

Utilisation de l'imagerie hyperspectrale embarquée sur drone pour la calibration et la validation d'un algorithme basé sur l'imagerie Sentinel-2 pour le suivi des fleurs d'eau d'algues et/ou de cyanobactéries dans les eaux douces du Québec méridional

Par : Anas El Alem, Karem Chokmani, Hachem Agili, Aarthi Venkatesan, Jimmy Poulin, Marion Tanguy, Isabelle Laurion et Jean-Pierre Dedieu

**Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau Terre Environnement
490, rue de la Couronne
Québec (Québec) G1K 9A9**

Rapport de recherche scientifique R1744

Le 25 avril 2018

© Institut national de la recherche scientifique, 2018

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2018
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-911-1 (version électronique)

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

PRÉAMBULE

Le présent rapport se compose de quatre parties dans lesquelles sont présentées les stratégies des campagnes de terrains (choix des lacs, les paramètres des plans de vol avec le drone, les procédures et techniques de filtration et d'estimation des propriétés limnologiques des lacs ... etc.), les statistiques descriptives des résultats des campagnes de terrain, un descriptif des données de la calibration et de la validation et des méthodes de prétraitements des images Sentinel-2. La deuxième partie a été destinée à l'analyse et aux discussions des résultats obtenus en termes d'indices d'évaluations statistiques (R^2 , EQMr (erreur quadratique moyenne), BIAISr, NASHr et Er (erreur relative)). La troisième partie est présentée sous forme d'un guide pour l'utilisateur d'une interface graphique développée au cours de ce projet qui assure l'ensemble des procédures de prétraitements et traitements des images Sentinel-2. Finalement, les conclusions et recommandations sont présentées à la dernière partie de ce rapport.

Cette étude entre dans le cadre d'un projet de partenariat entre l'Agence spatiale canadienne (ASC) et le Centre Eau-Terre-Environnement de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-ETE) afin de tester de potentiel d'un modèle d'estimation de la concentration en chlorophylle-a (Chl-a) développé avec des images Sentinel-2 simulées à partir d'une caméra hyperspectrale embarquée sur un drone ainsi que de la possibilité d'appliquer le modèle développé sur des images enregistrées par les capteurs Sentinel-2A et Sentinel-2B. Le suivi de la concentration en Chl-a est d'une grande importance pour les gestionnaires de la qualité de l'eau puisqu'elle figure parmi les trois paramètres limnologiques d'identification de l'état trophique d'un plan d'eau donné. De plus, elle est souvent utilisée comme indicateur de présence des fleurs d'eau d'algues et/ou de cyanobactéries (FEA) qui sont nocifs à la santé publique.

Ce travail a mis en évidence le potentiel des images satellitaires, particulièrement des capteurs Sentinel-2A et Sentinel-2B, à estimer la concentration en Chl-a pour le suivi de l'occurrence des FEA dans les lacs du Québec méridional. Cette étude avait aussi pour but de tester la faisabilité d'estimation de la concentration en Chl-a à partir d'un modèle calibré par des images simulées via des caméras hyperspectrales embarquées sur drone. Également, ce travail était l'occasion de tester la capacité du transfert conceptuel de la technologie d'estimation d'ensemble, testée auparavant sur les données du capteur MODIS (MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer), vers les données des capteurs Sentinel-2A et Sentinel-2B. Finalement, la présente étude a permis de proposer une nouvelle approche, destinée à l'étude de la qualité de l'eau, pour la réduction de l'effet atmosphérique des images des capteurs Sentinel-2A et Sentinel-2B.

Trois objectifs constituent l'axe principal de ce travail :1) la calibration d'un modèle basé sur les méthodes d'ensemble (MBME) avec des images Sentinel-2 simulées à partir des données enregistrées par des caméras hyperspectrales embarquées sur un drone. Trois lacs (baie Missisquoi du lac Champlain et les lacs Brome et Magog), montrant des états trophiques différents, ont été sujets à trois campagnes de mesures durant l'été 2017

pour des fins de la calibration du MBME, 2) validation deux sources de données différentes : 2.a) validation de la luminance et de réflectance des images Sentinel-2 simulées par comparaison avec la réflectance des données du capteur Sentinel-2 et 2.b) validation des estimées en Chl-a produites par le MBME. Cette dernière a également été effectuée par deux façons : i) validation croisée avec les données Sentinel-2 simulées et ii) validation par données indépendantes avec les données des capteurs Sentinel-2A et Sentinel-2B et les données *in situ* en Chl-a collectées par le réseau de surveillance volontaire des lacs durant les étés des années 2015, 2016 et 2017 et 3) développement d'une interface graphique pour l'utilisateur assurant l'ensemble des processus des prétraitements (corrections radiométriques et atmosphériques) et traitements (estimation de la concentration en Chl-a) des images Sentinel-2A et Sentinel-2B.

Résumé

Les fleurs d'eau d'algues et/ou de cyanobactéries (FEA) ont gagné en importance ces dernières années au Québec. Leur suivi par les méthodes d'échantillonnage standards est laborieux et coûteux et est limité dans le temps et dans l'espace. Un modèle basé sur les méthodes d'ensembles (MBME) développé d'imageries MODIS a démontré un grand potentiel à détecter les FEA, via l'estimation de la concentration en chlorophylle-a (Chl-a), particulièrement à leur phase d'initiation. Cependant, leur suivi près des rives des lacs (< 200 m) est impossible (pixels mixtes), zone exposant le plus de risque à la santé publique. Le transfert conceptuel du MBME vers des données Sentinel-2 simulées d'imageries acquises par drone est possible. Les cartes produites de la concentration en Chl-a dérivées de Sentinel-2, détaillées et récurrentes, seront très utiles pour les gestionnaires de l'eau afin de suivre les FEA près des rives des lacs.

Table des matières

1. Introduction	1
2. Description des étapes du projet	2
3. Matériels et localisation géographique	3
3.1. Zone d'étude.....	3
3.2. Données <i>in situ</i>	3
3.2.1. <i>Données de calibration</i>	4
3.2.2. <i>Données de validation</i>	7
3.3. Données des caméras embarquées sur SAT.....	9
3.3.2. <i>Prétraitements des images hyperspectrales embarquées sur le SAT</i>	10
3.3.3. <i>Validation des simulations Sentinel-2</i>	13
3.4. Données du capteur Sentinel-2.....	16
3.5. Masque «Eau-Terre-Nuage».....	22
4. Approche méthodologique	23
4.1. Calibration du modèle basé sur les méthodes d'ensemble.....	23
4.1.1. <i>Extraction des signatures spectrales des images simulées avec les échantillons</i> ...	23
4.1.2. <i>Calibration du modèle basé sur les méthodes d'ensemble (MBME)</i>	25
4.2. Validation du modèle basé sur les méthodes d'ensemble.....	28
4.2.1. <i>Validation-croisée</i>	28
4.2.2. <i>Validation par données indépendantes (RSVL)</i>	30
5. Limites du MBME et recommandations	33
6. Développement d'une interface graphique pour l'utilisateur	34
6.1. Liste des images Sentinel-2.....	35
6.2. Sortie.....	36
7. Conclusions	36

Liste des figures

Figure 1. Localisation des lacs sur la zone d'étude.....	3
Figure 2. Forme des transects définis pour l'échantillonnage de chaque lac. A) 1 ^{ère} mission et B) 2 ^{ème} et 3 ^{ème} missions.....	6
Figure 3. Localisation géographique des stations de mesures retenues pour la validation avec des données indépendantes en chlorophylle-a.....	8
Figure 4. Organigramme méthodologique du processus de simulation des données Sentinel-2.....	11
Figure 5. Moyennes des luminances du lac Magog (14, août 2017) hyperspectrales et simulées à 20 m de résolution spatiale, avec évaluation statistique.....	12
Figure 6. Image prise par le capteur Sentinel-2A le 13 oct. 2017.....	13
Figure 7. Photos prises par l'équipe TED lors de la mission de terrain à la baie Missisquoi du lac Champlain le 04 décembre 2017.....	14
Figure 8. Moyennes de la concentration en Chl-a collectées lors des trois missions du lac Magog.....	15
Figure 9. Moyennes des luminances collectées lors des trois missions au lac Magog.....	15
Figure 10. Comparaison entre la luminance de Sentinel-2, obtenue au lac Magog (14, août 2017), et un exemple de luminance de l'eau à 1 µg Chl-a L ⁻¹ publiée par le site web d'OCEAN OPTICS Web Book.....	16
Figure 11. Comparaison entre la luminance de la caméra visible embarquée sur drone, obtenue au lac Magog (14, août 2017), et la luminance de l'eau à 1 µg Chl-a L ⁻¹ obtenue par l'OCEAN OPTICS Web Book. Le zoom montre les luminances des régions simulées à partir de la courbe hyperspectrale.....	16
Figure 12. Distribution des pixels avec une réflectance négative collectés sur l'ensemble des bandes de l'image Sentinel-2, et produite par le programme Theia. La couleur indique la bande d'origine du pixel problématique (la couleur jaune représente par exemple les pixels négatifs collectés par la bande 3).....	17
Figure 13. Nouvelle approche pour la quantification de l'effet additif de la luminance en se basant sur les données des ImgDrone Simulées.....	18
Figure 14. Comparaison des luminances captées à partir de l'image Sentinel-2 du 11 août 2017 avec correction : radiométrique seulement (TOA), par le modèle COST (COST) et par le modèle proposé pour ce projet (COST _{Mod}) et les luminances captées à partir de l'image du drone pour la campagne du 14 août 2017 (Img _{Drone} simulée).....	19
Figure 15. Comparaison des Réflectances. A) Comportement de la réflectance captée à partir de l'image Sentinel-2 du 11 août 2017 avec correction : radiométrique seulement (TOA), par le modèle COST (COST) et par le modèle proposé pour ce projet (COST _{Mod}) et la luminance captée à partir des images du drone pour la campagne du 14 août 2017 (Img _{Drone} simulée). B) Comparaison des réflectances captées par drone simulée (Img _{Drone} simulée) aux longueurs d'onde de Sentinel-2 et celles du capteur Sentinel-2 corrigées avec COST _{Mod} , avec indices d'évaluation statistique.....	20
Figure 16. Comparaison du comportement spectral d'un pixel d'eau après correction du Lhaze par : 1) sélection indépendante des luminances du pixel noir (cadre bleu) et 2) utilisation des coefficients de correction relative de la luminance du corps noir (cadre rouge).....	21
Figure 17. Comparaison entre le masque Eau-Terre-Nuage (E.T.N.) développé au cours de ce projet et le masque eau et nuage produit par le programme Theia pour la même scène (18 TYT) le 23/10/2017. A) E.T.N (la teinte rouge correspond à l'eau) et B) produit Theia (les teintes en blanc, gris et noir correspondent aux nuages, brumes et la teinte rouge correspond au masque de l'eau).....	22
Figure 18. Illustration des moyennes des réflectances extraites des signatures spectrales des images simulées avec les moyennes en Chl-a correspondantes par campagne de mesures.....	24
Figure 19. Les «No Data» enregistrées lors de campagne no. 1 au lac Brome.....	24
Figure 20. Exemple de pixels saturés par le Sun-glint. (Lac Brome, campagne no. 2).....	25
Figure 21. Structure générale du classificateur d'ensemble. Les EM _i (i =1 :4) font références aux espaces de modélisation possibles.....	26

Figure 22. Nuage de points de calibrations des deux experts	27
Figure 23. Concentration en chlorophylle-a estimée à partir du modèle basé sur la méthode de l'ensemble comparée aux mesures in situ, avec les indices de performance statistique.....	29
Figure 24. Exemple de chevauchement de deux scènes (18TVR et 18TWS (201/07/30)).	30
Figure 25. Cas de points de mesure particuliers rencontrés à la base de calibration : A) brume dense, B) pixel sur végétation, C) pixels sur les Sun-glints et D) pixels à la rive transposés de un à deux pixels. Les mesures des cas A) à C) ont été éliminées, les mesures du cas D) ont été gardées.....	31
Figure 26. Concentration en chlorophylle-a estimée à partir du modèle basé sur la méthode de l'ensemble comparée aux mesures in situ collectées par le RSVL, avec les indices de performance statistique.	31
Figure 27. Localisation géographique de trois des points de mesures marqués à la Figure 26 collectés dans des conditions de turbidité intense; scène 17TPN le 07/19/2016.	32
Figure 28. Localisation géographique de quatrième point de mesure marqué à la Figure 26 collectés dans des conditions de turbidité intense; scène 17UPQ le 07/19/2016.....	33
Figure 29. Concentration en chlorophylle-a estimée à partir du modèle basé sur la méthode de l'ensemble comparée aux mesures in situ collectées par le RSVL en éliminant les mesures des eaux turbides, avec les indices de performance des modèles.....	33
Figure 30. Détermination du type du système d'exploitation d'une machine.	35
Figure 31. Différents panneaux de l'outil	35

Liste des tableaux

Tableau 1. Description des tâches du projet par lot de travail (L.T.).....	2
Tableau 2. Occurrence des épisodes de FEA par mois et par plans d'eau.	5
Tableau 3. Résumé des propriétés analysées (chlorophylle-a (Chl-a), phéophytine-a (Phéo-a), profondeur du disque de Secchi (PDS)), carbone organique dissout (COD), phosphore total (PT) et azote total (AT) pour les trois lacs (Baie Missisquoi (BM) Lac Brome (LB), Lac Magog (LM)) par campagne de mesure (C1, C2 et C3). EC est l'écart type de la base de données.	6
Tableau 4. Concentrations en Chlorophylle-a (Chl-a) de la base de validation par données indépendante. EC est l'écart type de la base de données.	8

1. Introduction

D'après le Ministère du développement durable, environnement et lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), près de 500 plans d'eau ont été touchés au Québec par une fleur d'eau d'algues et/ou de cyanobactéries (FEA) entre 2004 et 2015. Les méthodes usuelles de suivi de ces micro-organismes, sont laborieuses et coûteuses, et sont limitées dans le temps et dans l'espace. Ainsi, plusieurs organismes gouvernementaux et institutionnels s'intéressent à instaurer de nouvelles technologies leur permettant de suivre l'évolution des FEA de façon rationnelle et à moindre coût, notamment par imagerie satellitaire. En effet, le potentiel de la télédétection optique à détecter et suivre les FEA dans les eaux douces via des algorithmes physiques, empiriques ou semi-empiriques n'est plus à démontrer [1-4]. Les modèles basés sur les méthodes d'ensemble (MBME) appliquées aux données du capteur MODIS ont mis en évidence le potentiel de l'imagerie satellitaire à suivre et à détecter les FEA même à faibles concentrations [5]. Toutefois, la résolution spatiale grossière de MODIS ne permet pas le suivi de l'état et de l'évolution des FEA près des rives des écosystèmes aquatiques, zone qui d'après les gestionnaires de la qualité de l'eau, expose le plus la population aux risques de contamination par une cyanobactérie. Le transfert conceptuel de la méthodologie développée avec les données MODIS vers un capteur à résolution spatiale plus fine serait alors d'une grande utilité pour les gestionnaires de la qualité de l'eau.

Avec ces résolutions (spatiale de 20 m, temporelle de 5 jours et spectrale de 9 bandes), le capteur Sentinel-2 serait le un bon candidat pour le suivi des FEA près des rives des lacs. Toutefois, un historique de mesures *in situ* concomitantes aux données Sentinel-2 est nécessaire pour la calibration du MBME, qui n'est pas le cas. D'un autre côté, le laboratoire de télédétection environnementale par drone (TED) de l'INRS-ETE dispose depuis quelques années d'un système aérien télépiloté (SAT) muni de caméras hyperspectrales couvrant la plage spectrale du 400 à 1700 nm. Des études ont démontré qu'il est possible, à partir des données hyperspectrales, de simuler des données à résolution plus grossière pour des régions spectrales précises via des algorithmes de simulations et d'agrégations. Ainsi, l'objectif de cette étude est de ***transposer le concept méthodologique développé avec les données MODIS vers les données Sentinel-2 simulées, à partir des caméras hyperspectrales embarquées sur le SAT, et agrégées à 20 m de résolution spatiale en vue de développer une approche de suivi des FEA près des rives des eaux douces du Québec méridional.***

Le développement d'une telle approche se veut complémentaire aux méthodes standards de suivi puisqu'elle permet d'identifier les plans d'eau affichant des charges chlorophylliennes problématiques sur un territoire aussi étendu que celui du Québec méridional. D'ailleurs, Groupe Hémisphères (GH), qui s'intéresse aux problématiques liées à la gestion des milieux aquatiques, riverains et terrestres, a montré un grand intérêt à l'adjonction de moyens de surveillance des FEA complémentaires et relativement peu coûteux, tels que la télédétection satellitaire. Cet intérêt s'est manifesté

sous forme de collaborations entre le GH et le laboratoire de TED de l'INRS-ETE. À cet égard, GH jouera ainsi le rôle d'utilisateur final «*end-user*» des cartes produites et bénéficiera d'une licence à un outil permettant l'automatisation de l'ensemble des procédures de traitements et d'exportations. Le suivi des FEA à la fréquence temporelle des capteurs de Sentinel-2A et Sentinel-2B contribuera à comprendre d'avantages les facteurs géo-environnementales, aussi bien sur les plans climatiques et météorologiques qu'en apports en nutriments, menant à la stimulation et aux développements de ces micro-organismes dans les systèmes aquatiques québécois.

2. Description des étapes du projet

Le présent projet se subdivise en deux jalons principaux : 1) échantillonnages de terrain et traitements des données et 2) calibration et validation du MBME pour l'estimation de la concentration en chlorophylle-a (Chl-a) à partir des données simulées des caméras hyperspectrales embarquées sur drone. Les lots des travaux (L.T.) du jalon n°1 ont été présentés lors de la réunion de la fin de l'étape 1 qui a eu lieu à l'agence spatiale Canadienne (ASC) le 29 novembre 2017. Un rapport détaillant les procédés méthodologiques d'échantillonnage des lacs ainsi que leur survol avec drone a également été livré à l'ASC le 31 décembre 2017. Le présent rapport fera l'objet d'un rappel des différents L.T. du jalon n°1 ainsi que les principaux développements des L.T. du jalon n°2. Le Tableau 1 résume les L.T. de ce projet qui s'inscrivent principalement dans les différentes étapes suivantes :

Tableau 1. Description des tâches du projet par lot de travail (L.T.).

Jalon 1	1.	Préparation des campagnes de terrain
	1.1.	Sélection des lacs selon la superficie et la proximité
	1.2.	Occurrence aux cyanobactéries
	1.3.	Préparation de la campagne d'échantillonnage
	1.4.	Préparation de la campagne de mesures par SAT
	1.5.	Coordination des opérations d'échantillonnage de lacs par le RSVL avec l'agenda de Sentinel-2
	2.	Acquisition des images Sentinel-2
	2.1.	Téléchargements
	3.	Réalisation des campagnes de terrain
	3.1.	Campagnes de terrain : Survol avec le SAT
	3.2.	Campagnes de terrain : Échantillonnage
	4.	Traitement des données et des mesures de terrain
	4.1.	Analyse des échantillons des 3 lacs au laboratoire de limnologie
	4.2.	Traitement des images SAT et simulation des images Sentinel-2
4.3.	Réception et formatage des résultats d'analyses des échantillons du RSVL	
Jalon 2	5.	Traitement des images SAT et prétraitement et simulation des images Sentinel-2
	6.	Extraction des signatures spectrales des images simulées avec les échantillons
	7.	Adaptation du modèle existant (MODIS) pour Sentinel-2
	7.1.	Calibration
	7.2.	Validation
	7.2.1.	<i>Validation croisée</i>
	7.2.2.	<i>Validation avec données indépendantes (RSVL)</i>
	8.	Développement d'une interface graphique pour l'utilisateur
	8.1.	Programmation de la chaîne de traitements
	8.2.	Rédaction d'un guide de l'utilisateur
9.	Gestion de projet	

3. Matériels et localisation géographique

3.1. Zone d'étude

Située entre les latitudes 44° à 50° Nord, et les longitudes 67° à 80° Ouest, la région couverte par la présente étude représente la région des bassins versants prioritaires du Québec méridional et est composée d'une quinzaine de régions administratives. Cette zone englobe environ 2285 plans d'eau douce qui sont visibles à la résolution spatiale du capteur Sentinel 2 (Figure 1). Ces plans d'eau appartiennent à différents écosystèmes aquatiques qui sont régis par les facteurs physiologiques écologiques du bassin versant ou par l'action anthropique. Cela s'est traduit par une diversité en termes des caractéristiques intrinsèques des eaux de ces lacs tant au niveau de la qualité ou en présence de matières organiques (FEA) et/ou en suspension (turbidité). Cette diversité constitue un défi intéressant au modèle développé afin de tester sa robustesse sur différents environnements aquatiques.

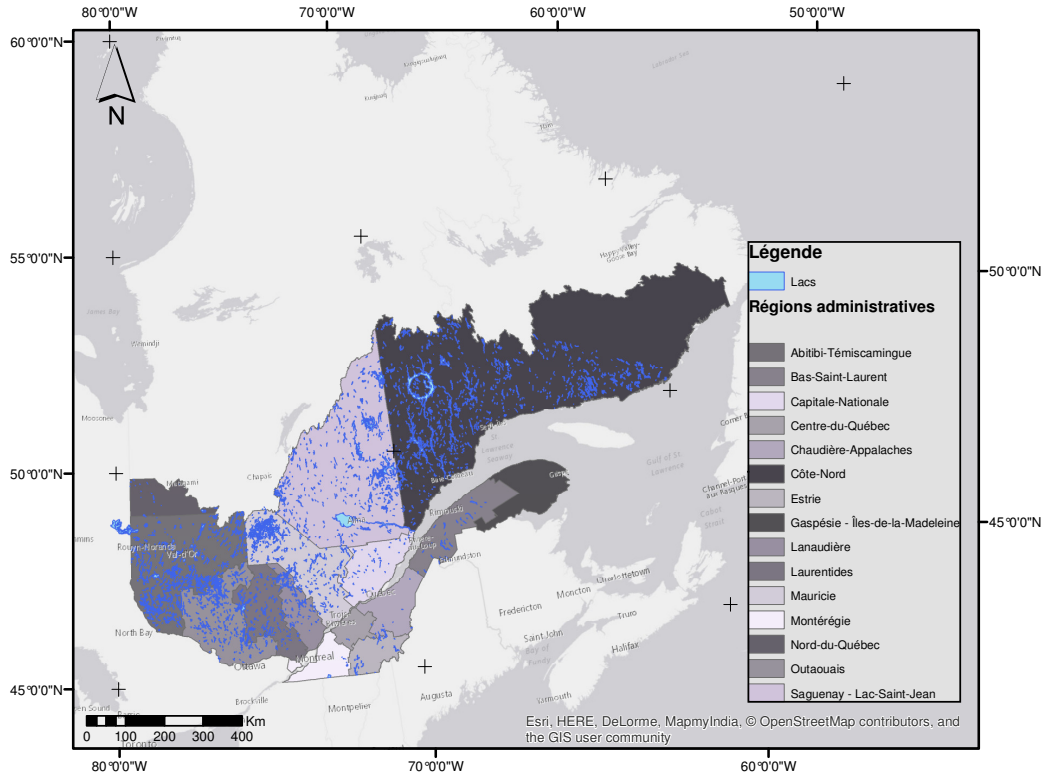


Figure 1. Localisation des lacs sur la zone d'étude.

