les relations entre a-440 et carbone organique dissous étant propres à chaque région, les régressions donc été calculées indépendamment pour chacune des deux régions.

À l'aide des équations de régression entre les valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorée et les teneurs en carbone organique, les teneurs en carbone organique ont été calculées pour l'ensemble des 2270 lacs visibles sur l'image d'Eastmain et des 302 lacs visibles sur l'image d'Abitibi. Les calculs ont été réalisés à l'aide d'un script sur le logiciel R.

¹² Ces trois fonctions sont disponibles dans la librairie MASS pour R.

3.4.5 Calcul des quantités de carbone organique dissous

Les quantités de carbone organique dissous ont été évaluées à l'aide d'une estimation des volumes des lacs sur l'ensemble des deux images représentatives des deux régions boréales. Le volume des lacs a été calculé à partir de relevés bathymétriques réalisés dans le cadre du projet Eastmain¹³. Les données bathymétriques comprenaient les aires, les profondeurs maximales et les profondeurs moyennes pour 13 lacs de la région d'Eastmain (Ferland et al. 2012). La relation entre les aires des lacs et leurs volumes est indirecte. Une première corrélation ($r^2 = 0.55$) a été obtenue entre les aire des lacs et leurs profondeurs maximales suivant l'équation :

$$y = 13.35x^{0.32} \quad (7)$$

Une seconde corrélation ($r^2 = 0.33$) a été obtenue entre les profondeurs maximales des lacs et leurs profondeurs moyennes suivant l'équation :

$$y = 0.74 x^{0.49} \quad (8)$$

Au final, ces deux équations ont permis d'estimer le volume de l'ensemble des lacs visibles sur les deux images représentatives des deux régions boréales. À partir des estimations de teneur en carbone organique dissous et des volumes des lacs, les quantités de carbone organique dissous ont été calculées pour les deux régions.

En résumé

-
- Deux images représentatives des régions d'Eastmain et d'Abitibi ont été analysées.
 - Les distributions des surfaces et de la matière organique ont été calculées.
 - Le carbone organique dissous a été estimé à partir de modèles régionaux.
 - Les volumes des lacs ont permis d'estimer des quantités de carbone organique dissous.
-

¹³ Données récoltées et étudiées par Marie-Ève Ferland dans le cadre de son doctorat.

Chapitre 4: Résultats

Un modèle de prédiction de l'absorbance de la matière organique dissoute colorée a été obtenu en associant un jeu de données de terrain non-synchronisé avec des images satellites récentes. La comparaison de ce modèle avec des modèles basés sur des mesures multiples sur le terrain et par satellite montre que des mesures uniques suffisent. Le modèle basé sur des images corrigées pour l'atmosphère n'est pas plus performant. Enfin, l'application du modèle dans deux régions boréales ayant des répartitions d'eau douce différentes montre des quantités de carbone organique dissous par unité de paysage de même ordre.

4.1 Prédiction de la matière organique dissoute colorée par satellite

L'observation des données montre une bonne réponse du capteur *Advanced Land Imager* aux variations de valeurs d'absorbance de matière organique dissoute colorée. Un modèle basé sur des mesures de terrain uniques et non synchronisées avec l'acquisition des images satellites donne des performances comparables à un modèle basé sur une acquisition de données synchronisées.

4.1.1 Relation entre les données satellitaires et les mesures de terrain

L'observation de la relation entre les ratios de bandes B2/B3 des images satellites et les données a-440 de terrain indique une bonne réponse du capteur *Advanced Land Imager* suivant la variation de valeurs a-440 sur le terrain (Figure 9). Les données de terrain offrent en effet une très grande variabilité avec une gamme de valeur d'absorbance de la matière organique dissoute colorée allant de 0.58 m^{-1} (lac 69, Abitibi) à 7.83 m^{-1} (lac 51, Abitibi).

Les deux régions complètent différemment la gamme de valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorée. En effet, les données de la région d'Abitibi occupent l'ensemble de la gamme de valeurs et les données de la région d'Eastmain complètent la gamme pour les lacs les plus clairs (i.e. partie inférieure droite, Figure 9).

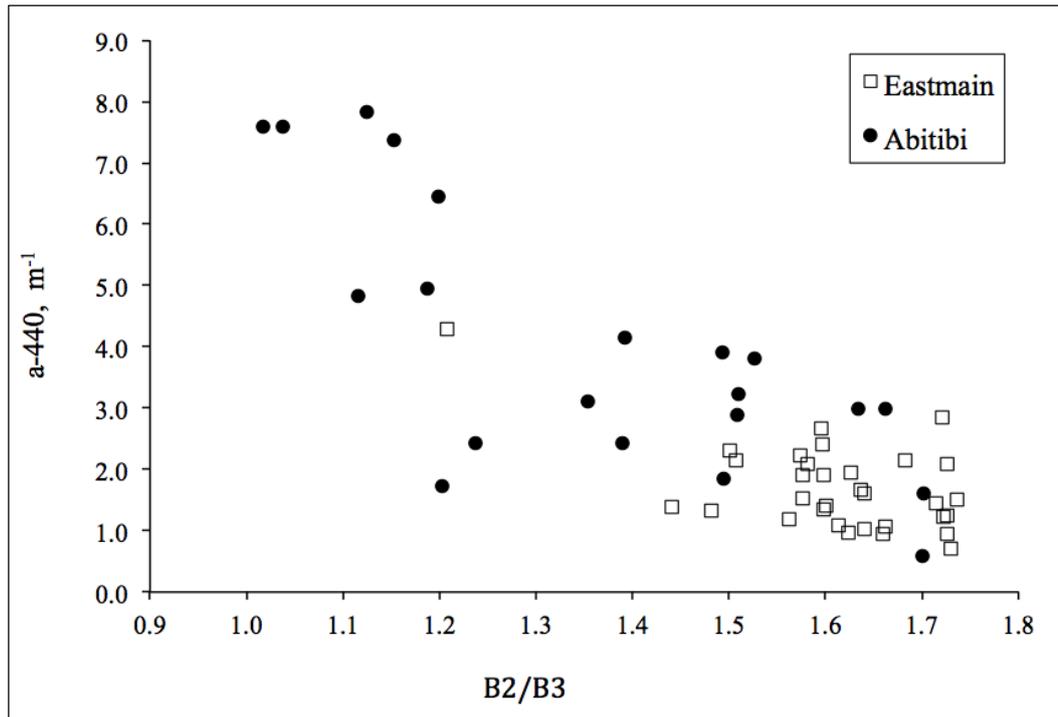


Figure 9 : Ratios de bandes B2/B3 des images satellites et valeurs d'absorbance a-440 mesurées dans 53 lacs des deux régions.

En particulier, la réunion des deux jeux de données permet de justifier l'utilisation d'un lac de la région d'Eastmain qui aurait été considéré comme valeur aberrante si l'on considère seulement les données d'Eastmain. Il s'agit du lac Lloyd (B2/B3 = 1.21, a-440 = 4.28 m⁻¹), qui se situe à l'extrémité gauche du jeu de données d'Eastmain (Figure 9). En effet, ce point s'inscrit parfaitement dans la relation construite à partir des données rassemblées d'Eastmain et d'Abitibi (Figure 9).

4.1.2 Modèle basé sur des mesures uniques et non-synchronisées

Le modèle 5 (Tableau 6) utilise des mesures uniques sur le terrain et sur le satellite. Lorsque des mesures multiples sont disponibles pour un lac donné, la valeur de terrain retenue est sélectionnée de façon aléatoire. Le modèle se base sur 6 images satellites claires (les images répétées ne sont pas utilisées) qui ont été corrigés au niveau du sommet de l'atmosphère (i.e. sans corrections atmosphériques).

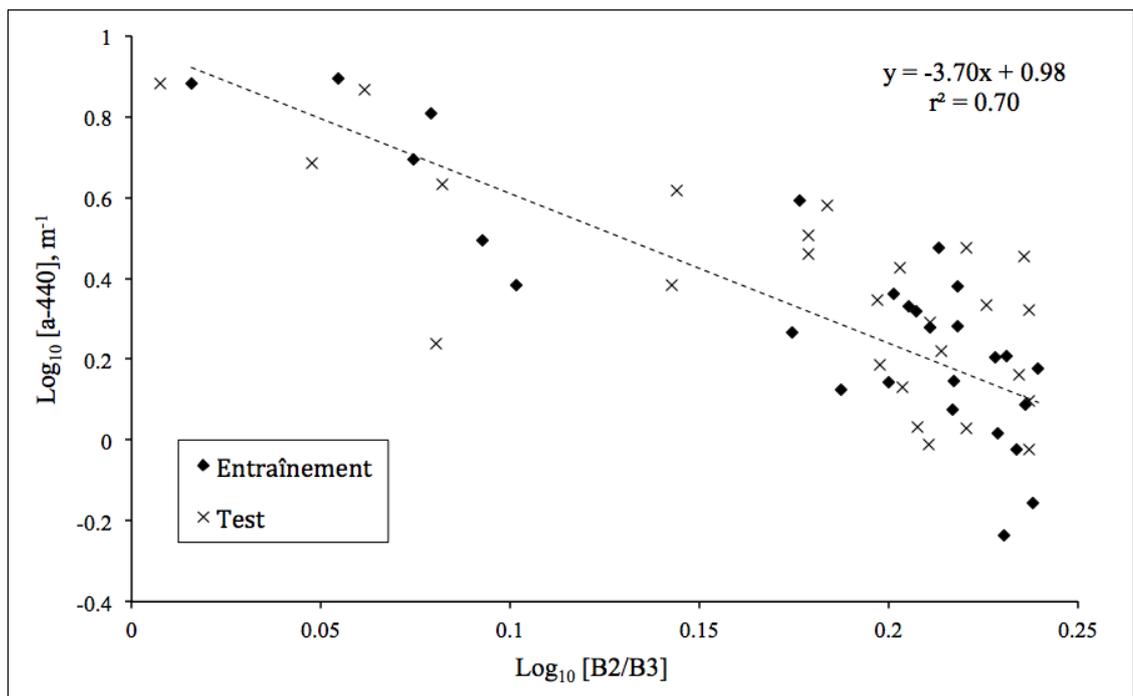


Figure 10 : Représentation en échelle log_{10} du modèle 5 (ligne en pointillé) basé sur 27 lacs d'entraînement et testé sur 26 lacs.

Ce modèle a été établi à partir de 27 lacs d'entraînement sélectionnés aléatoirement parmi les 53 lacs et testé sur les 26 lacs restant (Tableau 6, Figure 10). Les lacs d'entraînement sont répartis dans les gammes de couleurs claires et sombres (Figure 10). Ce modèle montre une bonne corrélation ($r^2 = 0.70$) entre les ratios de bandes B2/B3 et les valeurs d'absorbances a-440 mesurées sur le terrain avec une erreur-type de 1.12 m^{-1} .

