

Évaluation de l'algorithme OC5-PHYSAT avec données SENTINEL 3 haute-résolution sur le site de référence de Calvi

SIGNATURE PIGMENTAIRE DU PHYTOPLANCTON ET
IMAGERIE SATELLITAIRE « COULEUR DE L'EAU »

Sylvain Coudray

Novembre 2023

Document final LITTOSAT phase III

Avec la contribution de



Avec le soutien de



Contexte de programmation et de réalisation

Ce rapport a été réalisé dans le cadre du programme scientifique et technique AQUAREF pour la période 2022-2023, au titre de l'action B1.9 : Études techniques et scientifiques - Adaptation des méthodes par télédétection satellitaire à l'évaluation, à partir des indices pigmentaires en milieu marin (Ifremer)

Auteur :

Sylvain COUDRAY

Ingénieur de recherche à IFREMER/ODE/LERPAC, sylvain.coudray@ifremer.fr

Contributeurs :

Anne GOFFART

Océanographe biologiste, Université de Liège, A.Goffart@uliege.be

Philippe BRYERE

Ingénieur en imagerie satellitaire, Société ARGANS à Brest, pbryere@argans.eu

Quentin FONTAINE

Ingénieur en sciences marines, Société STARESO à Calvi, quentin.fontaine@stareso.com

Vérification du document :

Rémi BUCHET

Coordinateur national expertise DCE - IFREMER/ODE/VIGIES

remi.buchet@ifremer.fr

Christophe LAPLACE-TREYTURE

Ingénieur de recherche à l'INRAE, Unité Ecosystèmes Aquatiques et Changements globaux.

christophe.laplace-treuture@inrae.fr

Les correspondants

OFB : Olivier Perceval, DRAS, olivier.perceval@ofb.gouv.fr

Dorothee Vincent, DSUED, dorothee.vincent@ofb.gouv.fr

IFREMER : Sylvain Coudray, sylvain.coudray@ifremer.fr

Référence du document : Sylvain COUDRAY - Évaluation de l'algorithme OC5-PHYSAT sur jeu de données SENTINEL haute-résolution-300 mètres, pour le site de référence de Calvi - Rapport AQUAREF 2023 - 30 p.

Droits d'usage :	Accès libre
Couverture géographique :	International
Niveau géographique :	National, en lien avec les correspondants OFB.
Niveau de lecture :	Professionnels, experts
Nature de la ressource :	Document

Table des matières

1. INTRODUCTION	7
2. MÉTHODOLOGIE	9
3. CALCUL DES CONCENTRATIONS DE CHLOROPHYLLE-A TOTALE PAR OC5 SUR LE SITE DE CALVI.....	11
3.1 Adaptation des seuils de chlorophylle-a pour les données MODIS (1 km)	11
3.2 Adaptation des seuils de chlorophylle-a pour les données OLCI (300 m)	12
4. COMPARAISON DES RÉSULTATS OC5-PHYSAT ENTRE MODIS ET SENTINEL3 POUR CHAQUE GROUPE PHYTOPLANCTONIQUE	13
4.1 Comparaison des concentrations en chlorophylle-a totales	14
4.2 Comparaison des concentrations en pigments secondaires	15
4.2.1 Concentrations estimées en cyanobactéries de type <i>Prochlorococcus</i>	16
4.2.2 Concentrations estimées en cyanobactéries de type <i>Synechococcus</i>	17
4.2.3 Concentrations estimées en diatomées.....	18
4.2.4. Concentrations estimées en prymnésiofycées	19
4.2.5. Concentrations estimées en autres bactéries (nano-eucaryotes).....	19
5. CONCLUSION	21
REMERCIEMENTS.....	22
GLOSSAIRE	23
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	24
BIBLIOGRAPHIE.....	25
TABLES DES ILLUSTRATIONS	26
ANNEXE 1 - DÉTAILS D'IMPLANTATION DU PROTOTYPE OC5-PHYSAT	27
ANNEXE 2 - TABLE DES COEFFICIENTS D'ANOMALIES PHYSAT	28
ANNEXE 3 - TABLE DE CORRESPONDANCE N° SEMAINES / JOURS	29

Résumé

Depuis 2015, de nouvelles méthodes analytiques ont été prospectées par l'Ifremer et l'Université de Liège dans le cadre des projets MEDSAT et IC-MEDITS avec le support de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse puis de l'AFB pour spatialiser la composition des communautés phytoplanctoniques des eaux littorales méditerranéennes françaises. Elles sont basées sur l'utilisation de mesures HPLC hebdomadaires réalisées sur une station de référence couplées à des observations satellites journalières, elles-mêmes traitées par la combinaison successive de deux algorithmes d'analyse de la « couleur de l'eau » : OC5 et PHYSAT.

L'algorithme OC5 a été développé par l'Ifremer pour estimer les concentrations de chlorophylle-a totale à la surface des océans à partir de 5 bandes spectrales observées par le capteur couleur de l'eau de différents satellites (MODIS, SeaWiFS, OLCI) avec de bons résultats en zones côtières. Parallèlement, l'algorithme PHYSAT a été développé par l'Université de Lille, pour estimer la contribution des principaux groupes phytoplanctoniques dominants dans le signal satellite couleur de l'eau. Cette méthode empirique est basée sur la détection d'anomalies spectrales dans les réflectances à la surface de la mer, après soustraction de la composante principale due à la chlorophylle-a totale. Une bonne corrélation avec les mesures *in situ* a déjà été relevée dans l'océan global (Alvain et al., 2012) ainsi que sur tout le bassin méditerranéen (Navarro et al., 2014) pour les 4 groupes principaux : diatomées, cyanobactéries, haptophytes et toutes les autres espèces, regroupées par simplification dans la rubrique « autres nano-eucaryotes »

Pour la phase I de l'action Aquaref (2019-2020) Ifremer et l'Université de Liège ont testé et validé une version « locale » de cet algorithme avec des grilles d'observation de 5km x 5km, sur 3 sites méditerranéens en eaux claires : « Calvi Tête de canyon », « Marseille-Frioul » et « Banyuls-Sola » à partir des données satellitaires AQUA-MODIS de 2012 à 2018.

Pour la phase II (2021-2022), la validation a été étendue à deux nouveaux sites situés en eaux semi-turbides : Sète en Méditerranée, et Oléron en Atlantique / Golfe de Gascogne, pour les données MODIS disponibles de 2017 à 2020. Un test a également été effectué pour les sites de Calvi et Oléron avec des données SENTINEL3-OLCI moyennées à 1km de résolution, les données à 300 m n'étant alors pas encore disponibles.

Pour la phase III concernant le présent rapport, un nouveau test a été effectué avec des données satellitaires SENTINEL-OLCI à 300 mètres de résolution sur le site de référence de « Calvi-Tête de Canyon » pour l'année 2020. Les résultats obtenus ont été comparés avec ceux de MODIS et sont prometteurs. L'algorithme prototype a ensuite été transféré à la société d'ingénierie ACRI-ST pour être traduit en langage Python™ et évaluer l'intérêt des différentes approches de classification : méthodes analytiques linéaires ou méthodes par apprentissage.

Mots clés (thématique et zone géographique)

Couleur de l'eau, SENTINEL, OLCI, analyse spectrale, phytoplancton, composition, Mer méditerranée

Abstract

Since 2015, new analytical methods have been explored by Ifremer and the University of Liège (Belgium) in the framework of the MEDSAT and IC-MEDITS projects, initially supported by the Rhône-Mediterranean-Corsica Water Agency (AERMC) and then by the French Agency for the Bioiversity (OFB). The main goal of this project is to spatialise the phytoplankton composition of French Mediterranean coastal waters. These methods are based on the use of HPLC measurements performed on a reference point coupled with large-scale satellite observations that are treated by the combination of two successive “water colour” analysis algorithms: OC5 and PHYSAT.

The first one OC5, was developed by Ifremer to estimate total chlorophyll-a concentrations from 5 spectral bands observed by the water color sensor of different satellites (MODIS, SeaWiFS, OLCI) with good results in coastal areas. At the same time, the PHYSAT algorithm was developed by the University of Lille to estimate the contribution of the main dominant phytoplankton groups in the water colour signal. This empirical method is based on spectral anomaly detection in the light reflectance values obtained from the water surface, after subtraction of the total chlorophyll-a component in order to discriminate the influence of secondary pigments. Good matching was observed between PHYSAT results and *in situ* measurements at a global level (Alvain et al., 2012) as well as a regional scale for the mediterranean sea (Navarro et al., 2014) for the identification of four main groups: diatom, cyanobacteria, haptophytae, and all the other species simply grouped together as « Autres » (*i.e.* « Other » nano-eucaryotes).

In the first Phase (I) of the LITTOSAT AQUAREF action, IFREMER and Liège University did validate a local version of the method called OC5-PHYSAT with observation grids of 5 km x 5 km which were defined on 3 mediterranean sites in clear waters: “Calvi-Tête-de-canyon”, “Marseille-Friou”l and “Banyuls-Sola”, by using AQUA-MODIS satellite data from year 2012 to 2018. In the second phase (II) of the action, the validation was extended to both new sites located in semi-turbid waters: Sète-Mer on the Mediterranean coast and Oléron on the Atlantic / Gulf of Biscay coast, by using new available MODIS-DATA from year 2017 to 2020.

In the third and last Phase (III) of the LITTOSAT AQUAREF action, regarding this final report, a new trial was carried out with updated high resolution SENTINEL-OLCI data (300 meters), on the same reference site of « Calvi-Tête de canyon » for the year 2020. First OLCI results were compared to MODIS previous results, and appear very promising about the use of the ESA SENTINEL constellation in coastal areas to better identify the main Phytoplankton Groups. The prototype was next transferred to the ACRI-ST company in order to evaluate different methods of classification: linear-discriminant analysis or machine learning.