3.2. Données *in situ*

Deux bases de données ont servi à la calibration et à la validation du modèle. La première, collectée au cours de ce projet durant l'été 2017, a servi à la calibration du MBME et la deuxième, collectée par le réseau de surveillance volontaire des lacs (RSVL) au cours des étés 2015, 2016 et 2017, a été fournie par GH pour des fins de validation.

3.2.1. Données de calibration

Un protocole de préparation des campagnes de terrain, qui présente le L.T. n°1, a été mis en place en premier lieu. Ce protocole concernait cinq étapes principales : 1) sélection des lacs selon la superficie et la proximité, 2) occurrence aux cyanobactéries, 3) préparation de la campagne d'échantillonnage, 4) préparation de la campagne de mesures par SAT et 5) coordination des opérations d'échantillonnage de lacs par le RSVL avec l'agenda de Sentinel-2 (Tableau 1). Pour cette section, seules les étapes liées aux données de la calibration du MBME vont être développées (les trois premiers points). Le point n°. 4 sera discuté plus en détail dans la section 3.3 décrivant les données des caméras embarquées sur SAT et le point n°. 5 sera discuté plus en détail dans la section 3.2.2 décrivant les données de validation.

- **Sélection des lacs selon la superficie et la proximité**

L'objectif de cette sélection était d'établir une liste de lacs de niveaux trophiques différents (oligo, méso et eutrophe), ayant une taille leur permettant d'être imagés par le capteur MODIS, dont la résolution spatiale est de 250 m. Cependant, il est apparu que les études permettant d'obtenir des informations *a priori* sur l'état trophique des lacs du Québec sont peu nombreuses. Il a donc été décidé d'estimer les dates probables de développement des fleurs d'eau d'algues (FEA) pour trois lacs relativement peu distants les uns des autres, et dont l'occurrence, parfois forte, à ce phénomène est connue. Cette stratégie visait à augmenter les chances de collecter des données de Chl-a avec une grande variation en concentrations (allant des plus faibles aux très fortes), ce qui est optimal pour la paramétrisation des modèles empiriques tel que visé par le présent projet. L'occurrence aux FEA, la disponibilité de données historiques ainsi que la superficie des lacs étaient donc les nouveaux critères pour la sélection des lacs sur lesquels des relevés devaient être effectués. Les lacs Brome et Magog et la baie Missisquoi (nord-est du lac Champlain), tous trois situés dans le sud du Québec et distants d'une centaine de km, répondaient à ces critères.

- **Occurrence aux cyanobactéries**

D'après le MDDELCC, 15, 15 et 7 épisodes de cyanobactéries ont été recensés dans la baie Missisquoi, au lac Magog et au lac Brome, respectivement, entre 2007 et 2012. Ces plans d'eau font également partie de la liste des lacs suivis par les différents programmes de gestion des épisodes des FEA au Québec et dont la superficie est supérieure à 2.25 km² (superficie minimale requise pour la visualisation d'un plan d'eau à la résolution spatiale de MODIS, soit 250 m). De ce fait, il a été décidé de considérer ces plans d'eau douce pour bâtir la base de calibration du MBME pour l'estimation de la Chl-a. L'analyse des données historiques (2001 à 2008) de trois programmes différents de suivi des FEA (mesures des paramètres physico-chimiques des plans d'eau, plans de gestion et inventaire des plans d'eau touchés par une FEA) ainsi que des données historiques (2012 à 2016) de l'estimation de la concentration en Chl-a issues du capteur MODIS, a permis de mettre en évidence les mois les plus propices au développement

des FEA dans les plans d'eau présélectionnés qui sont juillet, août et septembre (Tableau 2). Ces trois mois ont donc été choisis pour effectuer les relevés sur le terrain.

Il est important de mentionner que les données *in situ* relevées au cours de la période 2001-2008 ne sont disponibles que pour la baie Missisquoi. Pour les lacs Brome et Magog, ces données sont seulement disponibles pour la période allant de 2004 à 2008. Il est également nécessaire de préciser que les données d'occurrence obtenues à partir des images satellites sont calculées à partir du nombre de journées où les concentrations en Chl-a ont dépassé $50 \mu\text{g L}^{-1}$, contrairement aux données *in situ*, qui représentent le nombre d'épisodes de FEA par mois. Ainsi, le nombre d'occurrences des FEA obtenu à l'aide des images satellite est plus important que celui estimé avec les données *in situ*.

Tableau 2. Occurrence des épisodes de FEA par mois et par plans d'eau.

Plan d'eau	mois	Occurrence des FEA obtenue à partir des données <i>in situ</i> (2001-2008)	Occurrence des FEA obtenue à partir des données satellite (2012-2016)
Baie Missisquoi	mai	0	6
	juin	2	1
	juill.	18	23
	août	17	45
	sept.	8	38
	oct.	1	7
Total		46	120
Lac Brome	mai	0	1
	juin	1	1
	juill.	4	9
	août	4	22
	sept.	4	34
	oct.	0	6
Total		13	73
Lac Magog	mai	0	1
	juin	0	3
	juill.	5	8
	août	3	15
	sept.	1	13
	oct.	0	2
Total		9	42

- **Préparation des campagnes d'échantillonnage**

La première campagne de terrain a été réalisée du 18 au 20 juillet 2017, la deuxième campagne de terrain a été réalisée du 14 au 16 août 2017 et la troisième campagne de terrain a été réalisée du 11 au 13 octobre 2017. Pour les trois missions effectuées, la démarche d'échantillonnage est demeurée la même, avec une série d'échantillonnages *in situ* réalisée simultanément avec le survol de la zone par drone. Cependant, la stratégie d'échantillonnage a été modifiée à l'issue de la première mission. Durant cette dernière, l'échantillonnage a été effectué sur deux transects de 180 m chacun, composés de 9 cellules de $20 \times 20 \text{ m}^2$ (soit la taille du pixel de Sentinel-2) et se croisant en leur centre (Figure 2.A). Échantillonner le long de deux transects s'est révélé fastidieux et très long une fois sur l'eau, malgré l'utilisation d'un GPS permettant de localiser le centre de chaque cellule. Ainsi, pour les deux autres missions,

l'échantillonnage a été effectué sur un transect unique rectiligne de 340 m, composé de 17 cellules de 20 x 20 m² (Figure 2.B). Les avantages d'échantillonner sur un transect rectiligne sont : 1) la couverture d'une plus grande distance, ce qui permet d'échantillonner un bien meilleur gradient de concentration en Chl-a lors de floraisons algales; 2) l'optimisation du temps, et cela aussi bien pour les échantillonnages *in situ* que pour le survol par drone; 3) la réduction du nombre de lignes de vols avec le drone, et ainsi de réduire la quantité de données à traiter; et 4) la réalisation de vols selon la direction exacte de l'orbite de Sentinel-2.

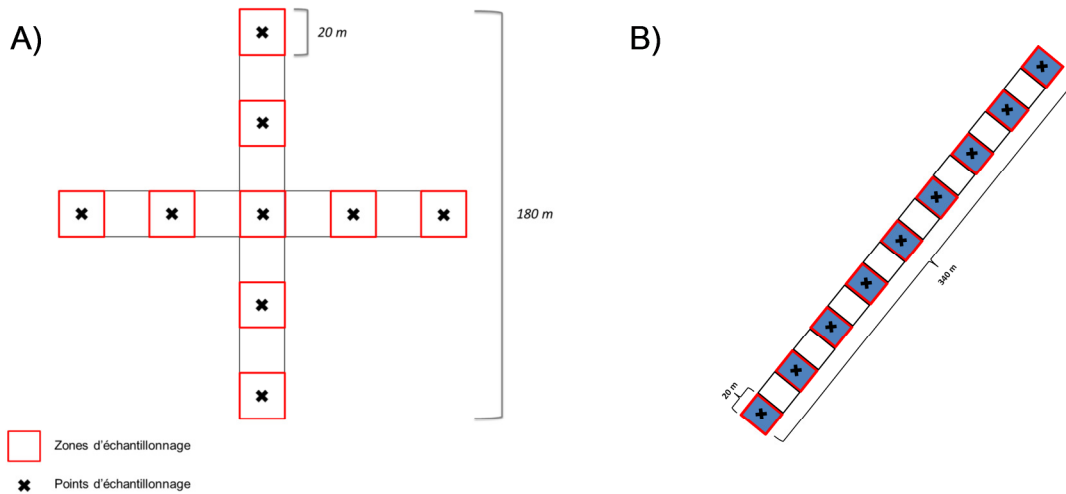


Figure 2. Forme des transects définis pour l'échantillonnage de chaque lac. A) 1^{ère} mission et B) 2^{ème} et 3^{ème} missions.

Tableau 3. Résumé des propriétés analysées (chlorophylle-a (Chl-a), phéophytine-a (Phéo-a), profondeur du disque de Secchi (PDS)), carbone organique dissout (COD), phosphore total (PT) et azote total (AT) pour les trois lacs (Baie Missisquoi (BM) Lac Brome (LB), Lac Magog (LM)) par campagne de mesure (C1, C2 et C3). EC est l'écart type de la base de données.

	Lacs	Chl-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) Moyenne \pm EC (Min - Max)	Phéo-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) Moyenne \pm EC (Min - Max)	PDS (m) Moyenne \pm EC (Min - Max)	COD ($\mu\text{g L}^{-1}$) Moyenne \pm EC (Min- Max)	PT ($\mu\text{g P/L}$)	AT (mg N/L)
C1	BM	34.2 \pm 4.7 (26.0 – 44.8)	7.7 \pm 0.8 (5.9 – 8.9)	1.2 \pm 0.1 (1.1 – 1.4)	6.92 \pm 1.728 (5.6 – 9.5)	46	0.806
	LB	3.4 \pm 0.3 (2.8 – 4.3)	1.0 \pm 0.1 (0.9 – 1.2)	4.2 \pm 1.7 (1.9 – 2.2)	3.76 \pm 0.996 (3 – 4.9)	23	0.409
	LM	3.4 \pm 0.4 (2.8 – 4.2)	0.7 \pm 0.1 (0.6 – 0.9)	3.6 \pm 0.2 (3.2 – 4.3)	4.42 \pm 1.547 (3.4 – 7.1)	13	0.330
C2	BM	61.8 \pm 8.5 (38.6 – 77.0)	19.7 \pm 5.4 (11.0 – 27.5)	0.8 \pm 0.1 (0.7 – 0.9)	4.84 \pm 0.297 (4.5 – 5.2)	66	0.957
	LB	17.1 \pm 1.3 (14.6 – 20.6)	1.1 \pm 0.5 (0.1 – 1.8)	1.5 \pm 0.1 (1.0 – 1.7)	3.2 \pm 0.1 (3.1 – 3.3)	18	0.425
	LM	2.5 \pm 0.2 (2.2 – 2.9)	0.5 \pm 0.2 (0.3 – 0.9)	3.1 \pm 0.2 (2.7 – 3.2)	3.36 \pm 0.089 (3.3 – 3.5)	10	0.279
C3	BM	19.7 \pm 13.7 (7.5 – 65.9)	5.2 \pm 2.5 (3.0 – 14.8)	0.9 \pm 0.1 (0.8 – 1.1)	*****	137	1.66
	LB	7.9 \pm 0.3 (7.3 – 8.6)	0.9 \pm 0.3 (0.1 – 1.3)	2.7 \pm 0.2 (2.3 – 3.1)	*****	54	0.564
	LM	2.7 \pm 0.4 (2.3 – 3.7)	0.7 \pm 0.1 (0.4 – 0.9)	3.5 \pm 0.2 (3.2 – 3.9)	*****	25	0.312
Total	BM	38.5 \pm 18.1 (7.5 – 77.0)	10.9 \pm 6.2 (3.0 – 27.5)	1.0 \pm 0.2 (0.7 – 1.4)	5.88 \pm 1.602 (4.5 – 9.5)	*****	*****
	LB	9.5 \pm 5.1 (2.8 – 20.6)	1.0 \pm 0.3 (0.1 – 1.8)	2.1 \pm 0.4 (1.0 – 3.1)	3.48 \pm 0.733 (3 – 4.9)	*****	*****
	LM	2.9 \pm 0.5 (2.2 – 4.2)	0.7 \pm 0.2 (0.3 – 0.9)	3.4 \pm 0.3 (2.7 – 4.3)	3.89 \pm 1.174 (3.3 – 7.1)	*****	*****

Les transects échantillonnés correspondent à la ligne centrale du plan de vol, qui est déterminé préalablement (Annexe A). Les coordonnées spatiales des points décrivant le

plan de vol permettent de repérer le centre de chaque cellule du transect. L'échantillonnage est ensuite réalisé au centre de chaque cellule, qui est repéré à l'aide d'un GPS portable par les personnes en charge de l'échantillonnage. 9 bouteilles, d'une capacité de 1 L étaient pré-marquées et conservées dans une glacière portable une fois remplies. Un disque de Secchi, qui permet de mesurer la transparence de l'eau, est également utilisé à chaque point d'échantillonnage. Une partie de l'eau échantillonnée est filtrée immédiatement après la fin de chaque échantillonnage. Les filtres, qui permettront d'estimer la concentration en Chl-a, sont conservés au froid dans une glacière (entre 0°C et 2°C). L'autre partie de l'eau est conservée dans un congélateur, à une température de -18°C, pour réaliser d'autres analyses (matière organique dissoute, carbone organique dissout, azote et phosphore) au laboratoire de limnologie de l'INRS-ETE. Le Tableau 3 résume les résultats de la concentration en Chl-a et en phéophytine-a (Phéo-a), la profondeur du disque de Secchi (PDS), du carbone organique dissout (COD), du phosphore total (PT) et de l'azote total (AT) des trois lacs pour les trois campagnes de mesures, sauf pour les mesures de COD de la troisième campagne, où un manque de coordination entre les deux laboratoires de l'INRS-ETE (TED et limnologie) a fait trader leurs analyses jusqu'à date.

3.2.2. Données de validation

Les données utilisées pour la validation du MBME ont été collectées sur 3 ans (de 2015 à 2017) par le RSVL et ont été communiquées au laboratoire TED de l'INRS-ETE par GH. La somme des trois bases de données du RSVL était de 1891 mesures (197, 1223 et 471 données ont été collectées pour les années 2015, 2016 et 2017, respectivement). Afin de bâtir une base de validation exploitable, il a ainsi été nécessaire d'identifier les dates de passages de Sentinel-2, sur la zone d'étude, et qui sont concomitantes aux dates de mesures *in situ* disponibles. Après cet exercice, le nombre total des mesures a été réduit à 301 données (4, 174 et 123 données pour les années 2015, 2016 et 2017, respectivement). De ces images, il a également été obligatoire de passer à une inspection visuelle, à l'aide du composé en fausses couleurs (PIR-V-B) des images Sentinel-2, afin de s'assurer de sélectionner seulement les points d'échantillonnages dont la réflectance du pixel correspondant est une mesure de l'eau pure. Ainsi, les points d'échantillonnages dont la réflectance est affectée soit par la présence de brumes denses et/ou de nuages (N = 70) ou d'ombre de nuages (N = 6) ainsi que les points d'échantillonnages associés à des pixels «No Data» (N = 131) ont été supprimés de la base de données. La fin de ces deux étapes a abouti au développement de la base de validation finale dont le nombre total de données en Chl-a est de 94 mesures (0, 32 et 62 (dont 3 sont un peu affectés par l'effet de *Sun-glint*) données pour les années 2015, 2016 et 2017, respectivement). La Figure 3 montre la distribution géographique des sites retenus pour la validation des estimées en Chl-a avec les données du RSVL (aucun site pour l'année 2015 n'est présenté sur la Figure 3 puisque le nombre de mesures retenues pour cette année était de 0).

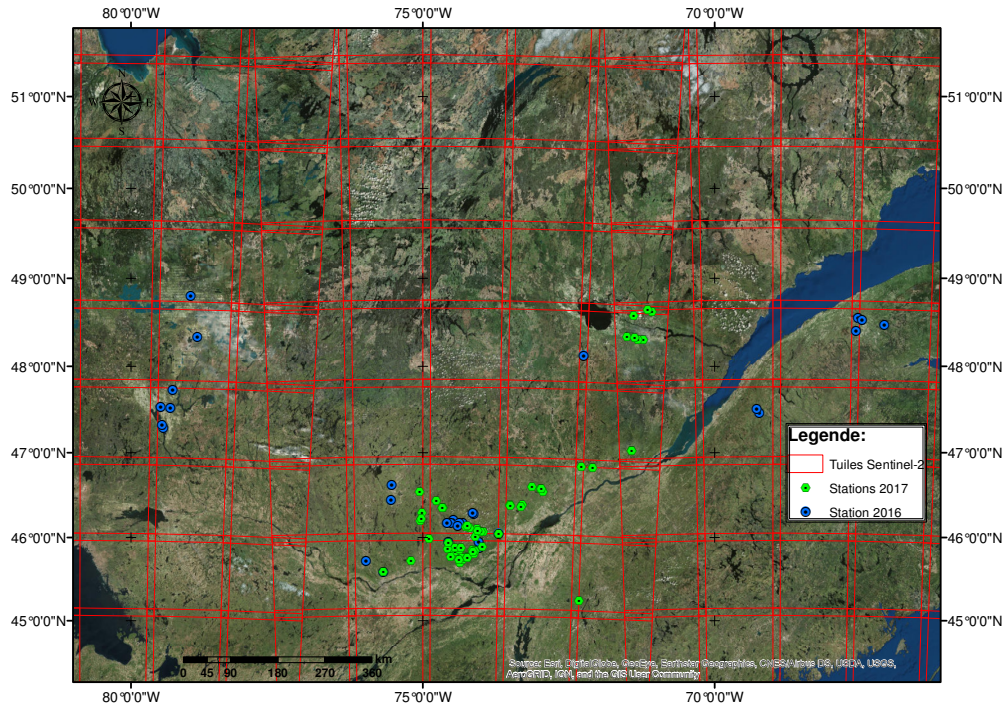


Figure 3. Localisation géographique des stations de mesures retenues pour la validation avec des données indépendantes en chlorophylle-a.

Le Tableau 4 résume les résultats de la concentration en Chl-a retenus pour la présente étude pour des fins de validation du MBME avec des données indépendantes. Il est à noter que les concentrations sont relativement faibles. Les faibles concentrations (en bas de $10 \mu\text{g L}^{-1}$) représentent plus que 97% de la base de données pour la validation. Ce fait, sera challengeant pour le MBME, puisqu'il est connu que l'estimation de la concentration en Chl-a pour les eaux oligotrophes lacustres est très complexe. Également, un tableau résumant les heures de passage des données RSVL et les heures de passage du capteur Sentinel-2 est présenté en Annexe D

Tableau 4. Concentrations en Chlorophylle-a (Chl-a) de la base de validation par données indépendante. EC est l'écart type de la base de données.

	Années	Chl-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) Moyenne \pm EC (Min - Max)	Nombre de mesures	Nombre d'images
RSVL	2015	*****	0	0
	2016	3.4 ± 2.3 (0.9 – 10.8)	32	16
	2017	4.4 ± 5.9 (0.7 – 41.8)	62	9
	Total	4.1 ± 5.1 (0.7 – 41.8)	94	25

Durant la réunion de la première étape du projet à l'ASC, une autre alternative au programme d'échantillonnage des données du RSVL a été proposée, à savoir le programme «*Lake Pulse*». Effectivement, Pr. Isabelle Laurion a pris l'initiative et a communiqué à l'équipe TED de l'INRS-ETE la liste des lacs visités durant cette première phase de ce programme de suivi de la qualité des eaux Canadiennes. Cependant, les

résultats des échantillons pris durant cet été ne sont pas encore disponibles. Vu la contrainte de temps pour le présent projet, il a ainsi été décidé de se passer de cette base de données et de valider l'algorithme uniquement avec les données du RSVL, *tel qu'il a été programmé initialement*, particulièrement après avoir combiné les données de deux années (2016 à 2017) menant au développement d'une base de validation assez large.

3.3. Données des caméras embarquées sur SAT

La préparation de la campagne de mesures par SAT s'était résumée en la génération des lignes de vol conformément à la réglementation de Transport Canada. La génération de ces lignes tenait compte de l'autonomie du drone avec les caméras hyperspectrales (soit en moyenne de 13 à 14 min et de 7 à 8 min pour le visible et le proche infrarouge, respectivement). Elle tenait également compte de la fauchée du capteur (entre 39 et 40 m) et du chevauchement de 25% des lignes de fauchée (soit 10 m) recommandé pour les acquisitions. Enfin, le GPS du drone ayant une précision de 10 m, il a également été jugé utile d'ajouter 10 m à chaque extrémité des lignes de vol. C'est pourquoi chaque ligne de vol a une longueur totale de 200 m (et non pas de 180 m) dans le cas du transect croisé utilisé lors de la première mission, et de 360 m (contre 340 m), dans le cas du transect rectiligne utilisé lors des deux dernières missions.

Il est à souligner que le laboratoire TED de l'INRS détient un certificat d'opérations aériennes spécialisées (COAS) ouvert, qui prendra fin le 31 mai 2018. Cependant, comme les lacs sélectionnés sont entourés de nombreux bâtiments, particulièrement le lac Brome et la baie Missisquoi, des avis de vols ont été envoyés auprès de Transport Canada pour chaque campagne de terrain. Pour l'ensemble des campagnes de terrain, le point de décollage du drone est demeuré le même pour chaque lac. Ce point a été sélectionné minutieusement, selon trois critères :

- **La distance maximale du point de décollage du drone**

Selon les exigences du COAS délivré par Transport Canada, le drone doit toujours rester à portée de vue du pilote. Aucun arbre, bâtiment, etc., ne doit réduire la visibilité du pilote.

- **Le point de décollage du drone**

Les zones publiques à accès limité pour le grand public ont été privilégiées, lorsque cela été possible, afin de respecter les exigences du COAS concernant les distances minimales requises pour les vols par drone.

- **La localisation la plus fréquente des blooms sur le lac**

L'application du modèle d'estimation de la concentration en Chl-a sur une série historique d'images MODIS a permis de détecter des zones d'occurrence aux FEA, et cela en particulier pour la baie Missisquoi et pour le lac Brome. Ces zones ont été favorisées lorsqu'elles répondaient aux exigences du COAS de Transport Canada énumérées ci-haut.

