

APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION HAUTE RÉOLUTION SPATIALE POUR LE SUIVI PHYTOPLANCTONIQUE DU LÉMAN

CONTRIBUTION OF REMOTE SENSING IN PHYTOPLANKTON MONITORING

CAMPAGNE 2022

PAR

Mona BONNIER et Orlane ANNEVILLE

STATION D'HYDROBIOLOGIE LACUSTRE (UMR CARRTEL, INRA, USMB), CS 50511, FR - 74203 THONON-LES-BAINS Cedex

Tristan HARMEL

MAGELLIUM, EARTH OBSERVATION UNIT, TOULOUSE, FRANCE

RÉSUMÉ

De précédents travaux ont été effectués à partir de l'imagerie « moyenne résolution spatiale » (e.g., Sentinel-3 à 300m de résolution) pour cartographier l'hétérogénéité spatiale et les variations temporelles de la biomasse phytoplanctonique dans le Léman. Il est d'intérêt, pour un suivi plus fin de la distribution du phytoplancton et l'étude des impacts locaux, d'analyser l'imagerie « haute-résolution » de l'imagerie de la mission Sentinel-2 (ESA/Copernicus) à une résolution de 20 m. Ce rapport présente les résultats obtenus à partir de la chaîne de traitement OBS2CO du CNES et de la collecte de données in-situ pour analyser les performances des algorithmes actuels. Premièrement, les algorithmes les plus adaptés ont été sélectionnés et implémentés pour la production de séries temporelles de la concentration en chlorophylle-a. Ces données satellitaires ont ensuite été confrontées aux données provenant des mesures in-situ de diverses sources dont la station LÉXPLORE, la base de données OLA et des observations ponctuelles en 3 sites supplémentaires spécialement effectuées lors des dates de passage du satellite. Les algorithmes développés pour les eaux oligotrophes sont en général les plus performants, avec des corrélations significatives entre les mesures in-situ et satellitaires, mais ont parfois tendance à sous-estimer les concentrations en chlorophylle-a. Les résultats indiquent une forte influence des conditions optiques du milieu, ce qui peut expliquer les écarts notables entre observations in-situ et satellites. Étant donné que les conditions optiques varient dans l'espace et le temps, l'utilisation de Sentinel-2 pour un suivi régulier nécessitera un travail supplémentaire pour prendre en compte la variabilité spatio-temporelle des propriétés optiques de l'eau dans le calcul des concentrations en chlorophylle-a.

ABSTRACT

The work consisted in selecting and parametrizing the best adapted algorithms to improve the spatial resolution of Lake Geneva's water quality surveillance by satellite. The satellite data came from Sentinel-2 and the in-situ chlorophyll-a in-situ data were compiled based on a variety of sources, including LÉXPLORE, OLA, and occasional observations at three additional sites on satellite passage dates. The O'Reilly algorithms perform best, with highly significant correlations between in-situ and satellite measurements, but sometimes underestimate the chlorophyll-a concentrations. The results indicate a strong influence of the milieu's optical conditions, which may explain the notable deviations between in-situ and satellite observations. Given that optical conditions vary in space and time, use of Sentinel-2 for regular monitoring will require additional work taking into account the spatiotemporal variability of the optical properties of water in the calculation of chlorophyll-a concentrations.

1. INTRODUCTION

Le suivi de la qualité du Léman consiste en des mesures de variables environnementales utilisées pour estimer l'état écologique des écosystèmes aquatiques. Bien qu'indispensable à la compréhension et la gestion des milieux, ce type de suivi est limité par son protocole, n'apportant que peu d'information sur l'ensemble du plan d'eau et les variabilités spatiales et temporelles qui sont généralement importantes (Soulignac et al., 2019). La télédétection est une approche qui permettrait de répondre à ces limites avec l'essor des missions dédiées financées par les agences spatiales.

La présente étude s'inscrit dans l'objectif d'amélioration des méthodes et des outils utilisés pour le suivi du phytoplancton en développant des approches basées sur l'imagerie satellitaire « haute résolution spatiale » de l'ordre de vingt mètres. Cette étude fait suite à un travail réalisé en 2022 (Bonnier., 2022) qui portait sur la prise en compte de la verticalité du phytoplancton et son impact sur la représentativité des estimations satellites afin d'optimiser l'interprétation des images. Ce précédent travail a permis de valider et quantifier les performances de l'imagerie « moyenne résolution » (300 m) des deux satellites Sentinel-3 distribuée par le programme Datalakes et celui l'ESA Climate Change Initiative (CCI) pour l'estimation des concentrations en chlorophylle a (Chl-a) sur la période 2017 à 2021.

Néanmoins, ce précédent travail montre également que les sorties de Sentinel-3, bien qu'étant un outil très intéressant pour le suivi des lacs, présente des limites dans ses applications en raison de sa moindre résolution spatiale par rapport à Sentinel-2 (Tableau 1). D'après ces résultats, l'imagerie Sentinel-2 apparait comme un complément essentiel à l'imagerie Sentinel-3 pour l'observation des phénomènes littoraux ou de petites échelles. Sentinel-2 apparait donc mieux adapté pour identifier des dépôts d'efflorescences localisées ou surveiller des points sensibles du lac (zones de baignade, point de stations de pompages...). Cependant, l'étude avait également mis en lumière le besoin de paramétrer régionalement les algorithmes appliqués aux données Sentinel-2 pour le Léman.

C'est à ce besoin que répond la présente étude. Nous avons porté notre intérêt sur plusieurs paramètres clés, proxy de la biomasse phytoplanctonique et des facteurs qui régulent la production primaire : la transparence de l'eau avec le coefficient d'atténuation diffuse de la lumière (kd), le coefficient du rayonnement photosynthétique actif (RPA ou PAR en anglais pour *photosynthetically available radiation*) et les concentrations en Chl-a.

Une grande partie du travail a été dédiée au contrôle qualité et à harmoniser les différents jeux de données in-situ provenant de différentes stations de prélèvements pour ensuite les comparer aux données satellites Sentinel-2. Dans un deuxième temps, différents algorithmes et paramétrisations permettant d'estimer la Chl-a à l'aide des images satellites Sentinel-2 ont été testés et comparés aux différents jeux de données in-situ. Cette comparaison a permis de faire remonter la nécessité d'adapter les algorithmes en fonction des différents milieux du lac, influencés par d'autres paramètres optiques inhérents tel que le CDOM. Enfin un outil de visualisation de ces différents algorithmes a été mis en place pour faciliter l'accès aux résultats et à ce nouveau jeu de données satellitaires via des *Jupyter notebooks* pour l'analyse des structures spatiales du lac.

Tableau 1 : Description des instruments optiques Sentinel-2 et Sentinel-3

Table 1 : Description of the Sentinel-2 and Sentinel-3 optical instruments

Instrument	Résolution spectrale	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Précision radiométrique
OLCI (Sentinel-3)	21 bandes spectrales	300 m	2-3 jours	<2 %
MSI (Sentinel-2)	13 bandes spectrales	10, 20, 60 m	5 jours	<3 %

2. MATERIEL ET MÉTHODES

2.1. ACQUISITION DES DONNÉES

2.1.1. DONNÉES SATELLITAIRES : SENTINEL-2

Un ensemble de traitements a été appliqué aux images satellites pour estimer la réflectance de la colonne d'eau (R_{rs} , *remote sensing reflectance*), préalable indispensable à l'estimation des paramètres « qualité de l'eau » tels que la Chl-a. Outre le géo-référencement ou la calibration radiométrique, l'opération cruciale à la télédétection des milieux aquatiques correspond aux corrections des effets atmosphériques et de la lumière réfléchi sur la surface de l'eau (reflets du ciel et du soleil) afin d'estimer la réflectance spectrale de l'eau (Harmel et al., 2018). Cette opération se nomme communément « correction atmosphérique » et l'amélioration de ces corrections restent des défis actuels pour l'observation de la planète. Ici, on définit les niveaux d'images suivants :

- L1C correspondant aux images géoréférencées de la réflectance non-corrigée au sommet de l'atmosphère,
- L2A les données en réflectance au niveau de la surface de l'eau après correction atmosphérique,
- L2B les images des paramètres géophysiques ou biogéochimiques issus de « l'inversion » des réflectances.

Dans le cadre de cette étude, une centaine d'images satellites L2A a été traitée à partir de la chaîne OBS2CO du CNES (Harmel et al., 2018) par Magellium pour la période comprise entre janvier 2017 et juillet 2023.

2.1.2. DONNÉES IN-SITU

Plusieurs jeux de données in-situ ont été récupérés et récoltés pour différentes stations situées à travers le lac (Figure 1). Les caractéristiques de ces stations et des protocoles utilisés sont définis ci-dessous.