Keywords (thematic and geographical area)

Water Colour, SENTINEL, OLCI, spectral analysis, phytoplankton, composition, Mediterranean sea

1. INTRODUCTION

Au cours de la dernière décennie, les analyses spectrales effectuées sur les signaux satellitaires dits « couleur de l'eau » ont pu être corrélées à la présence de différents grands groupes phytoplanctoniques¹ identifiables grâce à leur composition pigmentaire (Demarcq et al., 2012). Deux sortes d'identification sont généralement utilisées : soit par classes de tailles directement fonction de l'amplitude des signaux, soit par analyse spectrale des données reçues sur les différentes longueurs d'ondes. Pour cette dernière, la méthode PHYSAT développée à l'Université de Lille (Alvain et al., 2007, 2010) permet d'élaborer des cartes de répartition à grande échelle sur toutes les mers du globe. Elle consiste à détecter la « signature spectrale » de chaque grand groupe phytoplanctonique dans le signal réflécté à la surface de l'eau afin de distinguer l'influence respective des cyanobactéries, des diatomées, des haptophytes ainsi que de tous les autres organismes planctoniques regroupés sous le titre « Autres nano-eucaryotes ».

Cette méthode avait été adaptée à la mer Méditerranée en se basant sur l'algorithme modifié NASA/OC3-Med qui permet d'identifier la composante principale due à la chlorophylle-a et les résultats avaient été validés par le laboratoire espagnol ICMAN-CSIC grâce à une base de données pigmentaires acquises à l'échelle du bassin méditerranéen et plus spécifiquement en Mer Ligure durant les campagnes SODYF et BOUSSOLE (Navarro et al., 2014). Plus récemment, une nouvelle version PHYSAT basée sur l'algorithme OC4-Med (*i.e.* utilisant 4 longueurs d'ondes) a été mise en œuvre par la même équipe sur tout l'espace méditerranéen, en réutilisant une base de données « images » fournie par l'Agence Spatiale Européenne après fusion sur une durée de 18 années des données provenant de différents capteurs optiques : SeaWiFS, MODIS, MERIS et VIIRS (Navarro et al., 2017). De son côté, l'Ifremer dispose à ce jour d'une base de données des niveaux de chlorophylle-a totales sur les trois zones françaises Méditerranée, Atlantique et Manche (emprises DCSMM), calculés à partir des signaux MODIS à la résolution d'un pixel par kilomètre pour la période 2010-2019, grâce à un algorithme couleur de l'eau spécifique baptisé OC5 et utilisant 5 longueurs d'ondes (Gohin et al., 2014 ; Tilstone et al., 2020).

Dans le cadre de l'action AQUAREF, nous avons appliqué la méthode PHYSAT aux données OC5 sur une emprise d'environ 25 km² afin de caractériser l'évolution annuelle de la composition phytoplanctonique à une échelle non plus régionale mais très locale et côtière.

¹ Intitulés « Phytoplanktonic Functional Types » (PFT) dans les articles scientifiques relatifs à couleur de l'eau.

Le travail effectué en phase I de l'action a permis d'affiner les tables de classification qui avaient été initialement mises au point par l'institut espagnol à l'échelle du bassin. Les résultats ainsi obtenus avec le prototype OC5-PHYSAT ont été validés sur le site de référence de Calvi en eaux claires oligotrophes avec le concours de l'Université de Liège (Goffart et al., 2015). La validation est faite par comparaison des concentrations estimées de manière algorithmique avec celles obtenues *in situ* après analyses pigmentaires HPLC des prélèvements hebdomadaires. Deux autres sites côtiers plus spécifiques, « Banyuls-Sola » et « Marseille-Frioul », ont ensuite été validés à l'aide de séries HPLC produites sur les sites d'observation SOMLIT.

La seconde phase de l'action AQUAREF/LITTOSAT avait ensuite permis de confirmer l'utilisation de l'algorithme en eaux semi-turbides sur les deux sites de « Sète-Mer » en Méditerranée et « Auger-Oléron » en Atlantique, lorsque les turbidités sont inférieures en moyenne à 15 NTU, soit au maximum environ 25 mg.L⁻¹ de matières en suspension (MES) non algales.

Dans le présent rapport nous présenterons la clôture de l'action LITTOSAT par un test d'identification locale des groupes phytoplanctoniques sur le site de référence CALVI-Tête de Canyon, à partir des données satellitaires SENTINEL-3 haute-résolution. Elles sont fournies sur une grille avec un pas de 300 m au lieu de 1 km pour MODIS. Dans la zone test qui couvre environ 25 km² on passe ainsi de 5x5 = 25 échantillons spectraux à 15x15 = 225 échantillons spectraux par jour d'observation.

2. METHODOLOGIE

La méthode employée est identique à celle précédemment mise en œuvre pour le traitement des signaux MODIS. Elle consiste dans un premier temps à générer une base de données d'observations satellitaires afin d'obtenir les concentrations journalières en chlorophylle-a totales. On utilise pour cela une version de l'algorithme OC5 (= Ocean Colour 5 longueurs d'ondes allant de 412 à 555 nm) dont les seuils de détection ont été abaissés et divisés par 10 pour la Méditerranée en limite du bruit de la mesure satellitaire, afin de générer les trois paramètres suivants :

- Chlorophylle-a totale (TCHLA) dans l'intervalle $0.1 - 10.0 \mu\text{g.L}^{-1}$,
- Matières En Suspension (MES) en mg.L^{-1} ,
- Turbidité en NTU, estimée avec un rapport fixe à $0,54 \times \text{MES}$.

Les images « couleur de l'eau » en entrée proviennent du satellite SENTINEL3-OLCI qui mesure les réflectances marines à 300 m de résolution. Elles sont fournies par l'ESA après corrections atmosphériques.

Les concentrations en chlorophylle-a obtenues en sortie d'OC5 sont estimées à l'aide d'abaques empiriques en tenant compte du rapport entre les 4 longueurs d'onde bleues et vertes. La cinquième longueur d'onde située dans le jaune permet de filtrer les points côtiers sur lesquels la MES est prépondérante. Elles sont fournies à IFREMER par la société ARGANS.

Dans un second temps, les spectres recueillis sur les 5 longueurs d'ondes sont traités avec l'algorithme prototype d'IFREMER construit sur la méthode PHYSAT. Il permet de quantifier la contribution respective des 4 principaux groupes phytoplanctoniques : cyanobactéries, diatomées, prymnésiophyces, et autres nano-eucaryotes. Les cyanobactéries étant subdivisées en *Prochlorococcus* et *Synechococcus*.

Après soustraction de la composante principale chlorophylle-a, l'algorithme OC5-PHYSAT identifie le groupe dominant de chaque pixel à partir des formes spectrales spécifiques à chacun des groupes cités ci-dessus. Le résultat final est exprimé en pourcentage sur la zone d'observation². Chaque pourcentage est ensuite multiplié par la concentration hebdomadaire totale de chlorophylle-a pour estimer approximativement la contribution de chaque groupe à la production primaire totale. Les concentrations annuelles sont calculées en nanogrammes par litre, sur 52 périodes cumulées de 7 jours pour une année d'observation.

² Par exemple 20% de diatomées signifiera que 45 spectres sur les 225 de la grille ont été classifiés comme ayant une forme spectrale dominante correspondant au groupe des diatomées.

Pour vérifier la cohérence des résultats obtenus, les variations annuelles des concentrations de chaque groupe, obtenues à partir des données SENTINEL-3, sont comparées à celles déjà obtenues sur la même zone la même année avec les données MODIS (voir table 1 ci-dessous).

<i>Site en eaux-claires</i>	<i>Données satellitaires résolution</i>	
U.Liège «Calvi Tête de canyon»	2020 (MODIS)	1000 m
U.Liège «Calvi Tête de canyon»	2020 (SENTINEL 3A+B)	300 m

Table 1. Données satellitaires disponibles sur le site retenu.

Les résultats obtenus ont pu être validés partiellement durant le bloom printanier 2020 grâce à des analyses HPLC fournies par l'Université de Liège sur le site de référence Calvi-Tête de Canyon, à partir de 8 prélèvements hebdomadaires effectués par la société STARESO.

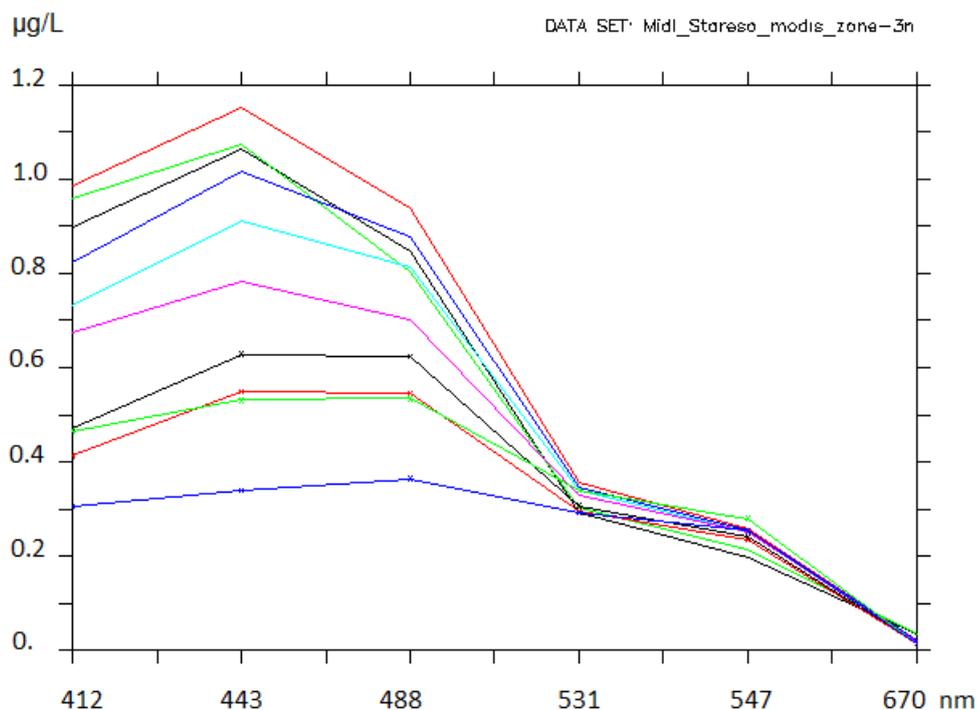
Par ailleurs, l'algorithme OC5-PHYSAT avait précédemment été calé sur des séries longues annuelles obtenues de la même manière pour la période 2012-2015.