3.3.1. Réalisation des vols avec le SAT

Le laboratoire TED de l'INRS dispose d'un drone de type hexacoptère, muni de 12 moteurs et ayant une charge utile de 12 kg, et deux caméras hyperspectrales couvrant la gamme de 400 à 1700 nm du spectre électromagnétique. Le poids total des deux caméras dépasse largement la capacité de charge utile du drone, la caméra dans le proche infrarouge et son ordinateur de bords pesant à eux seuls près de 10 kg. Par conséquent, il a été nécessaire d'effectuer deux, voire trois vols, par campagne de terrain, afin d'obtenir des données couvrant la gamme spectrale requise pour le développement du MBME. La réalisation de vols en transects rectiligne a alors pris tout son sens. En effet, lors de la première mission, il a été nécessaire d'effectuer deux vols avec la caméra dans le proche infrarouge, puisque le temps de vol du drone dépassait largement le temps d'autonomie des batteries. Lors des deux dernières missions, au cours desquelles un seul transect a été utilisé, le temps de survol était inférieur au temps d'autonomie des batteries. Un seul vol a donc été suffisant. Ainsi, le nombre de vols par mission a été réduit de trois à deux entre les missions de la première campagne et les missions des deux dernières campagnes. Les plans de vols pour chaque mission, ainsi que les paramètres de vol correspondants sont présentés en Annexe B et en Annexe C.

3.3.2. Prétraitements des images hyperspectrales embarquées sur le SAT

- **Calibration radiométrique**

Les capteurs hyperspectraux utilisés enregistrent la luminance électromagnétique sous forme de comptes numériques (CN) pour chacune des bandes des caméras du visible et du PIR avec une résolution spectrale moyenne de 3 nm et de 6 nm, et une résolution radiométrique de 12 bit et de 14 bit, respectivement. La conversion des CN en luminance est réalisée à l'aide d'une équation de calibration radiométrique standard (équation (1)), telle que :

$$\text{Luminance spectrale} = \text{Biais} + (\text{Gain} * \text{CN}) \quad (1)$$

- **Agrégations spatiale et spectrale des hypercubes en images Sentinel-2**

Le logiciel SpectronoPro, utilisé au laboratoire TED de télédétection de l'INRS, offre le choix de la résolution spatiale lors de l'étape de la géo-rectification des images hyperspectrales. Ainsi, les hypercubes ont été agrégés à 20 m de résolution spatiale avant leur agrégation spectrale. Sans entrer dans les détails, l'algorithme derrière cette

agrégation spatiale se base en premier lieu sur une interpolation spatiale, afin d'estimer la luminance des pixels «*No Data*» des cubes hyperspectrales (au niveau des virages du drone ou encore lors de l'enregistrement des données pendant le vol; par exemple), avant de moyenner la luminance à la résolution des sorties.

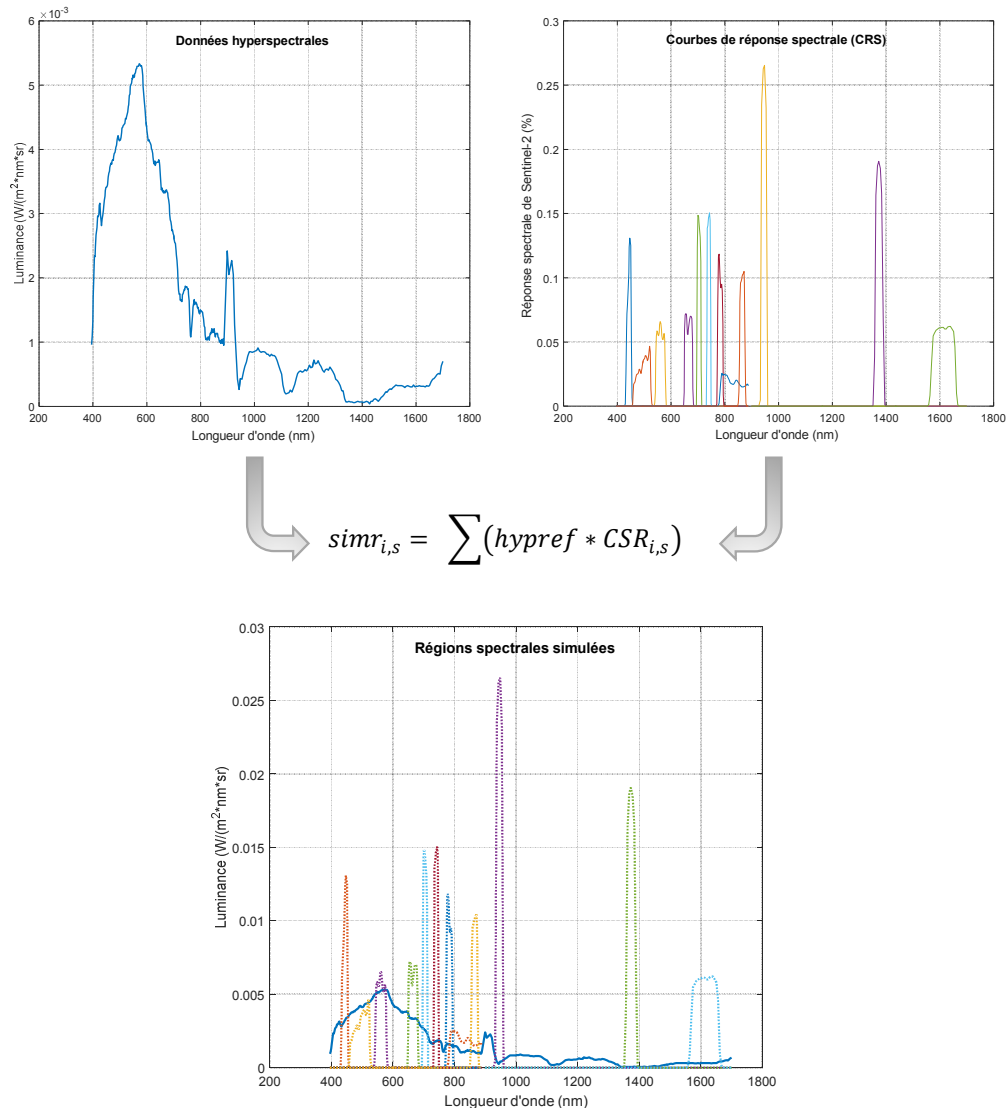


Figure 4. Organigramme méthodologique du processus de simulation des données Sentinel-2.

L'agrégation spectrale des hypercubes pour obtenir la résolution spectrale des images Sentinel-2 a été réalisée par l'équation (2) en se basant sur les courbes de réponse spectrale (CRS) du capteur. Ces CRS contiennent des informations sur les réponses spectrales mesurées et sur la largeur de la bande spectrale, pour chaque bande du capteur. Elles sont téléchargeables gratuitement sur le site internet de l'Agence spatiale européenne (ESA). Les valeurs de CRS de chaque bande du capteur correspondant aux données hyperspectrales acquises par drone en sont extraites, pour être utilisées dans le processus de simulation. Un organigramme schématisant ce processus est

présenté à la Figure 4. Les données utilisées dans cet organigramme sont les luminances hyperspectrales à 20 m de résolution spatiale calculées au lac Magog (14 août 2017) et les valeurs de CRS téléchargées du site de l'ESA. La fonction utilisée pour réaliser la simulation spectrale est inspirée des travaux de Blonski, Glasser [6] et est la suivante :

$$simr_{i,s} = \sum (hypref * CSR_{i,s}) \quad (2)$$

Avec :

$simr_{i,s}$ est la luminance simulée de Sentinel-2 dans la bande considérée;

$hypref$ est la luminance hyperspectrale de référence;

$CSR_{i,s}$ est la courbe de réponse spectrale du capteur dans la bande, avec $\sum CSR_{i,s} = 1$.

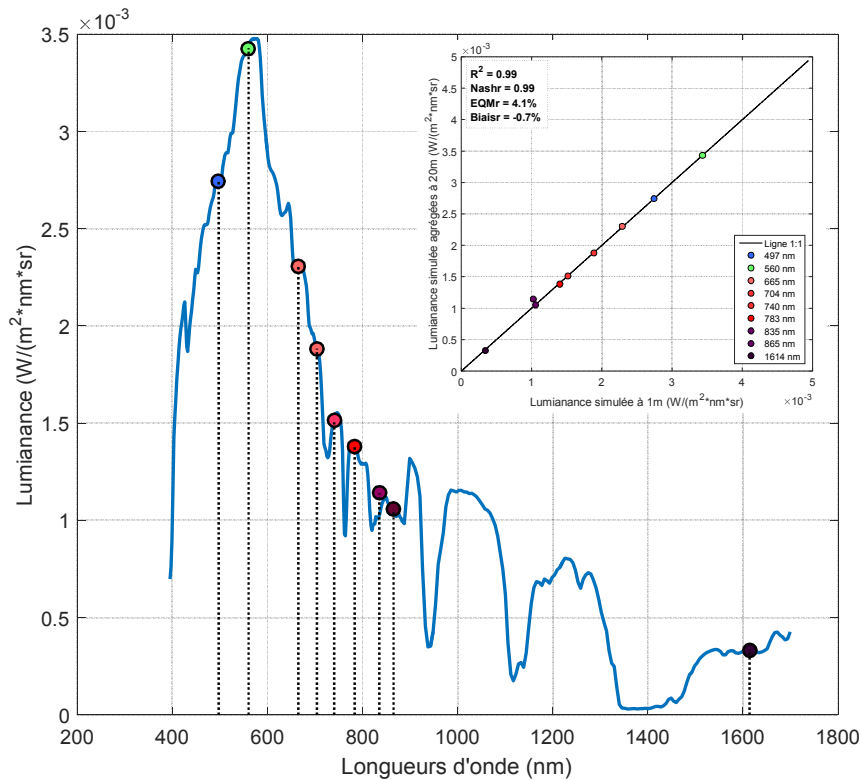


Figure 5. Moyennes des luminances du lac Magog (14, août 2017) hyperspectrales et simulées à 20 m de résolution spatiale, avec évaluation statistique.

La Figure 5 montre le résultat de la comparaison entre la moyenne des luminances du cube hyperspectral imagé au lac Magog (14 août 2017) ainsi que la moyenne de sa simulation aux longueurs d'onde de Sentinel-2, après l'agrégation spatiale à 20 m. De la Figure 5, une grande concordance entre les luminances à 1 m et celles agrées à 20 m est claire ($R^2 = 0.99$ et $NASHr = 0.99$). L'ensemble des luminances sont placées sur la diagonale (1 : 1), excepté pour la région (835 nm) où un léger déplacement est remarqué. Le Biais de -0.7% sous-entend que les luminances simulées et agrégées à 20 m de résolution spatiale sont légèrement sous-estimées. Cette dernière est une erreur systématique quantifiable qui peut être ajustée lors des traitements. Cette analyse démontre que les luminances hyperspectrales simulées et agrégées aux longueurs

d'ondes et à la résolution spatiale du Sentinel 2, respectivement, conservent en grande partie leur énergie, et ce, sur l'ensemble du spectre avec une erreur moyenne d'environ 4.1% qui est acceptable.

3.3.3. Validation des simulations Sentinel-2

Parallèlement à la validation présentée à la Figure 5, un vol avec drone concomitant au passage du capteur Sentinel-2 sur le lac Brome a été réalisé le 13 octobre 2017. Le but, cette fois-ci, était de comparer les données, simulées et agrégées à la résolution spatiale de Sentinel-2, aux données originales du capteur collectées sur le lac Brome. Cependant, l'enregistrement de cette tuile n'a été effectué que partiellement ne couvrant pas la zone d'intérêt (lac Brome) (polygone rouge sur la Figure 6).

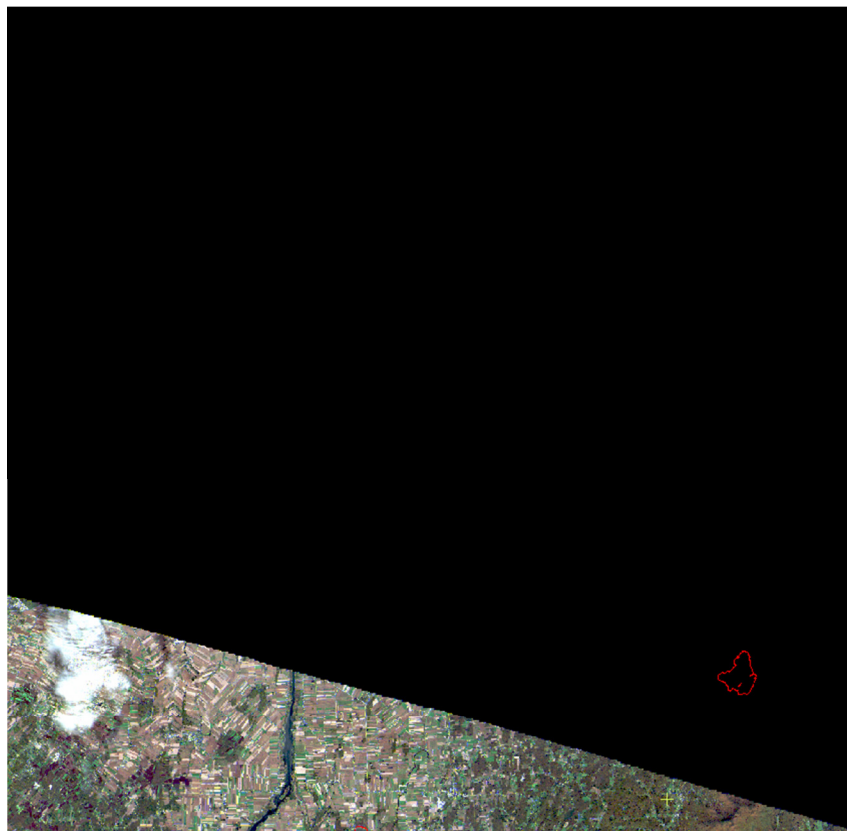


Figure 6. Image prise par le capteur Sentinel-2A le 13 oct. 2017.

De ce fait, une autre campagne de validation se devait nécessaire. Les dates de passage de Sentinel-2A et Sentinel-2B sélectionnées avant que les lacs gèlent sont, respectivement, le 02 et le 09 décembre 2017 et le 24 et le 27 novembre et le 04 décembre 2017. Pour des raisons logistiques (présence de neige et/ou de nuage ou non disponibilité de pilote), il n'a été possible d'effectuer qu'une seule campagne à la baie Missisquoi, à savoir celle du 04 décembre. Cependant, les conditions climatiques ont rendu le vol impossible. Comme le montre la Figure 7, il a été impossible de survoler le lac puisque un dense brouillard s'était installé durant toute la journée.

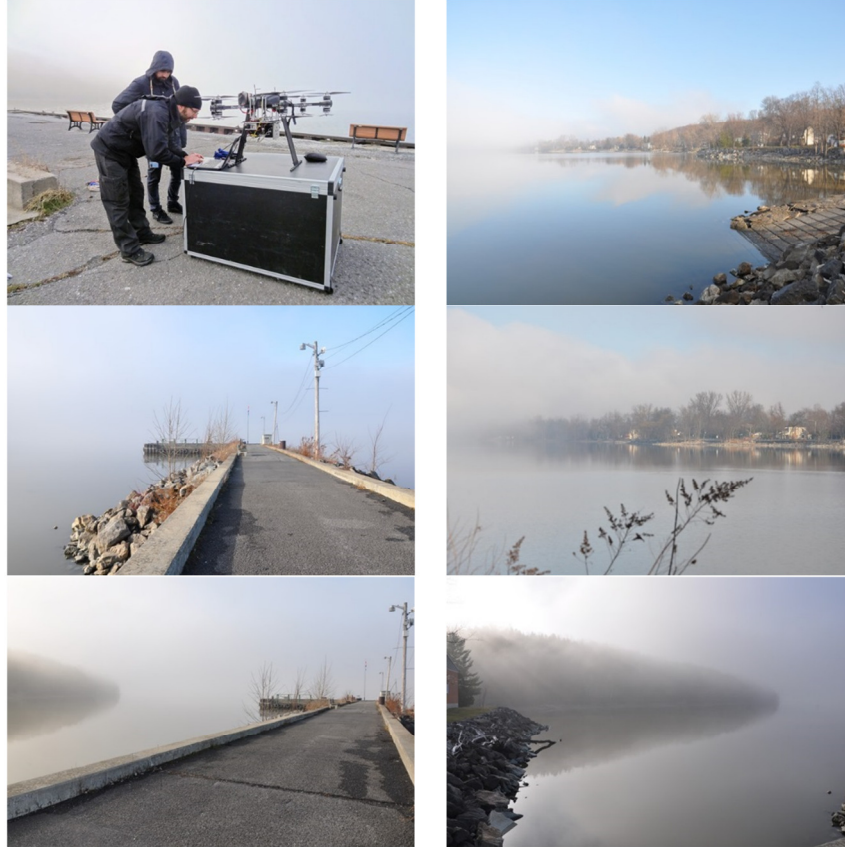


Figure 7. Photos prises par l'équipe TED lors de la mission de terrain à la baie Missisquoi du lac Champlain le 04 décembre 2017.

À la lumière de ces récentes contraintes et vu les conditions climatiques défavorables à la prise de données par drone ainsi que l'état gelé de l'eau des lacs, il a ainsi été décidé de procéder à la validation des images simulées avec le passage de Sentinel-2 le plus proche à une des trois missions de terrain effectuées sur le lac Magog. En effet, d'après les résultats de la concentration en Chl-a collectés sur ce lac, il s'est avéré que la variation de la Chl-a est en moyenne en bas de $1\mu\text{g L}^{-1}$ (Figure 8). Une variation très faible qui laisse supposée que les propriétés optiques inhérentes des eaux de ce lac sont globalement stables, temporellement, et par conséquent ces propriétés optiques apparentes le sont également. Cette hypothèse a été validée par les courbes des spectres moyens du lac Magog des trois campagnes de terrains (Figure 9). Certes, de la figure, la variation apparaît significative, mais cela est dû à l'échelle de la figure qui est de l'ordre de 1 millièème. En effet, l'écart type maximal des luminances des trois missions de terrains est de l'ordre de : $0.0019\text{ W m}^{-2}\text{ nm}^{-1}\text{sr}^{-1}$ le long du spectre électromagnétique qui souligne sa faible variation. D'autre part, à cause du dynamisme des eaux du lac, et vu la différence des dates de prise entre le Sentinel-2 (11 août 2017) et la campagne de terrain (14 août 2017), il est difficile, voire impossible, de comparer (pixel versus pixel) les données de la luminance. Cependant, le comportement intrinsèque des pixels de l'eau « pure » devrait rester le même pour les deux type de données (satellite et drone).

Ainsi, une comparaison entre les luminances obtenues à partir des deux plateformes (drone et satellite) et celles publiées à l'« *OCEAN OPTICS Web Book*¹ », a été effectuée. De la Figure 10, il est clair que l'allure des deux courbes de luminances (à gauche obtenue pour les données de Sentinel-2 et la courbe en violet (TOA) de la figure à droite publié par l'*OCEAN OPTICS Web Book*) concorde fortement. Une luminance décroissante à partir de 500 nm avec un petit pique à environ 750 nm pour retrouver l'allure décroissante vers la fin du spectre du visible. À noter également que les valeurs de luminances sont dans la même gamme. Le même exercice a été effectué avec les données hyperspectrales dans le visible acquises par drone et les mêmes conclusions ressortaient également (Figure 11).

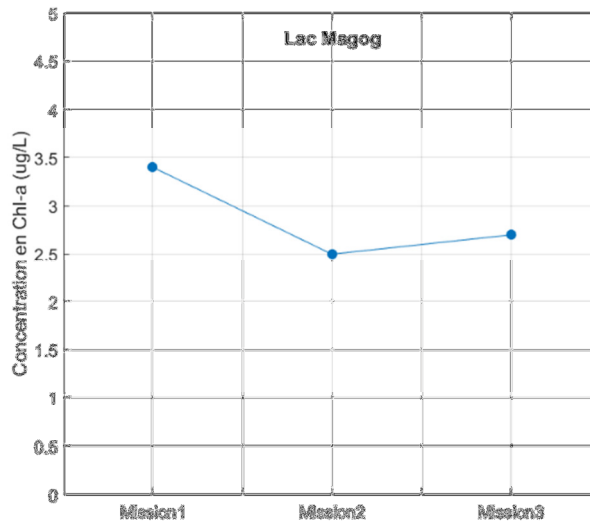


Figure 8. Moyennes de la concentration en Chl-a collectées lors des trois missions du lac Magog.

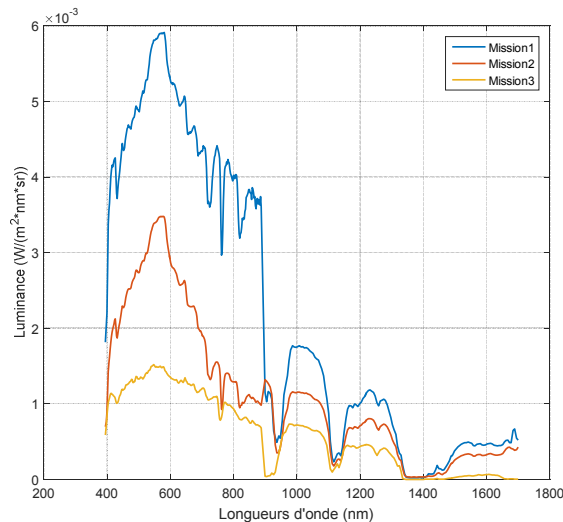


Figure 9 Moyennes des luminances collectées lors des trois missions au lac Magog.

¹ http://www.oceanopticsbook.info/view/remote_sensing/the_atmospheric_correction_problem.

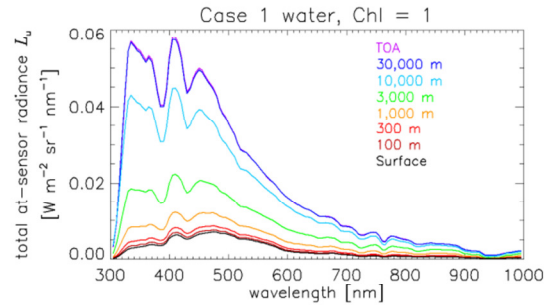
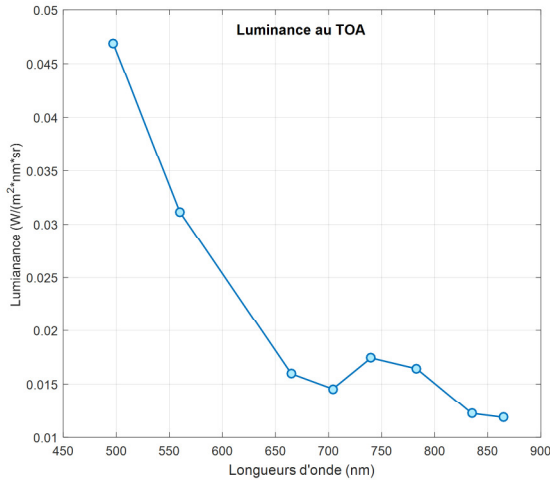


Figure: Fig. 2. Example at-sensor radiances L_u for different sensor altitudes. The water-leaving radiance and surface-reflected radiance (not shown) are the same in all cases.