Ainsi, un modèle basé sur des données de terrain non-synchronisées avec l'acquisition d'images satellites donne de bonnes performances malgré les délais entre le terrain et la prise d'image satellite. En effet, pour la région d'Abitibi, le délai entre la prise d'image satellite et la visite de terrain peut varier de moins d'un mois (10 lacs), de 1 à 3 mois (7 lacs), jusqu'à 1 an (4 lacs). Pour la région d'Eastmain, le délai varie de 1 à 6 ans, avec 3 lacs qui peuvent faire correspondre le terrain et le satellite dans le même mois d'une année différente. Ainsi, les données de terrain ne sont pas synchronisées avec les données satellites. Une analyse des résidus du modèle en fonction du délai entre la prise d'image et le terrain en jours n'a pas montré de corrélation ($r^2 = 0.01$), et la visualisation des données n'a pas suggéré de tendance.

Il semble donc que la variabilité apportée par la variation d'absorbance des lacs au cours du temps soit négligeable vis-à-vis de la variation des valeurs d'absorbances entre les lacs. La variance des mesures d'absorbance répétées sur le terrain a été calculée pour chacun des 21 lacs revisités. La moyenne de ces variances est de 0.33 m^{-1} . D'autre part, la variance des valeurs d'absorbances entre les lacs a été calculée à partir des valeurs moyennes d'absorbance pour chaque lac (toutes mesures confondues). Cette variance moyenne entre lacs est de 3.38 m^{-1} . Ainsi, il semble que la variabilité géographique soit supérieure à la variabilité temporelle des valeurs d'absorbances dans les lacs étudiés.

Ainsi, un modèle basé sur des données de terrain existantes, non-synchronisées avec la prise d'image satellite, se compare favorablement avec un modèle basé sur une acquisition de données de données synchronisée (Kutser et al. 2005b). La comparaison de ce modèle avec d'autres modèles basés sur des mesures répétées sur le terrain et sur le satellite permet de conclure sur les bénéfices d'ajouter des mesures répétées dans le jeu de données.

4.1.3 Bénéfices des mesures multiples sur le terrain et par satellite

Les quatre modèles issus de l'étude 2x2 sont de bonne qualité. L'ajout d'information par des répétitions de mesures sur le terrain ou sur le satellite ne semble pas améliorer la qualité de la prédiction. Bien que les coefficients de régression de ces modèles varient de 0.61 (modèle 1, Tableau 7) à 0.74 (modèle 4, Tableau 7), les erreurs types indiquent qu'il n'y a pas de modèle clairement plus performant qu'un autre. En effet, l'erreur-type du modèle le plus simple (modèle 1, Tableau 7) se trouve dans une tranche de 4% du modèle ayant la plus grande erreur-type (modèle 3, Tableau 7). Ainsi, il semble que la performance de ces 5 modèles reste dans le même ordre.

Modèle	Données terrain	Données satellite	N	a	b	r ²	Erreur-type (en m ⁻¹)
1	Aléatoires	Uniques	21	9.96	-3.81	0.61	1.14 (n = 32)
2	Répétées	Uniques	21	8.43	-3.59	0.66	1.10 (n = 32)
3	Aléatoires	Répétées	21	10.95	-3.83	0.67	1.28 (n = 32)
4	Répétées	Répétées	21	9.27	-3.61	0.74	1.15 (n = 32)
5	Aléatoires	Uniques	27	9.56	-3.70	0.70	1.12 (n = 26)

Tableau 7 : Modèles de prédiction de la matière organique dissoute colorée. N représente les effectifs d'entraînement des modèles, a et b les paramètres des régressions sous la forme $Y=aX^b$. L'erreur type est calculée en unités d'absorbance a-440 et se base sur l'effectif de test n du modèle.

D'autre part, bien que les pentes des modèles (paramètres b, Tableau 7) varient de -3.83 (modèle 3) à -3.59 (modèle 1), une analyse statistique montre que ces variations ne sont pas significatives. Une analyse de covariance ANCOVA a permis de conclure que les équations des modèles ne sont pas significativement différentes en termes d'ordonnée ($p=0.56$) et de pente ($p=0.99$) des modèles (paramètres a et b, Tableau 7).

Ainsi, un modèle basé sur des mesures uniques et non-synchronisées offre de bonnes performances. Les performances ne s'améliorent pas avec l'ajout de mesures tant sur le terrain (modèles 2 et 4) que sur le satellite (modèles 3 et 4).

4.1.4 Bénéfices des corrections atmosphériques

Les corrections atmosphériques des 4 images de 2010 ont permis d'étudier les bénéfices apportés par l'utilisation d'images corrigées au niveau du sol (i.e. corrigées pour l'atmosphère) par rapport à des images corrigées au niveau du sommet de l'atmosphère (i.e. non corrigées pour l'atmosphère). Pour les deux modèles, le jeu de données de terrain est identique.

Ces modèles se basent sur 40 lacs (23 à Eastmain, 17 en Abitibi) dont les mesures d'absorbance de la matière organique dissoute colorée ont été sélectionnées aléatoirement lorsque des répétitions étaient présentes. La régression entre les valeurs d'absorbance a-440 et les ratios de bandes B2/B3 extraits des images corrigées ($r^2 = 0.59$) se compare avec une régression basée sur des ratios de bandes B2/B3 extraits d'images non-corrigées pour l'atmosphère ($r^2 = 0.60$). En outre, la moyenne de résidus standardisés est comparable entre les modèles avec ou sans corrections atmosphériques (0.805 et 0.801 respectivement).

L'observation des résidus standardisés de ces deux modèles suivant la gamme de valeurs de matière organique dissoute colorée montre que les performances des modèles diffèrent dans les gammes de lacs très riches en matière organique par rapport aux lacs très clairs. Le modèle basé sur des images corrigées pour l'atmosphère est moins performant pour les lacs très riches en matière organique. Les 5 lacs les plus riches ont été surestimés avec le modèle basé sur des images corrigées (Figure 11). D'autre part, la moyenne des résidus standardisés pour les valeurs d'absorbance a-440 élevées (supérieures à la moyenne de 2.73 m^{-1}) est de 0.97 m^{-1} pour le modèle basé sur des images corrigées, contre 0.87 m^{-1} pour le modèle basé sur des images non corrigées pour l'atmosphère. Ainsi, il semble que

les corrections atmosphériques n'améliorent pas la prédiction pour les lacs très riches en matière organique.

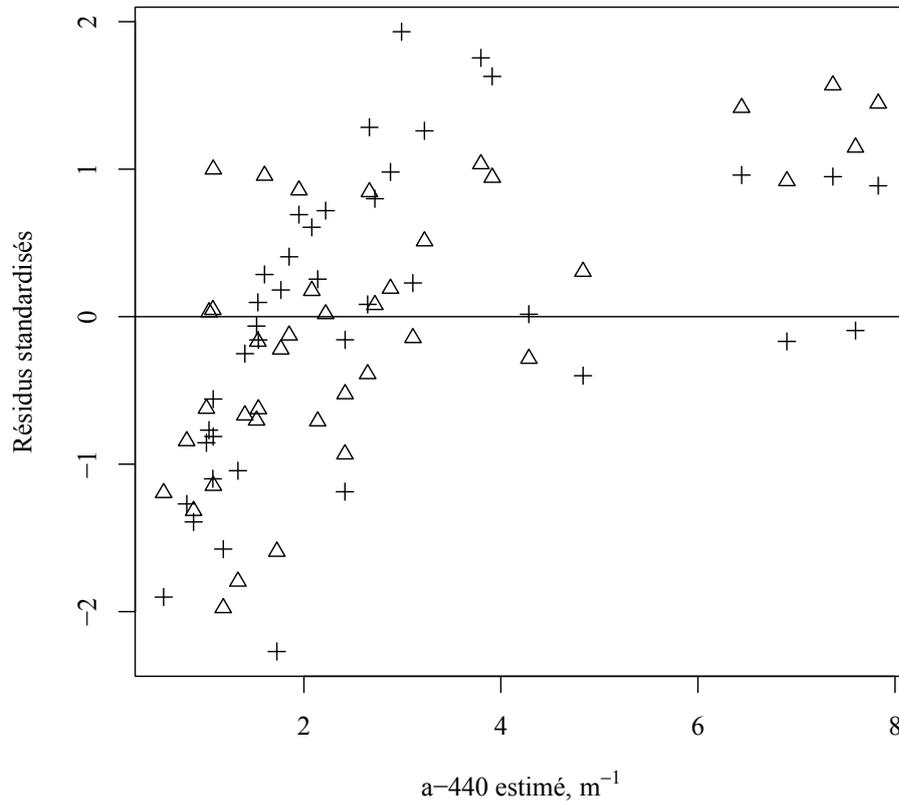


Figure 11 : Résidus standardisés des régressions de deux modèles basés sur 4 images de 2010 corrigées (triangles) ou non corrigées pour l'atmosphère (croix).

Inversement, la moyenne des résidus standardisés pour les valeurs d'absorbance a-440 faibles (inférieures à la moyenne de 2.73 m⁻¹) est de 0.72 m⁻¹ pour le modèle basé sur des images corrigées, contre 0.77 m⁻¹ pour le modèle basé sur des images non corrigées pour l'atmosphère. Ainsi, les corrections atmosphériques semblent améliorer la prédiction pour les lacs les plus clairs. En conséquence, les corrections atmosphériques semblent

favoriser la prédiction pour les lacs les plus clairs tout en défavorisant la prédiction pour les lacs les plus riches.

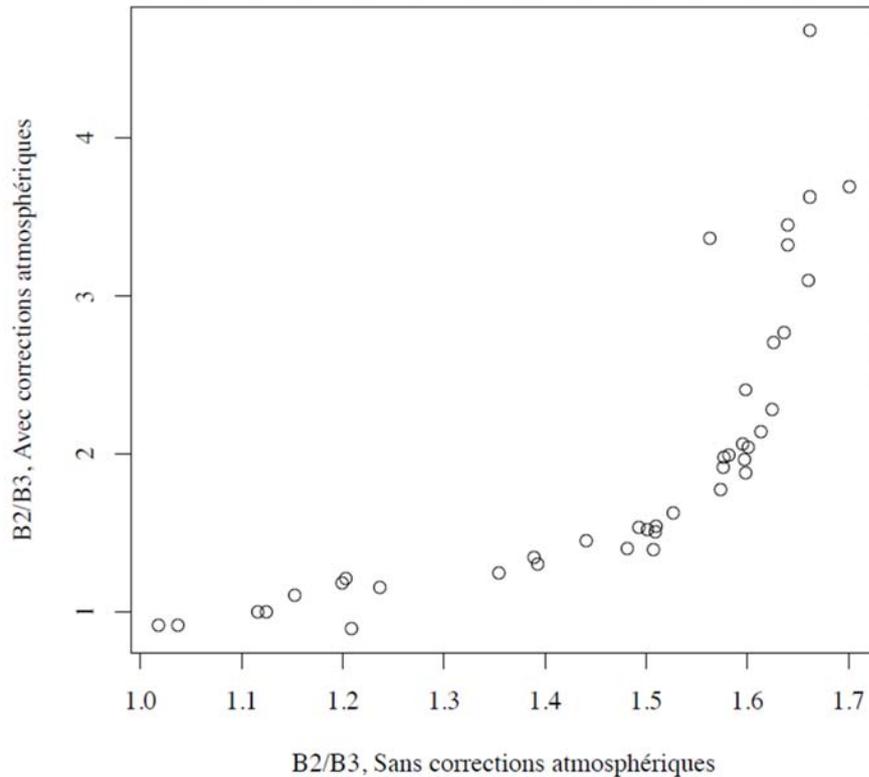


Figure 12 : Valeurs de ratio B2/B3 obtenus à partir de 4 images *Advanced Land Imager* corrigées (ordonnées) et non corrigées pour l'atmosphère (abscisses).