3. CALCUL DES CONCENTRATIONS DE CHLOROPHYLLE-A TOTALE PAR OC5 SUR LE SITE DE CALVI

3.1 ADAPTATION DES SEUILS DE CHLOROPHYLLE-A POUR LES DONNEES MODIS (1 KM)

La distribution spectrale de la chlorophylle-a totale sur les 5 longueurs d'onde mesurées par le satellite (voir Tableau Annexe 2), est obtenue en moyennant quotidiennement la totalité des échantillons mesurés sur le site sélectionné, soit 25 points répartis uniformément sur une surface de 25km².

Les spectres sont ensuite cumulés sur une année entière en fonction de différents niveaux de concentrations pour tenir compte de la déformation du signal : il reste plutôt plat pour les faibles concentrations, mais peut devenir fortement décroissant entre la 3e et la 4e longueur d'onde pour les fortes concentrations, puis rester constant jusqu'à la 5e longueur d'onde. La sixième longueur d'onde située dans le rouge à 670 nm est inexploitable en zone côtière (figure 1 ci-dessous). Au total, 10 classes de mesure sont ainsi définies pour essayer de répartir au mieux les différents échantillons suivant leur amplitude de réflectance maximale.

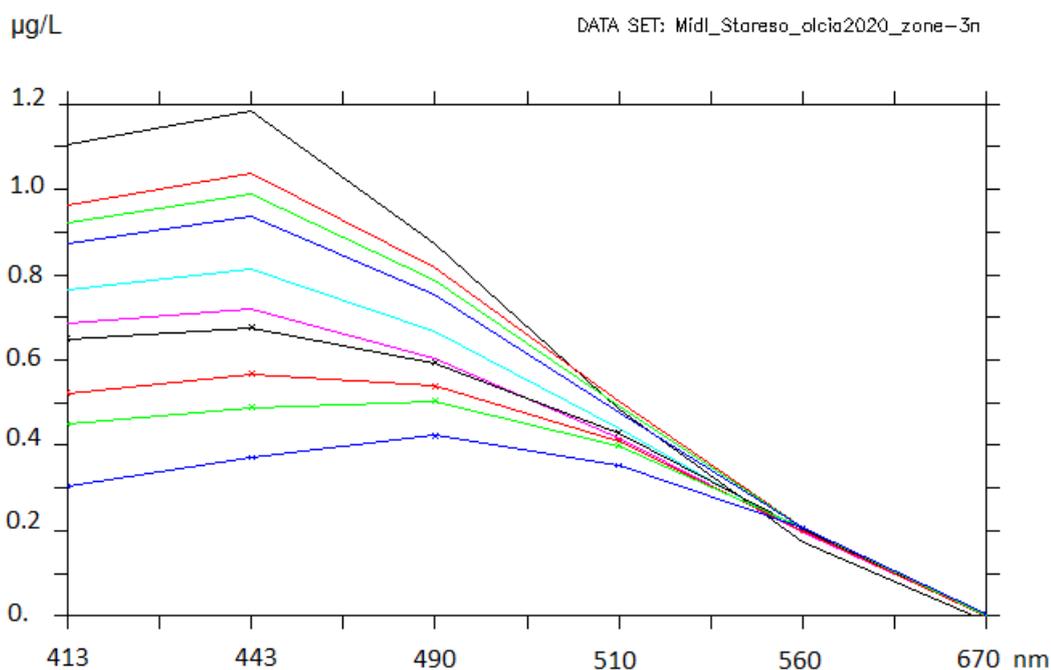


CALVI Tête de Canyon - Spectres moyens MODIS 2020

Figure 1. Abaque des spectres de chlorophylle-a totale pour 10 niveaux de concentration en fonction des 6 longueurs d'onde AQUA-MODIS.

3.2 ADAPTATION DES SEUILS DE CHLOROPHYLLE-A POUR LES DONNEES OLCI (300 M)

Les 5 longueurs d'onde mesurées par le satellite SENTINEL sont légèrement différentes de celles mesurées par le capteur MODIS. La forme spectrale est obtenue en moyennant quotidiennement la totalité des échantillons mesurés sur le site sélectionné, soit 225 points répartis uniformément sur une surface de 25km². Les spectres sont ensuite cumulés sur une année entière en fonction de différents niveaux de concentrations pour tenir compte de la déformation du signal.



CALVI Tête de Canyon - Spectres moyens OLCI A+B 2020

Figure 2. Abaque des spectres de chlorophylle-a totale pour 10 niveaux de concentration en fonction des 6 longueurs d'onde SENTINEL3-OLCI.

En première analyse, on remarque que les spectres cumulés sur les données OC5/SENTINEL3 ont meilleure allure que ceux générés par OC5/MODIS, avec une atténuation plus progressive et un saut moins brusque entre les deux longueurs d'ondes centrales 490 nm et 510 nm correspondant à la charnière bleu-vert (figure 2 ci-dessus).

Pour les faibles concentrations, là aussi les spectres font mieux ressortir le maximum d'absorption de la chlorophylle-a dans les faibles longueurs d'onde (correspondant par inversion à la réflectance minimale sur le 413 nm et 490 nm). Enfin, les cumuls spectraux pour les niveaux 1 à 10 sont mieux dissociés et quasiment sans croisements pour les 4 premières longueurs d'onde.

Les dix seuils de chlorophylle-a qui ont été appliqués pour générer les abaques de réflectivité MODIS et OLCI sont les suivants :

0.09, 0.10, 0.11, 0.13, 0.14, 0.18, 0.22, 0.27, 0.40, et 1.25 µg.L⁻¹.

4. COMPARAISON DES RESULTATS OC5-PHYSAT ENTRE MODIS ET SENTINEL3 POUR CHAQUE GROUPE PHYTOPLANCTONIQUE

Pour vérifier la cohérence des résultats obtenus avec le jeu de données ESA/SENTINEL-OLCI, la distribution annuelle des concentrations obtenues pour chaque groupe phytoplanctonique a été comparée avec celle issue du jeu de données NASA/AQUA-MODIS.

Les emprises sur le site Calvi-Tête de Canyon sont identiques pour les deux satellites. Pour le capteur couleur de l'eau MODIS la grille contient 25 spectres à 1 km de résolution et pour le capteur OLCI (A+B) il contient 225 spectres à 300 m de résolution. Chaque pixel MODIS correspond approximativement au centre d'une maille d'observation d'environ 1km x 1km.

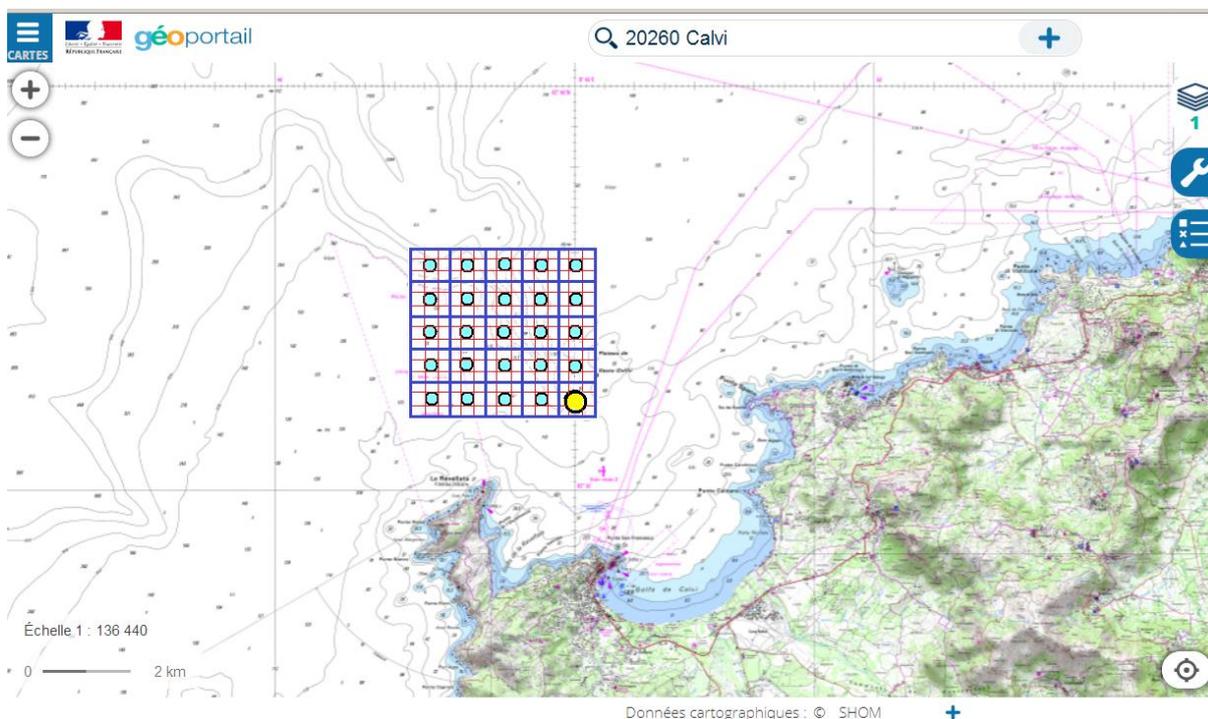


Figure 3. Localisation de la grille d'observation de 25 km² « Tête de canyon » en Baie de Calvi.