Figure 10. Comparaison entre la luminance de Sentinel-2, obtenue au lac Magog (14, août 2017), et un exemple de luminance de l'eau à $1 \mu\text{g Chl-a L}^{-1}$ publiée par le site web d'OCEAN OPTICS Web Book.

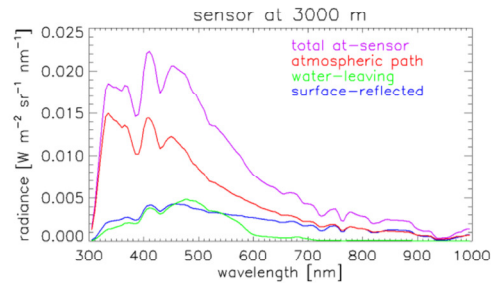
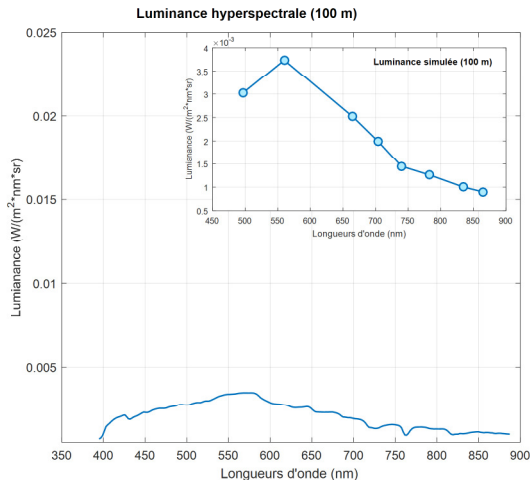


Figure: Fig. 3. The total radiance curve of Fig. 2 at 3000 m sensor altitude partitioned into the contributions by water-leaving radiance, surface reflectance, and atmospheric path radiance.

Figure 11. Comparaison entre la luminance de la caméra visible embarquée sur drone, obtenue au lac Magog (14, août 2017), et la luminance de l'eau à $1 \mu\text{g Chl-a L}^{-1}$ obtenue par l'OCEAN OPTICS Web Book. Le zoom montre les luminances des régions simulées à partir de la courbe hyperspectrale.

3.4. Données du capteur Sentinel-2

Initialement, les données du capteur Sentinel-2, supposées être utilisées au cours de ce projet, sont les images issues du programme Theia. En effet, le CNES et l'ESA ont, récemment, lancé un appel à proposition «au nom de Theia» prévoyant de produire et distribuer des produits de niveau 2A (correction géométrique et atmosphérique) sur une surface de 5M de km², dont 24 tuiles ont été accordées au Québec couvrant une large partie de ces bassins versants prioritaires (près 477,000 km²). Cependant, Une série de téléchargements d'images, pour la région de la ville de Québec (tuile T18 TYT), a démontré que les données de la réflectance présentent des problèmes.

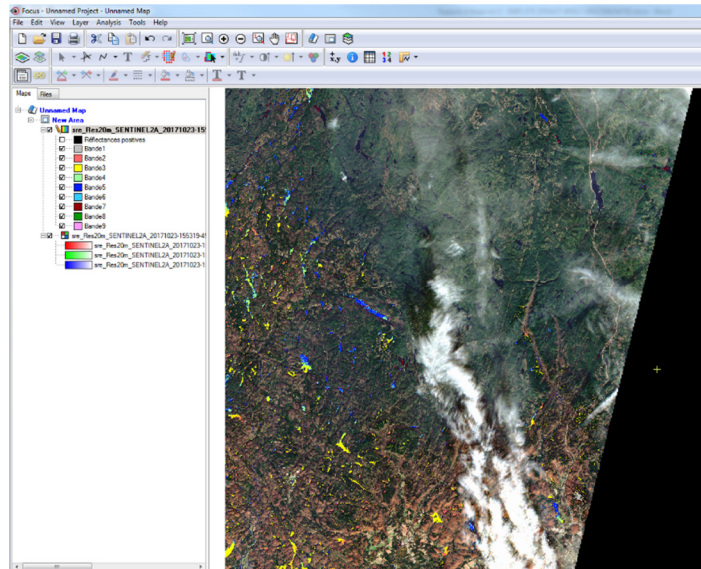


Figure 12. Distribution des pixels avec une réflectance négative collectés sur l'ensemble des bandes de l'image Sentinel-2, et produite par le programme Theia. La couleur indique la bande d'origine du pixel problématique (la couleur jaune représente par exemple les pixels négatifs collectés par la bande 3).

La Figure 12 montre un exemple d'images issues du programme Theia. Il est le résultat d'une image composite des pixels ayant une réflectance négative, et ce, de la bande 2 (bleu) à la bande 11 (courtes longueurs du proche infrarouge). Il est clair que l'ensemble des bandes génèrent des estimations erronées de la réflectance au niveau des plans d'eau. Ce problème a été signalé par courriel aux responsables du projet Theia, et le téléchargement des images a été suspendu, le temps que ce problème soit résolu. Cependant, afin de minimiser les pertes de temps, l'équipe de l'INRS a décidé de développer un modèle de correction atmosphérique de type «*image-based*».

Une des solutions retenues lors de la réunion de la première étape était l'utilisation du modèle COST [7], qui est une version améliorée du DOS (*Dark Object Subtraction* [8]). En plus de la correction de l'effet aditif causé par la présence des brumes dans l'image, le COST permet également de corriger une partie de l'effet multiplicatif causé par la transmittance. Le modèle est basé sur l'équation (3) qui permet d'estimer la réflectance destinée aux capteurs satellitaires proposée par Moran, Jackson [9]. L'amélioration ajoutée, par comparaison au DOS, est due à l'utilisation du cosinus de l'angle zénithal solaire qui, selon l'auteur, est une bonne approximation de la transmittance atmosphérique.

$$Ref = \frac{\pi \times (L_{\lambda} - L_{haze}) \times d^2}{TAU_v \times (ESUN_{\lambda} \times COS\theta_s \times TAU_z + Edown)} \quad (3)$$

avec :

Ref est la réflectance à la surface; L_{λ} est la luminance spectrale au niveau du capteur;
 L_{haze} est la luminance spectrale atmosphérique ascendante dispersé dans la direction de la pupille d'entrée du capteur et dans le champ de vision du capteur;

d est distance du soleil par rapport à la terre;

TAU_v est la transmittance atmosphérique le long de la surface terrestre au capteur;

$ESUN_{\lambda}$ est l'irradiance solaire exoatmosphérique moyenne ;
 θ_s est l'angle zénithal solaire en degrés ;
 TAU_z est la transmittance atmosphérique le long du soleil à la surface terrestre; et
 $Edown$ est l'irradiance spectrale descendante à la surface due au flux solaire diffus dans l'atmosphère.

Il est à préciser qu'une légère modification a été apportée au modèle COST proposé initialement au cours de ce projet. Cette modification intéresse particulièrement la partie de la luminance à retrancher (L_{haze}), qui est normalement estimée de l'image elle-même, afin de réduire l'effet additif des brumes. Le principe classique est de chercher dans l'image des pixels qui sont supposés, sans cet effet additif, avoir une réflectance d'un corps noir (1% ou 2% (pour certains auteurs)). Ces pixels représentent généralement des surfaces de l'eau ou l'absorption est quasi—totale. Pour le présent travail, sous l'hypothèse que la luminance du lac Magog varie peu (suite aux résultats présentés au rapport de mi-mandat), il est possible de considérer que la luminance du lac Magog comme luminance de référence ($L_{Réf}$). L'idée est alors de ramener la luminance de chaque bande de Sentinel-2 (L_{λ}) à cette luminance de référence. La différence ainsi calculée représente l'effet additif causé par la brume (L_{haze}) (Figure 13). Cette procédure peut se résumer par l'équation (4):

$$L_{haze} = L_{\lambda} - L_{Réf} \quad (4)$$

avec :

L_{haze} est la partie additive de la luminance;

L_{λ} est la luminance du Sentinel-2 pour chaque bande;

$L_{Réf}$ est la luminance du lac Magog, captée à partir des caméras hyperspectrales, simulée aux régions spectrales du Sentinel-2 à 20 m de résolution spatiale.

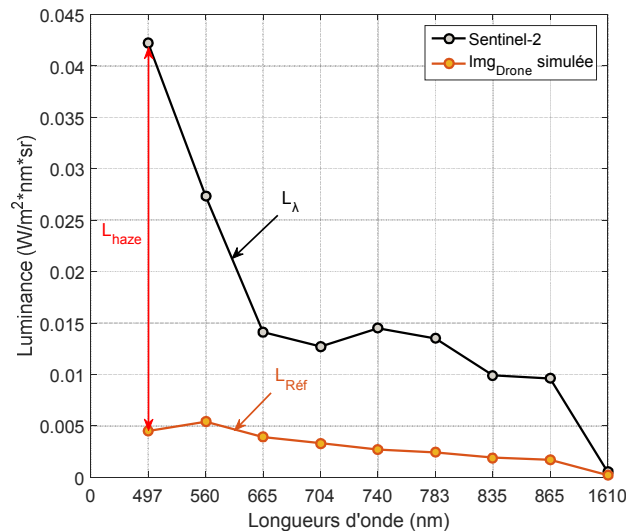


Figure 13. Nouvelle approche pour la quantification de l'effet additif de la luminance en se basant sur les données des lmgDrone Simulées.

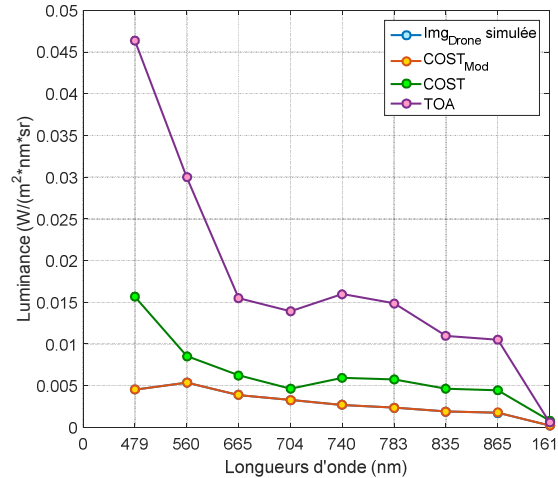


Figure 14. Comparaison des luminances captées à partir de l'image Sentinel-2 du 11 août 2017 avec correction : radiométrique seulement (TOA), par le modèle COST (COST) et par le modèle proposé pour ce projet (COST_{Mod}) et les luminances captées à partir de l'image du drone pour la campagne du 14 août 2017 (Imd_{Drone} simulée).

Afin de valider la nouvelle méthode de COST proposée pour le présent projet (COST_{Mod}), une comparaison entre les luminances TOA, COST, COST_{Mod} de l'image du 11 août 2017 et les luminances des images du drone agrégées et simulées (Imd_{Drone} simulée) aux longueurs d'onde de Sentinel-2 pour la campagne de terrain du 14 août 2017 a été effectuée. La Figure 14 montre les résultats de la comparaison, qui illustrent clairement que la méthode proposée approxime le mieux la luminance des images du drone simulée.

De l'équation (4), il est possible de calculer la réflectance non seulement pour les images du capteur Sentinel-2, mais aussi pour les images du drone simulées et agrégées à 20 m de résolution spatiale. En effet, puisque les images du drone sont simulées aux longueurs d'onde de Sentinel-2, il est possible de considérer que de l'éclairement solaires exoatmosphériques moyennes ($ESUN_{\lambda}$) de Sentinel-2 sont les mêmes que pour les images du drone. Pour le reste des entrées de l'équation (4), les paramètres sont connus : la transmittance atmosphérique le long de la surface terrestre au capteur ($TAU_v = 1$), l'angle zénithal solaire (θ_s) dépend de l'heure de la prise de l'image, des coordonnées géographiques et de la date, la transmittance atmosphérique le long du soleil à la surface terrestre ($TAU_z = \cos(\theta_s)$), la distance du soleil par rapport à la terre (d) est en fonction de la date et de l'éclairement spectrale descendante à la surface due au flux solaire diffus dans l'atmosphère ($Edow = 1$). De ces constats, il est possible d'utiliser la même équation pour convertir les données de luminances en réflectances, et ce, pour les images du drone et pour les images du capteur Sentinel-2.

Une grande concordance entre les deux réflectances (Imd_{Drone} simulée et COST_{Mod}) est perçue ($R^2 = 1$ et NASHr = 0.99). Les réflectances sont bien distribuées aux alentours de la diagonale (1 : 1). Le Biais est d'environ -0.26%, qui sous-entend que le modèle COST_{Mod} tend à sous-estimer très légèrement les réflectances. Cette erreur est systématique et est quantifiable, et peut être ajustée lors des traitements. Il est important

à souligner que **malgré le décalage temporel (3 jours de différences)**, les réflectances issues du modèles $COST_{Mod}$ ainsi que leurs correspondantes (Img_{Drone} simulées) conservent en grande partie leur énergie, et ce, le long du spectre avec une erreur moyenne d'environ 0.30%, qui est très acceptable (Figure 15).

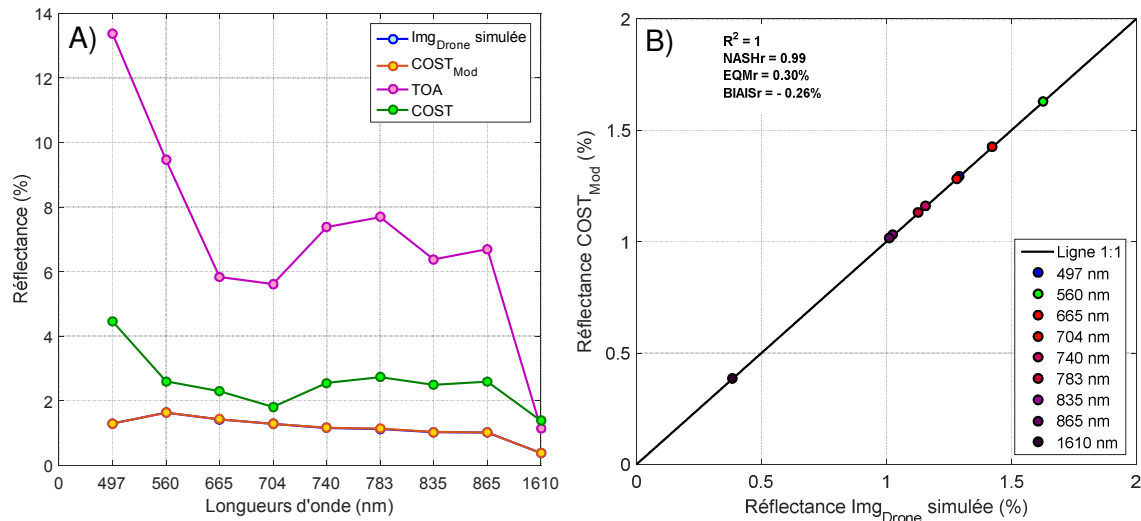


Figure 15. Comparaison des Réflectances. A) Comportement de la réflectance captée à partir de l'image Sentinel-2 du 11 août 2017 avec correction : radiométrique seulement (TOA), par le modèle COST (COST) et par le modèle proposé pour ce projet ($COST_{Mod}$) et la luminance captée à partir des images du drone pour la campagne du 14 août 2017 (Img_{Drone} simulée). B) Comparaison des réflectances captées par drone simulée (Img_{Drone} simulée) aux longueurs d'onde de Sentinel-2 et celles du capteur Sentinel-2 corrigées avec $COST_{Mod}$, avec indices d'évaluation statistique.

Toutefois, si cette procédure donnait de bons résultats en mode manuel et pour une petite portion de l'image de Sentinel-2 (à la grandeur des images prises par le drone), elle ne l'est pas en mode automatisé. En effet, la sélection de la L_λ du pixel noir (*dark pixel*) se fait de façon indépendante d'une bande à une autre (généralement, c'est la valeur minimale en luminance correspondante à 1% en réflectance). Ceci, mène alors à détruire les relations intrinsèques existantes entre les bandes. Cet effet est prépondérant au niveau des pixels de l'eau, puisque les luminances sont initialement très faibles. Une légère transformation conduit à l'altération du comportement le long du spectre électromagnétique. Une nouvelle procédure de sélection des pixels du corps noir a ainsi été adoptée. En effet, une fois le pixel du corps noir est identifié, des coefficients de luminances sont calculés à partir du comportement spectral de ce dernier. Ces coefficients de luminances (ou de corrections de la luminance), ne sont que les rapports de la luminance de chacune des bandes de ce pixels sur la luminance de la bande du bleu. Le choix de calculer ces coefficients en se basant sur la bande bleu est dû au fait que l'énergie de cette bande est toujours la plus grande. Ainsi, ces coefficients varieront entre 1 et 0 (1 pour la bande pour approximer le zéro au niveau des longueurs d'onde du PIR) et vont conserver le comportement spectral de ce pixel. Ces derniers sont par la suite utilisés pour le calcul du L_{haze} . À la différence de la méthode proposée ci-haut, seule la luminance du bleu du lac Magog est utilisée comme luminance de référence. Ainsi, au moment du calcul du L_{haze} pour une bande donnée, cette dernière

est corrigée par la valeur de la luminance de référence du bleu que multiplie le coefficient correspondant (équation (5)). De cette façon, les relations intrinsèques existantes entre les bandes seront conservées, même après la correction de l'effet additif. La Figure 16 montre une comparaison du comportement spectral de la réflectance le long du spectre électromagnétique d'un pixel de l'eau avec les deux méthodes. Il est clair que le résultat de la deuxième méthode, présenté dans le cadre rouge, copie le mieux la signature spectral d'une eau pure.

$$L_{haze} = 0.0023 * Coef_{\lambda} \quad (5)$$

avec :

0.0023 est la luminance de référence du bleu ($L_{Réf}$) issu du Lac Magog;

$Coef_{\lambda}$ est le coefficient de correction de la luminance de la bande λ issu du pixel noir ($Coef = \frac{L(\lambda)_{PN}}{L(bleu)_{PN}}$), où PN fait référence au pixel noir.

Ainsi l'équation finale pour le calcul de la réflectance prend la forme suivante :

$$Ref = \frac{\pi \times \left(L_{\lambda} - \left[0.0023 * \left(\frac{L(\lambda)_{PN}}{L(bleu)_{PN}} \right) \right] \right) \times d^2}{TAU_v \times (ESUN_{\lambda} \times COS\theta_s \times TAU_z + E_{down})} \quad (6)$$

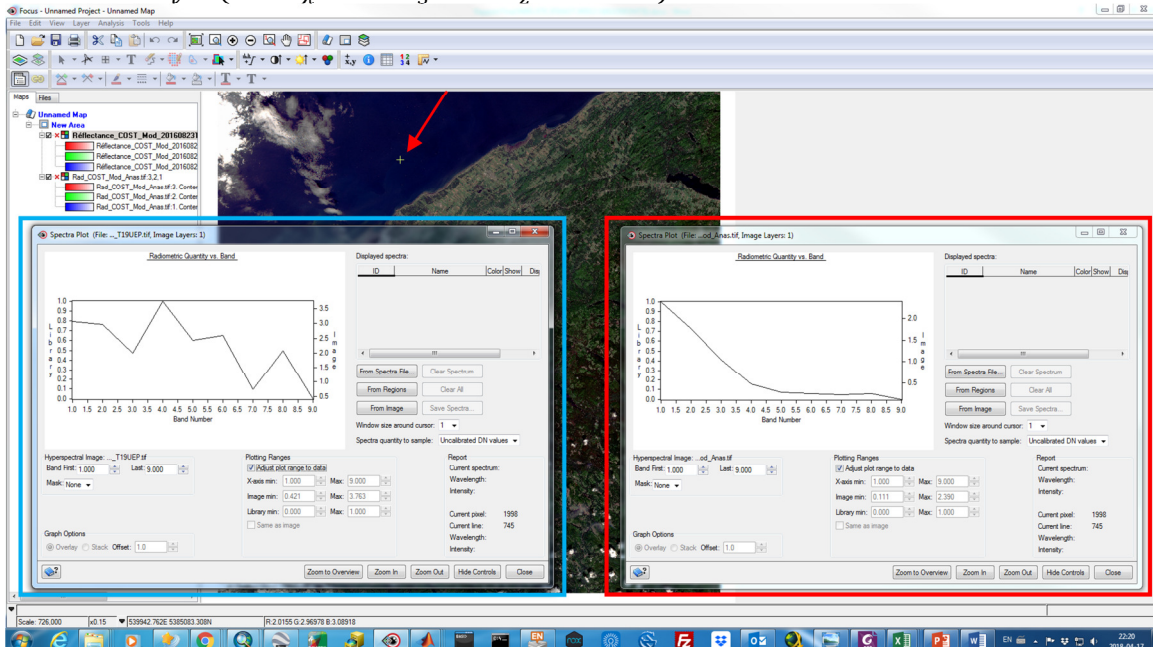


Figure 16. Comparaison du comportement spectral d'un pixel d'eau après correction du L_{haze} par : 1) sélection indépendante des luminances du pixel noir (cadre bleu) et 2) utilisation des coefficients de correction relative de la luminance du corps noir (cadre rouge).

3.5. Masque «Eau-Terre-Nuage»

Pour des fins d'automatisation des procédures des prétraitements et des traitements des images Sentinel-2, la génération d'un masque Eau-Terre-Nuage (E.T.N) est importante. Les eaux sont entourées de végétations, comportant de la Chl-a végétale, qui émet un fort signal dans les régions spectrales utilisées pour l'estimation de la Chl-a algale et qui, par conséquent, conduit à une confusion entre la Chl-a végétale et algale (particulièrement sur les rives). La réflectance des nuages est, généralement, forte des petites longueurs d'ondes aux plus fortes. L'application du modèle sur des pixels de nuage produit également des fortes concentrations en Chl-a qui peuvent être prises pour des fleurs d'eau d'algue. Le programme Theia, en plus des corrections atmosphériques de l'image, produit également des produits annexes, notamment un masque de nuages et d'eau. Toutefois, deux critères ont limité l'utilisation de ces deux produits : 1) la qualité des masques qui est très peu performante (Figure 17) et 2) l'aspect pratique des traitements; L'utilisateur sera obligé de télécharger des images de Sentinel-2, pour la même scène, deux fois. La première du serveur de l'USGS pour des fins de production de la carte des concentrations en Chl-a et la deuxième du site de Theia pour pouvoir masquer la terre et les nuage. Ainsi, il a été décidé de développer un algorithme de type «*Image-based*» pour la discrimination de la terre, l'eau et les nuages. La Figure 17.A montre le résultat du produit E.T.N. qui permet clairement une meilleure discrimination entre les trois classes. L'ensemble des lacs sont identifiés et masqués par comparaison au produit Theia qui surestime les nuages (les teintes blanc, gris et noir à la Figure 17.B) et qui, par contre, sous-estime d'une façon exagérée de l'eau (rouge à la Figure 17.B).