La comparaison des valeurs de ratio B2/B3 des 4 images corrigées ou non pour l'atmosphère (Figure 12) montre que les corrections atmosphériques apportent une meilleure sensibilité pour les lacs les plus clairs (B2/B3 supérieur à 1.5, Figure 12) et une perte de sensibilité pour les lacs les plus riches (B2/B3 inférieur à 1.5, Figure 12).

Ainsi, les corrections atmosphériques n'apportent pas de bénéfices à un modèle basé sur des images corrigées au niveau du sommet de l'atmosphère.

En résumé

-
- Un modèle basé sur des données de terrain existantes et non-synchronisées avec les images satellites offre une bonne prédiction ($r^2 = 0.70$, erreur-type = 1.12 m^{-1}) de la matière organique dissoute colorée des lacs boréaux.
 - L'ajout d'information dans le modèle par des répétitions des mesures sur le terrain (21 lacs revisités) et sur le satellite (4 images additionnelles) n'améliore pas le modèle.
 - Les corrections atmosphériques de 4 images test n'ont pas abouti à un modèle plus performant.
-

4.2 Application du modèle à deux sites d'étude au Québec

Deux images représentatives des régions d'Eastmain et d'Abitibi ont servi à comparer les deux régions. La distribution de l'eau douce est très différente dans les deux régions. L'application du modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée montre que les lacs ont des distributions de matières organiques différentes. Les teneurs en carbone organique des lacs diffèrent d'une région à l'autre. Cependant, les quantités de carbone organique dissous par surface de paysage sont de même ordre.

4.2.1 Distribution de l'eau douce dans les deux régions

Les deux régions sont significativement différentes en termes d'occupation de l'espace par l'eau douce. La région d'Eastmain est marquée par une omniprésence de l'eau douce qui recouvre près de 13 % du territoire (Tableau 8). La région d'Abitibi, quant à elle, comporte presque 3 fois moins d'eau douce avec seulement 4.7 % du territoire occupé par de l'eau douce.

D'autre part, l'eau douce est beaucoup plus segmentée dans la région d'Eastmain que dans la région d'Abitibi. En effet, on dénombre sur les images satellites 0.79 lacs par km^2 à Eastmain contre 0.09 lacs par km^2 en Abitibi. Enfin, la taille moyenne des lacs est 3

fois plus faible à Eastmain avec 16.47 ha en moyenne qu'en Abitibi avec 52.61 ha en moyenne (Tableau 8).

	Eastmain	Abitibi
Surface d'eau douce (ha)	37 394.64	15 889.59
Proportion de l'image couverte par de l'eau douce	12.98 %	4.70 %
Nombre de lacs	2270	302
Densité de lacs (nb/km ²)	0.79	0.09
Aire moyenne des lacs (ha)	16.47	52.61

Tableau 8 : Surfaces d'eau douces observées dans les deux images satellites représentatives des régions d'Eastmain et d'Abitibi.

Cependant, bien que le nombre de lacs et la couverture du territoire par l'eau douce soit très différente entre les deux régions, la distribution des tailles des lacs reste semblable entre les deux régions. En effet, environ 70% des lacs ont une superficie inférieure à 5 ha dans les deux régions (Tableau 9). La distribution des lacs dont la taille varie de 1 ha à 5 ha, et de 5 ha jusqu'à plus de 500 ha, est aussi comparable entre les deux régions (Tableau 9).

La distribution des lacs ayant une superficie inférieure à 1 ha (Tableau 9) est différente de celles des segments 1 ha à 5 ha, et 5 ha à plus de 500 ha. En effet, les lacs ayant une superficie inférieure à 0.1 ha sont moins fréquents que la distribution observée dans les autres segments laisserait présager. En effet, la résolution spatiale du capteur étant d'environ 0.01 ha, certains lacs de cette catégorie ont été omis de l'étude¹⁴.

¹⁴ Voir 5.1.4 : Résolution spatiale et étude de la distribution des lacs.

Superficie du lac	Eastmain		Abitibi	
	Nombre	Fréquence	Nombre	Fréquence
Inférieure à 5 ha	1637	72.1%	209	69.2%
Entre 5 ha et 50 ha	512	22.6%	64	21.2%
Entre 50 ha et 500 ha	107	4.7%	24	7.9%
Plus de 500 ha	14	0.6%	5	1.7%
<i>Total</i>	<i>2270</i>	<i>100.0%</i>	<i>302</i>	<i>100.0%</i>
Inférieure à 1 ha	906	39.9%	142	47.0%
Entre 1 et 3 ha	503	22.2%	51	16.9%
Entre 3 et 5 ha	228	10.0%	16	5.3%
<i>Total lacs de moins de 5 ha</i>	<i>1637</i>	<i>72.1%</i>	<i>209</i>	<i>69.2%</i>
Inférieure à 0.1 ha	190	8.4%	38	12.6%
Entre 0.1 et 0.5 ha	387	17.0%	64	21.2%
Entre 0.5 et 1 ha	329	14.5%	40	13.2%
<i>Total lacs de moins de 1 ha</i>	<i>906</i>	<i>39.9%</i>	<i>142</i>	<i>47.0%</i>

Tableau 9 : Distribution de la taille des lacs observée dans deux images satellites représentatives des régions d'Eastmain et d'Abitibi.

En outre, l'analyse des surfaces cumulées par les différents segments de taille des lacs montre que la répartition des surfaces entre les petits lacs et les grands lacs diffère d'une région à l'autre (Tableau 10). En effet, les lacs de moins de 5 ha concentrent 5.8% des eaux douces dans la région d'Eastmain contre 1.4% en Abitibi. Aussi, les lacs de plus de 500 ha concentrent seulement 37.6% des eaux douces à Eastmain contre 67.6% en Abitibi (Tableau 10). Ainsi, il semble que la présence de grands lacs en Abitibi impacte fortement la répartition des surfaces d'eau dans cette région.

Superficie du lac	Eastmain		Abitibi	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)
Inférieure à 5 ha	2183.3	5.8%	214.4	1.3%
Entre 5 ha et 50 ha	8170.9	21.9%	1059.4	6.7%
Entre 50 ha et 500 ha	12976.3	34.7%	3872.5	24.4%
Plus de 500 ha	14064.1	37.6%	10743.3	67.6%
<i>Total</i>	<i>37394.6</i>	<i>100.0%</i>	<i>15889.6</i>	<i>100.0%</i>

Tableau 10 : Surfaces cumulées des lacs selon leur superficie dans les régions boréales d'Eastmain et d'Abitibi.

Ainsi, la comparaison des deux images représentatives des deux régions a permis d'identifier des différences de répartition de l'eau douce entre les deux régions. La région d'Eastmain est marquée par une omniprésence de l'eau douce et une superficie moyenne des lacs faibles. La région d'Abitibi présente quant à elle moins d'eau douce et des lacs en moyenne 3 fois plus étendus qu'à Eastmain. La distribution des lacs selon leur taille est similaire entre les deux régions. Par contre, les grands lacs de la région d'Abitibi concentrent, proportionnellement, plus d'eau que les grands lacs de la région d'Eastmain.

L'application du modèle de prédiction de la matière organique colorée sur deux images représentatives dans ces deux régions permet de comparer ces régions au niveau de la matière organique dissoute colorée.

4.2.2 Distribution de la matière organique dissoute colorée dans les deux régions

Afin de cartographier la matière organique dissoute colorée dans les deux images satellites des régions d'Eastmain et d'Abitibi, le modèle 5 (Tableau 7) a été appliqué sur les deux images de ratio de bandes B2/B3 des deux régions. L'équation utilisée est :

$$a_{440} = 9.56 \left(\frac{B2}{B3} \right)^{-3.70} \quad (9)$$

Les valeurs moyennes d'absorbance de la matière organique dissoute colorée observées sur terrain sont très différentes entre les régions d'Eastmain et d'Abitibi. En effet, les lacs de la région d'Eastmain ont une absorbance a-440 moyenne de 1.8 m⁻¹ dans les lacs visibles sur l'image satellite, et de 1.7 m⁻¹ dans l'ensemble des lacs visités dans la région (Tableau 11). La région d'Abitibi comporte des lacs à la fois très clairs et très riches en matière organique (Figure 10). La moyenne de l'absorbance a-440 mesurée en Abitibi est plus élevée que pour la région d'Eastmain. En effet, la moyenne observée est de 4.0 m⁻¹ pour les lacs visibles sur l'image satellite et 3.1 m⁻¹ pour l'ensemble des lacs étudiés dans la région (Tableau 11).

	Eastmain	Abitibi
Valeurs moyennes d'absorbance a-440 (m ⁻¹) :		
de tous les lacs échantillonnés dans la région	1.7 (n=70)	3.1 (n=94)
des lacs échantillonnés visibles sur l'image	1.8 (n=23)	4.0 (n=8)
de tous les lacs visibles sur l'image	2.1 (n=2270)	2.4 (n=302)

Tableau 11 : Absorbance de la matière organique dissoute colorée à 440 nm observée sur le terrain et calculée sur l'imagerie.

Ainsi, bien que les valeurs d'absorbance a-440 moyennes mesurées sur le terrain soient très différentes (1.7 m⁻¹ à Eastmain et 3.1 m⁻¹ en Abitibi), les valeurs moyennes prédites par le modèle à partir des deux images satellites sont très proches entre les deux régions (2.1 m⁻¹ à Eastmain et 2.4 m⁻¹ en Abitibi). D'autre part, la distribution des valeurs d'absorbance a-440 observées par satellite est différente entre les deux régions.