- point jaune = point de prélèvement de l'Université de Liège
- points bleus = pixels de la grille d'observation MODIS
- traits bleus = grille MODIS, résolution 1km
- traits rouges = grille OLCI, trois fois plus dense, résolution 300m

4.1 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS EN CHLOROPHYLLE-A TOTALES

Les graphes des données annuelles présentés ci-dessous en figure 4, montrent les concentrations en chlorophylle-a totales résultant du traitement par OC5 des mesures MODIS (trait fin) et des mesures OLCI (trait épais) pour l'année 2020. Les amplitudes des concentrations sont moyennées spatialement dans la grille 5km x 5km située au niveau du Canyon sous-marin (voir Figure 3).

Dans les deux cas, le maximum de concentration se situe à environ 650 ng.L⁻¹ ce qui est faible par rapport aux années précédentes mais réaliste compte-tenu de la baisse de production primaire constatée en mer méditerranée depuis 2015 et de la mesure *in situ* réalisée pendant le bloom printanier au niveau de la Tête de Canyon. La présence de nuages en 16^{ème} semaine occulte les données OLCI alors que le capteur MODIS qui bénéficie d'une fauchée plus large, permet d'obtenir des données en limite de la couverture nuageuse³.

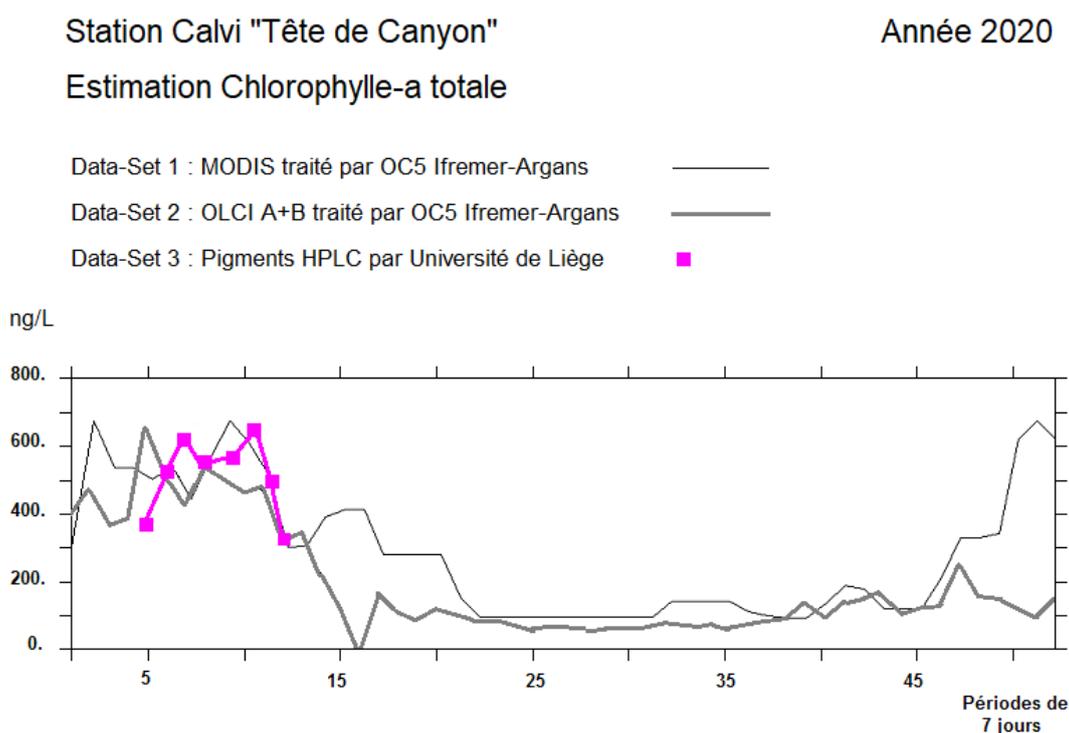


Figure 4. Comparaison des concentrations hebdomadaires de chlorophylle-a totale moyennées sur 7 jours pour le site Calvi -Tête de canyon, estimées par OC5 sur données Aqua-MODIS et Sentinel3-OLCI.

³ La couverture MODIS avec une bande de 2330 km, est plus importante que celle d'OLCI qui observe sur deux bandes de 1270 km chacune - satellites A et B - mais avec un chevauchement important.

La mesure HPLC sur les 8 prélèvements *in situ* réalisés durant le bloom printanier (en rose figure 4) fait bien apparaître le double pic caractéristique de chlorophylle-a en 7^{ème} et 11^{ème} semaine. Le premier pic est mieux vu plus au large par Sentinel3 en 5^{ème} semaine, tandis que le second pic est mieux vu par MODIS en 10^{ème} semaine.

A la fin du printemps et durant l'été, entre les semaines 16 et 40, la concentration reste faible et constante, en limite de sensibilité du capteur à environ 100 ng.L⁻¹. Pour les semaines 40 à 50 qui correspondent à l'automne, les mesures obtenues par les deux satellites sont très différentes. AQUA-MODIS observe une reprise très nette de la production à partir de mi-novembre en 47^{ème} semaine atteignant 600 ng.L⁻¹ fin décembre, tandis que SENTINEL-OLCI ne perçoit qu'un léger pic à environ 250 ng.L⁻¹ début décembre en 48^{ème} semaine qui retombe en fin d'année.

4.2 COMPARAISON DES CONCENTRATIONS EN PIGMENTS SECONDAIRES

Pour obtenir les courbes annuelles correspondant à chacun des 4 groupes dominants, les pixels d'image obtenus chaque jour à midi avec le satellite héliosynchrone ont été moyennés spatialement sur toute la grille 5 km x 5 km, à partir d'images satellitaires « krigées » et interpolées qui permettent d'obtenir une continuité des données dans les zones où la couverture nuageuse n'est pas trop importante. Les données obtenues ont ensuite été moyennées temporellement sur une période d'une semaine, afin de pouvoir être comparées avec les prélèvements *in situ* hebdomadaires.

Les cinq groupes distingués par l'algorithme de classification OC5-PHYSAT sont dans l'ordre les cyanobactéries séparées en *Prochlorococcus* et *Synechococcus*, les diatomées, les prymnésiofycées et enfin les autres nano-eucaryotes regroupant toutes les cellules ayant une réponse spectrale plutôt « plate », c'est à dire d'amplitude assez faible et constante. La correspondance entre les 4 grands groupes phytoplanctoniques et les pigments contenus dans les cellules de micro-algues est donnée dans la table 2 ci-dessous.

Groupe (PFT)	Pigments associés
Cyanobactéries	zéaxanthine + divinyl-chlorophylle a
Diatomées	fucoxanthine
Haptophytes	19'HF (HexanoyloxyFucoxanthine)
Autres	péridine + prasinoxanthine + alloxanthine + violaxanthine + 19'BF (ButanoyloxyFucoxanthine)

Table 2. Liste des pigments associés à chaque grand groupe phytoplanctonique.

4.2.1 Concentrations estimées en cyanobactéries de type *Prochlorococcus*

Concernant les cyanobactéries de type *Prochlorococcus*, le pic printanier est estimé à environ 50 ng.L⁻¹ en 8^{ème} semaine fin février dans les données OLCI alors qu'il n'était pas réellement détecté par MODIS (figure 5 ci-dessous).

En revanche, le capteur de la NASA observe un second pic automnal à environ 25 ng.L⁻¹ début septembre en 35^{ème} semaine. Il apparaît beaucoup plus tard dans les données de l'ESA début décembre en 48^{ème} semaine.

La mesure *in situ* effectuée durant le bloom montre que le traitement sur les données Sentinel améliore nettement l'estimation OC5-Physat qui, aux périodes nuageuses près, suit parfaitement « l'enveloppe » du signal *in situ*.

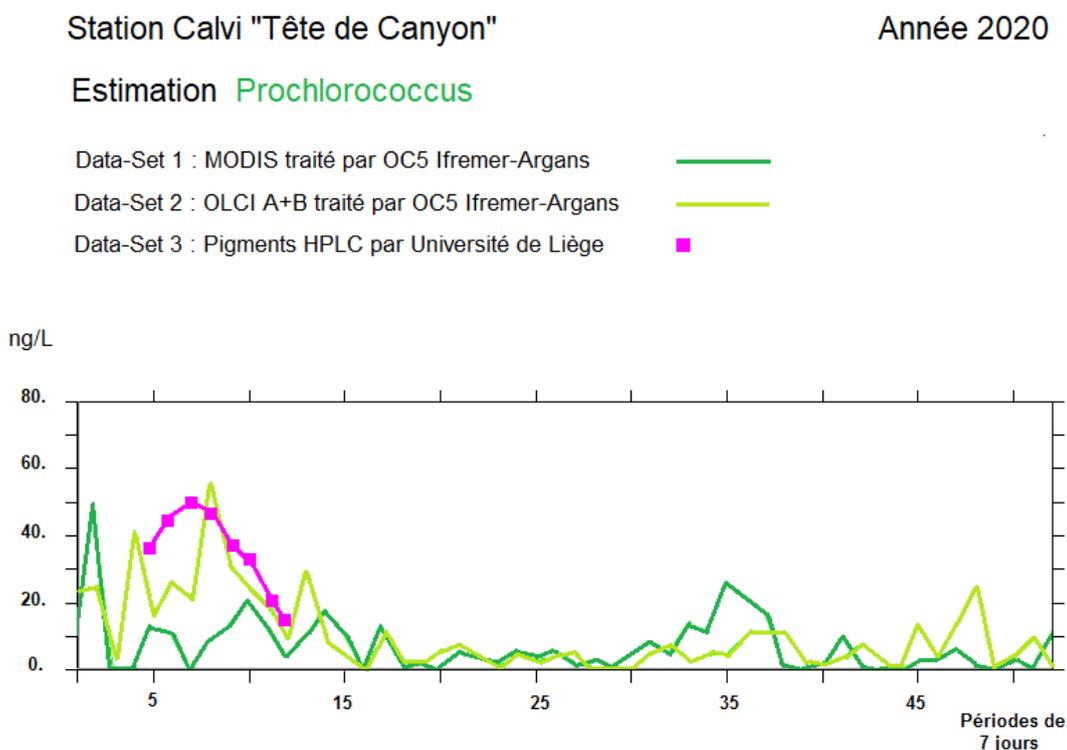


Figure 5. Concentrations de *Prochlorococcus* moyennées sur 7 jours pour le site de Calvi -Tête de canyon. Avec données Aqua-MODIS résolution 1 km (vert foncé), avec données Sentinel3-OLCI résolution 300 m (vert clair).