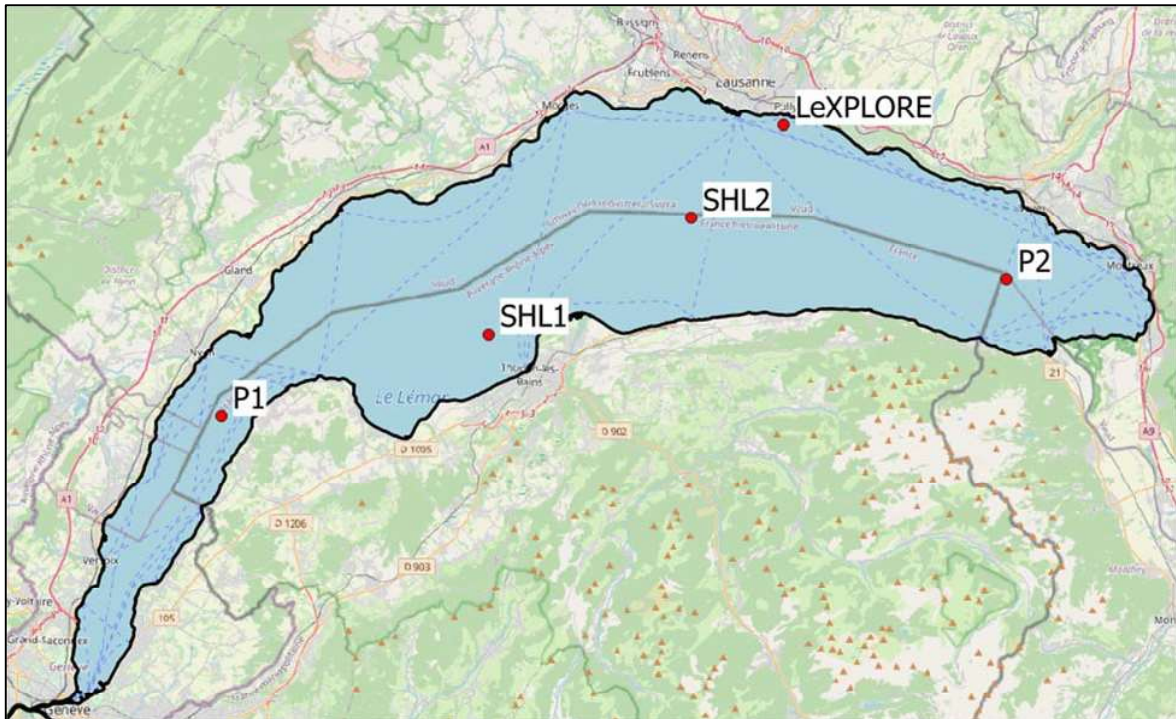


Figure 1 : Situation des différentes stations d'échantillonnage

Figure 1 : Location of the various sampling stations

2.1.3. LA STATION SHL2

Les données disponibles à la station d'échantillonnage SHL2 ont été collectées dans le cadre du suivi environnemental du lac coordonné par la CIPEL. Ces données ont été mises à disposition via la base de données OLA (Rimet et al., 2020). Cette station SHL2, est située dans la partie la plus profonde du lac (45.453°N, 6.594°E, Figure 1). La fréquence d'échantillonnage est mensuelle en hiver et bimensuelle le reste de l'année. Des échantillons d'eau ont été prélevés à dix profondeurs différentes (0, 1, 2,5, 3,5, 5, 7,5, 10, 15, 20, 30 m) et analysés au laboratoire le jour de l'échantillonnage. En outre, une sonde multi-paramètres (référence de la sonde : CTD90M, numéro de série 1079 et fabricant : Sea & Sun Marine Tech (Allemagne)) a été utilisée pour quantifier les profils verticaux des paramètres d'intérêt à une résolution verticale plus fine (en moyenne 2,7 mesures par mètre).

Ainsi, deux types de mesures in-situ sont disponibles pour estimer la Chl-a : (i) les concentrations calculées en laboratoire à partir des prélèvements d'eau (spectrophotomètre) et le protocole SCOR/UNESCO et (ii) les concentrations obtenues à l'aide d'un capteur de fluorescence pré-calibré. Les données in-situ de transparence sont mesurées avec un disque de Secchi noir et blanc de 20 cm de diamètre. Les données PAR sont mesurées à l'aide de la sonde multi-paramètres et sont alors synchrones aux mesures de concentrations de Chl-a.

Les stations SHL1, P1 et P2

Huit campagnes de prélèvement basées sur le protocole d'échantillonnage de la station SHL2 ont été mis en place pour cette étude de février 2023 à Juillet 2023. L'objectif était de s'adapter au calendrier du satellite Sentinel-2 pour avoir un jeu de données in-situ synchrone et comparable.

Cinq campagnes ont été réalisées à la station SHL1 (46.393 °N, 6.447° E, Figure 1) aux dates suivantes : 13-02-2023, 15-03-2023, 04-05-2023, 06-06-2023, et 21-06-2023. Des mesures et prélèvements ont été réalisés aux stations SHL1, P1 (46.350°N, 6.254°E) et P2 (46.423°N, 6.823°E) le 04-07-2023 afin d'estimer les hétérogénéités spatiales au sein d'une même journée. Les stations P1 et P2 ont été choisies à l'aide de la connaissance terrain des techniciens (Jean-Christophe Hustache INRAe, Pascal Perney INRAe), ces stations présentent des environnements contrastés en termes écologiques et des propriétés optiques de la colonne d'eau.

LÉXPLORE :

La plateforme LÉXPLORE est ancrée sur le Léman près de Pully, située à 570 m des rives aux coordonnées 46°30'0.819" Nord et 6°39'39.007" Est, la profondeur d'eau sous la plateforme est de 110 m. Les données de la plateforme sont disponibles sur le portail Datalake (<https://www.datalakes-eawag.ch/?home>). Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés aux jeux de données fournis par le profileur amarré autonome: Thetis (<https://lexplore.info/fr/menez-vos-recherches/instruments-pour-les-donnees-de-base/>). Ce profileur possède une sonde multi-paramètres et un Sea-Bird ECO PAR qui enregistre 1 à 3 profils par jour des concentrations en Chl-a et du PAR de 0,5 à 50m depuis 2018.

2.2. TRAITEMENT DES DONNÉES

2.2.1. DONNÉES SATELLITAIRES : SENTINEL-2

Les données de réflectances obtenues par le satellite ont été converties en mesure de chlorophylle-a via l'application de l'algorithme Ocean Color (OC2 (2 bandes) et OC3 (3 bandes)) de la NASA sur lesquels huit paramétrisations différentes ont été testées.

Les données de l'ensemble du lac ont été traitées à l'aide des algorithmes. Les données issues d'un périmètre de 100m autour des sites de prélèvement in-situ ont été moyennées pour chacun des sites (SHL1, SHL2 et LÉXPLORE) pour comparaison avec les valeurs de Chl-a in-situ (match-up).

2.2.2. DONNÉES IN-SITU

En ce qui concerne les mesures de Chl-a par sonde réalisées en SHL1 et SHL2, le biais d'estimation de la chlorophylle lié au Non-Photochemical Quenching (NPQ) a été corrigé selon la méthode décrite dans Bonnier (2022). Quant aux données de Chl-a de LÉXPLORE, uniquement les profils réalisés pendant ou en fin de nuit, moment où le biais lié au NPQ est le plus faible (Figure 2), ont été utilisés pour cette étude.