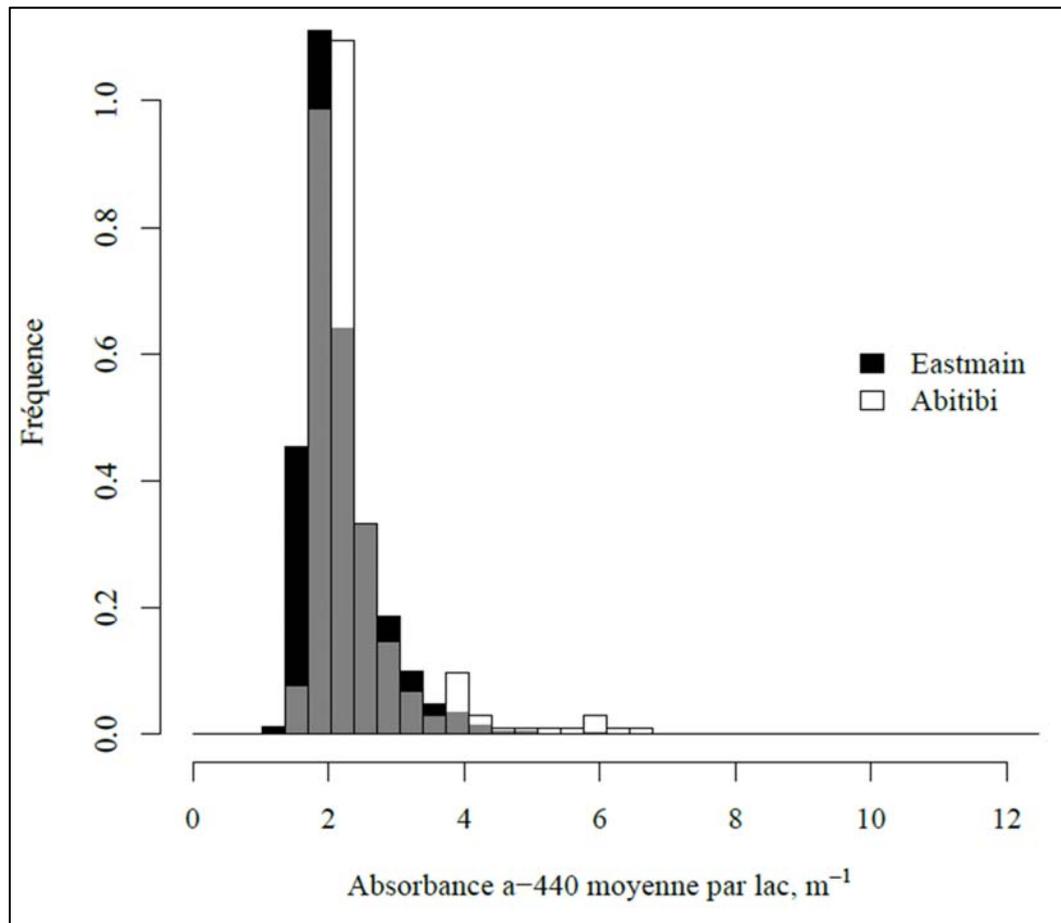


Figure 13 : Histogrammes des fréquences de valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorée (a-440) des lacs estimées sur les images d'Eastmain (noir) et d'Abitibi (blanc). La superposition des deux histogrammes apparaît en gris.

En effet, la dispersion des valeurs d'absorbances estimées sur l'image d'Abitibi est d'environ 30% supérieure à celle des valeurs estimées sur l'image d'Eastmain, avec des écarts à la moyenne de 0.78 m⁻¹ et 0.61 m⁻¹ respectivement. Les histogrammes de fréquences de valeurs d'absorbances estimées montrent que les lacs les plus riches en matière organique (absorbances a-440 supérieures à 4 m⁻¹, Figure 13) sont plus fréquents dans la région d'Abitibi que dans la région d'Eastmain. L'historgramme de l'image

d'Abitibi montre une gamme d'absorbances a-440 plus étendue que celui de l'image d'Eastmain.

Ainsi, les images *Advanced Land Imager* permettent de caractériser des différences entre les deux régions boréales au niveau de la distribution des valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorée.

4.2.3 Aire des lacs et matière organique dissoute colorée

Les relations entre l'aire des lacs et leurs valeurs moyennes estimées d'absorbance de la matière organique dissoute colorée ne montre pas de corrélation pour la région d'Eastmain ($r^2 = 0.00$) et pour la région d'Abitibi ($r^2 = 0.07$). La variabilité de valeurs d'absorbance ne semble pas s'expliquer par la taille des lacs. L'observation des nuages de points entre les deux variables était impossible en raison du grand nombre de points sur le graphique (jusqu'à 2270 points), et des diagrammes de densité ont été générés.

La visualisation de diagrammes de densité entre l'aire des lacs et leurs absorbance de la matière organique dissoute colorée estimée (Figure 14) montre que la forme des nuages de points diffère d'une région à une autre. En effet, la région d'Abitibi montre un groupe additionnel par rapport à la région d'Eastmain. On observe sur le diagramme de l'image d'Abitibi un groupe de lacs de faible taille avec des valeurs d'absorbance a-440 légèrement plus élevées qui vient s'ajouter au groupe central au groupe qui est aussi présent dans la région d'Eastmain (Figure 14). Cette observation pourrait traduire les différences de types de lacs entre les deux régions.

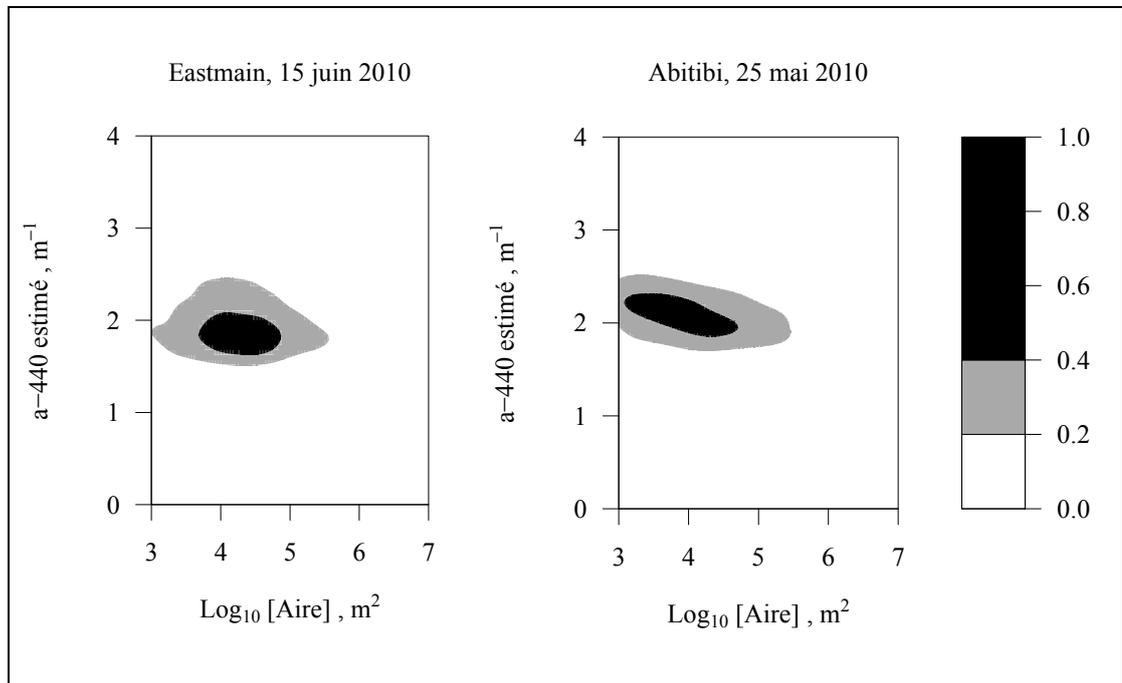


Figure 14 : Diagrammes de densité pour la relation entre l'aire des lacs et l'absorbance a-440 estimée à l'aide d'images *Advanced Land Imager* et du modèle 5 dans deux régions du Québec. Le graphe est constitué d'une matrice de 200 cellules de densité. L'échelle indique la probabilité de trouver un point dans chaque cellule.

Ainsi, aucune relation claire n'a été établie entre l'aire des lacs et leurs teneurs en matière organique. Les cartes hydrographiques, qui permettent de calculer les aires d'un grand nombre de lacs boréaux, ne permettent donc pas d'estimer des valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorée sur la base d'une relation avec l'aire. Ce résultat justifie l'utilisation d'images satellites acquises par des capteurs à radiométrie avancée de type *Advanced Land Imager*, ou prochainement Landsat 8, pour estimer la matière organique dissoute colorée des lacs.

4.2.4 Quantités de carbone organique dissous dans les deux régions

La teneur en carbone organique dissous moyenne calculée pour l'image d'Abitibi est plus élevée que pour l'image d'Eastmain, de même que pour l'absorbance de la matière organique dissoute colorée. En outre, la quantité

Relations entre absorbance a-440 et carbone organique dissous

Les relations établies entre les valeurs d'absorbance de la matière organique dissoute colorées et les teneurs en carbone organique dissous sont différentes entre les deux régions. Pour la région d'Eastmain, une corrélation ($r^2 = 0.61$) a été établie à partir de 356 échantillons. Les teneurs en carbone organique peuvent être estimées à partir de l'équation :

$$y = 5.54 x^{0.50} \quad (10)$$

Pour la région d'Abitibi, une corrélation ($r^2 = 0.49$) a été établie à partir de 94 échantillons. Les teneurs en carbone organique peuvent être estimées à partir de l'équation :

$$y = 9.08 x^{0.21} \quad (11)$$

Ces deux équations sont significativement différentes et l'utilisation d'équations propres à chaque région est justifiée (Figure 15).

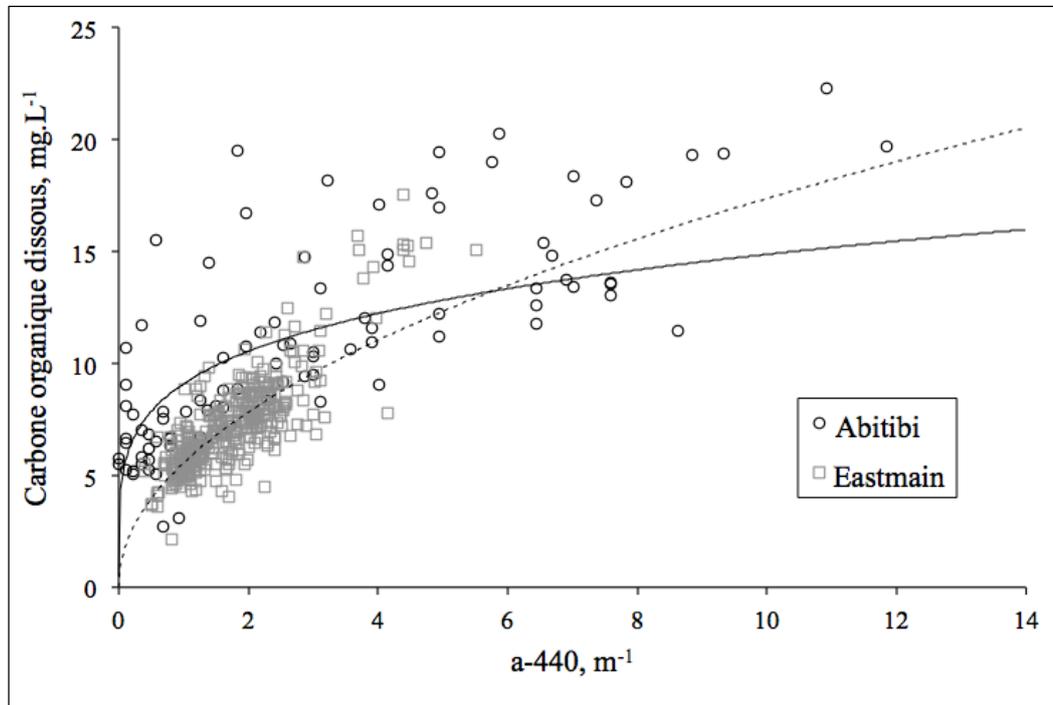


Figure 15 : Relation entre l'absorbance de la matière organique dissoute colorée à 440 nm et la teneur en carbone organique dissous pour 94 échantillons de la région d'Abitibi (ligne pleine) et 356 échantillons de la région d'Eastmain (ligne en pointillés).