4.2.2 Concentrations estimées en cyanobactéries de type *Synechococcus*

Concernant les cyanobactéries de type *Synechococcus*, le pic printanier est estimé à 120 ng.L^{-1} en 15^{ème} semaine (début avril) avec les données MODIS, et à 120 ng.L^{-1} en 14^{ème} semaine (début avril) avec les données OLCI. La décroissance est brutale début mai en raison d'un manque de données qui s'observe également sur la chlorophylle-a totale pour Sentinel3, qui correspond à une période nuageuse rendant le satellite quasi « aveugle » en 16^{ème} semaine. Le signal reste ensuite plus plat jusqu'à la fin de l'année et sans pic automnal.

Comme déjà remarquée pour les *Prochlorococcus*, MODIS détecte une reprise de l'activité des cyanobactéries fin août en 34^{ème} semaine.

La mesure *in situ* effectuée durant le bloom se situe entre les deux estimations satellitaires. Il faut cependant noter que les concentrations pigmentaires pour ce sous-groupe de cyanobactéries ont été évaluées par soustraction des concentrations en divinyl-chlorophylle-a à celles de la zéaxanthine, ce qui augmente l'incertitude sur le résultat.

Station Calvi "Tête de Canyon"

Année 2020

Estimation *Synechococcus*

Data-Set 1 : MODIS traité par OC5 Ifremer-Argans ———
Data-Set 2 : OLCI A+B traité par OC5 Ifremer-Argans ———
Data-Set 3 : Pigments HPLC par Université de Liège ■

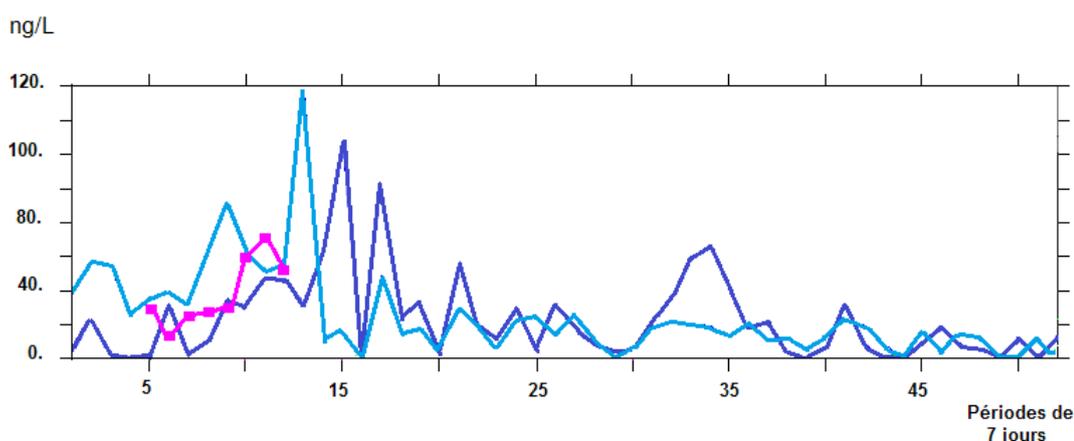


Figure 6. Concentrations de *Synechococcus* moyennées sur 7 jours pour le site de Calvi -Tête de canyon. Avec données Aqua-MODIS résolution 1 km (bleu foncé) , avec données Sentinel3-OLCI résolution 300 m (bleu clair).

4.2.3 Concentrations estimées en diatomées

Le bloom printanier des diatomées apparaît de manière « compacte » dans le traitement des données SENTINEL3, avec un maximum visible de 120 ng.L⁻¹ début février en 5^{ème} semaine (figure 7 ci-dessous), tandis que l'estimation sur les données MODIS ne fait apparaître que 3 pics successifs liés aux précipitations dans ce secteur. Par ailleurs, le second bloom automnal qui était détecté par AQUA-MODIS n'apparaît pas dans les données OLCI lorsque la luminosité baisse en hiver.

La mesure *in situ* effectuée durant le bloom printanier montre des concentrations en diatomées extrêmement faibles, mais dont les deux pics en 7^{ème} et 11^{ème} semaine sont bien en correspondance avec l'estimation MODIS. Il y a un rapport d'environ 2 entre les concentrations obtenues au point de mesure et celles estimées plus au large dans le Canyon par OC5-Physat, ce qui avait été également constaté en 2014 dans la première phase de l'action⁴.

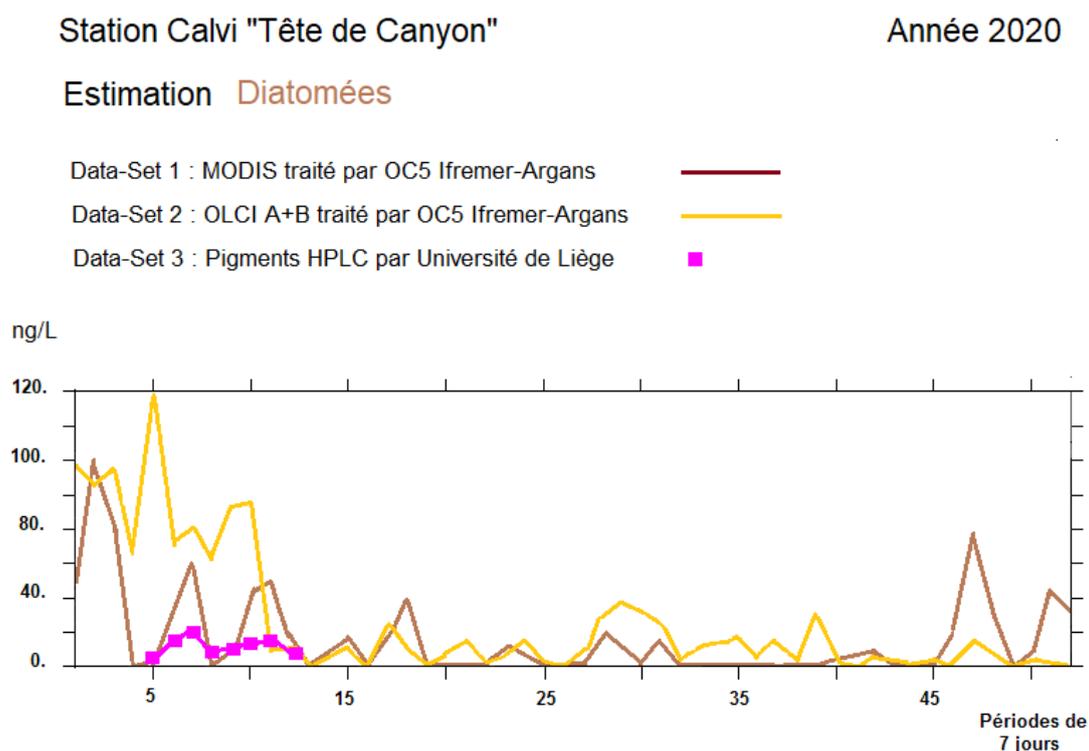


Figure 7. Concentrations du groupe Diatomées moyennées sur 7 jours pour le site de Calvi -Tête de canyon. Avec données Aqua-MODIS résolution 1 km (en marron) , avec données Sentinel3-OLCI résolution 300 m (en jaune).

⁴ Voir rapport IFREMER précédent : https://www.aquaref.fr/system/files/AQUAREF_2019_B1.9_LITTOSAT-Phase1_VF_0.pdf

4.2.4. Concentrations estimées en prymnésiophycées

La forme de la distribution obtenue au printemps avec le jeu de données SENTINEL3-OLCI sur le groupe des prymnésiophycées, se superpose approximativement à celle obtenue à partir des mesures *in situ* entre la 7^{ème} et la 12^{ème} semaine avec un maximum d'environ 160 ng.L⁻¹ pour les estimations HPLC et environ 170 à 180 ng.L⁻¹ pour les deux capteurs satellite. La distribution issue des données OLCI est plus compacte avec moins de trous dans l'identification des spectres et correspond mieux aux données issues du traitement HPLC avec 2 pics en 5^{ème} et 12^{ème} semaine.

Comme pour les cyanobactéries, MODIS fait apparaître un pic de production modéré fin août en 35^{ème} semaine, tandis que le capteur OLCI détecte un pic à 60 ng.L⁻¹ beaucoup plus tard fin octobre en 44^{ème} semaine.