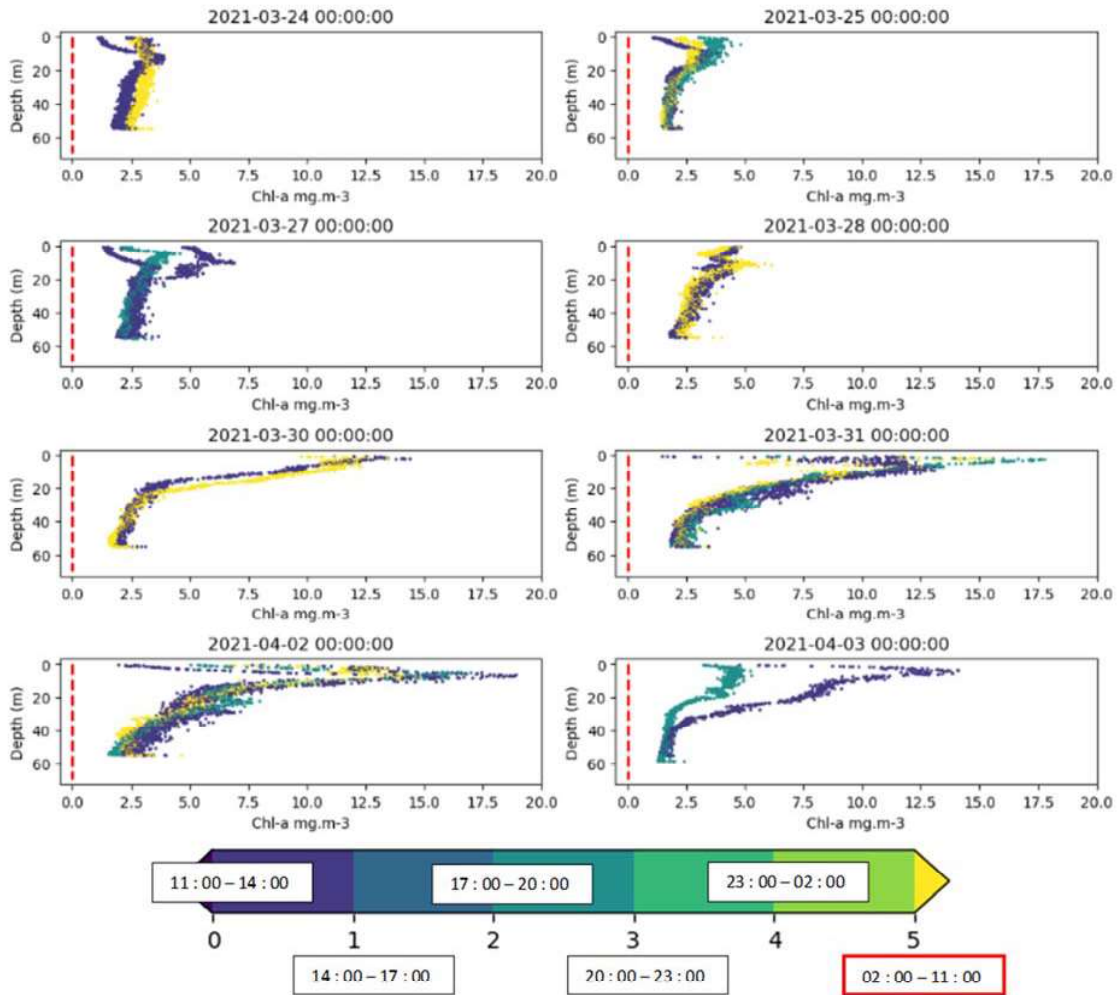


Figure 2 : Profils verticaux LÉXPLORE en fonction de différentes tranches horaires.

Figure 2 : Vertical profiles at LÉXPLORE site based on different time slots

Les concentrations en Chl-a ont été moyennées selon la profondeur en utilisant la formule décrite par Bonnier 2022. Le proxy d'abondance de phytoplancton ainsi obtenu (Chl_wg) est une moyenne pondérée de chlorophylle-a sur la strate d'eau visible par le satellite. Ce sont ces valeurs Chl_wg qui seront comparées aux estimations issues des données satellitaires lors des match-ups.

2.2.3. MATCH-UPS

Les valeurs de Chl_wg et les estimations de chl-a satellitaires moyennées sur 100m autour du site d'échantillonnage ont été comparées à l'aide de régressions linéaires et des indicateurs MSE (*mean square error*), RMSE (*root mean square error*) et corrélation de Pearson. Ainsi les performances des différents algorithmes et calibrations ont pu être évaluées en utilisant cette métrique.

3. RÉSULTATS

3.1. ANALYSE DES PERFORMANCES PAR COMPARAISON « MATCH UP »

Nous nommons par la suite « match-ups » ces comparaisons entre données satellite et in-situ. Les match-ups réalisés avec les données obtenues en SHL2 indiquent des corrélations significatives pour tous les algorithmes testés. Les algorithmes qui présentent de meilleures performances sont les OC2 et OC3d (O'Reilly et al., 1998) et dans une moindre mesure, le OC3 de Niroumand-Jadidi et al. (2021) (Figure 3 et 4).

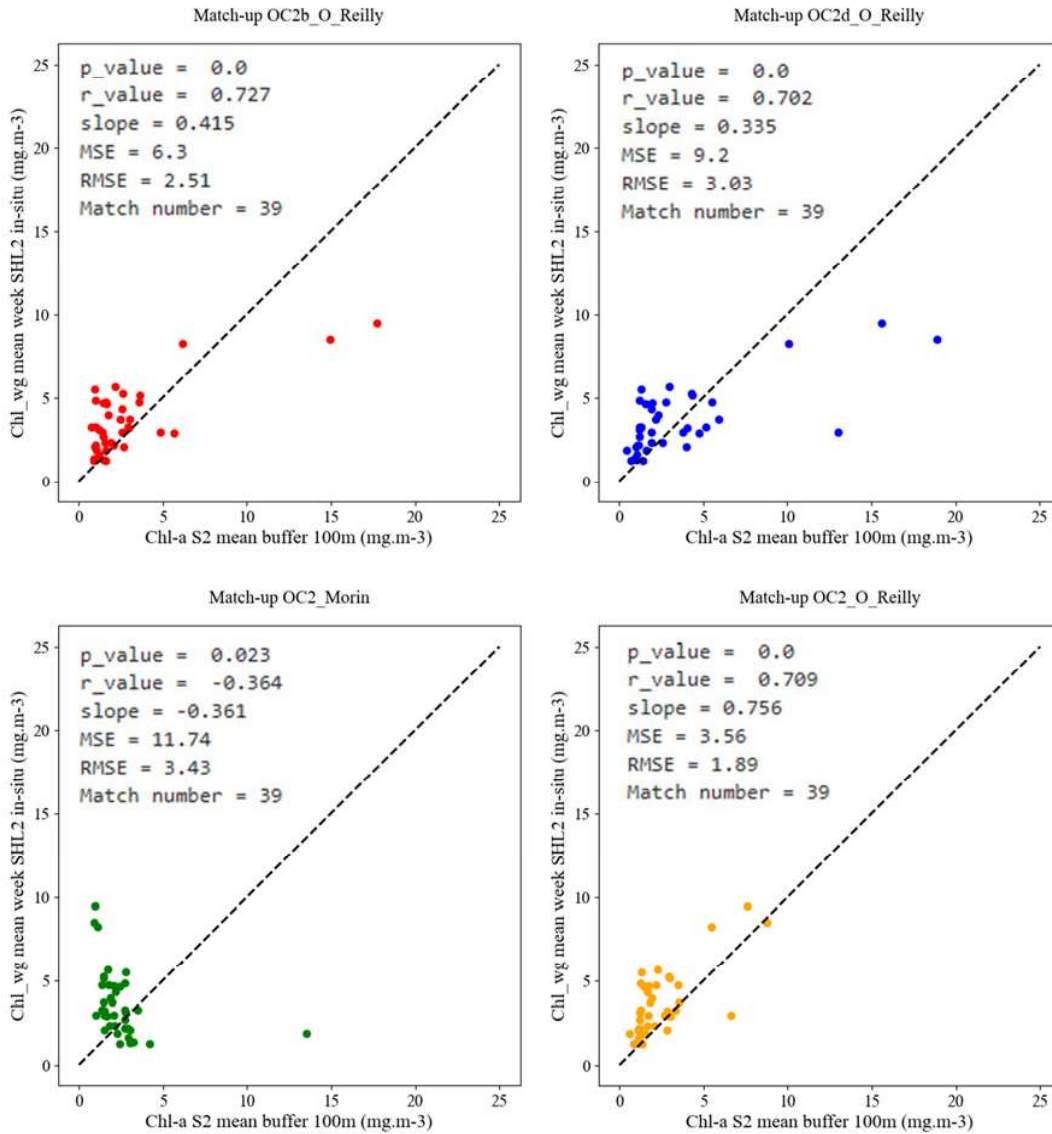


Figure 3 : Match-ups entre estimations satellites et in-situ en SHL2 (PARTIE 1)

Figure 3 : Match-ups between satellite and in-situ estimates in SHL2 (PART 1)