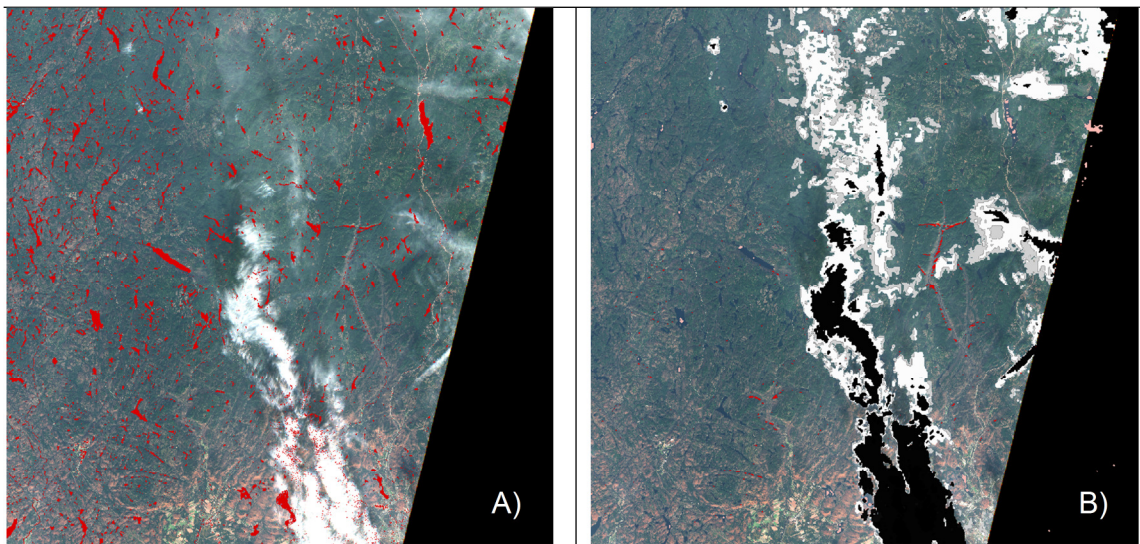


Figure 17. Comparaison entre le masque Eau-Terre-Nuage (E.T.N.) développé au cours de ce projet et le masque eau et nuage produit par le programme Theia pour la même scène (18 TYT) le 23/10/2017. A) E.T.N (la teinte rouge correspond à l'eau) et B) produit Theia (les teintes en blanc, gris et noir correspondent aux nuages, brumes et la teinte rouge correspond au masque de l'eau).

D'ailleurs, en plus des raisons précitées, un intérêt particulier a été porté au développement du masque E.T.N. pour ce projet, qui a été utilisé pour la sélection du pixel du corps noir lors de l'étape de la correction atmosphérique des images Sentinel-2. En effet, cette tâche est très délicate et en présence des petits nuages elle l'est encore plus. Les terres ombrées ont des réflectances encore plus faibles que celles de l'eau, alors les pixels de 1% de réflectance correspondaient à la terre ombrée, menant à des réflectances négatives pour les pixels de l'eau. Ainsi, via le développement du masque E.T.N., juste les pixels de l'eau qui sont sélectionnés et par conséquent le pixel de 1% appartient forcément aux pixels de l'eau. De cette façon les valeurs négatives en réflectance ont été évitées.

L'algorithme derrière la génération du masque E.T.N. est basé sur la luminance au TOA des images. Il est composé de deux parties : 1) la première sert à discriminer les pixels des nuages des deux autres classes (terre et eau) en posant des conditions allant de la bande du bleu à la bande du rouge et 2) la deuxième sert à discriminer les pixels de l'eau de la terre en posant des conditions allant de la bande du bleu à la bande des courtes longueurs du proche infrarouge. La combinaison des deux masques générés conduit au développement d'un masque E.T.N «*Image-based*» typique à chaque image traitée.

4. Approche méthodologique

4.1. Calibration du modèle basé sur les méthodes d'ensemble

La calibration d'un modèle consiste à trouver une relation de dépendance entre une ou plusieurs variables explicatives et la variable à expliquer, soit respectivement les indices spectraux et la concentration en Chl-a pour la présente étude. Cette relation est calculée mathématiquement par des modèles de régressions simples ou multiples, de type linéaire, exponentiel, quadratique ou autres. Pour cette fin, une étape d'extraction des signatures spectrales versus les mesures *in situ* des concentrations en Chl-a est obligatoire.

4.1.1. *Extraction des signatures spectrales des images simulées avec les échantillons*

La Figure 18 illustre le résultat de l'extraction des moyennes de la réflectance des signatures spectrales des images simulées du drone extraites des points de mesures *in situ* par campagne. De la Figure 18, il est clair que les réflectances de la troisième campagne (courbes en jaune) sont relativement élevées par rapport aux deux premières. Par exemple, des réflectances d'environ 6% sont enregistrées sur la baie Missisquoi pour des eaux non turbide, ce qui n'est pas normal. Ainsi, il a été décidé d'éliminer les mesures de cette campagne par précaution, puisque l'utilisation de valeurs erronées pour des fins de calibration mènera à un apprentissage du MBME non compatible avec les images Sentinel-2. De ces derniers, 2 échantillons de la deuxième campagne sur le lac Magog ont été abimées au laboratoire. Donc les analyses de Chl-a pour ces deux échantillons n'ont pas été réalisées. Lors de la première campagne au lac Brome trois pixels n'ont pas été enregistrés avec la caméra du visible (Figure 19) et 8

autres pixels étaient atteints par les *Sun-glint* (Figure 20). La base de calibration finale avait ainsi une taille de 41 d'un total de 81 mesures avec un maximum de $77.04 \mu\text{g Chl-a L}^{-1}$ et un minimum de $2.16 \mu\text{g Chl-a L}^{-1}$.

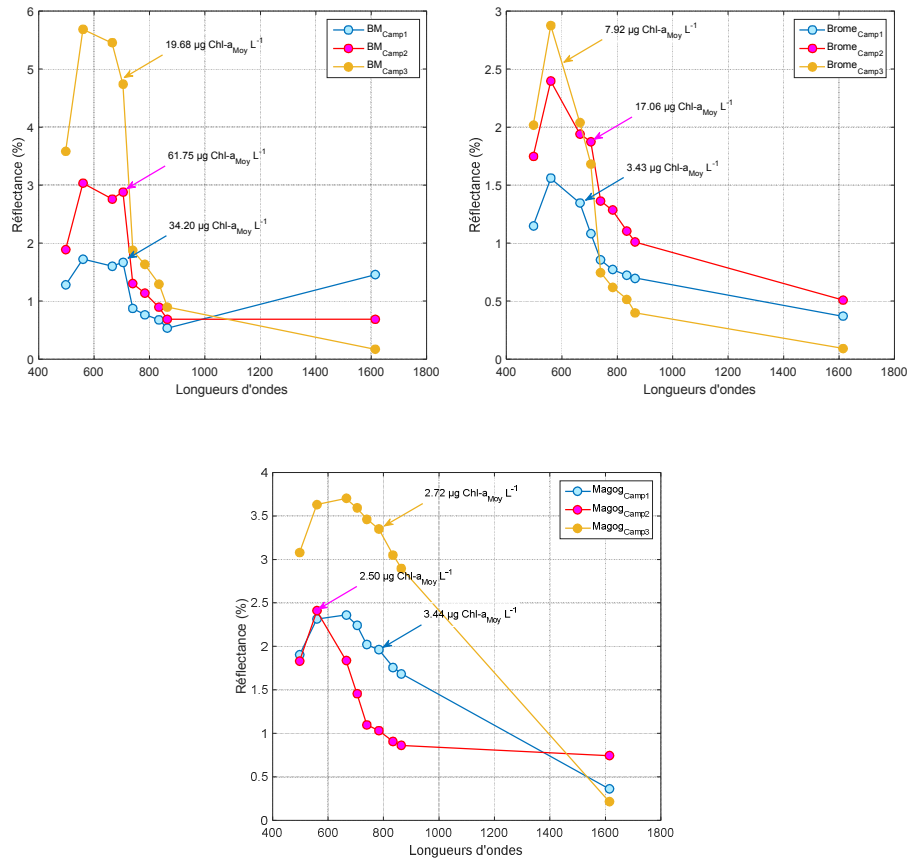


Figure 18. Illustration des moyennes des réflectances extraites des signatures spectrales des images simulées avec les moyennes en Chl-a correspondantes par campagne de mesures.

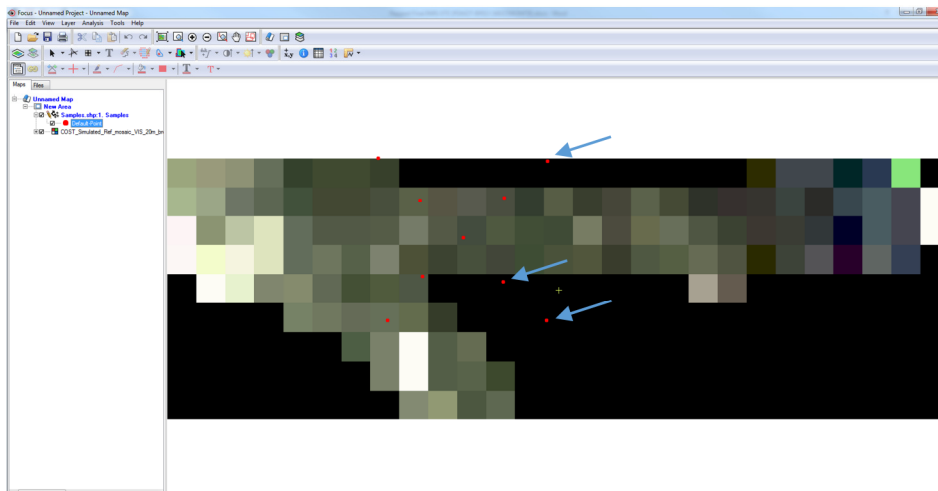


Figure 19. Les «No Data» enregistrées lors de campagne no. 1 au lac Brome.

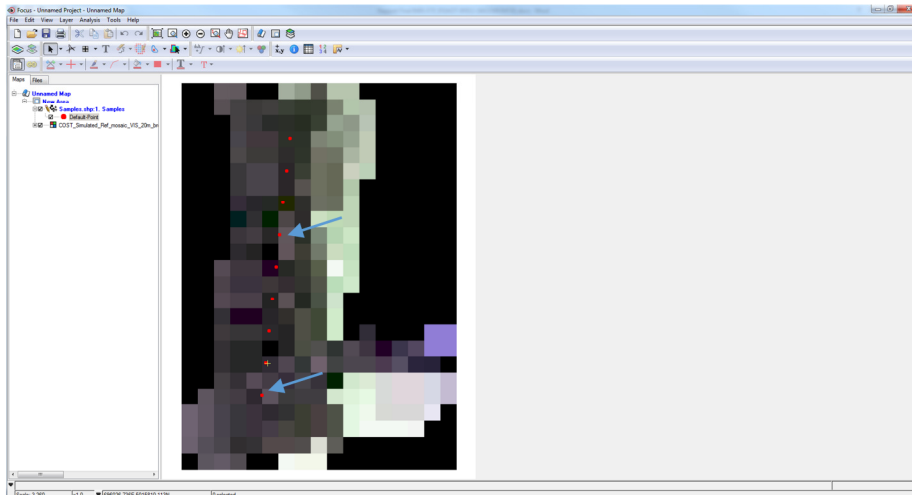


Figure 20. Exemple de pixels saturés par le *Sun-glint*. (Lac Brome, campagne no. 2)

4.1.2. Calibration du modèle basé sur les méthodes d'ensemble (MBME)

La calibration du MBME passe par deux étapes principales : 1) le développement d'un classificateur d'ensemble qui sert à assigner une classe trophique donnée (soit oligo (< à $10 \mu\text{g L}^{-1}$), méso (de 10 à $50 \mu\text{g L}^{-1}$) ou eutrophe (> à $50 \mu\text{g L}^{-1}$)) au pixel à traiter et 2) le développement d'un estimateur d'ensemble qui permet d'estimer la concentration en Chl-a du pixel pré-classé. Ces deux étapes se basent sur le calcul de relations de dépendance entre les mesures *in situ* et des indices spectraux. Les indices spectraux normalisés ont été favorisés pour le présent travail. D'autre part, il est également important de souligner qu'il n'a pas été possible d'utiliser les trois niveaux trophiques usuels des eaux, puisque le nombre de mesures dans la base de calibration dépassant les $50 \mu\text{g L}^{-1}$ est de 7. Il a ainsi été décidé pour le présent projet d'utiliser deux classes (oligotrophe (< à $10 \mu\text{g Chl-a L}^{-1}$) et méso-eutrophe (> à $10 \mu\text{g Chl-a L}^{-1}$)) pour la calibration du classificateur d'ensemble.

- **Le développement du classificateur d'ensemble**

Afin de développer un *classificateur d'ensemble* la technique du *bagging* en combinaison avec l'algorithme de CART (*Classification And Regression Tree*) ont été utilisés. Le *bagging* consiste à retirer, aléatoirement, une portion de la base de calibration pour ensuite, via l'algorithme de CART, développer un classificateur avec les données restantes basé sur les indices spectraux normalisés. Cet exercice est refait pour « n » itérations (« n » était fixé à 25,000 itérations). Le résultat de chaque itération est le calcul d'un seuil, permettant la discrimination entre les deux niveaux trophiques des eaux. La fin de cette étape marque le développement d'un vecteur aléatoire composé de « n » classificateurs. L'occurrence et la variance des seuils permettent par la suite de déterminer une distribution de probabilité (histogramme à la Figure 21) de seuils qui est caractérisée par une moyenne (μ) et une variance (σ). Ces deux moments statistiques servent par la suite au développement du *classificateur d'ensemble* composée d'un seuil nominal, minimal et maximal (Figure 21), basé sur l'équation suivante :

$$\text{Seuil}_i = \mu \pm \sqrt{3 \times \sigma} \quad (7)$$

avec

μ : est la moyenne du vecteur aléatoire correspondant au seuil nominal (le plus probable)

σ : est la variance du vecteur aléatoire.

i : varie de 1 à 2, avec 1 est le seuil minimal et 2 le seuil maximal.

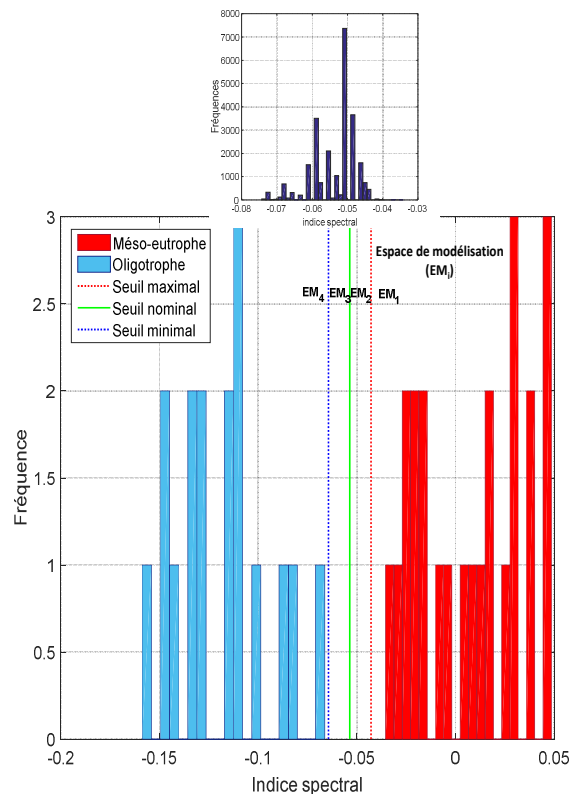


Figure 21. Structure générale du classificateur d'ensemble. Les EM_i ($i = 1 : 4$) font références aux espaces de modélisation possibles.

- **Le développement de l'estimateur d'ensemble**

Basé sur les résultats du *classificateur d'ensemble*, il est possible de développer un *estimateur d'ensemble*. En effet, au moyen des différents seuils calculés, il est possible de subdiviser la base de calibration en plusieurs « 3 (seuils) * 2 (classes) » sous-bases de données, permettant la calibration de 6 *estimateurs* spécifiques, appelés « *experts* » en domaine d'estimation d'ensemble [10]. D'autre part, il a été démontré que les *estimateurs* basés sur une régression multiple améliorent la précision de l'estimation [11]. Ainsi, la calibration des *experts* a été effectuée avec la régression pas-à-pas, connue sous le nom anglais « *stepwise regression* ». Le point fort de ces *experts*, c'est qu'ils sont non seulement spécifiques à la classe à modéliser, mais également aux zones de transitions d'une classe à une autre, qui sont souvent problématiques à modéliser. Cette étape marque le développement de *l'estimateur d'ensemble*. Toutefois, il est clair de la Figure 21 qu'aucunes mesures n'appartiennent à la zone de transition.

Ceci a par conséquent réduit le nombre d'*experts* à seulement deux. Un *expert* pour les eaux méso-eutrophes calibré par *stepwise* avec les données de couleur bleue sur la Figure 21 et un *expert* pour les eaux oligotrophes calibré également par *stepwise* avec les données de couleur rouge sur la Figure 21.

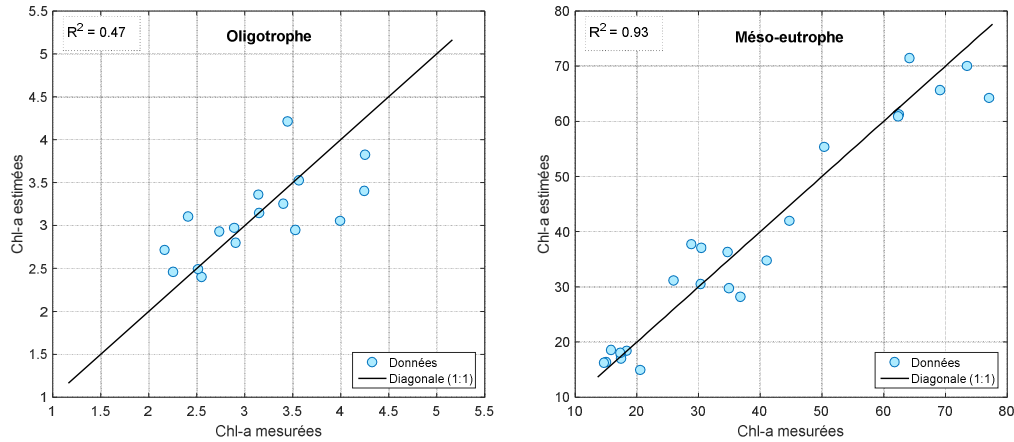


Figure 22. Nuage de points de calibrations des deux experts

La Figure 22 illustre les résultats de la calibration des deux *experts*. De la Figure 22, il est clair qu'une forte corrélation ($R^2 = 0.93$) existe entre les indices spectraux et les mesures *in situ* pour les eaux méso-eutrophes. Les indices spectraux sélectionnés par la régression pas-à-pas dans ces conditions trophiques sont : 1) l'indice normalisé entre la bande verte à 560 nm et la bande PIR à 783 nm, 2) l'indice normalisé entre la bande verte à 560 nm et la bande rouge à PIR nm et 3) un indice composé de trois indices normalisés qui sont : a) l'indice normalisé entre la bande rouge à 704 nm et la bande bleue à 497 nm, b) l'indice normalisé entre la bande rouge à 665 nm et la bande rouge à 704 nm et c) l'indice normalisé entre la bande bleue à 497 nm et la bande rouge à 665 nm. L'équation de calibration est la suivante :

$$[Chl - a]_{Méso-eutrophe} = \exp(-2.72 * Ind_1 + 3.39 * Ind_2 + 3.23 * Ind_3 + 2.21) \quad (8)$$

avec

$$Ind_1 = \frac{band3 - band7}{band3 + band7},$$

$$Ind_2 = \frac{band3 - band8}{band3 + band8},$$

$$Ind_3 = \left(\frac{band5 - band2}{band5 + band2} + \frac{band5 - band4}{band5 + band4} \right) - \frac{band2 - band4}{band2 + band4},$$

avec : $band2 = 497$, $band3 = 560$, $band4 = 665$, $band5 = 704$, $band7 = 783$ et $band8 = 835$ nm.

La corrélation est par contre moins prononcée pour les eaux oligotrophes qui est de 47%. Ceci est normal puisque la concentration maximale de la base de calibration est inférieure à $5 \mu\text{g Chl-a L}^{-1}$, ce qui est très faible. Dans ces conditions trophiques, le rapport «bruit/signal de retour» est fort ce qui influence la corrélation entre la réflectance et les mesures *in situ*. À la différence des eaux méso-eutrophes, un seul indice spectral qui a été sélectionné par la régression pas-à-pas et qui est l'indice normalisé entre la

bande verte à 560 nm et la bande rouge à 704 nm. L'équation de calibration est la suivante :

$$[Chl - a]_{Oligotrophe} = \exp(-3.35 * Ind_4 + 1.93) \quad (9)$$

avec

$$Ind_4 = \frac{Band3 - band5}{Band3 + band5}$$

L'estimation de la concentration en Chl-a via cette approche est une combinaison pondérée des estimées en Chl-a des deux *experts*. Les coefficients de pondération sont de 1/6 pour les seuils des extrémités (maximal et minimal) et 2/3 pour le seuil nominal (le plus probable), selon l'étude proposée par Tørvi and Hertzberg [12] pour des fins d'utilisation de la Quadrature Gaussienne. Cette technique permet de réduire le nombre élevé des seuils du vecteur aléatoire généré à partir de l'algorithme du *bagging* à un nombre réduit (en termes de 3 à 5 seuils optimaux (3 seuils optimaux ont été utilisées pour cette étude)) aussi précis que l'ensemble des seuils initialement calculés. Les pondérations des estimées en Chl-a de chaque *expert* changent selon le EM (Figure 21) via l'équation suivant :

$$[Chl - a]_{MBME} = \sum_{i=1}^k \omega_i \times \text{Exp}_{so_i^\uparrow} + \sum_{i=1}^{n_{so}-k} \omega_i \times \text{Exp}_{so_i^\downarrow} \quad (10)$$

avec :

n_{so} : est le nombre de seuils optimaux (SO) composant le classificateur d'ensemble fixé à 3 pour cette étude;

$\text{Exp}_{so_i^\uparrow}$: est l'ensemble d'*experts* calibrés par les mesures des eaux méso-eutrophes, qui devait être égale au n_{so} , mais pour cet étude un seul a été calibré;

$\text{Exp}_{so_i^\downarrow}$: est l'ensemble d'*experts* calibrés par les mesures des eaux oligotrophes, qui devait être au n_{so} , mais pour cet étude un seul a été calibré.

k : les indices des SO du classificateur d'ensemble qui varient de 1 à 3 avec (1 : fait référence au SO minimal, 2 : fait référence au SO nominal et 3 : fait référence au SO maximal, soit la ligne bleue, verte et rouge à la Figure 21);

ω_i : est l'ensemble des poids correspondants aux SO utilisés (poids du SO minimal = poids du SO maximal = 1/6 et poids du SO nominal = 2/3).