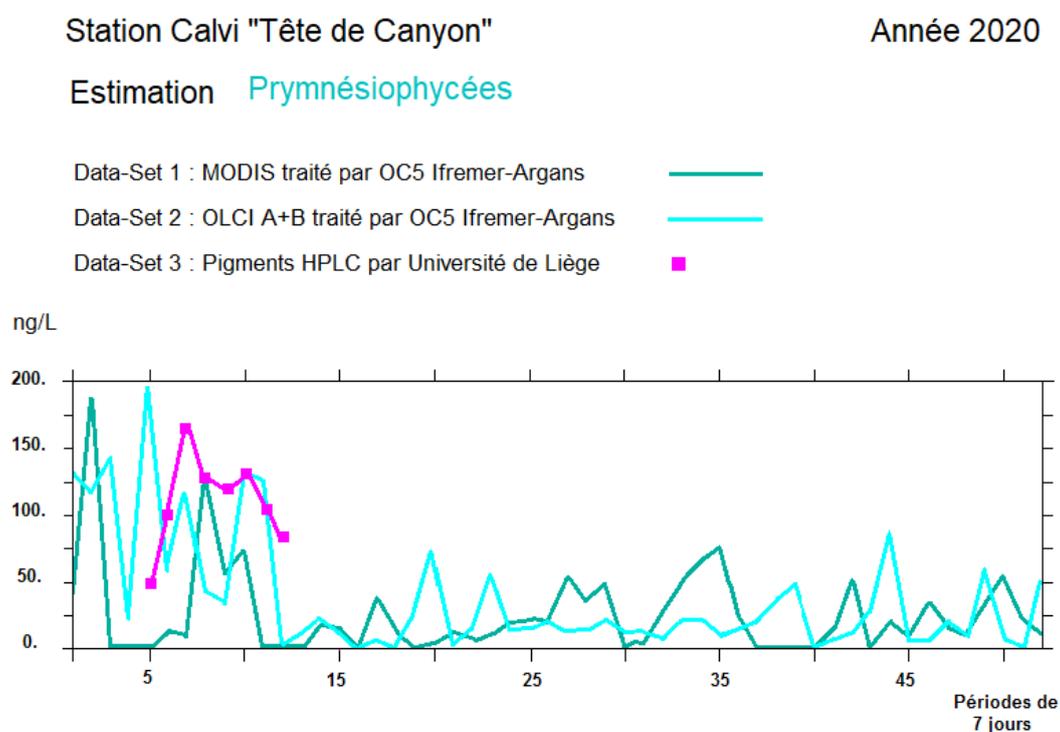


Figure 8. Concentrations du groupe Prymnésiophycées moyennées sur 7 jours pour le site Calvi -Tête de canyon. Avec données Aqua-MODIS résolution 1 km (en vert-bleu), avec données Sentinel3-OLCI résolution 300 m (en bleu clair)

4.2.5. Concentrations estimées en autres bactéries (nano-eucaryotes)

Pour toutes les autres espèces confondues qui ont été regroupées sous le titre « Autres nano-eucaryotes », des différences importantes sont constatées comme cela avait déjà été noté précédemment. La faiblesse du signal de réflectance caractéristique de ce groupe et l'accumulation d'incertitudes pour les longueurs d'onde supérieures à 531 nm, ainsi que la présence de nuages peuvent expliquer ces différences. Par ailleurs l'échelle des valeurs pour Sentinel3-OLCI est

supérieure : de 160 à 200 ng.L⁻¹ contre 60 à 100 ng.L⁻¹ pour Aqua-MODIS. La période correspondant aux concentrations maximales de début d'année est plus courte qu'avec MODIS et les concentrations diminuent fortement à partir de la 10^{ème} semaine. La période automnale est moins erratique et montre une progression constante vers le seuil de 100 ng.L⁻¹ jusqu'en 47^{ème} semaine.

La mesure *in situ* effectuée durant le bloom montre là aussi que l'utilisation des données Sentinel améliore nettement l'estimation OC5-Physat, lorsqu'on regarde « l'enveloppe » du signal obtenu. Cela peut s'expliquer par une meilleure détection des spectres propres aux dinoflagellés grâce à une plus grande sensibilité du capteur OLCI, et un décalage opportun des longueurs d'ondes dans la bande jaune-vert (voir tableau en annexe 2).

Station Calvi "Tête de Canyon"

Année 2020

Estimation Autres Nanoeucaryotes

- Data-Set 1 : MODIS traité par OC5 Ifremer-Argans —
- Data-Set 2 : OLCI A+B traité par OC5 Ifremer-Argans —
- Data-Set 3 : Pigments HPLC par Université de Liège ■

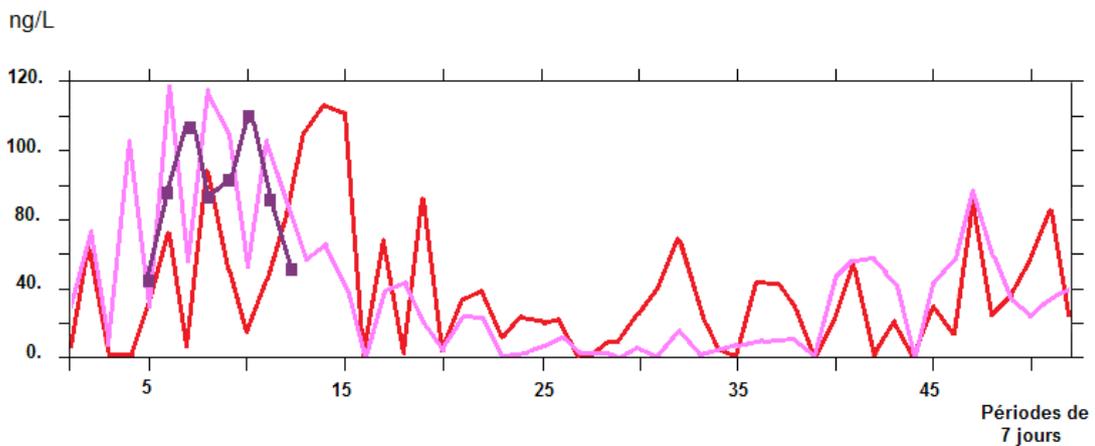


Figure 9. Concentrations des Autres nano-eucaryotes moyennées sur 7 jours pour le site de Calvi -Tête de canyon. Avec données Aqua-MODIS résolution 1 km en haut, avec données Sentinel3-OLCI résolution 300 m en bas.

5. CONCLUSION

Le travail de validation algorithmique mené précédemment pour l'action AQUAREF-LITTOSAT (phases I et II) avait permis de montrer que le prototype OC5-PHYSAT pouvait être utilisé sur des zones géographiques très locales réduites à 25 km². L'algorithme de classification avait été calibré en eaux-claires sur le site de référence situé en « Tête de Canyon » au large de Calvi, pour lequel des séries longues de données HPLC étaient disponibles de 2012 à 2015. Il avait ensuite été adapté aux eaux semi-turbides pour le site de Sète en méditerranée et d'Oléron en atlantique.

Pour la phase III de l'action LITTOSAT détaillée dans le présent rapport, nous avons comparé les résultats obtenus à l'aide des jeux de données satellitaires MODIS et OLCI de résolutions différentes : 1 km pour le premier et 300 m pour le second. La grille d'observation satellitaire a été maintenue à 25 km² afin de travailler sur une masse d'eau aux propriétés homogènes. Les deux grilles comprennent donc 25 observations spectrales pour MODIS, et 225 observations spectrales pour OLCI. Les quelques analyses HPLC qui ont pu être effectuées sur prélèvement *in situ* en 2020, ont permis de calibrer une partie des résultats obtenus avec le prototype OC5-PHYSAT qui est maintenant suffisamment robuste pour traiter indifféremment les deux sources de données.

Les données OLCI 2020 fournies par Argans proviennent de jeux de données corrigées par l'ESA en 2022 et correspondent à la fusion des mesures fournies par les deux satellites Sentinel3-A et Sentinel3-B. On peut d'ores et déjà remarquer que ces données « Haute-Résolution » sont de bonne qualité et permettent d'obtenir des résultats plus précis que MODIS grâce à un nombre de spectres plus important pour la même surface d'observation dans le secteur de Calvi. Le capteur n'est pas mis en défaut sur ce site très côtier durant l'observation du bloom printanier pour trois des quatre groupes principaux. On remarque que la dynamique annuelle des cyanobactéries est observée de manière plus précise avec le capteur OLCI, notamment pour les *Prochlorococcus*. Pour le groupe des prymnésiophycées, les estimations au printemps sont plus compactes avec moins de « trous » dans les distributions annuelles et sont plus représentatives des phénomènes réellement observables *in situ* durant la phase de bloom. De même, pour les autres nano-eucaryotes, la croissance et la décroissance printanière centrée sur la 7^{ème} semaine apparaît de manière plus évidente que dans le traitement des signaux MODIS. En revanche, le quatrième groupe des diatomées est nettement sur-évalué par OC5-Physat avec les données Sentinel3 et il serait nécessaire d'investiguer plus avant les signaux du capteur OLCI dans les longueurs d'onde concernées. L'observation du bloom automnal est également moins franche qu'avec MODIS, et nécessiterait peut-être des corrections algorithmiques sur les données brutes lorsque la luminosité diminue en début de période hivernale.

Ces premiers résultats sont néanmoins prometteurs pour l'utilisation des données Sentinel3 en zones très côtières.