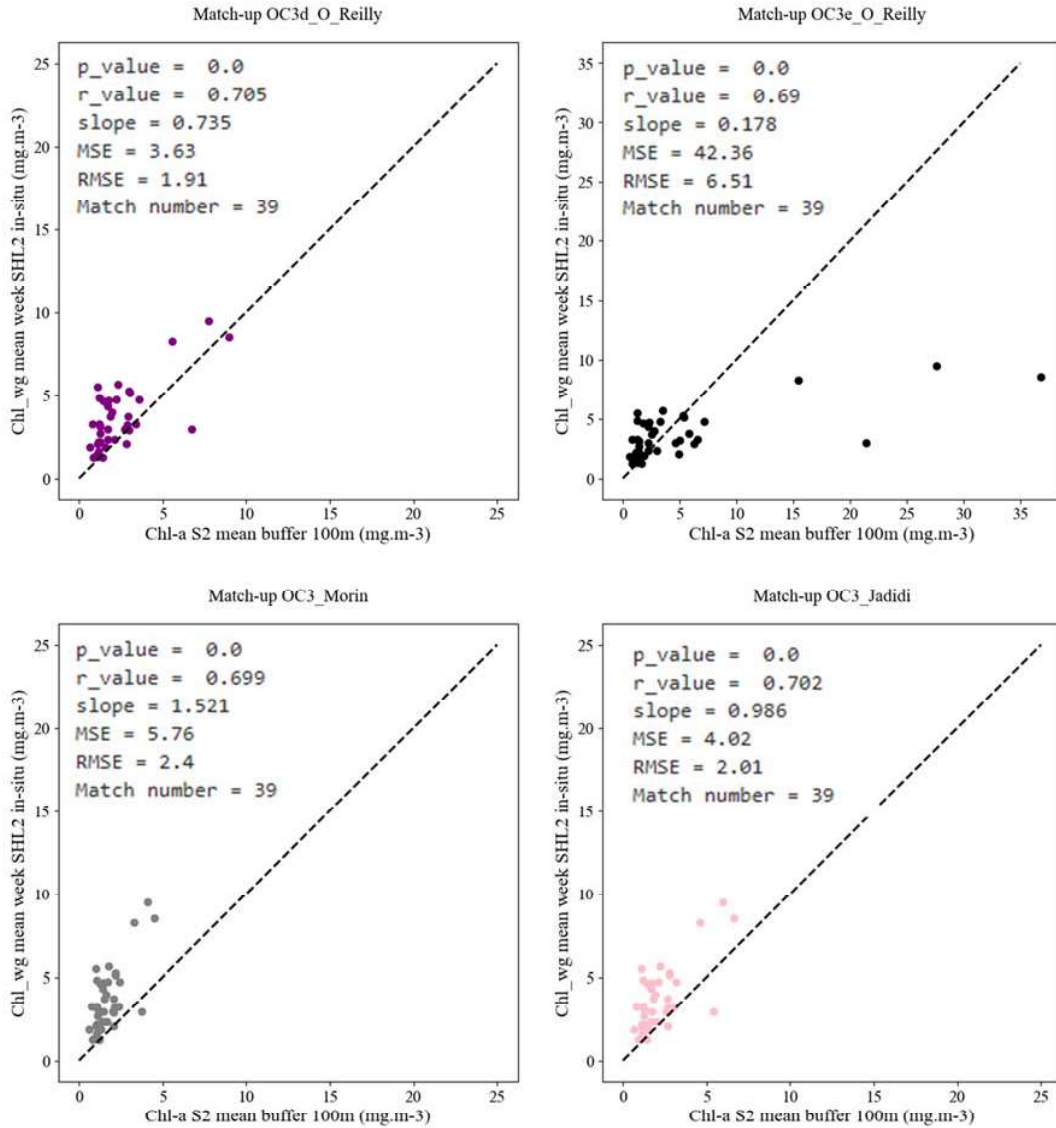


Figure 4 : Match-ups entre estimations satellites et in-situ en SHL2 (PARTIE 2)

Figure 4 : Match-ups between satellite and in-situ estimates in SHL2 (PART 2)

Les comparaisons avec les estimations satellitaires et les mesures in-situ réalisées en SHL1 indiquent une meilleure performance pour l’algorithme OC2b (O’Reilly et al. 1998) paramétrisé sur les bandes de Sentinel-2. Ce constat est valable pour la moyenne pondérée de Chl-a et pour la moyenne sur les 5 premiers mètres (Tableau 2).

Tableau 2 : Performance des algorithmes pour les estimations de chlorophylle-a en SHL2

Table 2 : Algorithm performance for chlorophyll-a estimates in SHL2

	Chl_wg			Chl_mean_0-5m		
	R_value	MSE	RMSE	R_value	MSE	RMSE
mean_chl_OC2b_O_Reilly	0.85	1.47	1.21	0.82	1.71	1.31
mean_chl_OC2d_O_Reilly	0.74	0.61	0.78	0.70	0.75	0.86
mean_chl_OC2_Morin	-0.71	2.05	1.43	-0.67	2.34	1.53
mean_chl_OC2_O_Reilly	0.74	0.86	0.93	0.69	1.08	1.04
mean_chl_OC3d_O_Reilly	0.75	0.96	0.98	0.71	1.17	1.08
mean_chl_OC3e_O_Reilly	0.76	1.01	1	0.71	1.07	1.04
mean_chl_OC3_Jadidi	0.75	1.06	1.03	0.71	1.29	1.14
mean_chl_OC3_Morin	0.75	1.7	1.3	0.70	1.97	1.41

La campagne réalisée le 4 juillet 2023 en 3 points du lac met en évidence une forte hétérogénéité spatiale des profils verticaux de chlorophylle-a au sein du même journée (Figure 4). Les estimations satellitaires à l'aide de l'algorithme O'Reilly sont sous-estimées par rapport aux mesures in-situ (Tableau 3) et ne retranscrivent pas la même image spatiale. D'après les algorithmes d'O'Reilly, le maximum de chlorophylle est observé en P2 (0.96 – 1.77 µg/L) alors que les mesures in-situ indiquent de plus fortes concentrations en P1 (3.3 µg/L).

Tableau 3 : Concentrations en chlorophylle-a (µg/L) estimées au points P1, SHL1 et P2 in-situ et satellitaires

Table 3 : Chlorophyll-a concentrations (µg/L) estimated at points P1, SHL1 and P2 in-situ and by satellite

	P1	SHL1	P2
Chl_wg	3.316	2.810	2.640
Chl_mean_0-5m	3.420	3.073	3.315
mean_chl_OC2b_O_Reilly	0.549	0.636	0.956
mean_chl_OC2d_O_Reilly	0.734	1.116	1.772
mean_chl_OC2_Morin	4.072	2.881	2.176
mean_chl_OC2_O_Reilly	0.885	1.177	1.602
mean_chl_OC3d_O_Reilly	0.495	0.647	1.109
mean_chl_OC3e_O_Reilly	0.447	0.560	1.151
mean_chl_OC3_Jadidi	0.489	0.655	1.120
mean_chl_OC3_Morin	0.458	0.623	1.011

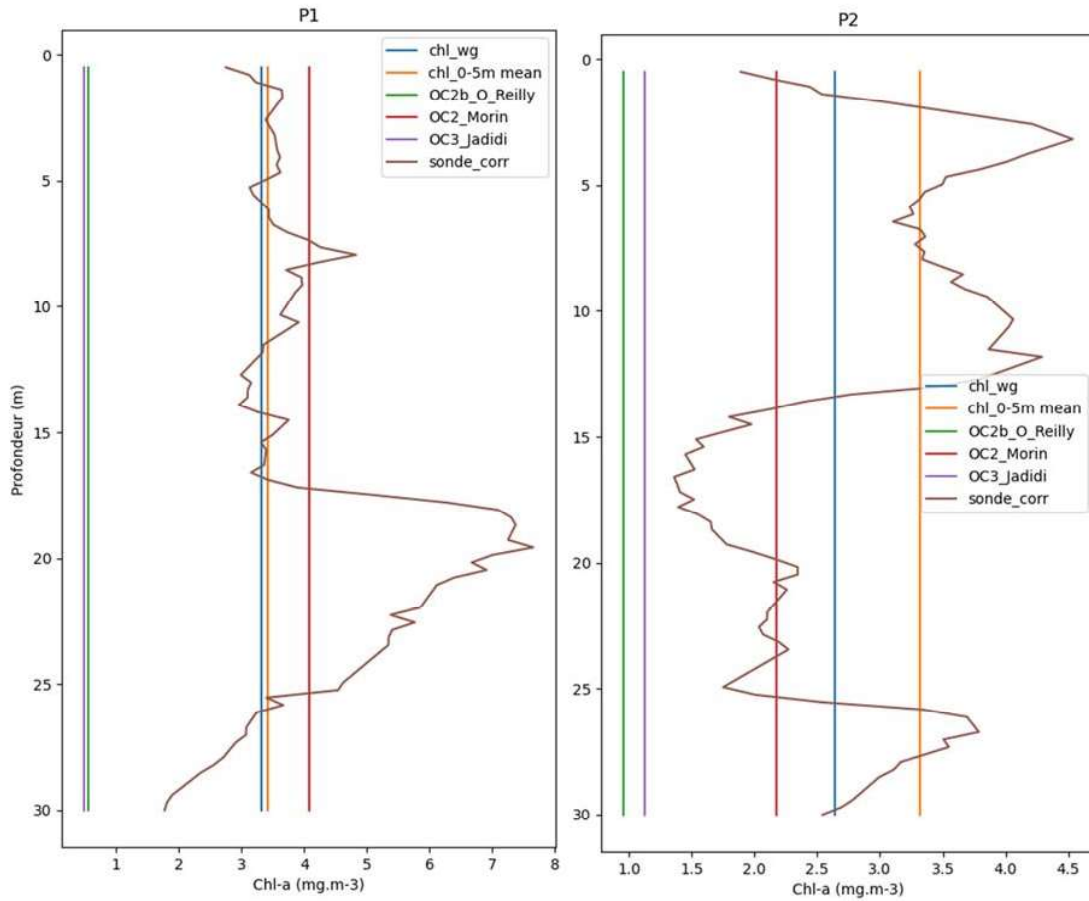


Figure 5 : Profils verticaux de chlorophylle-a en P1, P2 et SHL1

Figure 5 : Vertical profiles of chlorophyll-a in P1, P2 and SHL1

Les comparaisons (match-ups) réalisées sur les données mesurées à LÉXPLORE indiquent une meilleure performance de l'algorithme OC2 d'O'Reilly (Figure 6 et 7) mais ce dernier est moins performant qu'en SHL2 et SHL1.