4.2. Validation du modèle basé sur les méthodes d'ensemble

4.2.1. Validation-croisée

La validation-croisée est une technique qui consiste à enlever temporairement une mesure ou un bloc de mesures de la concentration en Chl-a base de données et d'utiliser le reste de la base comme données de calibration, pour ensuite estimer la concentration en Chl-a de la mesure enlevée. Cette opération se répète pour l'ensemble de la base de données pour aboutir à une estimation de toutes les mesures en Chl-a permettant une comparaison entre valeurs estimées/mesurées via des indices d'évaluation. Pour la présente étude, quatre indices d'évaluation statistique (le coefficient de détermination (R^2), le critère de Nash (NASH), l'erreur quadratique moyenne (EQM) et le Biais) seront utilisés dont les formules sont représentées par les équations 9 à 12. Le critère du NASH évalue la performance des modèles en comparant

les valeurs estimées avec la moyenne de celles mesurées. Pour un NASH négatif, il serait préférable d'utiliser la moyenne des valeurs mesurées que celles estimées par le modèle, ce qui est très peu performant. Le modèle commence à être satisfaisant à partir d'un NASH ≥ 0.8 ; le modèle est parfait pour un NASH = 1 [13].

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(Es_i - \bar{Es})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Es_i - \bar{Es})^2}} \right]^2 \quad (11)$$

$$\text{BIAIS} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Es_i - M_i) \quad (12)$$

$$\text{EQM} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Es_i - M_i)^2} \quad (13)$$

$$\text{NASH} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - Es_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (14)$$

avec :

n est la taille de l'échantillon, M et Es sont les valeurs mesurées et estimées, et \bar{M} et \bar{Es} sont les moyennes des valeurs mesurées et estimées.

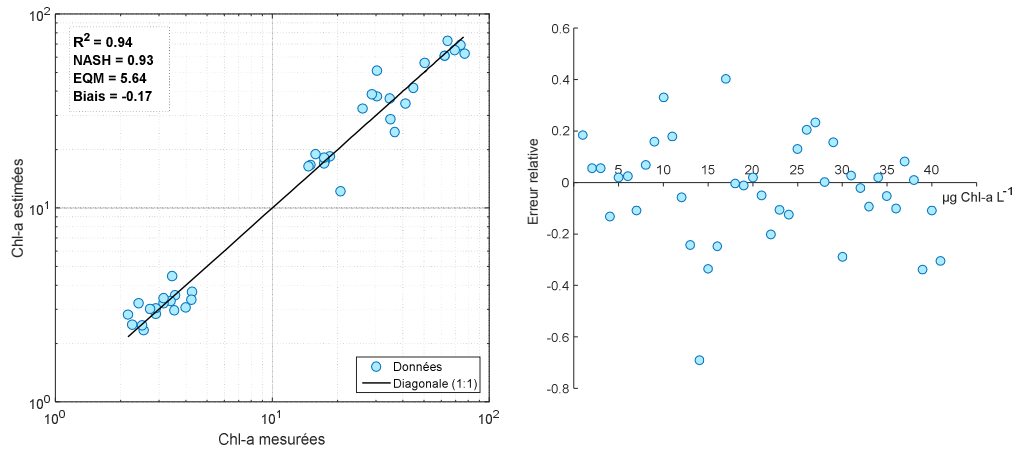


Figure 23. Concentration en chlorophylle-a estimée à partir du modèle basé sur la méthode de l'ensemble comparée aux mesures *in situ*, avec les indices de performance statistique.

Les résultats de validation croisée obtenus démontent le potentiel du MBME à estimer la concentration en Chl-a, tel qu'illustré à la Figure 23.A. Le R² de 0.94 indique que le MBME est capables d'expliquer jusqu'à 94% de la variance de la modélisation. Les valeurs du NASH et de l'EQM mettent en évidence la robustesse des estimées en Chl-a. Le biais, légèrement négative, soulignent que le MBME tend à sous-estimer de 0.17% la concentration en Chl-a. De plus, les points sont bien alignés par rapport à la diagonale (1 :1). En d'autres termes, les estimées en Chl-a ne sont pas sur-biaisées en extrapolation. Cette supposition est bien confirmée par le plot des résidus qui est normalement distribué (bonne distribution par rapport à l'axe 0) ne montrant aucune

tendance. Cela souligne la robustesse du MBME à estimer la concentration en Chl-a même en domaine d'extrapolation (Figure 23).

4.2.2. Validation par données indépendantes (RSVL)

Trois bases de données pour la validation du MBME, avec données indépendantes, ont été fournies par GH et qui ont été collectées par le RSVL entre 2015 et 2017. De ces bases de données 94 points échantillonnés ont pu être exploitables d'un total de 1891 mesures. Cependant, 99 mesures ont été utilisées pour la validation finale. Cette différence dans le nombre est due au fait que pour certaines mesures *in situ*, deux scènes différentes des images de Sentinel-2 étaient disponibles (Figure 24). Alors il a été décidé de garder les deux estimées en Chl-a pour la validation.

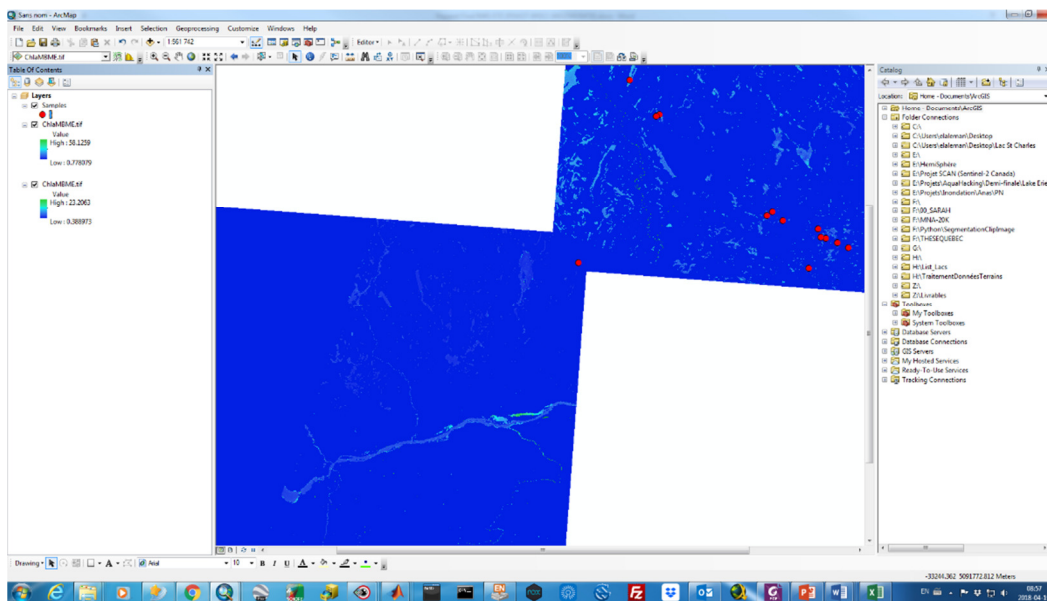


Figure 24. Exemple de chevauchement de deux scènes (18TVR et 18TWS (201/07/30)).

Il est important de signaler que ce nombre était initialement de 108 (32 mesures pour l'année 2016 et 76 pour l'année 2017), mais certaines mesures présentaient des valeurs très élevées en Chl-a. Après vérification, il s'est avéré que ces 9 points étaient soit placés sur des pixels saturés de *Sun-glirt* (4 mesures), ou placés sur des brumes denses (2 mesures) ou sur la végétation (3 mesures) (Figure 25.A à C). Alors, ces mesures ont été supprimées de la base de validation. Un autre cas de figure a également été rencontré. Il s'agit des points de mesure prises sur les rives des lacs. En raison de l'erreur de la correction géométrique des images Sentinel-2 ou du GPS des points de mesures ou des deux combinées, ces points de mesures sont souvent placés sur la rive à un ou deux pixels de l'eau. Ces derniers ont alors subi une translation au point de l'eau le plus proche (Figure 25.D). Le nombre de ces pixels s'est élevé à 12. Il est aussi important de préciser qu'en raison la grande variation existante entre les heures de prise des échantillons des deux bases de données (entre 7h30 et 23h00), l'estimation de la concentration en Chl-a pour la validation est issue de la moyenne d'un «buffer» de 3x3 pixels, sauf pour quelques cas. Ces derniers sont les mesures qui sont

prises aux rives des lacs. La moyenne des concentrations en Chl-a du *buffer* est surestimée par la végétation juxtaposant le lac. Pour ces cas, c'est la valeur du pixel correspondant au point de mesure qui a été extraite.

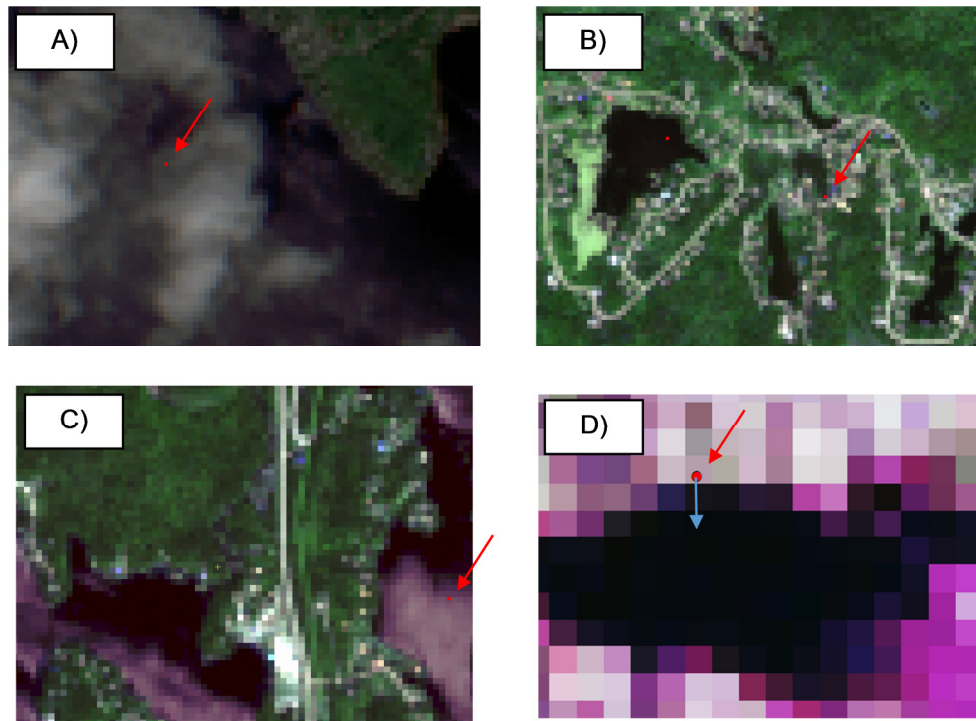


Figure 25. Cas de points de mesure particuliers rencontrés à la base de calibration : A) brume dense, B) pixel sur végétation, C) pixels sur les *Sun-glints* et D) pixels à la rive transposés de un à deux pixels. Les mesures des cas A) à C) ont été éliminées, les mesures du cas D) ont été gardées.

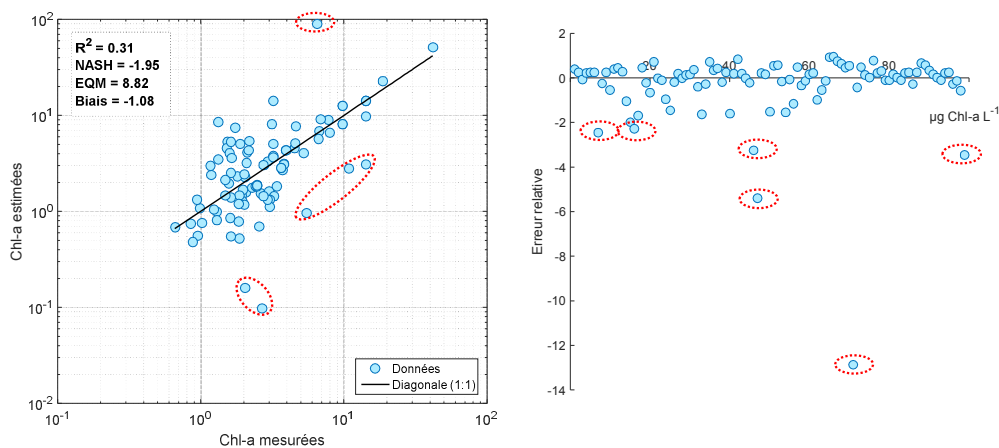


Figure 26. Concentration en chlorophylle-a estimée à partir du modèle basé sur la méthode de l'ensemble comparée aux mesures *in situ* collectées par le RSVL, avec les indices de performance statistique.

La Figure 26 montre le résultat de la validation avec les données du RSVL. Malgré les faibles valeurs des indices statistiques, particulièrement du NASH (< 0 qui suggèrent

que la moyenne des données *in situ* serait un meilleur estimateur que les estimations du MBME), il est clair qu'il existe une relation entre les concentrations en Chl-a estimées et celles mesurées, et que cette faible performance est probablement liée à quelques points influents (marqués avec des ellipses rouges sur la Figure 26). Cette hypothèse est confirmée par le graphique des erreurs relatives de la même figure, où il est remarqué que la grande majorité des erreurs relatives sont bien distribuées par rapport à l'axe zéro, ne montrant aucune tendance et comprises entre -2 et 2.

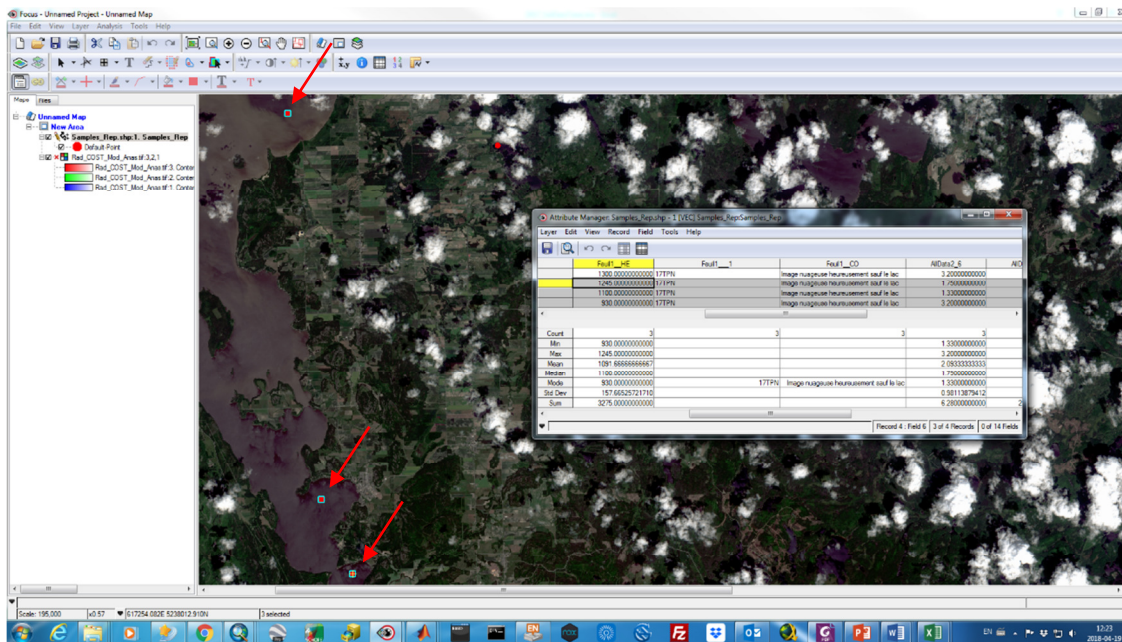


Figure 27. Localisation géographique de trois des points de mesures marqués à la Figure 26 collectés dans des conditions de turbidité intense; scène 177PN le 07/19/2016.

Après inspection visuelle des points marqués sur la Figure 26, il s'est avéré que quatre des six points ont été mesurés dans des eaux très turbides (Figure 27 et Figure 28). Il a ainsi été décidé d'éliminer ces quatre points pour une deuxième validation. La Figure 29 montre le résultat de la validation après élimination des mesures collectées dans les eaux turbides. Une nette amélioration de la modélisation est remarquée. Tous les indices d'évaluation se sont améliorés, particulièrement le NASH qui a passé de -1.95 à 0.79. Avec un tel NASH, la modélisation est considérée satisfaisante. Cela est également confirmé par le graphe des erreurs relatives, où la grande majorité des erreurs relatives est comprise entre -1 et 1. Il est important de prendre en considération que plus que 97% des concentrations de la base de validation du RSVL sont en bas de $10 \mu\text{g Chl-a L}^{-1}$ et plus que 91% sont en bas de $5 \mu\text{g Chl-a L}^{-1}$. La modélisation de la Chl-a dans ces conditions est extrêmement sensible. Ces propos sont confirmés par le *scatter-plot* des erreurs relatives, où une nette amélioration de modélisation est remarquée pour les plus fortes valeurs (extrémités droite). D'autre part, certes le modèle COST corrige une partie de l'effet de l'atmosphère sur le signal, mais une grande partie (liée aux aérosols, à la vapeur de l'eau et à l'ozone) ne l'est pas. Cela ajoute une nouvelle source d'erreurs non négligeable. De plus, les indices spectraux normalisés ont

été la solution pour effectuer le transfert de la modélisation vers les images Sentinel-2, mais en contrepartie, ils réduisent les rehaussements absolus. Ce facteur influence la qualité de la calibration des modèles (*experts*), qui est souvent légèrement meilleure avec des différences absolues.

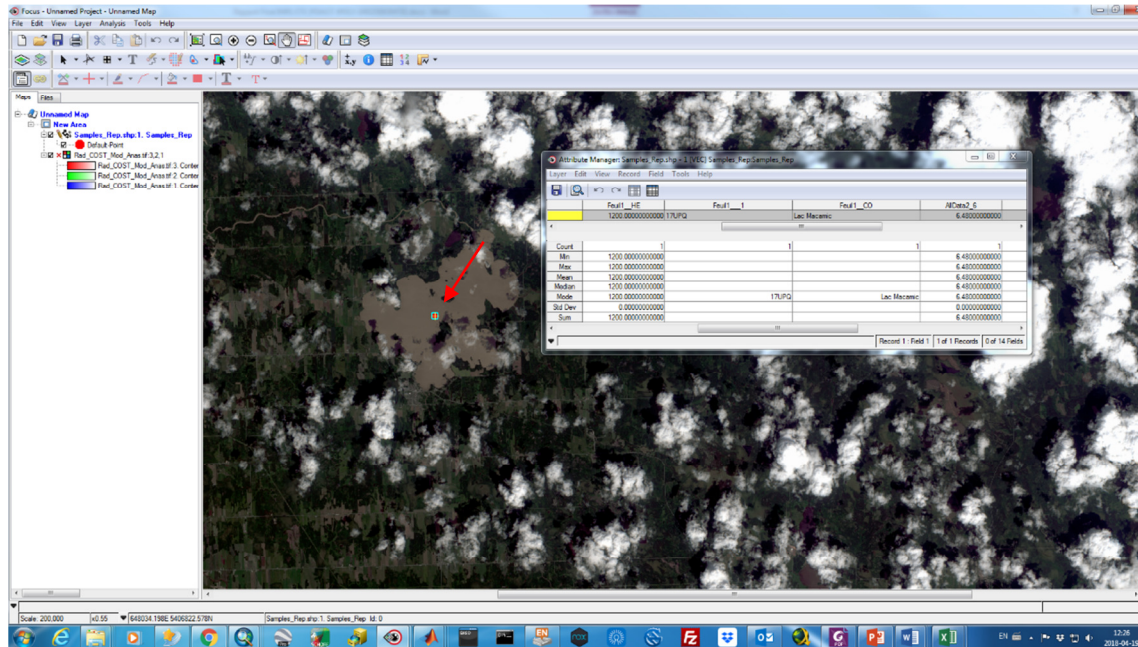


Figure 28. Localisation géographique de quatrième point de mesure marqué à la Figure 26 collectés dans des conditions de turbidité intense; scène 17UPQ le 07/19/2016.

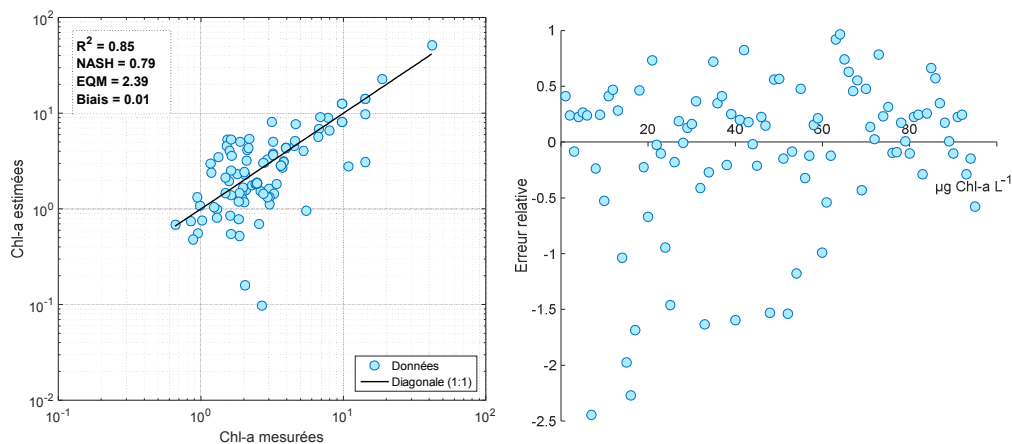


Figure 29. Concentration en chlorophylle-a estimée à partir du modèle basé sur la méthode de l'ensemble comparée aux mesures *in situ* collectées par le RSVL en éliminant les mesures des eaux turbides, avec les indices de performance des modèles.