REMERCIEMENTS

J'adresse mes sincères remerciements à tous ceux qui ont permis de mener à bien l'action LITTOSAT depuis 2019 en trois phases successives jusqu'à sa clôture en 2023 dans les meilleures conditions :

à Rémi Buchet et Emmanuel Ponzevera de l'équipe AQUAREF d'IFREMER Nantes, qui ont facilité le démarrage et le suivi de cette action, ainsi qu'à Thomas Le Roi et Philippe Nicolas pour la gestion financière,

à la société STARESO de Calvi et à son personnel qui ont pu réaliser les prélèvements *in situ* nécessaires en temps voulu malgré les conditions météorologiques incertaines et les aléas liés à la période Covid19,

à Anne Goffart de l'Université de Liège en Belgique, avec qui nous avons mis au point cette action sur la base de ses travaux antérieurs réalisés pour la période 2012-2015 et qui a traité puis analysé en laboratoire les différents prélèvements effectués ensuite,

à l'équipe du LERPAC IFREMER résidant en Corse ainsi qu'au LERPC IFREMER de La Tremblade qui ont soutenu et complété une partie de ces travaux dans le cadre des actions Marittimo, de la collaboration avec le Parc Naturel du Cap Corse, et plus généralement du programme IFREMER de surveillance de la qualité des eaux en Méditerranée et Atlantique,

à Francesca Vidussi du laboratoire MARBEC de l'Université de Montpellier qui a mis à notre disposition les mesures *in situ* des points SOMLIT en Occitanie et région SUD pour la validation des zones semi-turbides,

à la société ARGANS dans son ensemble pour leur expertise et à Philippe Bryère en particulier qui nous a fourni les données satellitaires d'entrée et les processus de lecture des données ayant grandement facilité la mise en place de l'algorithme OC5-Physat,

à Francis Gohin du service IFREMER DYNECO à Brest qui, avant son départ en retraite, avait activement soutenu la valorisation de l'algorithme OC5 et la mise en place des outils logiciels nécessaires,

à la société ACRI de Sophia Antipolis, et notamment à Antoine Mangin avec qui nous avons une collaboration de longue date ainsi qu'à Marine Bretagnon pour les échanges finaux sur l'analyse spectrale et les outils d'apprentissage automatique qui pourront un jour prendre le relais,

à l'équipe informatique IFREMER Datarmor de Brest qui tous les jours assure la bonne marche des équipements de calcul intensif requis pour le traitement des données satellitaires et enfin à Dorothée Vincent de l'OFB à Brest qui nous a fait confiance dès le départ pour mener l'action LITTOSAT.

GLOSSAIRE

Couleur de l'eau : désigne un ensemble de capteurs et d'algorithmes permettant de reconstituer le spectre de réflectance dans le domaine de la lumière visible. Il s'agit d'un spectre discret et non continu comportant un nombre restreint de bandes (de 5 à 8 longueurs d'onde en général).

Oligotrophe : Un milieu oligotrophe du grec oligo, « peu », et trophein, « nourrir », est un milieu particulièrement pauvre en éléments nutritifs. C'est le contraire d'un milieu eutrophe.

Imagerie hyperspectrale : L'imagerie hyperspectrale est une technique combinant l'imagerie et la spectroscopie où chaque image est prise pour une bande étroite du spectre électromagnétique.

Groupe dominant : il s'agit du groupe phytoplanctonique dont la signature spectrale est reconnaissable au point d'observation satellitaire. Il ne peut y avoir qu'un seul groupe observé à un temps t (12h00 pour le satellite héliosynchrone)

Orbite héliosynchrone : désigne une orbite satellitaire dont on choisit l'altitude et l'inclinaison de sorte que l'angle entre le plan d'orbite et la direction du Soleil demeure quasiment constant. Un satellite placé sur une telle orbite passe au-dessus d'un point de la surface terrestre donné à la même heure solaire locale (en général à midi pour avoir le maximum de réflectance solaire).

Réflectance : c'est la proportion de lumière réfléchi par la surface de la mer (flux lumineux réfléchi / flux lumineux incident).

SIGLES ET ABREVIATIONS

U.E. : Union Européenne

ESA : European Spatial Agency (Agence spatiale européenne)

NASA : National Aeronautics and Space Administration (Agence spatiale américaine)

COPERNICUS : Programme de l'U.E. destiné à collecter des données sur l'état de la terre

AQUA : Satellite américain dédié à l'étude du cycle de l'eau sur la terre lancé en 2004

SENTINEL : Famille de satellites européens dédiés au programme COPERNICUS

SENTINEL-3 A+B : Satellites européens jumeaux dédiés à la surveillance de l'environnement

MODIS : capteur couleur de l'eau du satellite américain AQUA de la NASA

OLCI : capteur couleur de l'eau du satellite européen SENTINEL3 de l'ESA

HPLC : Chromatographie liquide haute-performance (haute-pression)

OC3 / OC4 : Ocean Colour algorithm 3 or 4 bands © Nasa/Esa

OC5 : Ocean Colour algorithm 5 bands © Ifremer

PFT : Plancton Functional Types (Grands groupes phytoplanctoniques)

DV-Chla : Pigment divinyle-chlorophylle-a

CHLA : Pigment chlorophylle-a

TCHLA : Chlorophylle-a totale

PHYSAT : Méthode de discrimination des PFT par analyse spectrale de la couleur de l'eau

ARGANS : Société d'ingénierie satellitaire basée en Angleterre et à Brest, filiale du groupe ACRI

ACRI-ST : Société d'ingénierie basée à Sophia-Antipolis, filiale du groupe ACRI et spécialisée dans la gestion des données d'observation de la Terre

STARESO : Station de Recherches Sous-marines et Océanographiques de Calvi - Punta Revellata

BIBLIOGRAPHIE

Alvain, S., 2007. Étude de la distribution des principaux groupes de phytoplancton par télédétection satellitaire : **Développement de la méthode PHYSAT** à partir des données GeP&CO et application à l'archive SEAWIFS entre 1998 et 2004. Climatologie. Thèse de l'Université Paris-Diderot - Paris VII, 2005, <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00157372>

Alvain, S., Moulin, C., Dandonneau, Y., Loisel, H., 2008. **Seasonal distribution and succession of dominant phytoplankton groups in the global ocean: A satellite view**. Global Biogeochemical Cycles 22 (3), GB3001. <https://doi.org/10.1029/2007GB003154>

Coudray, S., 2019, **Application croisée de méthodes analytiques et innovantes pour déterminer la composition phytoplanctonique à large échelle, Signature pigmentaire du phytoplancton et imagerie satellitaire couleur de l'eau**, rapport final convention IFREMER-AFB ONEMA 2018-2019, RST.ODE/UL/LER-PAC 2019.

Goffart, A., 2019, **Application croisée de méthodes analytiques et innovantes pour déterminer la composition phytoplanctonique à large échelle**, rapport de l'Université de Liège pour IFREMER & AFB-ONEMA. [https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/233014/1/AGoffart Action 3 OC5-Physat 190403F.pdf](https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/233014/1/AGoffart>Action%203%20OC5-Physat%20190403F.pdf)

Gohin, F., Bryère, P., Perrot, L., 2014. **A new procedure for interpolating satellite-derived suspended particulate matters within the Previmex context**, Mercator Newsletter - q. Newsl. 49, 26-28, <https://archimer.ifremer.fr/doc/00197/30799/29168.pdf>

Gohin, F., Bryère, P., Lefebvre, A., Sauriau, P., Savoye, N., Vantrepotte, V., Bozec, Y., Cariou, T., Conan, P., Coudray, S., Courtay, G., Françoise, S., Goffart, A., Hernández Fariñas, T., Lemoine, M., Piraud, A., Raimbault, P., Rétho, M., 2020.

Navarro, G., Alvain, S., Vantrepotte, V., Huertas, I.E., 2014. **Identification of dominant phytoplankton functional types in the Mediterranean Sea based on a regionalized remote sensing approach**. Remote Sensing of Environment 152, 557-575. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.029>

Navarro, G., Almaraz, P., Caballero, I., Vazquez, A., Huertas, I.E., 2017. **Reproduction of Spatio-Temporal Patterns of Major Mediterranean Phytoplankton Groups from Remote Sensing OC-CCI Data**. Frontiers in Marine Science 4. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00246>

Tilstone, G., Mallor-Hoya, S., Gohin, F., Belo Couto, A., Sá, C., Goela, P., Cristina S., Airs, R., Icely, J., Zühlke, M., Groom, S., **Which ocean colour algorithm for MERIS in North West European waters?**, Remote Sensing of Environment, Volume 189, February 2017, Pages 132-151, ISSN 0034-4257, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.012>.

TABLES DES ILLUSTRATIONS

Figure 1. Abaque des spectres de chlorophylle-a totale pour 10 niveaux de concentration en fonction des 6 longueurs d'onde
Aqua-MODIS.

Figure 2. Abaque des spectres de chlorophylle-a totale pour 10 niveaux de concentration en fonction des 6 longueurs d'onde
Sentinel3-OLCI.

Figure 3. Localisation de la grille d'observation de 25 km² « Tête de canyon » en Baie de Calvi.

Figure 4. Comparaison des concentrations hebdomadaires de chlorophylle-a totale moyennées sur 7 jours pour le site
Calvi -Tête de canyon, estimées par OC5 sur données Aqua-MODIS et Sentinel3-OLCI.

Figure 5. Concentrations de *Prochlorococcus* moyennées sur 7 jours pour le site de Calvi -Tête de canyon.

Figure 6. Concentrations de *Synechococcus* moyennées sur 7 jours pour le site de Calvi -Tête de canyon.

Figure 7. Concentrations du groupe Diatomées moyennées sur 7 jours pour le site de Calvi -Tête de canyon.

Figure 8. Concentrations du groupe Prymnésiophycées moyennées sur 7 jours pour le site de Calvi-Tête de canyon.

Figure 9. Concentrations des Autres Nano-eucaryotes moyennées sur 7 jours pour le site de Calvi-Tête de canyon.

Table 1. Données satellitaires disponibles sur le site retenu.