Moyennes régionales de carbone organique dissous dans les lacs

Les lacs de la région d'Abitibi ont des teneurs en carbone organique estimées environ 30% plus élevées que les lacs de la région d'Eastmain. En effet, les teneurs moyennes en carbone organique dissous sont de 8.05 mg.L⁻¹ à Eastmain et 10.84 mg.L⁻¹ en Abitibi (Tableau 12). Cette différence suit la tendance observée pour la matière organique dissoute colorée avec 2.1 m⁻¹ à Eastmain et 2.4 m⁻¹ en Abitibi, et semble accentuée par les différences de pentes entre les deux équations régionales pour estimer les valeurs de carbone organique dissous.

Quantités de carbone organique dissous dans les deux régions

Le calcul des volumes des lacs a permis de calculer des quantités de carbone organique. La région d'Eastmain est caractérisée par une omniprésence des eaux continentales et contient 2 fois plus de surface d'eau par km² que la région d'Abitibi (Tableau 8). En conséquence, les volumes d'eau totaux de la région d'Eastmain sont plus élevés que dans la région d'Abitibi. En effet, l'image satellite d'Eastmain est couverte par 0.32 millions de m³ d'eau par km², contre 0.12 millions de m³ d'eau par km² dans la région d'Abitibi (Tableau 12).

	Eastmain	Abitibi
Teneur moyenne en carbone organique dissous (mg.L ⁻¹)	8.1	10.8
Volume d'eau des lacs visibles sur l'image (m ³) :		
- moyen par lac	4.05E+05	1.35E+06
- total	9.19E+08	4.08E+08
- total par km ² de paysage	3.19E+05	1.21E+05
Quantité moyenne de carbone organique dissous (g) :		
- par lac	3.25E+06	1.59E+07
- par m ² de surface de lac	17.64	23.79
- par m ² de paysage	2.56	1.42

Tableau 12 : Volumes d'eau et quantités de carbone organique dissous estimés dans deux régions boréales du Québec.

La région d'Abitibi est quant à elle caractérisée par des lacs en moyenne 3 fois plus volumineux que pour la région d'Eastmain, même si le volume total d'eau reste 2.5 fois inférieur. De plus, les teneurs moyennes en carbone organique dissous sont plus élevées en Abitibi que dans la région d'Eastmain avec 10.8 mg.L⁻¹ contre 8.1 mg.L⁻¹ (Tableau 12).

Ainsi, avec des teneurs en carbone organique dissous et des volumes plus élevés, la région d'Abitibi présente des quantités moyennes de carbone organique dissous par lac presque 5 fois plus élevées que dans les lacs d'Eastmain avec 15.9 tonnes contre 3.25 tonnes (Tableau 12). Toutefois, même si les quantités de carbone organique dissous sont plus élevées dans la région d'Abitibi que dans la région d'Eastmain, la quantité de carbone organique par surface d'eau demeure plus élevée dans la région d'Eastmain, qui présente des lacs de plus petite taille. En effet, les quantités de carbone organique dissous par unité de surface dans les lacs sont de 23.79 g.m⁻² à Eastmain et 17.64 g.m⁻² en Abitibi (Tableau 12).

Enfin, même si les lacs de la région d'Abitibi contiennent en moyenne 5 fois plus de carbone organique dissous que la région d'Eastmain, les quantités de carbone organique dissous par unité de paysage des deux régions restent du même ordre avec 2.56 g.m⁻² à Eastmain et 1.42 g.m⁻² en Abitibi.

En résumé

-
- La distribution de l'eau douce diffère entre les régions d'Eastmain et d'Abitibi.
 - L'aire des lacs ne permet pas de prédire la quantité de matière organique par satellite.
 - Les quantités de carbone par unité de paysage sont plus proches que le laisse présager la comparaison des quantités de carbone organique dissous des lacs des deux régions.
-

Chapitre 5: Discussion

Les conclusions de cette étude peuvent être étayées par l'ajout de nouvelles données de terrain et de nouvelles images satellites. Les bénéfices des corrections atmosphériques peuvent encore être explorés avec d'autres méthodes de traitement d'images possibles. Cette étude a permis de dégager des recommandations de travail à partir des prochaines images Landsat 8 qui sont présentées dans cette partie. Enfin, la géomatique semble se diffuser dans de nombreuses disciplines comme la biologie et l'écologie. Cette diffusion soulève des questions autour de l'adaptation des outils de géomatique et du partage des savoirs entre les disciplines qui seront discutées en fin de partie.

5.1 Limites des conclusions de l'étude

Les conclusions apportées par cette étude sur la possibilité d'utiliser des données non-synchronisées avec l'acquisition d'images satellites ne s'appliquent que pour des jeux de données couvrant une large gamme de valeurs d'absorbance. Les conclusions apportées sur les bénéfices d'utiliser des mesures de terrain et par satellite multiples sont limitées par le biais induit par le jeu de données qui ne présente des répétitions que pour certains lacs. L'absence d'améliorations apportées par les corrections atmosphériques peut être mise en question par d'autres méthodes de traitement. D'autre part, les satellites d'observation de la Terre actuels ont encore une résolution spatiale limitant l'étude des lacs boréaux de très petite surface. Enfin, les quantités de carbone organique dissous estimées dans les deux régions pourraient être ajustées par des données bathymétriques dans la région d'Abitibi. Enfin, les quantités de carbone organique sédimentées, invisibles par satellite, sont importantes à considérer pour l'étude du cycle du carbone à l'échelle régionale.

5.1.1 Utilisation de données non-synchronisées et gammes de valeurs

L'étude montre que des données non-contemporaines et non-synchronisées peuvent être utilisées pour construire un modèle de prédiction de la matière organique par satellite. Ainsi, la variation temporelle de l'absorbance de la matière organique est négligeable devant la variabilité des valeurs entre les lacs. Cependant, en considérant une partie des gammes de valeurs, comme par exemple en n'utilisant que le jeu de données Eastmain, la qualité du modèle chute ($r^2 = 0.40$). En effet, la variabilité observée au niveau du satellite avec le ratio B2/B3 devient faible devant la variabilité de valeurs mesurées sur le terrain (variance entre les différents échantillons). Ainsi, la variabilité temporelle devient négligeable lorsque la gamme de valeurs augmente. Dans un cas où la gamme de valeurs échantillonnées est mince, la synchronisation des données de terrain avec les données satellites permet donc potentiellement de limiter l'effet de la variation temporelle et ainsi améliorer la qualité du modèle.

5.1.2 Mesures répétées sur le terrain et par satellite

L'étude montre que l'ajout de mesures répétées sur le terrain et sur le satellite n'améliore pas la qualité du modèle de prédiction. Cependant, sur les 6 sites utilisés dans l'étude, seulement 2 comportaient des images répétées. Ainsi, la comparaison des modèles utilisant une répétition d'image ou non est biaisée. L'acquisition d'images additionnelles permettrait d'observer le comportement du modèle à mesure que l'on ajoute des images satellites.

Au niveau des mesures de terrain, sur les 53 lacs visibles sur l'imagerie et incorporés dans le modèle, 21 lacs ont été mesurés plusieurs fois, et 32 lacs une seule fois. Ainsi, lorsque l'on compare les modèles basés sur des mesures uniques avec des modèles basés sur des mesures multiples, un biais subsiste dû au fait que l'ensemble des lacs n'a pas été revisité. De plus, la région d'Eastmain concentre plus de lacs revisités (17 sur 32) que la région d'Abitibi (4 sur 21). Comme la région d'Eastmain se concentre dans la partie inférieure droite du modèle (Figures 8 et 9), les lacs ayant été revisités ne sont pas

également répartis sur la gamme de valeurs du modèle. L'ajout de données dans la région d'Abitibi permettrait d'étayer cette conclusion. D'autre part, la haute résolution temporelle de Landsat 8 permettra de questionner les conclusions basées sur un satellite prototype pour lequel la fréquence d'acquisition des images est très limitée. En effet, de nombreuses images seront disponibles pour un même site et la question des bénéfices des mesures répétées par satellite pourra être rediscutée dans des études prochaines.

5.1.3 Bénéfices des corrections atmosphériques

L'étude montre que les corrections atmosphériques n'améliorent pas la qualité de la prédiction. Cette conclusion rejoint celle d'une autre recherche utilisant des images *Advanced Land Imager* dans laquelle la performance des modèles ne s'améliorait pas avec les corrections atmosphériques (Winn et al. 2009). Cette conclusion montre cependant des limites pour plusieurs raisons.

Premièrement, la variabilité du jeu de données impacte fortement cette conclusion. Les données de terrain utilisées dans cette étude offrent une grande variabilité de valeurs d'absorbances. Ainsi, la gamme de valeurs du modèle est grande. En conséquence, les gains apportés par les corrections atmosphériques sont limités puisque la variabilité du modèle est déjà en grande partie expliquée par la variabilité entre les différents lacs visités sur le terrain (Tableau 7).

Deuxièmement, de nombreuses méthodologies sont envisageables pour effectuer des corrections atmosphériques, avec certaines plus performantes que d'autres. Par exemple, une méthode basée sur une utilisation conjointe d'images *Advanced Land Imager* et d'images hyper-spectrales *Hyperion* acquises simultanément donne de bons résultats (Kutser et al. 2005a, 2005b). Le satellite Landsat 8 n'offrira cependant pas d'images hyper-spectrales simultanées. Ainsi, cette méthode de correction ne pourra plus s'appliquer en dehors des données offertes par le satellite expérimental *Earth Observing-1*. Aussi, des logiciels commerciaux peuvent être envisagés, comme le module de corrections

atmosphériques FLAASH¹⁵. Ce module a aussi été évalué dans cette étude : 4 images d'essai (images du 4 octobre 2010 et du 19 mai 2011 à Eastmain, et images du 25 mai et 16 juillet 2010 en Abitibi) ont été corrigées à l'aide du module FLAASH sur les serveurs de l'Université de l'Illinois, Chicago¹⁶, commandé par le *NASA Goddard Space Flight Center* pour le projet *Geospatial Workflow Processing Engine* sur la plateforme Geobliki¹⁷. L'analyse des 4 images corrigées a montré de nombreuses sur-corrrections pour les lacs boréaux. En effet, certaines valeurs de réflectances négatives sont apparues. Pour autant, une calibration différente du module aurait pu toutefois aboutir à des résultats satisfaisants. Enfin, des méthodes empiriques existent mais ne s'appliquent pas dans le cadre de cette étude. En effet, elles nécessitent soit l'utilisation d'une large cible ayant une réflectance constante, comme du béton, commune à toutes les images, soit des mesures de réflectance au sol au moment de l'acquisition de l'image, et donc une campagne de mesure coordonnée. Ainsi, certaines méthodes de modélisation n'ont pas été envisagées dans cette étude. Ainsi d'autres méthodes doivent être envisagées pour explorer les bénéfices potentiels des corrections atmosphériques sur la qualité d'un modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée dans les lacs boréaux.