5. Limites du MBME et recommandations

Certes télédétection offre plusieurs avantages, toutefois, cette technologie présente un certain nombre de faiblesses dont la plus influente est la présence des nuages. Dans ce cas, les images satellitaires sont souvent inexploitable. Cependant, en faible présence

de nuages ou de brumes sur la scène, l'estimation de la concentration en Chl-a demeure possible, mais elle doit être considérée avec précaution. Un masque E.T.N. est fourni avec le produit de concentration en Chl-a par l'outil d'automatisation développé au cours de ce projet. Cependant, comme tout produit de modélisation, l'algorithme dernier la production de ce masque est entaché d'erreurs. Ainsi, les brumes moins denses et/ou les ombres de nuages ne sont souvent pas masquées. En présence de ce type de problématique, la modélisation de la concentration en Chl-a peut-être erronée. En effet, en cas de présence de brumes, une quantité importante du signal solaire est retournée vers le capteur avant qu'elle atteigne les eaux de lacs. Ainsi, lors de la modélisation de la Chl-a sur un plan d'eau donné, le signal de retour est bruité par la quantité du signal retournée vers le satellite avant qu'elle enregistre les propriétés optiques apparentes de ce plan d'eau. Par conséquent, les concentrations en Chl-a modélisées sur ces régions sont influencées par le signal retourné des brumes plus que des propriétés optiques de l'eau. Une sur- ou sous-estimation de la concentration peut ainsi en résulter. *Il est ainsi fortement recommandé de procéder à une vérification visuelle, du composé en couleur vrai, dans de telles situations.*

Également, comme il a été démontré à la section précédente, les eaux turbides influencent significativement la qualité de la modélisation de la Chl-a. La performance du MBME est nettement plus faible. En effet, à la différence du MBME développé avec les données de MODIS et qui utilise des indices spectraux calculés à partir des aires sous les courbes spectrales, ce dernier utilise des indices spectraux normalisés. Les aires sous les courbes spectrales, particulièrement celle du visible, sont sensibles à la présence des eaux turbides et y sont inversement proportionnelles, alors qu'ils sont positivement proportionnelles à la présence de la Chl-a. Cette particularité a rendu possible la modélisation de la Chl-a, avec les données MODIS, même dans les eaux les plus turbides. Les indices spectraux normalisés utilisent seulement les différences de bandes. Les différences de bandes considérées par le présent MBME (entre le bleu et le vert), sont à la fois sensibles et à la Chl-a et à la turbidité. De ce fait, la confusion entre les deux éléments est présente. *Le développement d'un algorithme de discrimination des eaux turbides est alors fortement recommandée pour une meilleure utilisation du MBME.*

6. Développement d'une interface graphique pour l'utilisateur

L'objectif principal de cette interface graphique est la production de la carte de la distribution spatiale de la Chl-a dans les lacs du Québec méridional visible à la résolution spatiale des capteurs Sentinel-2A et Sentinel-2B. Pour des fins d'installation de cet outil, le MCR_R2015b_win(46 ou 32)_installer.exe (dépendamment du type du système d'exploitation de la machine) est nécessaire. Une copie de cet exécutable est fournie avec le l'outil développé et est également téléchargeable gratuitement du site internet suivant : <https://www.mathworks.com/products/compiler/matlab-runtime.html>. La Figure 30 illustre la façon de la reconnaissance du type du système d'exploitation pour une machine donnée.

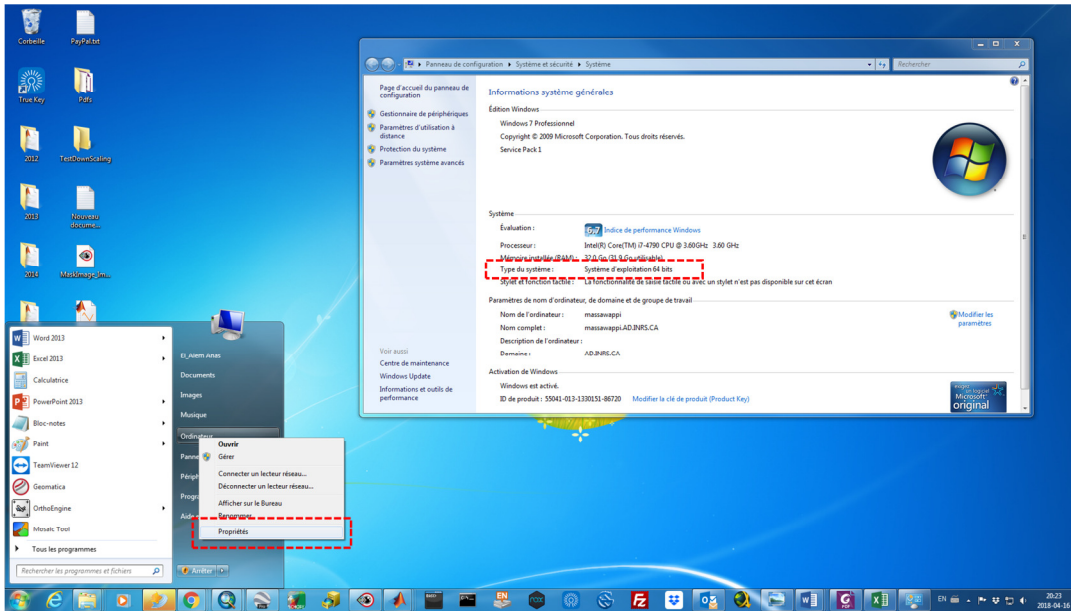


Figure 30. Détermination du type du système d'exploitation d'une machine.

L'interface graphique pour l'utilisateur (ou *Graphical User Interface (GUI)* en anglais) de l'outil développé est subdivisée en deux sections (Figure 31) :

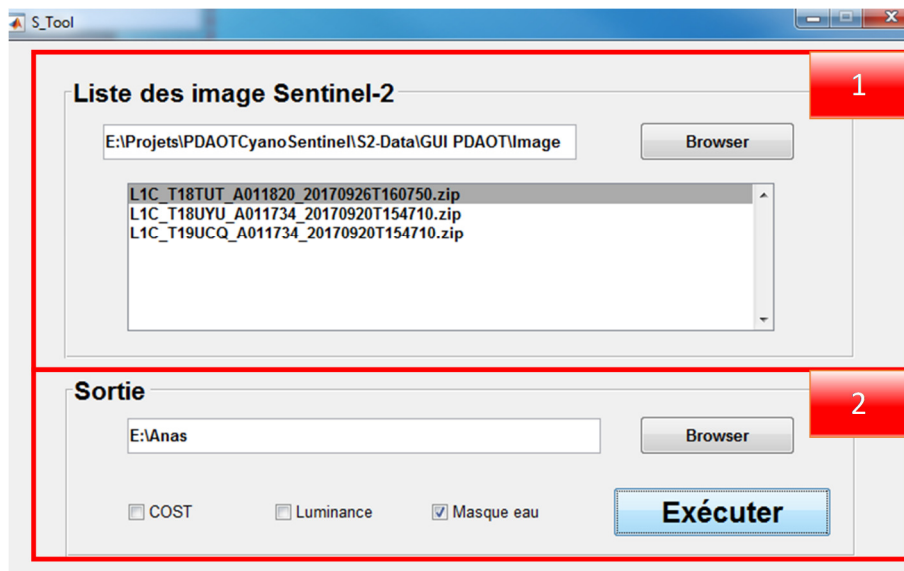


Figure 31. Différents panneaux de l'outil

6.1. Liste des images Sentinel-2

Cette section est composée d'un «*Browser*» et d'une liste déroulable. Au moyen du browser il est possible d'aller chercher les images Sentinel-2, préalablement téléchargées, d'un dossier donné sur la machine. Les images Sentinel-2 sont gratuitement téléchargeables du serveur de l'USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Une fois au dossier, la liste des images disponibles dans ce dernier sera affichée dans la liste déroulable, telle qu'illustrée dans l'exemple de la Figure 31.

6.2. Les sorties

Cette section est également composée d'un «Browser», de trois «Check-points» et d'un bouton d'exécution. Le browser permet de préciser le chemin de la sortie des cartes produites. Il est possible de traiter une ou plusieurs images. L'image traitée sera exportée en format .geotiff dans un dossier portant son nom d'origine. Si l'utilisateur ne coche aucun des Check-points, la carte produite sera celle de la concentration en Chl-a non masquée (ni avec le masque d'eau ni de nuage). En cochant un ou plusieurs Check-points, en plus de la carte de la concentration en Chl-a, la ou les produits cochés seront également traités et exportés en format .geotiff dans le dossier image. Le Check-point «COST» permet d'exporter les bandes 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 8A et 11 à 20 m de résolution spatiale après leur correction atmosphérique avec le modèle COST_{Mod}. Le Check-point «Luminance» permet d'exporter les mêmes bandes à la même résolution spatiale, mais en luminance. Finalement, le Check-point «Masque» permet d'exporter le masque eau et de nuage généré à partir de l'image elle-même.

7. Conclusions

Le but de cette étude était de transposer le concept méthodologique (modèle basé sur les méthodes d'ensemble (MBME)) développé avec les données MODIS vers les données Sentinel-2 simulées, à partir des caméras hyperspectrales abord du drone, et agrégées à 20 m de résolution spatiale pour le suivi des FEA dans les plans d'eaux douces du Québec méridional. Pour ce faire, trois campagnes de mesures ont été programmées au cours de l'été 2017. Collecter les paramètres de la qualité de l'eau de trois lacs (baie Missisquoi du lac Champlain et les lacs Brome et Magog) et imager ces lacs via des caméras hyperspectrales embarquées sur un drone au moment de la prise des mesures étaient les deux principaux objectifs des trois campagnes de mesures. L'utilisation de ces deux sources de données a permis la calibration d'un MBME basé sur données hyperspectrales simulées et agrégés à la résolution spatiale de Sentinel-2.

Trois validations principales ont été effectuées lors de ce projet : 1) validation des données simulées et agrégées à la résolution spatiale de Sentinel-2 en termes de luminance et de réflectance. Les indices d'évaluation statistique ont démontré une grande similitude, en termes de la luminance et de la réflectance, entre les images simulées et agrégées et les images Sentinel-2, particulièrement pour le critère du NASH qui était de l'ordre de 0.99 pour les deux, 2) validation-croisée de la concentration en Chl-a. Cette dernière était satisfaisante avec un $R^2 = 0.94$, un critère de NASH = 0.93, démontrant la précision des estimées en Chl-a avec les images drones simulées et agrégées à 20 m et 3) validation par des données indépendantes basée sur les estimées en Chl-a des images Sentinel-2. Les résultats de cette validation ont mis en évidence la faiblesse du MBME à produire des estimées de qualité de la concentration en Chl-a en présence des eaux turbides. Cependant, les indices d'évaluation statistiques ont été satisfaisants, en dehors des eaux turbides, avec un $R^2 = 0.85$ et un critère de NASH = 0.79.







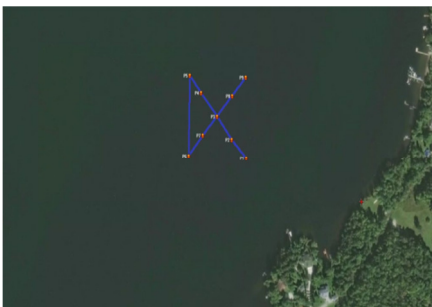


Une fois calibré et validé le MBME a été intégré dans un outil, sous format GUI (*Graphical User Interface*), exécutable sur n'importe quelle machine. L'outil développé a pour but d'automatiser l'ensemble des procédures de prétraitements et de traitements des images Sentinel-2. Avec cet outil, détecter les zones problématiques serait plus rapide pour un aussi large territoire que le Québec, laissant ainsi une importante marge de manœuvre aux décideurs. Cette interface graphique peut servir d'un système d'alerte de pointe à la présence des FEA mettant à disposition la technologie satellitaire entre les mains des décideurs ou tous autres organismes ou personnes s'intéressant à ce phénomène.

Cependant, la présence de nuages empêche l'utilisation des images satellites, tandis qu'en présence des brumes les estimées en Chl-a doivent être considérées avec précaution. Ce dernier problème peut toutefois être contourné par une inspection visuelle des images en pseudo-couleur ou par un suivi temporel de la concentration en Chl-a du plan en question. En contrepartie, considérant le fait que l'ensoleillement figure parmi les causes qui stimulent le développement des cyanobactéries (donc en conditions où les nuages sont moins présents), l'utilisation des données de télédétection demeurerait très avantageuse.

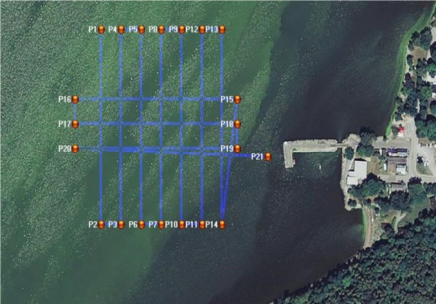


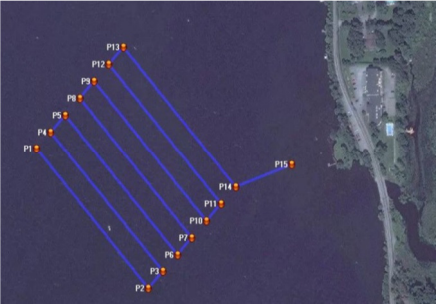


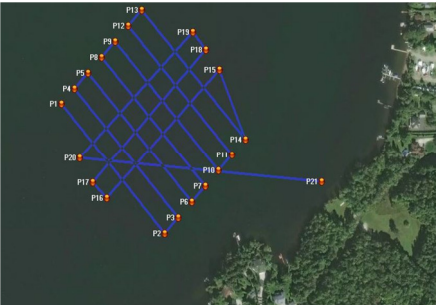


Référence :

1. Bresciani, M., et al., *Recognizing harmful algal bloom based on remote sensing reflectance band ratio*. Journal of Applied Remote Sensing, 2011. **5**(1): p. 053556-053556-9.
2. El-Alem, A., et al., *An Adaptive Model to Monitor Chlorophyll-a in Inland Waters in Southern Quebec Using Downscaled MODIS Imagery*. Remote Sensing, 2014. **6**(7): p. 6446-6471.
3. Lyu, H., et al., *Retrieval of phycocyanin concentration from remote-sensing reflectance using a semi-analytic model in eutrophic lakes*. Ecological Informatics, 2013. **18**(0): p. 178-187.
4. Yu, G., et al., *Remote Estimation of Chlorophyll-a in Inland Waters by a NIR-Red-Based Algorithm: Validation in Asian Lakes*. Remote Sensing, 2014. **6**(4): p. 3492-3510.
5. El-Alem, A., et al. *An ensemble based system for Chlorophyll-a estimation using MODIS imagery over Southern Quebec inland waters*. in *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2014.
6. Blonski, S., et al., *Synthesis of Multispectral Bands from Hyperspectral Data: Validation Based on Images Acquired by AVIRIS, Hyperion, ALI, and ETM+*. 2003.
7. Chavez, P.S., *Image-based atmospheric corrections-revisited and improved*. Photogrammetric engineering and remote sensing, 1996. **62**(9): p. 1025-1035.
8. Chavez, P.S., *An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data*. Remote sensing of environment, 1988. **24**(3): p. 459-479.
9. Moran, M.S., et al., *Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output*. Remote Sensing of Environment, 1992. **41**(2-3): p. 169-184.
10. Polikar, R., *Ensemble based systems in decision making*. IEEE Circuits and Systems Magazine, 2006. **6**(3): p. 21-45.
11. Hodjaty, M.M., M.R. Saradjian, and S. Jamshidi, *Chlorophyll – a Estimation in Sefidrud Estuarine Using MODIS Images*, in *FIG Congress 2010*. 2010: Sydney, Australia. p. 11.
12. Tørvi, H. and T. Hertzberg, *Estimation of uncertainty in dynamic simulation results*. Computers & Chemical Engineering, 1997. **21**, **Supplement**(0): p. S181-S185.
13. Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe, *River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles*. Journal of Hydrology, 1970. **10**(3): p. 282-290.

Annexe A. Positions des points d'échantillonnage pour les trois campagnes de terrain réalisées sur les trois lacs sélectionnés.

	Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3
Baie Missisquoi	 <p>Distance par rapport à la rive : 260 m</p>	 <p>Distance par rapport à la rive : 120 m</p>	 <p>Distance par rapport à la rive : 120 m</p>
Lac Brome	 <p>Distance par rapport à la rive : 240 m</p>	 <p>Distance par rapport à la rive : 230 m</p>	 <p>Distance par rapport à la rive : 120 m</p>
Lac Magog	 <p>Distance par rapport à la rive : 240 m</p>	 <p>Distance par rapport à la rive : 180 m</p>	 <p>Distance par rapport à la rive : 120 m</p>

Annexe B. Positions avec nombre de points des lignes de vol du drone pour les trois campagnes de terrain sur les lacs sélectionnés.

	Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3
Baie Missisquoi	 <p>Distance par rapport à la rive : 260 m</p>	 <p>Distance par rapport à la rive : 120 m</p>	 <p>Distance par rapport à la rive : 120 m</p>
Lac Brome	 <p>Distance par rapport à la rive : 240 m</p>	 <p>Distance par rapport à la rive : 230 m</p>	 <p>Distance par rapport à la rive : 230 m</p>
Lac Magog	 <p>Distance par rapport à la rive : 240 m</p>	 <p>Distance par rapport à la rive : 180 m</p>	 <p>Distance par rapport à la rive : 180 m</p>

Annexe C. Caractéristiques techniques des lignes de vol du drone pour les trois campagnes de terrain sur les trois lacs sélectionnés

Baie Missisquoi		Campagne 1	Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude
			1	0	10	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.0410683	-73.0831347
			2	0	10	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.0389085	-73.0831347
			3	0	10	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.0389085	-73.0827526
			4	0	10	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.0410684	-73.0827525
			5	0	10	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.0410684	-73.0823704
			6	0	10	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.0389086	-73.0823704
			7	0	10	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.0389086	-73.0819883
			8	0	10	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.0410685	-73.0819882
			9	0	10	100	7	20	100	P9	52	--	P	45.0410685	-73.0816966
			10	0	10	100	7	20	100	P10	52	--	P	45.0389087	-73.0816966
			11	0	10	100	7	20	100	P11	52	--	P	45.0390777	-73.0812241
			12	0	10	100	7	20	100	P12	52	--	P	45.0410686	-73.0812249
			13	0	10	100	7	20	100	P13	52	--	P	45.0410686	-73.0809419
			14	0	10	100	7	20	100	P14	52	--	P	45.0410687	-73.0809419
			15	0	10	100	7	20	100	P15	52	--	P	45.0410687	-73.0806589
			16	0	10	100	7	20	100	P16	52	--	P	45.0410688	-73.0806589
			17	0	10	100	7	20	100	P17	52	--	P	45.0397551	-73.0806589
			18	0	10	100	7	20	100	P18	52	--	P	45.0397552	-73.0806589
			19	0	10	100	7	20	100	P19	52	--	P	45.0397552	-73.0803766
			20	0	10	100	7	20	100	P20	52	--	P	45.0397552	-73.0803766
			21	0	10	100	7	20	100	P21	52	--	P	45.0396581	-73.0798821
			22	0	10	100	7	20	100	P22	52	--	P	45.0396581	-73.0798821
Baie Missisquoi		Campagne 2	Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude
			1	0	8	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.0386426	-73.0808189
			2	0	8	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.0418508	-73.0801807
			3	0	8	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.0418884	-73.0805591
			4	0	8	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.0386802	-73.0811972
			5	0	8	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.0387178	-73.0815795
			6	0	8	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.0419261	-73.0809374
			7	0	8	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.0419637	-73.0813157
			8	0	8	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.0387555	-73.0819537
			9	0	8	100	7	20	25	P8	52	--	P	45.0386582	-73.0803857
Baie Missisquoi		Campagne 3	Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude
			1	0	8	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.0386426	-73.0808189
			2	0	8	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.0418508	-73.0801807
			3	0	8	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.0418884	-73.0805591
			4	0	8	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.0386802	-73.0811972
			5	0	8	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.0387178	-73.0815795
			6	0	8	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.0419261	-73.0809374
			7	0	8	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.0419637	-73.0813157
			8	0	8	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.0387555	-73.0819537
			9	0	8	100	7	20	25	P8	52	--	P	45.0386582	-73.0803857