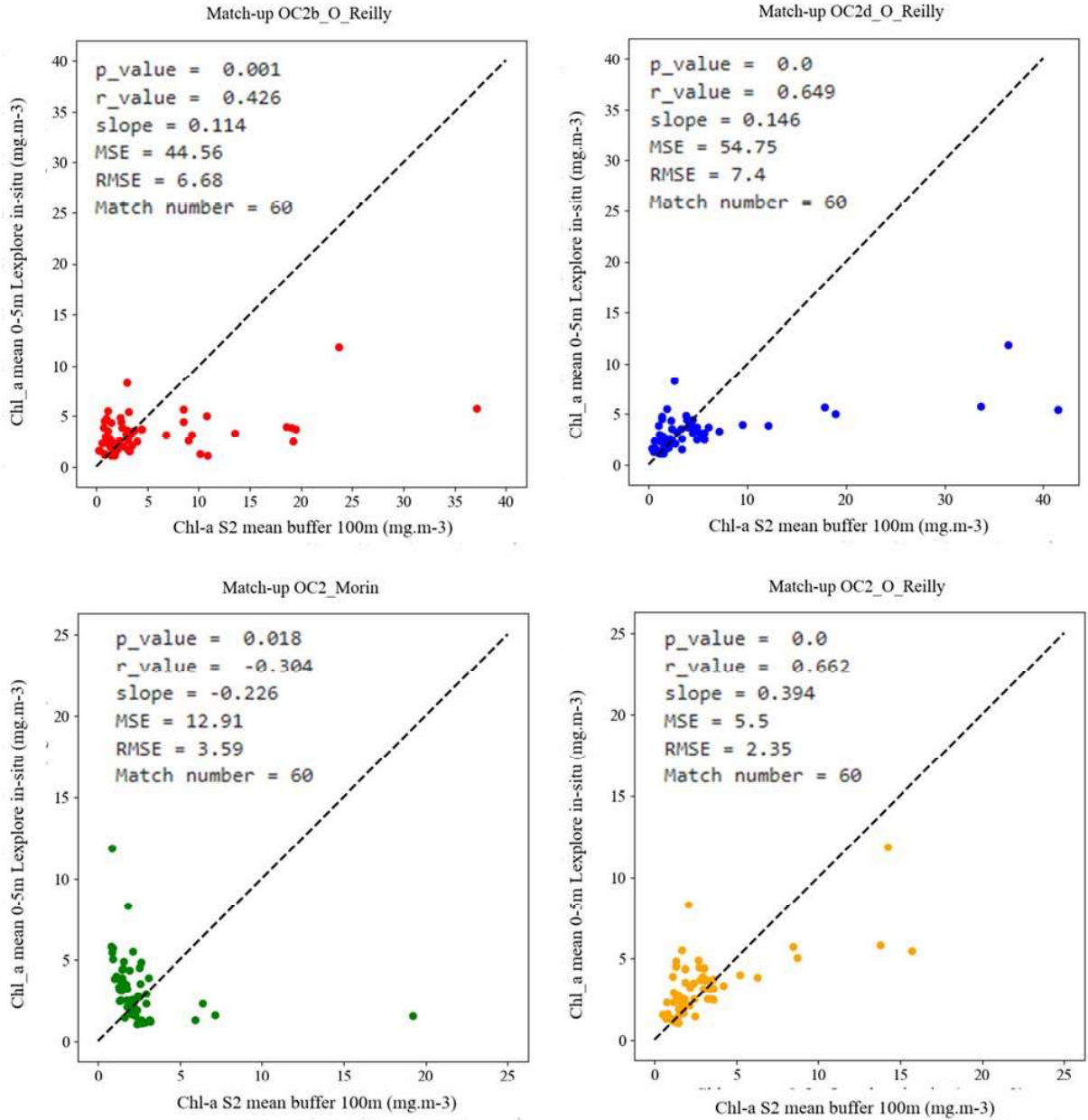


Figure 6 : Match-ups entre estimations satellites et in-situ au point LEXPLORE (PARTIE 1)

Figure 6 : Match-ups between satellite and in-situ estimates in LEXPLORE (PART 1)

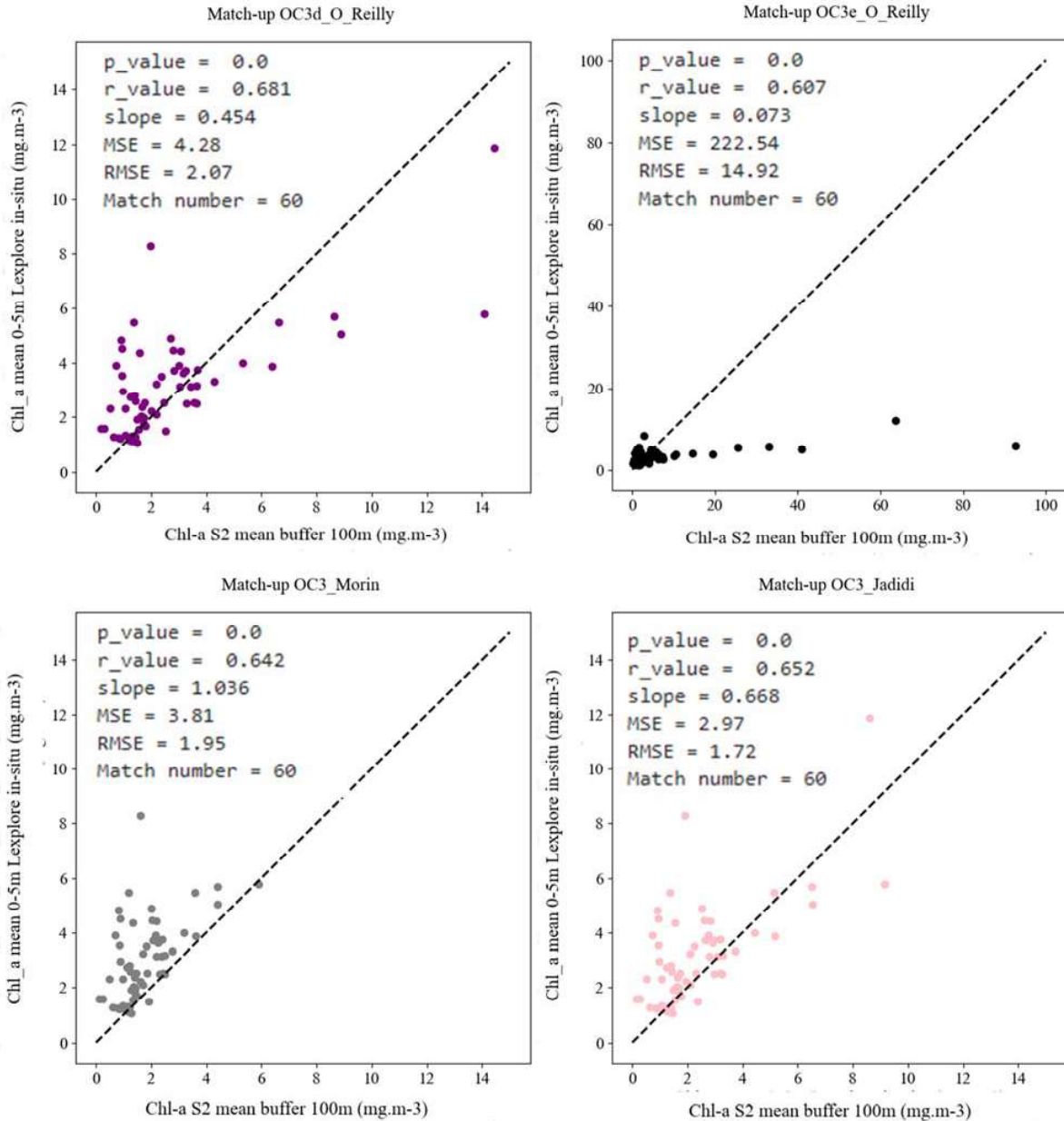


Figure 7 : Match-ups entre estimations satellites et in-situ au point LÉXPLORE (PARTIE 2)

Figure 7 : Match-ups between satellite and in-situ estimates in LÉXPLORE (PART 2)

Les différences de performance entre les paramétrisations seraient liées aux caractéristiques optiques de l'eau elles-mêmes liées à la charge de particules présentes dans la strate d'eau visible par le satellite. LÉXPLORE se situe à proximité d'une zone où les apports exogènes sont importants (la rivière : La Paudèze) et régulièrement soumise à des événements de précipitation de calcite en lien avec les apports du Rhône (Escoffier et al., 2022 ; Many et al., 2022) induisant ainsi ponctuellement une forte hétérogénéité de la réflectance à l'échelle du lac (Figure 11) avec des propriétés optiques fortement impactées par la présence de calcite ou de matières dissoutes. Ces apports exogènes et la précipitation de la calcite modifient ponctuellement les caractéristiques de l'eau et de ce fait, une re-paramétrisation de l'algorithme est nécessaire pour améliorer les estimations (Figure 8). Ainsi, il semble que l'utilisation conjointe de plusieurs algorithmes pourrait assurer une qualité d'observations au cours du temps.