Troisièmement, les données météorologiques utilisées pour générer les paramètres de diffusion et de diffraction dans le logiciel Reflect ont été fournies par des stations météorologiques relativement éloignées des sites d'acquisition des images. En effet, la station la plus proche pour la zone d'Eastmain est située à 180 km, et la station la plus proche pour la zone d'Abitibi à 140 km. Ainsi, les valeurs de température et d'humidité relatives sont relativement biaisées. De façon plus importante, les valeurs de visibilité n'ont pas pu être validées car la visibilité change rapidement d'un endroit à un autre. Différentes valeurs de visibilité ont donc été testées pour générer des valeurs de profondeur optique

¹⁵ FLAASH, *Spectral Science Inc.*, notamment commercialisé par la société *EXELIS Visual Information Solution* dans son logiciel ENVI (*ENvironment for Visualizing Images*) sous l'environnement IDL (*Interactive Data Language*).

¹⁶ <http://matsu.opencloudconsortium.org/>

¹⁷ <http://geobpms.geobliki.com/>

d'aérosol adéquates. Ainsi, les données météorologiques des zones boréales reculées comportent une grande partie d'incertitude. Ainsi, un raffinement des données météorologiques observées sur le terrain le jour de l'acquisition de l'image est souhaitable et permettrait d'améliorer le modèle physique de corrections atmosphériques. Cependant, tant qu'à se trouver sur le terrain le jour de l'acquisition de l'image, la mesure des réflectances au sol (pour une correction empirique des effets de l'atmosphère) est évidemment plus recommandée.

5.1.4 Résolution spatiale et étude de la distribution des lacs

La principale limite de l'utilisation d'une image satellite pour étudier la distribution des eaux continentales réside dans la résolution spatiale de l'image. En effet, la résolution spatiale du capteur *Advanced Land Imager*, qui est similaire à Landsat 7, est de 30 m. Ainsi, si l'on considère qu'une zone de tampon de 30 m pour ne pas inclure de pixels contenant des terres émergées, de nombreux lacs de petite taille sont exclus. Le nombre de lacs évalués sur une image de 30 m de résolution spatiale a été comparé avec des cartes de la base nationale de données topographiques canadienne¹⁸ sur une zone de 25 km par 50 km située dans la région d'Eastmain. Sur 899 lacs présents dans la base de données, seuls 414, soit moins de 50%, sont visibles sur l'imagerie à 30 m de résolution spatiale¹⁹.

Ainsi, l'étude de la relation entre les tailles des lacs et leurs valeurs d'absorbance pour la matière organique exclue la majorité des plus petits lacs. La prise en compte des lacs les plus petits permettrait peut être d'identifier une tendance voire une relation. Cependant, les capteurs utilisables sont très limités. En effet, plus la résolution spatiale augmente, plus la taille des images diminue. De plus, l'impératif de conserver une résolution radiométrique adéquate (supérieure à 11-bit, d'après Kutser et al. 2005a) limite le choix du capteur. Cependant, l'acquisition d'une image à très haute résolution spatiale

¹⁸ <http://geogratis.cgdi.gc.ca/>

¹⁹ Pour information, l'utilisation d'un capteur aquatique de type MERIS, qui a une résolution spatiale de 300 m, permettrait d'identifier seulement 4 lacs sur les 899 présents.

pour une partie d'une image acquise par *Advanced Land Imager* ou Landsat 8 permettrait de compléter une partie de la relation.

5.1.5 Quantités de carbone organique dissous dans le paysage

Le calcul des quantités de carbone organique dissous repose sur le calcul des volumes d'eau qui pose une principale limite : la bathymétrie des lacs a été mesurée seulement dans la région d'Eastmain. En effet, les lacs de la région d'Abitibi n'ont pas la même morphologie et une approximation a été induite par l'utilisation d'une équation commune aux deux régions. Le calcul des volumes pourrait être raffiné en incorporant des données de bathymétrie pour la région d'Abitibi.

Les quantités de carbone organique dissous estimées ne peuvent pas être comparées avec des quantités de carbone organique total, qui sont souvent publiées dans la littérature. En effet, les quantités de carbone organique total incluent le carbone contenu dans les sédiments. Ainsi, les valeurs calculées dans cette étude peuvent être comparées avec des études reposant sur des mesures de carbone organique total. Par exemple, les quantités de carbone organique dissous estimées sur les images des régions d'Eastmain et d'Abitibi sont de l'ordre de 10 à 30 g.m⁻² en surface aquatique. Comparé à une autre étude dans la région (Ferland et al. 2012), les quantités de carbone organique total dans 13 lacs situés autour du barrage d'Eastmain sont de 23 kg.m⁻² dans les lacs. Il existe donc un facteur mille entre les deux valeurs. Malheureusement, les teneurs en carbone organique dissous ne sont pas corrélés avec les quantités de carbone organique total des lacs (Ferland et al. 2012). Ainsi, les estimations de quantités de carbone à grande échelle peuvent être raffinés par des modèles reliant l'estimation de l'absorbance de la matière organique dissoute colorée par satellite avec les quantités totales de carbone organique dissous et sédimenté.

En résumé

-
- Les conclusions sur l'impact des répétitions de mesures peuvent être étayées par des revisites des lacs et des images additionnelles.
 - Les conclusions sur les corrections atmosphériques peuvent être remises en question avec d'autres méthodes de correction.
 - Une image avec une résolution de 30 m exclue la majorité des lacs boréaux de très petite surface mais peut être complétée par une image de très haute résolution.
 - La prise en compte des sédiments est essentielle pour calculer des bilans de carbone organique régionaux.
-

5.2 Recommandations pour construire des modèles similaires

5.2.1 Travail de terrain

Cette étude a montré que l'utilisation de données existantes peut aboutir à un modèle de prédiction de l'absorbance de la matière organique dissoute colorée satisfaisant. Pour autant, un modèle de prédiction satisfaisant doit couvrir une large gamme de valeurs d'absorbance. Ainsi, des mesures de terrain additionnelles peuvent être utilisées pour améliorer la qualité de la prédiction dans certaines parties du modèle (lacs clairs ou lacs riches en matière organique). Pour le travail de terrain, il est recommandé de compléter la gamme de valeurs du modèle en visitant de nouveaux lacs plutôt que de revisiter des lacs déjà étudiés. En effet, cette étude a montré que les mesures répétées sur le terrain n'améliorent pas le modèle de prédiction. Ainsi, une image satellite déjà existante, ou acquise après la première campagne de terrain permet d'identifier les lacs ayant des valeurs d'absorbance comprises dans les gammes de valeurs où le modèle manque de finesse pour directement cibler les lacs les plus intéressants.

5.2.2 Acquisition et traitement des images satellite

Puisqu'un modèle de prédiction peut être basé sur des images non-synchronisées, il est recommandé de renouveler l'acquisition d'image jusqu'à obtenir une image de bonne qualité (i.e. acquise dans des conditions météorologiques claires). En effet, les effets atmosphériques sont beaucoup plus importants que les effets de délai entre la prise d'image et le terrain.

Concernant le traitement des images, il est recommandé de minimiser la chaîne de traitement. En effet, une chaîne de traitement entièrement automatisable à l'aide d'algorithmes de calculs permet de limiter les risques d'erreur. De plus, le format L1GST inclus déjà des corrections radiométriques et géométriques en fonction de la topographie de la scène. Cependant, au lieu d'utiliser les valeurs digitales d'origine, il est recommandé de les convertir en unités physiques de réflectance au niveau du sommet de l'atmosphère.

Au niveau des corrections atmosphériques, les lacs boréaux limitent largement les possibilités. En effet, les lacs boréaux sont souvent très opaques et les gammes de réflectances sont très limitées. Ainsi, des approches empiriques telles que l'approche des « cibles obscures » ne peuvent pas s'appliquer, et l'utilisation de données de terrain non-contemporaines rend impossible l'utilisation de mesures de réflectances sur le terrain. Ainsi, seules les méthodes de modélisation sont envisageables. Parmi celles-ci, plusieurs méthodes ont été testées dans cette étude et le principal problème récurrent fut une sur-correction des valeurs renvoyant des valeurs de réflectances aberrantes. Il est donc recommandé d'envisager des corrections atmosphériques avec précaution avant de traiter l'ensemble des images satellites.

D'autre part, il est recommandé de calculer les ratios de bandes B2/B3 pour l'ensemble de l'image satellite avant d'extraire les valeurs B2/B3 pour chaque lacs. En effet, une moyenne des ratios est mathématiquement différente d'un ratio des moyennes.

Enfin, lors de la délimitation des contours des lacs, qui peut reposer sur l'utilisation de la bande infrarouge, il est recommandé de contrôler la sélection des zones d'eau à l'aide d'une image en couleurs de la scène. En effet, la séparation entre les zones émergées et les eaux très riches en matière organique requiert souvent un contrôle visuel. Par la suite, un ajustement de la valeur seuil sur la bande infrarouge peut faciliter le travail de classification.

En résumé

-
- Sur le terrain, il est préférable de visiter des nouveaux lacs pour compléter la gamme de valeurs du modèle de prédiction par satellite.
 - Il est préférable de renouveler l'acquisition d'une image légèrement nuageuse plutôt que de réaliser des corrections atmosphériques.
-

5.3 Articulation entre deux disciplines : biologie et géomatique

La biologie est une discipline qui repose sur de nombreuses sciences comme les mathématiques, la physique, la chimie, et plus tard l'informatique avec la modélisation. Ainsi, la biologie a depuis longtemps intégré les outils produits par d'autres domaines pour répondre à ses propres questions de recherche. Il est donc normal d'observer une utilisation croissante des outils de télédétection et de cartographie en biologie. Cette étude a présenté la télédétection du carbone organique dissous comme un outil pour apporter des informations aux biologistes afin de mettre en perspective leurs recherches. Cependant, l'articulation entre la biologie et la géomatique pose des problèmes au niveau de l'ergonomie des outils, des formats de données utilisés dans chaque discipline, et des connaissances non partagées.