Lac Brome	Campagne 1	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr.</th> <th>Heure</th> <th>Radius</th> <th>WP-Event</th> <th>AutoT...</th> <th>Climb rate</th> <th>Altitude</th> <th>Orientation</th> <th>Speed</th> <th>CAM-Nick</th> <th>Prefix</th> <th>Latitude</th> <th>Longitude</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>0</td><td>20</td><td>100</td><td>P1</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2687785</td><td>-72.5042438</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P2</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2672248</td><td>-72.502112</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P3</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2674124</td><td>-72.501836</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P4</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2689661</td><td>-72.5039677</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P5</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.268163</td><td>-72.5002316</td></tr> <tr><td>6</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P6</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2697167</td><td>-72.5028634</td></tr> <tr><td>7</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P7</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2694043</td><td>-72.5025874</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P8</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2683507</td><td>-72.5004555</td></tr> <tr><td>9</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P9</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2693873</td><td>-72.4993842</td></tr> </tbody> </table>	Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude	1	0	10	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.2687785	-72.5042438	2	0	10	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.2672248	-72.502112	3	0	10	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.2674124	-72.501836	4	0	10	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.2689661	-72.5039677	5	0	10	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.268163	-72.5002316	6	0	10	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.2697167	-72.5028634	7	0	10	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.2694043	-72.5025874	8	0	10	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.2683507	-72.5004555	9	0	10	100	7	20	100	P9	52	--	P	45.2693873	-72.4993842
	Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude																																																																																																																							
	1	0	10	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.2687785	-72.5042438																																																																																																																							
2	0	10	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.2672248	-72.502112																																																																																																																								
3	0	10	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.2674124	-72.501836																																																																																																																								
4	0	10	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.2689661	-72.5039677																																																																																																																								
5	0	10	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.268163	-72.5002316																																																																																																																								
6	0	10	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.2697167	-72.5028634																																																																																																																								
7	0	10	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.2694043	-72.5025874																																																																																																																								
8	0	10	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.2683507	-72.5004555																																																																																																																								
9	0	10	100	7	20	100	P9	52	--	P	45.2693873	-72.4993842																																																																																																																								
Campagne 2	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr.</th> <th>Heure</th> <th>Radius</th> <th>WP-Event</th> <th>AutoT...</th> <th>Climb rate</th> <th>Altitude</th> <th>Orientation</th> <th>Speed</th> <th>CAM-Nick</th> <th>Prefix</th> <th>Latitude</th> <th>Longitude</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>0</td><td>20</td><td>100</td><td>P1</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2678496</td><td>-72.5006912</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P2</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2710578</td><td>-72.5000505</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P3</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2710954</td><td>-72.5004303</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P4</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2678872</td><td>-72.5010708</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P5</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2679248</td><td>-72.5014307</td></tr> <tr><td>6</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P6</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2711331</td><td>-72.50081</td></tr> <tr><td>7</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P7</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2711707</td><td>-72.5011899</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P8</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2679628</td><td>-72.5018304</td></tr> <tr><td>9</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P9</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2697253</td><td>-72.4993822</td></tr> </tbody> </table>	Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude	1	0	8	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.2678496	-72.5006912	2	0	8	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.2710578	-72.5000505	3	0	8	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.2710954	-72.5004303	4	0	8	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.2678872	-72.5010708	5	0	8	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.2679248	-72.5014307	6	0	8	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.2711331	-72.50081	7	0	8	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.2711707	-72.5011899	8	0	8	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.2679628	-72.5018304	9	0	8	100	7	20	100	P9	52	--	P	45.2697253	-72.4993822	
Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude																																																																																																																								
1	0	8	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.2678496	-72.5006912																																																																																																																								
2	0	8	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.2710578	-72.5000505																																																																																																																								
3	0	8	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.2710954	-72.5004303																																																																																																																								
4	0	8	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.2678872	-72.5010708																																																																																																																								
5	0	8	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.2679248	-72.5014307																																																																																																																								
6	0	8	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.2711331	-72.50081																																																																																																																								
7	0	8	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.2711707	-72.5011899																																																																																																																								
8	0	8	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.2679628	-72.5018304																																																																																																																								
9	0	8	100	7	20	100	P9	52	--	P	45.2697253	-72.4993822																																																																																																																								
Campagne 3	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr.</th> <th>Heure</th> <th>Radius</th> <th>WP-Event</th> <th>AutoT...</th> <th>Climb rate</th> <th>Altitude</th> <th>Orientation</th> <th>Speed</th> <th>CAM-Nick</th> <th>Prefix</th> <th>Latitude</th> <th>Longitude</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>0</td><td>20</td><td>100</td><td>P1</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2678496</td><td>-72.5006912</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P2</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2710578</td><td>-72.5000505</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P3</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2710954</td><td>-72.5004303</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P4</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2678872</td><td>-72.5010708</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P5</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2679248</td><td>-72.5014307</td></tr> <tr><td>6</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P6</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2711331</td><td>-72.50081</td></tr> <tr><td>7</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P7</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2711707</td><td>-72.5011899</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P8</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2679628</td><td>-72.5018304</td></tr> <tr><td>9</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P9</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.2697253</td><td>-72.4993822</td></tr> </tbody> </table>	Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude	1	0	8	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.2678496	-72.5006912	2	0	8	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.2710578	-72.5000505	3	0	8	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.2710954	-72.5004303	4	0	8	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.2678872	-72.5010708	5	0	8	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.2679248	-72.5014307	6	0	8	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.2711331	-72.50081	7	0	8	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.2711707	-72.5011899	8	0	8	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.2679628	-72.5018304	9	0	8	100	7	20	100	P9	52	--	P	45.2697253	-72.4993822	
Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude																																																																																																																								
1	0	8	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.2678496	-72.5006912																																																																																																																								
2	0	8	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.2710578	-72.5000505																																																																																																																								
3	0	8	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.2710954	-72.5004303																																																																																																																								
4	0	8	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.2678872	-72.5010708																																																																																																																								
5	0	8	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.2679248	-72.5014307																																																																																																																								
6	0	8	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.2711331	-72.50081																																																																																																																								
7	0	8	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.2711707	-72.5011899																																																																																																																								
8	0	8	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.2679628	-72.5018304																																																																																																																								
9	0	8	100	7	20	100	P9	52	--	P	45.2697253	-72.4993822																																																																																																																								

Lac Magog	Campagne 1	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr.</th> <th>Heure</th> <th>Radius</th> <th>WP-Event</th> <th>AutoT...</th> <th>Climb rate</th> <th>Altitude</th> <th>Orientation</th> <th>Speed</th> <th>CAM-Nick</th> <th>Prefix</th> <th>Latitude</th> <th>Longitude</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>0</td><td>20</td><td>100</td><td>P1</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3243932</td><td>-72.029166</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P2</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3228395</td><td>-72.0270321</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P3</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3230271</td><td>-72.0267558</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P4</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3245808</td><td>-72.0288996</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P5</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3247685</td><td>-72.0286133</td></tr> <tr><td>6</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P6</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3232148</td><td>-72.0264793</td></tr> <tr><td>7</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P7</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3234024</td><td>-72.026203</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P8</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3249561</td><td>-72.0283368</td></tr> <tr><td>9</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P9</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3251437</td><td>-72.0280685</td></tr> <tr><td>10</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P10</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3235901</td><td>-72.0258285</td></tr> <tr><td>11</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P11</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3237777</td><td>-72.0256502</td></tr> <tr><td>12</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P12</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3233315</td><td>-72.027784</td></tr> <tr><td>13</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P13</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3235318</td><td>-72.0275777</td></tr> <tr><td>14</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P14</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3233337</td><td>-72.0253337</td></tr> <tr><td>15</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P15</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3234024</td><td>-72.0251151</td></tr> <tr><td>16</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P16</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3233337</td><td>-72.0251151</td></tr> <tr><td>17</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P17</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3233337</td><td>-72.0251151</td></tr> <tr><td>18</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P18</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3233337</td><td>-72.0251151</td></tr> <tr><td>19</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P19</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3233337</td><td>-72.0251151</td></tr> <tr><td>20</td><td>0</td><td>10</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P20</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3233337</td><td>-72.0251151</td></tr> </tbody> </table>	Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude	1	0	10	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.3243932	-72.029166	2	0	10	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.3228395	-72.0270321	3	0	10	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.3230271	-72.0267558	4	0	10	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.3245808	-72.0288996	5	0	10	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.3247685	-72.0286133	6	0	10	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.3232148	-72.0264793	7	0	10	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.3234024	-72.026203	8	0	10	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.3249561	-72.0283368	9	0	10	100	7	20	100	P9	52	--	P	45.3251437	-72.0280685	10	0	10	100	7	20	100	P10	52	--	P	45.3235901	-72.0258285	11	0	10	100	7	20	100	P11	52	--	P	45.3237777	-72.0256502	12	0	10	100	7	20	100	P12	52	--	P	45.3233315	-72.027784	13	0	10	100	7	20	100	P13	52	--	P	45.3235318	-72.0275777	14	0	10	100	7	20	100	P14	52	--	P	45.3233337	-72.0253337	15	0	10	100	7	20	100	P15	52	--	P	45.3234024	-72.0251151	16	0	10	100	7	20	100	P16	52	--	P	45.3233337	-72.0251151	17	0	10	100	7	20	100	P17	52	--	P	45.3233337	-72.0251151	18	0	10	100	7	20	100	P18	52	--	P	45.3233337	-72.0251151	19	0	10	100	7	20	100	P19	52	--	P	45.3233337	-72.0251151	20	0	10	100	7	20	100	P20	52	--	P	45.3233337	-72.0251151
	Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude																																																																																																																																																																																																																																																																						
	1	0	10	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.3243932	-72.029166																																																																																																																																																																																																																																																																						
2	0	10	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.3228395	-72.0270321																																																																																																																																																																																																																																																																							
3	0	10	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.3230271	-72.0267558																																																																																																																																																																																																																																																																							
4	0	10	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.3245808	-72.0288996																																																																																																																																																																																																																																																																							
5	0	10	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.3247685	-72.0286133																																																																																																																																																																																																																																																																							
6	0	10	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.3232148	-72.0264793																																																																																																																																																																																																																																																																							
7	0	10	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.3234024	-72.026203																																																																																																																																																																																																																																																																							
8	0	10	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.3249561	-72.0283368																																																																																																																																																																																																																																																																							
9	0	10	100	7	20	100	P9	52	--	P	45.3251437	-72.0280685																																																																																																																																																																																																																																																																							
10	0	10	100	7	20	100	P10	52	--	P	45.3235901	-72.0258285																																																																																																																																																																																																																																																																							
11	0	10	100	7	20	100	P11	52	--	P	45.3237777	-72.0256502																																																																																																																																																																																																																																																																							
12	0	10	100	7	20	100	P12	52	--	P	45.3233315	-72.027784																																																																																																																																																																																																																																																																							
13	0	10	100	7	20	100	P13	52	--	P	45.3235318	-72.0275777																																																																																																																																																																																																																																																																							
14	0	10	100	7	20	100	P14	52	--	P	45.3233337	-72.0253337																																																																																																																																																																																																																																																																							
15	0	10	100	7	20	100	P15	52	--	P	45.3234024	-72.0251151																																																																																																																																																																																																																																																																							
16	0	10	100	7	20	100	P16	52	--	P	45.3233337	-72.0251151																																																																																																																																																																																																																																																																							
17	0	10	100	7	20	100	P17	52	--	P	45.3233337	-72.0251151																																																																																																																																																																																																																																																																							
18	0	10	100	7	20	100	P18	52	--	P	45.3233337	-72.0251151																																																																																																																																																																																																																																																																							
19	0	10	100	7	20	100	P19	52	--	P	45.3233337	-72.0251151																																																																																																																																																																																																																																																																							
20	0	10	100	7	20	100	P20	52	--	P	45.3233337	-72.0251151																																																																																																																																																																																																																																																																							
	Campagne 2	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr.</th> <th>Heure</th> <th>Radius</th> <th>WP-Event</th> <th>AutoT...</th> <th>Climb rate</th> <th>Altitude</th> <th>Orientation</th> <th>Speed</th> <th>CAM-Nick</th> <th>Prefix</th> <th>Latitude</th> <th>Longitude</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>0</td><td>20</td><td>100</td><td>P1</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3235769</td><td>-72.0247389</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P2</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3267768</td><td>-72.0240181</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P3</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3268191</td><td>-72.0243973</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P4</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3236193</td><td>-72.0251181</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P5</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3236616</td><td>-72.0254973</td></tr> <tr><td>6</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P6</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3268615</td><td>-72.0247763</td></tr> <tr><td>7</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P7</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3269038</td><td>-72.0251556</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P8</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.323704</td><td>-72.0258764</td></tr> <tr><td>9</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>25</td><td>P8</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3235015</td><td>-72.0242453</td></tr> </tbody> </table>	Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude	1	0	8	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.3235769	-72.0247389	2	0	8	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.3267768	-72.0240181	3	0	8	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.3268191	-72.0243973	4	0	8	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.3236193	-72.0251181	5	0	8	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.3236616	-72.0254973	6	0	8	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.3268615	-72.0247763	7	0	8	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.3269038	-72.0251556	8	0	8	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.323704	-72.0258764	9	0	8	100	7	20	25	P8	52	--	P	45.3235015	-72.0242453																																																																																																																																															
Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude																																																																																																																																																																																																																																																																							
1	0	8	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.3235769	-72.0247389																																																																																																																																																																																																																																																																							
2	0	8	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.3267768	-72.0240181																																																																																																																																																																																																																																																																							
3	0	8	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.3268191	-72.0243973																																																																																																																																																																																																																																																																							
4	0	8	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.3236193	-72.0251181																																																																																																																																																																																																																																																																							
5	0	8	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.3236616	-72.0254973																																																																																																																																																																																																																																																																							
6	0	8	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.3268615	-72.0247763																																																																																																																																																																																																																																																																							
7	0	8	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.3269038	-72.0251556																																																																																																																																																																																																																																																																							
8	0	8	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.323704	-72.0258764																																																																																																																																																																																																																																																																							
9	0	8	100	7	20	25	P8	52	--	P	45.3235015	-72.0242453																																																																																																																																																																																																																																																																							
	Campagne 3	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nr.</th> <th>Heure</th> <th>Radius</th> <th>WP-Event</th> <th>AutoT...</th> <th>Climb rate</th> <th>Altitude</th> <th>Orientation</th> <th>Speed</th> <th>CAM-Nick</th> <th>Prefix</th> <th>Latitude</th> <th>Longitude</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>0</td><td>20</td><td>100</td><td>P1</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3235769</td><td>-72.0247389</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P2</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3267768</td><td>-72.0240181</td></tr> <tr><td>3</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P3</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3268191</td><td>-72.0243973</td></tr> <tr><td>4</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P4</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3236193</td><td>-72.0251181</td></tr> <tr><td>5</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P5</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3236616</td><td>-72.0254973</td></tr> <tr><td>6</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P6</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3268615</td><td>-72.0247763</td></tr> <tr><td>7</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P7</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3269038</td><td>-72.0251556</td></tr> <tr><td>8</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>100</td><td>P8</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.323704</td><td>-72.0258764</td></tr> <tr><td>9</td><td>0</td><td>8</td><td>100</td><td>7</td><td>20</td><td>25</td><td>P8</td><td>52</td><td>--</td><td>P</td><td>45.3235015</td><td>-72.0242453</td></tr> </tbody> </table>	Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude	1	0	8	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.3235769	-72.0247389	2	0	8	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.3267768	-72.0240181	3	0	8	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.3268191	-72.0243973	4	0	8	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.3236193	-72.0251181	5	0	8	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.3236616	-72.0254973	6	0	8	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.3268615	-72.0247763	7	0	8	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.3269038	-72.0251556	8	0	8	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.323704	-72.0258764	9	0	8	100	7	20	25	P8	52	--	P	45.3235015	-72.0242453																																																																																																																																															
Nr.	Heure	Radius	WP-Event	AutoT...	Climb rate	Altitude	Orientation	Speed	CAM-Nick	Prefix	Latitude	Longitude																																																																																																																																																																																																																																																																							
1	0	8	100	0	20	100	P1	52	--	P	45.3235769	-72.0247389																																																																																																																																																																																																																																																																							
2	0	8	100	7	20	100	P2	52	--	P	45.3267768	-72.0240181																																																																																																																																																																																																																																																																							
3	0	8	100	7	20	100	P3	52	--	P	45.3268191	-72.0243973																																																																																																																																																																																																																																																																							
4	0	8	100	7	20	100	P4	52	--	P	45.3236193	-72.0251181																																																																																																																																																																																																																																																																							
5	0	8	100	7	20	100	P5	52	--	P	45.3236616	-72.0254973																																																																																																																																																																																																																																																																							
6	0	8	100	7	20	100	P6	52	--	P	45.3268615	-72.0247763																																																																																																																																																																																																																																																																							
7	0	8	100	7	20	100	P7	52	--	P	45.3269038	-72.0251556																																																																																																																																																																																																																																																																							
8	0	8	100	7	20	100	P8	52	--	P	45.323704	-72.0258764																																																																																																																																																																																																																																																																							
9	0	8	100	7	20	25	P8	52	--	P	45.3235015	-72.0242453																																																																																																																																																																																																																																																																							

Annexe D. Résumé des heures des prises des échantillons par le RSVL et les heures de passage de Sentinel-2.

Données	Date	Heure des échantillons	Heure passage Sentinel-2	POINT_X	POINT_Y
1	2016-07-19	13:00:00	16:28:00	-79.32669999980	47.51540000020
2	2016-07-19	12:45:00	16:28:00	-79.44941999960	47.28510000000
3	2016-07-19	11:00:00	16:28:00	-79.49370000020	47.53475000040
4	2016-07-19	09:30:00	16:28:00	-79.47293000010	47.32555000010
5	2016-07-26	13:15:00	16:15:00	-79.29500000020	47.72777999960
s6	2016-07-19	12:00:00	16:28:00	-78.98422000020	48.79675999960
7	2016-07-19	10:35:00	16:28:00	-78.86838999970	48.33425999960
8	2016-08-22	13:10:00	16:01:00	-75.68494999990	45.59172000020
9	2016-08-22	10:30:00	16:01:00	-75.98136000020	45.71618000020
10	2016-08-22	11:20:00	16:01:00	-75.55074000000	46.45088999960
11	2016-08-22	15:10:00	16:01:00	-75.53549000000	46.62338999990
12	2016-08-29	*****	15:51:00	-74.03713999990	45.88272000000
13	2016-08-29	11:00:00	15:51:00	-74.04516000010	45.94975999970
14	2016-08-22	14:55:00	16:01:00	-74.56098000020	45.94404000030
15	2016-08-22	10:15:00	16:01:00	-74.39455000010	45.86137000020
16	2016-08-22	08:30:00	16:01:00	-74.46507999970	45.86673000010
17	2016-07-20	10:00:00	15:53:00	-73.70107000000	46.04480000010
18	2016-08-22	15:15:00	16:01:00	-74.47995999980	46.21140000000
19	2016-08-22	09:15:00	16:01:00	-74.32232000030	46.17634999980
20	2016-08-22	10:15:00	16:01:00	-74.52365000000	46.17423999960
21	2016-08-22	07:30:00	16:01:00	-74.37653999960	46.16936999980
22	2016-08-22	09:00:00	16:01:00	-74.40510000010	46.13985999960
23	2016-08-22	11:30:00	16:01:00	-74.13391000000	46.27640999960
24	2016-08-22	11:15:00	16:01:00	-74.14663000030	46.29269999990
25	2016-08-29	11:00:00	15:51:00	-74.59105000020	46.17082999970
26	2016-08-29	08:15:00	15:51:00	-72.25162000040	48.12485000040
27	2016-08-23	10:05:00	15:36:00	-69.24117999980	47.46735000030
28	2016-08-23	10:38:00	15:36:00	-69.27959000030	47.51074000030
29	2016-08-23	09:05:00	15:36:00	-67.57872000040	48.40822999960
30	2016-08-23	10:45:00	15:36:00	-67.54506000040	48.55351999970
31	2016-08-23	10:15:00	15:36:00	-67.09357999960	48.47831999970
32	2016-08-23	10:01:00	15:36:00	-67.47785999960	48.53151000010
1	2017-07-30	10:35:00	15:55:00	-75.68494899990	45.59171800010
2	2017-07-30	14:30:00	15:55:00	-75.20492639960	45.72866140040
3	2017-07-30	11:30:00	15:55:00	-74.90186800020	45.98520400020
4	2017-07-30	12:15:00	15:55:00	-75.01961199990	46.29729999980
5	2017-07-30	16:00:00	15:55:00	-75.04499599960	46.19687729970
6	2017-07-30	15:00:00	15:55:00	-75.03206400040	46.21927099970
7	2017-07-30	14:15:00	15:55:00	-75.06065000020	46.54666000040
8	2017-07-30	15:42:00	15:55:00	-74.45485699960	45.82859200040
9	2017-07-30	10:30:00	15:55:00	-74.36402499990	45.69883399980
10	2017-07-30	12:30:00	15:55:00	-74.33895400020	45.74231200020
11	2017-07-30	01:30:00	15:55:00	-74.34137789980	45.74923460000
12	2017-07-30	13:20:00	15:55:00	-74.24071799990	45.77365200020
13	2017-07-30	14:00:00	15:55:00	-73.98328500030	45.88597499990
14	2017-07-30	13:45:00	15:55:00	-74.32675039970	45.73609849960
15	2017-07-30	10:30:00	15:55:00	-74.33469099970	45.75811999980
16	2017-07-30	16:30:00	15:55:00	-74.37328799980	45.85984199990
17	2017-07-30	14:13:00	15:55:00	-74.45474399970	45.87683400020
18	2017-07-30	14:00:00	15:55:00	-74.24738499980	45.76642899990
19	2017-07-30	10:45:00	15:55:00	-74.34989500030	45.88307800030
20	2017-07-30	14:30:00	15:55:00	-74.57333900000	45.87117099980

21	2017-07-30	14:00:00	15:55:00	-74.56098300040	45.94403610000
22	2017-07-30	14:40:00	15:55:00	-74.11669000000	45.84351999990
23	2017-07-30	12:15:00	15:55:00	-74.12383000020	45.80695600000
24	2017-07-30	12:00:00	15:55:00	-74.14598000000	45.86057999980
25	2017-07-30	02:00:00	15:55:00	-74.52580000030	45.77170000020
26	2017-07-30	10:30:00	15:55:00	-74.10843000040	45.84132000010
27	2017-07-30	12:50:00	15:55:00	-74.23849600000	45.76615099970
28	2017-07-30	10:30:00	15:55:00	-74.38286600000	45.72953800020
29	2017-07-30	15:00:00	15:55:00	-74.10126862340	46.00920934540
30	2017-07-30	14:30:00	15:55:00	-73.70106699980	46.04480000010
31	2017-07-30	13:00:00	15:55:00	-74.14146999970	45.83658000010
32	2017-07-30	12:30:00	15:55:00	-74.04907099970	46.08498399970
33	2017-07-30	16:25:00	15:55:00	-74.65859599980	46.35656199960
34	2017-07-30	16:00:00	15:55:00	-74.66981900020	46.35300000000
35	2017-07-30	11:30:00	15:55:00	-74.07823600020	46.10608899990
36	2017-07-30	11:30:00	15:55:00	-73.97027000000	46.06500000000
37	2017-07-30	10:40:00	15:55:00	-74.00777777810	46.07527777780
38	2017-07-30	11:00:00	15:55:00	-74.06711700000	46.08711099980
39	2017-07-30	19:00:00	15:55:00	-74.20271800030	46.12020099960
40	2017-07-30	10:45:00	15:55:00	-74.77182859990	46.43695630040
41	2017-07-30	23:00:00	15:55:00	-74.26087899980	46.12932799960
42	2017-07-30	11:30:00	15:55:00	-74.24077199970	46.13998199990
43	2017-07-30	14:15:00	15:55:00	-72.32758199960	45.24853000020
44	2017-07-30	20:30:00	15:55:00	-72.94480999970	46.55001100020
45	2017-07-30	13:45:00	15:55:00	-73.13044999990	46.60583333330
46	2017-07-30	12:00:00	15:55:00	-72.98733300010	46.57642100040
47	2017-07-30	11:30:00	15:55:00	-72.97118900030	46.57833699980
48	2017-07-30	14:00:00	15:55:00	-73.29728499980	46.39070300020
49	2017-07-30	14:00:00	15:55:00	-73.51318398970	46.38670767030
50	2017-07-30	10:00:00	15:55:00	-73.50485044000	46.38004095010
51	2017-07-30	11:00:00	15:55:00	-72.28985500000	46.83446600040
52	2017-07-30	10:45:00	15:55:00	-73.32106200000	46.37244199990
53	2017-07-30	10:50:00	15:55:00	-72.09062409970	46.82531419980
54	2017-07-30	17:00:00	15:55:00	-71.42309189960	47.02308749960
55	2017-07-30	17:00:00	15:55:00	-71.42253630020	47.02892070020
56	2017-07-30	12:30:00	15:55:00	-71.07517199980	48.62178100000
57	2017-07-30	11:30:00	15:55:00	-71.22456000000	48.30874000000
58	2017-07-30	10:15:00	15:55:00	-71.31803800040	48.30973099980
59	2017-07-30	16:30:00	15:55:00	-71.50689639980	48.34264999980
60	2017-07-30	12:20:00	15:55:00	-71.37107500000	48.33256799980
61	2017-07-30	12:00:00	15:55:00	-71.38835219960	48.57782259970
62	2017-07-30	20:00:00	15:55:00	-71.14427500020	48.65277600030