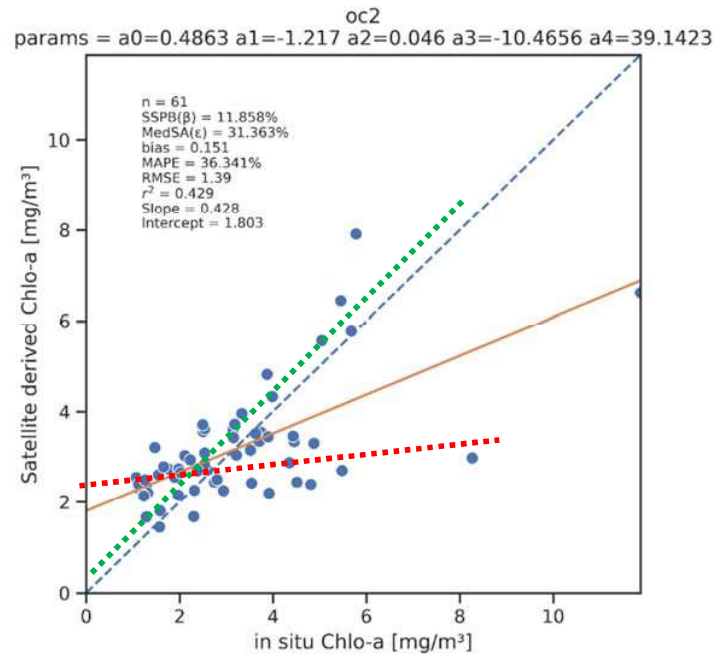
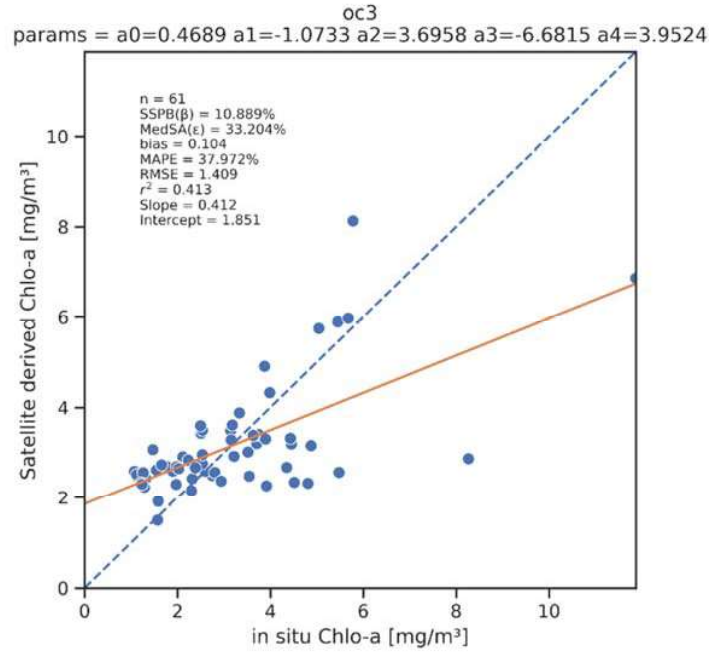


Figure 8 : Paramétrisations obtenues à l'aide des modèles OC2 et OC3. Deux répartitions des points sont visibles, en vert les points impactés par la concentration en Chl-a et en rouge les points impactés par le CDOM (Concentrations en matière organique dissoute colorée)

Figure 8 : Parameters obtained using the OC2 and OC3 models. Two distributions of points are visible, in green the points impacted by the Chl-a concentration and in red the points impacted by the CDOM (Concentrations of coloured dissolved organic matter).

3.1. ANALYSE SPATIALE

L'exercice de validation et quantification des performances de l'estimation de la Chl-a par la chaîne OBS2CO appliquées aux images Sentinel-2 a permis de dégager les paramétrisations les plus robustes pour le Léman. La paramétrisation issue de OC2 a été retenue ici pour analyser la distribution spatiale de la biomasse phytoplanctonique du Léman. Notons que du fait de la fauchée et l'orbite utilisée par la constellation Sentinel-2 la partie ouest du lac est observée deux fois plus fréquemment que la partie est, voir Figure 9. Ci-dessous une sélection d'images (Figures 10 à 15) illustrant la variabilité spatiale de réflectance et de chlorophylle-a dans le Léman.

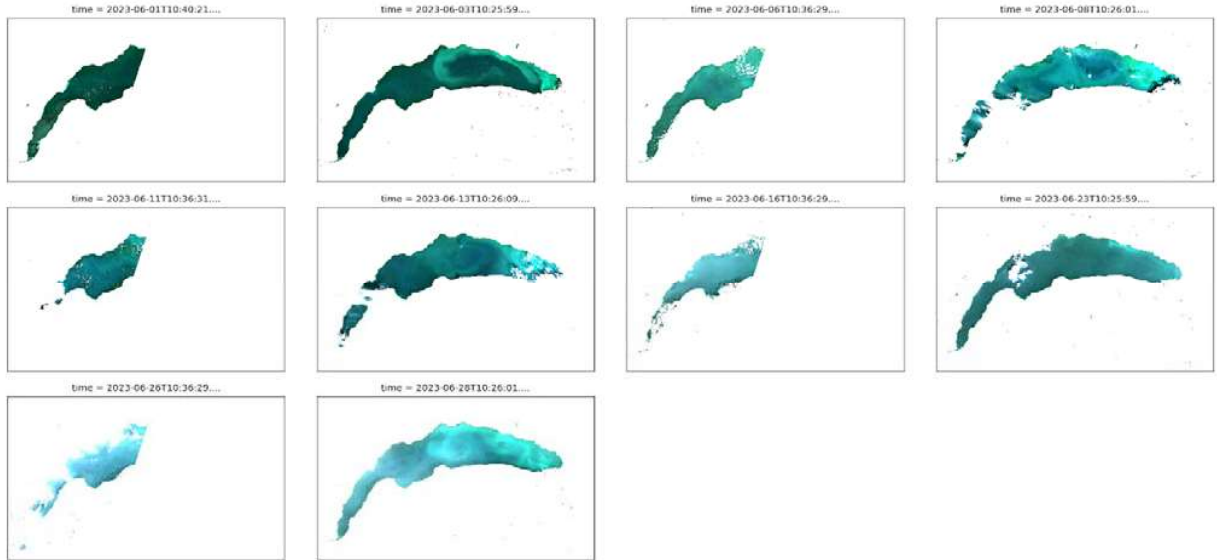


Figure 9 : Visualisation en vraie couleur (RGB) des images Sentinel-2 L2A du Léman sur le mois de juin 2023. Notons que la partie du lac est en-dehors de la fauchée du satellite une date de passage sur deux.

Figure 9 : True colour (RGB) display of Sentinel-2 L2A images of Lake Geneva in June 2023

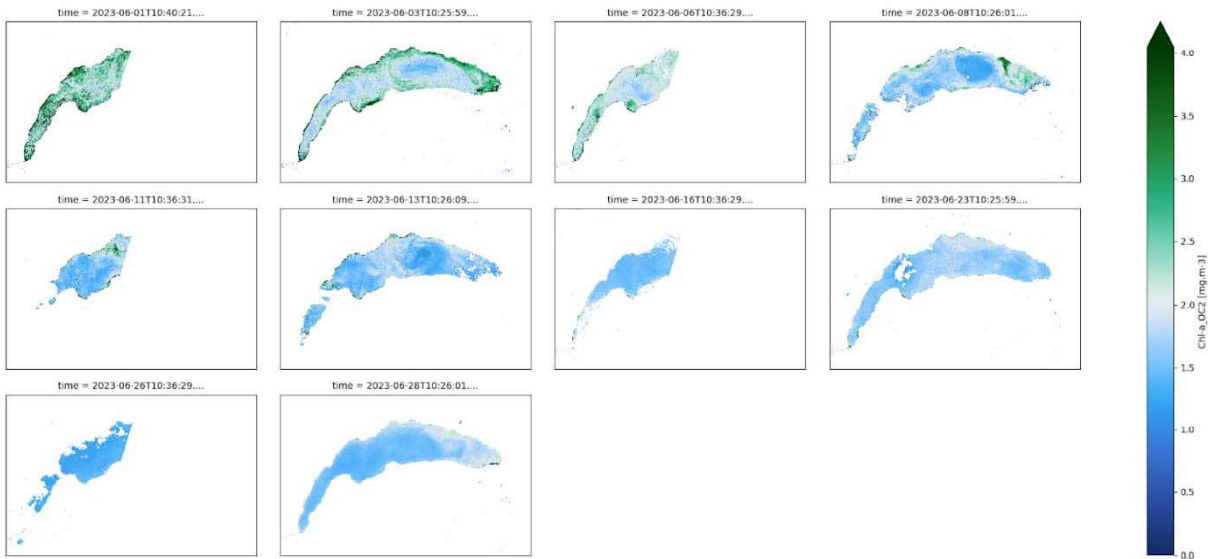


Figure 10 : Cartes de la concentration en Chl-a pour les dates correspondantes à celles de la Figure 9