5.3.1 Créateurs et utilisateurs des outils de télédétection

Les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et les outils de télédétection sont produits par la discipline de la géomatique. Ainsi, dans le cadre d'une application en biologie, les créateurs et les utilisateurs des outils appartiennent à deux disciplines différentes. La géomatique est en pleine expansion dans tous les domaines, notamment dans l'écologie. Le nombre d'utilisateurs de systèmes d'informations géographiques dépasse 4 millions de personnes, et les cursus académiques proposent de plus en plus de formations sur la géomatique (Unwin 2005). Ainsi, les SIG sont utilisés par une grande diversité d'utilisateurs scientifiques.

Cependant, les logiciels SIG appartiennent toujours aux champs de la cartographie et de la gestion de bases de données. L'architecture des systèmes reflète plus la vision de leurs créateurs que celle de leurs utilisateurs. Par exemple, le vocabulaire utilisé dans les logiciels de cartographie, avec des termes comme couches, couches thématiques, ne renvoient pas directement à la notion de carte du langage commun. Ainsi, des connaissances en cartographie et en traitement d'image sont nécessaires pour aborder un logiciel SIG. La difficulté à utiliser les SIG par les non spécialistes date depuis les premières apparitions de ces outils et perdure encore aujourd'hui (Traynor & Williams 1998). Ainsi, les spécialistes en écologie et en biologie qui souhaitent utiliser les SIG peuvent être limités par le manque d'adaptation des outils à leur discipline en termes de références techniques et d'ergonomie.

De plus, dans le cadre de l'utilisation d'une image satellite comme source d'information, le choix du capteur requiert une connaissance des différents formats d'image, des types de capteurs et leurs spécificités. En effet, avec le lancement de nombreux satellites d'observation de la Terre, la compréhension et la comparaison des spécificités des capteurs est de plus en plus difficile. L'utilisation conjointe de plusieurs capteurs est de plus en plus fréquente, mais les caractéristiques des capteurs quant à leurs résolutions spatiales, spectrales et temporelles, ne sont toujours pas standardisées entre les

capteurs (Joseph 2000). Le choix d'une résolution spatiale, spectrale et temporelle a un impact direct sur la qualité de l'analyse. Ainsi, le choix d'une source de donnée adéquate pour une nouvelle application requiert de comprendre les différentes spécificités des capteurs.

En outre, même si les images satellites offrent des mesures à faible coût et reproductibles de nombreux paramètres écologiques, il est souvent difficile de relier des données satellitaires avec des données de terrain. En effet, la structure des données biologiques et écologiques doit correspondre à celle des données satellitaires. Afin de pouvoir utiliser des données écologiques existantes pour une application par satellite, la structure spatiale des données doit correspondre à la structure des données satellites ou géo-spatiales (Sheffield et al. 2009). En effet, les données de référence au sol peuvent poser plusieurs limitations quant à la validité de leur positionnement (points GPS par exemple) et leur homogénéité spatiale quant à l'échantillonnage. Ainsi, la compréhension de la structure spatiale des données de télédétection a une conséquence directe sur la qualité de l'analyse. La qualité des données de terrain vis-à-vis des considérations spatiale influence directement leur potentielle réutilisation dans des études à large échelle basée sur des images satellite.

5.3.2 Implications biologiques des modèles issus de la géomatique

De l'autre côté de la frontière, les spécialistes en géomatiques doivent aussi acquérir les connaissances nécessaires en biologie et en écologie dans le développement de méthodes et d'outils SIG ou de télédétection. Dans le cadre d'études par satellites de phénomènes biologiques, les spécialistes en télédétection peuvent être confrontés à leurs limites à comprendre le domaine d'application.

Il semble que les outils de télédétection suivent le même cours que ceux de la modélisation informatique en pénétrant dans les domaines de l'écologie, la biodiversité et la conservation (Wang et al. 2010). En effet, ces disciplines appellent de plus en plus à un travail à grande échelle et poussent le développement de technologies géo-spatiales

adaptées. Les produits de télédétection prétraités à l'aide d'algorithmes commerciaux sont de plus en plus populaires pour répondre à des besoins de recherche en écologie, en biodiversité et en conservation (Wang et al. 2010). Cependant, la précision du besoin de recherche appelle souvent l'intervention d'un spécialiste en télédétection pour adapter le produit géo-spatial. En conséquence, la collaboration entre spécialistes de l'environnement et de la géomatique devient de plus en plus importante, comme par exemple ici en limnologie, ou encore en foresterie (Bergen et al. 2000).

Les ajustements des méthodes et des outils de télédétection liés au contexte biologique sont cependant difficiles pour les spécialistes de télédétection. La connaissance des écosystèmes étudiés, des modèles établis à partir d'observations de terrain, ou encore l'identification de données extraordinaires, et même l'interprétation de résultats, doivent faire intervenir conjointement les connaissances des deux disciplines. Par exemple, en étudiant la distribution des teneurs en carbone organique dissous dans des milliers de lacs, une bonne connaissance de la méthodologie de traitement de l'image, et une bonne connaissance de la biologie du milieu, sont nécessaires. En effet, une sous-représentation des lacs les plus petits peut simplement être liée à la résolution spatiale du capteur ou un effet de tampon dans le traitement du SIG. De même, une erreur de traitement des tables de données biologiques peut être rapidement identifiée par une observation de l'échelle de valeurs par une personne familière avec le terrain. Ainsi, les spécialistes de la géomatique participant à des recherches en écologie doivent nécessairement acquérir des connaissances de la discipline pour identifier des problèmes méthodologiques à l'interface entre les deux disciplines.

En résumé

-
- L'ergonomie des outils de télédétection n'est pas adaptée aux utilisateurs des nouvelles disciplines d'application.
 - La coopération entre biologie et géomatique est essentielle pour mener des études écologiques à grande échelle.
-

Conclusion

Les résultats de cette étude montrent la possibilité d'utiliser des jeux de données de terrain existants avec les futures images de Landsat 8 pour étudier la distribution du carbone organique dissous des lacs boréaux. En effet, un modèle de prédiction basé sur des campagnes de terrain distantes de 1 mois à 6 ans avec l'acquisition des images par satellite prototype de Landsat 8, *Advanced Land Imager*, est comparable avec un modèle basé des campagnes de terrain synchronisés dans le même mois de l'acquisition des images par le satellite prototype (Kutser et al. 2005b).

Les recommandations de cette étude quant aux stratégies d'acquisition et de traitement des données présentent une base de travail pour coordonner le travail avec les futures images de Landsat 8. Concernant le travail de terrain, la visite de nouveaux lacs semble plus importante que la revisite de lacs déjà étudiés. En effet, l'étude a montré que des modèles de prédictions basés sur des mesures répétées sur le terrain ne sont pas plus performants que des modèles basés sur des mesures uniques. En outre, la visite de nouveaux lacs permet d'étendre la gamme de valeurs d'absorbance en matière organique dissoute colorée des lacs utilisés dans le modèle. L'étude a montré que l'ajout des lacs de la région d'Abitibi dans le modèle a doublé la gamme de valeurs d'absorbance par rapport à un modèle basé sur les lacs de la région d'Eastmain. Concernant l'acquisition des images satellites, une image claire par site reste suffisante car les mesures répétées au satellite ne semblent pas améliorer le modèle. Cependant, ces conclusions pourraient être étayées par des mesures de terrain additionnelles et par des mesures satellites répétées.

La mise en œuvre de corrections atmosphériques dans le cadre d'études similaires a été remise en question lors de cette étude. En effet, plusieurs méthodes de corrections atmosphériques des images réalisées pour cette étude ont renvoyé des valeurs de réflectance aberrantes pour les lacs boréaux. D'autre part, la méthode de correction convenable retenue n'a pas débouché sur une amélioration du modèle de prédiction de la matière organique dissoute colorée par satellite. La correction des images au niveau du sommet de l'atmosphère seulement a donné des résultats satisfaisant dans cette étude. D'autre part,

cette méthode de correction très simple limite le risque d'erreur de calcul en utilisant de nombreuses images.

L'application du modèle de prédiction à deux images représentatives de deux régions boréales a permis d'estimer des teneurs en carbone organique dissous. Bien que les lacs de ces régions soient différents vis-à-vis de leurs tailles et de leurs quantités de carbone organique dissous, les bilans à l'échelle du paysage restent de même ordre. Cependant, cette application est limitée par le fait que la télédétection spatiale ne permet pas d'estimer le carbone organique contenu dans les sédiments des lacs. Ainsi, des travaux permettant d'associer le carbone organique total à des valeurs d'absorbance mesurées par satellite permettrait d'émettre les bilans régionaux de carbone organique par satellite.

Pour conclure, les résultats de cette étude suggèrent de nombreuses applications avec l'arrivée prochaine des images de Landsat 8. En effet, une estimation globale de la matière organique dissoutes colorées des lacs boréaux peut servir de base à de nombreuses études régionales. En effet, des relations avec le carbone organique dissous, le dégagement de CO₂ ou la quantité de carbone organique totale dans les lacs permettrait d'ajuster les bilans en carbone des écosystèmes boréaux.

Bibliographie

- Algesten, G., S. Sobek, A. K. Bergstrom, A. Agren, L. J. Tranvik & M. Jansson (2004) Role of lakes for organic carbon cycling in the boreal zone. *Global Change Biology*, 10, 141-147.
- Astoreca, R., V. Rousseau & C. Lancelot (2009) Coloured dissolved organic matter (CDOM) in Southern North Sea waters: Optical characterization and possible origin. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 85, 633-640.
- Belanger, S., M. Babin & P. Larouche (2008) An empirical ocean color algorithm for estimating the contribution of chromophoric dissolved organic matter to total light absorption in optically complex waters. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 113.
- Bergen, K., J. Colwell & F. Sapio (2000) Remote sensing and forestry - Collaborative implementation for a new century of forest information solutions. *Journal of Forestry*, 98, 4-9.
- Bouroubi, Y. 2009. REFLECT: Logiciel de restitution des réflectances au sol pour l'amélioration de la qualité de l'information extraite des images satellitaires à haute résolution spatiale. In *Département de Géographie*. Montréal: Université de Montréal.
- Brando, V. E. & A. G. Dekker (2003) Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 1378-1387.
- Bricaud, A., A. Morel & L. Prieur (1981) ABSORPTION BY DISSOLVED ORGANIC-MATTER OF THE SEA (YELLOW SUBSTANCE) IN THE UV AND VISIBLE DOMAINS. *Limnology and Oceanography*, 26, 43-53.