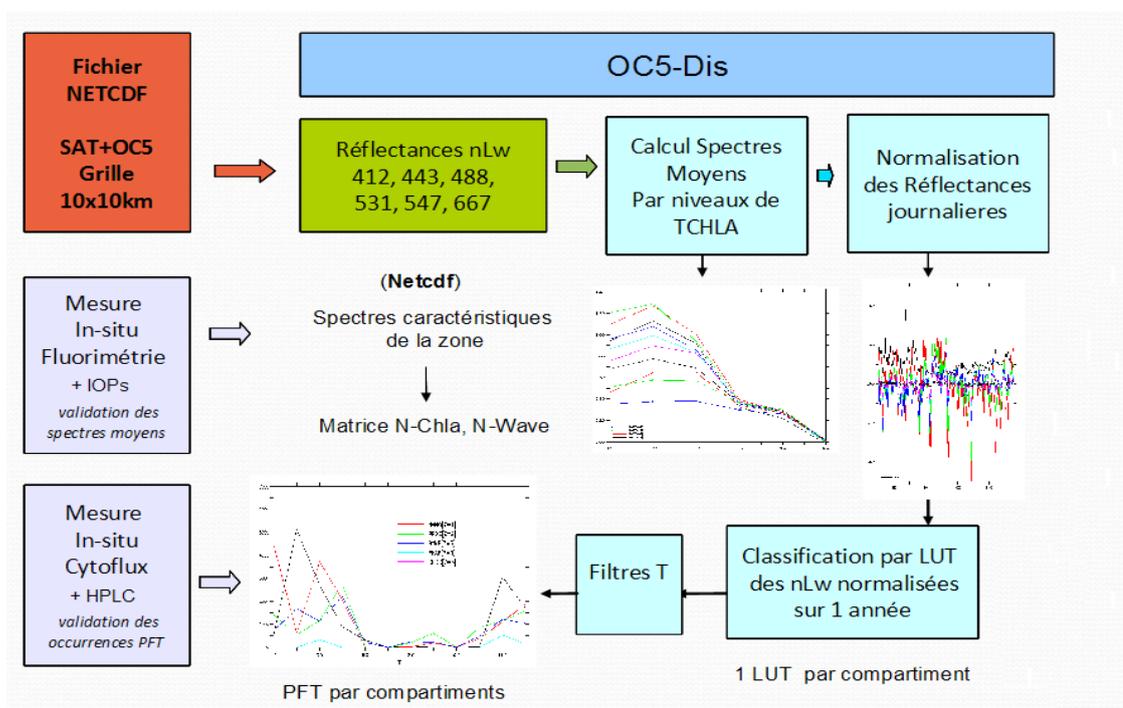
Table 2. Liste des pigments associés à chaque grand groupe phytoplanctonique.

ANNEXE 1 - DETAILS D'IMPLANTATION DU PROTOTYPE OC5-PHYSAT

La méthode PHYSAT, telle qu'elle est décrite dans (Navarro, 2014) est constituée des cinq étapes suivantes :

- Calcul des 10 spectres moyens de CHLA totales sur toute la zone par niveau observé. L'échelle est adaptée empiriquement pour le site en question.
- Normalisation des réflectances journalières par soustraction des spectres moyens à tous les points satellite de la zone et par échelle de niveaux. On enlève ainsi la composante du signal correspondant au pigment chlorophylle-a pour ne conserver que les anomalies correspondant aux autres pigments.
- Classification de tous les échantillons à l'aide d'un tableau de correspondance (Look-Up Table = LUT) contenant les coefficients charnières de chaque groupe (PFT) en fonction des différentes longueurs d'onde séparatrices (réflectances) pour une année entière.
- Filtrage des échantillons classifiés pour éliminer les identifications suspectes ou erronées.
- Tracé des pourcentages d'apparition de chaque PFT après cumuls mensuels ou hebdomadaires.

Elle a été reprise par IFREMER et adaptée à OC5 en fonction du synoptique suivant :



ANNEXE 2 - TABLE DES COEFFICIENTS D'ANOMALIES PHYSAT

Les coefficients charnières des rapports d'anomalies utilisés pour la discrimination spectrale sont ceux mis au point pour le site de Calvi sur un échantillon de référence comprenant 4 années de mesures consécutives 2012-2015, présentés dans la table ci-dessous.

Espèces	Violet	Bleu-Cyan	Vert-Jaune	Critères additionnels
Longueurs d'onde MODIS	412 nm	(443+488) nm	(531+547) nm	
Longueurs d'onde OLCI	413 nm	(443+490) nm	(510+560) nm	
Nano-eucaryotes type 1 min.	0.2000	0.3000	0.3000	Niveaux de réflectances très faibles
Nano-eucaryotes type 1 max.	0.9000	0.9600	1.1000	
Nano-eucaryotes type 2 max.	0.9001	0.3000	0.3000	Niveaux de réflectances faibles
Nano-eucaryotes type 2 max.	1.0000	0.8500	0.8500	
<i>Prochlorococcus</i> min.	0.6000	0.8501	0.8501	Cyan ~ Vert et Ra < 1 443nm faible + pic 488nm
<i>Prochlorococcus</i> max.	1.2000	1.1000	1.2500	
<i>Synechococcus</i> min.	0.7000	0.9800	0.9800	Cyan ~ Vert et Ra > 1 443nm = 488nm faibles
<i>Synechococcus</i> max.	1.2001	1.5001	1.1601	
Diatomées min.	1.1000	1.0200	1.0500	Cyan < Vert : 412nm < 443nm et 488nm > 547nm
Diatomées max.	3.0001	1.6565	1.5001	
Prymnésiophycées min.	0.8000	1.3666	1.3999	Niveaux de réflectances forts (avec coque CaCO3)
Prymnésiophycées max.	3.0001	1.5667	1.6001	

N.B. Ces coefficients correspondent à des rapports d'anomalie (sans dimension) ayant été définis de la façon suivante :

Avec MODIS : $\text{Radiance_anomalies}(\lambda) = \text{réflectance_modis } nLw(\lambda) / Tchl\alpha\text{-moyenne}(\lambda)$
avec $\lambda_{\text{bleu}} = 412$, $\lambda_{\text{cyan}} = (443 + 488) / 2$, $\lambda_{\text{vert}} = (531 + 547) / 2$.

Avec OLCI : $\text{Radiance_anomalies}(\lambda) = \text{réflectance_modis } nLw(\lambda) / Tchl\alpha\text{-moyenne}(\lambda)$
avec $\lambda_{\text{bleu}} = 413$, $\lambda_{\text{cyan}} = (443 + 490) / 2$, $\lambda_{\text{vert}} = (510 + 560) / 2$.

Les nano-eucaryotes ont été fractionnés de manière empirique en deux sous-groupes de formes spectrales légèrement différentes.

Des intersections ont été introduites entre les plages spectrales pour tenir compte des signaux ambigus sans les éliminer.

Les valeurs de concentrations hebdomadaires pour chaque groupe (en ng.L⁻¹) sont ensuite estimées en multipliant le pourcentage d'occurrences en tant que groupe dominant dans l'échantillon total, par la concentration totale moyenne en chlorophylle-a sur la grille d'observation.

ANNEXE 3 - TABLE DE CORRESPONDANCE N° SEMAINES / JOURS

Correspondance entre numéros de périodes de 7 jours (semaines légèrement décalées)
et les dates du calendrier pour les années bissextiles (2016, 2020)

semaine 01	1er Janvier	7 Janvier
semaine 02	8 Janvier	14 Janvier
semaine 03	15 Janvier	21 Janvier
semaine 04	22 Janvier	28 Janvier
semaine 05	29 Janvier	4 Février
semaine 06	5 Février	11 Février
semaine 07	12 Février	18 Février
semaine 08	19 Février	25 Février
semaine 09	26 Février	3 Mars
semaine 10	4 Mars	10 Mars
semaine 11	11 Mars	17 Mars
semaine 12	18 Mars	24 Mars
semaine 13	25 Mars	31 Mars
semaine 14	1er Avril	7 Avril
semaine 15	8 Avril	14 Avril
semaine 16	17 Avril	21 Avril
semaine 17	22 Avril	28 Avril
semaine 18	29 Avril	5 Mai
semaine 19	6 Mai	12 Mai
semaine 20	13 Mai	19 Mai
semaine 21	20 Mai	26 Mai
semaine 22	27 Mai	2 Juin
semaine 23	3 Juin	9 Juin
semaine 24	10 Juin	16 Juin
semaine 25	17 Juin	23 Juin
semaine 26	24 Juin	30 Juin
semaine 27	1er Juillet	7 Juillet
semaine 28	8 Juillet	14 Juillet
semaine 29	15 Juillet	21 Juillet
semaine 30	22 Juillet	28 Juillet
semaine 31	29 Juillet	4 Août
semaine 32	5 Août	11 Août
semaine 33	12 Août	18 Août
semaine 34	19 Août	25 Août
semaine 35	26 Août	1 Septembre
semaine 36	2 Septembre	8 Septembre
semaine 37	9 Septembre	15 Septembre
semaine 38	16 Septembre	22 Septembre
semaine 39	23 Septembre	29 Septembre
semaine 40	30 Septembre	6 Octobre
semaine 41	7 Octobre	13 Octobre

semaine 42	14 Octobre	20 Octobre
semaine 43	21 Octobre	27 Octobre
semaine 44	28 Octobre	3 Novembre
semaine 45	4 Novembre	10 Novembre
semaine 46	11 Novembre	17 Novembre
semaine 47	18 Novembre	24 Novembre
semaine 48	25 Novembre	1 Décembre
semaine 49	2 Décembre	8 Décembre
semaine 50	9 Décembre	16 Décembre
semaine 51	17 Décembre	22 Décembre
semaine 52	23 Décembre	31 Décembre (9 jours)