Figure 10 : Chl-a concentration maps for dates corresponding to those shown in Figure 9

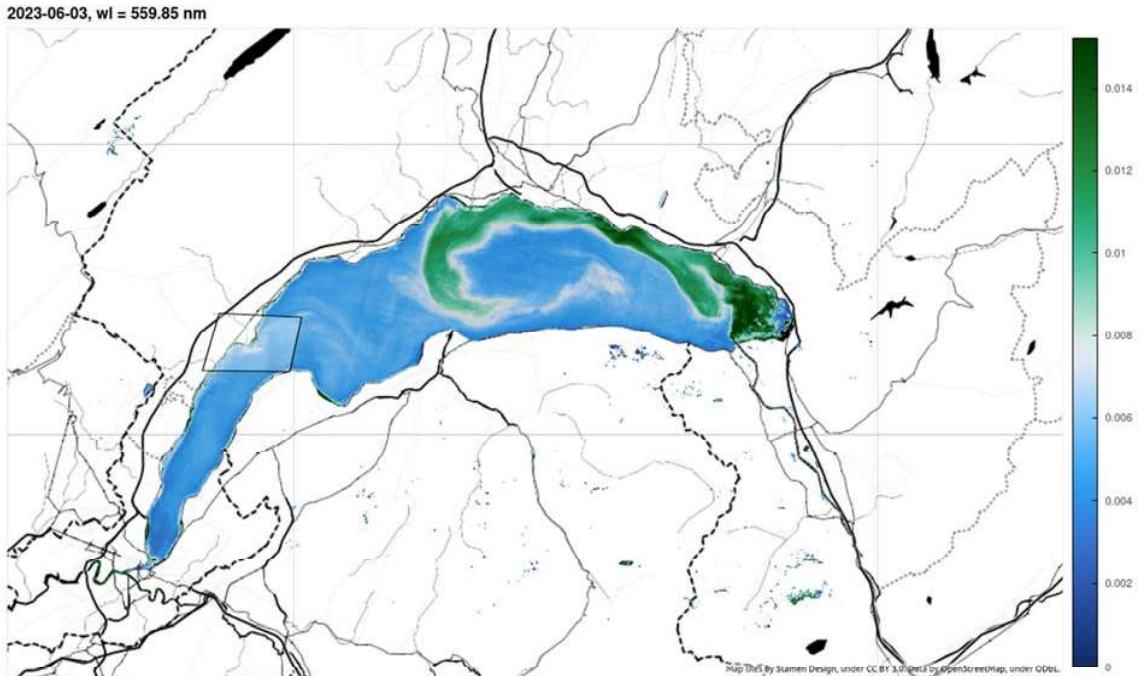


Figure 11 : Visualisation du Jupyter notebook sur fond de carte de la réflectance de télédétection (réflectance de la colonne d'eau) à 560 nm pour la date du 3 juin 2023. Notons le motif dynamique partant du tributaire du Rhône en partie est qui relâche des sédiments en suspension augmentant de fait la réflectance. Le polygone en partie ouest correspond à la zone d'extraction pour étude spatiale plus fine.

Figure 11 : Figure 11: Visualization on a map of reflectance of remote sensing (reflectance of the water column) at 560 nm for 3 June 2023. It should be noted that the dynamic pattern coming from the east part of the Rhone releases suspended particles of sediment, increasing reflectance. The polygon in the western part corresponds to the extraction zone for a more detailed spatial study.

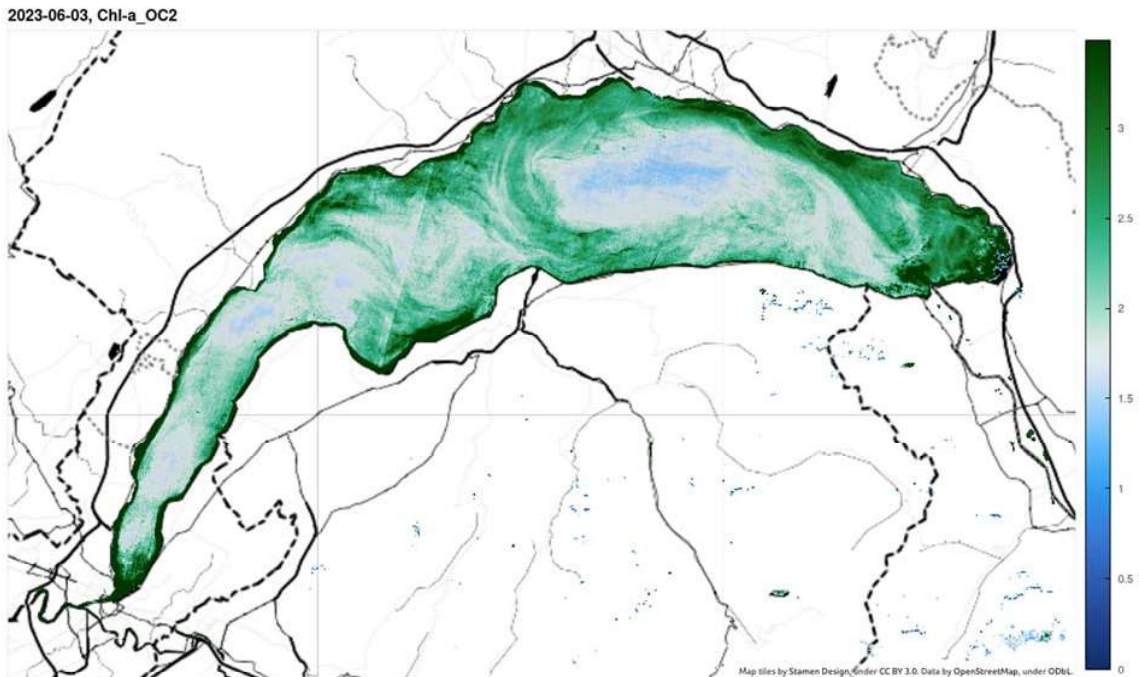


Figure 12 : Valeur de la concentration en Chl-a pour l'image visualisée en réflectance Figure 11

Figure 12 : Chl-a concentration value for the reflectance image Figure 11

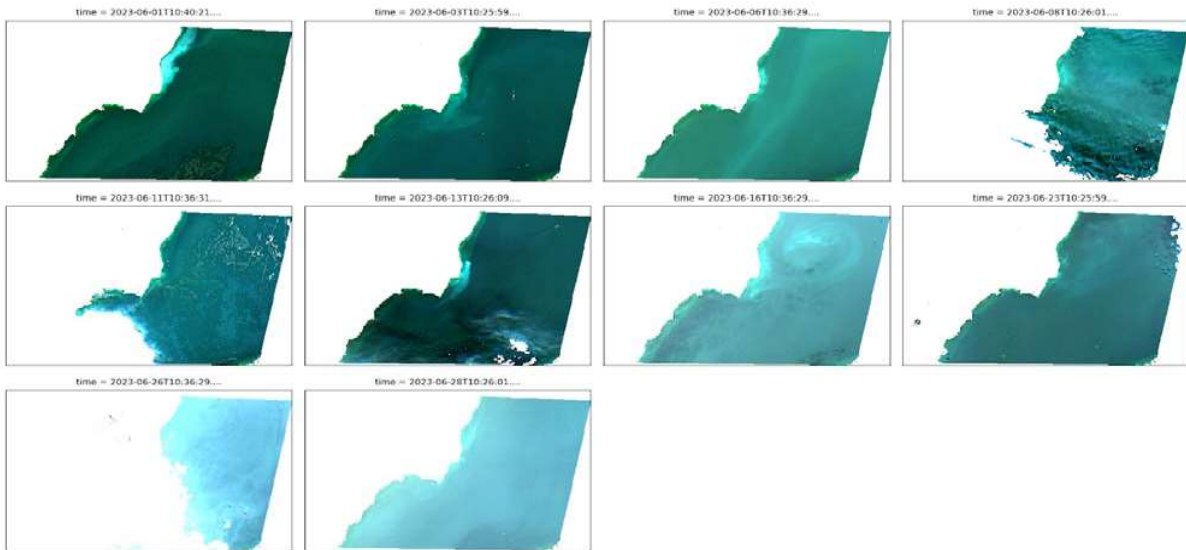


Figure 13 : Visualisation vraie couleur (RGB) de la zone d'intérêt extraite de la figure 11

Figure 13 : True colour (RGB) visualisation of the area of interest extracted from Figure 11