- Brothers, S. M., P. A. del Giorgio, C. R. Teodoru & Y. T. Prairie (2012a) Landscape heterogeneity influences carbon dioxide production in a young boreal reservoir. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 69, 447-456.
- Brothers, S. M., Y. T. Prairie & P. A. del Giorgio (2012b) Benthic and pelagic sources of carbon dioxide in boreal lakes and a young reservoir (Eastmain-1) in eastern Canada. *Global Biogeochemical Cycles*, 26, 10.
- Canham, C. D., M. L. Pace, M. J. Papaik, A. G. B. Primack, K. M. Roy, R. J. Maranger, R. P. Curran & D. M. Spada (2004) A spatially explicit watershed-scale analysis of dissolved organic carbon in Adirondack lakes. *Ecological Applications*, 14, 839-854.
- Cardille, J. A., S. R. Carpenter, M. T. Coe, J. A. Foley, P. C. Hanson, M. G. Turner & J. A. Vano (2007) Carbon and water cycling in lake-rich landscapes: Landscape connections, lake hydrology, and biogeochemistry. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 112, doi:10.1029/2006JG000200, 18 pp.
- Cardille, J. A., S. R. Carpenter, J. A. Foley, P. C. Hanson, M. G. Turner & J. A. Vano (2009) Climate change and lakes: Estimating sensitivities of water and carbon budgets. *J. Geophys. Res. - Biogeosciences*, 114.
- Chander, G., B. L. Markham & D. L. Helder (2009) Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, 893-903.
- Cole, J. J., Y. T. Prairie, N. F. Caraco, W. H. McDowell, L. J. Tranvik, R. G. Striegl, C. M. Duarte, P. Kortelainen, J. A. Downing, J. J. Middelburg & J. Melack (2007) Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems*, 10, 171-184.
- Cuthbert, I. D. & P. Delgiorgio (1992) Toward a standard method of measuring color in fresh-water. *Limnology and Oceanography*, 37, 1319-1326.

- Dera, J. 1992. *Marine Physics*. Amsterdam: Elsevier Oceanography Series.
- Downing, J. A. (2010) Emerging global role of small lakes and ponds: little things mean a lot. *Limnetica*, 29, 9-23.
- Downing, J. A., J. J. Cole, J. J. Middelburg, R. G. Striegl, C. M. Duarte, P. Kortelainen, Y. T. Prairie & K. A. Laube (2008) Sediment organic carbon burial in agriculturally eutrophic impoundments over the last century. *Global Biogeochemical Cycles*, 22, 10.
- Downing, J. A., Y. T. Prairie, J. J. Cole, C. M. Duarte, L. J. Tranvik, R. G. Striegl, W. H. McDowell, P. Kortelainen, N. F. Caraco, J. M. Melack & J. J. Middelburg (2006) The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments. *Limnology and Oceanography*, 51, 2388-2397.
- Doxaran, D., R. C. N. Cherukuru & S. J. Lavender (2005) Use of reflectance band ratios to estimate suspended and dissolved matter concentrations in estuarine waters. *International Journal of Remote Sensing*, 26, 1763-1769.
- Ferland, M. E., P. A. del Giorgio, C. R. Teodoru & Y. T. Prairie (2012) Long-term C accumulation and total C stocks in boreal lakes in northern Quebec. *Global Biogeochemical Cycles*, 26.
- Frazier, P. S. & K. J. Page (2000) Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, 1461-1467.
- Hirtle, H. & A. Rencz (2003) The relation between spectral reflectance and dissolved organic carbon in lake water: Kejimikujik National Park, Nova Scotia, Canada. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 953-967.
- Hudson, J. J., P. J. Dillon & K. M. Somers (2003) Long-term patterns in dissolved organic carbon in boreal lakes: the role of incident radiation, precipitation, air temperature,

southern oscillation and acid deposition. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7, 390-398.

Joseph, G. (2000) How well do we understand Earth observation electro-optical sensor parameters? *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55, 9-12.

Kallio, K., J. Attila, P. Harma, S. Koponen, J. Pulliainen, U. M. Hyytiäinen & T. Pyhälähti (2008) Landsat ETM+ images in the estimation of seasonal lake water quality in boreal river basins. *Environmental Management*, 42, 511-522.

Keller, W., A. M. Paterson, K. M. Somers, P. J. Dillon, J. Heneberry & A. Ford (2008) Relationships between dissolved organic carbon concentrations, weather, and acidification in small Boreal Shield lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 65, 786-795.

Kelly, C. A., E. Fee, P. S. Ramlal, J. W. M. Rudd, R. H. Hesslein, C. Anema & E. U. Schindler (2001) Natural variability of carbon dioxide and net epilimnetic production in the surface waters of boreal lakes of different sizes. *Limnology and Oceanography*, 46, 1054-1064.

Kutser, T. P., Donald C; Reinard, Anu; Sobek, Sebastian; Kallio, Kari (2005a) Mapping lake CDOM by satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 94, 535-540.

Kutser, T. P., Donald C; Tranvik, Lars; Reinard, Anu; Sobek, Sebastian; Kallio, Kari (2005b) Using Satellite Remote Sensing to Estimate the Colored Dissolved Organic Matter Absorption Coefficient in Lakes. *Ecosystems*, 8, 709-720.

Kutser, T. T., Lars; Pierson, Donald C. (2009) Variations in colored dissolved organic matter between boreal lakes studied by remote sensing. *Journal of Applied Remote Sensing*, 3.

- Lapierre, J. F. & P. A. del Giorgio (2012) Geographical and environmental drivers of regional differences in the lake pCO₂ versus DOC relationship across northern landscapes. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 117.
- Lunetta, R. S., J. F. Knight, H. W. Paerl, J. J. Streicher, B. L. Peierls, T. Gallo, J. G. Lyon, T. H. Mace & C. P. Buzzelli (2009) Measurement of water colour using AVIRIS imagery to assess the potential for an operational monitoring capability in the Pamlico Sound Estuary, USA. *International Journal of Remote Sensing*, 30, 3291-3314.
- Luo, Y., A. P. Trishchenko & K. V. Khlopenkov (2008) Developing clear-sky, cloud and cloud shadow mask for producing clear-sky composites at 250-meter spatial resolution for the seven MODIS land bands over Canada and North America. *Remote Sensing of Environment*, 112, 4167-4185.
- Mannino, A. R., Mary E.; Hooker, Stanford B. (2008) Algorithm development and validation for satellite derived distributions of DOC and CDOM in the U.S. Middle Atlantic Bight. *Journal of Geophysical Research*, 113.
- Menken, K. D. & P. L. Brezonik (2006) Influence of chlorophyll and colored dissolved organic matter (CDOM) on lake reflectance spectra: Implications for measuring lake properties by remote sensing. *Lake and Reservoir Management*, 22, 179-190.
- Molot, L. A. & P. J. Dillon (1996) Storage of terrestrial carbon in boreal lake sediments and evasion to the atmosphere. *Global Biogeochemical Cycles*, 10, 483-492.
- Morel, A. & B. Gentili (2009) A simple band ratio technique to quantify the colored dissolved and detrital organic material from ocean color remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 113, 998-1011.
- Pace, M. L. & J. J. Cole (2002) Synchronous variation of dissolved organic carbon and color in lakes. *Limnology and Oceanography*, 47, 333-342.

- Roehm, C. L., Y. T. Prairie & P. A. del Giorgio (2009) The pCO₂ dynamics in lakes in the boreal region of northern Quebec, Canada. *Global Biogeochemical Cycles*, 23, 9.
- Sheffield, K., S. Jones, J. Ferwerda, P. Gibson & A. Zerger. 2009. Linking biological survey data to remote sensing datasets. In *Innovations in Remote Sensing and Photogrammetry (Lecture Notes in Geoinformation and Cartography)*, 51-64. Springer. Heidelberg, Germany.
- Sipelgas, L., H. Arst, K. Kallio, A. Erm, P. Oja & T. Soomere (2003) Optical properties of dissolved organic matter in Finnish and Estonian lakes. *Nordic Hydrology*, 34, 361-386.
- Sobek, S., B. Soderback, S. Karlsson, E. Andersson & A. K. Brunberg (2006) A carbon budget of a small humic lake: An example of the importance of lakes for organic matter cycling in boreal catchments. *Ambio*, 35, 469-475.
- Sobek, S., L. J. Tranvik, Y. T. Prairie, P. Kortelainen & J. J. Cole (2007) Patterns and regulation of dissolved organic carbon: An analysis of 7,500 widely distributed lakes. *Limnology and Oceanography*, 52, 1208-1219.
- Teodoru, C. R., Y. T. Prairie & P. A. del Giorgio (2011) Spatial Heterogeneity of Surface CO₂ Fluxes in a Newly Created Eastmain-1 Reservoir in Northern Quebec, Canada. *Ecosystems*, 14, 28-46.
- Thienemann, A. (1925) Die Binnengewässer Mitteleuropas: Eine Limnologische Einführung. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. [In German].
- Toming, K., H. Arst, B. Paavel, A. Laas & T. Noges (2009) Spatial and temporal variations in coloured dissolved organic matter in large and shallow Estonian waterbodies. *Boreal Environment Research*, 14, 959-970.

- Tranvik, L. J., J. A. Downing, J. B. Cotner, S. A. Loiselle, R. G. Striegl, T. J. Ballatore, P. Dillon, K. Finlay, K. Fortino, L. B. Knoll, P. L. Kortelainen, T. Kutser, S. Larsen, I. Laurion, D. M. Leech, S. L. McCallister, D. M. McKnight, J. M. Melack, E. Overholt, J. A. Porter, Y. Prairie, W. H. Renwick, F. Roland, B. S. Sherman, D. W. Schindler, S. Sobek, A. Tremblay, M. J. Vanni, A. M. Verschoor, E. von Wachenfeldt & G. A. Weyhenmeyer (2009) Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, 54, 2298-2314.
- Traynor, C. & M. G. Williams (1998) *Power of persuasion: Non-technical users and geographic information systems*. Palo Alto: Computer Professionals Social Responsibility.
- Ungar, S. G., J. S. Pearlman, J. A. Mendenhall & D. Reuter (2003) Overview of the Earth Observing One (EO-1) mission. *Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 1149-1159.
- Unwin, D. J. (2005) Fiddling on a different planet? *Geoforum*, 36, 681-684.
- Vermote, E. F., N. Z. El Saleous & C. O. Justice (2002) Atmospheric correction of MODIS data in the visible to middle infrared: first results. *Remote Sensing of Environment*, 83, 97-111.
- Walker, S. A., R. M. W. Amon, C. Stedmon, S. W. Duan & P. Louchouart (2009) The use of PARAFAC modeling to trace terrestrial dissolved organic matter and fingerprint water masses in coastal Canadian Arctic surface waters. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 114, 12.
- Wang, K., S. E. Franklin, X. L. Guo & M. Cattet (2010) Remote Sensing of Ecology, Biodiversity and Conservation: A Review from the Perspective of Remote Sensing Specialists. *Sensors*, 10, 9647-9667.

- Winn, N., C. E. Williamson, R. Abbitt, K. Rose, W. Renwick, M. Henry & J. Saros (2009) Modeling dissolved organic carbon in subalpine and alpine lakes with GIS and remote sensing. *Landscape Ecology*, 24, 807-816.
- Zhang, J., J. Hudson, R. Neal, J. Sereda, T. Clair, M. Turner, D. Jeffries, P. Dillon, L. Molot, K. Somers & R. Hesslein (2010) Long-term patterns of dissolved organic carbon in lakes across eastern Canada: Evidence of a pronounced climate effect. *Limnology and Oceanography*, 55, 30-42.