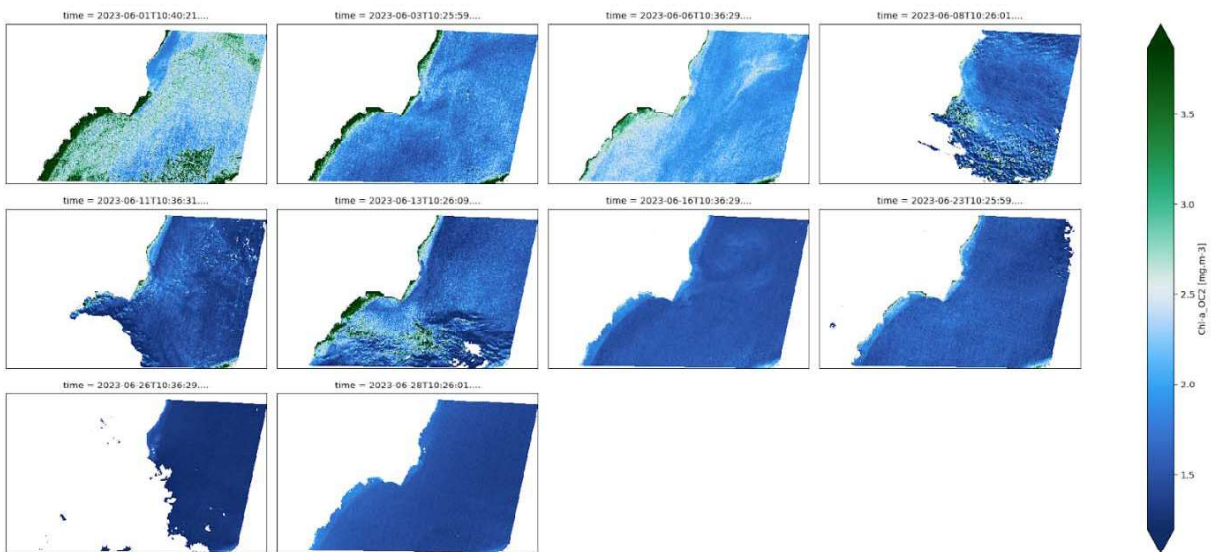


Figure 14 : Valeurs en Chl-a correspondant à la zone de la figure 13

Figure 14 : Chl-a values corresponding to the area shown in Figure 13

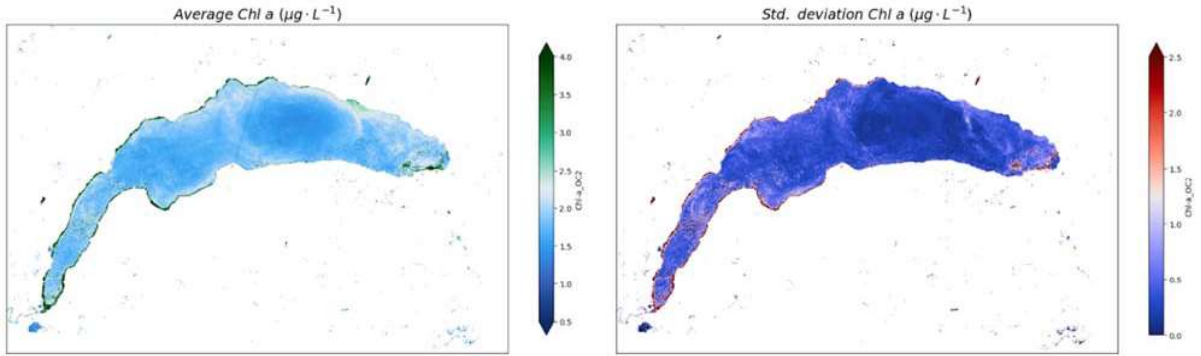


Figure 15 : Valeurs moyennes et écart type de la Chl-a calculés sur l'ensemble des images Sentinel-2 du mois de juin 2023

Figure 15 : Mean values and standard deviation of Chl-a calculated from all Sentinel-2 images for June 2023.

4. CONCLUSION

Les estimations de chlorophylle-a obtenue avec Sentinel-2 montrent des performances variables en fonctions des algorithmes utilisés. L'algorithme le plus performant est celui OC2 reparamétrisé sur les bandes spectrales de Sentinel-2. Il est connu que cet algorithme produit de bons résultats en conditions oligotrophes lorsque la concentration en Chlorophylle-a et en matières organiques dissoutes sont corrélées. Cependant, la présence « d'évènements blancs » dus à la précipitation de calcite et l'apport en matière organique dissoute par les tributaires peuvent biaiser les résultats obtenus par cet algorithme. Des travaux sont en cours (Magllium, OFB/INRAE) pour prendre en compte la complexité optique de ces types d'eau (Morin et al., *in prep.*). De ce fait, l'hétérogénéité spatiale des conditions optiques du milieu, qui par ailleurs évoluent en fonction de l'intensité des apports par les affluents (principalement le Rhône) et des évènements de précipitation de la calcite, constituent un enjeu important pour l'évaluation de l'abondance du phytoplancton par satellite ; particulièrement visible sur l'imagerie haute-résolution de Sentinel-2.

Un travail de recherche et développement est en cours chez Magellium et partenaires publics (pôle ECLA, OFB/INRAE) pour l'amélioration de l'ensemble des algorithmes de traitement de l'imagerie Sentinel-2 et production massive de produits « qualité de l'eau » à l'échelle nationale française. En parallèle de ce travail, la chaîne de traitement permettra bientôt de traiter l'imagerie de la famille Landsat (de Landsat-4 à Landsat-9) augmentant ainsi la fréquence des images mais aussi la profondeur temporelle (Landsat-4 lancé en 1982). Ce rapport montre la pertinence de ces missions satellites pour l'étude et la surveillance du Léman aux petites échelles spatiales. Une suite de ces travaux permettra d'évaluer et articuler la production de données à partir des chaînes de traitement de nouvelle génération.

BIBLIOGRAPHIE

- Blanc, P., Pelletier, J.P., et Moille, J.P. (1993). Variabilité spatiale et temporelle des paramètres physico-chimiques et biologiques dans l'eau du Léman. Rapp. Comm. int. prot. eaux Léman contre pollut., Campagne 1992,113-162.
- Bonnier M. 2022. Vers la prise en compte de la distribution verticale du phytoplancton pour le suivi des grands lacs par télédétection : investigation autour du Léman. Rapport Master 2 Université Gustave Eiffel, Marne-la-Vallée.
- Escoffier, N., Perolo, P., Lambert, T., Rüegg, J., Odermatt, D., Adatte, T., et al. (2022). Whiting events in a large peri-alpine lake: Evidence of a catchment-scale process. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 127, e2022JG006823. <https://doi.org/10.1029/2022JG006823>
- Harmel T, Chami M, Tormos T, Reynaud N, Danis P-A. 2018. Sun glint correction of the Multi-Spectral Instrument (MSI)-SENTINEL-2 imagery over inland and sea waters from SWIR bands. *Remote Sens Environ* 204: 308–321. doi: 10.1016/j.rse.2017.10.022
- Many, G.; Escoffier, N.; Ferrari, M.; Jacquet, P.; Odermatt, D.; Mariethoz, G.; Perolo, P.; Perga, M.-E. Long-Term Spatiotemporal Variability of Whittings in Lake Geneva from Multispectral Remote Sensing and Machine Learning. *Remote Sens.* 2022, 14, 6175. <https://doi.org/10.3390/rs14236175>
- Niroumand-Jadidi, M.; Bovolo, F.; Bruzzone, L.; Gege, P. Inter-Comparison of Methods for Chlorophyll-a Retrieval: Sentinel-2 Time-Series Analysis in Italian Lakes. *Remote Sens.* 2021, 13, 2381. <https://doi.org/10.3390/rs13122381>
- O'Reilly JE, Maritorena S, Mitchell G, Siegel DA, Carder KL, Garver DL, Kahru M, McClain CR. 1998. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS. *J Geophys Res* 103(C11): 24937–24950.
- Rimet F., Anneville O., Barbet D., Chardon C., Crépin L., Domaizon I., Dorioz J.-M., Espinat L., Frossard V., Guillard J., Goulon AC., Hamelet V., Hustache J.-C., Jacquet S., Lainé L., Montuelle B., Perney P., Quetin P., Schellenberger A., Tran-Khak V., Monet G. (2020). The Observatory on alpine Lakes (OLA) database : Sixty years of environmental data accessible to the public. *Journal of Limnology*, 79(2): 164-178.
- Soullignac F., Anneville O., Bouffard D., Chanudet V., Dambrine E., Guénand Y., Harmel T., Ibelings B., Trevisan D., Uittenbogaard R., Danis P.-A. (2019). Contribution of 3D coupled hydrodynamic-ecological modeling to assess the representativeness of a sampling protocol for lake water quality assessment. *Knowledge & Management of Aquatic Ecosystems*, 420, 42. <https://doi.org/10.1051/kmae/2019034>